

生活環境中で物品搬送・収納を行う
ロボットシステムにおける柔軟な戦略と機構に関する研究

東京大学大学院 情報理工学系研究科
知能機械情報学専攻
福井 類

はしがき

1996 年末，HONDA のヒューマノイドロボットがまるで人と見間違えるような滑らかな 2 足歩行を実現・お披露目して以降，一般の人々を含めてロボットへの関心はますます高まっている。これらはロボット関連の学会への投稿数，参加者の数から見ても顕著である。ロボット関連の学会では様々なアプリケーションを目標とし，またその実現方法も実に多彩なアプローチが提案され，これまでに試作されてきたプロトタイプを思い浮かべるだけでも，近年のロボット技術の目覚ましい発展を感じることが出来る。

一方で，人がロボットに期待するものに関しては定義が曖昧で，各ロボットエンジニア・研究者が手探りで各自に定義を行っている状態が続いている。一般の消費者がロボットに望むことに人の作業の代替が挙げられる。家の片付け・掃除をして欲しい，食器を洗って欲しい，洗濯をして欲しい。確かに人には生きるために避けることの出来ない雑多な作業というものが存在し，そういった非創造的な作業を取って替わってくれる機械の実現は非常に重要なロボット研究のタスクである。

しかし，これまで多くの人に利用され発達してきた機械を見ると，必ずしも人の作業を代替するものだけが華々しい発展を遂げてきたわけではない。例えば現在日本の中心産業と言える自動車，そして移動手段として多くの指示を得ている鉄道や飛行機，これらは人間では実現出来ないスピードそして方法での移動を実現しているものであり，それ故に現代社会での生活で欠かせないものになっている。

このような成功例を見ると，ロボットは一体どのような方向に進むべきかという哲学(フィロソフィー)をもっと議論すべきでないかと考える。人の作業代替とは聞こえが良いが，所詮は人が出来ることしか出来ないというのでは，ある意味で”道具”としては失格の烙印を押されても仕方がない。もし人の作業に取って替わるとしても，人よりも優れた方法，能力でその作業をこなさなければロボットの存在価値が問われかねないのである。

ここ数十年のヒューマノイドロボット研究で明らかになったことは”人の汎用性の高さ”である。人は手足を自由に使いこなし，様々な作業を無難にこなす。一方で世界最速の陸上選手であっても 100[m] を走るのに 10 秒は要してしまうし，人がどんなに大きな羽を手にもって鳥のように空を飛ぶことは出来ない。結局として何かを得るためには，何かを捨てなければならないのが，世の中の真理であり，捨てるものを適切にデザインし，得るものを目的と適合するように最適化することがロボットエンジニア，研究者に求められていることなのかもしれない。

本研究によって実現されたロボットシステム(プロトタイプ)は走るヒューマノイドのように華やかな動きをすることも無い。しかし，家庭内での物品搬送・収納を実現し，人がこれまで実現出来なかった”新しい”片付けというものを実現するという目的に適合するために最適化されたシステムである。

本論文をご覧になることで，改めて我々が求める機械としてのロボットとは何なのか。そしてそのロボットを実現するにあたって取るべき戦略とはどのようなものなのか，考えるきっかけとなって頂ければ幸いです。

平成 20 年 12 月
東京大学大学院 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻
福井 類

概要

本論文では近年の先進国における生活空間中でのモノ・情報溢れを改善するために、家庭内物流支援ロボットシステムを提案し、その実現に必須であった生活環境特有の課題解決のため、問題を総括的に取り扱うスキームとしての解決策（戦略的コンプライアンス）、そしてロボット自身に実装される機構的な解決策（Geometric object closure(以降では GOC と記述) と受動機構的コンプライアンス) を整理し、実際のシステムとして実装することでその技術的要点及び有効性を示した。

各章の概要を以下に示す。

第 1 章 緒論

生活空間中にモノや情報が溢れる原因の検討として、都市部における住宅事情、消費者を取り巻く物品情報の変化などに注目し、以下の 4 点が原因であると分析した。(1) 狭小な居住空間、(2) 必要以上にモノを購入、(3) モノを捨てられない、(4) 核家族化による資源共有の低下。これらの原因を解決するためには、(A) 物品の入出力フローを適正化する、(B) パツファ（収納空間）を増設することが必要であると考え、将来的に実現を狙う未来の集合住宅の姿を示しつつ、本研究の目標を生活環境中で物品の搬送・収納を行うロボットシステムの実現と定めた。さらに生活環境中でロボットがロバストな動作を実現する上で、阻害要因となる (1) 生活環境の変化、(2) 物品の多様性、(3) 人の作業のバラツキに対する対策が必須であるとした。

続いてモノを取り扱うシステムとしてロボットマニピュレーションの研究を、物体の拘束の概念から整理し、Closure の概念がロボットの確実性を検討する上で重要な概念であることを示した。

一方、自動車の発展の歴史を分析し、ロボットに必要なスキームを”戦略的コンプライアンス”の概念で整理し、”規格化、補助・強化、誘導”という 3 つの基本機能を導出した。更にそれらのスキームが機構的なコンプライアンスと融合することにより、実際の性能を実現可能であることを述べた。

以上より本研究の目的を、『生活環境においてロバストに物品搬送・収納動作をするロボットシステムを実現するために必要な、戦略的・機構的な方法論・設計論についてクロージャ及びコンプライアンスをキーワードとして整理し、それらを家庭内物流支援ロボットシステムの実現を例として具現化し、その有効性について検証を行うこと』と設定した。

第 2 章 生活環境中で動作する物品搬送・収納ロボットシステム

まずクロージャについて、拘束及び受動・能動により分類を行った。そして完全拘束ではない形態受動拘束である Object closure(Caging) に注目し、さらに機械設計の現場における幾何的な考察に対する重要性から GOC を提案した。このクロージャは集合論で定義されている Object closure と比較して、作図による条件判定が容易であるという利点を持つ。この GOC の設計手順を示す中で、従来より機械の組立で活用されてきた手法とクロージャとが密接に関係することを述べた。

続いて戦略的コンプライアンスについて検討を行った。生活環境の変化を受容するためには、ロボットにとって”見えやすい”計測用特徴の整備、複数台の計測システムによるタスクの分割、そしてロボットが自身のタスクに専念出来る環境を整備することが必要であると述べた。続いて物品の多様性を受容するために、ロボットの作業対象単位を物品 1 つ 1 つではなく”1 つのコンテナ”とし、さらにそのコンテナ及び搭載物がロボットにとって物理的・情動的に扱い易い構造・仕組みを有することとした。また人の作業のバラツキに関しては、人の作業を機構的・情動的に誘導する仕組みを用意することとした。

最後に機構的コンプライアンスに関する整理と本研究のポリシーについて検討した。従来研究におけるコンプライアンス性能の実現をアクチュエータの有無と実装形態によって分類した。そして本研究ではその中でも産業界での実績が多い、受動的な機構により実現されるコンプライアンスに注目し、”受動機構的コンプライアンス”と呼称することとした。

第3章 家庭内物流支援ロボットシステムを構成するサブシステムの実現と基本性能評価

前章で整理した3つの技術要素（GOC，戦略的コンプライアンス，受動機械的コンプライアンス）を活用した家庭内物流支援ロボットシステムを実現した。

家庭内物流支援ロボットシステムは次の6つのサブシステムより構成される。

(1) インテリジェントコンテナ（iコンテナ）

本システムにおいて人がロボットに望む物品搬送・収納支援，そしてロボットが人間に与えられる支援の間を埋める”接点”の役割を担う存在である。搭載する物品の性質（使用頻度，保管期間）によって3種類のバリエーション（クラスS，A，E）を有し，それぞれにおいて実装される筐体の構造や素材が異なる。共通の構造としてはコンテナ運搬ロボットの連結ピンがスムーズに挿入可能なテーパガイド穴，自動収納庫が容易にフォークテーブルを挿入可能なフラットスタンドバーなどのロボットに扱い易い工夫が施された筐体を有する。一方，電装品としてはクラスSでは積載物認識用のRFIDリーダが内蔵されている，またクラスSとAではコンテナの四隅に実装されたLEDがロボットによるコンテナの発見及び位置計測を補助する。

(2) 天井移動型コンテナ運搬ロボット

永久磁石誘導型天井吸着法により天井面を自由に動作可能であり，人や障害物と干渉することなく移動することが可能である。またコンテナを把持するマニピュレーション機構では，動力源が断絶された場合でもコンテナ把持を維持可能な偏芯連結ピン機構及びコンテナの水平及び傾斜誤差を吸収可能なコンプライアンス機構が実装されている。天井面からコンテナへのアクセス機構として採用された柔軟なタケノコ型伸縮機構には，人との接触力を低減する機能もある。

(3) 家庭用コンテナ自動収納庫

基本構造として市販の棚を利用でき，拡張フレームを実装することで自動収納庫が実現される。垂直・水平駆動を分離した自由度配置により生活空間への侵食を可能な限り低減し，水平運搬機構で実現されるコンテナのハンドリングにおいてはGOCを活用した拘束により，ロバストなコンテナのハンドリングが実現されている。またコンテナ運搬ロボットと接続するための構造を有しているため，スムーズにコンテナの受渡し作業を実現可能である。

(4) コンテナ位置認識システム

コンテナ位置計測を2つのフェーズに分類し，最初のコンテナの発見及び大域的計測では環境中に散在させた固定カメラでデータ取得を行い，続く2つ目のフェーズである局所的計測ではコンテナ運搬ロボットに無線LANカメラを搭載し，ロボットとの精確な相対位置を計測しているところが特徴的である。生活環境中での照明変化に対応するためにiコンテナのLEDを周期点滅させ，フィルタリングを容易にしている。なお大域的計測においては誤差100[mm]以下，局所的計測においては誤差10[mm]以下の高精度な計測を実現している。

(5) iコンテナ用多機能ドック（iDock）

個別の部屋におけるシステムへの窓口の役割を担う要素である。自動突出型折りたたみテーブルによって人・ロボットに対してコンテナを一時保管する場所を提供し，稼動式RFIDアンテナによりコンテナ内の物品の姿勢に因らずロバストな内容物の認識が可能となっている。また自動収納庫同様にコンテナの受渡しを容易にする構造を有している。

(6) 家庭内物流情報管理システム

稼動しているサブシステム，そして収納してある物品情報を統合的に管理する情報処理システムである。ユーザに物品の検索，登録などのインタフェースも提供する。

以上のサブシステムについて基本性能を確認する試験を実施し，仕様を満たす十分な性能を有していることを確認した。

第4章 家庭内物流支援ロボットシステムの統合

本システムで必要となる動作モード及びタスクについて整理し，タスクのうち複数のサブシステムの統合が必要なコンテナ把持・運搬タスクそして受渡しタスクについてシステム統合を行った。コンテナ把持・運搬タスクにおいてはコンテナ位置認識システムにより計測されたコンテナの詳細位置に誤差がある場合でも，その誤差をコンテナ運搬ロボットのマニピュレーション機構に実装されたコンプライアンス要

素により滑らかに吸収可能なことが確認された。これにより受動機械的コンプライアンスを活用することによって、複雑なフィードバック制御が無くても物体のハンドリングを実現可能なシステムが構成可能なことを確認した。

一方のコンテナ受渡しタスクにおいては、家庭用コンテナ自動収納庫に適用された GOC により受渡し作業対象のコンテナの位置・姿勢が”Caging” 状態に拘束され、コンテナ運搬ロボットのコンプライアンス要素が効果的に作用可能であり、受渡し作業がロバストに実現可能なことを確認した。これにより GOC 状態に物体を拘束し、さらに受動機械的コンプライアンスを位置決め誤差受容及びロボットの相互干渉緩和機構として活用することにより、複数のロボットが複雑な協調動作を実装しなくても物体の受渡し動作を実現可能なことを確認した。

第 5 章 結論

本研究で実現されたシステム及び得られた知見についてまとめ、さらに本システムの実用化にあたって取り組むべき将来課題について整理した。

目次

第1章	緒論	14
1.1	研究の背景：生活環境における物品搬送・収納のニーズ	14
1.1.1	人とモノの関係の記述	14
1.1.2	ロボット技術導入の可能性と現状	14
1.1.3	モノ溢れの現状，悪化する住宅事情	15
1.1.4	モノ溢れによる弊害を解決する	16
1.2	本研究が目標とするロボットシステム（家庭内物流支援ロボットシステム）	17
1.2.1	生活空間にモノと情報が溢れる理由	17
1.2.2	バッファ（収納空間）の増設と入出力フローの適正化の実現	20
1.2.3	目標とするシステムの将来像	21
1.3	物品を取り扱うロボット	22
1.3.1	物品搬送・収納ロボットの例	22
1.3.2	生活環境中で物品を取り扱うロボットにおける課題	23
1.3.3	ロボットによるマニピュレーション（Closure への注目）	24
1.3.4	環境の整備による機械の発展と2種類のコンプライアンス	26
1.4	本論文の目的	29
1.5	本論文の構成	30
第2章	生活環境中で動作する物品搬送・収納ロボットシステム	31
2.1	物品のマニピュレーションと幾何設計（クロージャ概念の整理と拡張）	31
2.1.1	クロージャに関する研究の整理	31
2.1.2	幾何的な考察の重要性	33
2.1.3	幾何的考察によるクロージャ	33
2.1.4	Object closure の拡張	35
2.1.5	Geometric object closure の設計・検討手順	36
2.1.6	物品のマニピュレーションと幾何設計のまとめ	39
2.2	戦略的コンプライアンス	40
2.2.1	生活環境中における物品搬送・収納作業における課題と戦略的コンプライアンスの対応	40
2.2.2	生活環境の変化に対応する戦略的コンプライアンス	40
2.2.3	物品の多様性に対応する戦略的コンプライアンス	41
2.2.4	人の作業のバラツキに対応する戦略的コンプライアンス	42
2.2.5	本システムで採用する戦略的コンプライアンスのまとめ	43
2.3	機械的コンプライアンス	44
2.3.1	機械的コンプライアンスの歴史と分類	44
2.3.2	本研究で導入するコンプライアンス方式の選定	46
2.3.3	受動機械的コンプライアンスの応用例と実現における一般的課題	47
2.4	生活環境中で動作する物品搬送・収納システムにおけるクロージャ及びコンプライアンス活用指針のまとめ	48

第 3 章	家庭内物流支援ロボットシステムを構成するサブシステムの実現と基本性能評価	49
3.1	システム全体設計	50
3.1.1	家庭内における物品の流れの整理及び家庭内物流における課題の抽出	50
3.1.2	システムの機能分析と構成の検討	53
3.1.3	家庭内物流支援ロボットシステムが導入された生活	56
3.1.4	本研究で実現する家庭内物流支援ロボットシステムにおける前提条件	56
3.1.5	家庭内物流支援ロボットシステムにおける不確実性要因の整理	57
3.2	インテリジェントコンテナ	59
3.2.1	i コンテナのバリエーション整理	59
3.2.2	システム設計（要求仕様，機能の検討）	60
3.2.3	インテリジェントコンテナ（クラス S）の基本設計と細部設計	62
3.2.4	インテリジェントコンテナ（クラス A）の実装	68
3.2.5	インテリジェントコンテナ（クラス E）の実装	70
3.2.6	基本性能試験	72
3.2.7	インテリジェントコンテナのまとめ	74
3.3	コンテナ運搬ロボット（1）（天井懸架移動部）	76
3.3.1	システム設計（要求仕様，機能の検討）	76
3.3.2	永久磁石誘導型吸着法の実現（基本設計と細部設計）	78
3.3.3	複数ロボットの同時位置制御の実現（基本設計と細部設計）	81
3.3.4	天井移動ロボットプラットフォームへの統合	84
3.3.5	基本性能試験	87
3.3.6	コンテナ運搬ロボット（天井懸架移動部）のまとめ	90
3.4	コンテナ運搬ロボット（2）（コンテナ操作部）	92
3.4.1	マニピュレーション機構部のシステム設計（要求仕様，機能の検討）	94
3.4.2	マニピュレーション機構部の実現（基本設計と細部設計）	95
3.4.3	マニピュレーション機構部の基本性能試験	102
3.4.4	伸縮機構部・天井懸架部・巻上げ動力部のシステム設計（要求仕様，機能の検討）	106
3.4.5	伸縮機構部・天井懸架部・巻上げ動力部の実現（基本設計と細部設計）	106
3.4.6	伸縮機構部・天井懸架部・巻上げ動力部の基本性能試験	113
3.4.7	コンテナ運搬ロボット（2）（コンテナ操作部）のまとめ	115
3.5	家庭用コンテナ自動収納庫	118
3.5.1	システム設計（要求仕様，機能の検討）	118
3.5.2	設計・実装の概要	120
3.5.3	基本設計（基本構造・方式の検討）	121
3.5.4	細部設計（機構の設計と実装）	125
3.5.5	基本性能試験	134
3.5.6	家庭用コンテナ自動収納庫のまとめ	139
3.6	コンテナ位置認識システム	141
3.6.1	システム設計（要求仕様，機能の検討）	141
3.6.2	基本設計（方式の検討）	141
3.6.3	細部設計及びシステムの実装	142
3.6.4	基本性能実験 1：大域的計測における位置計測実験	146
3.6.5	基本性能実験 2：局所的計測における位置計測実験	146
3.6.6	コンテナ位置認識システムのまとめ	147
3.7	i コンテナ用多機能ドック（iDock）	149
3.7.1	システム設計（要求機能の整理）	149
3.7.2	iDock の概要	150
3.8	家庭内物流情報管理システム	152
3.8.1	システム設計（要求仕様，機能の検討）	152
3.8.2	基本設計・細部設計（方式の選定と実装）	153

3.8.3	家庭内物流情報管理システムのまとめ	157
3.9	サブシステムのまとめ	158
第4章	家庭内物流支援ロボットシステムの統合	161
4.1	コンテナの物理的フローのためのシステムモード・タスクの整理	161
4.2	コンテナ把持・運搬タスクの実現（コンテナ運搬ロボットとコンテナ位置認識システムの接続）	164
4.2.1	把持・運搬タスクの要求性能の整理	164
4.2.2	コンテナ把持・運搬タスクに関連するサブシステムの整理	165
4.2.3	コンテナ把持・運搬タスクコントローラ的设计	168
4.2.4	コンテナ把持・運搬タスクの性能検証項目の検討	170
4.2.5	コンテナ把持動作ロバスト性試験（1. 水平誤差発生時）	171
4.2.6	コンテナ把持動作ロバスト性試験（2. 傾斜誤差発生時）	174
4.2.7	コンプライアンス要素影響評価試験	176
4.2.8	コンテナ把持・運搬タスク実現のまとめ	179
4.3	コンテナ受渡しタスクの実現（コンテナ運搬ロボットと家庭用コンテナ自動収納庫の接続）	180
4.3.1	コンテナ受渡しタスクの要求性能の整理	180
4.3.2	コンテナ受渡しタスクに関連するサブシステムの整理	181
4.3.3	コンテナ受渡しタスクコントローラ的设计	183
4.3.4	コンテナ運搬ロボット受渡し位置決め性能試験	186
4.3.5	コンテナ受渡しタスク実行性能確認試験	187
4.3.6	コンテナ受け渡しタスク実現のまとめ	191
第5章	結論	192
5.1	本論文のまとめ	192
5.2	本研究で得られた知見	195
5.3	将来課題	198
5.4	将来展望	199
参考文献		201
謝辞		218

目次

1.1	産業用ロボットの地域別稼働台数	15
1.2	ニューヨーク，ロンドン，東京における人口の推移	15
1.3	3大都市圏の転入超過数の推移(昭和29年～平成15年)	16
1.4	住居費支出割合の推移(勤労者世帯)	16
1.5	家庭内でのモノの流れを示す模式図	17
1.6	首都圏のマンション供給及び世帯人数構成の実体	18
1.7	住宅の各要素に対する不満度の調査	18
1.8	通信販売売上高の推移(1998～2007)	19
1.9	首都圏における超高層分譲マンション供給の推移	21
1.10	高層マンションの間取り例	21
1.11	未来の住宅のコンセプトスケッチ	22
1.12	生活環境中で物品を取り扱うロボット特有の問題	23
1.13	様々なグラスプレスマニピュレーション	25
1.14	拘束度合いによるマニピュレーションの分類	25
1.15	人とロボットのピン挿入協調作業の例	28
1.16	機械的コンプライアンスと戦略的コンプライアンス	28
1.17	本論文の背景にある動機(ポリシー)	30
2.1	拘束度合いによるマニピュレーションの分類(再掲)	32
2.2	クロージャの分類	33
2.3	フォークリフトによる物品の搬送(右:フォークリフト用パレット)	34
2.4	物体の拘束方向の差異	34
2.5	Object closure と Geometric object closure の差異	35
2.6	Geometric object closure 設計における座標系の設定	37
2.7	Geometric object closure の設計・検討手順 [STEP1]	37
2.8	Geometric object closure の設計・検討手順 [STEP2]	38
2.9	位置決めブロックと位置決めピン	39
2.10	位置決めピンの効果	39
2.11	モノと情報のカテゴリサイズの対応	41
2.12	人とロボットのハンドリング能力の差異	42
2.13	機械的コンプライアンスの分類	44
2.14	受動機械的コンプライアンスの簡易モデル	47
3.1	Robotic Room 3 のシステム構成の整理例	49
3.2	家庭内物流支援ロボットシステムにおける状態遷移	50
3.3	天井移動ロボットプラットフォームの概観	50
3.4	家庭内物流支援ロボットシステムの主機能の流れ	53
3.5	家庭内物流支援ロボットシステムのコンセプトスケッチ	54
3.6	家庭内物流支援ロボットシステムの全体構成図(3D-CAD データより作成)	54

3.7	家庭内物流支援ロボットシステムを用いた物品収納ストーリー	56
3.8	家庭内物流支援ロボットシステムにおける不確実性の構造分類化	57
3.9	家庭内物流支援ロボットシステムにおける不確実性の詳細と対策案	58
3.10	インテリジェントコンテナ役割の整理	60
3.11	i コンテナプロトタイプの概要 (クラス S)	62
3.12	i コンテナの上面ビュー (天板取り外し状態)	62
3.13	i コンテナの機能ブロック図	62
3.14	i コンテナサイズの概要	63
3.15	メインフレームの構造	63
3.16	タカヤ (株)RFID タグリーダ/ライタ TR3-C201	64
3.17	コンテナ天板の様子	64
3.18	コンテナ隅に設置された感圧ゴム (青色)	64
3.19	コンテナ底面の加速度センサ	64
3.20	ピン・ホール連結方式	65
3.21	連結ピンと安全カバー	65
3.22	液晶表示デバイス表示内容の概要	65
3.23	液晶表示デバイスと UI 用スイッチ	65
3.24	人間による把持用のハンドル	65
3.25	ポール底面の様子	66
3.26	コンテナ底面のフラットスタンドバー (白色)	66
3.27	フラットスタンドバー中央のマイクロスイッチ	66
3.28	フォークリフト用パレットの例	67
3.29	i コンテナで使用している Bluetooth モジュール	67
3.30	i コンテナ用コントロール回路	67
3.31	i コンテナ (クラス A) の概要	68
3.32	実装した i コンテナ (クラス A) の概観	69
3.33	i コンテナ (クラス E) の概要	70
3.34	ダンボールの構造	70
3.35	実装した i コンテナ (クラス E) の概観	71
3.36	試験で使用した RFID タグ (右: 単 3 乾電池)	72
3.37	RFID 交信距離の計測位置と各点での最大交信距離	72
3.38	3つの異なる RFID アンテナの性能比較	73
3.39	コンテナを運搬する際に発生する上下加速度	73
3.40	インテリジェントコンテナのスナップショット	74
3.41	天井移動ロボットプラットフォームのコンセプトスケッチ	76
3.42	永久磁石誘導型吸着法のスケッチ	77
3.43	複数ロボットの同時位置制御方式の比較	78
3.44	磁気回路ループ・非ループ切替型の模式図	79
3.45	着脱力内部保持型の模式図	79
3.46	吸着力減少型	79
3.47	吸着・減磁切替型	79
3.48	磁石モジュールのパーズ図	80
3.49	磁石モジュールの外観 (正面)	80
3.50	磁石モジュール下面ポールキャスト	80
3.51	ELF/MAGIC のシミュレーション結果出力例 (左), 磁石モジュールのシミュレーション結果 (ELF/MAGIC) および実測値の比較 (右)	80
3.52	QR コードとマイクロ QR コードのサンプル	81
3.53	2次元コードリーダ "TFIR31-DM"	81
3.54	コードリーダより送られるデータのフォーマット	82
3.55	角度推定計算用座標, ベクトルの定義	83

3.56	移動ユニットのパス図	84
3.57	移動ユニットへの吸着ユニットの取り付け	84
3.58	移動ユニットの経路生成用木構造マップ	85
3.59	天井移動ロボット動作天井 (右下: 印字された2次元コード)	86
3.60	天井移動ロボット追従性能実験の様子 (移動ユニット)	87
3.61	天井移動ロボット追従性能実験の様子 (天井下面懸架ユニット)	87
3.62	スティックスリップ現象による追従誤差計測実験のセットアップ	88
3.63	移動ユニット動作時の天井下面懸架ユニット共通部の追従誤差: 移動速度 15[mm/s]	88
3.64	移動ユニット動作時の天井下面懸架ユニット共通部の追従誤差: 移動速度 30[mm/s]	88
3.65	磁石モジュールの牽引動作モデル	89
3.66	移動ユニットの最大牽引力測定実験の様子	89
3.67	移動ユニットの位置計測実験結果	90
3.68	コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) のスナップショット	91
3.69	コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) の概観	92
3.70	コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) の機能ブロック図 (上) とスケルトン図 (下)	93
3.71	最大傾斜角設定の検討	94
3.72	マニピュレーション機構の概要	95
3.73	連結ポイント数と各種性能の関係	96
3.74	ピン ↔ ホール連結構造の候補	96
3.75	ジャミングを回避可能なピンと穴寸法の検討	97
3.76	(左) 連結ピン及び穴の構造, (右) 把持状態認識用スイッチとノッチ付回転プレート	98
3.77	(左) コンプライアンス要素の配置案候補, (右) ピン2本による新たなジャミング状態	98
3.78	コンプライアンス要素のレイアウト設計	99
3.79	(左) 水平コンプライアンス機構, (右) 傾斜コンプライアンス機構	100
3.80	傾斜コンプライアンスの断面図	101
3.81	ジャミング発生確認試験の様子	102
3.82	荷重支持性能確認試験の様子	102
3.83	マニピュレーション機構試験用テストベンチ	103
3.84	テストベンチの座標系と水平位置誤差の設定	103
3.85	マニピュレーション機構ボディ姿勢, 連結ピンの変位, プラットフォーム発生力の時系列グラフ。(左) 水平位置誤差のみ, (右) 水平位置誤差と傾斜誤差がある場合	105
3.86	天井懸架部・巻き上げ動力部の概要	106
3.87	伸縮機構部の概要	106
3.88	巻き上げ動力関連電装系 (左: DC モータ, 中: Hブリッジモータ制御回路, 右: Liイオンバッテリー)	109
3.89	天井懸架部に加わる2種類の外力	112
3.90	荷重巻き上げ・運搬性能確認試験の様子	113
3.91	外力絶縁性能試験の様子	114
3.92	コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) のスナップショット	116
3.93	傾斜した状態で設置されたコンテナを把持する様子	116
3.94	家庭用コンテナ自動収納庫の概要	120
3.95	家庭用コンテナ自動収納庫の機能ブロック図	120
3.96	家庭用コンテナ自動収納庫の設計・実装の流れ	121
3.97	自動収納庫の基本構造候補	122
3.98	自由度レイアウトの比較	122
3.99	モノレール方式の物品搬送システムの例	123
3.100	自動収納庫におけるコンテナ収納・取出し方法の比較	123
3.101	コンテナ引き出し動作の比較	124
3.102	水平運搬機構の荷重支持模式図	125
3.103	SUS304HLの断面形状の一覧	126

3.104	上下移動レールと固定レール接合部の様子	126
3.105	垂直面ローラレイアウトのモデル	126
3.106	水平面ローラレイアウトの候補	127
3.107	水平移動用位置決めスイッチと左右リミットスイッチ	128
3.108	ガイドプレートとコンテナ角のポール構造部	129
3.109	コンテナ貼り付け RFID タグとアンテナ	129
3.110	フォークテーブルの構造とコンテナとの幾何学的関係	129
3.111	駆動軸とモータの相対配置の比較	131
3.112	駆動系のまとめ	131
3.113	フォークテーブルの先端に取り付けられた障害物検知センサ	132
3.114	コンテナ拘束用のロックプレートと i コンテナ底面に設置された溝	132
3.115	家庭用コンテナ自動収納庫の水平運搬機構で実現される Geometric object closure の概要	133
3.116	コンテナ収納位置誘導試験の様子	134
3.117	コンテナ収納位置誘導試験結果	135
3.118	取得された駆動力データの例 上側：荷重 0[kg], 下側：荷重 8[kg]	136
3.119	駆動力測定結果のまとめ	137
3.120	ローラ段差乗り越えの簡易モデル	137
3.121	$g(\eta)$ の傾向	137
3.122	コンテナ収納取出し動作性能試験の様子	138
3.123	コンテナ取り出し動作試験の設定	138
3.124	家庭用コンテナ収納庫のスナップショット	139
3.125	コンテナ位置認識・計測の流れ	141
3.126	コンテナ位置認識システムの機能ブロック図	142
3.127	i コンテナ上面に設置された 4 つの LED	143
3.128	IEEE 1394 カメラのレイアウト	143
3.129	内部パラメータ校正用ボード (左) と外部パラメータ校正用シートを設置した環境 (右)	143
3.130	大域的計測用カメラシステムの外部パラメータ推定に用いた画像 (左上の番号はカメラの通し番号と対応)	143
3.131	バンドパスフィルタのボード線図	144
3.132	i コンテナ模擬テストベンチ	144
3.133	外部パラメータ校正用装置 (左) と外部パラメータ校正時のセッティング (右)	145
3.134	局所的計測用カメラシステムの外部パラメータ推定に用いた画像	145
3.135	大域的計測実験の計測点	146
3.136	局所的計測実験の計測点	146
3.137	コンテナ位置認識システムのスナップショット	147
3.138	家庭内物流支援ロボットシステムにおける iDock の役割	149
3.139	iDock の概要	150
3.140	iDock のスナップショット (左), 稼動アンテナの動作の様子 (右)	150
3.141	家庭内物流情報管理システムの概要	152
3.142	i コンテナ通信制御ボックスの機能ブロック図	153
3.143	RCS-CRaMaS コントロール PC 用 GUI (メインウィンドウ)	154
3.144	物品固有情報登録・修正 GUI ウィンドウ	155
3.145	物品登録作業：バーコードの読み取り (左) と RFID タグへの情報の書き込み (右)	156
3.146	物品検索 GUI ウィンドウ	156
3.147	構築した家庭内物流支援ロボットのサブシステム群	158
3.148	家庭内物流支援ロボットシステムに導入された主要 3 技術の可視化	159
4.1	家庭内物流支援ロボットシステムにおけるシステムモードの状態遷移	162
4.2	一般的なフィードバック制御スキームと本研究が採用するタスク実現スキームとの違い	165
4.3	コンテナ把持・運搬タスクを実現するシステム構成	165

4.4	コンテナ位置認識システムの概要	166
4.5	コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)の概要	166
4.6	コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)の概要	167
4.7	伸縮機構部の概要	167
4.8	マニピュレーション機構部の概要	167
4.9	コンテナ把持・運搬タスクの流れ	168
4.10	コンテナの局所的な位置計測実行時のカメラ画像	169
4.11	コンテナ把持時のロボット位置決めルーチン	170
4.12	試験用テーブルとiコンテナ(クラスA)	171
4.13	試験実施時のコンテナ運搬ロボットとiコンテナの位置関係	172
4.14	水平誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の様子	172
4.15	コンテナ・ロボット間の相対位置と局所的な位置計測誤差の関係	173
4.16	傾斜誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の様子(ロール傾斜 10.3[deg])	174
4.17	傾斜誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の様子(ピッチ傾斜 7.4[deg])	175
4.18	コンプライアンス要素影響評価試験のセットアップ	176
4.19	コンプライアンス要素影響評価試験の結果(Point index: 1)	177
4.20	コンプライアンス要素影響評価試験の結果(Point index: 2)	177
4.21	コンプライアンス要素影響評価試験の結果(Point index: 3)	178
4.22	コンプライアンス要素影響評価試験の結果(Point index: 4)	178
4.23	コンテナ受渡しタスクを実現するシステム構成	181
4.24	家庭用コンテナ自動収納庫の概要	182
4.25	コンテナ受渡しタスクのフロー	183
4.26	コンテナ運搬ロボットガイドプレート	184
4.27	コンテナ受渡し待機時のコンテナ運搬ロボットと水平運搬機構の位置関係	185
4.28	移動許容範囲の不整合における問題	185
4.29	コンテナ運搬ロボット, 水平運搬機構両者のCaging状態での移動許容範囲	186
4.30	コンテナ運搬ロボットによる受渡し位置決め動作の様子	187
4.31	出庫受渡しタスクロバスト性試験の設定	188
4.32	出庫受渡しタスクの連続写真	188
4.33	入庫受渡しタスクロバスト性試験の設定	189
4.34	入庫受渡しタスクの連続写真	190
4.35	積載物がないコンテナを入庫受渡しした場合の水平運搬機構上に設置されたコンテナ状態	190

表目次

1.1	自動車環境整備の歴史とロボットの環境整備における必要機能のまとめ	29
2.1	生活環境特有の問題と戦略的コンプライアンスの対応	43
3.1	課題と解決策のまとめ一覧	52
3.2	コンテナバリエーションと各クラスで実装する機能の一覧	59
3.3	アンテナ通信テストの結果	73
3.4	インテリジェントコンテナの仕様一覧	74
3.5	磁石モジュールの要求仕様・機能	79
3.6	2次元コードマトリクスに使用したコードのスペック	82
3.7	天井プレートの接続方法	86
3.8	コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)の仕様一覧	91
3.9	ボックス形状荷物の把持方式候補	96
3.10	傾斜コンプライアンス機構実現方法の候補	100
3.11	水平誤差許容性能試験結果(ピン挿入結果と最大発生力)	104
3.12	昇降方式の候補	107
3.13	並進・回転固定構造の検討	108
3.14	巻き上げワイヤと減速機の比較検討	109
3.15	巻き上げ高さ計測方法の比較	110
3.16	伸縮機構下部電力供給・信号伝達方式の比較	111
3.17	外力絶縁機能を実現する機構の比較	112
3.18	コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)の仕様一覧	117
3.19	コンテナ運搬ロボットとのコンテナ受渡し方法の比較	124
3.20	一般的な長ストローク駆動機構のリスト	130
3.21	動力源を兼用・独立利用した場合の部品構成の検討	130
3.22	簡素な部品構成で実現可能な駆動軸直角変換機構のリスト	131
3.23	家庭用コンテナ自動収納庫と工業用との比較	140
3.24	大域的計測の結果(水平誤差)	146
3.25	局所的計測の結果(水平誤差)	146
3.26	コンテナ位置認識システムの仕様一覧	148
3.27	iDockの仕様一覧	151
3.28	家庭内物流支援ロボットシステムに導入された主要3技術の一覧	159
3.29	産業用と家庭用における物品搬送・収納システムで用いられる技術・機能の比較	160
4.1	システムモードのタスクへの分解	163
4.2	水平誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の結果	173
4.3	傾斜誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の結果	175
4.4	コンテナ運搬ロボット受渡し位置決め性能試験の結果	187

第1章

緒論

1.1 研究の背景：生活環境中における物品搬送・収納のニーズ

1.1.1 人とモノの関係の記述

人間が生活を営むとは、即ちモノと関わりを持つことである。ここにおけるモノとは食料・飲料などの「食べモノ・飲みモノ」から始まり、生活をするにあたって必要な生活用品，仕事をするのに必要な事務用品，産業に必要な素材・材料全てを含めている。

近年，この人とモノとの関わりに変化が起きてきている。これまでは人の生活を充実したものにするための要素であったモノが，次第に人の生活事態を支配し，操作するまでに至っている。具体的には我々の生活の多くがモノの購入，保管，整理，消却に費やされており，生活の豊かさを示す指標であったはずの所有物（モノ）が人の貴重な労力・時間を奪う一要因になっている。この現象の原因は技術革新により社会が豊かになるにつれ，人を取り巻くモノ・情報が急激に増大し，処理しきれなくなったモノ・情報が我々の生活環境を侵害し始めたからであると考えられる。

1.1.2 ロボット技術導入の可能性と現状

この問題を解決するために情報技術 (Information Technology) においては，Google を代表とするロボット検索エンジンと呼ばれる技術を用い，情報を整理・集約した形で人間がアクセスすることが可能になっている。このような情報技術の発展により広く知識の整理・要約・検索が可能になり，世界全体での情報量の圧縮が可能となっている。

しかし，実体の存在する「モノ」においては，その溢れる状態を抜本的に改善するようなブレークスルーは発見されておらず，新しい枠組みの開発は急務である。

そこで情報技術において「ロボット」が活躍を示すように，実世界においてモノを取り扱う「ロボット」に注目が集まっている。昨今，産業用途へのロボットの導入は非常に盛んであり 2007 年末の予想稼働台数は日本単独でも 35 万台に及ぶ (図 1.1^{*1})。一方で，家庭環境内でも iRobot 社の清掃用ロボット”Roomba” が好調な売れ行きである。販売台数では 2005 年は 66 万 3,000 台，2006 年は 72 万 5,000 台^{*2}と非常に好調な売り上げを継続している。しかし，実際にモノを取り扱うことの出来る家庭用ロボットという意味では研究・開発レベルに留まっており，民生用として製品化された事例はまだ存在せず，1 日も早く溢れるモノを取り扱うことの出来るロボットの開発と実用化が求められている。

^{*1} http://www.nikkeibp.co.jp/style/biz/feature/industry/060615_robot/

^{*2} <http://robot.watch.impress.co.jp/cda/column/2007/02/19/371.html>

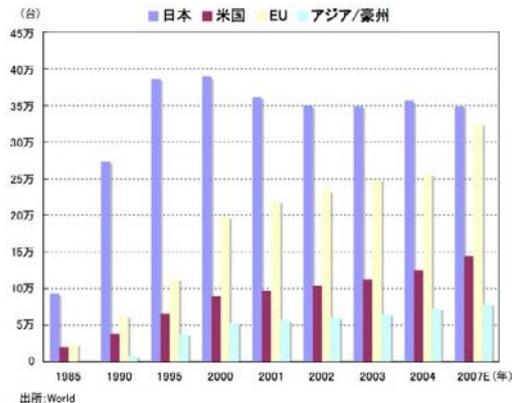


図 1.1 産業用ロボットの地域別稼働台数

1.1.3 モノ溢れの現状，悪化する住宅事情

一方，先進国都市部におけるモノ溢れの原因には「人口集中による居住空間不足」という根深い問題がある。図 1.2 に先進国首都の代表例としてニューヨーク，ロンドン，東京における人口推移の様子を示す。ニューヨーク，ロンドン，東京ともに人口が増加傾向にあることがグラフより読み取れる。日本国内に限って総務省・国土交通省発表のデータ [1] より更に詳しい分析を行うと，昨今の住宅事情について更に興味深い事実が分かる。図 1.3 に東京，大阪，名古屋の 3 大都市圏での人口推移を示す。グラフより平成 7 年 (1995 年) 以降，三大都市圏において東京のみ人口が増加し続けているのが分かる。1995 年 (Windows95 が発売された年) 以降，パーソナルコンピュータや携帯電話など情報機器，そして WWW (インターネット) を代表とする情報ネットワーク網が普及したにも係わらず，東京への人口一局集中はとまらず，むしろ情報技術の発展が人と人との物理的な接近を促していると考えられるようなデータである。

このように近年，都市部における人口過密は住居面積の不足に直結し，結果として収納空間の不足によるモノ溢れの現象が発生していると考えられる。

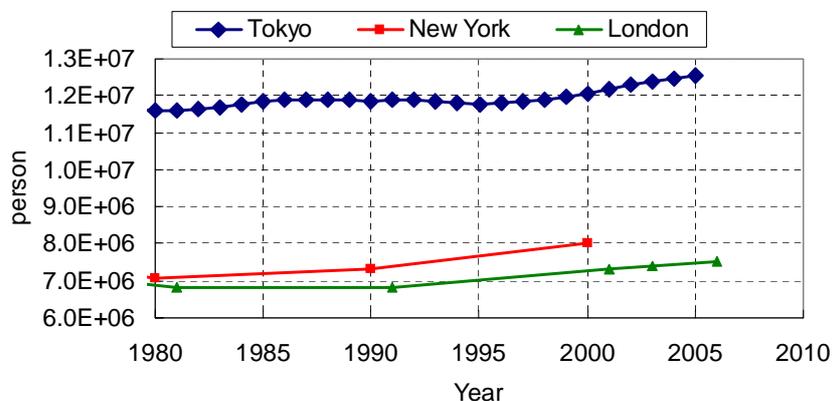


図 1.2 ニューヨーク，ロンドン，東京における人口の推移

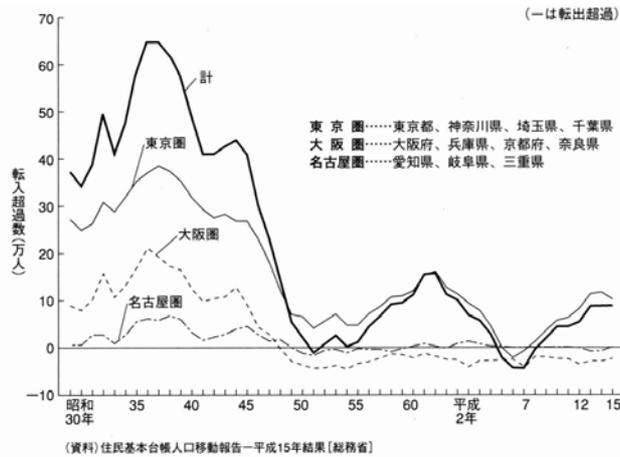


図 1.3 3大都市圏の転入超過数の推移 (昭和 29 年～平成 15 年)

1.1.4 モノ溢れによる弊害を解決する

モノ溢れの現象はその対処に迫られる人間の時間的損失や精神的安定性の問題を引き起こすだけでなく、物品の不必要な消費・廃棄をもたらすことが多く、環境の持続可能性が求められる現状においては、重大な問題である。さらに日本（東京）を含めた一部の国・都市においては、図 1.4 に示すように収入に占める居住費の割合増加が顕著であり、女性が結婚・出産を避け働き続けるケースが増加しており、結果として結婚及び出産の遅延に起因する少子化現象が見られるようになってきている。

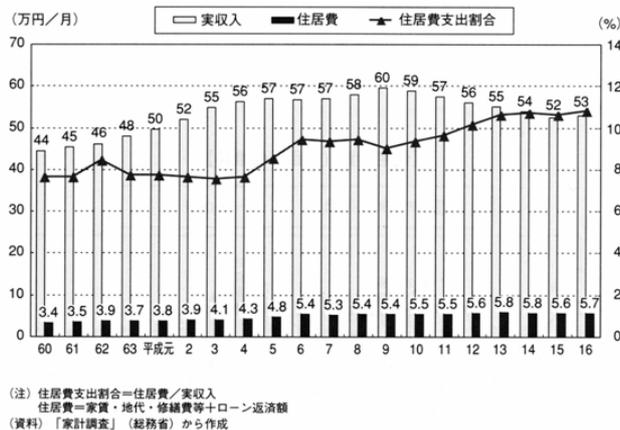


図 1.4 住居費支出割合の推移 (勤労者世帯)

このようにモノ溢れによる居住空間の圧迫は

1. 時間的損失, 精神的圧迫
2. 浪費による環境負荷
3. 居住費高騰による家計の圧迫 (女性による労働の長時間化 → 少子化)

と言った多くの社会問題を引き起こしており、その抜本的な解決が強く求められる。

そこで我々は生活環境中において、空間効率高くそして収納物情報の損失がない物品収納・搬送を実現

するロボットシステムを実現することにより，これらの問題に対して解決法を示すことを目標とする。

1.2 本研究が目標とするロボットシステム (家庭内物流支援ロボットシステム)

本節では，まず生活空間にモノと情報が溢れる理由について，前節よりも詳細なデータを分析し，議論する。次に，分析により明らかになったモノ溢れの原因群を解決するために，ロボットシステムに必要な機能の大枠について議論し，それを実現することにより未来の住宅がどのようなカタチになるべきかについて提案する。

1.2.1 生活空間にモノと情報が溢れる理由

生活空間にモノと情報が溢れる理由について考察するために，まず家庭内でのモノの流れを図 1.5 に模式的に描画する。

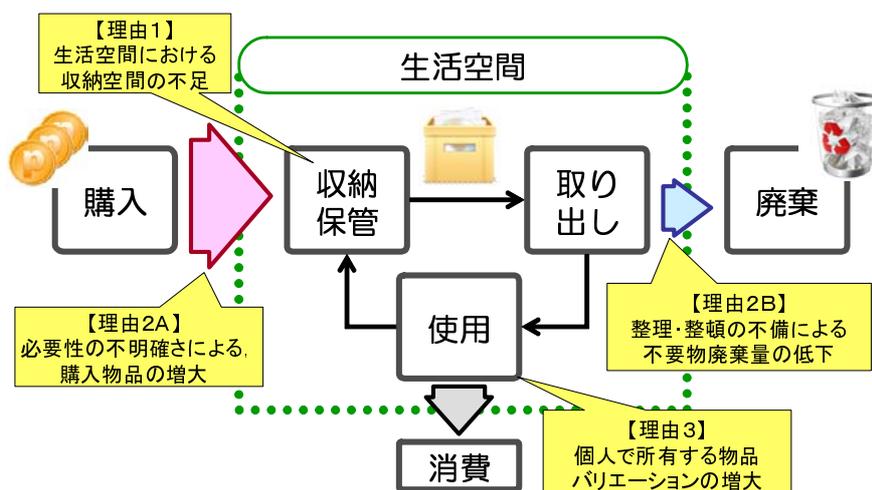


図 1.5 家庭内でのモノの流れを示す模式図

図 1.5 は 1 入力 (購入), 2 出力 (消費, 廃棄) の流れを表しており, この流れにおいて次の 4 つの問題が発生していると考えられる。

- 問題 1 : 狭小な居住空間
- 問題 2 A : 必要以上にモノを購入
- 問題 2 B : モノを捨てられない
- 問題 3 : 核家族化による資源共有の低下

以降でその詳細を述べる。

問題1：狭小な居住空間

都市部の地価高騰により、物品を収納するのに十分な空間を確保出来ない。

図1.4に示したように生活費に占める居住費の割合は増加傾向にある。居住費の割合を一定に保つためには、敷地の面積が狭い家に住むか、もしくは交通手段・環境条件などの劣る物件に引越しをする必要がある。この状況を如実に表しているのが図1.6(左)に示す首都圏マンション供給における型式別の推移であり、2(L)DK以下の小規模住居の供給が近年急激に増加しているのが分かる。これは不動産業界が、ユーザのニーズを緻密に分析し、小規模物件の方がユーザの需要が高いと分析した結果と考えられる。更に昨今、居住空間の間取りに関する関心が非常に高まっており、それを象徴するかのように間取りに関する新書や文庫が次々と出版されている [2],[3],[4]。

ちなみに内田は著書 [2] において明治の西欧化においては和風のモノと西欧風のモノ（例えば和装、洋装など）両者が生活に必要であったため、住宅ではモノ溢れが起こっていたと指摘している。また図1.7に示すように住宅の収納スペースに関しては約半数の方が何らかの不满を抱いているのが現状であり、図1.7中の「非常に不満」の割合に関しては高齢者への配慮の次に不满を感じている項目となっており、収納スペースに非常に貧窮している住宅が存在していることを示している。

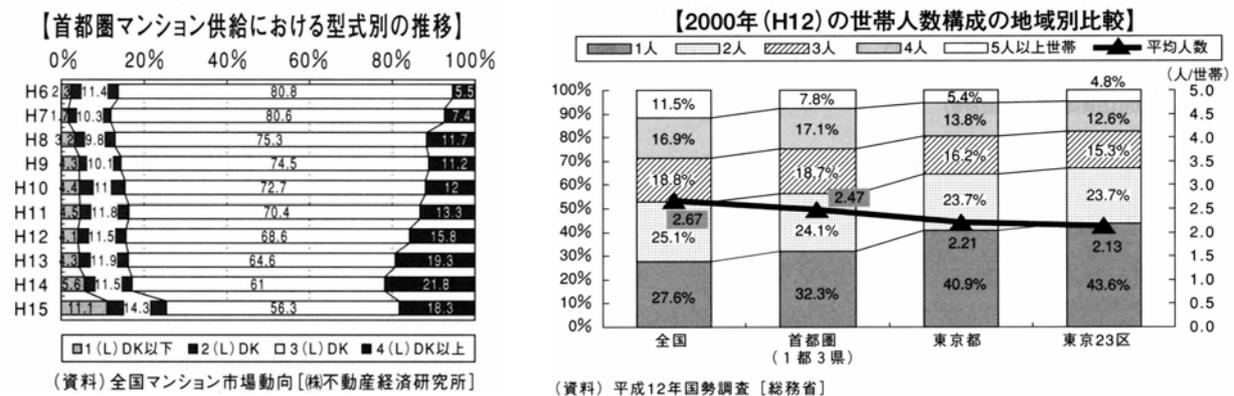
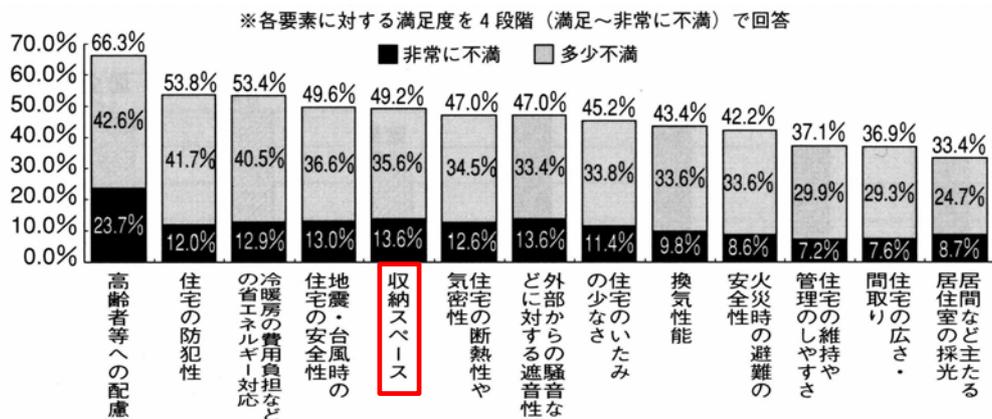


図1.6 首都圏のマンション供給及び世帯人数構成の実体



(資料)平成15年住宅需要実態調査[国土交通省]

図1.7 住宅の各要素に対する不満度の調査

問題2 A：必要以上にモノを購入

昨今、商品に関するたくさんの情報が消費者に流れ込んできている。このため消費者が本当に必要な物品を決断することが困難になっているのではないかと推測される。それを間接的に裏付けるデータとして社団法人日本通信販売協会が発表している通信販売売上高の推移(図1.8)がある。これを見ると、通信販売業界は1998年以降、確実に市場を拡大しており、それに伴いダイレクトメールやカタログなど、新規の物品購入を促す情報が消費者を取り巻いていると言える。また経済的余裕がある30代独身者が、購買によるストレス発散等の目的もあり、モノを必要以上に購入してしまうといったこともあるようである(参考：株式会社ハー・ストーリィ実施のアンケート「女性の衝動買いについて」^{*3})。

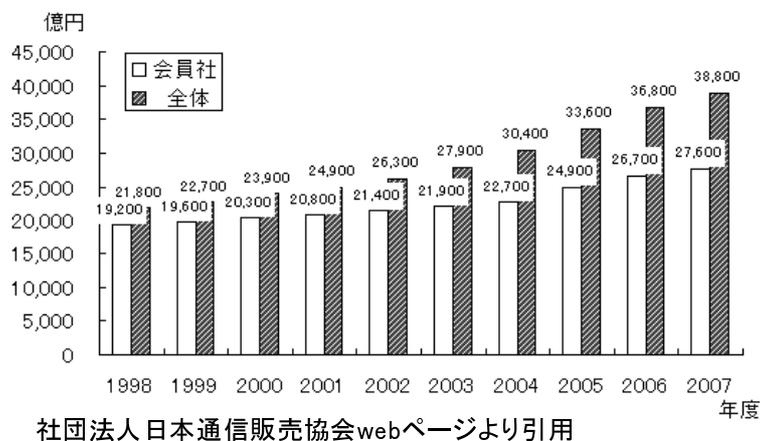


図1.8 通信販売売上高の推移(1998~2007)

問題2 B：モノを捨てられない

昨今、日本のニュースでもモノを捨てられずに「ゴミ屋敷化」した住宅のニュースが取り扱われることが多いが、これは日本だけの減少ではなく、欧米でも1つの社会問題化しているようである^{*4}。その心理(学)的な背景を詳細に分析するのは、本研究の対象とするところではないが、一方で情報理論的な考え方として、何かしらの判断(ここではモノを廃棄するという判断)を下すために、必要な検討項目が増えるほど、その決断を正しく(正しいらしく)下すための計算量は増える。つまり、物品の種類・数が過剰になると整理・整頓の”基準”を定めることが困難になり、モノが廃棄されずに生活環境に蓄積されるということになるのである。

問題3：核家族化による資源共有の低下

東京(首都圏)における核家族化の進行は図1.6(右)に示されるとおりである。東京23区内においては、一人もしくは二人の世帯数構成が70[%]以上を占めている。これは図1.6(左)のマンション供給の実体とも関連することであるが、これらのデータが示すのは各世帯の人員が減少した結果、生活環境において施設・物品を家族で共有することが少なくなり、個々人で多くの種類の物品を所有しなければならないという現状である。

^{*3} <http://www.herstory.co.jp/press/research/200806/20080620impulse.buy.html>

^{*4} ゴミを捨てられない人のことを”パルク・ラット”とねずみにたとえて呼称するようである。http://en.wikipedia.org/wiki/Compulsive_hoarding

1.2.2 バッファ（収納空間）の増設と入出力フローの適正化の実現

前節のような社会的背景とそれに起因する問題を解決する方法について本節では検討する。本研究では前述の諸問題に対して大きく分けて2つの方針を提案する。

- (A) 入出力フローの適正化
- (B) バッファ（収納空間）の増設

以降では、各方針について説明する。

(A) 入出力フローの適正化

まず家庭内でのモノのフローにおける「入力」である、購入について検討する。購入する物品を決定する際には、式 1.1 のような差分を考える。^{*5}

$$(\text{購入物品}) = (\text{必要な物品}^{*6}) - (\text{所有している物品}) \quad (1.1)$$

つまり上記の単純な式モデルにおいて、購入物品を正しく選定するためには、以下の2つが必要となる。

- 必要な物品を過去の物品使用履歴より正しく見積ること
- 所有している物品情報を全て正しく取得可能なこと

一方で出力においては、消費は前述の使用履歴を積算することにより、正しく把握することが可能であるが、廃棄を決定するためには次のような項目を検討する必要がある。

1. 物品の使用頻度
2. 物品を入手した際に支払った費用
3. 新規に同等の物品を入手する場合の費用（入手性）
4. 物品に対する付加価値（想い出等）

ここで、一般の日用品においては4の付加価値は殆どの場合支配的でない。また2、3に関しては現状でも比較的容易に入手可能な情報である。一方で1の使用頻度に関しては、「よく使う」「めったに使わない」などの抽象的な概念しか把握出来ていない項目であり、この情報の整備・定量化が求められる。

以上を整理すると、物品入出力の適正化を行うためには「過去及び現在の物品所有・使用情報」を正しく得る手段（システム）を構築することが必要であると言える。

(B) バッファ（収納空間）の増設

一方で、フローにおけるバッファとなる収納空間を増設するためには、以下に示すような空間の使い方の革新が求められる。

- 土地、空間の3次元的利用
マクロな視点では都市部での住宅を一軒家から高層住宅に再開発するという方向が考えられる。すでに東京都では隅田川沿い、豊洲等の湾岸地区で多くの実践例があり、図 1.9 が示すように今後も首都圏における超高層分譲マンションの供給は増加すると考えられる。一方、ミクロな視点としては生活空間において棚等の収納設備を立体化し、収納容量を増やすということが考えられる。更には従来より一部の家屋で利用されてきたが、天井裏空間、床下空間といった日常では人が使用しない空間を収納空間として活用しようという取り組みが必要となってくる。

^{*5} モノのフローにおける入力には贈答品や懸賞品なども含まれるがこれらは一般的に生活者がその入力量をコントロール出来るものではないため、検討の対象としない。

^{*6} 実際の生活では”必要”のないものを所有することも大切ではあるが、ここではあくまで必要最小限の所有を基準として検討する。

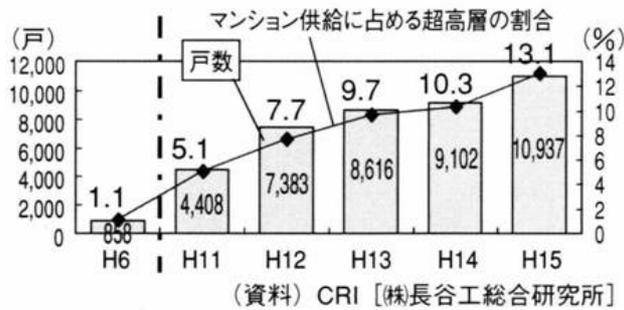


図 1.9 首都圏における超高層分譲マンション供給の推移

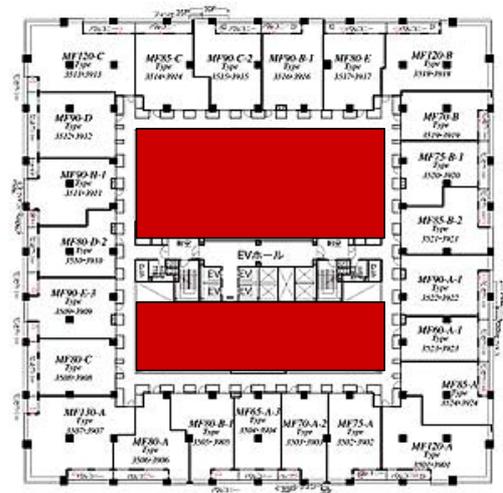


図 1.10 高層マンションの間取り例

- 収納空間の集約化，共有化
 収納空間を集約する，もしくは近隣の住人で共有するという概念が重要となってくる。吉田はかつての日本人の住居の使い方に注目し，役割を限定しない共用の空間を作ることが生活空間を”狭くしない”方法であると指摘している [3]。また内田も同様に，戦後においても，狭い日本の住宅について想いを馳せた建築家たちが，限定した役割しか果たすことの出来ない玄関を住宅から排除した，”玄関のない住宅”まで設計していたと述べており [2]，空間の役割に関する議論はここ数 100 年続いていることになる。
 現代での現実的な方策として，マンション等の集合住宅においては各家庭で収納空間を用意するのではなく，立体駐車場やエレベータのように共有設備として収納空間を実現するということが考えられる。現状では，各家庭で冷蔵庫，収納庫を準備し，それらに温度管理設備や出納設備などが独自に備わっているが，それらの共通機能を集約することで，空間体積に対する収納効率が改善されることが期待出来る。
- 居住空間に適さない空間を収納空間として活用
 一般的に高層マンションの間取りは図 1.10 のようになっている。ここで，中央の赤色部分は空洞となる。これは容積率の問題も大きい，外周の採光が困難なため，中央部は居住環境として適さないという問題が大きい。一方で収納庫として空間を利用する場合，紫外線劣化等の問題からむしろ光の進入を防ぐ場合すらあり，これらの中央部も十分活用可能な空間となる。このように，居住空間に適さない空間でも収納空間に活用することで，バッファを確保することが可能となる。

1.2.3 目標とするシステムの将来像

前節で議論をしたバッファ（収納空間）が増設され，また物品の入出力フローの適正化が実施された未来の住居として図 1.11 のような住居形式を提案する。その特徴は次の 2 点である。(1) 住宅、オフィス、生活インフラを可能な限り同一の敷地に収納することで搬送作業を削減。(2) 家庭用の物品収納コンテナを搬送する専用エレベータ、一括で収容する共同収納庫により、建物の中でのモノの流れを適正化。

本研究では図 1.11 のような未来の住宅の姿を念頭におきつつ，各家庭において収納空間を増設することの出来るロボットシステムの実現を目標とする。また，モノの流れの適正化という意味で現在広く用いられている”物流”という言葉を借り受け，本研究の目標を”家庭内物流支援ロボットシステム”と呼ぶ。これは，“物流 5 大機能”と呼ばれる輸送・保管・荷役・包装・流通加工を家庭の中で実現するロボットシステムとして適当な呼称であると思われる。

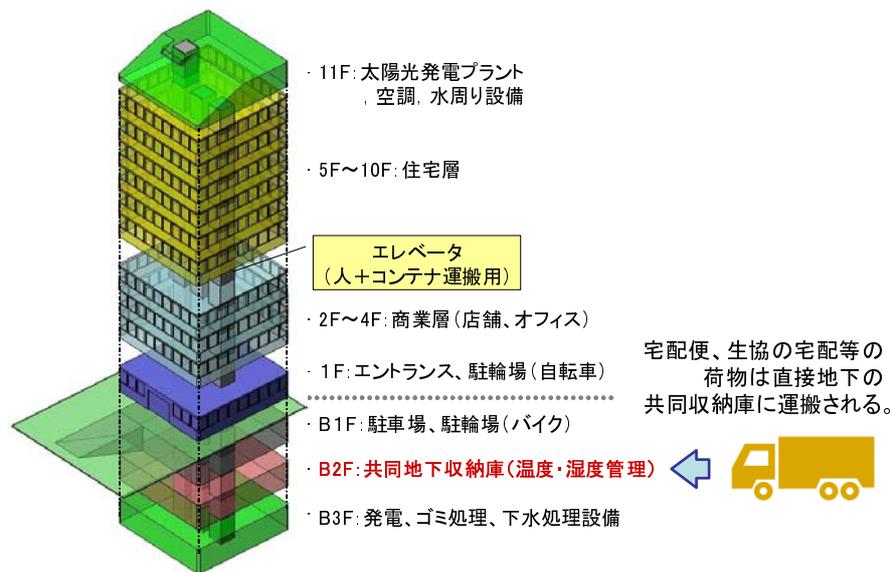


図 1.11 未来の住宅のコンセプトスケッチ

1.3 物品を取り扱うロボット

本節ではまず、工場や物流センターそして（模擬）生活環境中で物品を搬送・収納するロボットの例を整理し、その成果を踏まえて生活環境中で物品を取り扱うロボットにおける課題を整理する。続いて物品の搬送・収納作業をマニピュレーションの観点から分析するために、これまでに実施されたロボットマニピュレーション研究について整理する。最後に自動車を中心とする機械の発展についてふれ、生活環境中でロボットの能力を最大限引き出すために「環境を整備する」という視点に立ち、本研究のスタンスを整理する。

1.3.1 物品搬送・収納ロボットの例

これまで工場、物流基地向けに多くの自動化運搬装置が研究・開発されてきている。工場等での産業用途で物品をハンドリングする装置（クレーン、コンベアなど）、所謂”マテハン”^{*7}については長岡の著書 [5] が詳しい。物流センターでは比較的ハンドリング自動装置の導入が進んでいるケースが多く、複数ロボットの連動の実績 [6] なども見られる。また病院での看護師の負担低減を目的とした簡単な物品搬送ロボットの開発・試験運用も盛んである [7, 8]。松下電工が開発したロボット”HOSPI”では画像中より人の頭部を発見するアルゴリズム [7] を実装し、静止障害物と人物の識別等を行っている。Cosmaらは工場における軽量物流作業を行うロボットの開発を行っている [9]。一方、研究段階ではあるが、オフィス、実験住宅などで比較的柔軟に物品搬送を行うロボットも開発されている。Prasslerらはオフィス環境中で、メールの運搬をしたり、ゴミ箱の片付けを行う搬送ロボットの開発を行っている [10]。高橋らはオフィス用メッセンジャロボット『正宗 II』の開発を行っている [11]。Petterssonらは実験模擬住宅中で物品の搬送を行うシステム統合を試みている [12]。Miuraらは生活環境中で物品搬送を行うロボットにおいて画像認識、音声認識、物品のマニピュレーションを統合したシステムを開発している [13]。YamazakiらはVisionシステムとロボットハンドを用い家具の扉開閉を実装したり [14]、未知形状の物体のモデルを構築してマニピュレーションを行う試みを行っている [15]。

*7 マテリアルハンドリングの略称

大場らは環境にロボットの動作情報を埋め込むというポリシーのもと、書籍の片付けや食卓の後片付けを実現している [16, 17]。また日本の機械メーカ、家電メーカ等においてもサービスロボットの研究・開発が盛んである。富士通研究所ではサービスロボット”enon”の余剰ボディースペースを利用して、鞆等を搬送するサービスを提案している [18, 19]。東芝研究開発センターでは、家庭用のロボット (ApriAlpha) に拡張のアタッチメントを付けることで、搬送作業を行わせるコンセプトを提案している [20]。

しかし工場の生産ラインにおいて高効率な運搬性能が実現されていると比較して、これらのロボットは完成度が高いとは言えず、未だ多くの課題が残されていると言わざるを得ない。まず、人間が活動する環境（特に生活環境）は日々状態が変化し、自動化装置のロボастな動作を妨げる外乱が多いという問題がある。工場の限られた空間（柵の中）で動作するロボットと異なり、生活環境中で動作するロボットには環境の変化を筆頭として特有の課題が存在する。

1.3.2 生活環境中で物品を取り扱うロボットにおける課題

前述したように生活環境中でロボットが人間のように様々な物品を取り扱うのは容易ではない。それは工場で活躍するロボットとは異なり以下の生活環境特有の問題 (図 1.12) があるからである。

1. 生活環境の変化
2. 物品の多様性
3. 人の作業のバラツキ

上記のロボットの安定した動作を阻害する各要因について詳細に分析する。

産業用と家庭用物品搬送・収納ロボットの比較

	産業用物品搬送・収納ロボット	家庭用物品搬送・収納ロボット
環境	整備されていて不変	完全には整備されておらず変化する
対象物品	少品種大量	多品種少量
人との共存	不要 (ロボットは安全柵の中で動作)	必要 (生活環境の中へロボットが入り込む)

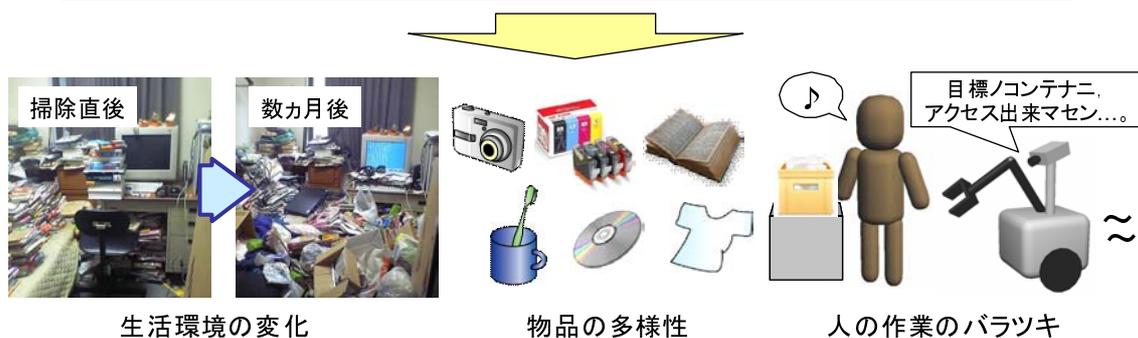


図 1.12 生活環境中で物品を取り扱うロボット特有の問題

生活環境の変化について

ロボットは一般的に、定められた繰り返し作業を行うことを得意とする。これはロボットの脳、つまりプログラムが人為的に構成されたものだからである。昨今、ロボットの知能に関する研究も盛んであるため、人が明示的にプログラムしていない動作も実現可能になりつつある [21]。しかし、タスクの詳細（前提条件、経過処理、完了条件）をロボットに伝達するためには、なんらかの定義が必要となり、その定義を現状のロボット構成のように（デジタル）計算機を介して判断している以上、なんらかの情報劣化（離散化）は避けられない。

一方で生活環境は人の営みによって時々刻々と変化するものである。生活環境の変化そのものはエントロピー増大の法則からも分かるように停止させることは出来ない。このように変化する環境の中では、単純な繰り返し作業の成否はその環境の状態に依存することになり、自動化機械としては、その存在意義が問われかねない。

物品の多様性について

人が生活環境の中で用いている物品は実に多種多様である。一説には、一人当たり 4,000 個の物品を生活の中で使用していると言われる。そのため、ロボットが操作対象としなければならない物品の種類も必然的に多様となる。

このように生活環境中に存在する全ての物品を、画一的な制御ロジックで操作することは非常に難しい。人は赤子のころより繰り返しの鍛錬にて非常に柔軟な制御ルーチンを身につけているが、ロボットがその制御ルーチンを学習するに至るまでは多くの時間と労力が必要である。

これらの問題を解決するために、物品に取り付けられた (RFID) タグを活用し、そのタグにロボットがそのモノを扱うのに必要な情報 (形状、表面特性、材質)、さらには推奨するロボットのハンドリング情報を収めることにより、物品個々の差異を吸収しようとする試みもある [22, 23, 16]。しかし、上記のインフラが整備されたとしてもロボットはタグ内の情報を十分に活用出来るだけの高い能力が求められるため、その実現は容易ではない。

人の作業のバラツキについて

人の営み自身がロボットの画一的な動作と比較すると大きなバラツキを持っており、そのようなバラツキを有する (ある意味での) 作業者と同一空間にて共棲することはロボットにとって1つの課題である。つまり、ロボットのみが存在する環境 (工場における自動化ラインの中) において作業をするのとは異なり、人が環境中で動作することにより、ロボットの動作の不確実性が高まることになる。その意味では生活環境中で動作するロボットにとって人の営みこそが最大の外乱であると言っても過言ではない。

1.3.3 ロボットによるマニピュレーション (Closure への注目)

マニピュレーションの定義

従来ロボットによる物体操作、即ちロボットマニピュレーションに関して非常に多くの研究が行われてきた。Shimoga のサーベイ論文 [24] を見るだけでも、その歴史の深さを感じる事が出来る。

吉川はマニピュレーションを「対象物を移動させたりそれに力を加えることによって、目的とする対象物の変化を実現すること」と定義している [25]。我々の研究が目標としている物品の搬送・収納作業において目的とする対象物の変化はすなわち「対象物の位置が変わること」である。

対象物の位置を変化するためには“把持”と“操作 or あやつり”の2つのフェーズが必要である。例えばフォークリフトによるパレット運搬作業においては、フォークリフトを挿入することが“把持”、フォークを傾斜させて走行に耐える状態を作ることが“あやつり”、そして車両の走行能力を用いて移動することが“操作”に該当する。ここで把持とは「操作 (あやつり) の作業を効果的に実行するための準備作業のこと」であり^{*8}、物体を操作 (あやつる) するとは「ある1つの安定した把持状態から別の安定した把持状態へ移行させること」とも解釈出来る。ここで厳密には、物体を廃棄・破棄する動作などは移行先の動作は安定である必要はないが、ある瞬間までは安定性を維持することが求められておりその意味では、上記の解釈が広く適用出来ると考える。このように操作とあやつりの厳密な区別は困難であるが、本研究では以下の解釈を適用する。

操作： 対象物の位置を変化させる直接的な移動作業のこと。

あやつり： 対象物の把持状態を大きな移動を伴わずに変化させる内部状態変化作業のこと。

^{*8} 本研究では把持の意味を『操作の準備段階』と広く捉えて活用するため、一般的な Grasp-less Manipulation とは異なる説明を行う。

前述したように本研究が目的とするマニピュレーションは内部的状態の変化ではなく，物品の位置が変わることであるため，“把持”と“操作”の2フェーズで以降の検討を進める。

マニピュレーションの分類と Closure

マニピュレーションの分類には，機構的な分類，制御的な分類など様々な視点がある。従来，ロボットマニピュレーションにおける議論ではグラスプが必要なマニピュレーションと必要でないグラスプレスマニピュレーションに分類されて検討をする慣習があった。本研究では操作の準備状態を広く“把持”と捉えているため，ここにおけるグラスプと把持の指し示すものは必ずしも一致しない。一般的にグラスプとは人の手を模したロボットハンドによる把持（操作・あやつり）の準備作業を示している。しかし，グラスプによる分類では図 1.13 に示す Pushing, Tumbling, Pivoting, Caging といった方法は全てグラスプレスマニピュレーションとなり，その方法の多様性から考えるとこれらを単一のカテゴリとすることには議論の余地がある。そこで把持状態の拘束度合い (Degree of Constraint) によってこれらを分類することを考える。なお相山は manipulation 動作時の環境（地面）との接触状態でグラスプレスマニピュレーションを整理しているが [26]，これらに対しても拘束度合いによる分類を適用することで，また異なった見方も出来る。図 1.14 に拘束度合いによるマニピュレーションの分類チャートを示す。図 1.14 のように拘束度合いにより分類することによって，グラスプ・グラスプレスマニピュレーションを次の4つに分類することが出来る。

- 完全拘束マニピュレーション (Full Constraint Manipulation)
- 拘束マニピュレーション (Constraint Manipulation)
- 半拘束マニピュレーション (Semi Constraint Manipulation)
- 非拘束マニピュレーション (No Constraint Manipulation)

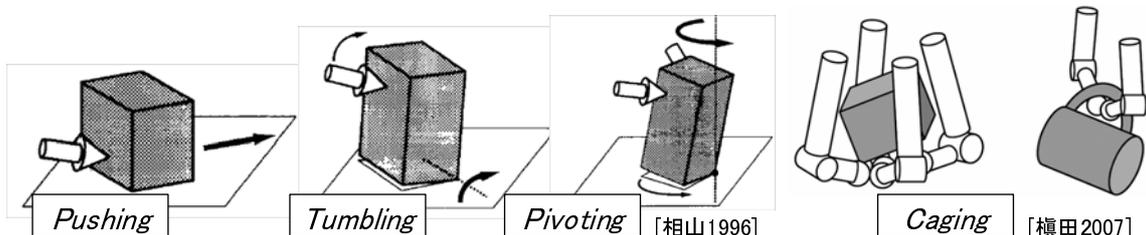


図 1.13 様々なグラスプレスマニピュレーション

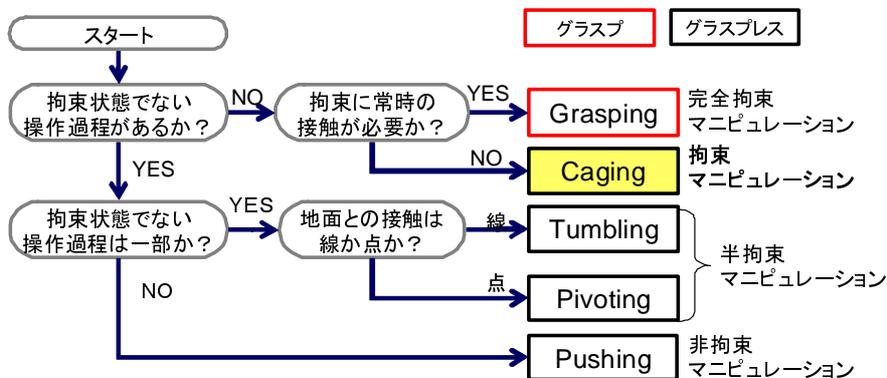


図 1.14 拘束度合いによるマニピュレーションの分類

もっとも拘束の程度が低い非拘束マニピュレーションには Mason[27], Lynch[28], 大川 [29], 栗栖 [30] が解析・動作計画を行った Pushing が属し, 続いて拘束度合いが低い半拘束マニピュレーションには相山 [26] がその優位性を訴えた Pivoting や Tumbling が属する。Maeda らはグラスプレスマニピュレーションにおいて物体の可動方向を検討することによって Pushing, Tumbling が自動的に切り替わるような作業計画を実現可能なアルゴリズムを提案している [31]。また 2 つ目に拘束度合いが強い拘束マニピュレーションとしては, Wang らが複数台ロボットでの協調搬送に適用し [32], また横田らが 3 次元中での基礎的な成立条件を検討した [33]Caging が該当する。そして最も拘束度合いの高い完全拘束マニピュレーションとしては Grasping (いわゆる Pick & Place, 例: 多指ロボットハンドでの把持) が該当する。ここで拘束 (Constraint) という基準を新たに提案したが, 従来よりマニピュレーション研究では近い概念としてクロージャ (Closure) という概念がある [34]。Closure は幾何的もしくは力学的な拘束状態が成立していることを意味しており, その解析はマニピュレーションにおける確実性・安定性と密接に関係しており, 本研究ではこの Closure の概念を 1 つの核として議論を進める。

1.3.4 環境の整備による機械の発展と 2 種類のコンプライアンス

これまで, 整備されていない環境 (Unstructured Environment) 中で必要な移動を行い, 何かしらの作業 (物品操作) をロボットに行わせるための方法論について多くの研究が行われてきた。

Yoshikawa らはロボットマニピュレータ先端に画像取得装置を取り付け, 把持物体の断面形状を取得し, その形状に応じた把持戦略を構成する試みを行っている [35]。Yamazaki らは移動ロボットに取り付けたカメラ画像から物体のモデルを構築し, ロボット内部に物体のモデルがない, またはタグ等により物体情報を補填する環境がない場合での物体の Manipulation について研究を行っている [15]。

また軍事ロボット分野においては SLAM (Simultaneously Localization and Mapping) の技術進歩が目覚しく, 軍事偵察の目的で実用を狙えるものも開発されてきている。

しかし, 現代社会を支える移動・搬送機械である自動車 (または飛行機) の発展を振り返るとそれらが必ずしも整備されていない環境を克服して発達してきたわけではないことが分かる。斉藤は著書 [36] の中で自動車普及時の日本の道路整備事情の悪さにまつわる事件を何点が紹介しているが, その中で象徴的なのが明治 44 年 (1911 年) にイタリア製の乗用車で東京発の山陽山陰ドライブを試みたが, 道路崩壊等のトラブルにより大阪付近で途中断念したという出来事である。当時の自動車サスペンション技術と比較して現在の技術が著しく向上していることは Eckermann の著書 [37] 等からも明らかであるが, それでも現在では当たり前のように自動車が往来している東海道の旅程も, 道路の整備なしには成しえないということを示している事例と言える。上記のように自動車は率先的に環境を整備することによって, その能力を発揮してきたことが分かる。ロボットを人と共棲し, 人の能力を補填する機械として捉えた場合, 自動車の発展の歴史はそのままロボットの発展に必要な条件と考えることが出来る。

そこで本研究ではロボットが人と共棲するために, ロボットを整備されていない環境の中で動作させようとするのではなく, ロボットの能力を引き出すためにどのように環境を構築するべきかの議論を行う。昨今このような環境整備の取り組みを”空間知能化”もしくは”環境構造化” [38] と呼び多くの研究が取り込まれるようになってきている。そこで本節では自動車発展の歴史について分析を行い, そのキーとなる環境整備の概念をロボットに適用することを考える。

自動車発展の歴史の分析

日本で自動車が広まったきっかけは関東大震災 (1923 年) 後の復興期と言われている [36]。それまで軌道交通 (鉄道, 路面電車) を重視してきた日本政府であったが, 震災により軌道, 電力等のインフラが大ダメージを受け交通・物流網が麻痺してしまった。そこで平坦な道であれば自由に移動可能な自動車の利点が認識され, アメリカからの T 型フォードの大量輸入 (800 台) へと繋がったわけである。つまり震災復興時に求められた多量の物流の実現は「人が出来ないことを行う機械」としての自動車の利便性を広めることとなったと言える。

一方で欧米諸国と比較して道路の舗装, 交通法令の整備などの面において遅れをとっていた日本は GHQ の占領下において対応が行われるまで長距離の自動車移動において様々な支障があったとされる。上記のような日本の自動車史はある意味日本特有のものではあるが, 一般に自動車が交通・物流において

現在の高い地位を築き上げるにあたっては、次のような環境整備（インフラ整備）の手順を経て発展してきた。

1. 交通規則の制定

道路の一部を車両通行専用とし、機械の動作範囲と人間の生活範囲を半強制的に分割することにより、人の安全を確保しやすい環境を整備し、自動車の安全確保能力の不足を補った。また自動車同士や対人の衝突を防止するため（日本では）左側通行の基本が義務付けられた。

2. 路面の舗装

一般的にホイール移動機構は平坦な道での移動効率が高いが、段差踏破能力に欠ける。そこで石畳やアスファルトで路面を平坦に整備することによって、サスペンションへの負荷を低減し、高速な移動を可能とした。

3. 信号機，交通標識の整備

自動車が社会に深く浸透し、その利用台数が増えるにしたがって、自動車同士もしくは対歩行者の事故が多くなった。これを防止するために自動車の移動方法に対して一定のルールを設けることが必要となったため、そのルールをドライバーや歩行者に対して明示するための信号機，交通標識が整備された。これにより、全ての自動車・歩行者が交通状態に対して共通の情報共有を行うことが可能となり、安全が確保されるようになった。

4. 高速道路の整備

自動車の長距離移動を更に向上させるために、都市間を結ぶ高速道路ネットワークが整備された。高速道路は一般に自動車走行に特化した道路であり、障害物のない安全な道，対向車との間に施設された柵，立体交差の駆使，そして信号機の排除などにより自動車の安定した高速長距離移動の実現に大いに貢献している。

このように自動車は非常に多くのインフラ及び規則の整備と共に発展してきたと言える。

環境整備手法のロボットへの適用（戦略的コンプライアンスの導出）

前述の自動車用環境整備の歴史をもう少し一般的に解釈をしてみると次のように要約される。

1. 交通規則の制定 → 機械の動作領域における基本ルールの整備
2. 路面の舗装 → 機械の性能を補う環境の整備
3. 信号機，交通標識の整備 → 規則遵守へと誘導する環境の整備
4. 高速道路の整備 → 機械の性能を發揮させる環境の整備

上記の分析において機械の性能を補うことと發揮させることの線引きは明確なものではなく、同種の整備手法であるとも言える。よって環境整備により実現すべき基本機能は次の3つとなる。

1. 規格化 (Regulation)

規格化にはタスク，役割，領域・空間の規格化の3種類がある。

- タスクの規格化: 複数の作業がロボットから見て常に同種の繰り返し作業となるよう変換する機能。
- 役割の規格化: ロボット・人それぞれが担当する役割を明確にし，目的のタスクを分割する機能。
- 領域・空間の規格化: ロボットと人それぞれが主として使用する領域・空間を定義することで，空間を共有させる機能。

2. 補助・強化 (Assist, Enforce): ロボットが取り扱いやすい機構，情報を付加することにより，その性能を補填する機能。

3. 誘導 (Navigation): 人にルールのメリットを認識させ，順応させることで人の高い支援能力を自然と引き出す機能。

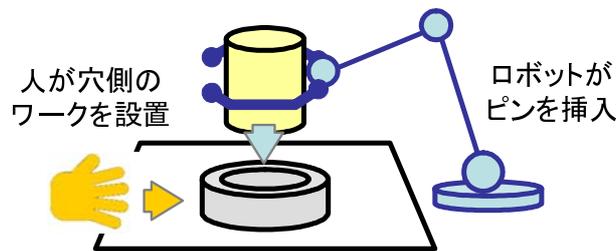


図 1.15 人とロボットのピン挿入協調作業の例

ここで図 1.15 のような人とロボットのピン挿入協調作業を例にすると上記の基本機能は次のような設備の実現に該当する。

1. 規格化 (Regulation)
 - タスクの規格化: タスクを「穴径よりも少し細いピンを穴に挿入すること」と定義。
 - 役割の規格化: 人はワークをテーブルにセットし、ロボットはピンをワークに挿入すると役割を明確化。
 - 領域・空間の規格化: ロボット稼動時は人はテーブル内には存在しないとする。
2. 補助・強化 (Assist, Enforce): 挿入穴に面取りを施す。穴径を大きくする。穴の上面を着色する(ロボット Vision 用)。ワーク簡易把持用の治具を用意。ワーク位置計測装置を設置。
3. 誘導 (Navigation): 穴側のワークを人が可能な限りピンの真下に設置可能なよう、設置場所にマーカもしくはガイドを用意する。

これらの機能を実現する環境整備の仕組みを”戦略的コンプライアンス”と呼ぶことにする。新版ロボット工学ハンドブック [39] によるとコンプライアンスは「接触環境(モノ)との間に発生するであろう相互作用力を考慮に入れた機械的柔軟性のこと」と定義されている。そもそも compliance の語源としては何かに”倣う”ことを意味しており,”整合性”や”従順”などの意味合いが強い。つまり機械的柔軟性が高いことは物理的に変形して”倣う”ことの必要条件であったため、「コンプライアンス = 機械的柔軟性」と捉えられるようになったと考えられる。機械的コンプライアンスは RCC(Remote Center Compliance) を代表として工業用途でロボットアームの安定した繰り返し動作を補助するために広く活用されており、特にピン挿入作業 (Peg-In-Hole) における機械的コンプライアンスの貢献は大きい。

一方、先ほど環境整備の機能を人とロボットのピン挿入協調作業を例として説明したように、両コンプライアンスが適応されるアプリケーションは非常に相関が高い。つまりロボットが人・環境と接触するタスクにおいては、どちらか一方または両方が他方に対して”倣う”ことが必要であり、図 1.16(左)のようにロボット側が倣う場合を機械的コンプライアンス、図 1.16(右)のように人・環境側がロボットに倣うことを戦略的コンプライアンスと定義していることになる。一般に戦略的コンプライアンスは仕組みとして機能するものであるが、実際にロボットの安定した動作を実現するためには、どちらか片方が倣えば解決するという問題は少なく、機械的コンプライアンスとの協調が重要になってくると考えられる。

その意味では戦略的・機械的コンプライアンスを一様に分別することは困難であり、両者の混合を戦略的コンプライアンスと呼ぶのが妥当との考え方もあるだろう。



図 1.16 機械的コンプライアンスと戦略的コンプライアンス

以上の分析を整理すると表 1.1 のようになる。

表 1.1 自動車環境整備の歴史とロボットの環境整備における必要機能のまとめ

自動車における環境整備	整備内容の一般化	戦略的コンプライアンスの機能抽出	ロボットマニピュレータによるピン挿入作業との対応
交通規則の制定 (左側通行, 歩道との分割)	機械の動作領域における基本ルール の整備	規格化 (Regulation) タスクの規格化 役割の規格化 領域・空間の規格化	タスクを穴径よりも少し細いピンを 穴に挿入することと明確化。 人はワークをテーブルにセットし、 ロボットはピンを挿入すると役割を定義。 ロボット稼働時は人はテーブル内には 存在しないとする。
路面の舗装	機械の性能を補う 環境の整備	補助 (Assist)	挿入穴に面取りを施す。 穴径を大きくする。 穴の上面を着色する。
信号機 交通標識 白線	規則遵守へと誘導 する環境の整備	誘導 (Navigation)	穴側のワークを人が可能な限り ピンの真下に設置可能なよう、 設置場所にマーカやガイドを用意。
高速道路の整備	機械の性能を発揮 させる環境の整備	補助, 強化 (Assist, Enforce)	ワーク簡易把持用の治具を用意。 ワーク位置計測装置を設置。

1.4 本論文の目的

以上の検討より、本論文では生活環境においてロバストに物品搬送・収納動作をするロボットシステムを実現するために必要な、戦略的・機構的な方法論・設計論についてクロージャ及びコンプライアンスをキーワードとして整理し、それらを家庭内物流支援ロボットシステムの実現を例として具現化し、戦略的・機構的な方法論・設計論の有効性について検証を行うことを目的とする。

家庭内物流支援ロボットシステムによるユーザの支援をより効果的なものにするためには、本システムを介して取得される物品の使用に関する情報を分析し、ユーザへの支援情報としてもしくはロボットシステムの動作基準としてフィードバックする必要がある。しかし、本研究における取り組みではそのような分析が可能なデータを取得出来る環境を構築することをまず最初の目標としている。これは(模擬)生活環境中で物品を扱うロボットシステムを実現するために取り組むべき課題が非常に多岐に渡り、博士研究として取り組むべき十分な課題量があるからではあるが、システムの完成形として将来を見据えた場合、その基本的な議論を本論文中で行うことは必要と思われる。そこで第5章における将来展望において、情報分析及びそのフィードバックに関する議論を行う。

本論文中で明示的に表現されることは少ないが、この研究にあたって、次のような動機が背景にあることをご理解頂き、読み進んで頂けると検討の基準などの理解が進むと思われる。

1. ロボットはその専従する作業において、人間より優れている必要がある。
2. 日本のモノづくりの現場で培われた技術を家庭用ロボットへ応用させる。
3. 実用ロボットの開発、運用コストの割り振り最適化を行い、開発及び導入のスピードを加速させる。^{*9}

図 1.17 に上記の動機について詳細を示す。

^{*9} 最近、ロボット開発においてはその応用、実用化が求められている。本研究が提案している家庭内物流支援ロボットシステムは近い将来の実用化を狙ったものではあるが、一般消費者として導入を考えた場合、そのコストは必ずしも許容可能な範囲であると断言出来ない。しかし、過去の新しい機械(自動車や飛行機)の導入期を振り返ると、プロトタイプは概ね一般消費者が負担可能な金額で製作・販売されていたわけではない。つまり、将来的な費用見積りは重要ではあるが、プロトタイプが高額であることを新しい機械の第1の開発障壁にしない社会基盤の創出が重要となってくる。

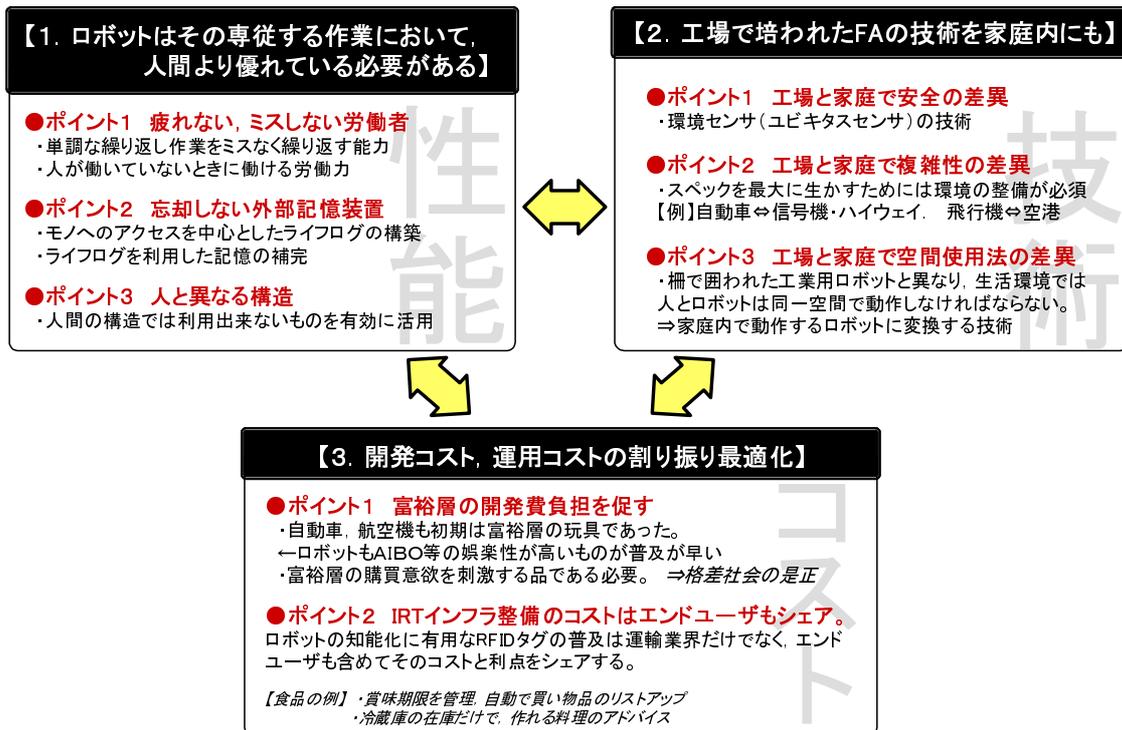


図 1.17 本論文の背景にある動機(ポリシー)

1.5 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第2章では生活環境中で動作する物品搬送・収納システムについて、本章でも取り上げた問題・課題に対する解決指針について議論・整理する。第3章では家庭内物流支援ロボットシステムを構成する各サブシステムの実現について述べ、その基本性能を評価する。第4章では各サブシステムを統合し、システムに要求されるタスクとして実現し、その性能を評価する。第5章は結論である。

第 2 章

生活環境中で動作する物品搬送・収納ロボットシステム

本章では 1 章で述べた生活環境中で動作するロボットシステムにおける問題・課題に対する本研究としての解決指針について検討を行う。まず物品を扱うロボットシステムとしてマニピュレーション分野でのクロージャに関する議論を行い。続いて前章で提案した、仕組みとしての” 倣い ” を引き出すための戦略的コンプライアンスについて本研究での適用を検討する。更に戦略的コンプライアンスと対になる機械的コンプライアンスについて、その歴史・分類などについて整理を行い、本研究が目指す受動機械的コンプライアンスに関して応用時の課題について考察を行う。最後に本研究が目標とする家庭内物流支援ロボットシステムにおけるクロージャと戦略的・機械的コンプライアンスの活用指針についてまとめる。

2.1 物品のマニピュレーションと幾何設計（クロージャ概念の整理と拡張）

本節ではまず、把持における拘束状態を表現する指標となるクロージャについて、従来研究を整理し、続いて把持における幾何的な考察の重要性について指摘し、幾何的なクロージャとして Object Closure の拡張検討を行う。最後に拡張した指標として Geometric object closure の設計・検討手順を整理する。

2.1.1 クロージャに関する研究の整理

クロージャの定義については中村の文献 [34] や吉川の文献 [40] が詳しい。またロボットによるハンドリング工学全般とその数学的ツールの理解には Mason の著書 [41]，そして平井らの著書 [42] 及び論文 [43] が詳しい。ここではその概要をなぞりつつ、近年のクロージャ研究の情報を追加する。

吉川はクロージャを能動性・受動性により整理することを提案している [40]。これにより図 2.1 に挙げた完全拘束マニピュレーションを整理すると図 2.2(上) のようになる。また拘束マニピュレーションである”Caging”はこの分類に従うと、形態受動拘束の 1 種と分別される。各分類について詳細に述べる。

- 形態受動拘束/力受動拘束（一部）：機構学上の “Form/Force closure”
Reuleaux は彼の著書 [44] において機構学の軸受けやリンクについて簡潔な整理を行い、幾何的に部品の移動を防止する”Form closure” と、更に与圧で機構部品の移動（ぶれ）を防止する”Force closure” の分類を行った。また Form closure を実現するために 2 次元平面においては最小 4 点の接触が必要であることを Reuleaux は示し、3 次元において 6 自由度の動きを奪うためには最小 7 点の接触が必要であることを Dizioglu と Lakshiminarayana[45] が示している。ちなみにこの最小 7 点が必要ということに関する証明は吉川の論文 [40] にも簡潔に示されている。
- 力受動拘束（一部）：“Work closure”
中村は物体の拘束が維持されるためには、外力によって物体が微小変位することにより発生する仕事をキャンセルするように作用力が発生しなければならないことに注目し、外乱による影響を受けにくい状態で物体を拘束する”Work closure”を導出した [34]。この”Work closure”は外力に抵抗

するために十分な力を作用器が発生する必要があり、力受動拘束に分類される。

- 力能動拘束：ロボット工学上の”Force closure”
 ”Force closure” は与えられた作用点における作用力によって任意の合力（合モーメントも含む）を加えられる状態のことを示す。この”Force closure” については Nguyen が解析を行い、摩擦のない2次元平面での拘束には最少4点の、3次元空間での拘束には最少7点の接触点が必要であることを証明している [46, 47]。最少拘束点が共に7つであることから推測されるように、”Form closure” と”Force closure” は双対関係にあることを中村は示しており [34]、実用を考えた場合にこれらの定義は必ずしも厳密である必要はないと考える。また中村は把持の安定性について議論し、”Force closure” が安定性を示す3つの指針のうちの1つであると指摘している [48]。
- 能動受動混在拘束
 一方でクロージャとして特別に命名されていない、能動受動混在拘束は能動拘束方向と受動拘束方向が混在するもので、2個ある各々の作用器が1自由度独立に開閉駆動可能なグリッパなどがこれに該当する。
- 完全拘束ではない形態受動拘束
 拘束マニピュレーションである”Caging” としては王らが”Object closure” [32] を提案しており、横田、前田ら [33] は3次元のケージングについて基礎的な考察を行っている。“Object closure” は任意の力を発生させることを目的とした力能動拘束ではないため、その拘束そのものが物体のハンドリングを行うことにはならない。一方で、ロボット自身が何かしらの移動方法を持っている場合、ロボットと物体の相対位置はある領域内に収まるというメリットがある。

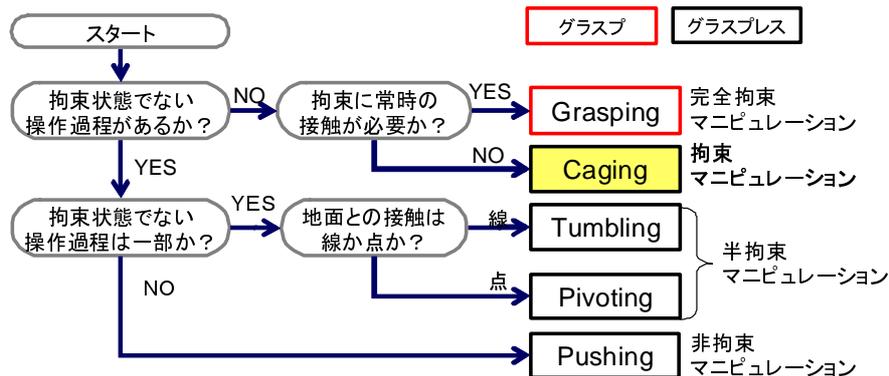


図 2.1 拘束度合いによるマニピュレーションの分類 (再掲)

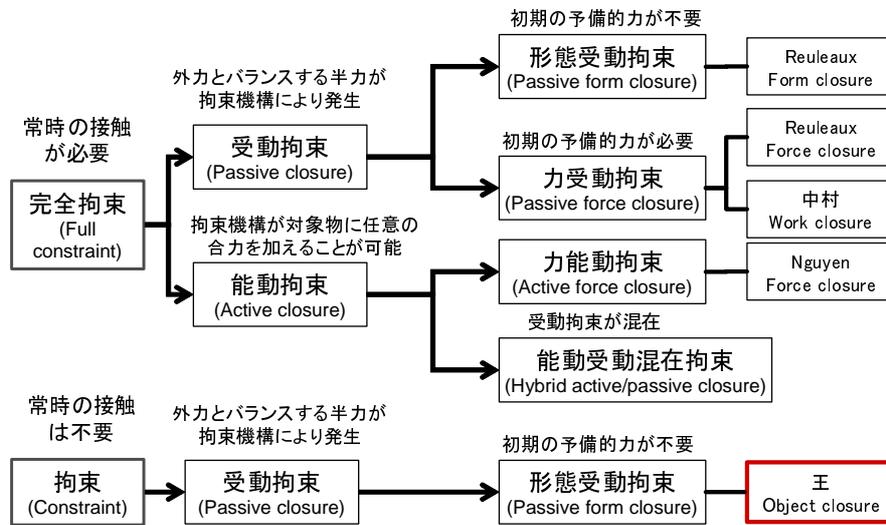


図 2.2 クロージャの分類

2.1.2 幾何的な考察の重要性

実際に機械（ロボット）設計現場においては、2次元 CAD 図面または3次元 CAD モデルをベースとした幾何的な設計が中心となる。もちろん最近では3次元 CAD の活用により、ソリッドモデルを活用した FEM や機構解析によって、動力学を含めた設計検討が可能となってきているが、それでも現場の設計者にとって純粋な幾何検討と比較して敷居が高く、幾何的な整合性の確認と静力学解析（FEM を含む）が設計作業の中心となっている。これは次のような理由が解析の精度向上にネックになっているからだと考えられる。

- FEM 解析を精確に実施するためには、評価する基礎材料データの取得が必須であり、必ずしも十分なデータが得られる環境が揃っていることが期待出来ない。
- 物体の過渡応答に重要な剛性のヒステリシス性や物体同士の摩擦に代表される減衰項を正しく推定するためには多くの経験が必要である。

上記のような解析精度の他に、解析を行う作業者のコスト、そして様々な解析を十分に高速かつバリエーション豊富に実施するのに必要な計算機インフラコストはメーカーにとって大きな負担となる可能性がある*1。

上記のような様々な問題を踏まえると、詳細な動力学的検討が不要で、幾何的・静力学的検討を中心として問題を解決出来れば、それは設計者に優しい（易しい）手法であると言える。そこで本研究では幾何的な検討を中心として物品（物体）のマニピュレーションを捉えることを試みる。

2.1.3 幾何的考察によるクロージャ

マニピュレーションにおいて動的な力学に関する考察を可能な限り避け、物品の安定した把持・操作を実現するためには”形態受動拘束”を実現することが求められる。前述したように形態受動拘束には常時接触の必要な、完全拘束マニピュレーションである Form closure と常時の接触は不必要な拘束マニピュ

*1 昨今のモノづくり系雑誌では CAE の導入による試作工数の低減が謳われることが多いが、実際にはエンジニアの作業時間が大幅に増大し、サービス残業の増加、現場の疲弊など必ずしも大きな利点だけではないことに注意が必要である。

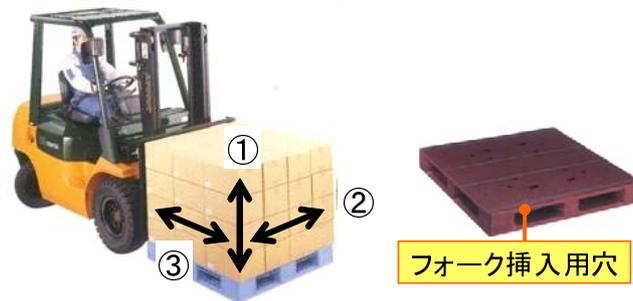


図 2.3 フォークリフトによる物品の搬送 (右:フォークリフト用パレット)

レーションである Object closure の二種類の選択肢がある。ここで産業用のマテハン^{*2}装置の代表格であるフォークリフトによる物体の搬送を考えてみる。図 2.3 に示すように産業用途でフォークリフトは口バストかつ迅速に物品の把持・操作を行うことが出来る。このパレットに積載された物品を搬送する把持状態は当然完全拘束ではなく Object closure 状態になっている。具体的には車両操縦者から見て、パレットの上下方向 (1) はフォークの上面及び物品の加わる重力によって拘束される、そして左右方向 (2) はフォークがパレット穴に挿入されることにより、パレットの上下面を支持している梁とフォーク自身により拘束される、最後の前後方向はパレットをわずかに車両後方に傾けることにより、マストの根元とフォーク自身によって拘束される。ここで上下方向で重力を 1 つの拘束と見なしたが、物体の把持・操作時に加わる外力が自重 (重力) と比較して十分に小さいときには重力を 1 つの拘束として見なすことが出来る。重力を拘束と見なすことについては Nguyen も 2 次元の Force closure の検討の中で触れている [46]。

重力はそれに反する拘束が存在する場合は 1 つの拘束と見なすことが出来るが、一方で物体を空間中に固定するという意味では外力となる。よって、実用上物体を幾何的に拘束するためには、まずこの重力に対する配慮をしなければならない。重力は一般的には鉛直下方に加わるために、図 2.4 に示すように物体を拘束するためにはまず重力に抗する上下・傾斜の拘束を実現し、続いて水平の位置を維持するという検討の手順になる。そもそもフォークリフトもフォークが重力に対して直接的に接触して支えているのに対して、水平 2 方向には、フォークとパレットの付加的な構造・仕組みにより支えていることにより、上記の検討の手順の妥当性が伺える。

以上のように、重力方向を考慮した Object closure を活用することが、実用的なマニピュレーションスキームには重要であると言える。



図 2.4 物体の拘束方向の差異

*2 マテリアルハンドリング

2.1.4 Object closure の拡張

改めて王らが提唱した Object closure[32] についてその詳細を検討する。王らは平面を動作する複数移動ロボットを用いて凸型多角形物体を Caging 状態で運搬する研究を行った。Caging とはある物体が任意の外的操作によって動いた場合でも、特定の領域に収まったままであるような拘束状態のことを指す。王らはこの Caging 状態を式 2.1 のような集合論的な表現を用いて記述している。

$$\begin{cases} C_{free.obj} \neq \emptyset \\ C_{free.obj} \neq q_{obj} \\ C_{free.obj} \cap C_{free.inf} = \emptyset \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで $C_{free.obj}$ は物体が自由に動ける 6 次元コンフィグレーション空間 (C 空間), q_{obj} は現在のオブジェクトのコンフィグレーション, そして $C_{free.inf}$ は無限遠方にある物体が自由に動ける C 空間のことである。

つまり第 1 式は初期に Caging と成り得る状態が存在することを保証し, 第 2 式は Caging 状態が現在の状態だけしか存在しない場合 (つまり Caging が即ち完全拘束しか存在しないような状態) を除いている。そして最後の第 3 式が物体が無限遠方に存在する場合の状態空間と現在の物体状態の間に feasible なパスが存在しないことを保証している。

この定義では $C_{free.obj}$ 自身に関する制限は加えていない。つまり物体は Object closure 状態であるならば自由な位置・姿勢を取ることが出来る。しかし, 実用的なマニピュレーションにおいて物体の初期の位置・姿勢は兎も角として, 目的となる位置と姿勢は (ある範囲を持つとしても) 一意に定められる。

また搬送する物体が如何なる姿勢を取っても良いという状況は対象物体によっては, 適切な条件とは言えない。例えばコーヒーの入ったカップやケーキが入った箱を運搬する際に, 内容物がこぼれたり崩れたりしないように保つことを考えると, その作業過程において物体が任意の姿勢を取ることが許されない。

更に複数ロボットでのクロージャのように拘束位置が非常に多様である場合は集合論による定義は有効かつ厳密である, しかし一般にロボットの作用器は多指ハンドを含めて複数ロボットによる作業ほど配置自由度は高くなく, また対象物体の形状が既知である場合には, 幾何的な検討を直接行うほうが簡潔である。

そこで本研究では Object closure の幾何的側面を強化した "Geometric object closure" を提唱する。この Geometric object closure では物体の位置・姿勢が特定の範囲に収まるような Caging 状態を実現することを目的としている。図 2.5 に両者の差異を示す。Geometric object closure の条件を以下に示す。

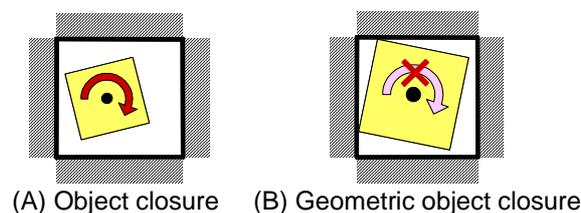


図 2.5 Object closure と Geometric object closure の差異

Geometric object closure の条件

- 条件1 対象物体が規定の領域内で移動することを許容する。すなわち、全ての作用点が常に接触していることは必要としない。このような作用点のことを、作用候補点と呼ぶ。
- 条件2 摩擦による位置拘束は把持の確実性を低下させるために作用候補点としてカウントしない。
- 条件3 可能な限り重力方向と非重力方向（水平方向）の検討を独立に行う。重力方向に関しては重力を1つの作用点候補と見なす。
- 条件4 並進3自由度に物体が運動した場合、並進の向き（正、負）に因らず規定の範囲内で作用（接触）する作用候補点が必ず1つあること。
- 条件5 回転3自由度に物体が運動した場合、回転の向き（正、負）に因らず規定の範囲内で作用（接触）する作用候補点が必ず2つあること。

各々の条件について、もう少し詳細に説明する。条件2についてはフォークリフトの運搬においても図2.3ではパレットそのものは拘束状態にあるものの、パレットの上の物品は左右方向(2)には拘束されておらず自重による摩擦によって動作が制限されているに過ぎない。当然、この状況下ではフォークリフトが急旋回した場合には遠心力が摩擦力を上回る可能性があり、落下の可能性を含んでいる。このように条件2を適用しない場合、搬送状態によっては条件1が満たされないことがしばしば発生するため、この条件を設定している。条件3については前述の重力方向の支持の重要性に基づいている。条件4、5はCaging状態を幾何的な側面から説明しており、並進に抗するためには1つの作用候補点による反力が必要であり、回転に抗するためには1つの作用点を支点として、もう1つの作用点を力点とする反モーメントが必要であることを示している。物体の自由度と拘束条件の対応については、MorrowがPrimitive taskの分類に用いた表記法[49]が参考になる。

王らはObject closureが成立しているかの判定に必要な計算量が1つの課題であると述べているが[50]、Geometric object closureでは設定された位置・姿勢の範囲内での接触候補点の有無を調べる計算のみで済むため簡便である。

但し実用上は以下に述べる作用候補点の冗長性を十分に取ることで、上記の条件4、5を確保することが重要と言える。

2.1.5 Geometric object closure の設計・検討手順

本節ではGeometric object closureの設計・検討手順を示す。ここでの検討では重力方向と水平方向を独立に検討可能な場合を想定している*3。図2.6に本検討における座標系の概要を示す*4。

STEP1 操作対象物体の重力方向（一般に上下方向）を考慮し、ベースとなる垂直支持平面を構成する作用候補点3点の位置を決める。

⇒ この3点に加えて、鉛直下方に重力による作用候補点が1点存在すると仮定することで、上記の並進1 + 回転2自由度の全てに対して作用候補点を対応させることが可能となる。

⇒ 重力を1点として考えるためには、採用候補点と重心が対向しないように配置する必要がある。

STEP2 ベースとなる支持面と直交する形で物体の水平方向の支持に必要な作用候補点を4点以上設定する。

⇒ STEP1によりこの検討は平面内での問題に限られるようになった。よって並進2 + 回転1自由度に対応した作用候補点を求める。

以上のステップを図例を示しながら詳細に述べる。

*3 重力方向と水平方向を独立に検討可能な場合とは以下のSTEP1にて重力方向の作用候補点3点を定めることが出来る場合のことである。フォークリフトは厳密にはこの条件に適合しない。

*4 本座標系は以降の実装の章での設定とは必ずしも一致していないので注意。

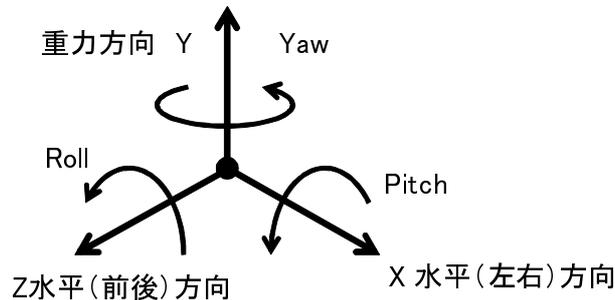


図 2.6 Geometric object closure 設計における座標系の設定

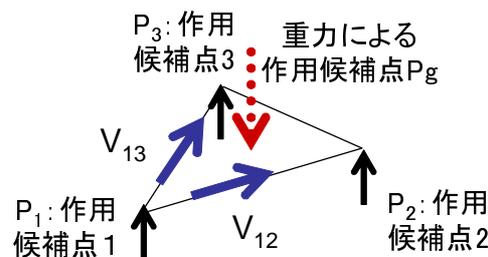
STEP1: 重力方向の検討 (上下並進とロール・ピッチ回転の拘束)

図 2.7 Geometric object closure の設計・検討手順 [STEP1]

図 2.7 に STEP 1 での検討の模式図を示す。まず上下運動に関しては P_g と $P_1 \sim P_3$ のいずれかが反力を発生する作用候補点となる。一方ロール、ピッチの運動に関しては V_{12}, V_{13} をそれぞれ P_1 に対する、 P_2, P_3 の相対位置ベクトルとする。ここで V_{12} を軸とする回転に対しては P_g と P_3 が反モーメントを実現する作用候補点となり、 V_{13} を軸とする回転に対しては P_g と P_2 が反モーメントを実現する作用候補点となる。ここで $P_1 \sim P_3$ のいずれかと P_g が対向して配置された場合、反モーメントを実現出来ない回転の状態が存在することに注意しなければならない。 $P_1 \sim P_3$ が構成する面上に回転軸を設置した場合の回転は上記の回転の組み合わせで実現されるため、ロール・ピッチの 2 自由度に関してはこれにより拘束されたと言える。

STEP2: 水平方向の検討 (前後左右並進とヨー回転の拘束)

Reuleaux[44] によると平面上に設置された任意形状の物体の拘束には最低 4 点必要である。一般的に 4 つの作用候補点を用いて前後左右方向の並進運動を拘束することは容易である。これは各方向に独立に 1 つずつ作用候補点を配置することで実現可能であるからである。一方で、その 4 点によりヨー回転も同時に拘束するためには慎重な検討が必要である。例えば図 2.8(A) に示すように 4 つの作用候補点を点対象に設置してしまった場合、正方形物体は自由にヨー回転をしてしまうこととなる。これは点対象に作用候補点を配置した場合、物体の回転モーメントを支持することの出来る作用候補点のペアが常に同方向のモーメントしか支持出来ないことに起因する。逆に言えば、このような同方向の支持モーメントのみ発生可能な状態を点対称と呼ぶという解釈も出来る。このような状態を回避するためには次の 2 つの方法がある。

1. 回転運動を拘束可能なレイアウトに作用候補点を配置する。
図 2.8(B) に示すように作用候補点を配置することで回転を拘束することが可能である。

2. 作用候補点の数を増やす。(作用候補点を冗長にする。)

図 2.8(C) に示すように作用候補点を増やすことで回転を拘束することが出来る。また作用候補点を複数並べて面とすることで、冗長性を持たせるということも考えられる。図 2.8(D) の”作用候補面”は回転の拘束という意味では同等である。

後者の作用候補面を用いる方法には物体の動作許容範囲を設計するという意味で利点がある。図 2.8(E) のように作用候補面によって物体が拘束されている場合、回転と並進が組み合わさった運動を行った場合でも物体の位置・向きは拘束枠の中に制限される。一方、作用候補点4つを適切にレイアウトした場合(図 2.8(F))では、並進と回転が組み合わさった運動における物体は作用候補点の4つで形成される拘束枠よりも外に突き出ることが可能となる。これは作用点候補点による拘束においては、物体の回転に伴い、作用点で形成される枠の座標軸の取り方が替わるために発生する現象であるが、物体の運動の許容範囲を設計するときにおいてはこの拘束枠の変形は非常に煩わしいものとなる。よって水平方向の検討では作用候補面を用いて拘束枠を形成するのが、もっとも簡便かつ確実な方法であると言える。

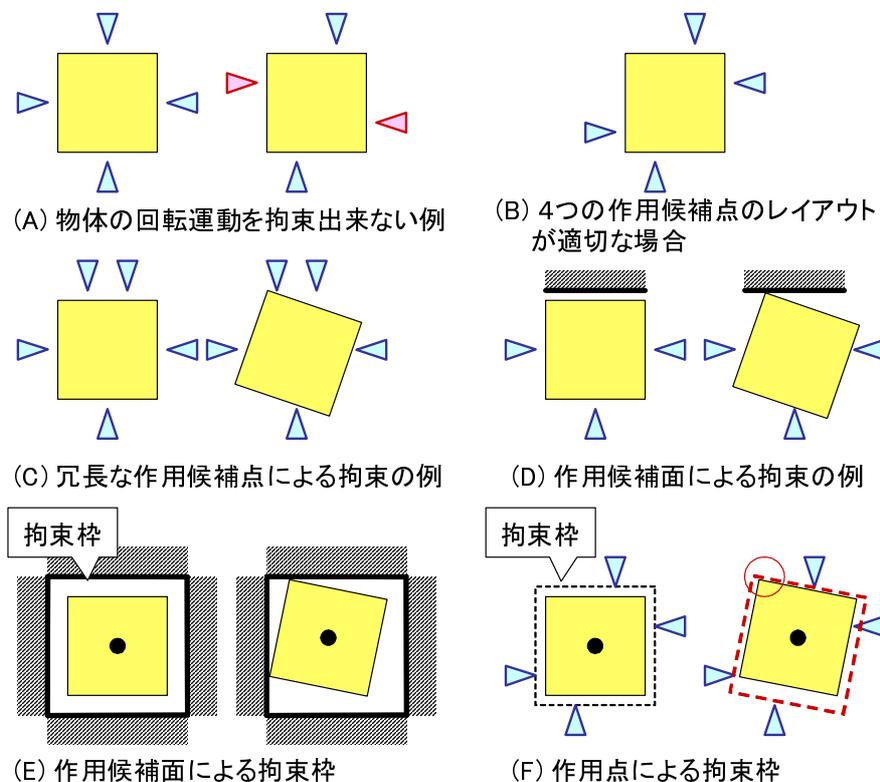


図 2.8 Geometric object closure の設計・検討手順 [STEP2]

作用候補面による拘束は工業用の治具(図 2.9(A))においても確認出来る。一方、金型の位置決めでは、図 2.9(B) に示すような位置決めピンが多用されている。これは金属加工機械において、旋盤を用いて寸法精度の高い軸を製作することが比較的容易であり。またその軸が様々なはめ合い状態で挿入することの出来る位置決めピン用の穴をエンドミルとリーマにより容易に加工出来るという製造面での利点がある。

また幾何拘束の観点としては図 2.10 に示すように位置決めピンでの拘束は、位置決めピンを任意の断面で切断し押し開いた作用候補面の集合となる。これによりピン自身の回転を拘束することは出来ないが、並進に関しては全方向非常に緻密な位置拘束が可能になる。



図 2.9 位置決めブロックと位置決めピン

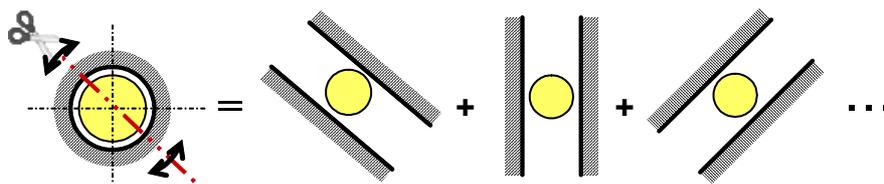


図 2.10 位置決めピンの効果

2.1.6 物品のマニピュレーションと幾何設計のまとめ

本節ではまず従来研究におけるクロージャ概念の整理を行った。続いて機械設計の現場における幾何的な考察の重要性を説明し、幾何的な考察のみで実現出来るクロージャに関して産業用途の運搬で広く用いられているフォークリフトを例として、その可能性の分析を行った。

そして王らが提案した Object closure の幾何的な要素を拡張するための検討を行い、Geometric object closure の提案を行った。最後に Geometric object closure の具体的な設計・検討手順について整理を行い、その過程で従来より産業用途で用いられている位置決めピン、ブロックなどが Geometric object closure の実現において、重要な役割を担う可能性があることを述べた。

2.2 戦略的コンプライアンス

2.2.1 生活環境中における物品搬送・収納作業における課題と戦略的コンプライアンスの対応

第1章で述べたように生活環境中における物品搬送・収納作業には次の3つの課題がある。

1. 生活環境の変化
2. 物品の多様性
3. 人の作業のバラツキ

また、戦略的コンプライアンスとして以下の3つの基本機能を定義した。

1. 規格化 (Regulation)
規格化にはタスク、役割、領域・空間の規格化の3種類がある。
 - タスクの規格化: 複数の作業がロボットから見て常に同種の繰り返し作業となるよう変換する機能。
 - 役割の規格化: ロボット・人それぞれが担当する役割を明確にし、目的のタスクを分割する機能。
 - 領域・空間の規格化: ロボットと人それぞれが主として使用する領域・空間を定義することで、空間を共有させる機能。
2. 補助・強化 (Assist, Enforce): ロボットが取り扱いやすい機構、情報を付加することにより、その性能を補填する機能。
3. 誘導 (Navigation): 人にルールの特長を認識させ、順応させることで人の高い支援能力を自然と引き出す機能。

次節以降では生活環境中における各課題を戦略的コンプライアンスによりどのように克服していくかについて検討する。

2.2.2 生活環境の変化に対応する戦略的コンプライアンス

生活環境が変化することをロボットを含めたなんらかの力で停めることは事実上不可能である。しかしロボットにとって”見える”世界を変化しない安定した環境とすることは可能である。つまりロボットがセンサにより外界の生データを取得し、認識のために特徴量を抽出する際に、抽出される特徴量が一定であればロボットにとって環境は変化していないのと同義である。この実現にはロボットセンサの処理時に安定した特徴量抽出が行える計測環境を整備することが求められる。具体的な手法の1つとしては生活環境中には存在しない特徴(形状、色、パターン、点滅など)を持つマーカを活用することが考えられる。これは戦略的コンプライアンスにおけるロボット能力の”補助・強化”に該当する。さらに一般的に計測器には得意とする設定(レンジ、分解能)というものがあり、その範囲を超えた計測は出力の安定性(信頼性)を欠いてしまう。そこで得意とする設定の異なる複数の装置を連携して目的の性能を実現するという戦略(センサフュージョン)が有効である。これはロボット間における”役割の規格化”の戦略であると言える。

一方、ロボットが物体を操作する際にも物体固有のバラツキ、環境のバラツキがその操作の阻害要因となることがある。そこでロボットの物体操作が常に安定するように外乱を排除する環境を整備することが必要である。具体的には工場のように安全柵による明示的な空間分割は使えないにせよ、ロボットが自らの動作に専念出来る空間を用意することが重要である。

外乱の排除という意味では機械的コンプライアンスが有名であるが、本解決法は機械的コンプライアンスの機能を補完する戦略と位置付けられる。

2.2.3 物品の多様性に対応する戦略的コンプライアンス

生活環境中に存在する多種多様な物品を画一的な制御ロジックで取り扱うことは非常に難しい。一方で人は生活の中で「片付け」というモノ・情報の圧縮作業を行っている。片付けという言葉は様々な作業を含み、非常に広い定義の言葉であるが、その作業の1つにカテゴリズもしくはパレタイズが含まれる。これは物品を幾つかのカテゴリに分類し、同種の物品をひとまとまりにして収納する作業のことである。多くの収納用品（コンテナケース等）もこのカテゴリズ、パレタイズを片付けの基本動作と想定しており、これらの作業はこれまで人間が慣れ親しんだ動作・作業であると言える。

パソコンを含めた情報通信デバイスの中ではこのカテゴリズ・パレタイズが顕著であり、複雑なデータを1つの塊として扱うための”ファイル”，そしてそのファイル群をさらにカテゴリズし、ひとまとまりに扱うために”フォルダ，ディレクトリ”を単位として情報のやり取りをすることは、もはや現代情報化社会においては当たり前の行動となっている。

このようにモノと情報はその扱い方において図 2.11 のような対応関係を持っていることが分かる。

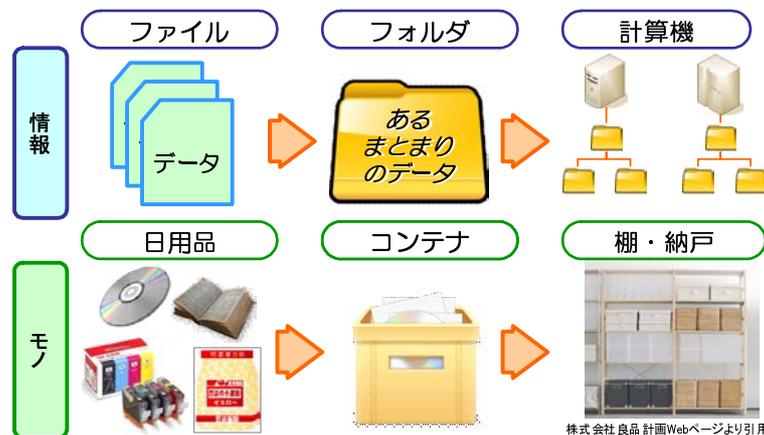


図 2.11 モノと情報のカテゴリズの対応

ここで情報技術が発展した背景を踏まえるとそこには、常に新しい”規格”の制定が係わってくるということが分かる。WWWでの使用を想定して制定されたTCP/IP, HTML, XML, RSSなどといったプロトコルや共通言語の存在により、多くの情報を画一的に扱うことが可能となり情報の流れが促進されたことは言うまでもない。

そこで実際のモノにおいても流れを円滑にするためには、このような規格の存在に注目することが重要となる。まず物品の多様性を回避するために、ロボットの物品操作単位を定義することが必要になる。ここで、その操作単位を1つのコンテナケースと設定することを提案する。これにより様々な物品を操作する動作もロボットにとっては常にコンテナケースを扱うことになり、見かけ上同一の作業を繰り返すことになる。これは正に戦略的コンプライアンスにおけるロボット作業の”タスクの規格化”であるが、サービスを受けるユーザとの関係をみた場合、ユーザがコンテナにモノを収納し、そのコンテナをロボットが取り扱うという意味では”役割の規格化”であるとも言える。

一方で「ユーザは各々の物品を使用したいのに、コンテナケースを媒介しなければならないのは余計な作業が増えるのでは？」という指摘もあるであろう。確かに現状の我々の生活の中でコンテナケースは必ずしも生活に馴染んだ収納装置と言い切ることは出来ない。しかし、これまで人は筆筒、食器棚、本棚という収納装置を活用してきた。これらの棚型収納装置の1つ1つの引き出し・棚段は広義の意味でのコンテナケースと言えるのではないか。さらに解釈すると、これらの引き出しや棚段は専用の設置場所が定められたコンテナケースと考えられる。上記のような解釈を踏まえると、人が食器（お箸、茶碗）を使った後に食器棚の専用の引き出しに収納するのは当然であるし、文房具を使用した後に文具棚もしくは机の引き出しにこれらを収納するのも当然の作業である。つまり、これまでは引き出しというコンテナケースの

設置場所が棚の中しかなかったものが、自由度高く設置出来るようになったと発展的に捉えることが出来る。

さらに、人はモノの所在を自らの行動との対応によって記憶している可能性があり、コンテナに物品を収納しロボットが自動で収納するようなシステムにおいては、モノと行動の対応が損なわれる可能性がある。しかし、一方で人はモノ同士の関係によっても記憶を形成することが可能であると考えられる。つまり、あるモノ (A) を収納する際にコンテナの中にあった別のモノ (B) を視覚で捉えることにより、モノ (A) を探索する際にモノ (B) を検索のインデックスとして用いることが可能になるのである。このようにコンテナケースを媒介することにより、人の脳におけるモノの記憶の形成方法が変化する可能性があることは非常に興味深く、今後の課題として取り組んでいきたい。

また、人とロボットがコンテナケースをハンドリングする方法は必ずしも同じである必要はない。図 2.12 に示すように、人は器用な手指を用いて物品を容易に把持することが可能であるが、ロボットにとって物品の位置を認識し、把持を制御し、さらに安定して把持しているかを認識するのは容易ではない。そこでコンテナケースにロボットがハンドリングしやすい構造を付加することを考える。当然、この構造は本来の機能である物品の収納や人による取り扱いを阻害するものであってはならない。ロボットにとって扱いが容易なコンテナケース構造を整備するという戦略は”補助・強化”に該当する。

上記のロボットの物品操作単位の定義 (コンテナケース) を有効に活用するためには、コンテナケースとそれに搭載されている物品の対応関係を簡潔かつロバストに取得することが必要となる。ここでロボットにとって各々の物品の情報が容易に取得可能なように、全ての物品に RFID タグが貼り付けられている環境を想定する。昨今の画像処理技術の進歩により、テンプレート画像との相関により物品認識を行う技術も開発されてきているが [51]、正確さという意味では直接物品情報を取得可能な RFID 技術が有望であると考えた。また近年物流業界で RFID の費用対効果に関して疑問の声があるが、物品に RFID を貼り付けるメリットを物流業者だけでなく、一般消費者まで共有することでその費用負担を低減可能であると考え、まずは消費者サイドの実用例を本研究が提案するというスタンスを取ることにする。この RFID の環境整備もロボットによる物品情報の取得を補助するという意味で”補助・強化”の戦略に該当する。



図 2.12 人とロボットのハンドリング能力の差異

2.2.4 人の作業のバラツキに対応する戦略的コンプライアンス

人の営み自身がロボットの画一的な動作と比較すると大きなバラツキを持っており、そのようなバラツキを有する (ある意味での) 作業者と協調することは、ロボットにとって1つの大きな課題である。人の作業のバラツキが問題となるのは、ロボットと人間が同一の物体を同一の方法で操作するときである。具体的には前述の戦略によりコンテナケースを人とロボットが取り扱う場合、ロボットが自由に動作可能な空間において人間が任意にコンテナケースを設置したとしても、ロボットの機能に特に問題はない。しかし、ロボットの動作が制限される空間 (例えば収納棚) に片付けられたコンテナケースはある規定の姿勢をしていなければロボットにとって非常に扱いづらいものになってしまう。これは一般的にロボットのアクチュエータが人間の手足ほどフレキシブルなハンドリング能力を持っていないことに起因するものであるが、ロボットの能力を一日両日で高めることは現実的でない。

そこでロボットの動作が制限される空間においては、人間が自然とロボットが動作しやすい状態にコン

テナケースを設置するように誘導するという戦略をとる。これは山中らによって開発されたICカード型のチケット (Suica) 読み取り装置に利用されている戦略 [52] を参考にしている。この読み取り装置ではICカード読み取り範囲, 時間の性能を補うため人がアンテナ部にICカードをタッチするようにアンテナ外装を傾斜させる, 発光によりアンテナ部を強調するという工夫を行っている。誘導の手法として具体的にはガイドプレートのような”機械的な誘導”と, 音声, 発光, 誘導指示線 (道路における白線) などの”情報的な誘導”を組み合わせることを考える。この戦略は戦略的コンプライアンスにおける「誘導」であることは言うまでもないが, 人が補助すべき作業とロボット自身が独立で行う作業を分別しているという意味では”役割の規格化”と捉えることも出来る。

2.2.5 本システムで採用する戦略的コンプライアンスのまとめ

前節での検討結果を表 2.1 に整理する。

表 2.1 生活環境特有の問題と戦略的コンプライアンスの対応

課題	解決策	戦略的コンプライアンスの機能
生活環境の変化	安定した特徴量抽出が行える計測環境の整備	補助・強化
	設定の異なる複数の装置が連携可能な環境の整備	役割の規格化
	ロボットが自らの動作に専念出来る空間を用意	領域・空間の規格化
物品の多様性	物品操作単位をテナケースと定義	タスク・役割の規格化
	テナケースにロボットが扱い易い構造を付加	補助・強化
	各々の物品にRFIDタグを貼り付け	補助・強化
人の作業のバラツキ	人による作業を機械的・情報的に誘導	誘導, 役割の規格化

2.3 機械的コンプライアンス

本節ではまず機械的コンプライアンスの歴史及び分類について整理し，本研究で重視する受動機械的コンプライアンスの重要性について述べる。続いて受動機械的コンプライアンスを実現する上での一般的課題について検討する。

2.3.1 機械的コンプライアンスの歴史と分類

物体のハンドリングにおいて環境との相互作用を考慮した場合，機械的な柔軟性が重要となり多くの研究が行われてきた。特に Peg-in-hole insertion タスクにおいて，その実現方法や精確さについて多くの議論が行われてきており，まずはその知見を整理する。コンプライアンスを実現する方法として，大きく次の2つの視点で分類・整理することが出来る。

- アクチュエータの有無による分類
 アクチュエータを使用しない受動的な機械要素のみでなじみ構造を実現する受動的な方法とアクチュエータを利用した能動的な方法に分けられる。
- 実装形態による分類
 マニピュレータの先端に集中して実装する方式と，マニピュレータの各関節の駆動により実現する分散実装方式に分けられる。

上記の分類方法により分類した結果の概要を図 2.13 に示す。以降では各方式の特徴，研究の歴史等について述べる。

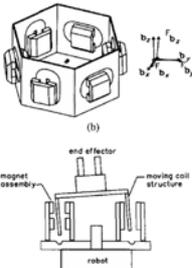
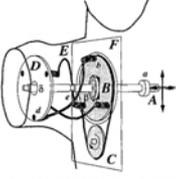
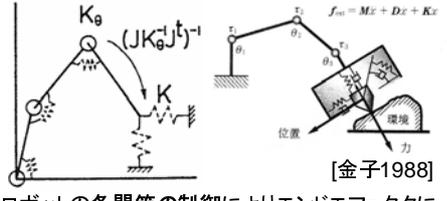
		アクチュエータの有無による分類	
		受動的コンプライアンス (アクチュエータを用いない受動的な機械要素のみで実現)	能動的コンプライアンス (アクチュエータを用いて実現)
実装形態による分類	集中実装方式 (マニピュレータ先端で実現)	 <p>「RCC (Remote Center Compliance)」に代表される，バネ・ダンパ・ガイドなどの機械要素をアクチュエータの先端に装備し，幾何的な誤差を吸収する方法。 [Whitney1982]</p> <p>※ピーエル・オートテック 株式会社カタログより引用</p>	 <p>能動アクチュエータをマニピュレータの先端に取り付け，好みの剛性にコンプライアンス性能を調整する方法。 Coarse Fine manipulator と呼ばれる。 [Hollis1987] [Nakamura1991] [Tsuda 1992]</p>
	分散実装方式 (マニピュレータの各関節で実現)	 <p>人と共存するロボットにおいて，人との接触力を低下させるために柔軟な受動関節を有するロボットが開発されている。但し，実作業にその柔軟性を応用した例はまだ少ない。 [Okada 2001]</p>	 <p>ロボットの各関節の制御によりエンドエフェクタにおいて仮想的な柔軟性を実現する方法。 [金子1988]</p> <p>Equations shown: $f_{ext} = M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx$, $(JK_a^{-1}J^T)^{-1}$, K</p>

図 2.13 機械的コンプライアンスの分類

受動的コンプライアンス集中実装方式

RCC (Remote Center Compliance) に代表される、バネ・ダンパ・ガイドなどの受動的な機械要素をアクチュエータの先端に装備し、幾何的な誤差を吸収する方法。工業用途での実績が非常に多く、高い信頼性を誇っている [53]。

RCC の挙動を含めた Peg-In-Hole insertion タスクに関しては Whitney らにより準静的な解析が詳細に行われた [54, 55]。この解析の中でジャミングの発生する原因がピンと穴との2点での接触であることが示され、また挿入するピンの先端に RCC を用いて仮想的に回転中心を配置することの有効性についても議論している。近年でも RCC の重要性に関しては幾つかの研究が行われており、関心の高さが伺える [56]。RCC の発展版として所望の剛性を設定可能な可変受動的コンプライアンスとして VRCC (Variable Remote Center Compliance) [57] も提案されている。最新の研究としては Yun らがロボットの作業学習フェーズにおける機械的柔軟性の重要性について言及している [58]。

また人の手を模したロボットハンドにおいても受動的な機構・構造への関心が高まっている。石塚らは複合遊星ギアを用いて把持対象物体の形状に馴染むロボットフィンガの研究を行っている [59]。吉川らの研究ではロボットハンドの指先端に Elastic gel で出来た柔軟構造部を設けることにより、対象物体との接触問題を回避している [35]。

受動的コンプライアンス分散実装方式

昨今、生活環境中での人や環境との接触に対応するために柔らかいロボットアームを実現するための研究が多く行われており、それらの実装では受動的なコンプライアンスが分散実装されている例が見られる。Iwata らはロボットアームの一部の関節に機械的な柔軟バネ要素を加えることで、接触力を低減させることを試みている [60]。岡田らは可変コンプライアンスを実現するヒューマノイド用の肩機構を開発している [61] が、その中で投げ釣りを例えとして釣竿のしなり (コンプライアンス性) がエネルギーの蓄積に役立っていることを指摘している。ちなみに現在指摘されているコンプライアンスの効能として (1) 誤差吸収性能、(2) 接触安全性能、(3) エネルギー蓄積性能の3つが挙げられる。

能動的コンプライアンス集中実装方式

能動アクチュエータをマニピュレータの先端に取り付け、好みの剛性にコンプライアンス性能を調整する方法。Macro/Micro Manipulator または Coarse-Fine Manipulator と呼ばれるものであり、1980~90年の間に多くの研究が行われた [62]。当時の時代的な背景としてロボットのアーム角度用エンコーダの分解能や精度が十分でなかったため、それらを補う技術として注目が集まった。Wen-Wei らは非常に柔軟な構造物の先端に高速応答のアクチュエータを取り付けた Macro/Micro Manipulator を構築し、適切な計測システムを導入することで Macro Manipulator の稼動範囲全域で Micro Manipulator の高応答性を確保したままの制御が可能であると指摘している [63]。現在ではエンコーダの高性能化に伴い、MEMS を代表とする半導体プロセスや精密加工に応用が移行している。松本は機械加工において工具の先端にセンサを取り付けることによりワークとの接触力を計測しフィードバックを行う場合に、センサの低剛性が加工状態に悪影響を及ぼしてしまうことに対応するため、接触力に対して負の変位を示すネガティブコンプライアンスアクチュエータを導入し、加工精度の向上を実現している [64]。

また能動的コンプライアンス集中実装方式の特徴として、電磁石を用いて摩擦がゼロの状態を作り出し理想的なコンプライアンス特性を実現している研究 [65, 66, 67] が挙げられる。ただ電磁石を用いた場合、電磁石自身が持つ非線形性が常に制御の課題であった。Tsuda らは5自由度のコンプライアンスを制御できる MESITER を開発し [67]、Whitney が解析的に示した Peg-In-Hole 用受動的コンプライアンス設計における以下の重要なポイント [54] に関して実験的に確認を行っている。

1. ピン挿入時に発生する力とジャミング回避性能に関して相関は認められない。
2. Float 法はピン挿入時に発生する力を最小化することは可能であるが、ジャミング回避性能は通常の RCC と比較して高いとは言えない。

能動的コンプライアンス分散実装方式

ロボットの各関節の制御によりエンドエフェクタにおいて仮想的な柔軟性を実現する方法。部品の押し付けによる位置決めなどを目的として利用されることが多い。位置と力を相互的に制御する問題は Raibert, Craig らのハイブリッド制御法の提案 [68] より後、ロボットの制御分野での関心が高まった。一方で、この位置と力の並列的な制御に関して、杉本は位置と力に分類することに対する物理的根拠がないことを指摘している [69]。マニピュレータの力制御全般に関しては、吉川 [70] や小菅 [70] の論文が詳しい。

能動的コンプライアンス分散実装方式の例として、金子らはロボットアームの先端にて所望のコンプライアンス性能を実現するための手法として、ダイレクトコンプライアンス制御を提案している [71]。横井らは冗長ロボットアームにおいてエンドエフェクタのコンプライアンス性能を実現する方法を提案している [72]。McAllister らはロボットのコンプライアンス行列を実験データより同定する研究を行っている [73]。

受動的コンプライアンス分散実装方式と同様に、能動的コンプライアンスにおいても人と共存可能なロボット実現するために、人・環境との接触力を低減する試みが行われている。Zinn らは柔軟アクチュエータにおける応答性悪化に対する対応策として、低応答・大出力のアクチュエータと高応答・低出力のアクチュエータを組み合わせることで応答性を確保しつつ、接触力を小さくする機構を提案している [74]。Tseserukou らは関節中に組み込んだ小型光学式トルクセンサによって、インピーダンスコントロールを行う制御方式を提案している [75]。

2.3.2 本研究で導入するコンプライアンス方式の選定

前述のように、機械的コンプライアンスに関しては数多くの研究と実績があり、ロボット実用化を狙う本研究としてもこれらの成果の上に研究を積み重ねられることは強みとなる。

中でも受動的コンプライアンスは RCC を中心として産業用途での実績も多く、その安定性を利用する意義は大きい。受動的コンプライアンスの導入例が多い理由に機械的な要素は動作の安定性が高く、また一般的には、各種センサとの組み合わせにより容易にフェールセーフを実現可能であるためであると推測される。

Whitney はロボット (マニピュレータ) 単独の軌道制御と比較して環境との接触問題の重要性について言及し、ロボット自身のイナーシャではなく外界との剛性 (コンプライアンス) に注目することが必要であると述べている [76, 77]。さらにエンドエフェクタ先端における (Remote Center Compliance などの) 受動的な柔らかさが剛性制御やダンピング制御における諸問題を解決する簡潔な方法だとも提案している。大隅らは産業用ロボットにおいて確立されたロボットの高い位置制御系を利用し、弾性機構要素をロボットの一部として率先して取り込み、関節と等価な取り扱いをすることにより、複数のロボットが円滑に協調可能であることを示している [78]。

本研究でもロボットと環境もしくはロボット同士の積極的な接触を必要としており、機械的な要素と安全を確保する簡素なセンサ群を組み合わせた受動的コンプライアンスを導入することとする。また実装方式に関しては、各ロボットの機能・レイアウトに応じて選定を行うため、ここでは限定しない^{*5}。なお以降では戦略的コンプライアンスとの差異を明確にする必要のため、“受動機械的コンプライアンス”と呼ぶことにする。

^{*5} 後に示すコンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) においては、複数の受動機械的コンプライアンス要素を実装したため、受動的コンプライアンス分散実装方式となっている。

2.3.3 受動機械的コンプライアンスの応用例と実現における一般的課題

受動機械的コンプライアンスの導入に当たっては次のような一般的な課題がある。図 2.14 に受動機械的コンプライアンスの簡易モデルを示す。ここで図中矢印の先端にて環境との接触を行うものとする。本モデルでは並進自由度を実現するコンプライアンス要素として記述しているが、回転を実現するコンプライアンス要素でもほぼ同様の検討が必要となる。

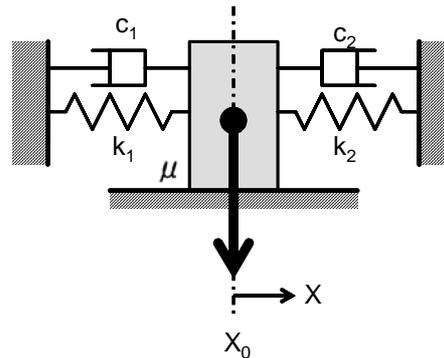


図 2.14 受動機械的コンプライアンスの簡易モデル

- 初期位置確保の問題

受動的コンプライアンスにおいては、様々な外力から開放された後の初期位置 (x_0) が一定の状態になることが求められる。これは初期状態が異なると受動機械的コンプライアンスに求められる性能を実現出来ない可能性があるからである。^{*6}

- 振動の問題

受動機械的コンプライアンスでは柔軟ゆえ、構造自身の振動が問題となることがある。これに対処するために受動的コンプライアンスのバネ係数 (k_1, k_2) が小さい場合には、減衰要素 (c_1, c_2) を加え、自励振動などを予防する必要がある。但し、この減衰要素を強くしすぎると初期位置確保の問題が発生することになる。

- 柔らかさの調整の問題

受動的コンプライアンスの柔らかさの最適値を解析的に求めることは困難である。これは無限に大きいコンプライアンス (0に近いバネ定数 (k_1, k_2)) が必要であるなか、初期位置 (x_0) を確保するためには、摩擦要素 (μ) を乗り越えられるだけの大きさのバネ力が必要であり、この摩擦要素は再現性が低い影響因子だからである。

- 機械的性質の経年変化の問題

機械的要素のうち磨耗部品 (スライダやゴムバネ) はその使用と共に特性が変化してくる。摩擦係数やバネ特性の変化は前述の初期位置にも影響してくるため、メンテナンスを考慮した設計が必要となる。

^{*6} RCC の場合にはピン先端に回転中心が来ることを想定して治具等をレイアウトするため、回転中心がずれてしまうと RCC の性能が低下してしまう。

2.4 生活環境中で動作する物品搬送・収納システムにおけるクロージャ及びコンプライアンス活用指針のまとめ

本章では以下の3つの項目について提案・議論をした。

- 幾何設計を重視し、実用的な **Caging** 拘束を実現するための **Geometric object closure**
機械設計の現場において CAD を用いた幾何設計が重視されていることを述べ、幾何設計によりロボットのロバストな動作を実現することを目的とし、常時の接触が必要ではない Caging 状態を重力や物体の回転の拘束など実用上検討が必要な項目に沿った形で適用可能なクロージャの提案を行った。
- 仕組みとしての” 做い ” を実現する戦略的コンプライアンス
戦略的コンプライアンスの基本機能として次の3つを上げた。
(1) タスク、役割、空間・領域の規格化、(2) ロボットへの補助・強化、(3) 人の誘導
これらの基本機能を用いることにより、生活環境特有の3つの課題に対する、戦略的コンプライアンスの応用戦略について提案した。
課題1：生活環境の変化 ⇐ 安定した特徴量抽出が行える計測環境の整備、設定の異なる複数の装置が連携可能な環境の整備、ロボットが自らの動作に専念出来る空間を用意
課題2：物品の多様性 ⇐ 物品操作単位をコンテナケースと定義、コンテナケースにロボットが扱いやすい構造を付与、各々の物品に RFID タグを貼り付け
課題3：人の作業のバラツキ ⇐ 人による作業を機械的・情動的に誘導
- 誤差・外乱に対する柔軟性・許容性を実現する受動機械的コンプライアンス
物体のマニピュレーションを実現するために、これまで工場等の産業用途で実績のある受動機械的コンプライアンスの安定した性能に着目し、柔らかかつロバストな環境との接触を活用することとした。

第3章

家庭内物流支援ロボットシステムを構成するサブシステムの実現と基本性能評価

本章ではまず家庭内物流支援ロボットシステムのシステム全体設計を行い，続いて各サブシステムの実現と基本性能評価について述べていく。

なおここで本論文の設計項目に関する呼称について整理をしておく。システムの呼称は以下のルールに従うものとする。

1. システムは複数のサブシステムから構成される。
2. サブシステムは複数のユニット（～部）もしくは複数のサブシステムから構成される。
3. ユニットのモジュールまたはコンポーネント（～機構）^{*1}から構成される。

上記呼称に基づき東京大学佐藤・森研究室で開発してきた”Robotic Room 3”[79]を構成要素の関係に分解すると図3.1ようになる。

また設計作業は概ね以下の枠組みで整理する。

1. システム設計
仕様・性能の定義とそれに基づく必要機能の抽出
2. 基本設計
必要機能を実現するための基本構造，方式の検討
3. 細部設計
基本構造・方式を実現するための細部の機構形状・寸法の検討

また，各検討においては判断の基準としてコストを用いることがあるが，定性的な議論として明らかな差異がある場合，ロボットシステムの実用化を目指す本研究としては，検討項目から外すわけにはいかない。一方で1次試作である現時点で体系的な議論は困難であるため，現時点では一検討要素の扱いに留める。

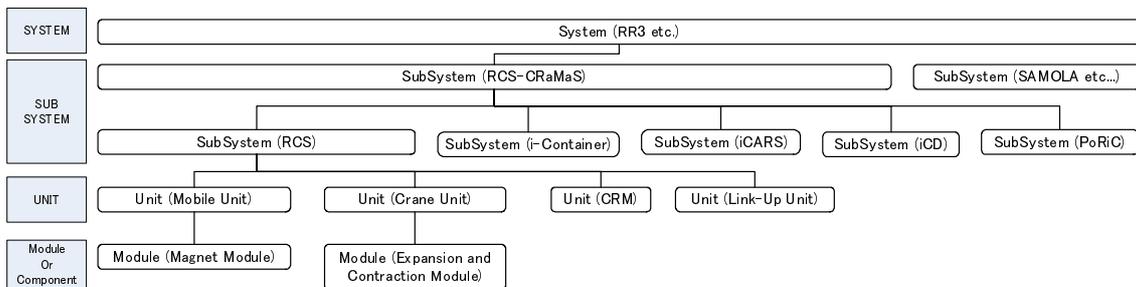


図 3.1 Robotic Room 3 のシステム構成の整理例

*1 モジュールとコンポーネントはほぼ同義の言葉として用いる。

3.1 システム全体設計

本節ではシステム全体構成の決定，役割の割り振りを行う。

3.1.1 家庭内における物品の流れの整理及び家庭内物流における課題の抽出

家庭内物流支援ロボットシステムによる人間のモノへのアクセス支援は図3.2に示すように「保管」「運搬」「受渡し」の3つの主機能による状態遷移から成る。

「運搬」の基本となる生活環境中におけるロボットの移動においては，人間とロボットの空間の取り合いが大きな問題となるが，これまで我々が取り組んできた天井移動ロボットプラットフォーム [80][81] (Robotic Ceiling System, 図3.3) を利用することで問題解決の目途は立っていると見える。^{*2}

一方で「保管」「受渡し」に関しては，各々の生活環境特有の課題が残されている。そこでまず「保管」「受渡し」における課題の洗い出しを行い。それらを解決する物流支援ロボットシステムのシステム全体設計について述べる。

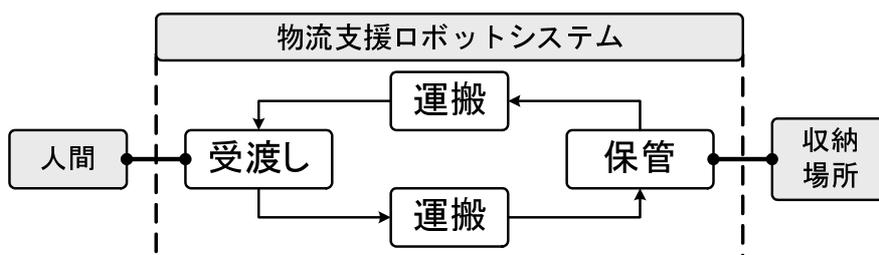


図3.2 家庭内物流支援ロボットシステムにおける状態遷移

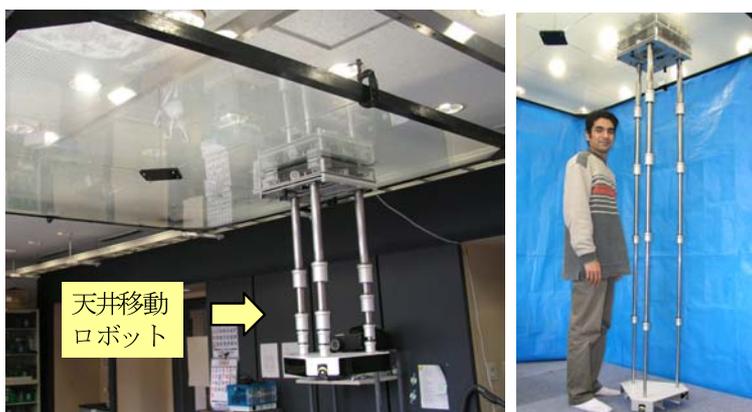


図3.3 天井移動ロボットプラットフォームの概観

^{*2} 天井移動ロボットプラットフォームは全てのロボットに天井面を動作させることで，人とロボットの空間の取り合い問題を解決する手段であるが，エネルギー効率という意味では常にロボットが重力に逆らって自らの筐体や物品の持ち上げを行う必要があり，必ずしも効率的であるとは言えない。しかし，生活環境中ではロボットの動作を阻害する障害物なども多く，障害物の回避のためにロボットの多くの労力が費やされるという問題がある。本研究ではロボットが安定してタスクを実行出来ることを優先し，本プラットフォームを活用する。

「保管」、「受渡し」における課題の洗い出し

●【課題1】居住空間の効率活用

昨今、都市部での人口過密は先進国における重要な問題の一つである。これに伴い居住空間は縮小化の一步をたどり結果として十分な収納空間が確保出来ないという問題も発生してきている。そこで本システムにおける保管においては、居住空間をより効率的に用いる方法を開発する必要がある。一方で、従来の収納方法を著しく損なうようなシステムはユーザへの苦痛を伴う可能性があり、可能な限り既存の収納方法と両立する形での収納方法の確立が課題となる。

●【課題2】収納位置の最適化

人間はモノの役割、価値などを自然と整理し、保管・配置の位置を最適化している。例えば食器は台所近辺に配置されるし、使用頻度の高いものは手元に、その逆は納戸の奥に収納するなどの最適化を行っている。搬送センターにおける物流の最適化とは異なるモノの素性・属性の曖昧さを含む問題を取り扱うという意味で、生活環境中における人間の保管・配置の最適化プロセスの解明とロボットによる再現・実装が課題となる。

●【課題3】受渡しにおける確実性向上

物品の受渡しに関しては、古くよりロボットハンドによる Pick and Place が取り組まれてきたが、形状が未知の物体を自由に操作するまでは至っていない。特に生活環境における物体は多種多様であり、そのすべての形状・性質を詳細に記述することは困難であり、把持の確実性が要求される実生活環境においてこれまでのロボットハンドによる把持戦略は必ずしも実用的とは言えない。この確実に物体の受渡しを行うスキームもしくは機構の開発が課題となる。

「保管」、「受渡し」における課題の解決策の検討

●【課題1】居住空間の効率活用の実現

空間の効率活用という意味では天井移動ロボットプラットフォームのポリシーと同様に、「日常人間が使用していない空間を活用する」という考えが必要となる。一戸建ての住宅を見るとロフトや天井裏収納が普及している。これは人間が居住するには十分な高さや広さのない天井裏を収納空間として活用するという考えである。しかし、この天井裏の収納にはクローゼット等の一般収納と異なり、以下の2つの問題が挙げられる。

- － 出納作業が非常に手間であり、居住者にとって大きな負担となる。
- － 日常使用しない空間だけに、天井裏に収納されているものを人間が忘却してしまう可能性がある。

ここで工場等でよく見られる自動収納庫の仕組みを取り入れることによって上記二つの問題を回避することが可能となる。具体的には

- － 天井裏への出納作業をロボットにより自動化する。
- － 収納庫へ入庫したものの記録を行う。

これによって従来の収納方法を損なうことなく、天井裏空間を収納空間として高効率に活用することが可能となる。また一方ですべての品を天井裏に収納するのは既存の収納方法を損なう可能性があるが、これは天井裏収納庫と同様な棚型の収納庫を従来の収納棚と置換することで回避可能である。

- 【課題3】受渡しにおける確実性向上の実現

確実性を向上するために、受渡し作業を標準化するという方法が工場のライン生産の中で行われてきた。これは対象物体の詳細な情報をシステム側に受渡し、かつその受渡し方法を数種のパターンに分類し、同種の受渡しは常に同じ手順・方法で実施するというものである。

これに類する解決策として把持方法の情報を記載したタグを物体に付与する研究[23, 16, 82]があるが「ロボットのための環境を整備する」という概念を提言した重要な研究である一方で、生活環境中の物体は実に多種多様であり、これらすべての受渡し戦略をタグに記述するという点では、現実的であるとは言い難い。そこで「家庭内における物品受渡しの標準化」を念頭に、人とロボットが容易にモノを受渡し可能な「接点」の構築に取り組むこととする。戦略的コンプライアンスの実現方法に関しても述べたが、ここでは「受渡しにおける接点」として、人が様々なモノを収納するのに十分な積載性能を持ち、またロボットにとって位置発見、把持、運搬、収納が容易となる補助機能を実装したインテリジェントコンテナ（以降”iコンテナ”と記述）を構築し、家庭環境内での人間とロボットシステムの物品の受渡しをより確実なものとする*3。システムのコア要素としてiコンテナを位置づけ、ロボットのタスクを規格化している点でiコンテナの導入は戦略的コンプライアンス適用の代表例と言える。

- 【課題2】収納位置の最適化の実現

人間は日常の整理・整頓の中で使用頻度、将来的な価値、使用組み合わせなどの様々な情報を頭の中で処理している。一方で前述の課題3の解決方法としてモノの受渡しをiコンテナを用いて行うこととした。これにより基本的に収納品はコンテナ内に設置されることになり、このコンテナに内容物を認識させる機能を実装すればモノの使用頻度、タイミング、使用組み合わせなどの一通りの情報が得られ、これを処理することによって収納位置の最適化を図ることが出来る。

具体的には、以下の収納最適化方法に対応したシステムを構築することが重要であると考えられる。

1. 天井裏収納庫と棚型収納庫の収納区別

使用頻度の高いものは棚型収納庫に設置し、その逆は天井裏に収納するといった区別を行うことにより「人間の従来の収納方法を損なわずに空間を効率的に利用可能」という利点を享受出来る。

2. 同一コンテナへの収納組み合わせ

同時に使用されることの多いモノは同一のコンテナに積載する方が出納の手間が省ける。

課題と解決策のまとめ

表 3.1 に本節での検討結果をまとめる。

表 3.1 課題と解決策のまとめ一覧

課題	解決策
1. 居住空間の効率活用の実現	天井裏自動収納庫及び棚型自動収納庫の構築
2. 収納位置の最適化の実現	iコンテナによるモノの使用履歴情報の取得とその情報に基づく、収納場所・収納組み合わせの最適化
3. 受渡しにおける確実性向上の実現	種々の受渡し補助機能を搭載した“iコンテナ”を仲介とする、人間とロボットシステムのモノの受渡し。

*3 ここにおけるインテリジェントとはコンテナケースが物品収納の客体となっているだけでなく、物品搬送・情報収集を主体として行うという意味において知能化されていることを表現している。

3.1.2 システムの機能分析と構成の検討

まずシステムに必要な主機能の整理を行い、次にそれらを実装するシステム構成について述べる。

システムの主機能の整理

i コンテナを接点として人間とシステムの間でモノのやり取りを行う上で必要なシステムの主機能を保管・運搬・受渡しの流れに沿って図 3.4 に整理する。本システムに必要な主機能は以下の5つとなる。

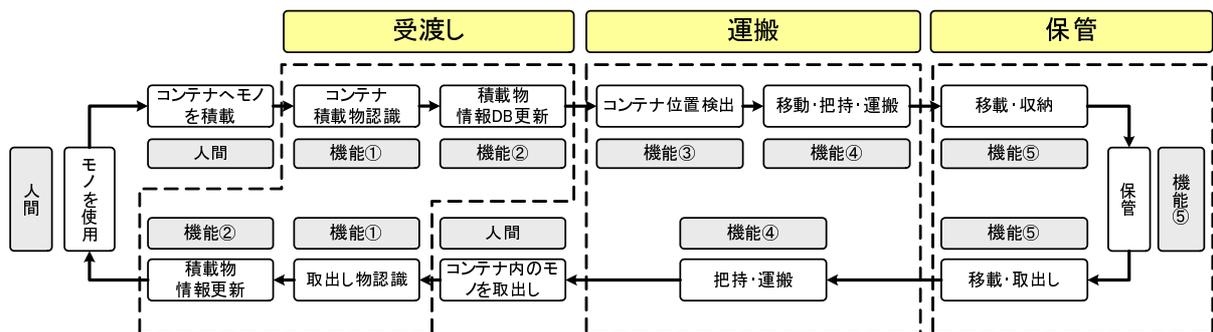


図 3.4 家庭内物流支援ロボットシステムの主機能の流れ

- 主機能 1: i コンテナの積載物の変化を認識する。
- 主機能 2: 機能 1 によって認識された積載物の変化情報を蓄積・管理する。
- 主機能 3: i コンテナの位置を認識し、運搬に備える。
- 主機能 4: i コンテナを把持・運搬・設置する。
- 主機能 5: i コンテナを収納取出し、保管する。

以下で5つの主機能のタスクおよび実装方針について述べる。なおここで上げる主機能は実装上のサブシステムとは1対1で対応しておらず、1つのサブシステム上に複数の機能が実装されるものもある。

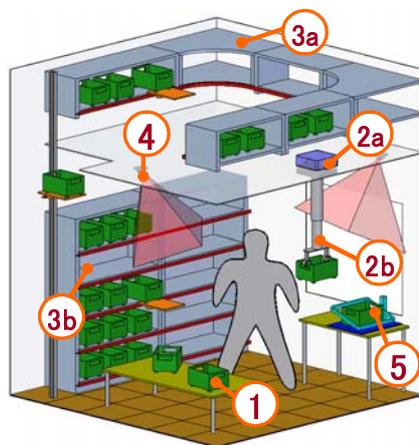
- 主機能 1: i コンテナ積載物認識機能
 昨今物流業界で普及活動が盛んな RFID 等のタグを読み取る機能を用いて、積載物の認識を実現する。またこの認識結果は人間に提示し、必要によって処置の確認を問いかける。この機能は部屋中に分散される i コンテナ自身に実装される場合もあれば、i コンテナをバッチ的に処理するような専用のドックで実装する場合もある。
- 主機能 2: 家庭内物流情報管理機能
 i コンテナ積載物認識機能により取得された積載物情報をネットワーク経由で取得し、データベースとして検索可能な形で蓄積する。また蓄積した情報は収納最適化ソフトウェアによって処理され、生活者への収納アドバイス等の形で情報支援を行う。
- 主機能 3: i コンテナ位置認識機能
 この機能は部屋中に分散配置されるセンサと i コンテナに実装されるマーカの組み合わせによって実装される。なお「位置の認識」とは部屋の中からコンテナを発見するという「大域的位置計測」とコンテナに接近したロボットに詳細なコンテナの相対位置・姿勢を伝達する「局所的位置計測」の両者を含んでいる。
- 主機能 4 - 1: i コンテナ運搬機能
 天井移動ロボットプラットフォーム [81] を拡張して、生活環境中の居住者や家具などの物品と干渉することなく、コンテナを運搬する。
- 主機能 4 - 2: i コンテナ把持誘導機能

i コンテナをロボットにとってハンドリングしやすい物体とするため、ラフなロボットの位置制御でも把持へと導くガイド機能と、把持・固定を行うロック機能を実現する。

● 主機能5：i コンテナ収納・取出し・保管機能

天井裏収納庫と棚型収納庫においてi コンテナの移載や収納庫間の荷移しなどを実現する機能。既存の物品棚を拡張することによって自動収納庫を実現するのが好ましい。また、工業用の自動収納庫とは異なり、巨大なスタックークレーンの専用空間を用意するのではなく、可能な限りコンパクトなロボットを実現し、常時の空間占有を避ける必要がある。

システム構成の検討



(1) インテリジェントコンテナ (iコンテナ)

- ・日用品のタグを読み取り、物品使用ログを取得する
- ・人およびロボットが運搬、収納作業し易い構造を持つ

(2) 天井移動型コンテナ運搬ロボット

- 天井懸架移動部：生活環境を侵害せずコンテナを運搬可能。
- コンテナ操作部：外乱に柔軟にコンテナの把持が可能。

(3) 家庭用コンテナ自動収納庫

- 天井裏収納庫：長期収納する物品を保管する。
- 棚型収納庫：日々使用する日用品を収納する。

(4) コンテナ位置認識システム

- ・コンテナの発見から詳細な位置計測までを網羅する。

(5) iコンテナ用多機能ドック (iDock)

- ・収納庫への日用品の受け入れ口、コンテナに入っているモノの認識、重量の計測等を行う。

図 3.5 家庭内物流支援ロボットシステムのコンセプトスケッチ

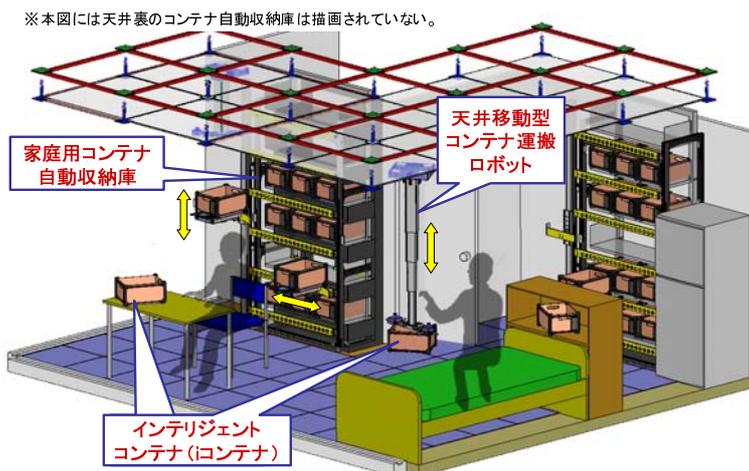


図 3.6 家庭内物流支援ロボットシステムの全体構成図 (3D-CAD データより作成)

本節では前述の主機能群を実現する「家庭内物流支援ロボットシステム」の構成について示す。図 3.5 にシステムのコンセプトスケッチを示す。図 3.6 に 3 次元 CAD データより作成した、システムの全体構成図を示す。本システムは複数の機能特化型ロボットが連携することによって、空間効率高く日常生活の物品を半自動で収納・管理するシステムであり、次のサブシステムより構成される。

- インテリジェントコンテナ (i コンテナ) intelligent container (i-Container) ⇒ 3.2 節
i コンテナ積載物認識機能と i コンテナ把持誘導機能を実現する i コンテナ本体。物品収納作業における人とロボットの媒介者として本システムの戦略的コンプライアンスの要に位置付けられる要素である。i コンテナは戦略的コンプライアンスを実現するために、構造的、知能的に強化された存在である。
- 天井移動型コンテナ運搬ロボット Ceiling mobile robot for container transfer. ⇒3.3.3.4 節
i コンテナ運搬機能及び i コンテナ把持誘導機能を実現するサブシステム。永久磁石誘導型天井吸着法 [80][81] によって天井面に懸架して移動をすることにより、生活環境中の人間と低干渉で動作することが可能。またコンテナ操作部として高コンプライアンスマニピュレーション機構を実装することにより、コンテナとの位置決め誤差やコンテナ自身の傾斜を吸収して把持動作を実行することが可能である。
- 家庭用コンテナ自動収納庫 Home-use automated container storage/retrieve system ⇒3.5 節
i コンテナ収納・取出し・保管機能を実現するサブシステム。天井裏収納庫と棚型収納庫をシームレスに繋ぎ、空間効率の良い収納設備を実現する。また、家庭内での安全かつ空間低干渉な動作を実現するために、垂直・水平動作を分割した特殊な駆動方式を採用しているのが特徴である。天井裏収納庫はこれまで人が効果的に活用出来なかった天井裏のスペースを収納空間として活用可能である。棚型収納庫は市販されている家具にオプション構造物を設置することで実現可能。通常の棚と同様に人間が直接アクセスし物品の操作が可能である点が、工業用の自動収納設備と異なる。
- コンテナ位置認識システム Position recognizer for intelligent container. ⇒ 3.6 節
i コンテナ位置認識機能を実現するサブシステム。部屋の中からのコンテナ発見及び大域的位置計測は部屋中に散在させた安価なカメラを利用し、ロボットがコンテナの操作準備として行う局所的な位置計測ではコンテナ運搬ロボットにカメラを取り付けて実施する。
- i コンテナ用多機能ドック (iDock) Multi-functional dock (iDock) ⇒ 3.7 節
棚型収納庫が収納部屋に一括で施設される一方で、iDock は各部屋に1つずつ設置され、コンテナにとっての一時保管場所もしくはハブ拠点となる。また RFID アンテナによる搭載物の認識や荷重計測など低コスト版の i コンテナで省略されている機能を補うことで、コンテナプロパティ情報を円滑に更新する。なお iDock の実現に関しては勝代の論文 [83] にて詳細を述べているため、本論文では概要を述べるに留まる。
- 家庭内物流情報管理システム Logistical information management system in living space ⇒ 3.8 節
家庭内物流情報管理システムは i コンテナに積載された物品情報を収集し、それらを分析することにより物品の収納場所・形態の最適化、または廃棄時期の助言などを行う。また本研究で構築したシステムにおいては物品の登録等の情報管理も行う。

3.1.3 家庭内物流支援ロボットシステムが導入された生活

本研究が提案するシステムを導入した場合の生活の様子を図 3.7 に示す。

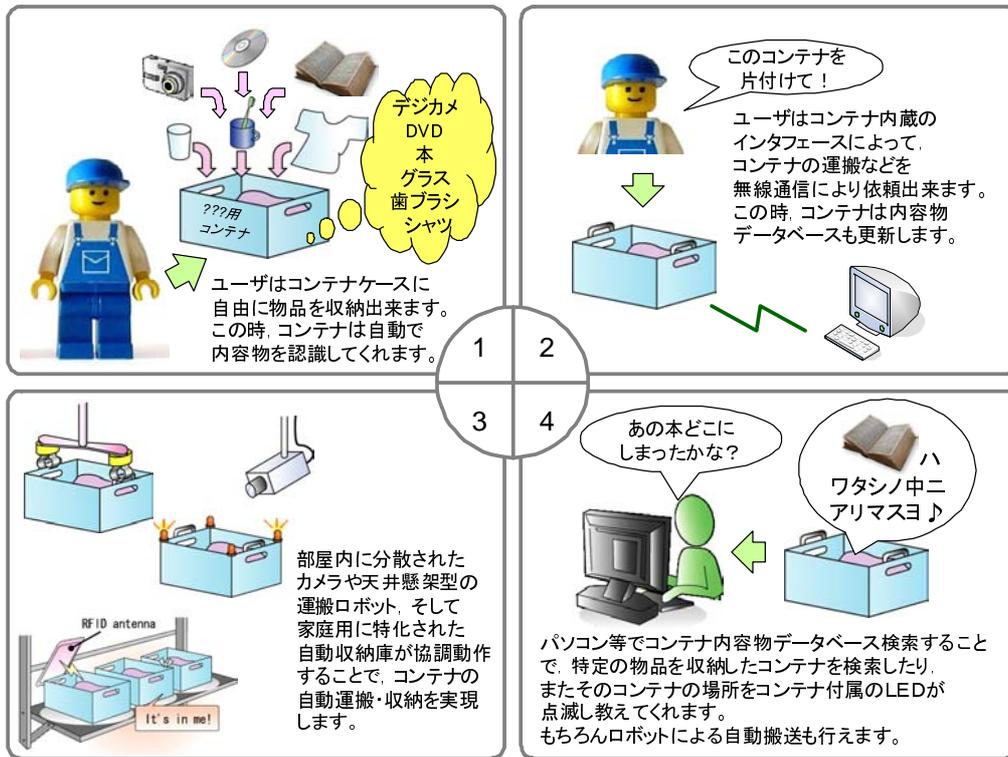


図 3.7 家庭内物流支援ロボットシステムを用いた物品収納ストーリー

3.1.4 本研究で実現する家庭内物流支援ロボットシステムにおける前提条件

なお、以降の議論においては以下のような前提条件を置いてシステムの開発を行っている。

- 本システムを使用するユーザは物品の収納に関心があり、生活環境がいわゆる整理・整頓された状態になることを望んでいる。
- システムの動作障害となるユーザの行動に関して、ユーザ自身がある程度の知識を持っており、敢えてその行動を選択することはしない。具体的には以下のような行動を取らない。
 - － i コンテナの物品収納容積を超えて物品を収納し、ロボットによる操作を阻害する。
 - － コンテナ運搬ロボットがコンテナを運搬している際に、コンテナ運搬ロボットの移動方向に立ちふさがる。
 - － コンテナ運搬ロボットがコンテナを把持しているときに、コンテナを横取りする、もしくはコンテナ運搬ロボットにわざと接触する。
 - － 家庭用コンテナ自動収納庫が操作しようとしている i コンテナを横取りする。
 - － コンテナ位置認識システムが稼動中に、カメラの視野を塞ぐ。
- 本システムが稼動するに当たって必要な環境情報（家の構造、家具の配置）などはシステム側がデータとして所有しており、それらはシステム稼動中に変化しない。

3.1.5 家庭内物流支援ロボットシステムにおける不確実性要因の整理

本節ではまず、生活環境中で動作するロボットシステムにおける、不確実性の要因について構造的な把握を行う。図 3.8 に誤差要因の構造分類化を示す。この分類では誤差要因に関連すると思われる不確実性の原因を列挙、各々について具体的な誤差要因項目を整理した。本整理は家庭内物流支援ロボットシステムの構成における不確実性要因を整理したもので、必ずしも全ての一般的なロボットシステムにおいて適応可能な分類方法ではない。しかし、本項目をベースに各々のロボットシステムにおける不確実性を評価するのに、十分な項目を有していると考えている。この整理を元に、物品搬送・収納作業の流れに沿ってタスクを実現する上で、各サブシステムにおいて対処する必要のある誤差要因と対策案を図 3.9 に示す。なお、本対策案はこれから詳細に説明をするサブシステムの実装特有のものも含まれていることに注意されたい。以降では本対策案を実装した、各サブシステムの実現について述べる。



図 3.8 家庭内物流支援ロボットシステムにおける不確実性の構造分類化

動作フェーズ	動作項目	動作内容	符号	不確実性要因	符号	本システムにおける対策案	
受渡し	コンテナ積載物認識	タグ情報の読み取り	-	計測距離不足	8-2	UIによる読み取り失敗のユーザーへの通知	
	積載物情報DB更新		-	金属の影響(環境ノイズ)	8-1	コンテナ構造材の樹脂・ダンボール化	
運搬	(A) 位置認識①	コンテナ位置検出(1:大域的的位置認識)	LEDマーカ位置概算	A1	環境ノイズ	8-1	LEDマーカの周期的点滅を利用した耐環境性
			LEDマーカ頂点抽出		人、ロボット、モノによるオクルージョン	8-6	複数のカメラを設置することにより、オクルージョン状況を回避
			LEDマーカ位置計算		環境ノイズ	8-1	位置概算時の画像より頂点探索用2値化処理の閾値の設定
			LEDマーカ距離計算		分解能不足、離散化、焦点不一致	8-4,5	LEDマーカの重心位置を計算する
	(B) 位置認識②	コンテナ位置検出(2:局所的的位置認識)	移動U位置・方向認識	B2	採用した拘束条件に引っ張られる	9-3	複数の条件を採用した結果の平均を答えとしし採用する
			コンテナ運搬ロボットの高さ認識		校正誤差	8-7	複数画像による校正結果の平均を採用
			LEDマーカ位置概算		機器設置誤差	8-8	部屋全体を網羅するような市松模様のシートを用いてキャリブレーションを実施
			LEDマーカ頂点抽出		計算誤差(float, 三角関数)	9-1,2	微少量のため初期検討では無視できるものとする
			LEDマーカ距離計算		人、モノとの接触	6-1,2	天井懸架型移動ロボットの採用により人・モノとの接触の可能性を低減
					制御通信の断絶、遅延	7-1,2	アクブリッジメッセージの実装による、通信確認
	C移動	コンテナ運搬ロボットからのコンテナ位置への接近	水平移動	B1			
		コンテナ運搬ロボットからのコンテナ位置への下降・接近	水平移動				
	(D) 把持	コンテナの把持	移動U位置・方向認識	B3	機器設置誤差	8-8	計測器の座標系とロボットの座標系を校正時に対応付け 2Dコードマトリクスシートの設置誤差は回避不能
			移動U位置・方向制御		サンプリングレート不足	8-3	計測ミス多発時に移動速度を落として計測
			高さの制御		ガラスの積み	2-1	微少量のため初期検討では無視できるものとする
			傾きのパッシブ制御		伸縮機構の傾き	2-1	伸縮機構傾き量の計測→補正の必要性の検討
			ピンの挿入		環境ノイズ	A1と同様	
			ピンの連結		ロボットの筐体によるオクルージョン	8-6	ロボット自身の筐体に移りこむ画像領域から余裕をもった撮像位置の設定
コンテナの持ち上げ			環境ノイズ		A1と同様		
コンテナ運搬ロボットからのコンテナ位置への巻上げ			分解能不足、離散化、焦点不一致		A1と同様		
コンテナ運搬ロボットが自動収納庫の受渡し位置に移動			採用した拘束条件に引っ張られる		A1と同様		
コンテナ運搬ロボットが自動収納庫の受渡し位置に移動			機器設置誤差		A1と同様		
(E) 運搬	コンテナ運搬ロボットが自動収納庫の受渡し位置に移動	水平移動	D1	校正誤差	8-7	キャリブレーション時にエンドエフェクタ座標での位置計測を可能にする	
		移動U位置・方向制御		B2と同様			
		高さの制御		局所的的位置認識の誤差(B3の結果)	-	減速タイミングをコンテナ推定高さ+50mm程度とすることで安全側に設定	
		傾きのパッシブ制御		移動U位置・方向認識の誤差(B2と同様)	4-2	微少量のため初期検討では無視できるものとする	
		ピンの挿入		永久磁石誘導法のスティックスリップ	2-1	支持するボールローラにばね機構を実装 → 将来的には磁石モジュールとローラの一体化を検討する	
		ピンの連結		ガラスの積みによるホイールの非接触	4-1	磁石の吸着力の一部をグリップ力にするための押付けバネの追加	
		コンテナの持ち上げ		摩擦不足によるホイールのスリップ	-	マニピュレーション機構のコンプライアンス(ピン溝幅余裕)で対処	
		コンテナ運搬ロボットからのコンテナ位置への巻上げ		局所的的位置認識の誤差(B3の結果)	5-2	コンテナ運搬ロボット下端に2軸の回転ジョイントを実装	
		コンテナ運搬ロボットが自動収納庫の受渡し位置に移動		製造時のピンの設置(位置・傾き)誤差	1-1	マニピュレーション機構のコンプライアンス(XYスライダ)で対処	
		コンテナ運搬ロボットが自動収納庫の受渡し位置に移動		連結部の摩擦	3-3	連結ピン、プレート素材をSUS材にて製作し摩擦を低減	
(F) 移載	コンテナ自動収納庫のコンテナ運搬ロボットへの位置合わせ	水平制御	F1	連結部の摩擦	3-3	連結ピン、プレート素材をSUS材にて製作し摩擦を低減	
		高さ制御		コンテナ運搬ロボットからのコンテナ位置への巻上げ	5-3	コンテナに積載物重量測定用のセンサ	
		ピン連結解除		計算誤差(float, 三角関数)	9-1,2	微少量のため初期検討では無視できるものとする	
		コンテナ収納・取り出しロボット動作全般		D1と同様	-	ガイドプレートによる位置決め方式を採用	
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		水平位置計算ドリフト	9-4	リミットスイッチを用いたマイルストーン地点でのキャリブレーション	
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		上下移動制御エンコーダ刻み	9-1	微少量のため初期検討では無視できるものとする	
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		コンテナ不接地による荷重摩擦	5-1	コンテナ移動ロボット(コンテナ操作部)の制御目標高さを若干低めにし、確実な接地を実現する	
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		制御通信の断絶、遅延	7-1,2	アクブリッジメッセージの実装による、通信確認	
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		高さ制御	F2と同様		
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		水平制御	F1と同様		
(G) 収納	コンテナ収納・取り出しロボットの移動	高さ制御	G1	高さ制御	F2と同様		
		水平制御		F1と同様			
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		G4	棚上の障害物(人が設置したコンテナ等)	5-4	コンテナ収納ロボットの左右に実装された接触スイッチで障害物を認識
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		F2	棚上の障害物(人が設置したコンテナ等)	5-4	フォークテーブル先端の赤外線センサにて障害物を認識
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		G2	テーブルの積み	2-1	テーブルの板の両端を曲げ加工して積み低減する
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		G2	レールの積みによる機体の傾き	2-1	ステンレスレール素材の十分な厚みを確保
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		G2	荷重のローラ押し付けによる機体の傾き	2-1	金属ローラを採用し、上下ローラ間の距離を十分に確保
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		G3	テーブル先端と棚段との接触	4-3	テーブル板先端にローラを設置し、摩擦を低減する
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		G3	コンテナと棚段とのすべり摩擦	4-3	コンテナの底面(フラットスタンドバー)を樹脂材料にすることで摩擦を低減する
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		H2と同様			
動作フェーズ	動作項目	動作内容	符号	不確実性要因	符号	本システムにおける対策案	
保管	(H) 取り出し	コンテナ収納・取り出しロボット動作全般	H1	制御通信の断絶、遅延(G1と同様)			
		収納段までのコンテナ収納・取り出しロボットの移動		F2と同様			
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		F1と同様			
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		-	テーブルの積み(荷物ないため小)	-	微少量のため初期検討では無視できるものとする
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		H1	コンテナ位置のずれ(人間が設置する際)	5-4	RFIDアンテナをセンサとして利用した設置位置の誘導+ガイドプレートによる自動位置決め
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		H2	コンテナ設置位置のズレ(人が設置した後)	5-4	コンテナガイドプレートを棚に設置することにより、テーブル挿入動作によりコンテナの位置が規定される。
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		H2	フックと穴位置との位置合わせ誤差	3-1	フックの溝穴とフック先端形状に余裕を持たせることで自動的にロック状態になるようにする
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		H2	フックプレートとコンテナの接触摩擦	4-3	フックプレートを定摩擦素材(POM)で製作
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		H2	フックプレートの摩擦	3-3	定期的なメンテナンスによりフックプレートを交換
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		G2と同様			
(I) 移載	iCARSスタッククレーンのコンテナ運搬ロボットへの位置合わせ	水平制御	I1	F1と同様			
		高さ制御		G4と同様			
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		F2と同様			
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		G5と同様			
運搬	J運搬	コンテナ収納・取り出しロボットの移動	K1	D2と同様			
		コンテナ運搬ロボットからのコンテナの解放		目標地点の高さ情報	10-1	クレーンのスチールベルトの積みにより多少の上下誤差を許容可能	
受渡し	K解放	コンテナ運搬ロボットからのコンテナの解放		高さ認識+制御			
		コンテナ収納・取り出しロボットの移動		F1,F2と同様			

※1:基本的に頻繁にモノの受渡しをする机の高さなどはGUIによって数値を設定しておくものとする

- Geometric Closureに関連する項目
- 戦略的コンプライアンスに関連する項目
- 機械的コンプライアンスに関連する項目

図3.9 家庭内物流支援ロボットシステムにおける不確実性の詳細と対応策

3.2 インテリジェントコンテナ

本節では家庭内物流支援ロボットシステムの中核技術を成す、インテリジェントコンテナ（iコンテナ）の実現について述べる。まずiコンテナのバリエーションについて整理を行い、システム設計において要求仕様の検討を行う。続いてインテリジェントコンテナの最上位クラスに位置付けられるクラスSと中間クラスに位置付けられるクラスA、そして最廉価版のクラスEについて実装を述べる。実装したiコンテナの基本性能を確認する試験を行い、最後にiコンテナに用いられている技術についてまとめる。

3.2.1 iコンテナのバリエーション整理

物品には、それぞれの持つ役割に応じて保管・収納期間が異なる。そのため、iコンテナにも収納する物品の多様性に応じたバリエーションが求められる。そこで本研究ではコンテナバリエーションとして機能・コストのトレードバランスを実現するため、「CLASS S, A, E」の3段階を用意することとした。これは物品には保存される期間によって、長・中・短期の3つのカテゴリが存在すると仮定しており、その保管期間が長いものほど直接的に使用される機会が少なくなるため、コンテナの機能が少なく、安価であることが求められるとの考えによるものである。3者の役割りは次の通りである。

- クラスS：液晶表示デバイス、ボタン入力など、フルスペックの機能を有し、常に人の傍に居て人とロボットシステムのインタフェースの役割りをするiコンテナの最高クラス。
- クラスA：クラスSより液晶表示デバイスの簡略化及びRFIDタグ認識機能の削除によりコスト低減を狙ったクラス。外部のRFIDタグ読み取り装置によって積載物情報を更新する必要がある。
- クラスE：長期間収納するものを収容するためのコンテナ。単体では人間とのインタフェースは搭載せず、物品の収納のみを行う。クラスA同様に外部の読み取り装置によって積載物情報を更新する必要がある。天井移動型コンテナ運搬ロボットによる搬送への対応はオプションとなる。

表 3.2 に i コンテナのバリエーションと各コンテナの特徴と機能リストを示す。

表 3.2 コンテナバリエーションと各クラスで実装する機能の一覧

		← 高機能・高価		→ 低機能・安価
クラス イメージ図 概要		クラスS	クラスA	クラスE
機能	 身近に設置する インタフェース			 長期保存用
		iコンテナの機能をフルに搭載したクラス。人の傍らに常においておき、物流支援システムとのインタフェースとしての役割りを担う。	クラスSのLCD表示デバイスを簡略化及びRFIDタグ認識機能を削除。主として自動での片付け（整理整頓）に用いるコンテナ。	長期間収納するものを保管するためのコンテナ。衣替えの時期等に、天井裏収納品を一括して出し入れするのに有効である。
フォーク運搬対応		○	○	○
コンテナ把持誘導		○	○	△
積載物RFIDタグ認識		○	×	×
コンテナ位置光学計測認識		○	○	×
荷重計測		○	○	×
ユーザ支援情報提示		○	×	×
運搬感知		○	○	×
消費電力管理		○	○	×

※ ○:機能有、×:機能無、△:選択可 ← 家庭用タコンテナ自動収納庫の中のみで使用する場合は、フォーク運搬にのみ対応。

3.2.2 システム設計（要求仕様，機能の検討）

本節ではインテリジェントコンテナに要求される機能について検討する。なおここでは全ての機能を実装するクラスSを想定して議論を進める。まずiコンテナの主な役割りは次の4つ(図3.10)である。

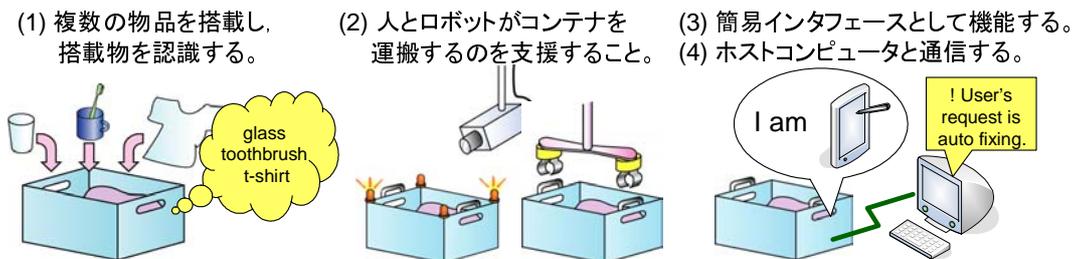


図 3.10 インテリジェントコンテナ役割の整理

- (A) 複数の物品を積載し，更に積載内容物の認識による物品の使用情報，収納情報を取得すること。
- (B) 人，ロボットによるコンテナ運搬時の支援を行うこと。
- (C) ユーザインタフェースとして人間からシステムへの指令を受け付けること。
- (D) ホストコンピュータと通信を行い積載物情報，ユーザ指令情報などを伝達すること。

これらの役割りにおいて要求される仕様を以降で整理する。

物品積載に関する要求仕様

iコンテナによる物品積載に関しては次の3つの機能が必要である。

- 物品積載機能
複数の物品を効率よく積載出来るものとする。なお最大積載荷重は5[kg]と設定する。
- 積載物タグ情報認識機能
RFIDタグの付いた積載物の認識が出来るものとする。
- 積載重量認識機能
荷重センサにより積載物の重量を計測可能とし，ロボット運搬の際のオーバーロードを予防する。

人，ロボットによる運搬に関する要求仕様

人やロボットによる運搬のために，iコンテナに要求される機能は次の6つである。

- 人間による把持の支援機能
人間にとって把持・運搬しやすい構造であること。
- 運搬感知機能
システム側がコンテナの移動を逐次的に感知するため，人間による運搬を認識可能なこと。
- コンテナ多段設置機能
一般のコンテナケース同様に，複数のコンテナを重ねて設置可能なこと。
- コンテナ位置認識支援機能
運搬準備として行われるロボットによるコンテナ位置計測の精度向上に寄与すること。
- 天井ロボット把持支援機能
コンテナ運搬ロボットによる把持を支援する構造を有する。
- コンテナ設置面状態認識機能
コンテナ運搬ロボットがコンテナを操作する際にコンテナが平面に置かれていることが確定してい

るとタスクの実行可能性が高まるため、コンテナが設置されている面の状態を認識可能とする。

- 家庭用コンテナ自動収納庫移載支援機能
家庭用コンテナ自動収納庫における移載作業を支援する構造を有する。

ユーザインタフェースに関する要求仕様

ユーザインタフェースとしてiコンテナに求められる機能は次の2つである。

- ユーザコマンド入力機能
専用のデバイスではなく、身近な情報端末装置として簡単なコマンドなどの入力を受け付け可能なこと。
- サービス情報提示機能
積載物認識結果、積載重量等の情報をユーザに提示可能なこと。

ホストコンピュータとの通信に関する要求仕様

ホストコンピュータには大きく2つの役割がある。1つはコンテナの位置、収容物のデータベース、ログを作成し、ユーザが後に検索するときのルックアップテーブルを整備する。もう一つはiコンテナを通じて送信されるユーザの要求を解釈し、他のロボットに動作指令を送ることである。ホストとの通信について求められる機能は次の2つである。

- ホスト状態通知要求回答機能
ホストが定期的に行う、コンテナ内部状態の変化通知要求に回答する。
- ユーザコマンド伝達機能
ユーザインタフェースを用いたユーザからシステムへの指令を即座にホストコンピュータに伝達する。

3.2.3 インテリジェントコンテナ（クラス S）の基本設計と細部設計

i コンテナ（クラス S）は i コンテナに必要とされる一通りの機能を全て実装していることが求められるクラスである。よって、本章ではこれまでの検討で i コンテナに必要とされた各機能の実装方法について述べ、採用した実装方法を検証するために試作したプロトタイプについて示す。なお i コンテナ（クラス S）は本プロジェクトの初期に試作された為、後の設計変更により方式自体が変更された箇所が多い。最終的に定められた規格はクラス A を参照されたい。まず試作した i コンテナプロトタイプの概要を図 3.11 に、天板を外した内部の様子を図 3.12 に、そしてシステムブロック図を図 3.13 に示す。以降では各機能の実装詳細について述べる。

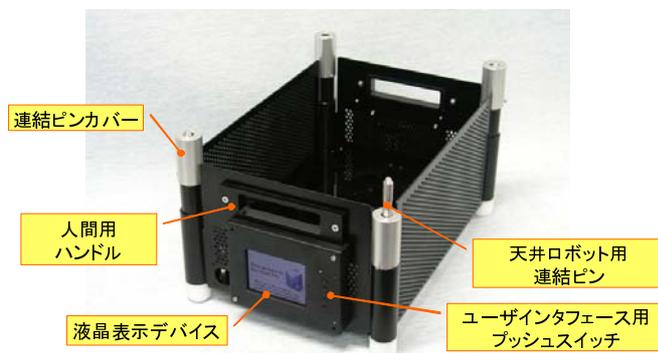


図 3.11 i コンテナプロトタイプの概要（クラス S）

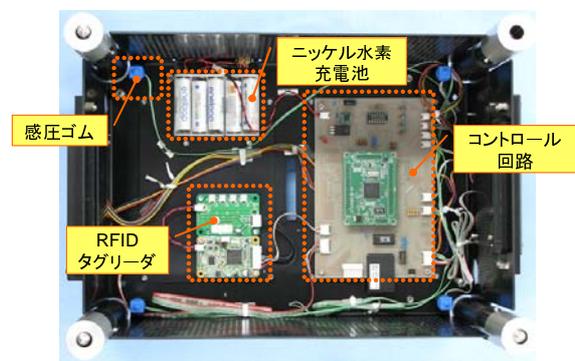


図 3.12 i コンテナの上面ビュー（天板取り外し状態）

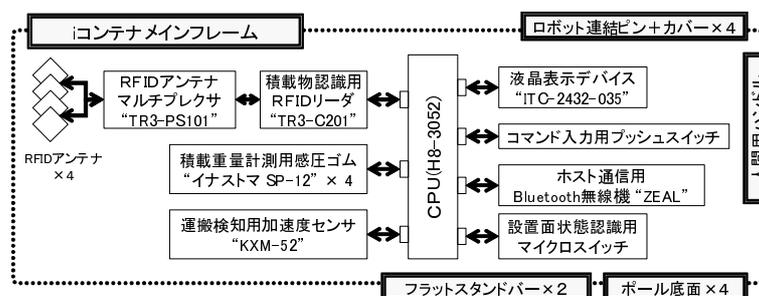


図 3.13 i コンテナの機能ブロック図

物品積載機能の設計と実装

まず物品を積載する容量の検討を行った。現在市販されているコンテナケースの大きさを見ると A4 サイズより少し大きい程度のもが多い。そこで i コンテナもこれらの製品を参考とし内寸を W:250, D:350, H:170[mm], 外寸を W:270, D:370, H:188[mm] と規定した (図 3.14)。続いて基本構造であるが、大量生産のコンテナケースの場合、プラスチック材料の射出成型品であることが多い。これはリブ構造を容易に実現でき、軽量かつ剛性の高い構造体を実現可能であるからだが、少数の試作を行うには不向きな製造法であるため、今回は図 3.15 に示すような板金部品をメインフレームとし、部品の四つ角を樹脂性のポールにより固定することで構造体を構成することとした。また、後の検討で RFID アンテナをコンテナの底に設置することとなったため、底面を打ち抜き、樹脂プレートを貼り付ける構造とし、可能

な限り電波の減衰が少なくなるように配慮している。実際に試作した部品は軽量化のために底面を除く4面にパンチングメタル加工が施してある。

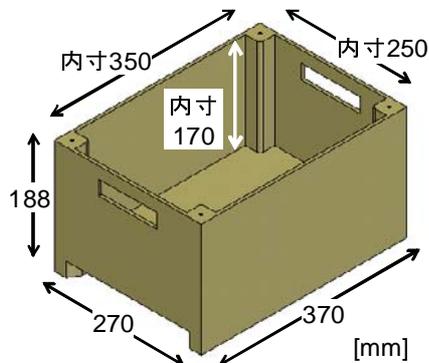


図 3.14 i コンテナサイズの概要

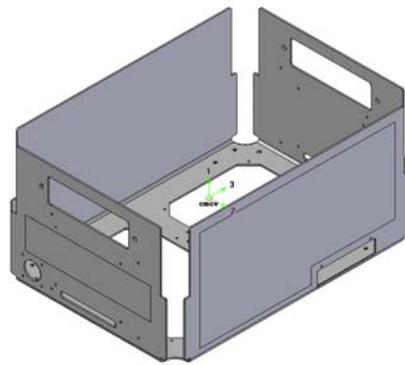


図 3.15 メインフレームの構造

積載物タグ情報認識機能，積載重量認識機能の実装

まず積載物に貼り付けられた RFID タグを読み取るために，RFID タグリーダーとアンテナをコンテナに搭載する必要がある。今回は RFID リーダに関しては図 3.16 に示すような市販の組み込み用リーダー（タカヤ（株）製 RFID タグリーダー/ライター TR3-C201）を利用することで，その開発コストを抑えた。一方で RFID アンテナはそのレイアウトから検討の対象となるため自作することとした。まずアンテナのレイアウトではコンテナ積載物に付けられたタグを出来るだけエラーなく読み取れることが求められる。そこで今回はタグ通信距離が 180[mm] の市販アンテナ（タカヤ株式会社製 TR-A101 アンテナ）を参考としてアンテナを設計し，コンテナ底面に配置することとした。

次に積載物重量認識のために荷重センサをコンテナ底面に設置する。そこでコンテナ底面を二重構造とし，天板の下に荷重センサを埋め込むこととした。なおコンテナ底面同様に天板は RFID アンテナの読み取り距離を確保するために樹脂材料で構築し，裏側に 4 つのアンテナ用のコイルを形成する構造とした（図 3.17 参照）。荷重センサとして一般的には歪みゲージを利用したロードセルが使用されるが，微小の抵抗変化を読み取るため，アンプ回路が必要となる。今回の荷重センサは過積載を認識出来れば良く，広いレンジでの精確な計測は不要なためイナバゴム製の感圧ゴム”イナストマ SP-12”を採用することとした^{*4}。このイナストマを図 3.18 に示すように，コンテナ底面の隅に設置し，その先端で天板を支持することで荷重を計測する構造とした。

運搬感知機能の実装

人間による i コンテナの運搬を検知するためには主に次の 3 つの方法が考えられる。(1) コンテナの位置を計測する方法，(2) コンテナの傾斜を計測する方法，(3) コンテナの振動を計測する方法。上記の 3 つのうち最も簡便に計測出来るのは (3) の振動を計測する方法である。これは昨今の MEMS 技術の向上により比較的安価に加速度センサ（振動センサ）が入手できるようになったためである。よって本研究では 3 軸の加速度センサ（KXM-52）を図 3.19 に示すようにコンテナ底面の基板上に設置し加速度計測を行い，定常状態からの変化量が閾値を超えたときにコンテナが運搬されたと認識することとした。なお，一般的には重力方向の加速度として常時 1[G] が計測されていることになり，運搬時はコンテナの傾斜によりこの値が変化するため，間接的にコンテナの傾斜を計測していることにもなるという副次的な利点がある。

*4 イナストマによる荷重計測はドリフトの問題があるため後にフォトリフレクタによる荷重計に改修した。

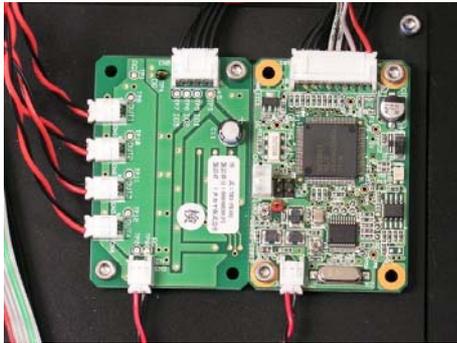


図 3.16 タカヤ (株)RFID タ
グリーダ/ライタ TR3-C201

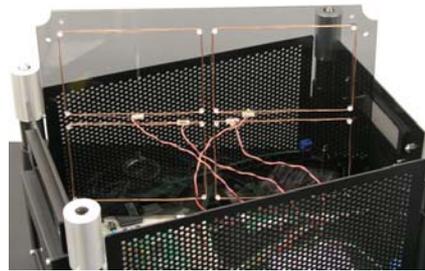


図 3.17 コンテナ天板の様子



図 3.18 コンテナ隅に設
置された感圧ゴム (青色)

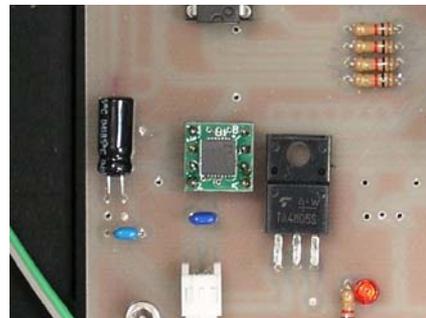


図 3.19 コンテナ底面の加速度センサ

ロボット把持支援機能の実装

豊富な知識データを元に視覚情報より複雑な3次元情報を取得可能な人間と異なり、ロボットの立体計測・認識能力は未だその実用において様々な課題が残っている。そこでロボットが簡単かつ確実にコンテナを把持するために、ロボットにとって把持を行いやすい構造をコンテナに付与することを考える。ロボットが簡単に把持を行う構造としては、磁石吸着方式、フォーク挿入方式などがあるが、今回は確実性を重視し、図 3.20 に示すようなピン連結方式を採用することとした。このためコンテナ側に把持用のピンを設置し、安全のため保護カバーで覆う方式を採用した^{*5}。図 3.21 にプロトタイプに搭載したロボットによる把持用ピン部の様子を示す。

コンテナ位置認識支援機能, サービス情報提示機能, ユーザコマンド入力機能の実装

i コンテナではシステムによる位置認識支援と人間への情報提示を同一のデバイスで行うことを狙い、液晶表示デバイスを採用した。今回 i コンテナに実装するにあたり、コンテナへの組み込みが容易な市販の小型液晶表示デバイスを調査し、インテグラル電子製の LCD 表示デバイス”ITC-2432-035”を選定した。このデバイスは 3.5inch TFT 液晶で 320×240pixel の解像度を有する。その特長は文字のフォントをデバイスに内蔵していること、そしてコンパクトフラッシュ上の画像データを表示出来ることである。

^{*5} 後の設計変更により、コンテナ側を穴にロボット側にピンを実装する方式へと設計変更を行った(クラスA参照)。これにより保護カバーが不要となり、コンテナの構成部品点数が削減された。

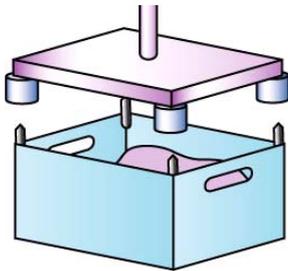


図 3.20 ピン・ホール連結方式



図 3.21 連結ピンと安全カバー

このためメモリサイズの小さなマイコンでも、高度な文字、画像描画が可能である。次にユーザコマンド入力機能の実現のため、液晶表示デバイスの脇に操作用のプッシュスイッチを配置し、液晶画面と連動することでコマンド選択式のインタフェースを構築することとした。なおプッシュスイッチは OK, NG, Up, Down の 4 種に絞りこみ、簡便に操作を行えるような工夫をしてある。上記を踏まえて液晶表示デバイスには、タグ情報認識結果を出力する画面と、位置認識用として色相に特長を持つマーカ画像*6のほか図 3.22 に示すようにユーザインタフェース用途に数種の画面を用意した。図 3.23 に i コンテナに搭載した液晶表示デバイスの様子を示す。



コマンド入力画面

積載物情報表示画面

通信状態表示画面

図 3.22 液晶表示デバイス表示内容の概要



図 3.23 液晶表示デバイスと UI 用スイッチ



図 3.24 人間による把持用のハンドル

*6 コンテナ位置認識支援機能は後の設計変更により、コンテナの四隅に赤色 LED を実装することにより実現することとした。

人間による把持の支援機能，コンテナ多段設置機能の実装

人間による把持の支援機能は一般的なコンテナケースと同様に取っ手を用意することで実現可能である。なおコンテナフレームを板金部品としたために，人間が把持するためには厚さが足りない。そこで図 3.24 に示すように別途樹脂部品で取っ手を用意し，板金部品に固定する方法とした。次にコンテナ多段設置機能の実装としては，ロボットによる把持用の連結ピンを上下にコンテナを積み重ねるときの固定用に活用することとした。このため，図 3.25 に示すように，4つ角の樹脂ポール部の底面に連結ピンが挿入可能な穴を設置した。^{*7}



図 3.25 ポール底面の様子

家庭用コンテナ自動収納庫移載支援機能，コンテナ設置面状態認識機能の実装

家庭用コンテナ自動収納庫はフォークリフトのようにコンテナを底面より支持し，収納庫への移載を行う。そのためコンテナはフォーク挿入分，床面より底上げされていなければならない。そこで図 3.26 に示すようにコンテナフレームの下に高さ 20mm ほどの樹脂製のフラットスタンドバーを 2 本設置した。一般にフォークリフト用のパレットは図 3.28 に示すように，上下面共に平板を敷き詰めることによって，フォークの挿入スペースを確保しつつ地面や棚面の状態に因らずに設置が出来るような構造を採用している。しかし本研究では敢えてフラットスタンドバーを 2 つの構造に分割することで，棚等に設置する際の指向性を作り出し，人が取っ手面を前後にして棚に設置してくれるよう誘導することとした。

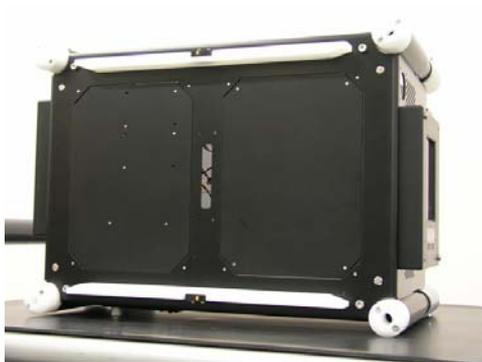


図 3.26 コンテナ底面のフラットスタンドバー（白色）

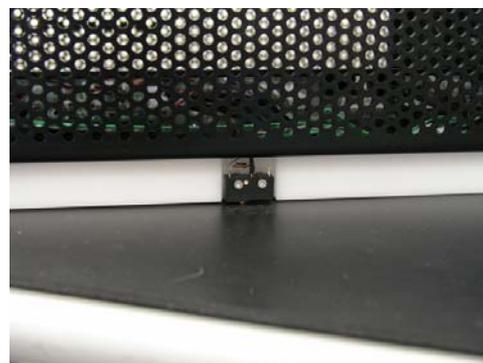


図 3.27 フラットスタンドバー中央のマイクロスイッチ

^{*7} その後，設計変更によりコンテナ側からピンが削除されたので多段設置用に小径 ($\phi 3$ [mm]) のノックピンがコンテナ対角 2 箇所追加された。

このバーは比較的摩擦係数の小さい素材（ポリアセタール樹脂）で製作し、両端はテーパ加工を施している、これによりフォーク作業時にスムーズにコンテナを引き出すことが可能となる。またコンテナ設置面の状態を認識可能なように、バーの中央に図 3.27 に示すようにマイクロスイッチを設置している。このスイッチが ON になっているときに、コンテナの設置面が平坦であり、かつコンテナを安定して支持するだけの剛性を備えていることが保証されることになる。またコンテナ多段設置機能の実現に用いられたポール底面の樹脂部品は外側にも R 形状が設けられており、家庭用コンテナ自動収納庫側の凹型のガイドプレートとの組み合わせにより、移載作業の過程で自然とコンテナの位置決めが実現される構造となっている。（3.5.4 節参照）



図 3.28 フォークリフト用パレットの例

ホスト状態通知要求回答機能及びユーザコマンド伝達機能の実装

まずホストコンピュータとの通信方法であるが、i コンテナとホストは無線で 1 対多の通信を行う必要がある。そして通信電力も比較的小さいものが好ましい。上記の条件を満たすため、本研究では Bluetooth 無線通信を採用することとした。また開発コスト低減のため市販の Bluetooth 通信モジュール（AD テクノロジー（株）製、”ZEAL”，図 3.29）を利用することとした。

コントロール回路の実装

本節までに取り上げた各種センサやデバイスを統合的に制御する CPU として（株）ルネサス テクノロジ製”H8-3052F”を採用し、図 3.30 に示すような制御基板を実装した。なおバッテリーとしてニッケル水素電池 4 本を採用した。現状ではこのバッテリーでコンテナに実装されたモジュールをフル稼働した場合は数時間程度しか動作出来ない。そのためエネルギーセーブモードが実装されている。

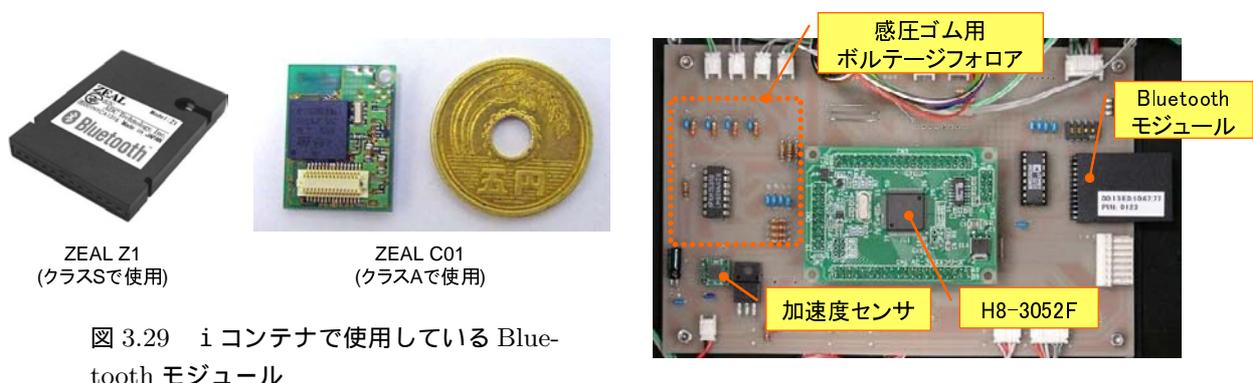


図 3.29 i コンテナで使用している Bluetooth モジュール

図 3.30 i コンテナ用コントロール回路

3.2.4 インテリジェントコンテナ（クラス A）の実装

インテリジェントコンテナ（クラス A）は物品を中期的に保存するために、クラス S より RFID タグ認識機能及びユーザ支援情報提示機能を省略するクラスである。よって i コンテナ（クラス S）と外部寸法やホストとの通信コマンドは共通に設計されているが、廉価化に当たっていくつかの抜本の変更を行った。以下にその詳細を述べる。

i コンテナ（クラス A）の概要

図 3.31 に i コンテナ（クラス A）の概要を示す。

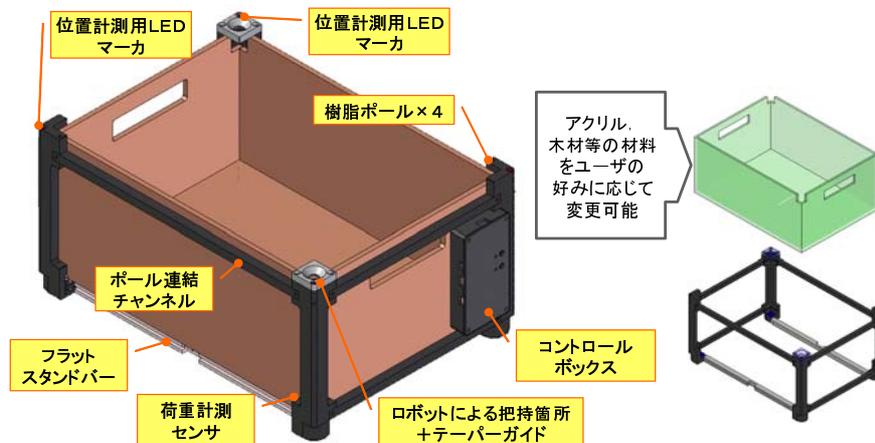


図 3.31 i コンテナ（クラス A）の概要

まずクラス A はクラス S と異なり構造をフレームとボックスの 2 つに分けて構成することとした。フレーム側に電装系等の全ての機能を実装することで、ユーザは好みのボックス（素材^{*8}、色）を選択することが可能という特徴がある。これによって、収納する物品のカテゴリに応じて概観を変えるといったことが可能となり、従来のコンテナケースと同様にユーザが直接的に扱うときの利便性が確保出来る。

i コンテナ（クラス A）に実装されている主な機能とその実装詳細を以下に述べる。

- テーパーガイド付連結穴によるロバストなコンテナ把持動作の支援
クラス A には 4 つ角の樹脂ポールのうち 2 箇所コンテナ運搬ロボットが把持を行うためのテーパーガイド付連結穴が設けてある。このテーパーガイドに、偏心連結ピンが滑り込むことによって、簡便かつ頑健にコンテナの把持が実現出来る。
- LED マーカによるコンテナ位置認識システムの補助
樹脂ポールの最高部には各々 1 つずつ、合計 4 つの LED が内臓されている。この LED はマイコン制御により 7.5[Hz] の周期点滅及び消灯の制御が可能となっている。この点滅によりコンテナ位置認識システムは環境光の影響に対してロバストにコンテナ位置の計測が可能であり、またユーザ自身が特定のコンテナを探索するときにも活用出来る。
- 簡易ロック型フォークテーブルによるロバストなコンテナ移載作業支援構造
ボックス部の底面にはフォークテーブル用のフック溝が装備されている。これにより、家庭用コンテナ自動収納庫の移載作業（コンテナ取り出し、収納）作業がロバストに行えるようになっている。
- ガイドブロックを活用した人及びロボットによるコンテナ収納位置決めの容易化
樹脂ポールの底部はクラス S 同様に R 部が設けられている。これにより、3.5 節の図 3.108 に示す

*8 金属は RFID タグ読み取りの都合上使用出来ない。

ような凹型のガイドプレートと組み合わせることにより、ロボットによる単純な押し動作によって精密な位置決めをすることが可能となっている。

- RFID によるコンテナ ID の通知と位置決め精度の確保
コンテナの前面、背面に各々 1 枚ずつコンテナ ID 認識用の RFID が貼り付けられており、家庭用コンテナ自動収納庫や iDock などに収納・設置した際に装置側でコンテナの ID を取得可能となっている。また家庭用コンテナ自動収納庫では、この RFID をコンテナの設置位置確認のためにも用いている*⁹。
- 可動 RFID アンテナによる搭載物認識機能の支援
クラス A の筐体は樹脂もしくは木材で構成されており、iDock 等の外部 RFID アンテナを用いたコンテナ内の積載物認識の際に、認識の性能を低下させないよう工夫がしてある。

実装した i コンテナ (クラス A) の概観を図 3.32 示す。



図 3.32 実装した i コンテナ (クラス A) の概観

*⁹ 自動収納庫がコンテナの RFID タグを読み込めることがコンテナが正しい位置に設置されていることを保証するようになっている。

3.2.5 インテリジェントコンテナ（クラスE）の実装

インテリジェントコンテナ（クラスE）は物品を長期的に保存するために、クラスS、Aに実装される全ての電装品を取り外し、また廉価化のために筐体を構成する素材も、クラスSやAで用いられている素材とは全く異なる素材を用いた簡易版iコンテナである。以下にその詳細を述べる。

iコンテナ（クラスE）の概要

図3.33にiコンテナ（クラスE）の概要を示す。

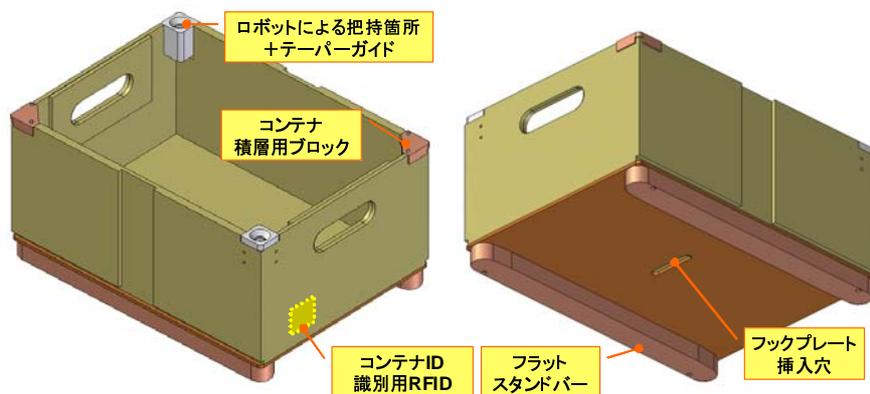


図 3.33 iコンテナ（クラスE）の概要

まずiコンテナ（クラスE）は筐体の製造コストを大幅に削減するために、素材としてダンボールを使用することとした。ダンボールは現在でも流通梱包資材として広く使用されており、構造の頑健性や耐久性には定評がある。

一方でダンボールは図3.34のような3層構造となっており、中央部の”フルート”は指向性を持っており方向によって強度が異なる。また、ダンボールには一般的に圧縮強度は強いが引張り強度は弱いという性質があり、引張りが伴う構造になる場合には構造を補強することも検討しなければならない。

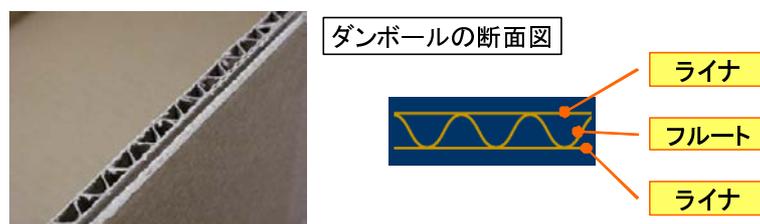


図 3.34 ダンボールの構造

さらに、金属や樹脂の構造体と異なり、ダンボールは1枚のダンボール板を折り曲げ、そして接着することによって構造を実現する。この時、前述したフルートの指向性によっており曲がる位置にある種の”癖”が発生してしまうため、金属や樹脂と同様の精度を実現することは出来ない。一般にダンボールの構造体では最低でも3[mm]程度の幾何誤差は許容せねばならず、その意味で一般的な機械設計とは異なる配慮が必要となる。構造体以外の細かな造形が必要な部品はMDFもしくはABS樹脂を使用した。但しMDFは素材の密度が荒いため、微細造形には適した素材でないことに注意が必要である。

i コンテナ（クラス E）に実装されている主な機能とその実装詳細を以下に述べる。

- テーパガイド付連結穴によるロバストなコンテナ把持動作の支援
クラス E にはダンボール構造の 2 箇所 ABS 樹脂で製作した、コンテナ運搬ロボットが把持を行うためのテーパガイド付連結穴が設けてある。このテーパガイドに、偏芯連結ピンが滑り込むことにより、簡便かつ頑健にコンテナの把持が実現出来る。
- 簡易ロック型フォークテーブルによるロバストなコンテナ移載作業支援構造
ボックス部の底面には紙管材で製作したフォークテーブル用のフック溝が装備されている。これにより、家庭用コンテナ自動収納庫の移載作業（コンテナ取り出し、収納）作業がロバストに行えるようになっている。
- ガイドブロックを活用した人及びロボットによるコンテナ収納位置決め容易化
底面にはクラス S 及び A 同様に R 部を設けるために MDF 製のフットブロックが接着されている。これにより、3.5 節の図 3.108 に示すような凹型のガイドプレートと組み合わせることにより、ロボットによる単純な押し動作によって精密な位置決めをすることが可能となっている。
- RFID によるコンテナ ID の通知と位置決め精度の確保
コンテナの前面、背面に各々 1 枚ずつコンテナ ID 認識用の RFID が貼り付けられており、家庭用コンテナ自動収納庫や iDock などに収納・設置した際に装置側でコンテナの ID を取得可能となっている。また家庭用コンテナ自動収納庫では、この RFID をコンテナの設置位置確認のためにも用いている。
- 可動 RFID アンテナによる搭載物認識機能の支援
クラス A 同様にクラス E では小さなビス以外には金属素材を可能な限り用いずに、iDock 等の外部 RFID アンテナを用いたコンテナ内の積載物認識の際に、認識の性能を低下させないよう工夫がしてある。

実装した i コンテナ（クラス E）の概観を図 3.35 示す。

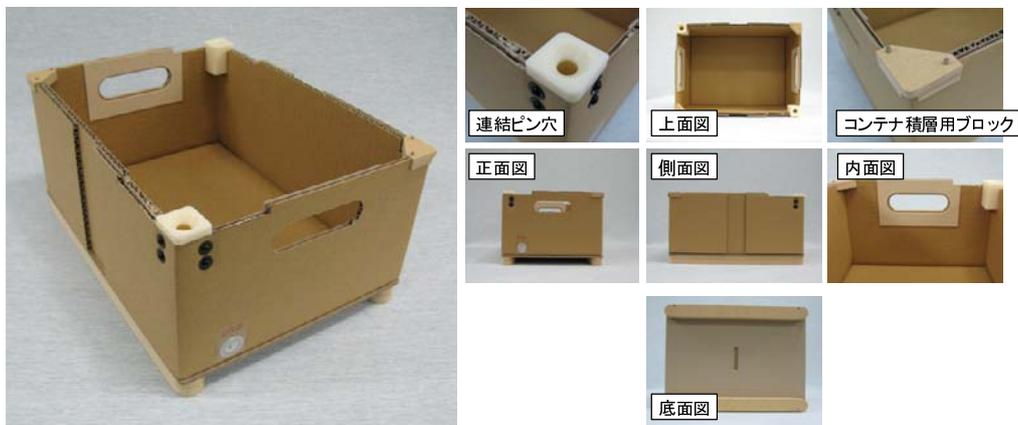


図 3.35 実装した i コンテナ（クラス E）の概観

3.2.6 基本性能試験

本節では特にコンテナ単体の性能として検証が必要であると思われる積載物タグ情報認識機能，運搬感知機能について検証を行った。

積載物タグ情報認識機能の性能検証

本検証では RFID タグの読み取り距離の性能確認を行う。RFID の読み取り距離はタグの角度やアンテナ設置場所の条件によって異なるため一概にその性能を述べることは出来ない。そこで本試験では最大交信距離を確認し，実装結果について議論する。今回読み取り試験に使用したタグ (図 3.36) はシートタイプのタグであり，45[mm] 角と比較的小型であるため多くのものに貼り付けられると思われる。試験で

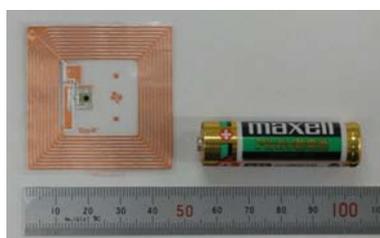


図 3.36 試験で使用した RFID タグ (右：単 3 乾電池)

はコンテナ天板上の複数計測点においてタグを垂直に下降させていき，リーダが反応した時点でのタグとアンテナの距離を計測した。図 3.37-(1) に計測位置と各点での最大交信距離を示す。本試験の結果，性能が良い部分ではコンテナ深さ (150[mm]) をある程度網羅できる交信距離が実現出来ているものの，アンテナが隣り合う計測点での交信距離は著しく短くなっている。アンテナの相互干渉の影響を減らすためにアンテナ 1 つのみを有効にして計測を行って見たが大きな性能変化はなかった。続いてアンテナの大きさと交信距離を確認するために 3 タイプのアンテナの比較を行った。図 3.38 に比較した 3 種のアンテナの概観を示す。RFID ハンドブック [84] によると交信距離はアンテナの半径と同程度と言われ，つまりアンテナの半径が大きくなるほど交信距離は長くなることになる。しかし，アンテナの半径が大きくなるとインピーダンスが大きくなり，共振周波数の調整が難しくなる。今回のアンテナの試作においては 3 型アンテナのみインピーダンス調整のために巻き数が 2 になっている。上記の試験と同様の交信距離を計測した結果を表 3.3 に示す。この試験の結果は，アンテナを大きくすることが単純に交信距離を伸ばす方法ではないということを示している。アンテナのレイアウトを含めた詳細な設計が課題である。

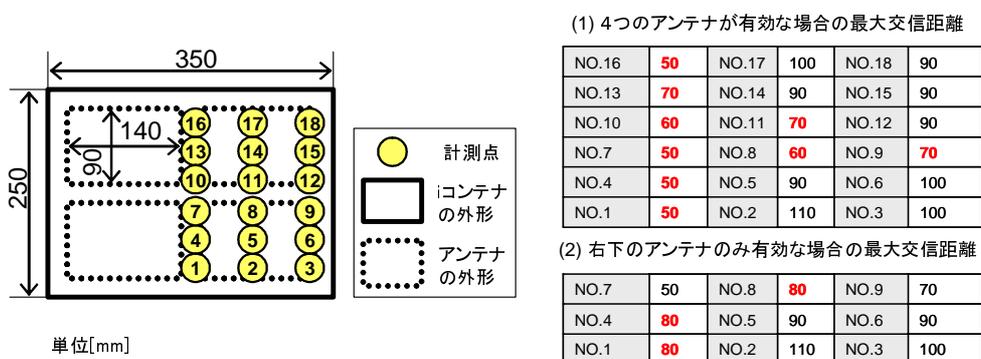


図 3.37 RFID 交信距離の計測位置と各点での最大交信距離

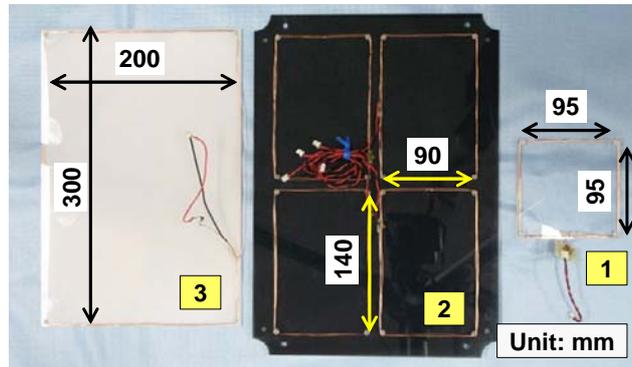


図 3.38 3つの異なる RFID アンテナの性能比較

表 3.3 アンテナ通信テストの結果

アンテナ番号	幅	高さ	コイル巻き数	交信距離 *1
1	95	95	3	110
2	90	140	3	110
3	200	300	2	110

単位 : mm *1 : コイルの中心で計測

運搬感知機能の性能検証

人間による運搬を感知する検証試験を行った。試験は被験者 3 人（20 代男性）にコンテナを机上より持ち上げ、再び机上に設置するという作業を 4 回ずつ試行してもらい、その際にコンテナに発生する振動を加速度センサにより計測した。図 3.39 にコンテナを持ち上げて、下ろすという試験で取得されるデータの例を示す。一般にコンテナを持ち上げるよりも、設置する際に大きな加速度が検出されることが確認された。また、今回の試験においてコンテナ設置の際に最も発生加速度が小さかった試行（最も静かにコンテナを置いた状況）で被験者 A は 0.3[G]、被験者 B は 0.2[G]、被験者 C は 0.7[G] の上下加速度が検出された。これはコンテナを研究環境中に 1 時間程度放置した際に検出された最大上下加速度 0.06[G] と比較しても十分に大きな値であり、コンテナに発生する加速度を閾値処理することで、人間によるコンテナ運搬を検出可能なことが確認された。

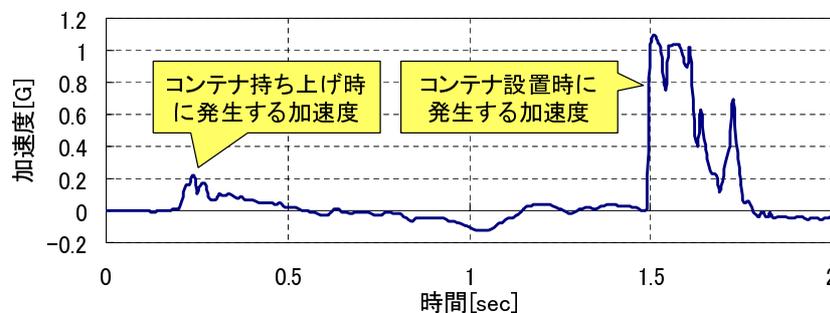


図 3.39 コンテナを運搬する際に発生する上下加速度

3.2.7 インテリジェントコンテナのまとめ

家庭内物流支援ロボットシステムにおいて人がロボットに望む支援，そしてロボットが人間に与えられる支援の間を埋める”接点”の役割を担う，インテリジェントコンテナを提案し，必要機能の検討を踏まえてプロトタイプ的设计・製作を行った。主要機能の検証試験においては，加速度センサを用いた運搬感知機能が有効に働くことを確認し，積載物タグ情報認識機能においてはアンテナの相互干渉を踏まえた詳細な設計が課題であることを示した。

インテリジェントコンテナのスナップショット

インテリジェントコンテナの概観を図 3.40 に示す。



図 3.40 インテリジェントコンテナのスナップショット

仕様一覧

インテリジェントコンテナの仕様一覧を表 3.4 に示す。

表 3.4 インテリジェントコンテナの仕様一覧

	クラスS	クラスA	クラスE
基本サイズ(約)	外寸: 370×270×188 [mm], 内寸: 350×250×170 [mm]		
最大積載重量	5 [kg]		
自重	2.8 [kg]	1.7 [kg]	1 [kg]
把持ガイド	POM樹脂製円形テーパーガイド(穴径φ11[mm], テーパー角度90[deg])		
フォーク挿入部	設置面高さ20.5 [mm]以上, ガイド間隔206 [mm]		
位置計測マーカ	赤色LED: 4箇所7.5[Hz]により点滅		---
無線通信	Bluetooth Ver2.0+EDR対応(Class2), シリアルプロファイル(57.6kbps)		---
荷重計測	イナストマ-4点 ※1	フォトフレクタ式荷重計測4点: 最大定格6[kg]	---
ベース素材	アルミ合金(A5052)	ABS樹脂・MDFボード	ダンボール・MDFボード

※1: イナストマによる荷重計測にはドリフトの問題あり

クロージャ、コンプライアンス技術の適用箇所

本サブシステムの実現における Geometric object closure, 戦略的コンプライアンス, 受動機械的コンプライアンスの3つの主要技術の適用箇所を以下に整理する。

- Geometric object closure
 - － コンテナの2角に設けられた連結ピン挿入穴。
⇒ コンテナ運搬ロボットの堅牢な把持状態の実現が可能になる。
 - － コンテナ底面に設けられた, フラットスタンドバー, ガイドプレート接触用コンテナフット R部, そしてフック溝(プレート)。
⇒ 家庭用コンテナ自動収納庫のロバストなコンテナ移載作業が可能となる。
- 戦略的コンプライアンス
 - i コンテナ自身が物品の多様性に対するタスクの規格化, 役割の規格化を実現している。そして i コンテナに採用された構造, LED マーカがロボットの能力の補助・強化に該当する。さらに i コンテナの底部構造は人が棚等の収納庫に i コンテナを設置する際に収納方向, 位置を誘導するような仕組みが組み込まれている。
 - － タスクの規格化ではロボットは日用品それ自体を扱うのではなく, コンテナケースを運搬することによって, モノを扱うことと同等となる環境を整備した。
 - － 役割の規格化では上記のタスクと関連し, コンテナに対して日用品の出し入れを行うのはユーザ(人)の役割であり, それ以降のコンテナの取り扱いを行うのがロボットの役割であると定義している。
 - － ロボット能力の補助・強化としては, コンテナのハンドルを把持し運搬するという人の器用な動作をロボットに再現させるのではなく, 専用の構造(連結ピン穴, フックプレート)を用意することによってロボットの能力を補っている。また LED マーカによりロボットが安定してコンテナを発見・位置計測可能な計測環境の整備を行っている。
 - － 人の誘導としては, フラットスタンドバーにより安定するコンテナの設置方向に指向性を持たせ, 人が取っ手を手前として棚に収納するように誘導している。^{*10}
- 受動機械的コンプライアンス
 - コンテナの2角に設けられた連結ピン用テーパガイド
⇒ 連結ピン挿入動作時に穴とピンの位置決め誤差がある場合でも, テーパガイドの誘導により連結ピンが挿入されるようになっている。

^{*10} 後に示すコンテナ自動収納庫に設置する際には, コンテナ脚のR部がガイドプレートと接触することで人が精確な位置決めを行えるよう誘導する。

3.3 コンテナ運搬ロボット(1)(天井懸架移動部)

前述したようにコンテナ運搬ロボットは大きく分けて天井懸架移動部とコンテナ操作部に分かれる。本節では”天井移動ロボットプラットフォーム”[80, 81]を活用した天井懸架移動部について述べる。

3.3.1 システム設計(要求仕様, 機能の検討)

まず天井移動ロボットプラットフォームのコンセプトを示し, このプラットフォームを実現するために重要な2つのキーとなる技術について考察し, その実現方法を述べる。

天井移動ロボットプラットフォームのコンセプト

天井移動ロボットプラットフォームの実現イメージを図3.41に示す。このコンセプトスケッチは天井面をさまざまな動作目的を持ったロボットが共存・移動し, また必要時には天井下面よりアクチュエータを伸ばすことで, 人間への支援を行う様子を示している。本プラットフォームのポイントをまとめると次の二つになる。

ポイント1 特殊な天井材料ではなくともロボットが天井面で支えられ, 移動できること。

ポイント2 複数台のロボットが同時にプラットフォーム上で動作可能なこと。

ポイント1は既存の家に導入する際, 施工可能であるために必要な条件であり。ポイント2は物品搬送だけでなく, 様々な目的をもったロボットが同時に各々の支援タスクを実行するために必要な条件である。

プラットフォームの2つのポイントを実現するためには, それぞれキーテクニックとなるものが必要となる。特殊な材料ではない天井をロボットに移動させるためには「天井吸着方法」が重要となり, 複数台のロボットが同一の環境で共存して動作するためには「複数ロボットの同時位置制御」が重要となる。以降ではこの二つのキーテクニックについて実装を念頭とした議論を行う。

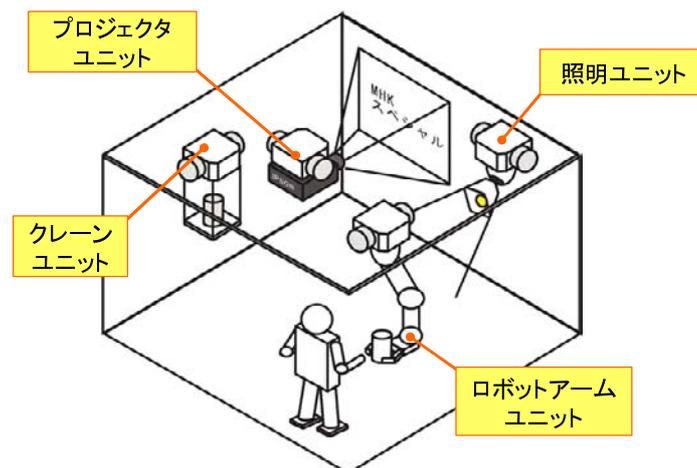


図 3.41 天井移動ロボットプラットフォームのコンセプトスケッチ

キーテクニック1: 天井吸着方法

まず今回のプラットフォームの天井吸着方法の条件を以下にまとめる。

1. ロボットが天井を移動するのに実装面・安全面から十分な吸着力を出せること

2. ロボットが2次元的に制限を受けず動作可能なこと
3. 天井材料は鉄材など特別なものでなく、またその天井の加工・施工も比較的容易であること。
4. 吸着に能動的なエネルギーを必要としないこと。つまり（電力等の）エネルギーの供給がなくても吸着を持続できること

以上の4条件を満たすものとして「永久磁石誘導型吸着法」を検討した。図3.42にその概要を示す。

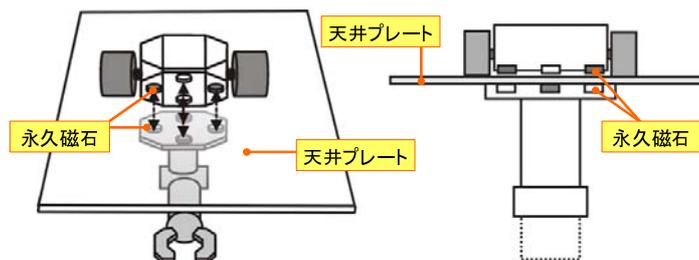


図 3.42 永久磁石誘導型吸着法のスケッチ

この方法は非常に単純な仕組みで、天井面を挟んで2つの永久磁石を対向させ、上側の磁石が移動すると磁路を保持しようと下の磁石が誘導されるというものである。実際には対向する2つの磁石の位置がずれると、磁路が天井面に対して傾くため水平方向の力が発生し、下の磁石が誘導されるという現象を利用している。この上側の移動を走行ロボットに行わせることによって天井下面に吸着したハンドリングロボットの物体搬送等を実行させることができる。

キーテクニック2：複数ロボットの同時位置制御

複数の移動ロボットの位置を同時に計測するためには大きく分けて図3.43のような二つの方式が考えられる。その二つの分類およびそれぞれの利点・欠点をまとめる。

- 計測器統合方式：1つのマスタ計測器とコンピュータが全てのロボットの位置を計測する。
 【利点】マスタとなる計測器+コンピュータに位置計測の機能を任せられることができるので、各ロボットの実装が楽になり、台数の増加時にはコストの面で有利になることが期待できる。
 【欠点】ロボットはマスタの探索範囲に常にいることが求められ、行動範囲が限定されてしまう。
- ロボット自律取得方式：各ロボットがセンサを実装し自分の位置を自主的に手に入れる。
 【利点】各ロボットが自主的に動作するので、マスタとなる優秀なコンピュータが必要なく、またそのため行動範囲の拡張も容易である。
 【欠点】各ロボットのタスクが増え、台数が増えると実装時のコストが上がってしまう。

今回は各ロボットが比較的自由に動作できることを期待し後者の方法を採用することとした。また後者の方法において問題となるのが、各ロボットが如何に正確に自分の位置を取得するかということである。つまり単体のロボットに実装できる位置計測方法でどれだけの精度が出せるかが課題である。

ランドマークとなる画像をカメラで入手し、それを元にロボットの位置を取得する手法がさまざまな研究で提案されているが[85, 86, 87]、今回は知的環境という観点から、その手法をさらに発展させて、ロボットの移動領域全体にランドマークとなるマーカを埋め込むことを考えた。このとき本来利点として挙げられている「行動範囲の拡張性の容易さ」を妨げるものであってはならない。そこで本研究では安価なマーカとして2次元コードを採用した。2次元コードを利用したロボットの位置取得及び作業支援に関しては太田らも取り組んでおり[22]、ロボットによる移動、ハンドリングという一連の作業を実現している。この2次元コードに位置（座標）の情報を書き込んだものを移動領域全体に書き込むことで、移動ロボットが自主的に位置を取得できる環境を実現する。採用したコードおよび読み取り方法などについては後の3.3.3節で詳細を述べる。

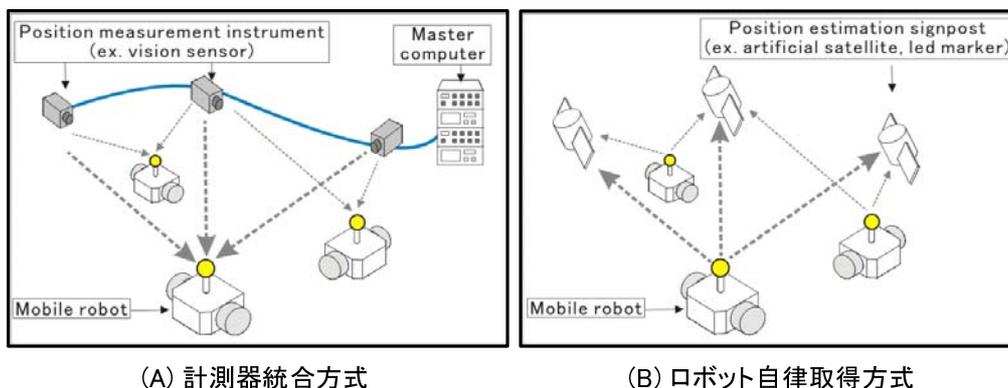


図 3.43 複数ロボットの同時位置制御方式の比較

3.3.2 永久磁石誘導型吸着法の実現（基本設計と細部設計）

本章では「永久磁石誘導型吸着法」をロボットに適用するために必要な磁気回路の設計・シミュレーションおよび吸着力測定について述べる。以降この吸着法を実現する磁気回路のことを「磁石モジュール」と呼ぶ。まずこの磁石モジュールに求められる基本的な仕様およびその実現方法について考察し、その後実際に設計・製作・計測を行った磁石モジュールについて述べる。

要求仕様とその実現方法の考案

今回のアプリケーションにおける磁石モジュールには次のような基本仕様が求められる。

- 実装および安全上十分な吸着力を持つ
必要な吸着力というのは天井下面でどのような機能や機構をもったユニットを動作させるかによって異なる。人間とのインタラクションを持つことになるユニットの場合、当然安全面での制限が厳しくなる。
- 必要に応じて吸着力を減少させることができる
永久磁石を用いている関係上、この機能がないと永久に天井面から外すことができなくなりメンテナンスが行えなくなってしまう。また強力な吸着力を発揮したままの磁石モジュールを保管することは安全管理上好ましくない。

前者の実現のために比較的安価で大きな吸着力を持つ、ネオジウム鉄ボロン系の磁石を採用した。このネオジウム鉄ボロン系の磁石は従来のフェライト系磁石に比べると4～10倍近い最大磁気エネルギー積を有し、1980年代まで最大のエネルギー積を有していたサマリウムコバルト系よりも安価でかつ大きな吸着力（最大磁気エネルギー積で1.5倍程）を示すという利点を持っている（参考文献 [88]）。また吸着力の見積りには（株）エルフの「ELF/MAGIC」というソフトを使用した。後者の実現のために、磁石の個数や磁気回路構成を考えて、以下のような4つの方法を検討した。

1. 磁気回路ループ・非ループ切替型
2. 着脱力内部保持型
3. 吸着力減少型
4. 吸着・減磁切替型

まず磁気回路ループ・非ループ切替型は図 3.44 に示すように一般にマグネットチャックに使用されている方法である。その利点は比較的簡単な機構で完全に吸着力を無くすことが可能な点であるが、一方でヨークの加工が複雑であり、瞬間的に吸着力を減らすことはできない。

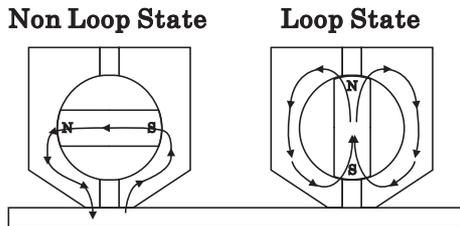


図 3.44 磁気回路ループ・非ループ切替型の模式図

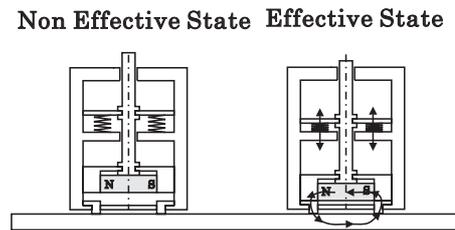


図 3.45 着脱力内部保持型の模式図

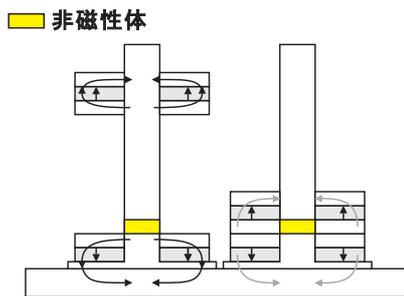


図 3.46 吸着力減少型

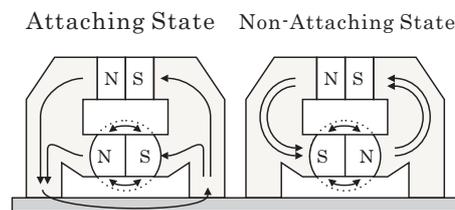


図 3.47 吸着・減磁切替型

次に、着脱力内部保持型は鶴らが開発した手法 [89] で、図 3.45 に示すように吸着した状態で次に脱着するための力をモジュール内部に蓄えるというものである。この利点は切替のレスポンスの良さであるが、吸着力をなくした状態を保持することが難しいという問題がある。

3つめの吸着力減少型は図 3.46 に示すように2つの磁石を用い、1つは吸着用そしてもう1つを吸着力の減少用に用いるというものである。その利点は機構が非常に簡単であることだが、磁石1つを吸着力減少のためだけに用いるという欠点がある。

そして最後の吸着・減磁切替型は図 3.47 に示すような、「磁気回路ループ・非ループ切替型」と「吸着力減少型」をあわせたような方法で、その利点は減磁用のループがそのまま吸着用の磁路として使えることである。しかしやはり複数個の磁石が必要ということでそのコストは無視できない。

以上のような方法を検討した結果、今回は部品構成が最もシンプルな「磁気回路ループ・非ループ切替型」を採用することにした。また意図せずヨーク内でループしてしまう磁気を減らし、確実に吸着力を得るために、磁気回路ループ用のヨークおよび非ループ用のヨークをそれぞれ独立に用意した。

次に磁石モジュールの吸着力の仕様および機能の検討を行った。検討の結果、磁石モジュールの要求仕様を表 3.5 のように設定した。なおこの要求仕様は実際にロボットを作成する上での重量割り振りを考慮しながら行った。

表 3.5 磁石モジュールの要求仕様・機能

吸着力	10[mm] のモジュール間ギャップにおいて 7.5[kgf]
吸着&脱着	3段階の切替式
付加機能	天井面と一定の間隔を保持する。 天井面との摩擦を小さくする。

磁石モジュールの詳細設計と実装

前述の要求仕様を満たす磁石モジュールを実現するために図 3.48 のような基本構造を持つ磁石モジュールを設計した。図 3.49,3.50 に実際に製作した磁石モジュールの外観を示す。使用した磁石は信越化学工業(株)のネオジウム系マグネット”N45H”である。天井面との摩擦を減らしつつ一定の距離を保つボールキャスタが内蔵され、また3段階の吸着・脱着切り替え機能はT型レンチを上方より押し付けることにより磁石を回転させ、位置決めピンにより位置を固定させることによって実現した。

本磁石モジュールの吸着力の測定を行った。その結果を図 3.51 に掲載する。ELF/MAGIC によるシミュレーションと実測値との差は30%程度であるが、要求仕様の「ギャップ 10[mm] で 7.5[kgf]」の吸着力という条件を満たしている。なおこのシミュレーションと実機の吸着力が異なる理由は、シミュレーションでは磁路を形成する磁石、ヨークなどの主要部品のみで解析を行っているため、全ての漏れ磁束を再現出来ていないためと考えられる。

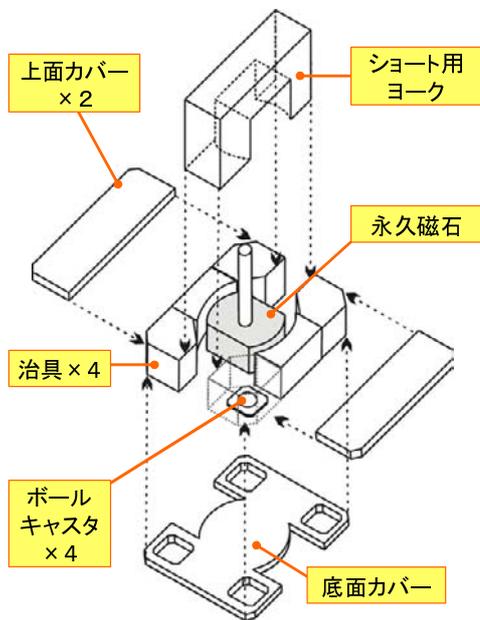


図 3.48 磁石モジュールのパース図



図 3.49 磁石モジュールの外観(正面)

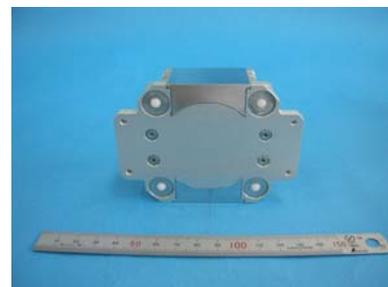


図 3.50 磁石モジュール下面ボールキャスタ

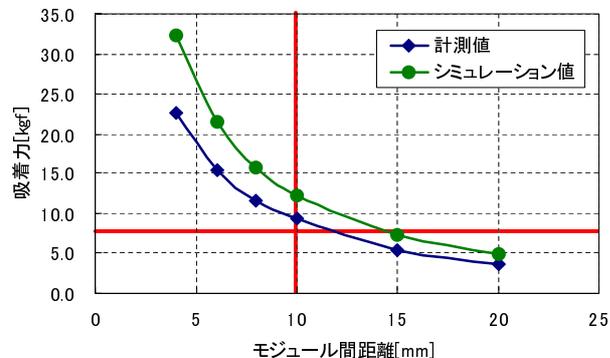
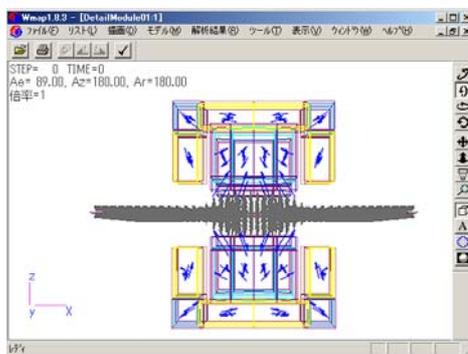


図 3.51 ELF/MAGIC のシミュレーション結果出力例(左), 磁石モジュールのシミュレーション結果(ELF/MAGIC) および実測値の比較(右)

3.3.3 複数ロボットの同時位置制御の実現（基本設計と細部設計）

3.3.1 節で述べたように、今回の天井ロボットでは環境側に位置情報を2次元コードによってマーカとして記述し、それぞれのマーカを各ロボットが読み取ることによって位置制御を行うこととした。本章ではまず、使用したコードのスペックや読み取り方法について述べ、次にそこから得られた情報からロボットの位置・角度を計算する手法について述べる。

2次元コードと情報の読み込み

まず既存の2次元コードの中から、ロボットの位置推定に使いやすいコードの選定を行い、(株)デンソーウェーブが開発・規格化した「QRコード」(図3.52)を採用した。このコードを採用した理由は読み取りスピードが高速であり、またその読み取りの手法(特徴マーカ及びコード位置抽出)がロボットの位置を検出する手法との相性が良いと判断したためである。QRコードはコードの切り出しに3つのシンボルを用い、まず読み取るべきコードの位置を決定する。このコードの位置検出方法がロボットの位置推定にそのまま利用可能である。

またQRコードを読み取る装置としては(株)東研が販売している組込み型QRコードリーダーである「TFIR31-DM」(図3.53)を用いた。このTFIR31シリーズは装置に組み込むための小型のバーコードリーダーであり、カメラと照明が一体化されている。また「TFIR31-DM」はプリント基板等に印字されたダイレクトマーキングを読み込むのに特化したバージョンであり、今回は透明ガラス面での反射を可能な限り防止するために本装置を使用した。但し組込みタイプということで(株)デンソーウェーブが販売している2次元コードリーダー「QD-20」などと比較すると、カメラ及び照明条件は必ずしも良いとは言えない。シャッタースピードやゲインなどは環境に合わせて調整する必要がある。

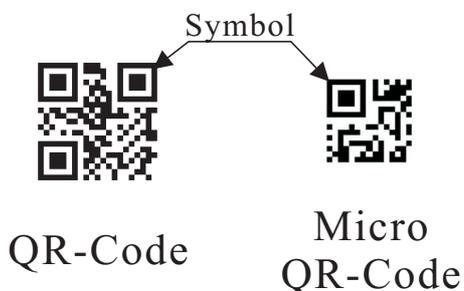


図3.52 QRコードとマイクロQRコードのサンプル



図3.53 2次元コードリーダー「TFIR31-DM」

TFIRシリーズの内蔵ソフトウェアで特徴的なのは、リーダー調整用に読み込んだマーカのカメラ画像中の座標を出力するモードが3つ用意されているところである。本研究では、「4角座標通知モード」を利用してロボットの位置を計算している。具体的にはこのモードを使用すると、図3.54のようにコードリーダーは読み取ったコード内のデータに画像内のコードの位置を4つの角の座標という形で付加して送ってくるようになっている。このコードデータおよびコードの位置データからロボットの位置・方向を計算する。なおここで注意が必要なのが、コードリーダーが出力する座標の位置は位置検出パターンよりも若干外側に位置することになる。これはQRコードがコード本体の周辺に最低4セル分のクワイエットゾーンを必要としており、このゾーンも含めてコードと認識しているためである。^{*11}

^{*11} 厳密にはクワイエットゾーンがコードに含まれるという考え方は正しくない。なぜならばクワイエットゾーンはリーダーの性能により4セル以上確保されることもあり、その意味ではコードはあくまで位置検出パターンまでと理解されるべきである。

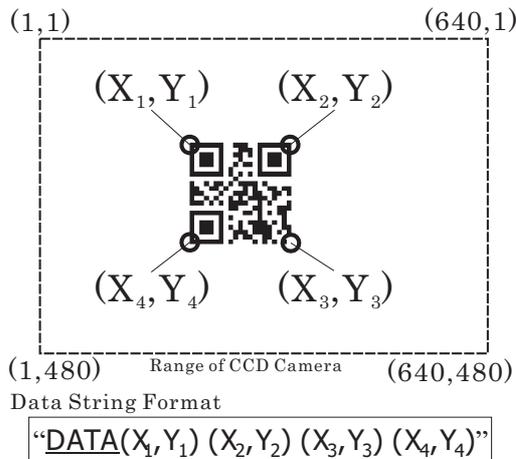


図 3.54 コードリーダーより送られるデータのフォーマット

表 3.6 2次元コードマトリクスに使用したコードのスペック

QRコードモデル	モデル2
誤り訂正レベル	M
バージョン	1
セルサイズ	8 Pixels
コードサイズ ^a	7.112mm 四方
コードサイズ ^b	約 8.030mm 四方

^a クワイエットゾーン含まず
^b クワイエットゾーン含む

2次元コードマトリクス

今回用意したコードマトリクスには各コードに”X0007Y0023”のように、原点からそのコードがX, Y方向に何個目のコードかという情報が含まれている。使用したQRコードのスペックを表3.6に掲載する。1枚のシートを実装の都合上500[mm]×500[mm]とし、その中に10[mm]ピッチで50×50=2,500個のコードが印刷されている。これらのシートを移動領域に敷き詰めることによって、ロボットの位置推定を可能にするのだが、ロボットは跨いだシートの枚数をカウントして自分がどのシートの上にいるかを記憶する必要がある。

コード情報からの位置推定計算

推定位置はX座標の場合、式3.1(Yについても同様の計算)によって計算される。

$$\begin{aligned}
 X_{position} = & (SheetSize \times XSheetOffset) \\
 & + (CodePitch \times XCodeData) \\
 & + ((CodeSize \times XPosition_{CCD}) / CodeSize_{CCD})
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

ここで *SheetSize* とは2次元コードを印刷したシートの大きさ500[mm], *XSheetOffset* はX方向に何枚目のシートにいるかを示す変数, *CodePitch* は配置した2次元コードの間隔で10[mm], *XcodeData* とはコードに書き込まれた”X00??Y00??”の”??”の部分に相当し, シートの上で何番目のデータであるかを示す変数。 *CodeSize* は印字されたコードの大きさで7.112[mm], *XPosition_{CCD}* とはカメラ画像上のコードの中心位置, *CodeSize_{CCD}* はカメラ画像上のコードの大きさが何ピクセルかを示す変数である。

つまりまず, (1) どのシートにいるかを考慮し, 次に (2) どのコードを読み取ってるかを調べ, 最後に (3) そのコードがカメラのどの位置に写っているかを考えることによって現在の自分の位置を計算している。

コード情報からの角度推定計算

推定角度は次の手順で計算される。

1. コード辺ベクトルの計算
2. 平均ベクトルの算出と角度への変換
3. 移動ユニット座標系への変換

以降で各計算手順の詳細を述べる。図 3.55 に以下の計算で使用する座標，ベクトルの定義を示す。

まず式 3.2 によってコードの各辺のベクトルを計算する。なお，本計算手法中の $\text{index}=4$ は $\text{index}=0$ と同値であるとする。

$$v_i = [x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i], (i = 0..3) \quad (3.2)$$

次にベクトル v_1, v_2, v_3 をベクトル v_0 と同じ方向にするために各々回転させる。回転させたベクトルを v'_i とすると，各ベクトルは式 3.3 のように書き下せる。

$$\begin{aligned} v'_0 &= [x_1 - x_0, y_1 - y_0] \\ v'_1 &= [y_2 - y_1, x_2 - x_1] \\ v'_2 &= [-x_3 + x_2, -y_3 + y_2] \\ v'_3 &= [-y_0 + y_3, x_0 - x_3] \end{aligned} \quad (3.3)$$

続いてこれらの辺ベクトル v'_i の平均を次式により求め

$$v'_{ave} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 v'_i \quad (3.4)$$

次式により角度に変化し，かつ移動ユニットの座標系への変換を行う。

$$\theta = s * \cos^{-1}(v'_{ave}) - \pi/2 \quad (3.5)$$

$$s = \begin{cases} 1 & (if \ y_1 > y_0) \\ -1 & (else) \end{cases}$$

なお上記の数式中の $\pi/2$ は移動ユニットの座標系と2次元コードリーダの座標系における，角度の取り方の違いを吸収する項である。

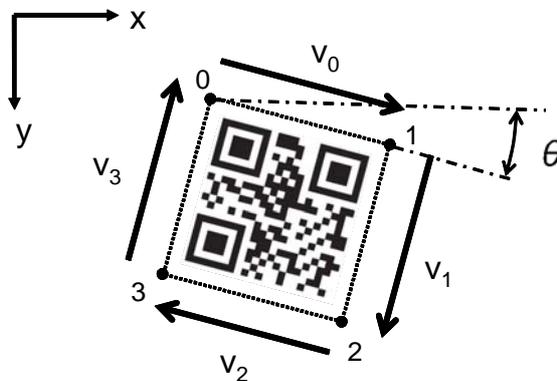


図 3.55 角度推定計算用座標，ベクトルの定義

3.3.4 天井移動ロボットプラットフォームへの統合

前章までで説明をしたキーテクニックを組み込んだ天井移動ロボットプラットフォームを構築した。本節ではプラットフォームを構成する移動ユニットとそれが動作するロボット用天井について述べる。

移動ユニット

移動ユニットは図 3.56 に示すように2つのモータおよびタイヤを持つ、2 駆動輪対向型の移動車両で、2次元コードリーダー、Bluetooth 無線機、リチウムイオンバッテリー、そして緊急停止用の遠隔操作電源遮断回路（(株)サーキットデザイン，“WR-01”）等が搭載されている。移動ユニット側の吸着ユニットはボールキャストで天井上表面に接触しており、本体とは図 3.57 のようにリニアブッシュで結合されている。これにより吸着ユニットは移動ユニットの傾きと関係なく天井板と一定の距離を保つことができるようになっている。また、リニアブッシュとプレートとの間には圧縮バネを組み込み、磁石モジュールの吸着力の30[%]ほどが移動ユニットのタイヤのグリップ力になるようセッティングされている。

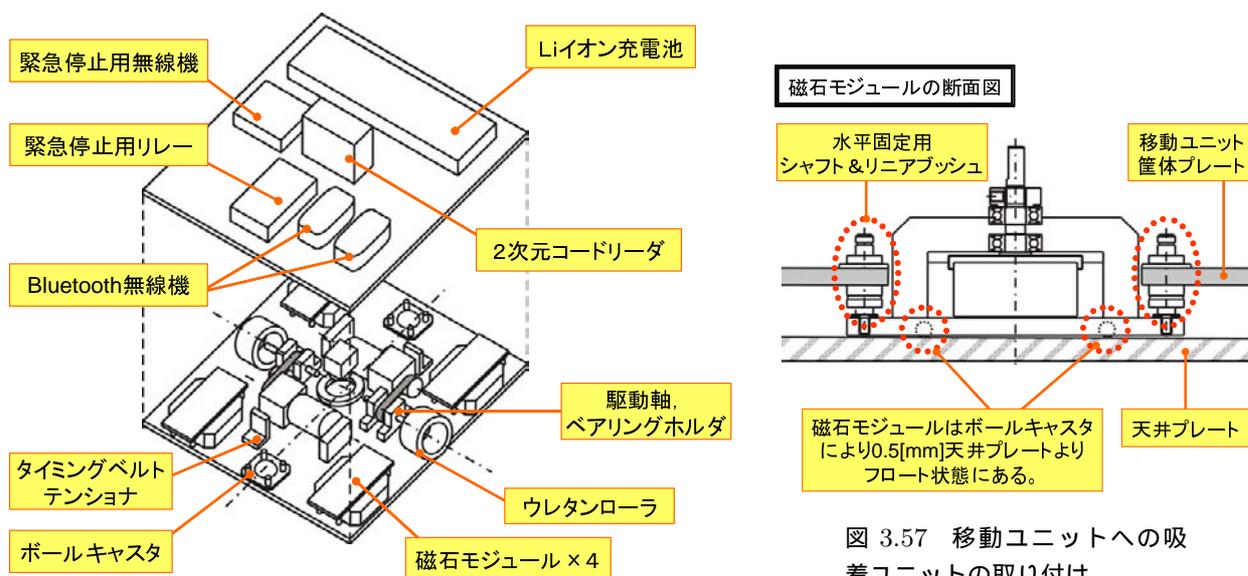


図 3.56 移動ユニットのパーズ図

図 3.57 移動ユニットへの吸着ユニットの取り付け

移動ユニットの移動経路生成と自動運転の実現方法

天井移動ロボットプラットフォームではロボット動作のための複雑な経路探索や走行制御が必要でないのが一つの特長であるが、完全に無計画では動作しないため一定のルールを決める必要がある。今回採用したルールは木構造マップを利用した経路生成法である。以降でこのルールについて述べる。

まず天井平面で交差点となる位置を適宜複数個選択する、この交差点を CrossPoint と呼ぶ。そしてこの CrossPoint 同士を連結し Path を作成する。今回サンプルとして用意したマップを図 3.58 に示す。動作天井は、2,000×2,000(mm) の広さを持ち4 辺は枠に接し、また中心には吊り金具が存在するのでここに入り込むことができない。そこで、1,000(mm) の板の中心4 点をまず基本の CrossPoint とし、その周辺に補助用のクロスポイントを2 個ずつ配置した。次にこのマップを利用した経路生成手順について述べる。経路生成においては、最終のゴール地点の座標および目標角度が与えられるものとする。

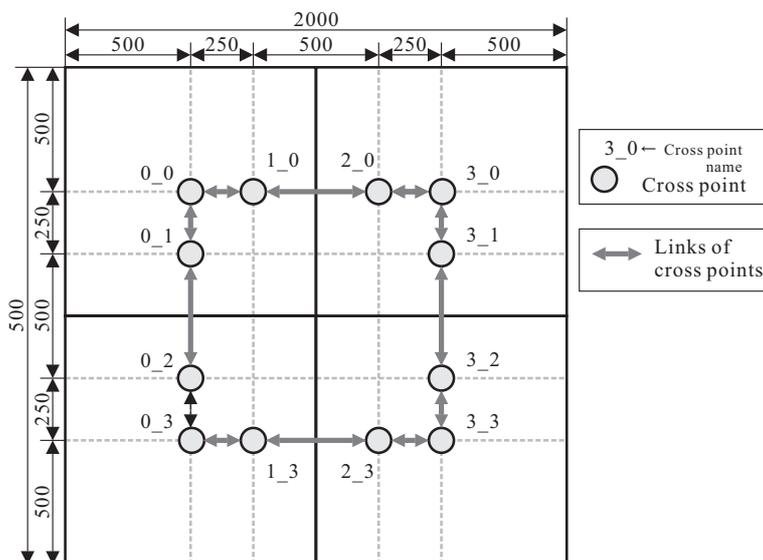


図 3.58 移動ユニットの経路生成用木構造マップ

- STEP1 ゴール地点を設定し，現在の移動ユニットの位置を取得する。
 STEP2 ゴール地点に一番近い距離にある CrossPoint を探しそこを GoalCrossPoint とする。
 STEP3 移動ユニットの現在位置から一番近い CrossPoint を探し CurrentCrossPoint とする。
 STEP4 CurrentCrossPoint を経路の配列リストに登録する。
 STEP5 CurrentCrossPoint に連結する CrossPoint を全て検索し，各 CrossPoint に移動した場合にゴール地点にどれだけ近づくかを計算する。
 STEP6 CurrentCrossPoint に連結する CrossPoint の中でもっともゴールに近づく CrossPoint を CurrentCrossPoint として登録する。
 STEP7 CurrentCrossPoint と GoalCrossPoint が等しい場合経路生成を終了する，そうでない場合 STEP4 へと戻る。

最後にこの経路に沿って移動ユニットを自動運転させるコントロールについて述べる。今回移動ユニットの移動はシンプルな (1) 仮想ライントレース前進，(2) 左右 Pivot ターン，(3) 停止の組み合わせによって行う。自動運転の流れを次に示す。なお，詳細位置決めルーチンに関しては 4.2.3 節で述べる。

- STEP1 2次元コードリーダより現在の位置，そして経路の配列より次のターゲットの座標を取得する。
 STEP2 現在の位置および次のターゲットの座標より必要旋回角度を計算する。
 STEP3 必要旋回角度が閾値以下の場合 STEP4 に進む。閾値より大きい場合，Pivot ターンにより，次のターゲットが移動ユニットの前方に来るように旋回する。
 STEP4 仮想ライントレース前進を行う。⇒ この前進方法では現在位置とターゲットの間に仮想的なラインを想定し，そのラインが移動ユニットの中心に来るように左右輪の回転速度を制御する。
 STEP5 現在の角度をアップデートし，その角度と目標旋回角度との差が閾値以下であれば仮想ライントレース前進を続ける。閾値より大きい場合には Pivot ターンにより，次のターゲットが前方になるように旋回する。
 STEP6 現在の位置から次のターゲットまでの距離を計算する。
 STEP7 この距離が一定以内の場合，次のターゲットを調べこれが空の場合，STEP8 の最終旋回モードに移行する。空でない場合 STEP2 から新しいターゲットに向けて処理を行う。
 STEP8 現在の方向および最終目標旋回角度より旋回方向を決定し旋回を開始する。
 STEP9 現在の角度をアップデートし，その角度と目標旋回角度との差がある一定値以下であれば停止し自動運転モードを終了する。そうでなければ STEP8 に戻る。

天井移動ロボット動作用天井

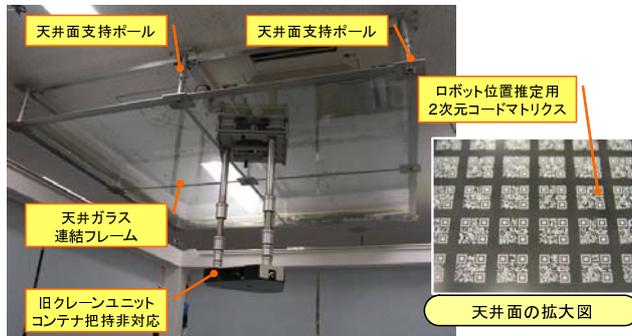


図 3.59 天井移動ロボット動作用天井 (右下：印字された2次元コード)

天井移動ロボット専用の動作環境として図 3.59 に示すような天井を製作した。この天井は 1000[mm]×1000[mm] で厚さ 6[mm] の強化ガラスの上に2次元コードマトリクスを白色インクで印刷した透明シート (500[mm]×500[mm], 4 枚) ならべ、その上下にシート及びガラス表面の保護用に上面 1[mm], 下面 2[mm] 厚のポリカーボネート板 (1000[mm]×1000[mm]) を貼り付けている。なお天井面を透明な素材で製作したため (1) 天井面上で動作している移動ユニットの様子を下方から確認できる, (2) 既存の天井の下側に取り付けられた場合にも照明設備をそのまま利用できる, という二つの利点を得られる。また強化ガラスの安全性に関しては, 仮設天井設置の前に強化ガラスを4点自由端支持し, 板の中心に 60[kg] ほどの重りを載せてみたところ 10[mm] 程度のタワミを示したものの亀裂等の問題はなく, 大きな衝撃力を加えない限りは安全であることを確認してある。

天井移動ロボットは永久磁石の強力な力で天井面を挟み込むため, 段差等がある場合それを乗り越えるために非常に大きな駆動力 (牽引力) が必要となる。よって, 動作天井面は上面・下面共に平滑であることが求められる。特に隣接するガラスプレートを接合する箇所は段差が生じやすいため, その対処が必要となる。天井面を平滑にするには表 3.7 のような方法が考えられる。各方式の中で, 今回は製造・施工コストともに優れていると考えられる ”強化ガラス + アルミコネクタ方式” を採用した。実際にこの方式の採用により, ガラス隣接部での段差は大幅に減少し, 天井ロボットがスタックするなどの問題が発生しないことを動作試験により確認している。この構成で4組の天井面を連結し, 2000[mm]×2000[mm] の動作用天井を構築した。

表 3.7 天井プレートの接続方法

方式	接着方式	薄板接着方式	複合材料張り合わせ方式	強化ガラス+アルミ枠方式	強化ガラス+アルミコネクタ
図例					
説明	強化ガラスの辺を両面テープ等の接着剤によって貼り合わせたもの。施工・分解作業が煩雑であり, また分解後のガラスに接着剤跡が残るという欠点もある。	銅板等の薄い金属材料でつなぎ目を補強することによって接合部を隣合う板に伝達する方法。	中心構造部材をアルミ板で作成し, その両面と隙間を透明樹脂で埋めることにより, 従来のガラスの光を通す機能を損なわずに, 隣合う板との連結性と剛性を上げる方法。	ガラスの加工性を補うために, 加工性の良好なアルミ材料で枠を作成し, ガラスと張り合わせる方法。	アルミのコネクタによって隣接する強化ガラスを接続することによって接合部を隣合う板に伝達する方法。
段差防止効果	【×】施工直後は接合防止の効果を発揮するが経年に伴い段差が出てくる。	【△】銅板の設置箇所を確保すれば, かなりの効果が期待できる。	【◎】アルミ枠の連結により隣合う板の段差はなくなると考えられる。	【○】アルミ材料費用 + アルミとガラスの接着に費用が必要。※1	【○】銅板接着方式と同様以上の効果が期待できる。
製造コスト	【○】製造コストはガラス板のみなので, 非常に安価。	【○】製造コストはガラス板 + 安価な銅板のみなので安価。	【×】中心のアルミ板の加工費用が大きく, コスト大。	【×】アルミ材料費用 + アルミとガラスの接着に費用が必要。※1	【△】アルミのコネクタを安価な押し出し材で製作することにより低価格での実装が可能。
施工コスト	【×】隣合うガラスの接着のため多くの人工が必要。	【△】接着方式ほどではないが, それなりの人工が必要。	【○】はめ込むだけなので, 作業は少ない。	【○】アルミ枠方式とほぼ同様にはめ込み作業だけなので施工コストは小。	

※1: 通常の機械加工を実施した場合, アルミ枠が反る可能性があり, それを防止するための加工は非常に高価である。

3.3.5 基本性能試験

以上のようにして構築された天井移動ロボットプラットフォームの動作確認実験を行った。まず今回実装した天井吸着手法に関して、それぞれの耐荷重の計測を行った。続いての実験では移動ユニットを適宜移動させ、下部懸架ユニット^{*12}の追従性能を確認した。3つ目の実験では移動ロボットの最大牽引力を計測した。4つ目の実験では移動ロボットの自己位置計測の性能評価を行った。以降で実験の詳細を述べる。

永久磁石誘導型吸着法の評価実験

永久磁石誘導型吸着法の性能を評価するために吸着ユニットに負荷を与え、落下する荷重を計測する試験を行った。試験により31[kg]の負荷を与えたときに天井からの落下が起こった、これは各磁石モジュールの吸着力の総和40[kg]より2～3割ほど小さいことになる。この原因は今回の測定において一部の磁石モジュールにねじれの力が加わり、吸着力の低下に繋がったと思われる。しかし吸着力約30[kg]という性能はコンテナ操作部及び運搬対象のコンテナ自重と積載物重量を考慮しても十分な吸着力であると言える。

天井移動ロボットの追従性能実験

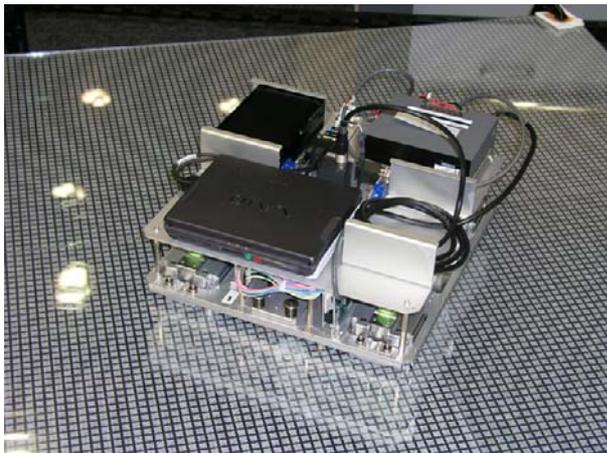


図 3.60 天井移動ロボット追従性能実験の様子（移動ユニット）



図 3.61 天井移動ロボット追従性能実験の様子（天井下面懸架ユニット）

本実験では、天井上面の移動ユニット（図 3.60）の移動に対して、天井下面の懸架ユニット（図 3.61）がどのような追従性能を示すかを簡易的に計測することを目的とする。実際に試験天井面を移動ユニットを走行させ、天井下面懸架ユニットを追従させてみたところわずかにスティックスリップ現象を示すものの、静的な状態での位置のずれはほとんどなく、静的な誤差として確認されたのは磁石モジュールの位置決めによるものだけであり、そのオーダはサブミリ以下であることが確認された。これは機械加工・組み上げの公差に基づくものであり、その精確な測定は困難である。

そこでスティックスリップ現象による動的追従誤差を計測する実験を行った。実験は図 3.62 のようにワイヤタイプのリニアスケールを各ユニットに取り付け、移動ユニットを一定速度で走行させたときのリニアスケールの出力パルスをカウントすることによって行った。使用したリニアスケールは Microtech

*12 本試験で用いたユニットは磁石モジュール等の必要最小限な要素のみを実装したユニットである

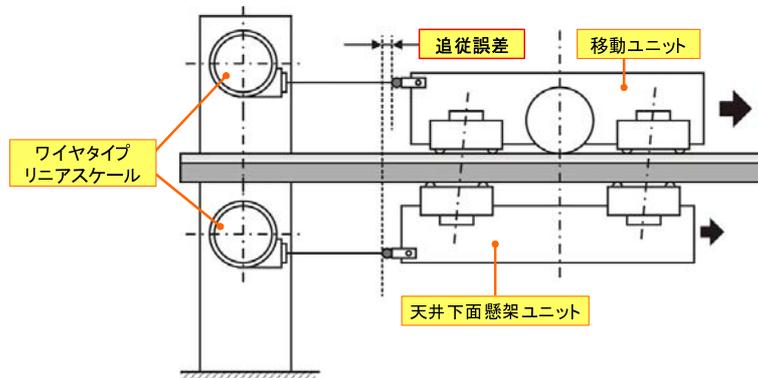


図 3.62 スティックスリップ現象による追従誤差計測実験のセットアップ

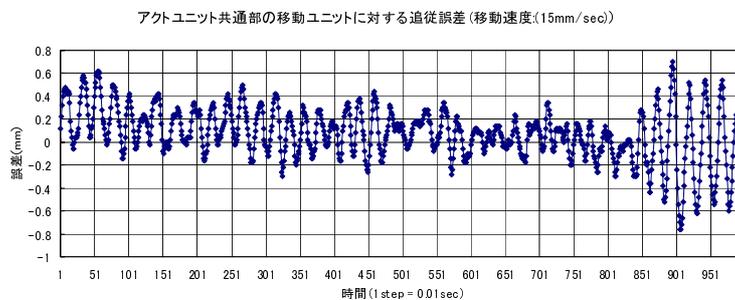


図 3.63 移動ユニット動作時の天井下面懸架ユニット共通部の追従誤差: 移動速度 15[mm/s]

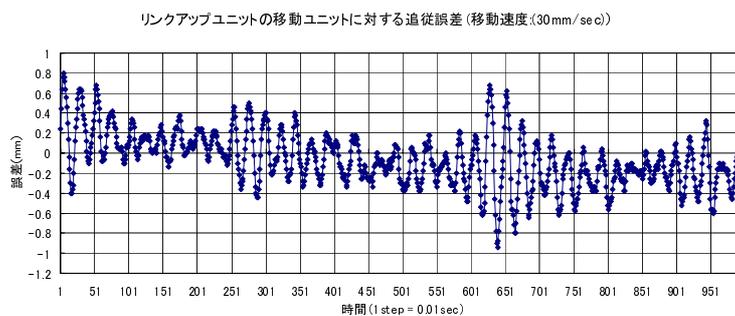


図 3.64 移動ユニット動作時の天井下面懸架ユニット共通部の追従誤差: 移動速度 30[mm/s]

Laboratory 製”MLS 30-4500-1000” で、測定ストローク 1,000[mm]、最小分解能 0.02[mm] のものである。また 2 系統のパルスカウントは秋月製の”H8-3052” ボードを用いて行った。サンプリングレートは 100[Hz] である。図 3.63,3.64 に実験の結果を示す。グラフを見ると移動ユニットの速度が 15[mm/s]、30[mm/s] の両方とも動的な誤差が最大 1[mm] 程度であった。ここで追従誤差が細かく振動しているのは、永久磁石誘導型吸着法は上下ユニットの位置誤差が大きくなり、磁石の吸着力の横方向の大きさが摩擦と比較して十分に大きくなった時に追従動作が始まるというスティックスリップ現象を起こしているためと考えられる。また誤差の幅が一定でない理由は磁石モジュールの支持にボールキャストを用いているため、ほこりなどが侵入し摩擦状態が変化しているためと考えられる。

各磁石モジュール単位でこの動的な誤差を考えると図 3.65 に示すようなモデルに簡素化することが出

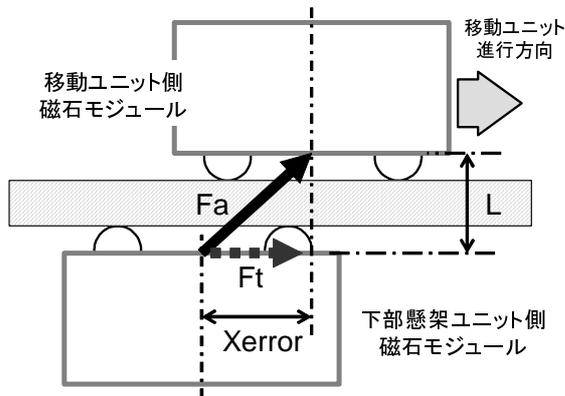


図 3.65 磁石モジュールの牽引動作モデル

図 3.65 中の記号の意味

L : 磁石モジュール間の垂直距離

$Xerror$: 磁石モジュール間の水平位置誤差

Fa : 磁石モジュールの吸着力

Ft : 磁石モジュールの水平牽引力

来る。このモデルにおいて $Xerror$ が十分小さいとき式 3.6 が成立する。

$$\mu_0 \times Fa = Ft = Fa \times \frac{Xerror}{L} \tag{3.6}$$

ここで μ_0 は磁石モジュールの静摩擦係数である。この式に現状の磁石モジュールのパラメータである $Xerror=1[\text{mm}]$, $L=10[\text{mm}]$ を代入すると, $\mu_0 = 0.1$ となり, この値はボールキャストで円滑なガラス面上に支持された磁石モジュールの静摩擦係数としては妥当な値である。よって, 本スティックスリップ現象は磁石モジュールのボールキャストによる静摩擦により発生していると考えられる。

移動ユニットの最大牽引力測定実験

本実験では図 3.66 に示すように, バネ量りを移動ユニットの後端に取り付け直進動作をさせ, ホイールがスリップする限界の牽引力を測定した。測定の結果, 直進時の最大牽引力は 35[N] 程度であることが分かった。この実験により, 移動ユニットが適度な牽引力を有し, また一方で適度な滑りを実現していることが確認された。この牽引力と滑りのバランスが後に示すガイドプレートによる位置決めには重要となってくる。

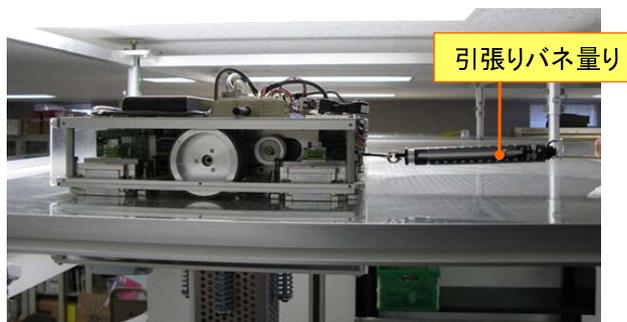


図 3.66 移動ユニットの最大牽引力測定実験の様子

移動ユニットの位置計測実験

本実験では移動ユニットを規定の天井位置において指定の角度 (30[deg] 刻みの 12 点) に回転させ、その位置での 2 次元コードデータからの位置・角度推定結果のばらつきを調べ、本手法のロバスト性 (再現性) を評価する。実験の結果を図 3.67 に示す。結果より X 方向, Y 方向, ヨー角度の標準偏差最悪値がそれぞれ 0.22[mm], 0.33[mm], 0.30[deg] であることが分かった。この実験により、本手法を用いることで比較的ロバストにロボットの位置・角度を計測できることが確認された。

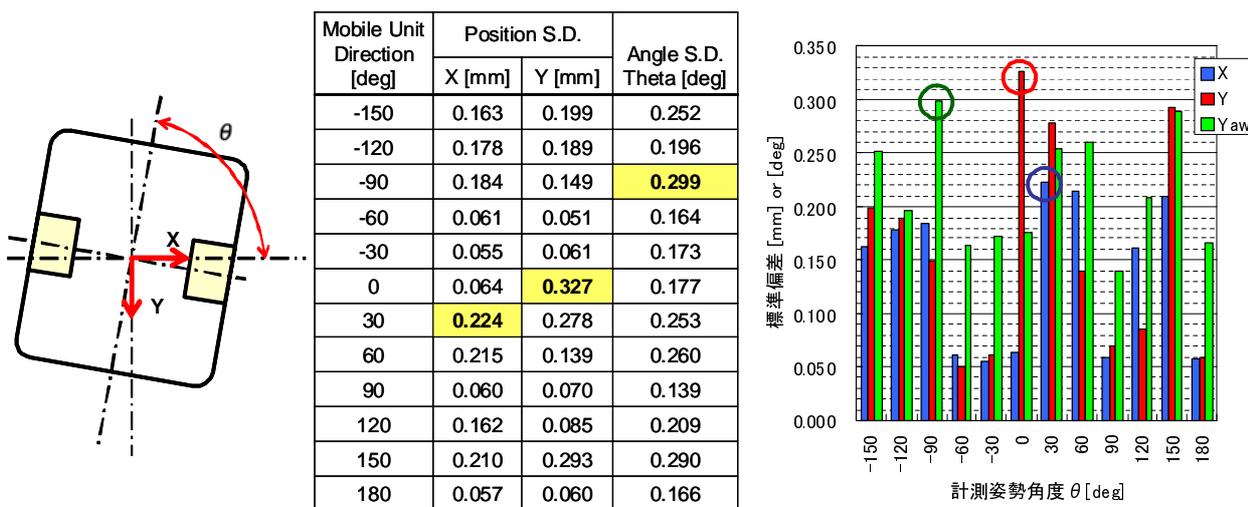


図 3.67 移動ユニットの位置計測実験結果

3.3.6 コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) のまとめ

本節ではコンテナ運搬ロボットの天井懸架移動部の仕様検討, 設計, 基本性能試験について述べた。

天井懸架移動部では人間生活環境中で動作するロボットが従来の人間生活を阻害しないように、人間とロボットの共有空間をできるだけ少なくすることを 1 つの特徴と設定した。これを実現するために、人間が平常で使用しない空間として天井に注目し、この天井面をロボットが移動し必要時のみ天井から人間へアクセスするという手法を取ることを考えた。また単体のロボットが天井面を動作するのではなく、複数台が同時に動作できることも重要であると考えた。

生活環境中の天井面にロボットを吸着させる手法としては永久磁石を用いた ” 永久磁石誘導型吸着法 ” を提案した。また複数台が同時に動作するために必要な複数移動ロボットの同時位置計測に関しては ” 2 次元コードマトリクス ” を用いた位置計測手法を提案した。

実験により ” 永久磁石誘導法 ” が生活環境内の天井でロボットを動作させるのに有効であることを示し、 ” 2 次元コードマトリクス ” を用いた位置計測手法がロボットが自律的かつ正確に自己位置を推定するのに有効であることを確認した。

コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) のスナップショット

コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) の概観を図 3.68 に示す。

仕様一覧

コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) の仕様一覧を表 3.8 に示す。

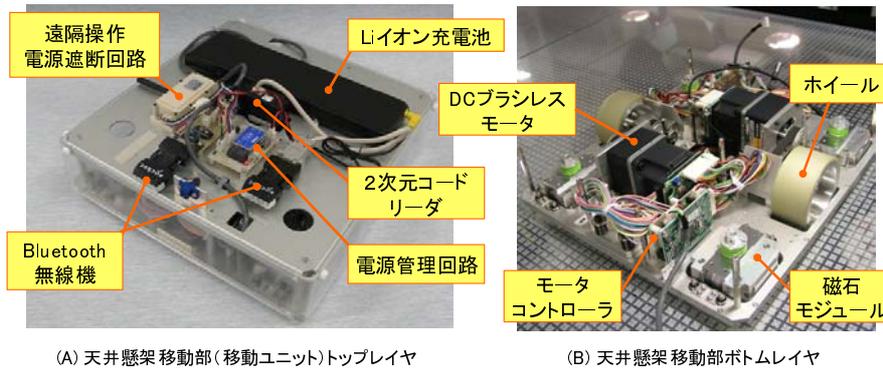


図 3.68 コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) のスナップショット

表 3.8 コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) の仕様一覧

項目	仕様
駆動方式	2ホイール対向型+2つのボールキャスタによる支持
筐体サイズ	340 × 320 × 150 [mm]
自重	10 [kg]
最大牽引力	35 [N] ※1
最小旋回半径	0 [mm]
最高移動速度	125 [mm/sec]
自己位置推定精度	位置: 0.33[mm], 角度: 0.30[deg] ※2

※1: コンテナ操作部のみ牽引時
 ※2: 標準偏差

クロージャ、コンプライアンス技術の適用箇所

- Geometric object closure
 本サブシステムではコンテナのマニピュレーションは行わないので、関連項目なし。
- 戦略的コンプライアンス
 - ロボットが天井面を移動可能なプラットフォーム（環境）の整備
 ⇒ ロボットが人やモノと干渉せずに、タスクに専念するための領域・空間の規格化と言える。
 - 二次元コードマトリクスによるロボットの位置推定
 ⇒ 生活環境の変化に対応するためのロボットの能力の補助・強化であると言える。
- 機械的コンプライアンス
 本サブシステムではコンテナのマニピュレーションは行わないので、関連項目なし。

3.4 コンテナ運搬ロボット(2)(コンテナ操作部)

コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)は大きく分けて次の3つのコンポーネントより構成される。

1. マニピュレーション機構部
コンテナを柔軟かつロバストに把持操作するコンポーネント。
2. 伸縮機構部
マニピュレーション機構部の安定した昇降動作を実現しつつ、人や障害物との接触による外乱を天井懸架部に伝えないよう絶縁するコンポーネント。
3. 天井懸架部・巻き上げ動力部
天井懸架移動部の動作によりコンテナ操作部全体を移動させ、伸縮機構部の昇降動作の動力源となる巻き上げ動作を実現するコンポーネント。

図 3.69 にコンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)の概観を、図 3.70(上)に機能ブロック図、図 3.70(下)にスケルトン図を示す。マニピュレーション機構部は非常に構造が複雑であるため、まずマニピュレーション機構部単独でシステム設計、実装、基本性能試験について述べる。次に、伸縮機構部及び天井懸架部・巻き上げ動力部について上記と同じ項目について述べる。なおコンテナ運搬ロボットに搭載された WirelessLAN カメラによって、最終的にコンテナを把持するのに必要なコンテナの位置計測を実施する構成になっているが、本カメラについては 3.6 節のコンテナ位置認識システムにおいて詳細に述べる。

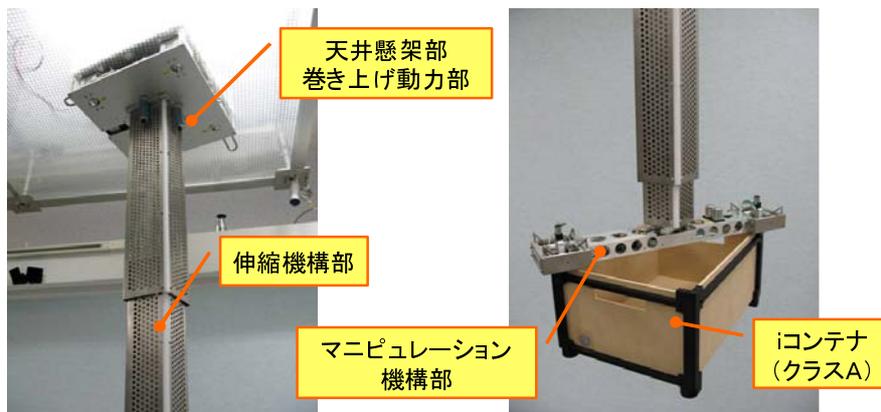


図 3.69 コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)の概観

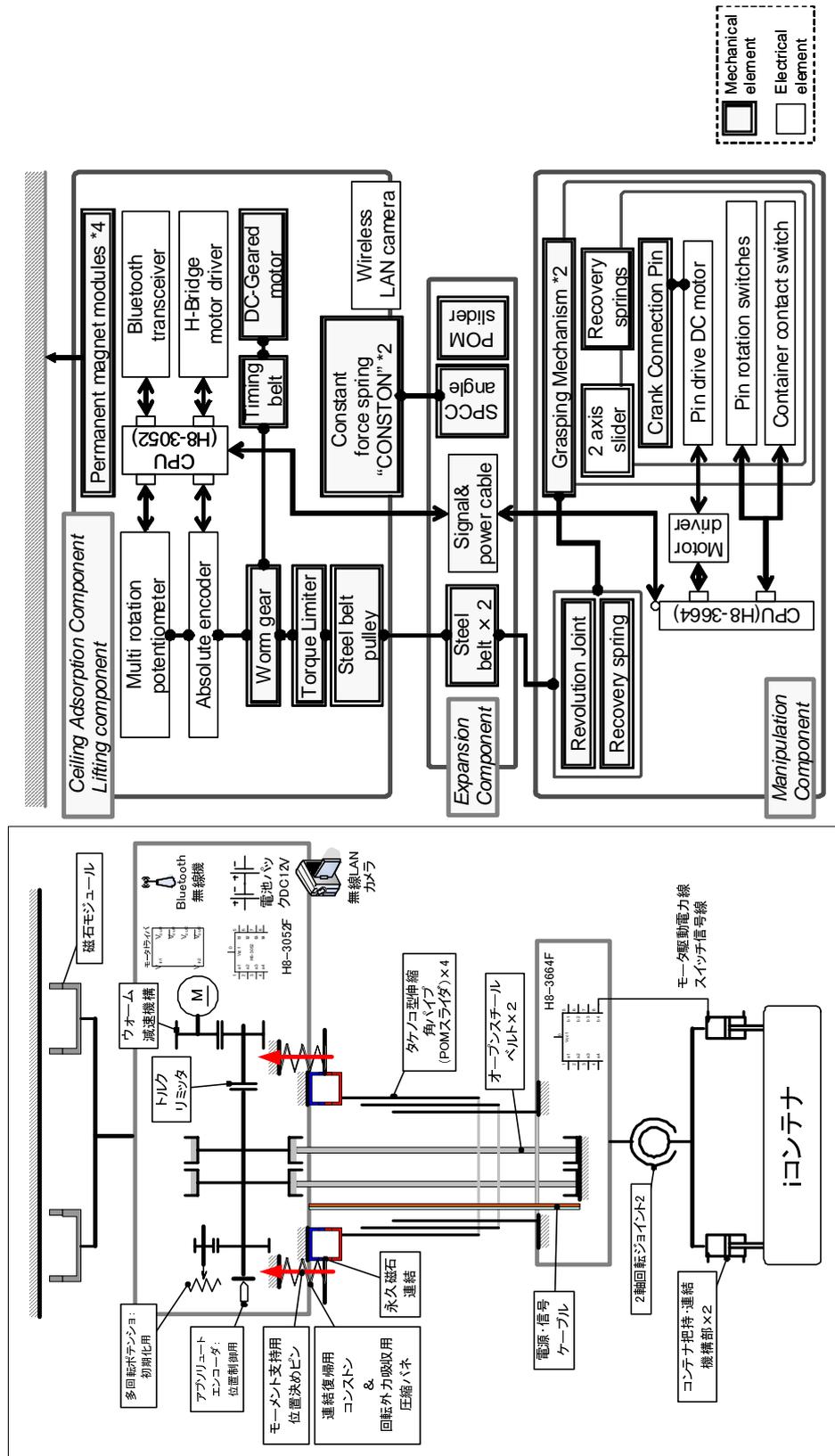


図 3.70 コンテナ運搬ロボット（コンテナ操作部）の機能ブロック図（上）とスケルトン図（下）

3.4.1 マニピュレーション機構部のシステム設計（要求仕様，機能の検討）

前述したように，天井面からの昇降動作はマニピュレーション機構以外の2つのコンポーネントが実現するため，マニピュレーション機構に求められる性能は(1) i コンテナの設置状態という環境変化を吸収して把持準備状態を実現し，(2) ロバストに把持（連結，解放）動作をすることとなる。前者が機械的コンプライアンスであり，後者の動作実現を補助・支援することを意味している。また，後者は機械的コンプライアンスを阻害する方式であってはならないという点も重要な検討事項である。上記の性能を実現するためには，以下のような機能が必要となる。

- (1) 水平，傾斜誤差受容機能（コンプライアンス機能）
生活環境での i コンテナの位置計測は誤差を含む。そこでマニピュレーション機構にはその誤差（水平誤差 $\pm 10[\text{mm}]$ と設定^{*13}）を吸収するコンプライアンス性能が必要となる。また i コンテナは水平面に設置されるとは限らないため，ある程度の傾斜状態（図 3.71 の検討により最大傾き角 $10[\text{deg}]$ と設定）でも把持が行える必要がある。
- (2a) i コンテナ連結・解放機能
マニピュレーション機構は i コンテナの連結・解放の状態遷移及び状態認識が出来る必要がある。
- (2b) 無動力把持維持機能
まず把持状態を維持すべき最大荷重を i コンテナ本体 + 積載物重量併せて $8[\text{kg}]$ と設定する。安全のため連結の状態維持に動力が不要で，停電時やバッテリー切れの際にも i コンテナとの連結を維持出来る必要がある。

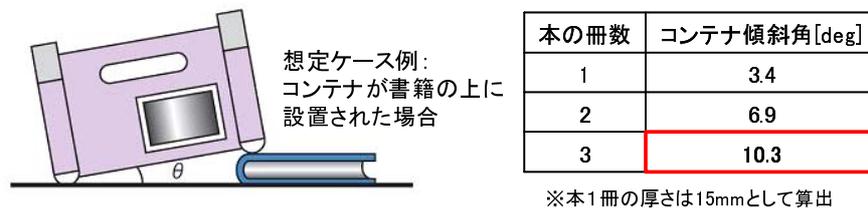


図 3.71 最大傾斜角設定の検討

*13 許容すべき誤差はコンテナ位置認識システムの性能に依存してくる。今回は事前の試験により $10[\text{mm}]$ 程度の精度が実現される目算を得て，この値を設定した。

3.4.2 マニピュレーション機構部の実現 (基本設計と細部設計)

本章では各必要機能の実装について述べる。まず図 3.72 に開発したマニピュレーション機構の概要を示す。以降では、まずコンプライアンス機能を阻害しない把持方式の検討について述べ、続いてそれらをサポートするコンプライアンス機構の設計及びレイアウトの検討について述べる。

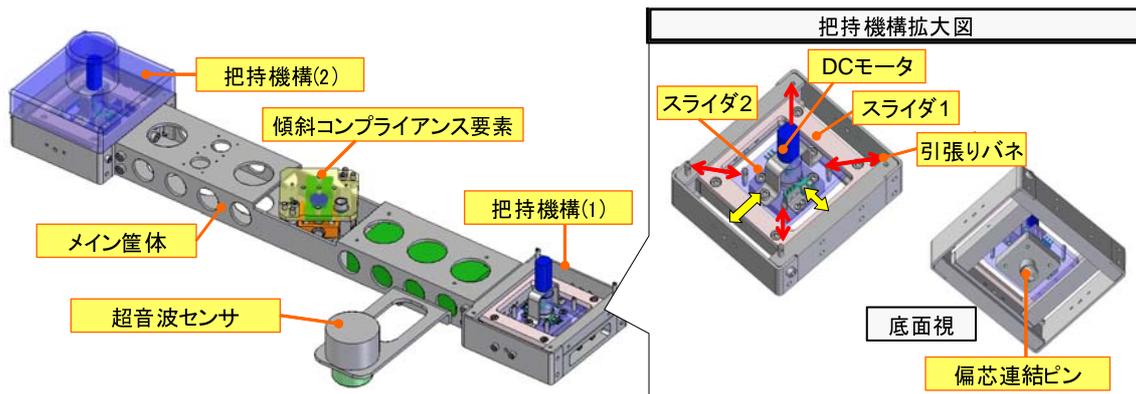


図 3.72 マニピュレーション機構の概要

— i コンテナ連結・解放機能及び無動力把持維持機能の実装 —

本節では、以下の 4 項目について設計検討を行う。(1) 把持の基本方式の選定, (2) 連結ポイント数の検討, (3) 連結を実現する具体的な構造, (4) 連結の際にジャミングが発生しない連結構造部の幾何寸法

i コンテナ把持方式の検討

コンテナケースを含めたボックス形状荷物の運搬を行う方式として表 3.9 に示すような方式が一般的であるが、本研究では確実な把持が可能で、かつ連結状態の認識が容易であるという意味でピン連結方式を採用した。次にピン構造と穴構造をそれぞれ i コンテナ側、マニピュレーション機構側のどちらに設置するかを検討が必要となる。把持機構単体の開発初期フェーズにおいてはレイアウトの容易さから、把持機構側に穴構造を設置していた、このため i コンテナに設置されたピンの安全保護用カバーが必要となり、多数の i コンテナを用いる際にはコスト高となってしまう。そこで本研究では把持機構側にピン構造を設置することとした。

把持連結ポイント数の検討

ピン連結方式の場合、最低 2 箇所以上の連結ポイントがないと i コンテナの回転を固定出来ない。i コンテナは上面が開放された箱構造をしているため、連結ポイントは i コンテナの角に設置する必要がある。よって連結ポイント数は 2~4 箇所の中から決める必要がある。連結ポイント数と各種性能は図 3.73 に示すような関係にある。連結ポイント数を増やすほど安全性は高くなるものの、把持動作の複雑さが増し、結果として把持動作失敗の可能性が高くなる。そこで今回は連結構造を安全性の高いものを選択することとし、連結ポイント数は最小の 2 箇所 (i コンテナの対角) と設定した。

表 3.9 ボックス形状荷物の把持方式候補

方式	ハンドル把持方式	フォーク挿入方式	マグネット吸着方式	ピン連結方式
図例				
説明	人間と同様にハンドでコンテナのハンドルを掴む方式。	フォークリフトのようなフォークでコンテナ底面を支える方式。	磁石で吸着する方式。片側を電磁石にすることでコンテナとの結合・分離を行う。	宇宙線が連結するように溝にピンなどを差し込むことでコンテナと結合する方式。
利点	ハンドルとハンドの形状を工夫することである程度、位置決め精度に対して寛容にできる。	下から支えるため安定している。位置決め精度に対して寛容である。	複雑な機構が必要でない。位置決め精度に対して寛容である。	ラッチ機構と組み合わせやすく、ロックをかければ確実な保持が可能。
欠点	確実にハンドでハンドルが把持できたかどうかをセンシングするのが難しく、誤検知する危険性がある。	搬送時に衝突した際、コンテナを落としてしまう危険性がある。	ラッチ機構と組み合わせなければ衝突時にコンテナを落としてしまう可能性がある。また電磁石での消費電力も少なくない。	機構が複雑になる。ピンを挿入するには、位置合わせが必須なので別のガイド機構を設ける必要がある。

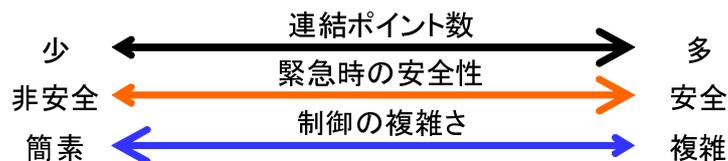


図 3.73 連結ポイント数と各種性能の関係

連結構造の検討

続いてピンと穴構造を連結する構造の検討を行う。連結構造として図 3.74 に示す 3 方式が考えられる。各々の概要と特長を整理する。

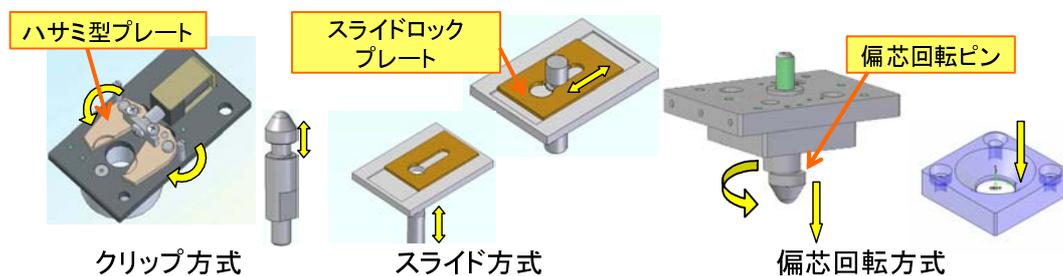


図 3.74 ピン ↔ ホール連結構造の候補

- クリップ方式：ピンの溝をプレートで挟み込み連結する方式。プレートをわずかに駆動するだけなので、構造が容易である反面、過大な荷重が加わった場合ピンの面取り部などの接触によりプレートが開放してしまう恐れがある。
- スライド方式：スライドプレートのカギ溝とピンの溝が重なることで、連結を実現する方式。連結のための稼動方向とピンに荷重が掛かる方向が異なるため、荷重が加わることでピンが外れること

はなく、安全な構造である一方で、水平に大きなストロークのアクチュエータが必要となる。

- 偏芯回転方式：物流コンテナで用いられているツイストロックピンの連結構造と同様に挿入ピンの一部が元のピンから突出変形し、固定を行う方式。小さな水平面積内に実装可能であり、またスライド方式と同様な理由で安全な連結が可能。

本研究では、そもそも i コンテナの設計においてコスト面を考慮して把持機構側にピンを設置する方式としており、またマニピュレーション機構が小型化可能なことから、偏芯回転方式を採用した。

把持連結ピン幾何寸法の検討

把持連結ピンが穴構造に挿入される際に次の2つのことを考慮しなければならない。

1. ジャミングの回避：ピンが穴に挿入される場合相互の摩擦力及び構造支持力がバランスするとピンのコジリが発生する。
2. 確実な把持状態認識の実現：連結・解放を認識するセンサの出力と把持状態が1対1対応するような幾何拘束が必要となる。

● ジャミングの回避： ジャミングの回避に関して、Whitney[54] が工場のペグ・ホールの挿入作業に関して2次元モデルを用いて非常に簡潔な結論を導き出している。これによると多くのジャミングはピンと穴部が2箇所接触する場合に発生するため、この2箇所での接触を防止すればジャミングを回避できることになる。ペグ・ホールの場合ペグの長さは対象部品の仕様により固定されてしまうため、RCC(Remote Center Compliance)等を用いて回転中心とペグ先端の距離を短くすることによって、2箇所での接触を防止しているが、今回はピン挿入長さを自由に設定することが可能なため、図 3.75 に示すように、可能な限りピン挿入長さ (L_2) を短くすることによって通常ピンが挿入される角度範囲では2点の接触が発生しない状況を容易に実現可能である。

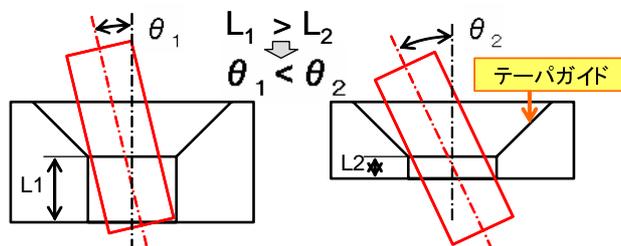


図 3.75 ジャミングを回避可能なピンと穴寸法の検討

● 確実な把持状態認識の実現： 把持状態を正しく認識するためには2種類のセンサが必要となる。まずピンが確実に穴部に挿入されていることを認識するセンサ、そしてもう1つが偏芯回転ピンが確実にロック位置で停止していることを認識するためのピン回転位置計測センサである。今回のピン、穴構造は図 3.76(左)のような構造をしているため、平面(A)が平面(B)と完全に接触していることがピンの穴への挿入と同義になる。そこで平面(A)上に接触スイッチの先端を配置することで、この接触を認識させることとした。スイッチの先端はピンの根元付近に位置するため偶然に他の物体と接触することは希であるが、さらに2つの把持機構のスイッチ入力の”AND”を取ることで、より確実な認識が可能となる。また偏芯回転ピンは「連結位置にあること」と「解放位置にあること」の二つの状態が認識出来ればよいいため、図 3.76(右)に示すように偏芯ピンの周りにノッチをつけた円形プレートを用意し、ノッチが連結認識用、解放認識用のそれぞれのスイッチを OFF にすることで認識が出来るようにした。

—水平、傾斜誤差受容機能の実装—

本節ではまず水平、傾斜誤差を受容するためのコンプライアンス構造の構成について検討し、続いて水平、回転コンプライアンス要素各々の実現方法について検討を行う。

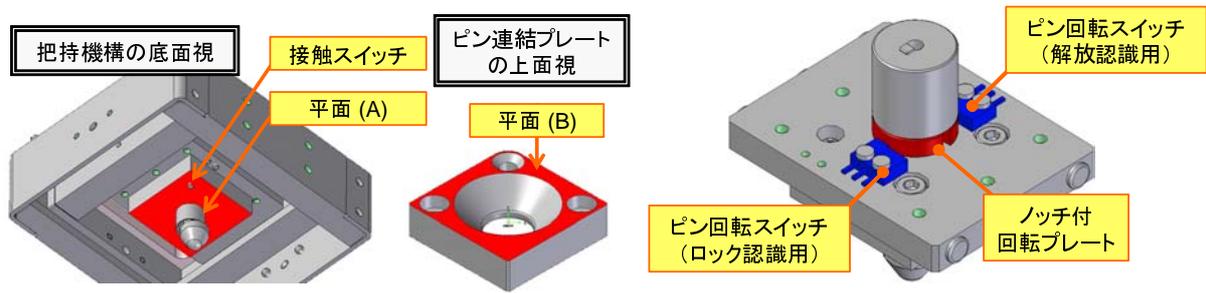


図 3.76 (左) 連結ピン及び穴の構造, (右) 把持状態認識用スイッチとノッチ付回転プレート

水平, 傾斜誤差吸収構造の構成検討

前節での検討により, 偏芯回転ピンによる2箇所連結によってコンテナを把持する方式を選定した。つまり, コンプライアンス機能の設計としては, 『対象が水平3自由度(X, Y, ヨー)と傾斜2自由度(ピッチ, ロール)の自由度を持つ状況において, 2つのピンを同時に挿入する問題』に取り組むこととなる。まず傾斜誤差に関してはコンテナとの連結箇所2つは連動して傾斜するため^{*14}必要最小限の2自由度のコンプライアンス要素を1つ設置すれば良い。一方で水平誤差吸収構造の構成については, 次の3つの項目について検討する必要がある。

1. 水平3自由度の誤差を吸収するためにはいくつの機構要素が必要か。
2. i コンテナの製造誤差によるピンの挿入不良の可能性はないか。
3. 2本のピンが連動することによるジャミングの可能性はないか。

まず1に関しては概ね, (a) 集中構成方式(1水平誤差吸収構造+1ヨー軸回転ジョイント構成)と(b)分散構成方式(2水平誤差吸収構造)の2つが考えられる。図 3.77(左)に各々のスケルトン図を示す。Yaw軸の回転コンプライアンスの導入に関しては図 3.78(a, 下)に示すように, ヨー軸の初期位置がわずかでもずれてしまった場合, 水平位置として非常に大きな誤差になるため慎重な検討が必要となる。また製造誤差の問題は適切な治具を用いて組み立てることで回避可能であるが, 高精度な組立がコストに及ぼす影響は無視出来ない。さらに2本のピンが連動することによるジャミングの問題は図 3.77(右)に示すように, 2本のピン間距離が固定されている場合, 各々1箇所, 合計2箇所の接触点が発生し, 結果としてジャミング状態になるということが考えられる。以上より分散構成方式(2水平誤差吸収構造)の方がより堅実な方式であると考えられる。

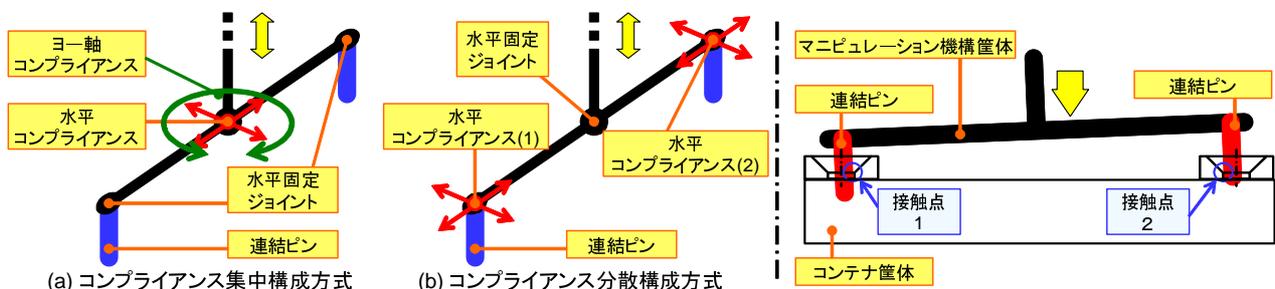


図 3.77 (左) コンプライアンス要素の配置案候補, (右) ピン2本による新たなジャミング状態

*14 実際にはコンテナ筐体のねじれ等によりズレが生じるが, これはコンテナ筐体の剛性を挙げることで対処する。

水平、傾斜誤差吸収構造の詳細レイアウト検討

前節の検討に続き、コンプライアンス構造の水平・垂直方向のレイアウトについて詳細な検討を行う。水平方向に関しては図 3.78(a) 上段に示すように、2つの水平誤差吸収構造はi コンテナ対角に位置する

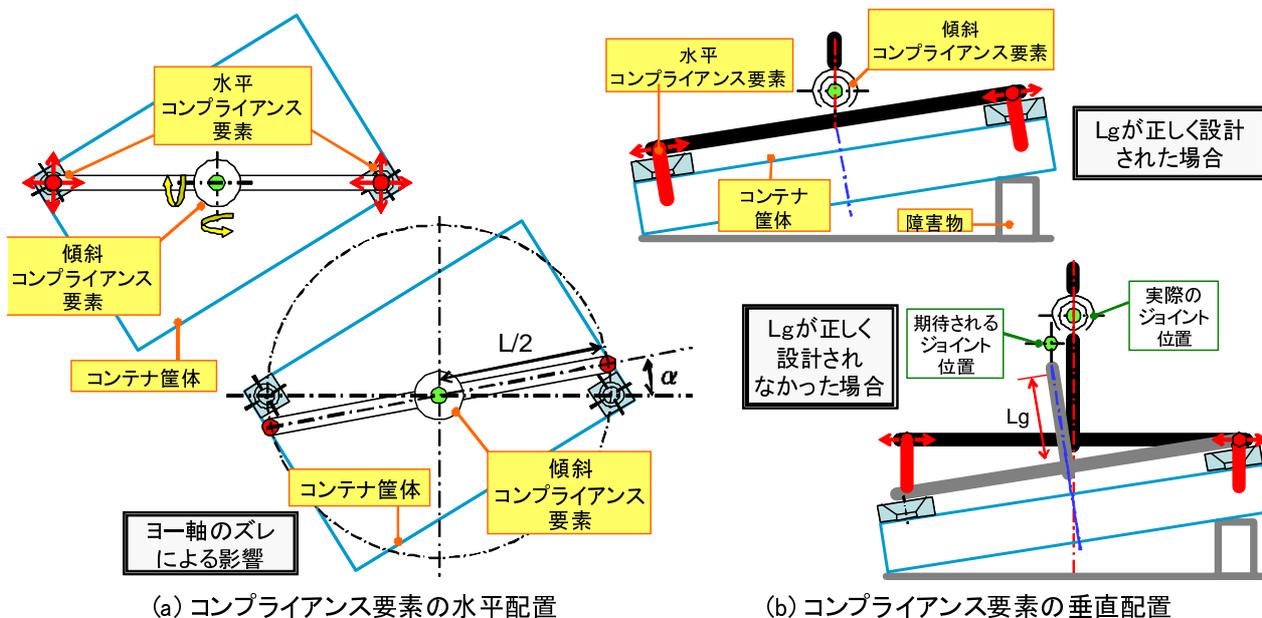


図 3.78 コンプライアンス要素のレイアウト設計

ことになり、この中心に傾斜誤差吸収構造を配置するのが左右の質量バランス的に妥当であり、特に工夫の余地はない。一方で垂直面のレイアウトに関しては傾斜誤差吸収構造と連結ピンの先端位置との長さは図 3.78(b) 上段に示すように可能な限り小さいほうが好ましい。これは図 3.78(b) 下段に示すように、 L_g が不要に長い場合、マニピュレーション機構自身の傾きとi コンテナの傾きが一致せずに静止してしまう現象が発生するからである。実際にはマニピュレーション機構を昇降させる位置を筐体の傾きを計測しながら緻密に制御することにより、この状態は回避可能ではあるが、そもそもi コンテナの傾斜角を正確に計測することは困難なため、 L_g を可能な限り小さくするほうが現実的な解法であると言える。

水平誤差吸収構造の検討

水平誤差吸収構造では連結ピンの垂直方向は保持しつつ、連結ピンと穴の水平位置誤差を滑らかに吸収する構造が必要となる。前述した工場内でのペグ挿入作業ではRCCを用いるのが一般的であるが、RCCはゴムの弾性変形を利用した構造のため変位を大きくとることは出来ない。そこで「ハイブリッド摩擦スライド方式」を採用することとした。この方式では図 3.79(左) に示すような二重のスライド構造によって水平 X,Y 方向の変位を実現している。そして図 3.79(中央) に示すようにスライド面を摩擦の異なる二種の材料を用いることによって、誤差吸収動作時はスライド上面の低摩擦素材との接触により、スムーズなスライド動作を実現する。一方でi コンテナ把持後には、把持荷重によって下面の高摩擦素材とスライドが接触することにより不要な振動などが発生しないよう連結ピンを固定可能である。またスライドは連結解除後は引張りバネにより中央に戻る構造となっている。本構造はWhitneyがジャミング回避には効果のないと指摘した [54] フロート方式と同様の機構であるが、本研究では連結ピンの長さを十分に短くすることによってジャミングを回避しているため、RCCと比較して大きい誤差吸収性能を有効に活用出来る。

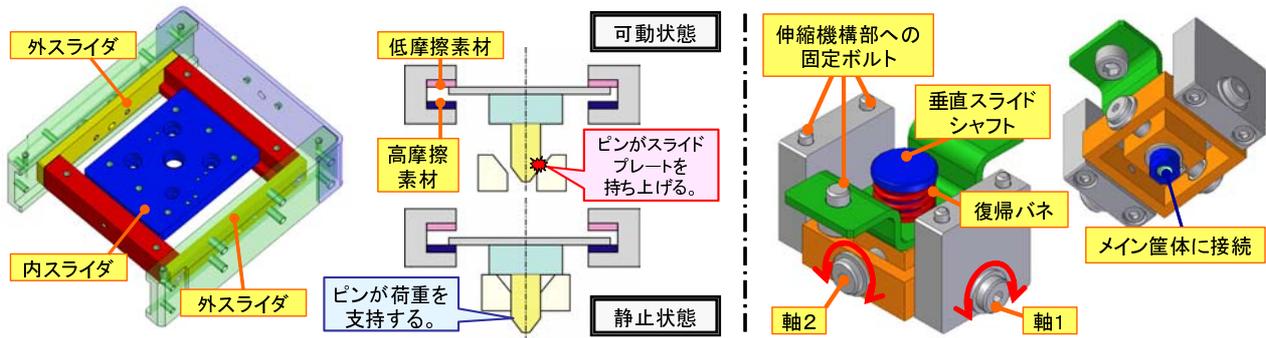


図 3.79 (左) 水平コンプライアンス機構, (右) 傾斜コンプライアンス機構

傾斜コンプライアンス機構の実現方法

i コンテナの傾斜に合わせてマニピュレーション機構を傾ける傾斜コンプライアンス機構には i コンテナのピッチ角, ロール角の 2 つの回転自由度が求められる。2 つの回転自由度を実現する方法としては 2 つの方式が考えられる。各方式の概要と特長を表 3.10 に整理する。今回の使用では球面ジョイントの 3 軸目がわずかでも動作してしまうと図 3.78(a) 下に示すように, 連結ピンの位置では非常に大きな位置ずれ ($\epsilon = \alpha \times (L/2)$ で L が大きい) を発生してしまう。そこで部品数は多くなってしまいが 2 軸直交方式を採用することとした。実装した回転ジョイントを図 3.79(右) に示す。

表 3.10 傾斜コンプライアンス機構実現方法の候補

機構名	2軸直交型	球面ジョイント方式
図例		
説明	すべり軸受けを2系統, 直交に配置して2軸の回転ジョイントを形成する方式。	3自由度の球面ジョイントの1自由度を拘束して2自由度の回転ジョイントを実現する方式。
利点	回転自由度が2自由度のみなので, 把持機構の自由度と競合することなく, 調整が容易。	回転ジョイント自体が3軸の自由度を持っているので, 部品数が少なくすむ。
欠点	部品数が多いため, 組立・メンテナンスの費用が高む。	回転自由度が3と柔軟に回転するため, 把持機構との自由度のバッティングが発生し, 緻密な動作の調整が必要となる。

なお水平状態への復帰を実現するために、柔軟ゴム素材を戻りばねとして利用し^{*15}，またi コンテナ荷重が加わると支持シャフト(図3.80の青)がブラケット(図3.80の緑)のテーパ穴部と連結することで、回転ジョイントが固定されるような構造とした。

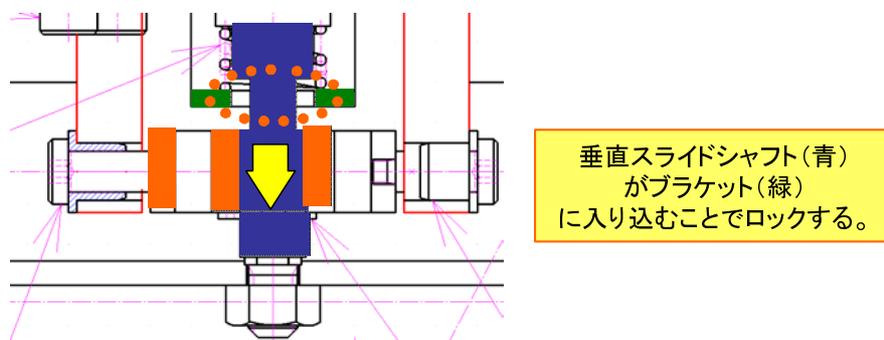


図 3.80 傾斜コンプライアンスの断面図

^{*15} 柔軟ゴム素材は減衰効果を持つため振動抑制の機能を果たす。

3.4.3 マニピュレーション機構部の基本性能試験

試験では前節で設計・実装を行ったマニピュレーション機構の基本性能を評価するために以下の4つの試験を行った。

1. ジャミング発生確認試験
2. 荷重支持性能確認試験
3. 水平誤差許容性能確認試験
4. 傾斜誤差許容性能確認試験

ジャミング発生確認試験

本試験では図 3.81(上) に示す i コンテナ上面模擬プレートを、図 3.81(下) に示すようにマニピュレーション機構の連結ピンに挿入したままで姿勢を変化させ、任意の相対姿勢において図 3.77(右) に示すようなジャミングが発生しないことを確認した。

荷重支持性能確認試験

図 3.82 に示すように、i コンテナ上面模擬プレートに 10[kg] の荷重をぶら下げて、荷重支持性能の試験を行い、マニピュレーション機構が設定最大荷重 (8[kg]) 以上を支持可能なことを確認した。

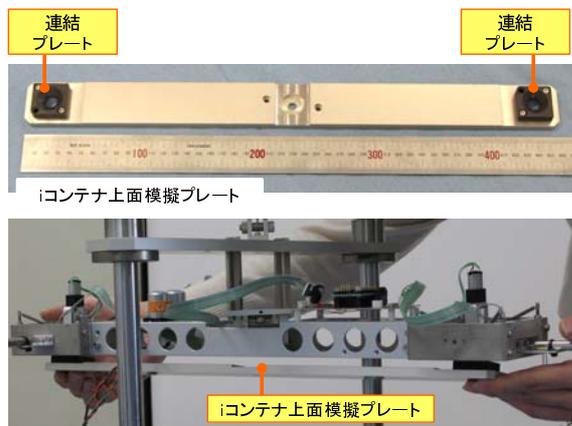


図 3.81 ジャミング発生確認試験の様子



図 3.82 荷重支持性能確認試験の様子

水平誤差許容性能確認試験

本試験では図 3.83 に示すような i コンテナ及び伸縮機構部模擬用のテストベンチを用いて、ピン連結試験を実施した。図 3.84(a) に本テストベンチの座標系を示す。図 3.84(b) に示すような 13 パターンの i コンテナ・機構相対位置において、ヨー角度を-2, 0, 2[deg] の 3 パターン（一部は 0[deg] のみ）にした場合の合計 26 パターンの試験を行った。各ポイントでの試行数は 3 である。

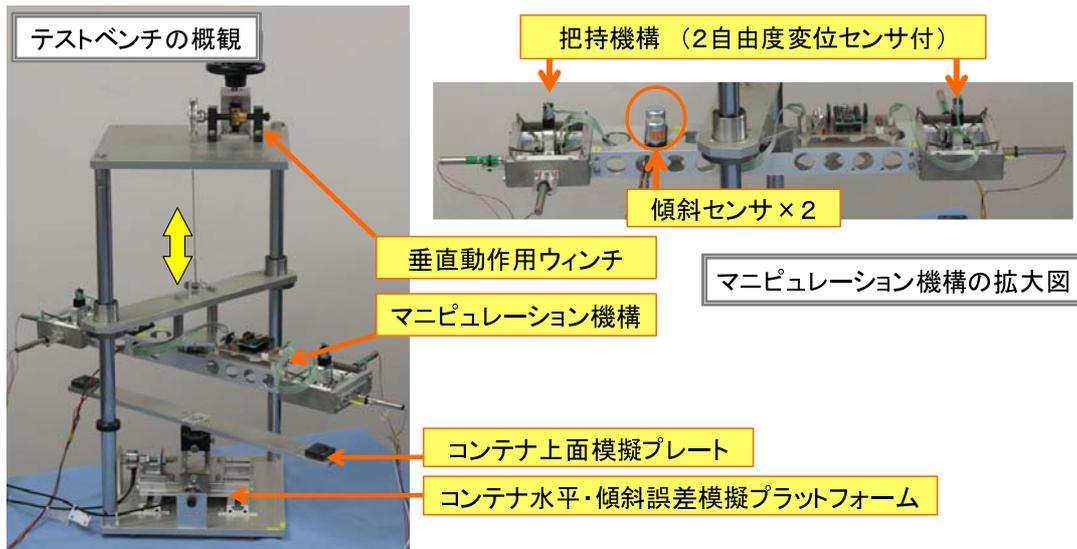


図 3.83 マニピュレーション機構試験用テストベンチ

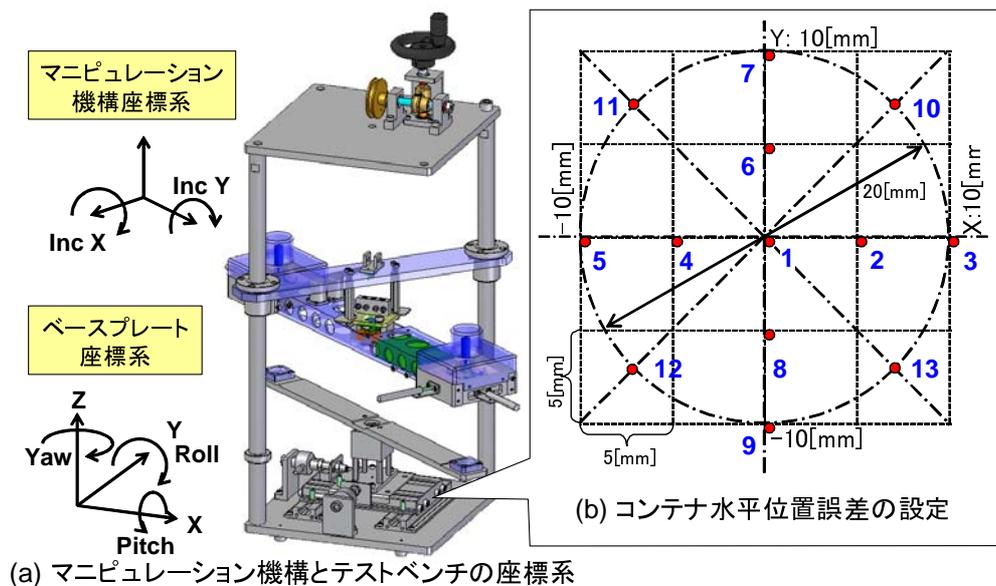


図 3.84 テストベンチの座標系と水平位置誤差の設定

図 3.85(左) は両連結ピンの変位と加わった力の時間履歴を示している。続いて表 3.11 に挿入動作の結果及び水平最大発生力(2方向の合力)の一覧を示す。一部で計測装置の摩擦による初期位置のずれを修正する作業が必要だったものの、全般的に非常に良く誤差を吸収しており、高いコンプライアンス性能が確認されたと言える。

また発生水平合力は設計許容値である 2.5[N](i コンテナ静止力) を超えてしまうことが発覚したが、これは適宜テーブルクロス等の摩擦増強シートを机上に設置することで容易に対処可能なため、特に問題にはならない。

表 3.11 水平誤差許容性能試験結果(ピン挿入結果と最大発生力)

計測点	位置誤差		ヨー角度					
			0 [deg]		2 [deg] *1		-2 [deg] *1	
	X	Y	状態	力	状態	力	状態	力
1	0	0	○	2.1	○	5.1	○	3.2
2	5	0	○	3.1	○	2.7	○	5.0
3	10	0	△	5.0	-	-	-	-
4	-5	0	○	2.5	○	2.6	○	2.5
5	-10	0	○	5.5	-	-	-	-
6	0	5	○	1.7	○	2.6	△	3.1
7	0	10	○	4.8	-	-	-	-
8	0	-5	○	3.3	○	3.4	○	2.9
9	0	-10	○	3.2	-	-	-	-
10	7.1	7.1	△	5.4	-	-	-	-
11	-7.1	7.1	○	3.0	-	-	-	-
12	-7.1	-7.1	○	2.7	-	-	-	-
13	7.1	-7.1	○	2.8	-	-	-	-

力単位 : [N]

○: 挿入動作完了.
 △: 初期位置補正した場合,
 挿入動作完了.
 -: 試験未実施

*1: 計測点1では3 or -3 [deg].

傾斜誤差許容性能確認試験

本試験では前節の試験と同様にテストベンチを用いて試験を実施した。計測位置は図 3.84 の 1, 4, 8 の 3 点である。各計測点においてピッチ、ロール角をそれぞれ最大設定値の 10[deg] にした場合の連結動作の試験を実施した。なお上記の設定は、初期のピン先端位置が連結ガイド穴の上方に位置するための幾何的な限界より設定している。図 3.85(右) に計測点 8 において i コンテナピッチ角を +10[deg] にした場合の挿入・引抜動作におけるマニピュレーション機構全体の傾斜、連結ピンの水平変位量、そして模擬コンテナ部に加わった外力(2方向の力の合成値)の様子を示す。このグラフより i コンテナが傾斜している場合、まず(1)片側の連結ピンが水平誤差受容機能によって穴部へとガイドされ、続いて(2)筐体全体が傾いた後に(3)反対側の連結ピンが穴へ挿入し初め、最終的に(4)筐体と i コンテナの傾斜が一致して静止するという把持動作の一連の流れが確認出来る。本試験により連結ピンの水平位置が i コンテナの連結ガイド穴の水平領域内であれば^{*16}、相対水平誤差 5[mm] かつ傾斜角が ± 10 [deg] の場合でも連結動作を達成可能なことを確認した。

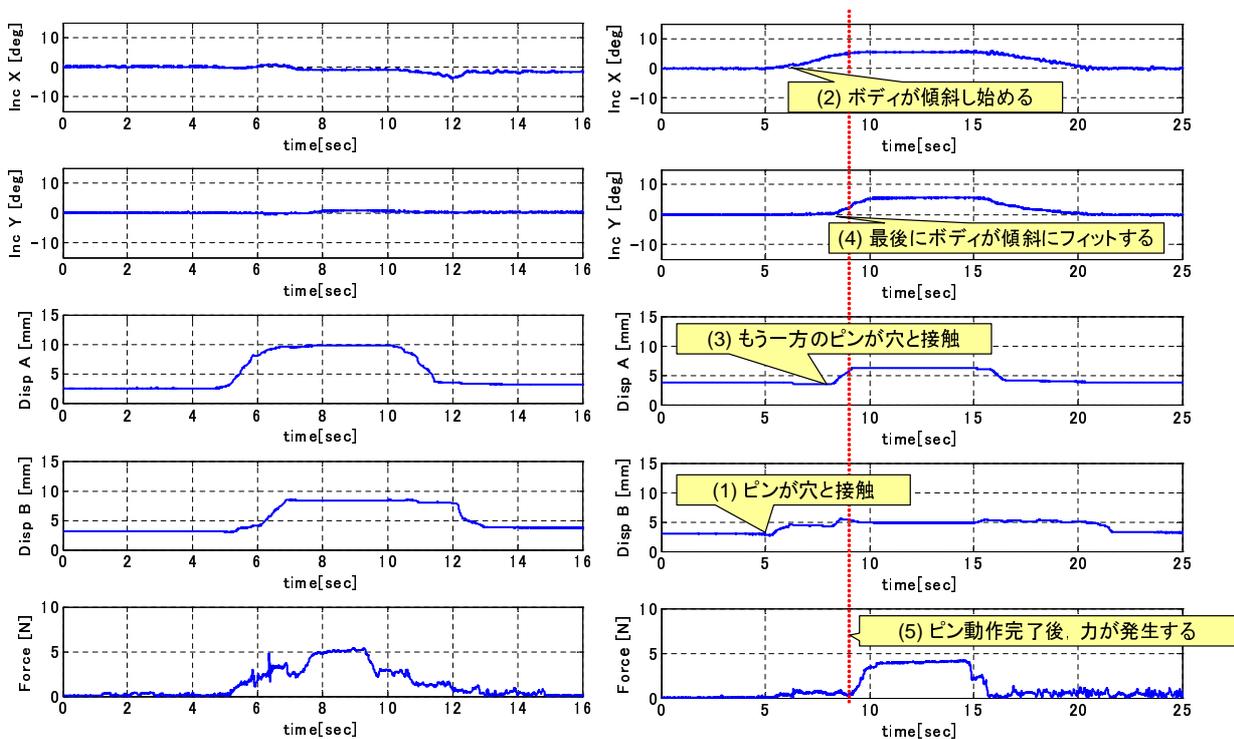


図 3.85 マニピュレーション機構ボディ姿勢、連結ピンの変位、プラットフォーム発生力の時系列グラフ。(左) 水平位置誤差のみ、(右) 水平位置誤差と傾斜誤差がある場合

*16 相対水平誤差 5[mm] かつピッチ or ロール角 10[deg] の一部の状態ではピンの鉛直下方に i コンテナ連結ガイド穴が位置しなくなるため、ピンの挿入動作が実現出来ないものがある。

3.4.4 伸縮機構部・天井懸架部・巻き上げ動力部のシステム設計(要求仕様,機能の検討)

まず伸縮機構部,天井懸架部,巻き上げ動力部に求められる仕様・機能は次の通りである。

- 天井懸架機能
永久磁石誘導型天井吸着法に対応して,天井に吊り下がることが可能なこと。
- 昇降駆動機能
最大積載量 (5[kg]) を搭載したコンテナを把持したマニピュレーション機構部をロバストに昇降動作可能なこと。なおストロークは天井面から一般の机高さまでアクセス出来るように 1,200[mm] とする。また,バッテリー切れなどによりエネルギー源から断絶された場合でも昇降位置を維持可能なことが求められる。
- 外力絶縁機能
人や障害物と接触してしまった場合にでも,天井懸架部に外力が加わらないように絶縁すること。

3.4.5 伸縮機構部・天井懸架部・巻き上げ動力部の実現 (基本設計と細部設計)

まず図 3.86 に天井懸架部・巻き上げ動力部の概要を,図 3.87 に伸縮機構部の概要を示す。なお両者の縮尺は同一ではないことに注意されたい。以降では前節で挙げた各機能の実現について示す。

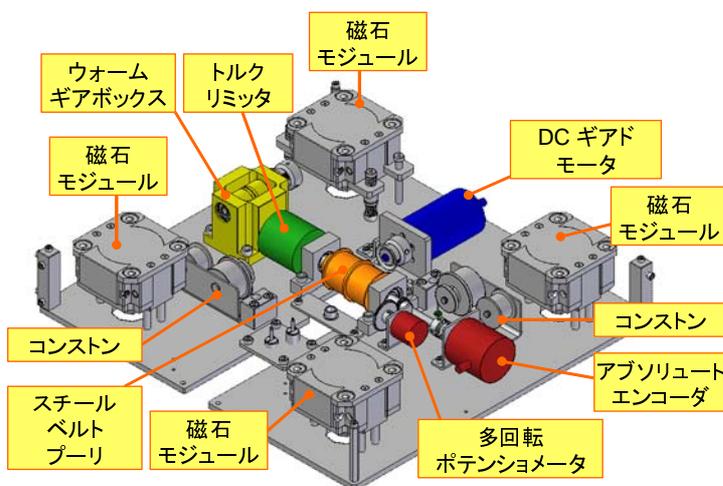


図 3.86 天井懸架部・巻き上げ動力部の概要

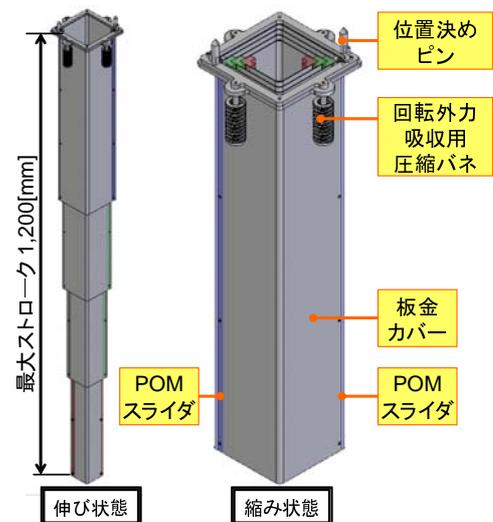


図 3.87 伸縮機構部の概要

—天井懸架機能の実装—

永久磁石誘導型天井吸着法を実現するためには,天井懸架移動部の4つの磁石モジュールと対向する4つの磁石モジュールを実装する必要がある。そこで図 3.86 に示すようにロボット筐体の4つ角に磁石モジュールを配置することとした。天井面上の天井懸架移動部と同様に4つの磁石モジュールのうち,1つは上下にバネに支えられて変位出来るようになっており,これにより4つの磁石モジュールが同一平面上に位置決めされて,可能な限り大きな吸着力を発揮出来るようにしている。

—昇降駆動機能の実装—

本節では昇降駆動機能の実装について示す。実装のためには次の一連の検討が必要となる。

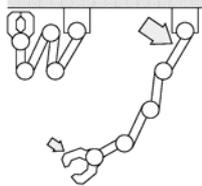
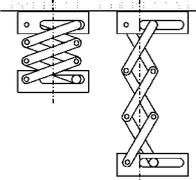
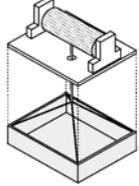
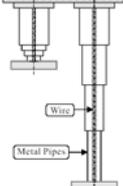
1. 昇降方式の選定
2. 並進，回転固定構造の検討
3. 巻き上げ機構（動力源，ワイヤ，減速機，ブレーキ）の検討
4. 巻き上げ高さ計測方法の検討
5. 伸縮機構下部電力供給・信号伝達方式の検討

以下に各検討について詳細を述べる。

昇降方式の選定

天井面に懸架（吸着）する構造体より昇降する機構としては表 3.12 のような方式が考えられる。今回の使用では，可能な限り天井面からの突出が小さく，また下端に取り付けられるマニピュレーション機構へのねじりや振動が少ない方式が好ましい。よってタケノコ型伸縮方式（機構）を採用することとした。

表 3.12 昇降方式の候補

方式	アーム方式	ジャバラ方式	ワイヤクレーン方式	タケノコ型伸縮方式
図例				
説明	ロボットアームと同じような関節機構を持ち各関節を最大限に曲げることで縮小状態を得る方式。	高所作業台や自動車用のジャッキと同じ構造を利用したものである。	一般的な荷物吊り上げ用のクレーンと同じ機構である。	上下動の巻き上げをするワイヤー周りを径が段階的に変化する複数のパイプで覆う方式。
利点	自由度が高いため構造によってはある程度の移動範囲を確保できる。	剛体で吊り下げ部を多点支持をするので安定した上下運動が期待できる。	機構がシンプルであり伸縮率が高い，また荷台の振動が巻き取り側に伝わりにくい	伸縮率が比較的高く，また荷台の揺れ，ねじれなどを防止することが出来る。
欠点	高さ1自由度を制御するために多自由度を制御する必要がある。構造部品数が多いため重量が大きくなる。	伸縮率が低い。構造部品数が多く，重量が大きくなる傾向がある。	荷台が揺れる可能性があり，作業部の位置決めをするのが困難である	構造部品数が比較的多く，重量が大きくなる傾向がある。

並進・回転固定構造の検討

マニピュレーション機構は伸縮機構の先端に取り付けられ、適切な位置決めによりコンテナの把持動作を行う。よって、伸縮機構自体はワイヤ自体が持つ不要な並進・回転自由度を拘束する構造を有する必要がある。タケノコ型伸縮方式を採用する場合、表 3.13 に示すような2種類の並進・回転固定構造が考えられる。今回はある程度の自重のあるコンテナを運搬するため、ロボット全体の自重は可能な限り軽量であることが求められる。そこで「樹脂レール+レール保持カバー」方式を採用することとした。

表 3.13 並進・回転固定構造の検討

機構名	薄肉パイプ+リニアブッシュ	樹脂レール+レール保持カバー
図例		
説明	薄肉のステンレス丸パイプとリニアブッシュによりスライダを構成する方式。	2個の樹脂スライダとそれを固定する板金のレール保持カバーで構成する方式
利点	リニアブッシュによりスライド機構が実現されるため、非常にスムーズかつ頑健なスライド動作が実現可能。	樹脂レールの2面にて回転を固定するため、1つのスライダで回転を保持可能。またレール保持カバーは単純な曲げ板なので、パンチングメタル加工により軽量化が可能。
欠点	丸パイプを用いるため、回転の自由度を防止するためには最低2系統のスライダが必要。リニアブッシュホルダなどの部品数も多くなり、重量が大きい。	樹脂レールのため、ねじり等が加わると壊れてしまい、完全に回転自由度を固定するのは困難である。また樹脂の剛性が低いので、各伸縮段の重なりは長めに取る必要がある。

巻き上げ機構（動力源、ワイヤ、減速機、ブレーキ）の検討

巻き上げ機構の検討においては、巻き上げの動力源、巻き上げるワイヤの種類、そして動力を効率良く減速する方法、そして動力なしで昇降位置を維持するブレーキ機構についての検討が必要である。

● 動力源の選定:

まず、巻き上げの動力源については、磁石モジュールに占有される面積を考慮すると、動力部の寸法が $100 \times 100 [mm^2]$ 以内と非常に小型であることから、電気モータ駆動を選定した。よって、巻き上げ動力部には電装系として以下のような構成要素が必要となる。

- (ギアド)DC モータ
- Hブリッジモータ制御回路
- 充電電池 (Li イオンバッテリー^{*17})

図 3.88 に巻き上げ動力部の電装系として選定した品と各品の簡単なスペックを示す。なお、今回のようなクレーンタイプのモータの選定に関しては文献 [90] に詳細が記載されている。

● 巻き上げワイヤの選定:

表 3.14(左) に巻き取りワイヤの選定として通常のワイヤを用いた場合とスチールベルトを用いた場合の比較を示す。通常のワイヤの方が安価かつ剛であるが、今回コンテナを把持するためには高さ方向の位置合わせも (水平の位置合わせではないが) 重要になるため、スチールベルト方式を採用した。

● 減速機・ブレーキの選定:

表 3.14(右) に比較的大きな減速比を実現する装置として代表的なものを3種類 (遊星歯車, ハーモニッ

*17 繰り返しの間欠的な充電を考慮し、Li イオンバッテリーを選定した。

●DCギアドモータ



写真は
"3557K+30/1"

メーカー	ミニモータ(スイス)
型番	2642W-012CR+30/1
出力	22.1[W]
減速比	3.71:1
サイズ	φ30-L69.1

●Hブリッジモータ制御回路



使用MOSFET	J533,K2936 (ルネサス)
最大定格電流	30[A]
サイズ	55*45[mm]

●Liイオンバッテリー



メーカー	エナックス(株)
型番	Power Battery Half
出力電圧	DC9.6~16.4[V]
定格出力	2[A]
容量	2200[mAh]
サイズ	W:60,D:140,H:23[mm]

図 3.88 巻き上げ動力関連電装系 (左: DC モータ, 中: H ブリッジモータ制御回路, 右: Li イオンバッテリー)

表 3.14 巻き上げワイヤと減速機の比較検討

方式	ワイヤ方式	スチールベルト方式	遊星歯車 (+電磁ブレーキ)方式	ハーモニックドライブ (+電磁ブレーキ)方式	ウォームギア (+遊星歯車)方式
図例					
説明	金属線によって製造したワイヤをプーリで巻き上げる方式。	薄肉のステンレスをベルトとし、プーリで巻き上げる方式。	軸に固定されていない遊星歯車を利用することによって、減速する機構。	歯数が1つ違う内歯と外歯を組み合わせ、噛み合いが1つずれることによって減速を実現する機構。	ウォームとホイールの歯先のすべりによって減速を実現する機構。
利点	ワイヤのねじれに対して強く、また使用用途が広いため、コストも比較的安い。	非常に薄肉であるため、プーリ内での重なりの影響が小さく、ベルトの送り出し量とクレーン高さの線形性が安定している。	比較的小スペースで大きな減速比を実現可能。	小スペースで大きな減速比を実現でき、かつ非常に高効率に動力伝達が可能である。	適切な相対位置でギアボックスを構成することにより、自然とブレーキ動作を実現可能である。
欠点	ワイヤの送りだし量とクレーンユニットの高さの関係が必ずしも一定でない。	非常に薄肉の金属で作られているため、ねじれに弱く、強く折り曲げると破断してしまう。また少量の購入時は高価である。	動力伝達の効率が比較的良好いためロックが掛からず、ブレーキ動作を実現するために別の構造が必要。	動力伝達の効率が良いためロックが掛からず、ブレーキ動作を実現するために別の構造が必要。	減速比がそこまで大きくないので、別途モータの出力を減速する遊星歯車機構が必要。

クドライブ、ウォームギア)示す。減速機としての性能(質量、体積あたりの減速比、動力伝達効率)は遊星歯車、ハーモニックドライブがウォームギアと比較して高いが、ウォームギアはそれ自身がブレーキ構造になるという特徴を有する。このため、減速機とブレーキの2つの機構として考えた場合、ウォームギアは占有空間・消費電力の面から考えて、他の2つよりも優位に立つためウォームギアを採用した。

巻き上げ高さ計測方法の検討

巻き上げ高さを計測する方式としては次の2つの方向性が考えられる。

1. 直接計測方式

伸縮機構部の両端の距離を直接的に計測するセンサ（レーザセンサ等）を取り付けることにより、巻き上げ高さを計測する方式。

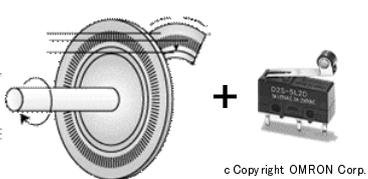
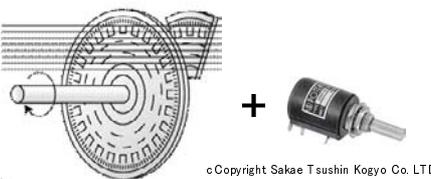
2. 間接計測方式

スチールベルトの巻き上げプーリの回転数から巻き上げ高さを推測する方式。

今回巻き上げワイヤとしてスチールベルトを採用したため、間接計測方式でも比較的高い精度で高さを推測することが可能であると推測される。また、直接計測方式で使用するレーザセンサは一般的に装置の大きさが大きく、また非常に高価である。よって本コンポーネントでは間接計測方式を採用した。

間接計測方式では初期化動作の有無によって表 3.15 に示す2つの方式が考えられるが、今回は初期化動作が不要であるということを中心として、「アブソリュートエンコーダ + 多回転ポテンショ」方式を採用した。

表 3.15 巻き上げ高さ計測方法の比較

機構名	インクリメンタルエンコーダ + 初期化スイッチ	アブソリュートエンコーダ + 多回転ポテンショ
図例	 c Copyright OMRON Corp.	 c Copyright Sakae Tsushin Kogyo Co. LTD.
説明	インクリメンタルエンコーダによる、差分計測により高さを計測する方式。	多回転ポテンショにより概ねの回転数を計測し、アブソリュートエンコーダにより詳細な回転位置を計測する方式。
利点	エンコーダと初期化スイッチの簡素な構成で実現可能なためコスト面で有利。また配線も単純である。	電源投入後、初期化動作を必要としないため、非常停止として電源OFFという手段が選択可能である。
欠点	マイコンがリセットされる毎に初期化の作業が必要となる。	エンコーダとポテンショを統合するソフトウェアの構築が必要である。また部品数・配線数共に若干多くなる。

伸縮機構下部電力供給・信号伝達方式の検討

マニピュレーション機構部への電源及び制御信号伝達方法には表 3.16 に示す2つの方式が考えられる。今回は全体質量の軽量化が重要であり、また充電方法が容易である「有線電源供給・信号伝達方式」を採用した。

表 3.16 伸縮機構部下部電力供給・信号伝達方式の比較

方式	有線電源供給・信号伝達方式	複数バッテリー・無線機搭載方式
図例		
説明	巻き取り式ケーブルによって電力及び制御信号を天井懸架部からマニピュレーション機構部に伝達する方法。	天井懸架部とマニピュレーション機構部各々に独立したバッテリー及び無線機を搭載する方法。
利点	バッテリー及び無線機が1つずつで済むため構成がシンプルになる。またバッテリーの充電箇所も1箇所なので、充電器の構造も簡素なものに出来る。	伸縮パイプ中にケーブルを通過させる必要がないため、パイプ構造部の設計が容易になる。
欠点	パイプ構造部でスチールベルトと電源・信号ケーブルが絡まないような構造的な工夫が必要となる。	バッテリー、無線機ともに2系統必要なので、構成部品数が多くなり重量が大きくなる可能性が高い。また充電も2箇所必要となり、充電器の工夫が必要。

—外力絶縁機能の実装—

繰り返しになるが外力絶縁機能では、人や障害物と接触した場合にでも、天井懸架部に外力が加わらないように絶縁することが求められる。この外力とは図 3.89 に示すように、大きく分けて”鉛直に加わる外力”と”回転として伝わる外力”の2種類が考えられる。この両者に対して外力絶縁機構は対処する必要がある。この2種類の外力に対する絶縁を実現する機構としては表 3.17 に示すような2種類が考えられる。今回はコンポーネントの高さを可能な限り低く抑えるため、「トルクリミッタ+伸縮パイプ連結解除機構方式」を採用することとした。しかし、部品数の構成などを踏まえるとコンテナ運搬ロボット用天井高さが十分に確保可能な場合には「定荷重パネ方式」を採用した方が簡便な構成になる可能性もある。

樹脂レール+レール保持カバー方式による伸縮機構部の並進・回転固定はソリッドな固定ではないため、それ自身が一部外力絶縁機能を持っていることになる。また樹脂レール+レール保持カバーとこの外力絶縁機能は併にある種の”柔らかさ”を実現していることになり、これらは受動機械的コンプライアンスとしても機能することを考慮する必要がある。

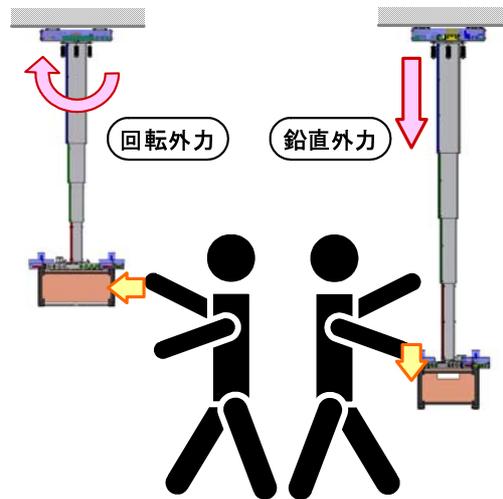


図 3.89 天井懸架部に加わる2種類の外力

表 3.17 外力絶縁機能を実現する機構の比較

方式	定荷重ばね(コンストン)方式	トルクリミッタ+伸縮パイプ連結解除機構方式
図例	<p>外乱絶縁コンポーネント 磁石モジュール 連結復帰用コンストン M タケノコ型伸縮角パイプ (POMスライダ) ×4 オーブスチールベルト ×2 電源・信号ケーブル マニピュレーション機構 コンテナ</p>	<p>磁石モジュール トルクリミッタ M モーメント支持用位置決めピン 連結復帰用コンストン 永久磁石連結 タケノコ型伸縮角パイプ (POMスライダ) ×4 オーブスチールベルト ×2 電源・信号ケーブル マニピュレーション機構 コンテナ</p>
説明	天井懸架部と伸縮機構部を分離し、複数の定荷重バネ(コンストン)により連結させることにより、伸縮機構部に外力が加わった場合でも、定荷重バネが外力を受け流すことが可能である。	タイミングベルトへの鉛直荷重はトルクリミッタにより受け流し、伸縮パイプ部への鉛直・回転荷重は位置決めピン、圧縮バネ、コンストン、永久磁石による連結解除機構で受け流す方式。
利点	コンストンを複数付けるのみで、鉛直外力も回転外力も支持可能なため、設計が容易である。	天井懸架部と伸縮機構部を完全に分離する必要がないため、天井懸架部の高さが低く出来る。
欠点	巻き上げ動力部全体が定荷重バネの下に取り付け構造となるため、天井吸着機構と合わせて2重構造になり自重が大きくなる。定荷重ばねのみで回転外力を支えるため、容量大のバネが必要。	伸縮パイプ連結解除機能を実現するための部品数が多く、構造が複雑である。また、巻き上げ高さによってコンストンに加わる力が異なるため、設計時の調整に手間がかかる。

3.4.6 伸縮機構部・天井懸架部・巻き上げ動力部の基本性能試験

本試験では伸縮機構部・天井懸架部・巻き上げ動力部の基本性能評価のため(1)荷重巻き上げ・運搬性能確認試験,(2)外力絶縁性能試験の2つの試験を行った。

荷重巻き上げ・運搬性能確認試験

本試験ではコンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)を全て統合し,最大積載重量が搭載されたコンテナを巻き上げ及び運搬可能であることを確認する。コンテナの最大積載量は5[kg]なので,図3.90(左)に示すようにコンテナ内に紙類を5[kg]搭載し,巻き上げ・運搬試験を実施した。図3.90(右)に巻き上げ動作の様子を示す。試験の結果,最大荷重負荷時においても巻き上げ動作・運搬動作を問題なく実現可能なことを確認した。

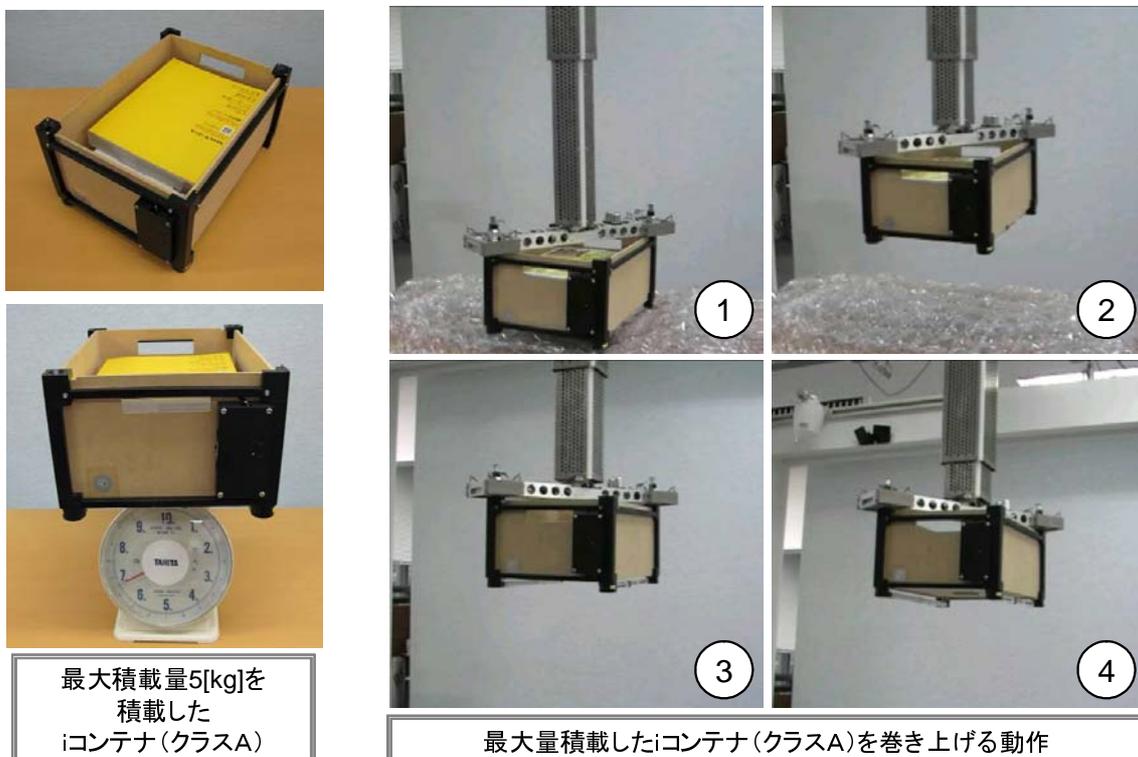
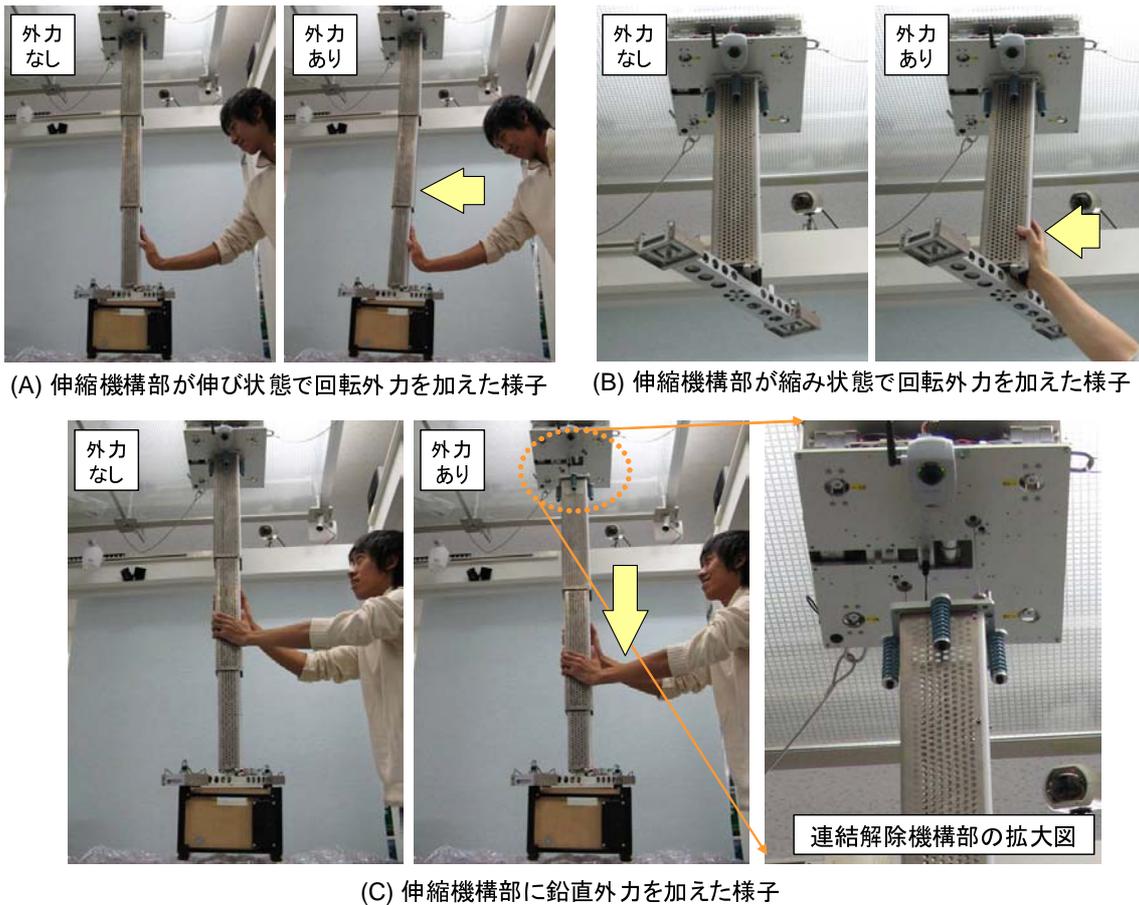


図 3.90 荷重巻き上げ・運搬性能確認試験の様子

外力絶縁性能試験

外力絶縁性能試験では回転外力と鉛直外力を各々加えたときの外力絶縁機能の動作確認を行う。回転外力として人が伸縮機構部下部を水平方向に押した場合の挙動と伸縮機構部に鉛直外力を加えた場合の挙動を確認する。図 3.91 に試験の様子を示す。試験の結果、鉛直外力・回転外力ともに設計通りの外力絶縁性能を示し、天井懸架部の落下などの問題が発生しないことを確認した。



3.4.7 コンテナ運搬ロボット(2)(コンテナ操作部)のまとめ

3.4節ではコンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)について述べた。本サブシステムはマニピュレーション機構部、天井懸架部、巻き上げ動力部、伸縮機構部より構成される。

マニピュレーション機構部は次の特徴を有する。

1. 連結・開放機構として短小な偏芯連結ピンを採用することによってジャミングフリーかつ堅実な把持機能を実現した。
⇒ 偏芯連結ピンにより「コンテナを把持するという問題」を、『水平3自由度(X, Y, Z)と傾斜2自由度(ピッチ, ロール)の自由度を持つ対象に対して、2つのピンを同時に挿入するという問題』に変換することが可能となる。
2. 把持対象のコンテナの水平及び傾斜位置決め誤差を吸収する柔軟な構造要素を有する。

天井懸架部では次の特徴を有する。

1. 永久磁石誘導型天井吸着法 [81] の採用により、天井面を2次的に自由に移動することが可能である。

伸縮機構部及び巻き上げ動力部では次の特徴を有する。

1. タケノコ型伸縮機構を用いることにより天井面からの突出が少なく、そしてねじりや振動が比較的少ない天井面から生活空間へのアクセスが可能である。
2. 並進・回転固定構造として樹脂レール+レール保持カバー構造を採用することにより、アクチュエーション動作時は不要な変位を抑制しつつも、人やモノとの接触時には柔軟に変形することによって、接触力を低減可能である。
3. スチールベルト巻き上げ方式の採用により、複雑な高さ計測装置を用いずとも高さの推定が容易となり、また予期しない物体との接触時にもマニピュレーション機構及びコンテナの重量以上の荷重が接触対象に加わらない構造を実現した。

上記のような特徴を持つコンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)の基本性能試験を実施した。

マニピュレーション機構ではジャミングが発生せず、必要な荷重(10[kg])を支持可能なことを確認し、テストベンチを用いたマニピュレーション機構の単体試験によりコンテナとの水平・傾斜位置決め誤差がある場合でも柔軟にコンテナ把持動作(連結ピン挿入動作)が可能なることを確認した。伸縮機構部、天井懸架部、巻き上げ動力部では最大積載量(5[kg])を搭載したコンテナをロボットが運搬可能なことを確認し、また鉛直外力・回転外力も絶縁可能なことを確認した。

コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) のスナップショット

コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) の概観を図 3.92 に示す。図 3.93 に傾斜した状態で設置されたコンテナを、把持・持ち上げる動作の連続写真を示す。

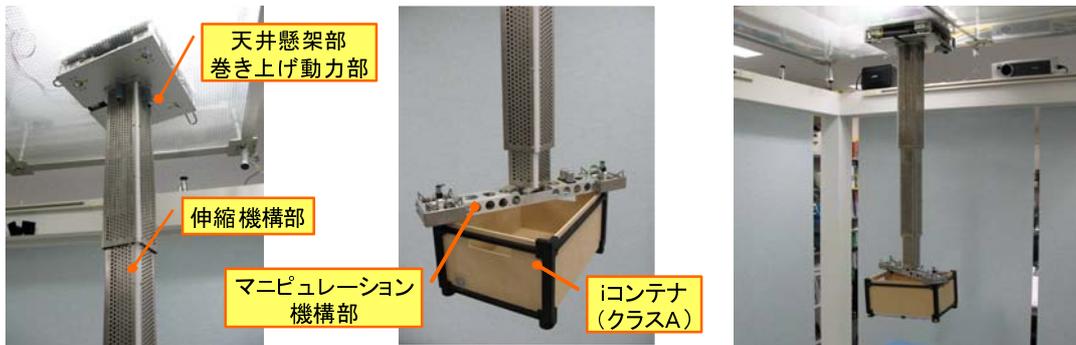


図 3.92 コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) のスナップショット

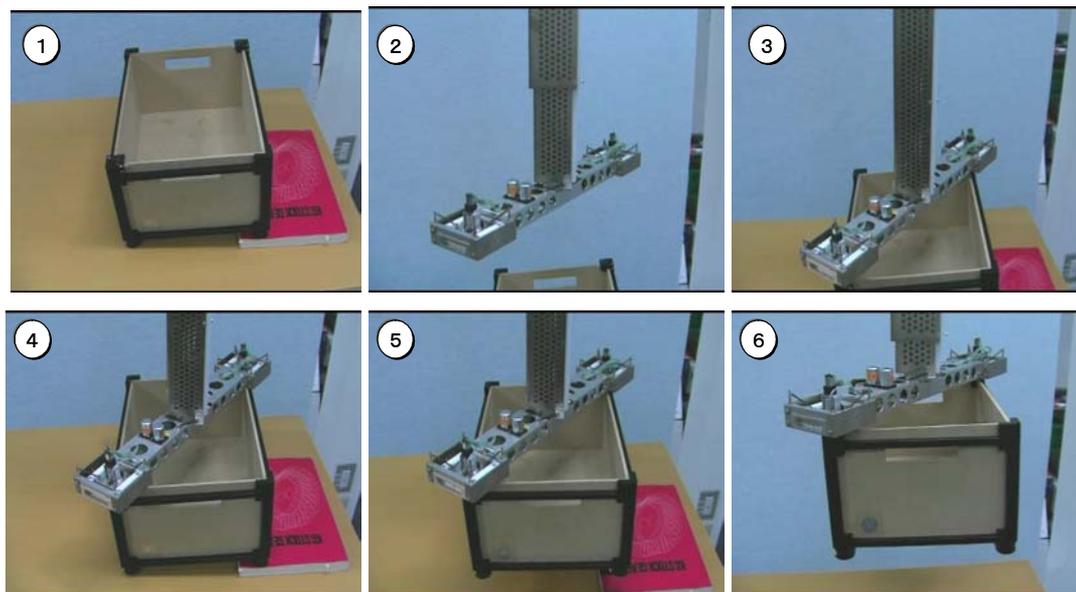


図 3.93 傾斜した状態で設置されたコンテナを把持する様子

仕様一覧

コンテナ運搬ロボット（コンテナ操作部）の仕様一覧を表 3.18 に示す。

表 3.18 コンテナ運搬ロボット（コンテナ操作部）の仕様一覧

項目	仕様
サイズ	340 × 320 × 610 [mm] ※縮み時
可搬重量	8 [kg] ※1
コンテナ把持方式	偏芯連結ピンによって2箇所を拘束 ※ジャミングフリー
位置・姿勢誤差吸収性能	水平10 [mm], 姿勢ロール・ピッチ 10 [deg]
コンテナ把持定格重量	10 [kg]
昇降駆動方式	スチールベルト巻上げ
天井懸架長さ	610～1,835 [mm]
巻き上げ速度	100 [mm/s]
外乱絶縁用機械要素	トルクリミッタ, コンストン, 切り離し永久磁石を実装

※1: コンテナ自重3[kg]を含む

クロージャ、コンプライアンス技術の適用箇所

- Geometric object closure
 - － 偏芯連結ピンによるコンテナの把持。
 - ⇒ 2本の位置決めピン構造による水平自由度の拘束と、偏芯部のせり出しによる重力方向の平面による支持。
 - ⇒ 把持状態の維持に動力が不要な堅牢な把持状態の実現が可能。
- 戦略的コンプライアンス
 - － コンテナをハンドリングするアクチュエーション機構全体を天井より懸架させた。
 - ⇒ 人やモノと干渉せずに、コンテナの把持・運搬タスクに専念するための領域・空間の規格化と言える。
- 機械的コンプライアンス
 - － マニピュレーション機構部の水平コンプライアンス及び傾斜コンプライアンス要素によって、把持対象コンテナとの相対位置・姿勢誤差を吸収し、ロバストな把持が可能となる。
 - － 伸縮機構部の並進・回転固定構造として採用した「樹脂レール＋レール保持カバー構造」とトルクリミッタ、位置決めピン、永久磁石などで構成される「外力絶縁構造」により、通常作業時は不要な自由度を拘束しつつも、人やモノとの接触、またはロボットと操作対象コンテナとの相対位置・姿勢にずれがある場合は、その誤差を吸収可能。

3.5 家庭用コンテナ自動収納庫

本節では家庭環境内での使用に特化したコンテナ自動収納庫について述べる。

3.5.1 システム設計（要求仕様，機能の検討）

物品の収納・管理・運搬という課題においては、これまで工場，物流基地向けに多くの自動化装置が研究・開発されてきている。自動収納庫を用いた在庫，製品の管理はコスト管理の上で非常に重要な課題であり，その効率化においては，機械技術，情報技術共に多くの取り組みが成されている [91, 92, 93]。これらの先行開発に対して，本研究のミッションは工業用途で蓄積された高レベルな物体ハンドリング技術，空間活用技術を生活環境においても利用可能な形に「変換」することである。

以降では機械技術と情報技術両方の側面で，関連する研究と本研究のミッションについて整理・分析を行う。

関連研究とミッションの整理 1：機械技術の側面での分析

機械技術の側面において，3次元的な倉庫の立体化，高層化というのは空間効率の面より非常に重要視され，特に製造ラインの自動化が進むにつれて部品を集中的に管理する必要性から，自動収納倉庫の需要が高く，様々な工業用製品が開発されている [94, 95, 96]。一方で生活環境においても自動収納倉庫を採用することにより，空間効率の高い収納方法を実現することが可能であるにも係わらず，実際に使用されている例が少ないが，これは以下の問題が原因であると考えられる。

- 設置コストの問題
- 物品の多様性の問題
- 人と低干渉で安全に動作させる問題

設置コストに関しては，地下高騰によって都市部の住宅では収納スペース確保が困難になったことから，設置コストが土地の費用を下回るという状態になってきており，特定のニーズが確認されるようになった。また，生活空間では工場の生産ラインなどと比較すると物品の種類が多いが，一般に自動収納庫は個々の部品を収納するのではなく，パレタイズしたものを収納することが得意なため，本研究が提案している i コンテナを用いれば，物品の多様性は問題にならない。その意味で，i コンテナは自動化装置のタスクの難しさを低減することに役立っていると言える。一方で工場で用いられている自動収納庫をそのまま生活環境に導入するのは，空間確保と安全性の面で問題がある。具体的にはスタッカークレーンが稼動する空間を確保しつつ，人と干渉せず安全を担保するという課題をクリアする必要がある。そこで本研究では空間確保と安全性の問題を解決した家庭用コンテナ自動収納庫の機構を開発することが課題となる。

関連研究とミッションの整理 2：情報技術の側面での分析

物品管理においてはサプライチェーンマネジメント (SCM) を代表とする物流業界において，物品の効率的な管理技術の開発が進んでいる。本研究においては，i コンテナが RFID 技術によって収納物品の情報を取得可能なため，家庭内にある物品の全容把握が容易になり，また在庫の検索においても google 等の WWW のサーチエンジンと同様に，計算機上に記憶された不揮発な情報が活用可能と考えられる。昨今では自動倉庫の高度化を目指して収納物の季節性も考慮した最適化実現への取り組みが行われている [97]。

生活環境においても衣服，寝具などの季節性を考慮した収納が重要となり，これらの物流における技術も応用した高度な収納方法が考えられる。具体的には物品の使用履歴データのマイニングにより，物品を頻繁に使用するものと，そうでないものに分別することが可能である。そして頻繁に使用するものを身近な棚に設置する，希にしか使わないものを天井裏などの長期保管用倉庫に設置するなどを行うことにより，利便性の高い収納が実現可能になると考えられる。よって天井裏空間も収納空間として拡張可能な収

納形式を実現すること、収納しているコンテナの情報を逐次取得可能で、その情報を利用しコンテナの収納位置移し変えが行えるシステムを実現することが求められる。

家庭用コンテナ自動収納庫の要求仕様検討

本節では、まず家庭用コンテナ自動収納庫の性能について整理し、各性能の必要機能を列挙する。

- A. 保管性能：i コンテナを棚もしくは天井裏に收容し、必要に応じて取り出しが行える環境を実現する。
- B. 収納・取出し性能：コンテナ運搬ロボットと連動し、コンテナの受け渡しを含めて自動的に収納・取出し作業を行う。
- C. 情報管理性能：i コンテナ及びその搭載物の使用履歴等の情報を取得、管理する。

以降では各性能に要求される機能について整理する。

A. 保管性能に関する必要機能の検討

保管性能の実現に必要な機能は次の3つである。

A1 人間生活適応収納機能

ロボットによる作業だけでなく、人間による日常の収納作業にも適応した保管能力を有する。

A2 天井裏空間利用機能

従来の家庭用収納設備と比べて空間利用効率が高くなるよう天井裏空間も収納空間として活用する。

A3 人によるコンテナ収納位置の誘導機能

人間がコンテナを収納するときに、ロボットの移載作業が容易な状態になる様に誘導する。

B. 収納・取出し性能に関する必要機能の検討

i コンテナの積載重量は5[kg]と設定されている。i コンテナの自重が最大で3[kg]と規定しているため、収納・取出し性能では合計8[kg]の荷重を取り扱える必要がある。この収納・取出し性能は次の4つの機能により実現される。

B1 人間低干渉移載機能

生活空間内で移載を実施するため、人間との干渉が小さい方法で移載を行う。

B2 コンテナ位置誤差適応機能

コンテナが詳細に位置合わせされていなくても、収納・取出し動作中に適応的に収納位置の修正を行う。

B3 コンテナ設置状態認識・表示機能

人間がコンテナを棚に収納するときに、そのコンテナがロボットによる自動作業が可能な状態で収納されたかを認識し、人間に伝達する。この機能は前述の収納位置の誘導機能と協調するものである。

B4 コンテナ運搬ロボットへのコンテナ受渡し機能

天井移動型のコンテナ運搬ロボットとの間でスムーズにコンテナの受渡し作業を行う。

C. 情報管理性能に関する必要機能の検討

情報管理性能の実現に必要な機能は次の2つである。

C1 i コンテナプロパティ認識機能

収納、取り出しを行うi コンテナの情報（コンテナID、收容物等）を取得する。

C2 i コンテナ保管情報管理機能

コンテナの出納データの蓄積、管理を行う。

3.5.2 設計・実装の概要

本章では詳細な設計に関する説明の準備として自動収納庫の概要と設計手順について説明する。

家庭用コンテナ自動収納庫の概要

開発した家庭用コンテナ自動収納庫の概要を図 3.94 に、システムブロック図を図 3.95 に示す。コンテナ自動収納庫は様々なデバイスが実装された棚構造部と垂直運搬機構、そしてコンテナの収納・取出し動作を行う水平運搬機構から構成される。

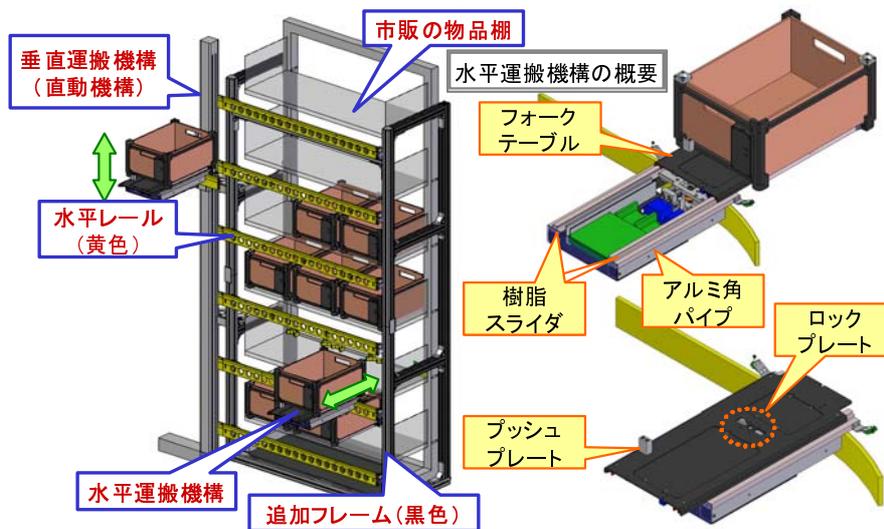


図 3.94 家庭用コンテナ自動収納庫の概要

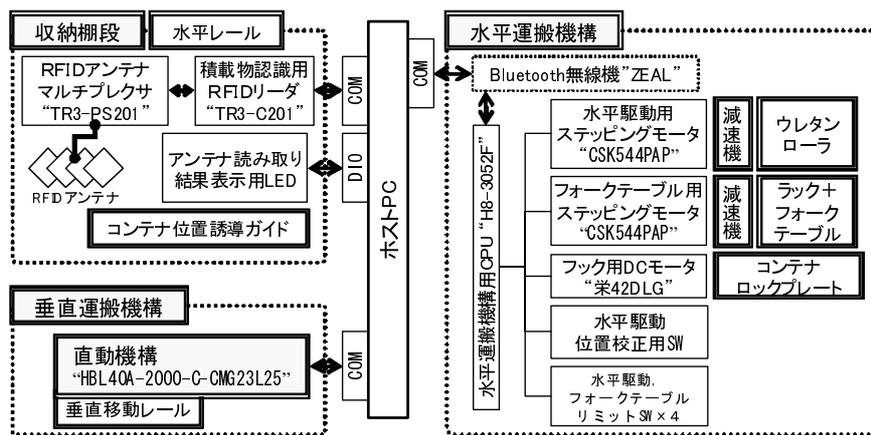


図 3.95 家庭用コンテナ自動収納庫の機能ブロック図

家庭用コンテナ自動収納庫の設計の流れ

図 3.96 に設計検討の流れを示す。なお図中の記号、番号は後の節番号と対応している。3.5.3 節の基本設計においては前述した要求仕様に基づき、基本的な構造・方式の選定を行う。3.5.4 節の詳細設計及び実装においては、基本構造・方式を実現するための、具体的な機構、デバイスに関する説明を行う。

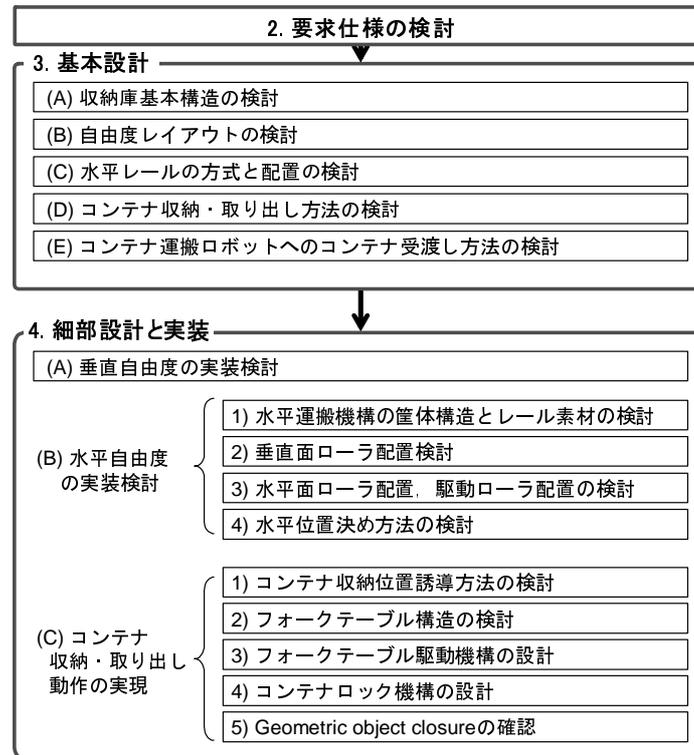


図 3.96 家庭用コンテナ自動収納庫の設計・実装の流れ

3.5.3 基本設計 (基本構造・方式の検討)

前節の検討で必要とされた機能を実現するために、i コンテナ自動収納庫の基本構造，自由度レイアウト，レール形状・配置，収納取出し方法そしてコンテナ運搬ロボットとのコンテナの受渡し方法に関する検討を行う。

収納庫基本構造の検討

コンテナ収納庫を自動化する方法としては図 3.97 に示すようなエレベータ方式，循環方式の 2 種類の方法がある。両方式の概要と特長は次の通りである。

- エレベータ方式
棚とスタッカクレーンの 2 つの構造からなり，各段にて移載を行う方式。従来の収納棚と同様の方法で収納を行うことが可能であり，また駆動部位が小さいので動力源を小さくすることが出来る。
- 循環方式
棚自体が循環駆動され，特定の箇所にて移載を行う方式。動作する全ての空間を収納空間として利用出来るため，空間利用効率が高い。

一般の収納棚と同様の収納方法が可能という点ではエレベータ方式が有利なため，本方式を採用する。また収納棚部は今回は市販の書架を利用することとした。

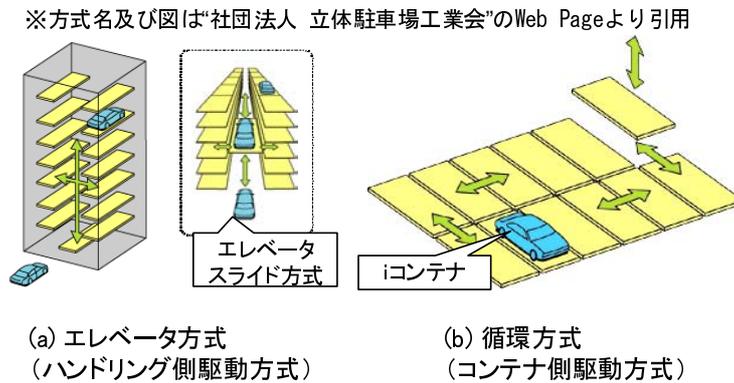


図 3.97 自動収納庫の基本構造候補

自由度レイアウトの検討

エレベータ方式の収納庫の場合、スタッククレーンには垂直方向と水平方向の2つの自由度の動作が必要となる。この自由度のレイアウトには図 3.98 に示すようなレイアウトが考えられる。各々の概要と特長は次の通りである。

- 自由度一体型レイアウト
工業用のスタッククレーンで一般的な、垂直・水平自由度を同一の台車の上に設置する方式。垂直と水平の同時駆動により作業の高速化が可能。
- 自由度分離型レイアウト
このレイアウトは図書館用倉庫 [98] に採用されている。垂直自由度担当の直動機構と水平自由度担当の台車を分離する方式。水平稼働部が台車のみと小型で、挟まれが発生する箇所が少ない。

生活環境中では工場に増して高い安全性が求められ^{*18}、また人とロボットの空間の取り合いが大きな問題となるため、自由度分離型レイアウトを採用する。さらに自由度分離型レイアウトでは直動機構を天井裏まで拡張することで、容易に天井裏空間を収納スペースとして利用可能なことが利点である。

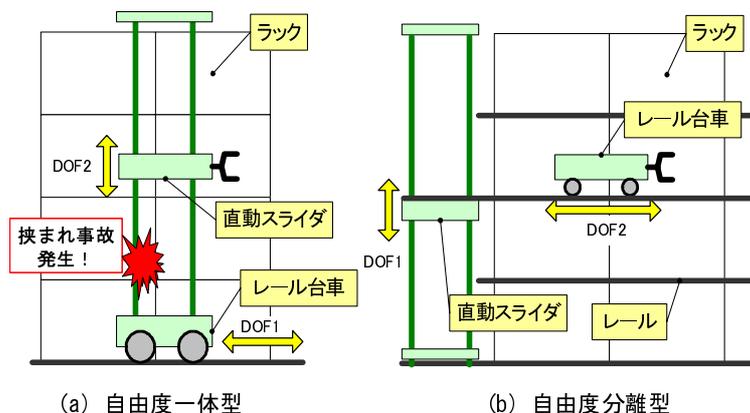


図 3.98 自由度レイアウトの比較

*18 工場では装置の利用者がある程度装置について知識を有していることが期待出来るが、家庭用では装置の特徴について熟知していると想定してはならない。

水平レールの方式と配置の検討

空間上を水平移動する一般的な方法は天井自動搬送システムで採用されているモノレール方式（図 3.99）である。この方式は構造を剛にすることで、大重量を運搬することが出来、また軌道経路の設計自由度が高いという利点がある。本システムではこのモノレールを天井裏にはり巡らせることによって、天井裏を収納空間として利用可能とすることを狙う。広く天井裏を活用するため、直線状のレールと屈曲したレールの二種類のレールを用いることとする。また、通常の棚にも同様のモノレールを配置することで、各棚段にスタッククレーンがアクセス可能なようにする。



図 3.99 モノレール方式の物品搬送システムの例

コンテナ収納・取出し方法の検討

本節では棚上のコンテナを取り出す、または棚にコンテナを設置する方式について検討を行う。コンテナ収納・取出し方法としては図 3.100 に示すようなフォーク方式と把持方式が一般的である。両方式の概要と特長を次に示す。

- フォーク方式（非固定方式）
工場でのスタッククレーンで一般的に用いられている方式である。フォークリフトのようなフォーク構造物を対象の底部に挿入して移載を行う方式。フォークを差し込むというシンプルな動作のため、詳細な位置合わせが不要である。一方で対象物を引き出す際には接地面より持ち上げるための大作用力、小ストロークのアクチュエータが必要となる。
- 把持方式（固定方式）
ロボットハンド、連結ピン等で対象を把持・ロックし、押し込み、引き出しを行う方式。ロックをした状態で移載を行うので、高速な移載でもコンテナのすべりが発生しない。またコンテナの底面の摩擦が小さければ、引きずった状態で牽引出来るため持ち上げ動作が不要である。

本研究ではフォーク方式の挿入動作と把持方式の引き出し動作の両者の利点を生かしたハイブリッド方式となる”フォーク+簡易把持方式”を採用する。

図 3.101 に本方式のコンテナ引き出し動作の模式図を示す。この方式ではフォークテーブルをコンテナの下に差し込み、ロックアクチュエータによってコンテナをロックすることでコンテナを引き出すという手順をとる。

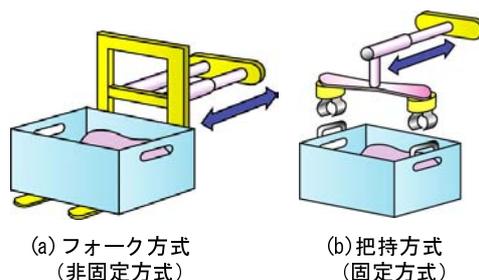


図 3.100 自動収納庫におけるコンテナ収納・取出し方法の比較

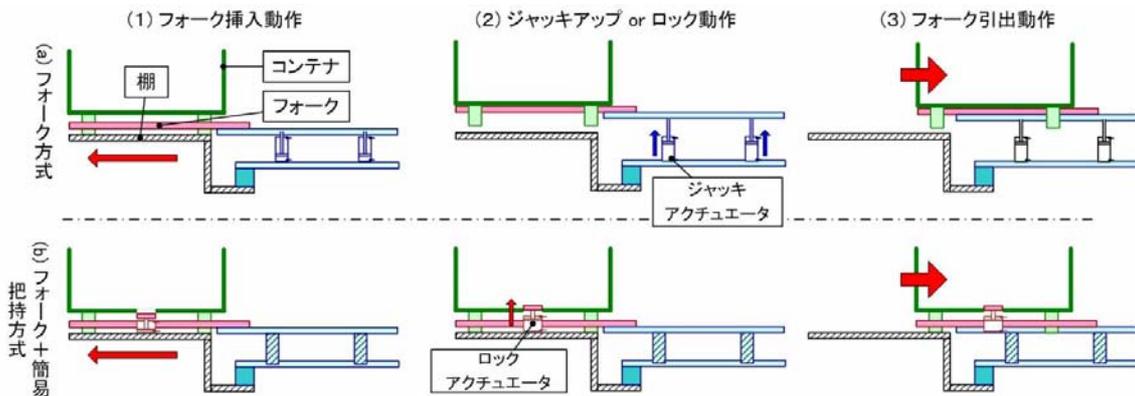


図 3.101 コンテナ引き出し動作の比較

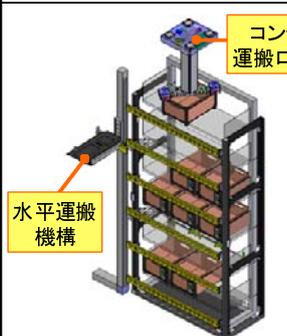
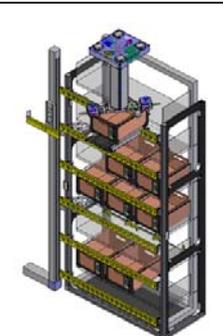
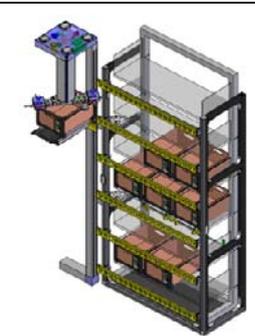
コンテナ運搬ロボットへのコンテナ受渡し方法の検討

コンテナ受渡しタスクの実行には受渡し場所の差異により次の3つの方式がある。

- 棚段受渡し方式
- 固定レール上受渡し方式
- 上下移動レール上受渡し方式

各方式の概要と特徴を表 3.19 にまとめる。受渡し効率という意味では棚段受渡し方式が最も効率が良いものの、収納するコンテナの数そしてシステムを導入する天井高さによって導入出来る方式は異なるため、各々の環境に合わせて方式を選定する必要がある。

表 3.19 コンテナ運搬ロボットとのコンテナ受渡し方法の比較

方式	棚段受渡し方式	固定レール上受渡し方式	上下移動レール上受渡し方式
図例			
説明	自動収納庫の最上段を受渡し専用の場所と指定し、コンテナ運搬ロボットは棚段への設置もしくは棚段からの持ち上げを行い、自動収納庫は最上段を通常の棚段と同様に扱うことで受渡しを行う方式。 ⇒コンテナの水平・上下位置決めともコンテナ運搬ロボットが担当。	最上段の固定レールにコンテナ収納ロボットを移動させて、コンテナ運搬ロボットは最上段に待機するコンテナ収納ロボットとの受渡しを行う方式。 ⇒コンテナの上下位置決めはコンテナ運搬ロボットが担当、水平位置決めは自動収納庫側が担当。	上下移動レール上にコンテナ収納ロボットを移動させて、直動機構の動作にてコンテナ運搬ロボットとの位置決めを行う方式。 ⇒コンテナの水平・上下位置決めとも自動収納庫側が担当。
利点	コンテナの受渡しに関して、コンテナ運搬ロボットと自動収納庫が各々のタスクを独立に実行出来るため、大量のコンテナの受渡しを行う際には効率が良い。	受渡しの水平位置決めは自動収納庫側が行うため、コンテナ運搬ロボットの位置決め制御の労力が軽減される。	コンテナ自動収納庫の高さが天井高さまでであるような場合でもコンテナの受渡しタスクが実行可能なため、コンテナの収容効率が高い。
欠点	コンテナ運搬ロボットが棚段に侵入するだけの十分なスペースが必要なため、天井が高い部屋かもしくは高さの低い自動収納庫にしか適用出来ない。	受渡しのために、コンテナ収納ロボットを最上段のレールに移動させる必要がある。	コンテナの受渡しのためにコンテナ収納ロボットを上下移動レールに移動させ、直動機構を制御する必要がある。

3.5.4 細部設計（機構の設計と実装）

本章ではこれまでの検討により選定された構造，方式を実現するための詳細設計及び実装について述べる。まず垂直動作の実現について述べ，続いて水平動作の実現について検討する，最後にコンテナの収納・取出し動作について述べる。

—垂直自由度の実装検討—

垂直自由度の実現には大ストロークの直動機構を活用するのが簡便である。本研究ではコントローラを機構に内蔵したメカインダストリー社製のタイミングベルト式直動機構”HBL40A-2000-C-CMG23L25”を採用した。このアクチュエータは筐体にコントローラを内蔵しているため，省スペース化が可能である。

—水平自由度の実装検討—

本節ではまず最初に水平運搬機構のメインボディ構造とレール素材に関して検討し，次に荷台を支持するローラの配置について検討する。ローラ配置の検討では，垂直荷重とモーメントを支持するための垂直面のローラ配置の検討と屈曲レールに沿って運搬を行うための水平面のローラ配置の検討が必要となる。なお，駆動ローラの配置は水平，垂直の両者と深く関わってくるため後半の水平面の配置検討において行う。最後に水平自由度の位置決め（位置計測）を行う方法について検討する。

水平自由度の実装検討 1：水平運搬機構の筐体構造とレール素材の検討

前節で示したように，棚の各段にレールを設置する場合，水平移動部の重心の鉛直上方にモノレールをレイアウトすると棚からレールが浮き出した状態となり，人の生活空間を大きく侵害する状態となってしまう。そこで図 3.102 に示すように棚とレールを接近した状態で配置することになる。その結果，水平運搬機構は片持ち状態となり，荷台を指示する筐体には高い剛性が求められる。軽量かつ高剛性な筐体を形成するため，アルミの角パイプを平行に 2 列配列することによって，片持ち荷重を支持する構造を採用した。また同時にモノレールに対しても大きなモーメントが加わるためその形状の選定にはレールの変形まで含めた検討が必要となる。まず素材剛性と形状バリエーションの豊富さから，レール素材として SUS304HL を採用した。

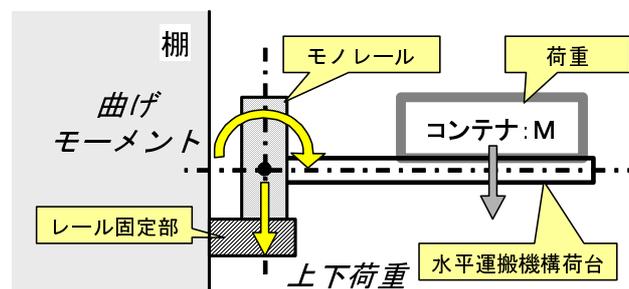


図 3.102 水平運搬機構の荷重支持模式図

SUS304HL の断面形状としては図 3.103 に示すようなものが考えられる。また SUS304HL の長尺素材はその寸法規格が限定されており，必ずしも最適な寸法のものが手に入らないということも，検討の中で重大な要因となる。各形状の概要と特長を次に示す。

- バー型（角パイプ型）

平型は最も単純な構造で，圧延した板を一定の幅で切断したような断面を持つ。また角パイプは平

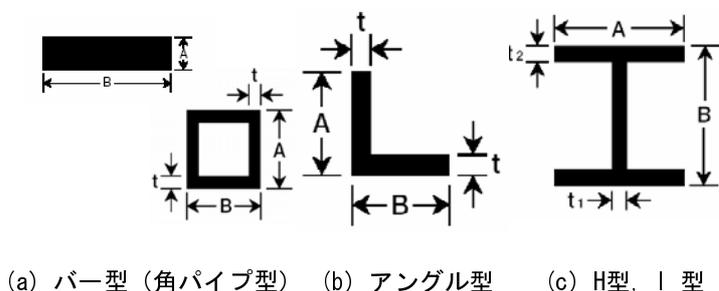


図 3.103 SUS304HL の断面形状の一覧

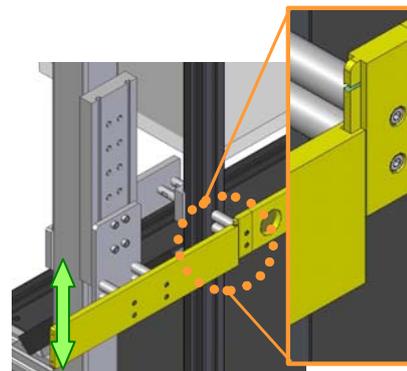


図 3.104 上下移動レールと固定レール接合部の様子

型の中央を中空にした構造である。規格が比較的豊富であるので寸法自由度が高いが、取り付けには工夫が必要である。

- アングル型
エル型の構造。取り付けは容易であるが、ねじりに対して剛性が低い。
- H型, I型
建築構造物や鉄道のレールなどに用いられる構造。ねじれに対して剛性が高く、取り付けが容易であるが、規格バリエーションが少ない。

今回の用途では高いねじれ剛性が必要となり、また強度と寸法の最適化のためには豊富なバリエーションが求められる。そこで本プロトタイプではバー型レールを採用した。また上下移動レールと固定レール間の接合状態を良くするために、図 3.104 に示すように両レールにはインロー溝を設けることとした。

水平自由度の実装検討 2：垂直面ローラ配置検討

前述した様に、水平運搬機構は片持ち状態となるため大きなモーメントを支持出来る必要がある。図 3.105(左) に垂直面ローラレイアウトのモデルを示す。モーメントのつりあいより各ローラは式 (3.7) のような力を支持することになる。

$$f = m \times L/h \tag{3.7}$$

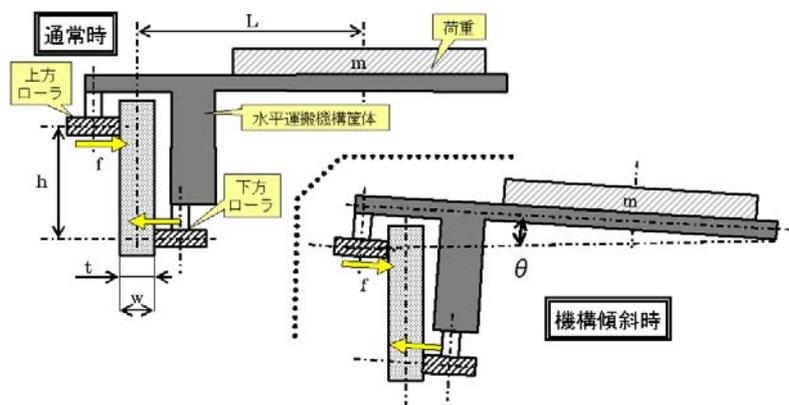


図 3.105 垂直面ローラレイアウトのモデル

図中の記号の定義は次の通りである。

- m : 荷重 (自重含む)
- L : レールから荷重重心までの距離
- t : レール厚さ
- w : 上方ローラ, 下方ローラ間水平距離
- h : 上方ローラ, 下方ローラ間垂直距離
- f : ローラ発生力
- θ : 筐体傾き角

ローラ発生力 (f) が過大な場合、ローラ内の軸受けに負荷がかかり寿命が低下するという問題が発生するだけでなく、ローラ表面のウレタンやローラを支持するシャフトの撓みを発生することになる。その結果、上方ローラ、下方ローラ間水平距離 (w) が広がりレール厚さ t との差が大きくなるため、図 3.105(右) に示すように機構が傾いてしまうことになる。このとき筐体の傾き角 (θ) は式 (3.8) のようになり、ここでも h が大きいほうが傾きが小さくなることが分かる。

$$\theta = \arctan\left(\frac{w-t}{h}\right) \quad (3.8)$$

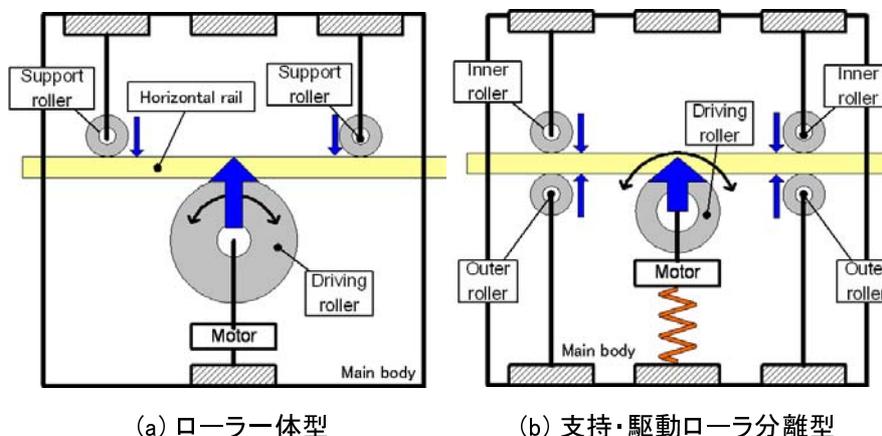
そこでローラ発生力 (f) を適切な値の範囲に収めることが必要となり、そのためにはローラ間垂直距離 (h) を大きくとることが求められる。一方でローラ間垂直距離はレール高さを規定するため、これが過大な場合棚の前面が塞がれてしまう。コンテナ高さは 188[mm] であり [99, 100]、市販棚の棚段の高さは約 300[mm] ほどに設定されている。ここに人間によるコンテナ把持余裕 50[mm] を加味すると、ローラ間垂直距離の最大距離は約 $300 - (188 + 50) =$ 約 62[mm] となる。またローラ垂直距離が長くなるとレールを捻る力が大きくなり必然的にレールの変形が大きくなり、結果として棚に対して水平運搬機構が傾いてしまうため、これを防ぐためにレールの厚さ (t) が大きくなる。上記を整理すると、ローラ配置の検討では以下の3条件を踏まえた検討が必要となる。

- 回転モーメントを支持し、ローラ発生力を過大にしないローラ間垂直距離があること。
- ローラ間垂直距離に規定されるレール高さがコンテナの取り出しを阻害しないこと。
- ローラがレールを捻る力がレールのねじり剛性の許容範囲であること。

レール素材の寸法規格を含めた検討の結果ローラ間垂直距離は 55[mm](レール高さ 65[mm]) とし、またレール厚さは FEM による検討により、ねじりに対して必要な剛性を確保可能な 9[mm] とした。

水平自由度の実装検討3：水平面ローラ配置，駆動ローラ配置の検討

水平面ローラの配置検討においては、屈曲レールに対応するように水平運搬機構を旋回させるためレールに沿って筐体を旋回させる旋回ガイドローラを設置する必要がある。そして駆動ローラは図 3.106 に示すように、(a) ローラー体型と (b) 支持・駆動ローラ分離型の二つの方法が考えられる。今回は片持ち構造となるため中央の支持ローラには大きな荷重が掛かることになる。この荷重を支持し、かつ水平駆動を行うためにはモータの出力が過大となるため、部品数は増えるがモータの負荷が小さい (b) 支持・駆動ローラ分離型を採用することとした。また棚側のローラ（インナローラ）は支持ローラ押し付け力を調整可能なように、位置を変更することが可能となる構造とした。これにより、機体の自重による荷台の傾斜などを初期状態で補正すること^{*19}が可能となる。一方で支持力が過大な場合、走行時の損失にも繋がるため、慎重な位置調整が必要となる。



(a) ローラー体型

(b) 支持・駆動ローラ分離型

図 3.106 水平面ローラレイアウトの候補

*19 コンテナを積載する面は可能な限り水平となることが好ましい。

水平自由度の実装検討4：水平位置決め方法の検討

前述のように荷重支持ローラと駆動ローラを分離して実装することにより，駆動ローラへの負担が減少する一方で，滑りも発生しやすくなることになりローラの回転数だけから位置を算出する方法に頼るのは懸命ではない。そこで図 3.107 に示すように位置決めスイッチを水平運搬機構に取り付け，図 3.107(右)に示すようなレール上の突起物を感知することによって水平位置決めが出来るようにした。また，位置決めに失敗してオーバーランした場合や突出しているコンテナと接触したときには左右のリミットスイッチが ON になることで緊急停止する構造とした。

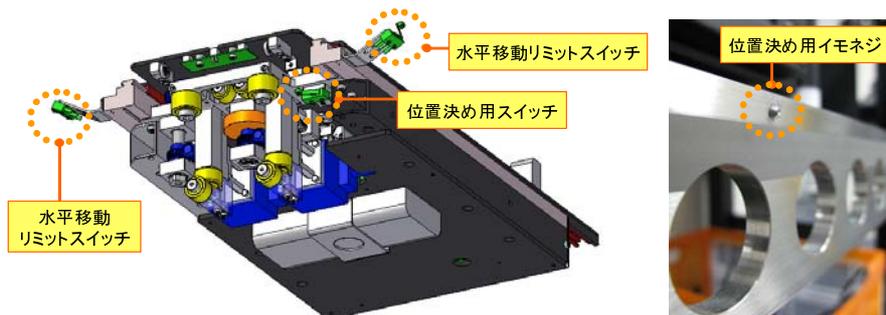


図 3.107 水平移動用位置決めスイッチと左右リミットスイッチ

—コンテナ収納・取出し動作の実現—

本節ではまず，人がコンテナを規定の位置に収納するように誘導する方法（仕組み）の設計について説明し，次にフォークテーブルの構造及び駆動機構，そしてコンテナロック機構の設計について示す。

コンテナ収納・取出し動作の実現1：コンテナ収納位置誘導方法の実装

工業用の自動収納庫と異なり，人間が手作業でコンテナ収納作業を行うため，収納されるコンテナの位置は常に画一的であるとは限らない。しかし，人間が何の制限もなく設置したコンテナの位置・姿勢を認識しハンドリングを行うことはロボットにとって困難である。そこで，人がコンテナを設置する際に自然と既定の位置に収まるように誘導する仕組みを構成することが求められる。この目的を実現するには，構造的な仕組みと簡易センサを用いた情報提示の仕組みの二種類が考えられる。まず構造的な仕組みとして，図 3.108 に示すようにガイドの窪みの部分にコンテナのボール部が押し込まれることによって，受動的にコンテナの位置が規定されるような構造とした。これによって，人がラフにコンテナを設置した場合でも，テーブル挿入動作を行うことにより自然とコンテナが既定の位置に位置決めされるようになる。また一方の簡易センサを用いた情報提示としては，図 3.109 に示すように i コンテナに貼り付けられたコンテナ ID 認識用の RFID タグと専用の RFID アンテナを，図 3.108 のように設置することにより，コンテナが規定の領域内にあることを認識する仕組みを実現した。なお，コンテナ位置の計測結果の情報提示方法については，後の基本性能実験により選定した。

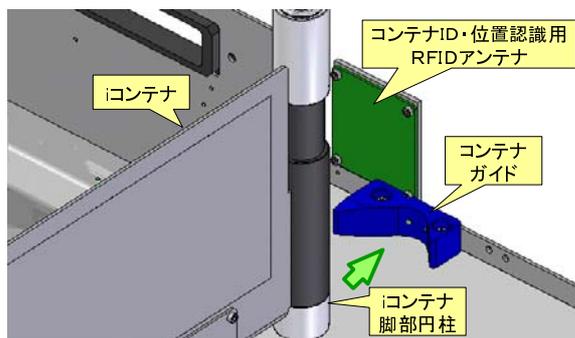


図 3.108 ガイドプレートとコンテナ角のポール構造部

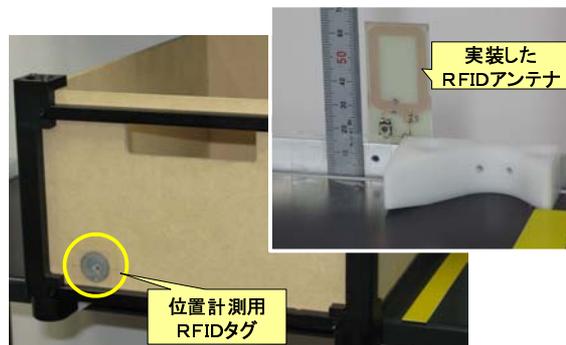


図 3.109 コンテナ貼り付け RFID タグとアンテナ

コンテナ収納・取出し動作の実現2：フォークテーブル構造の検討

フォークテーブルはコンテナと棚板との隙間に挿入出来る薄型構造体であり、一方でコンテナロック機構の荷重を支持する十分な剛性を有しなければならない。そこで図 3.110 左に示すように、フォークテーブルは両サイドを折り曲げることにより剛性を向上させた板金プレートで構成することとした。なおこの曲げフランジ部はコンテナハンドリングの際には左右の水平自由度を拘束するガイドにもなる。さらに図 3.110(中・右) に示すように、曲げ部の R はコンテナをコンテナ運搬ロボット等により水平運搬機構上に上面から設置する際のガイドの役割も果たす。

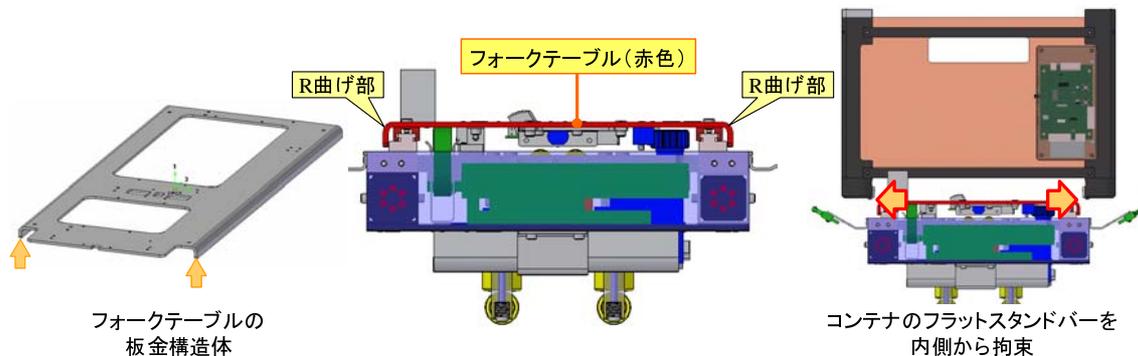


図 3.110 フォークテーブルの構造とコンテナとの幾何的關係

コンテナ収納・取出し動作の実現3：フォークテーブル駆動機構の設計

フォークテーブルの駆動にはコンテナの底にフォークを挿入するだけの長いストロークの駆動機構が必要となる。表 3.20 に長ストロークの駆動機構として一般的なものを整理する。水平運搬機構は人との干渉を可能な限り小さくするため薄型(小型)にする必要がある。そこで構造がシンプルなラックギア+モータ方式を採用することとした。フォークテーブルの駆動にモータを用いる場合、水平運搬機構の自重が十分軽量であるとする、水平移動のモータとほぼ同じ出力となり、駆動源(モータ)の兼用を計ることが可能となる。表 3.21 に駆動源の数を変更した場合の各々の部品構成に関する検討を示す。検討の結果、駆動源(モータ)の兼用により電装系などの簡素化が狙える可能性はあるものの、必要な機構部品が増えてしまうため、フォークテーブル駆動と水平移動は各々独立に駆動源(モータ)を用意することとした。モータを独立に用意する場合、その配置によって筐体の形状は大きく変わる。そこで駆動軸に対する相対位置の検討を行う必要がある。図 3.111 に示すように、駆動軸と平行にモータを設置した場合、動力伝達

表 3.20 一般的な長ストローク駆動機構のリスト

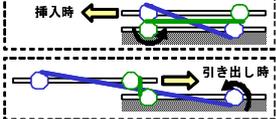
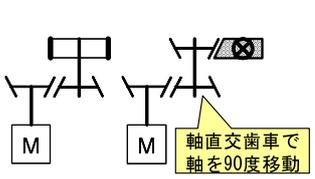
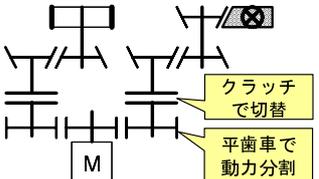
方式	油空圧シリンダ+油空圧ポンプ	送りねじ+モータ	ラックギア+モータ	ワイヤ(ベルト)+モータ
図例				
製品例	<ul style="list-style-type: none"> 油空圧シリンダ【CKD】ペンシルシリンダSCPシリーズ 油空圧ポンプ【ツカサ電工】ギアポンプ【HNP】マイクロギアポンプ 	<ul style="list-style-type: none"> 送りねじ【ミスミ】ボールねじ、台形ねじ等 	<ul style="list-style-type: none"> ラック【教育歯車】【ミスミ】 	<ul style="list-style-type: none"> プーリ「三木プーリ」
説明	油圧ポンプの流量をペンシルタイプのシリンダの直動へ変化する方法。小型のシリンダは油圧用は販売されていないので、空圧用を流用するのがベター。	モータの回転運動をねじ機構により直動運動へ変化させる方法。直動への変換によりある程度減速機構を内包可能。	左記の送りねじをラックギアに置換したものの。	ワイヤをプーリによって巻き取ることにより、駆動させる方法。挿入時巻き取り用のプーリと引き出し時巻き取り用のプーリを用いることで、両者で同等の出力を実現することが可能。
利点	シリンダ内径の変更により、同一の機構で様々な出力を選択可能。配管はフレキシブルなものを利用可能なので、機構配置の自由度が高い。	送りねじ部品は様々なメーカーで取り扱っているので、入手が容易。また、精度の高い位置決めも可能。	直接的に回転運動を直動運動に変換するので位置決めが簡単。機構が簡単で設計・整備が容易。	プーリとワイヤ方式で適切に設計した場合非常に機械効率が高く、静音設計が可能となる。
欠点	ロッド部がシリンダ部より大きく外に出るため、動作流体の汚染がないよう処置しなければならない。	軸を指示するベアリング等が軸の両端に必要であり、装置が全体的に大型化する。	バックラッシュがあるため、精度の高い位置決めは期待できない。	挿入時駆動プーリと引き出し時駆動プーリの運動が必要となるため、タイミングベルト等での動力伝達機構が必要となる。

表 3.21 動力源を兼用・独立利用した場合の部品構成の検討

動力源数・配置	2個(各機構独立)	1個(動力源共通化)	図	意味
動力スケルトン				モータ
				ホイール
				ラックギア
				平歯車
				歯車(軸直交)
				電磁クラッチ
特徴・評価	モータを2つ使用するため、制御回路のスペースは必要だが、構成が簡素であり設計時の配置制限も少ない。	モータの個数を低減する効果はあるが、動力分割のための歯車やクラッチ+駆動回路と構成部品が多くなってしまふ。		

にシンプルな機構（平歯車、タイミングベルトなど）が使用できるために部品数が少なくなることが期待される一方で、モータ自体が筐体下方に突き出る形状となるため、生活空間を侵害してしまう可能性がある。一方、駆動軸とモータを直角に配置した場合、モータは筐体の中にコンパクトに納まるため、水平運搬機構の筐体サイズを小さくすることが可能である。よって駆動軸とモータは直角に配置することとした。またモータは駆動と位置決めが容易なステッピングモータを採用した。直交する駆動系を簡素な構造で接続するためには表 3.22 に示すようにウォーム、ベベル・マイタ、ハイポイドギアを使う方法が考えられるが、減速機構としても活用可能であることを考慮して、ウォームギアを採用した。以上のように設計した駆動形のまとめを図 3.112 に示す。

ところでフォークテーブルの挿入動作時は挿入先に障害物が存在しないことを確認する必要がある。そこで図 3.113 に示すようにフォークテーブルの先端には赤外の近接センサを配置し、前方及び上方の障害物を発見した場合には動作を停止させることとした。

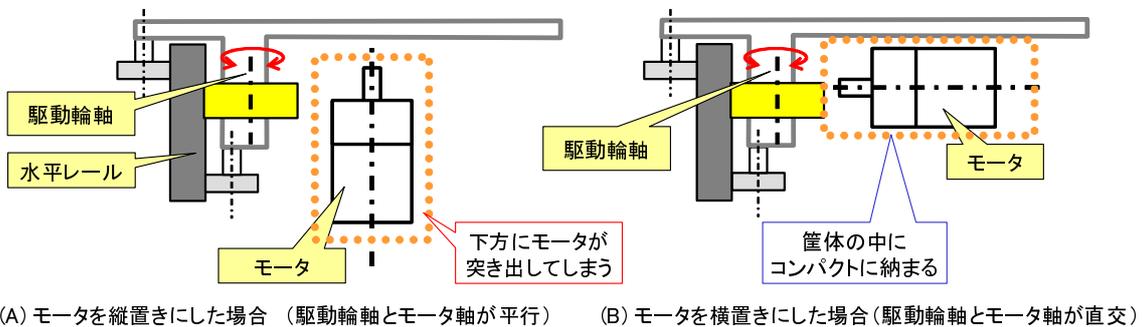


図 3.111 駆動軸とモータの相対配置の比較

表 3.22 簡素な部品構成で実現可能な駆動軸直角変換機構のリスト

機構名	ウォームギア	ベベル・マイタギア	ハイポイドギア
図例			
説明	回転によってウォームホイールの歯面上をウォームギアが斜面を登るように移動する。	平歯車の歯を傾けて、円錐状に歯接触面が来るようにした歯車のこと。	ベベルギアの軸中心が同軸でないものこと。
利点	減速比を大きく取れる。また組み合わせによってはブレーキ機構を実装できる。 ウォームホイールとギアを同一平面に並べることによって高さを抑えた設計が可能。	ウォームギアと比べて機械効率が高く、静音で駆動する。 ※ストレートギアと比べて曲がり歯だとギア同士が線接触するため、より静音性が高い。	ウォームギアと比べて機械効率が高く、静音で駆動する。 また同軸に設置しなくても良いため、軸配置の自由度が高い。
欠点	歯面を滑りながら駆動するため機械効率が低く、潤滑剤の使用が不可欠。	減速比を高く出来ないため、別途減速機構を容易にする必要がある。 歯車の上に歯車が重なる構造のため、高さ方向にスペースが必要。	

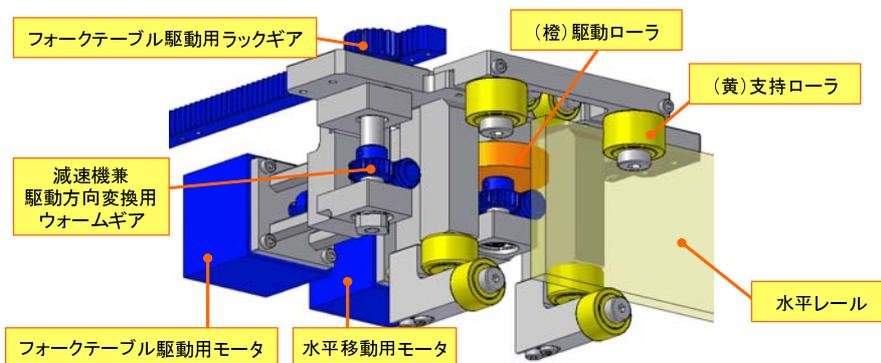


図 3.112 駆動系のまとめ

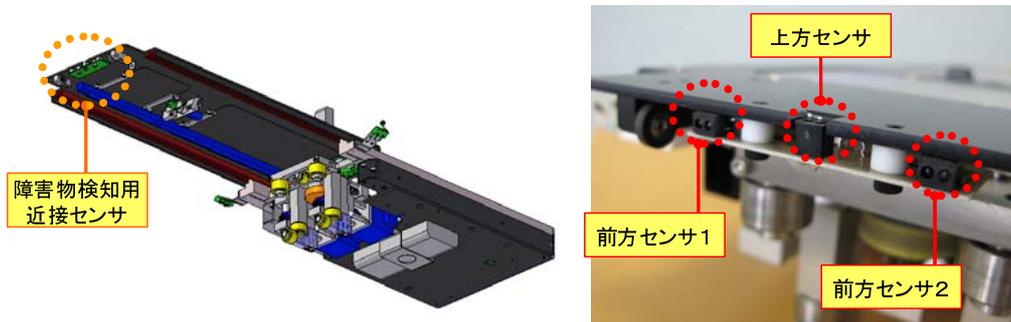


図 3.113 フォークテーブルの先端に取り付けられた障害物検知センサ

コンテナ収納・取出し動作の実現 4：コンテナロック機構の設計

前述した用に、コンテナガイドプレートを採用したことにより、水平運搬機構は高い位置決め誤差受容性能を有することになった。そこでコンテナロックは非常にシンプルな機構で実現可能となる。簡易把持方式としてはフォークプレートよりロックプレートが突き出る構造（図 3.114(左)）を採用した。コンテナの底面中心に設けられた溝（図 3.114(右)）と、このロックプレートが噛み合うことによってロック状態が実現される。

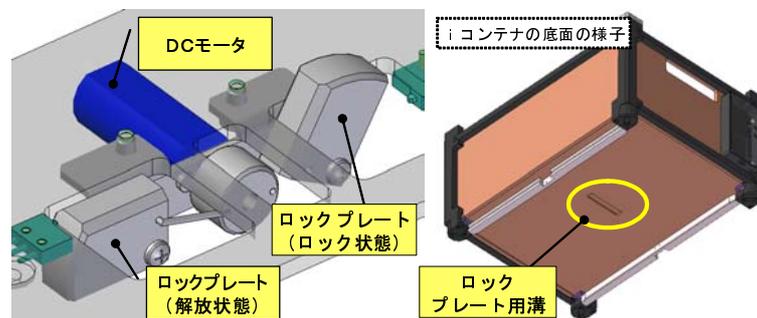


図 3.114 コンテナ拘束用のロックプレートと i コンテナ底面に設置された溝

コンテナ収納・取出し動作の実現 5：Geometric object closure の確認

ここまで検討してきた i コンテナ自体の構造，フォークテーブルとコンテナロックプレート，そして棚に設置されたガイドプレートにより Caging 状態である Geometric object closure がどのように実現されるかをまとめる。まず Caging 拘束状態に関係する機械構造体を以下に列挙する。

- i コンテナ
 - フラットスタンドバー（コンテナ脚部円柱を含む）
 - コンテナ横板
 - ロックプレート用溝
- 家庭用コンテナ自動収納庫
 - ロックプレート
 - フォークテーブル板金構造体
 - フォークテーブルプッシュプレート
 - コンテナガイドプレート（棚上に設置）

図 3.115 に運搬の各状態での各々の機械構造体の位置関係を示す。フォークプレート挿入位置決め時 (A) はコンテナガイドプレート ⇔ フラットスタンドバー, そしてフォークテーブルプッシュプレート ⇔ コンテナ横板での拘束により Caging 状態が実現されている。この状態は2箇所でのR部が接触している状態であり位置決めピンでの拘束と同様に比較的精密な位置の規定が可能である。一方のコンテナ拘束時 (B) はロックプレート用溝 ⇔ ロックプレート, そしてフラットスタンドバー ⇔ フォークテーブル板金構造体での拘束により Caging 状態が実現されている。この状態は長方形の物体を長方形の枠の中に入れて拘束している状態と同じであり, 作図による移動許容範囲の検討が容易であるのが特徴である。なお本 Caging の設計ではプレート挿入方向で 2[mm], 左右方向で 6[mm] のコンテナの移動が許容されている。ここで特徴的なのがコンテナ拘束時 (B) が Caging 状態であることは当然のこと, フォークプレート挿入位置決め時 (A) も Caging 状態にあることである。この2段階の Caging により, 拘束がスムーズかつロバストに実現されるようになる。

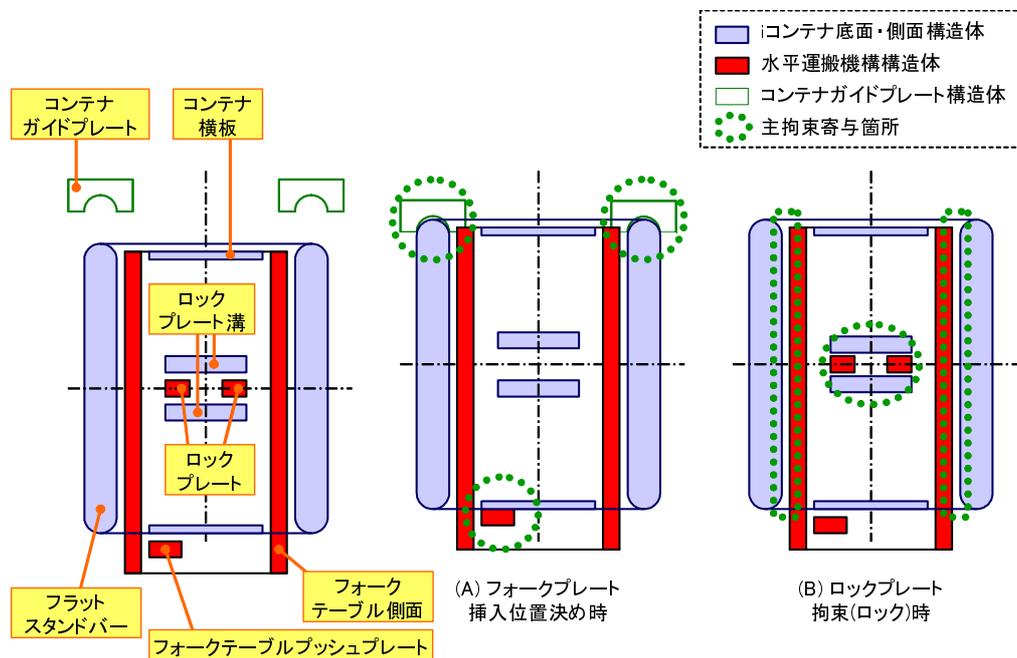


図 3.115 家庭用コンテナ自動収納庫の水平運搬機構で実現される Geometric object closure の概要

3.5.5 基本性能試験

まず人のコンテナ収納特性を把握するための実験を行い、続いて以下のコンテナ運搬動作に関する試験を実施した。

- 水平レール移動動作
- レール乗り移り動作
- コンテナ収納，取出し動作

基本性能試験 1：人によるコンテナ収納位置の誘導性能試験

本節では人がコンテナを収納する際の収納位置誘導性能に関する実験について述べる。

【試験設定】

本試験は次の設定で実施した。図 3.116 に試験の様子を示す。

- 被験者：5名(女性2名，男性3名)
- 収納コンテナ：i コンテナ(クラスA)
- 誘導方法：次の4パターン
SET 1：ガイドプレートのみ
SET 2：ガイドプレート+誘導ライン
SET 3：SET2+RFID 認識結果をLEDで提示
SET 4：SET2+RFID 認識結果をビープ音で提示
- 試験回数：各誘導方法で5回ずつ
- 計測項目1：コンテナを収納するのに要した時間
- 計測項目2：コンテナ収納作業完了後のコンテナ位置
(LED 精密位置計測装置 (accuTrack[101]) を利用。精度 0.1[mm]RMS)
- アンケート項目：各設定の使いやすさ

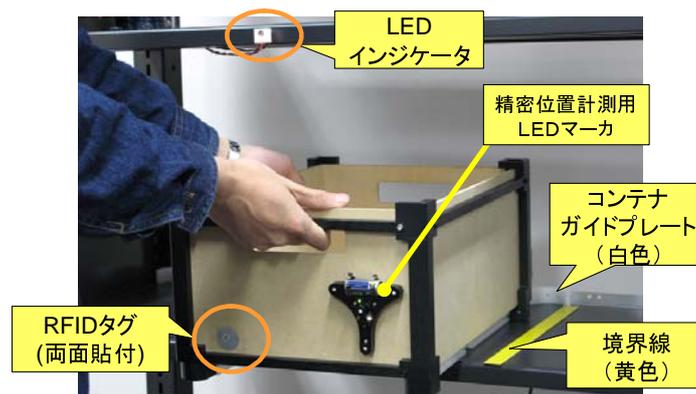


図 3.116 コンテナ収納位置誘導試験の様子

【試験結果】

図 3.117 に試験結果を示す。まず図 3.117(左) のグラフが各設定でコンテナ収納に要した時間の平均値である。何れの被験者においても境界テープを設置した場合 (Setting 2) がガイドプレートのみの場合 (Setting 1) と比較して作業時間が長くなっている。これは境界の存在が収納範囲が狭まったという印象を被験者に与えた結果，作業が慎重になったためと考えられる。また被験者によっては，LED の点灯もしくは音によりコンテナ収納完了の通知を受けることで作業時間が短くなるという現象が確認された。続いて図 3.117(中央) のグラフは被験者が設置したコンテナ位置と理想的なコンテナ収納位置との距離をグ

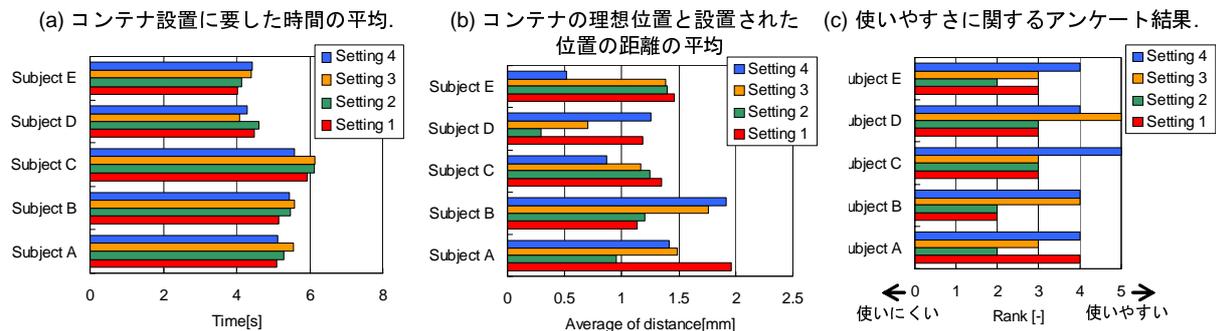


図 3.117 コンテナ収納位置誘導試験結果

ラフ化したものである。これによりコンテナガイドのみでも平均誤差 2[mm] と十分に小さく、コンテナを既定の位置へ誘導可能なことが確認された。最後に図 3.117(右) のグラフは被験者に使いやすさについてアンケートを求めた結果である。コンテナ終了完了通知 (Setting 3 or 4) の機能については、状態の把握という意味で高く評価されていると言える。しかし、その提示方法については改善の必要があると言える。以上を整理すると、次のようになる。

- 位置誘導に関してはガイドプレート単体で十分に機能する。
- 境界テープはガイドプレート単体と比較して、作業者に心理的な拘束を与えることが可能であり、コンテナを規定の位置へ誘導する一定の効果があると推測される。
- LED、音による情報提示は、ユーザの安心感を与えることが出来るため、作業時間が短くなることがある一方で音に関しては音色、発音時間、LEDに関しては取り付け位置、発光量などの改善が必要である。

基本性能試験 2：水平運搬機構移動動作試験

レール初期の状態では駆動ローラのウレタンとステンスレールの間ですべりが発生してしまったため、十分な駆動力を確保することが出来なかった。そこで、ステンスレールにフィラメントテープを貼り付け摩擦を確保した^{*20}。これによりコンテナ収納ロボットが、5 [kg] の荷重を積載したコンテナ (合計 8[kg]) の水平運搬及び移載作業を実施可能であった。支持・駆動ローラ分離型の場合、機体の自重が押し付け力に寄与しないため、ローラ・レール間の摩擦の管理が重要となることが確認された。

*20 最終的にはステンスレールの駆動ローラが接する面にサンドブラスト加工を施すことで、摩擦を確保することにした。

基本性能試験3：水平運搬機構レール乗り移り動作試験

本試験では、水平固定レールと上下移動レールの乗り換え時に牽引力が最大になることが予測されていたため、機体より水平駆動ローラを取り外し、牽引力の測定を行った。また計測値と計算値との比較を行い、計測値の評価を行った。計測設定は次の通りである。

- 駆動力：手動
- センサ：ロードセル（共和電業”LM10KA”）
- サンプリングレート：1 [kHz]
- 移動方法：固定レール上から静止レール上まで水平移動
- ローラ設定：2種類
- 荷重：0, 3, 5.5, 8 [kg]（4種類）

図 3.118 に本試験により取得されたデータの例を示す。

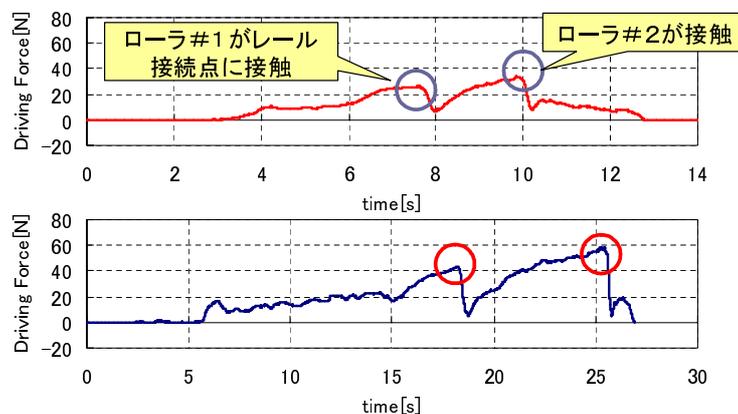


図 3.118 取得された駆動力データの例 上側：荷重 0[kg], 下側：荷重 8[kg]

各支持ローラが固定レールと上下移動レールの段差を乗り越える際に牽引力がピークを示していることが分かる。続いて本試験の結果を運搬荷重に応じて整理したグラフを図 3.119 に示す。試験設定でも述べたように、本試験ではインナローラの調整位置を 2 通り試行し、最大牽引力への影響を確認した。なお設定 A では設定 B よりもインナローラ的位置を 1[mm] ほどレール側に押し付けた状態である。試験の結果、インナローラ的位置が最大必要牽引力に大きく影響することが確認された。これはインナローラを押し込むとローラ支持力が大きくなり、結果として段差乗り越えに必要な駆動力が大きくなるために発生する現象であると考えられる。駆動力の計測後、設定を B としてモータにより水平駆動したところ、荷重 8[kg] を搭載した場合でも問題なくレール乗り移り動作を実行可能なことを確認した。

続いて設計計算上の必要牽引力と実際の牽引力との比較を行った。ローラが段差を乗り越える際の状態を簡易にモデル化すると図 3.120 のようになる。ここで R はローラ半径、 h は段差高さ、 F_s は機体の支持力、 F_d が必要牽引力である。このモデルにおいて $\eta = h/R$ と定義すると、 F_s と F_d の関係より F_d は式 (3.9) のように表される。

$$\begin{aligned}
 F_d &= F_s \times \frac{\sqrt{2Rh - h^2}}{R - h} \\
 &= F_s \times \frac{\sqrt{2\eta - \eta^2}}{1 - \eta} = F_s \times g(\eta)
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

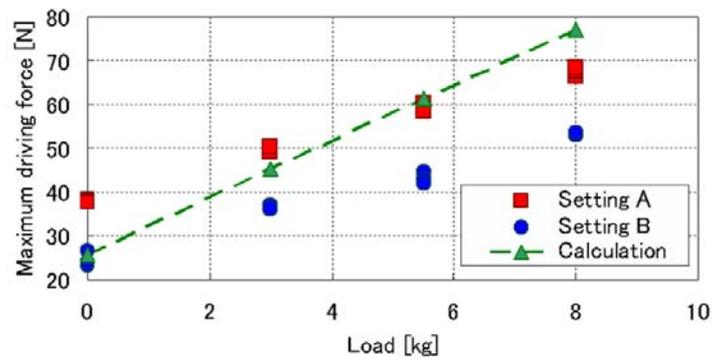


図 3.119 駆動力測定結果のまとめ

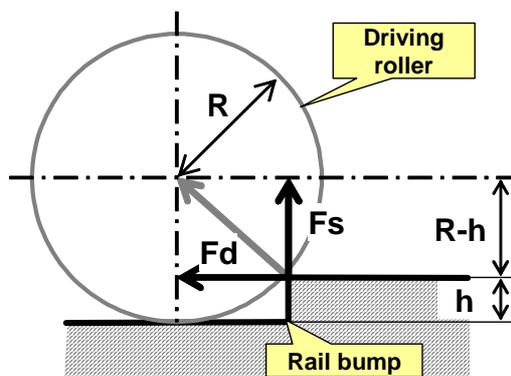


図 3.120 ローラ段差乗り越えの簡易モデル

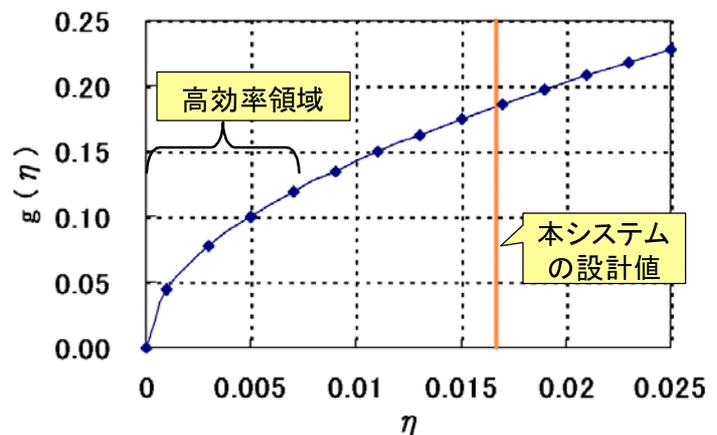


図 3.121 $g(\eta)$ の傾向

今回の設定では支持ローラ半径 R は $12[\text{mm}]$ 、段差高さ h は実測で $0.2[\text{mm}]$ 、また F_s は式 (3.7) で計算される f に相当し、機体に乗せる荷重により変化する値である。本式により計算される値が図 3.119 の点線で示された値である。前述したようにローラの押し付け状態により牽引力は大きく異なるが、実際の牽引力を調整により計算値と同等もしくは以下に設定することが可能であり、本計算によって設計を行うことが妥当であることが確認された。また F_d を決定づける $g(\eta)$ は η に対して図 3.121 に示すような傾向である。効率の良い設計のためには、 η が小さい領域を使用するべきだということが確認される。これにより可能な限り段差高さ h を小さくすると同時にローラ直径 R を大きくすることが重要であることが分かる。

基本性能試験4：コンテナ収納取出し動作試験

図3.122にコンテナ収納取出し作業時の様子を示す。人間が設置したコンテナの取り出し動作の確認をするために、図3.123に示すような7通りの状態にコンテナを設置し、試験を実施したところ問題なくタスクが完了し、高いコンプライアンス性能が確認された。また一方のコンテナ設置作業に関しても、ガイドプレートによる誘導のおかげで、所定の位置にロバストに設置可能なことを確認した。

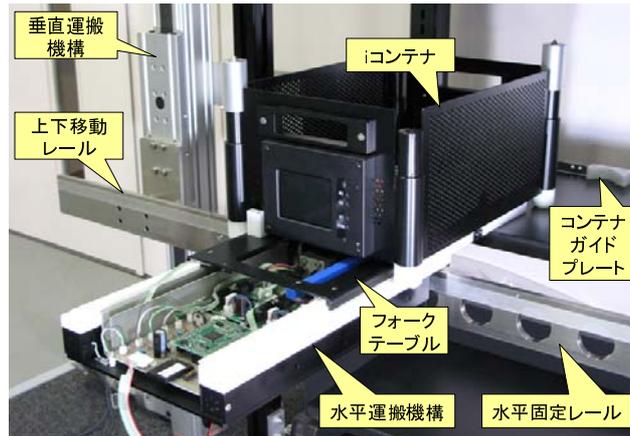


図 3.122 コンテナ収納取出し動作性能試験の様子

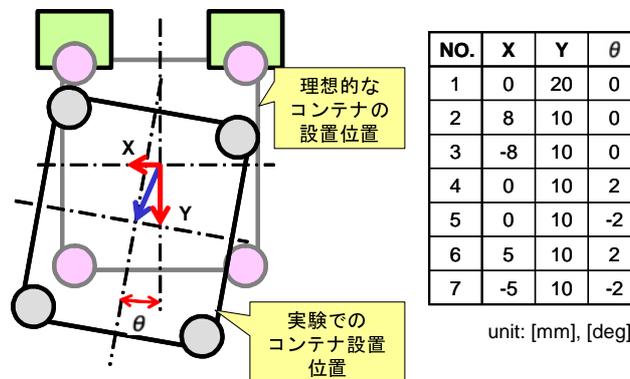


図 3.123 コンテナ取り出し動作試験の設定

3.5.6 家庭用コンテナ自動収納庫のまとめ

本節では家庭用コンテナ自動収納庫の設計・実装・基本性能試験について述べた。その特長は以下の通りである。

1. エレベータ方式の収納方法を採用したことにより人による通常の棚への収納行為を維持したままの収納自動化が可能。
2. 自由度分離型スタッカークレーンの採用により棚と天井裏空間を同様な収納空間として利用可能とし、また占有利用空間を低減し、挟まれなどが発生する可能性のある機構を少なくすることが可能。
3. ガイドプレートやRFIDを用いたセンシングにより、人がコンテナを設置する位置を、自動装置にとって取り扱いやすい状態に誘導することが可能。

開発を通じて、本形式のロボットにおいて以下の点が設計・実装において重要なポイントであることが確認された。

- モノレール機構においてはレール高さ（ローラ間垂直距離）を十分に確保する必要がある。
- 自由度分離型のクレーンでは、レール間段差乗り越え時に牽引力は最大になるため、これを低減するために段差自体を小さくすると同時に、ローラの径を可能な限り大きくとる必要がある。
- 支持・駆動ローラ分離型のモノレール機構では機体の自重が駆動ローラの押し付け力に寄与しないため、駆動ローラ・レール間の摩擦を高くすることが必要となる。
- ガイドプレートを設置するだけで人は正確に位置決めを行うことが可能だが、境界線の設置やRFID、LED、ピープ音を利用した状態表示によって、ユーザの慎重さや安心感を促すことが可能である。

家庭用コンテナ自動収納庫のスナップショット

家庭用コンテナ自動収納庫の概観を図 3.124 に示す。



図 3.124 家庭用コンテナ収納庫のスナップショット

仕様一覧

家庭用コンテナ自動収納庫の仕様一覧を一般的な工業用の収納庫との比較として表 3.23 に示す。

表 3.23 家庭用コンテナ自動収納庫と工業用との比較

	家庭用コンテナ自動収納システム	工業用コンテナ自動収納システム
基本構造	エレベータ型(棚段は固定)	エレベータ型/循環型
大きさ	約W1,500×H2,300×D450[mm]	1つの部屋~建屋全体と大型
自由度レイアウト	自由度分離型レイアウト (直動機構とコンテナ収納ロボットを分離) ・垂直: タイミングベルトリニアアクチュエータ駆動 ・水平: オーバーハングローラ駆動	自由度統合型レイアウト(スタッカクレーン)
レール構造	モノレール, 片持ち懸架方式	---
取り出し・設置方法	フォーク・簡易ロック統合方式	フォーク方式, 把持方式
最大運搬重量	8 [kg] ※1	数10[kg]~数10[ton]
最高移動速度	安全のため低速 (水平0.2 [m/s])	効率化のため高速 (1~2 [m/s])
コンテナ位置認識	RFIタグ及びビアンテナ	カメラ, 光学マーカ
空間占有	非常に小さい →自由度を分離しているため退避モードが可能	非常に大きい →スタッカクレーンの専用稼働空間が必要
人間によるコンテナ操作	可能	不可能(スタッカクレーンが必ず必要)
外乱許容性能	非常に柔軟に許容可能	一般的には対応していない
障害物認識	赤外距離センサ及び接触スイッチ	一般的には対応していない

※1: コンテナ重量含む

クロージャ、コンプライアンス技術の適用箇所

- Geometric object closure
 - 棚奥のコンテナガイドプレート, フォークテーブル, フックプレート, コンテナプッシュプレートで構成される幾何的な拘束による位置決めと把持動作
⇒ フォークテーブルを棚段に挿入する動作により, コンテナの位置・姿勢を制限することが可能となり, またフックプレートのロックとフォークテーブル自身の構造によりコンテナの移動を制限しつつ移載作業を行うことが可能。つまり把持準備時, 把持実行時共に Caging が実現されている。
- 戦略的コンプライアンス
 - 人による収納庫へのコンテナ設置作業時のコンテナ位置を規定するために, ガイドプレート及び RFID によるコンテナ位置認識環境を整備し, 人によるコンテナ位置決めを誘導している。
⇒ 人による作業を機械的・情動的に誘導している点で戦略的コンプライアンスの”誘導”に該当する。また人はロボットのロバストな動作のために, コンテナを棚にしっかりと設置するという役割を担うことになり, ”役割の規格化”とも言える。
- 機械的コンプライアンス
 - Geometric object closure によりロバストな把持を実現しているため, 本サブシステムでは明示的な機械的コンプライアンスを使用していない。

3.6 コンテナ位置認識システム

本節では部屋中に設置された i コンテナの位置を発見し、コンテナ運搬ロボットによる把持に必要な詳細な位置情報を取得する、コンテナ位置認識システムについて示す。

3.6.1 システム設計（要求仕様，機能の検討）

生活空間でコンテナ位置計測を実施するには2つの課題がある。

- 課題1．計測環境が煩雑である
生活空間は多種多様なものが存在し定常的な外乱が多く、また時々刻々と変化する環境に柔軟に対応する必要がある。
- 課題2．計測目標のスケール幅が広い（目標精度）
図 3.125 のように、数 [m] スケールの部屋からコンテナを発見し、位置を把握する「大域的計測」から、ロボットの把持に必要な高精度の「局所的計測」まで網羅しなければならない。

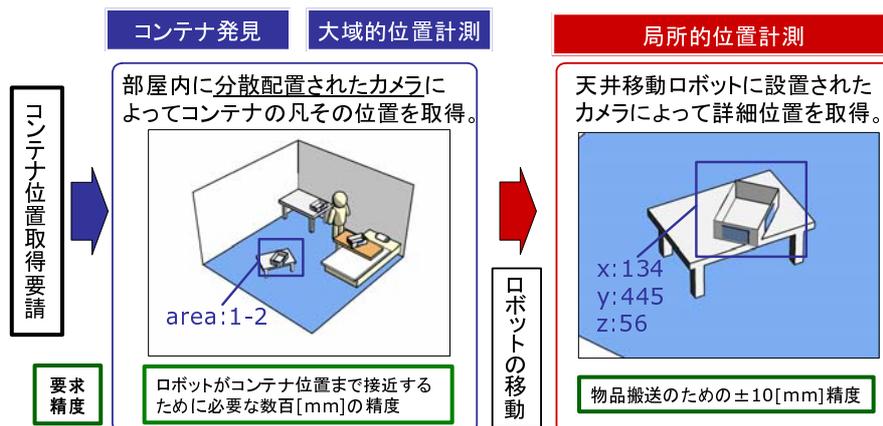


図 3.125 コンテナ位置認識・計測の流れ

なお本システムでは天井移動ロボットによってコンテナへアクセスするため、垂直高さの計測精度は必ずしも必要でなく、水平2次元での位置精度が重要となる。大域的計測においては局所的計測を行う準備のため、ロボットが計測対象に接近するのに十分な精度の200[mm]を目標精度として設定する。局所的計測に関しては把持ロボット側に水平コンプライアンス要素を装備することを踏まえて ± 10 [mm]の水平精度を目標と設定する。

3.6.2 基本設計（方式の検討）

本節では上記の仕様を実現するためにまず、カメラレイアウトについて検討を行い、続いて発見・位置計測の特徴量の検討を行う。

カメラ設置方式の検討

大域的計測と局所的計測で求められる精度のオーダが異なるため、これを同一のカメラで実現することは容易ではない。そこで、大域的計測は環境中に散在させた複数の固定カメラを用いて実現し、一方の局所的計測は無線カメラをコンテナ運搬ロボットに搭載することによって実現する。本手法と同様なアプ

ローチとして外圍らは環境マップを作成する際に天井に設置されたステレオカメラと移動ロボットに搭載したセンサ（超音波センサ等）を融合する手法について研究している [102]。

発見・位置計測特徴量の検討

生活環境は光学計測にとって外乱となる要素が多い。物体それ自体が持つ幾何的（パターン情報上の）特徴を画像処理により抽出する方法もいくつか提案されているが [103, 51]，今回の発見から詳細位置計測まで広く実現するには課題が多い。そこでコンテナの発見が容易になるように LED を用いた周期的な発光ビーコンをコンテナ上面に取り付けることとする。これは家庭環境中で一定した周期で色相変化を起こしている物体は少なく，また規定のバンドパスフィルタを用いることによって容易にノイズ除去をすることが出来るという利点がある。また最低 1 つのカメラでも位置計測が可能なるよう，LED の配置に幾何的な拘束を設けることにした。具体的には長方形の頂点に LED を配置している。

3.6.3 細部設計及びシステムの実装

本章では実装したシステムの詳細を述べる。

システムの概要

まず本システムのブロック図を図 3.126 に示す。

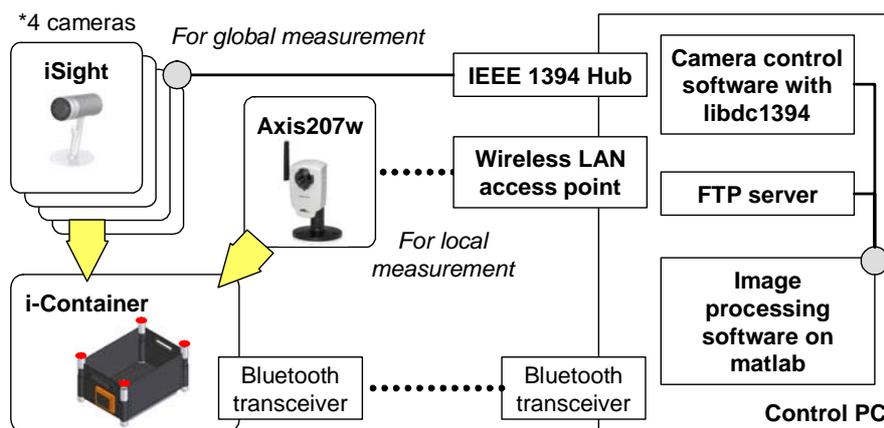


図 3.126 コンテナ位置認識システムの機能ブロック図

光学マーカの実装

LED は赤色の高輝度タイプ (Kighbright 製 'L934SRDG') を採用し図 3.127 に示すようにコンテナの四つ角に設置した。また一般のカメラは 30[Hz] で撮像するため，余裕をみて 1/4 の 7.5[Hz] で LED を点滅させることとした。

大域的計測用カメラシステムの実装

カメラハードウェアの設定

今回環境カメラとして安価でかつ基本的な制御が可能な PC チャット用の iSight(Apple 製，画素数 640×480) を採用した。iSight 4 台を IEEE1394 ハブを介して FA 用 PC に接続する。今回は図 3.128 に示すように，2[m]×2[m]×2.2[m] の空間の天井に中心を向くようにカメラを設置した。

カメラの校正

カメラの内部パラメータの校正には図 3.129(左) に示すキャリブレーションボードを撮像した画像を用い，Jean-Yves Bouguet が公開している Matlab 用の Camera Calibratin Toolbox[104] を使用した。一

方外部パラメータの校正には図 3.129(右) のようにコンテナの位置を計測する環境中に市松模様のシート(東リ製クッションフロア”CF5674”)を敷き詰めて,校正を行った。図 3.130 に校正に用いた画像例を示す。なお,コンテナの位置計測は本来はコンテナ運搬ロボットの座標系にて結果が出力されるのが好ましい。そこで天井面と床面の基準位置のズレをメジャーにて実測し,座標系の補正を行っている。メジャーでの計測のため,この補正には 10[mm] 程度の誤差が含まれている可能性があることに注意が必要である。

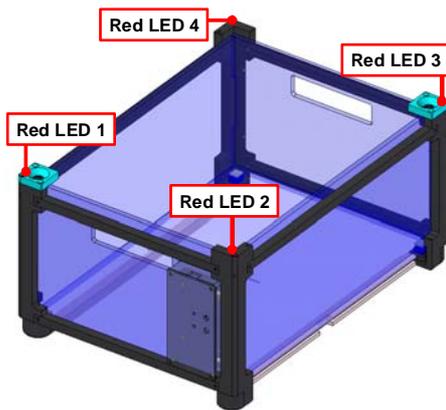


図 3.127 i コンテナ上面に設置された4つのLED

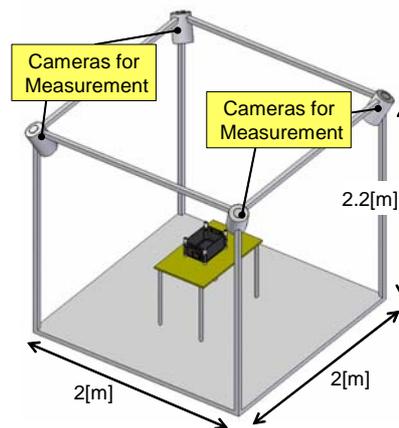


図 3.128 IEEE 1394 カメラのレイアウト

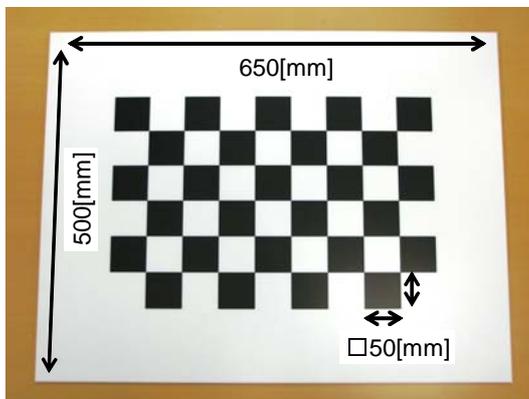


図 3.129 内部パラメータ校正用ボード(左)と外部パラメータ校正用シートを設置した環境(右)

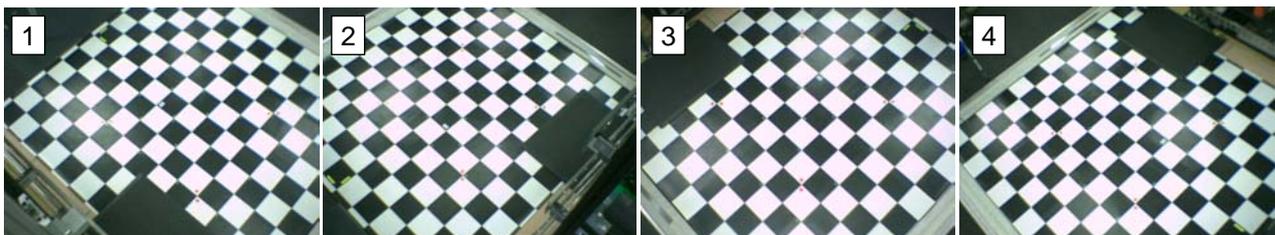


図 3.130 大域的計測用カメラシステムの外部パラメータ推定に用いた画像(左上の番号はカメラの通し番号と対応)

データ処理部の構築

画像撮影後のデータ処理の流れは次の通りである。

- 処理1．背景差分によるフィルタ対象の絞込み
- 処理2．バンドパスフィルタによる点滅画素の抽出
- 処理3．圧縮膨張フィルタによるノイズ除去
- 処理4．ラベリングとそれに基づく4点の候補の選択
- 処理5．LEDの平行, 辺長さ条件より3次元位置の計算

処理1において1枚目の画像を背景として背景差分を行い, 変化があった画素のみフィルタリングの対象とすることで処理の高速化を計った。処理2におけるフィルタの周波数特性を図3.131に示す。また処理5の概要を以下に示す。まずLEDが作る長方形の対辺のベクトルが同一であるため式(3.10)の関係がある。

$$M_1 - M_2 = M_4 - M_3 \quad (3.10)$$

ここで $M_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$ は空間上のLEDの位置ベクトルである。これによりLEDが構成する長方形の向きが定まる。続いて, 既知であるLED間の距離 (w_{ij}) から求められる式3.11の関係を用いて奥行き方向のスケールを求めることでLEDが構成する長方形の位置が求められる。

$$|M_i - M_j| = w_{ij} \quad (3.11)$$

なお, LED間の距離を与える箇所の組み合わせ(6通り)で計算を行い, その平均を求めた。また同様に複数のカメラにコンテナが写った場合も平均結果^{*21}を採用した。

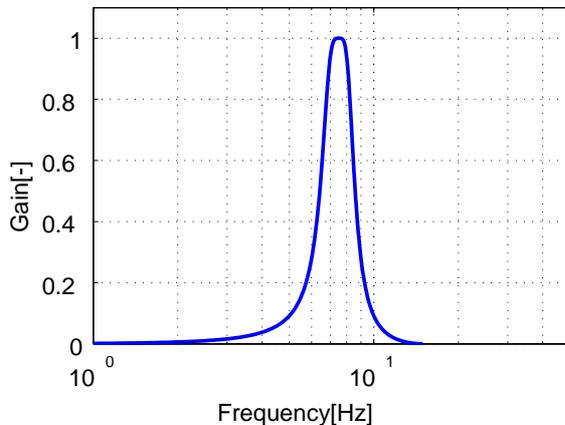


図 3.131 バンドパスフィルタのボード線図

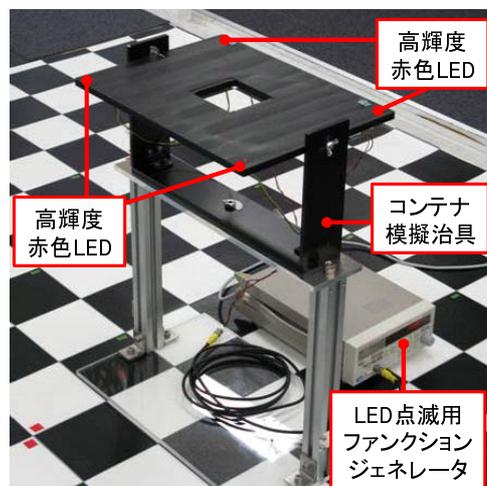


図 3.132 i コンテナ模擬テストベンチ

局所的計測用カメラシステムの実装

カメラハードウェアの設定

ロボットに搭載できるカメラとして無線 LAN カメラ (AXIS Communication 製, '207W') を選択した。このカメラは画素数 640×480 であり, また外部トリガにより撮影を行い, 撮影した画像ファイルを FTP 経由でサーバに転送可能である。これによりロボット本体に処理負荷をかけることなく, 移動先で撮像を行うことができる。

^{*21} 実際には画像の端で LED が発見された場合には計測精度が低下するため, 一律に平均を求めるのが精度向上に繋がるとは限らない。

カメラの校正

局所的計測用カメラシステムの内部パラメータ構成には大域的計測と同様に図 3.129(左) に示したキャリブレーションボードを使用した。また外部パラメータはコンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)の座標系において精確に把握する必要がある。そこで図 3.133(左) に示すような専用校正装置を用意し、図 3.133(右) に示すように、マニピュレーション機構の連結ピンを専用校正装置に挿入した状態で、校正装置との相対的なカメラ姿勢を求めることによって校正を実施した。図 3.134 に校正に用いた画像を示す。



(A) 局所的計測カメラ専用校正装置

(B) 校正装置にコンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)が接続

図 3.133 外部パラメータ校正用装置(左)と外部パラメータ校正時のセッティング(右)



図 3.134 局所的計測用カメラシステムの外部パラメータ推定に用いた画像

データ処理部の構築

局所的計測におけるデータ処理は、カメラが1台という点を除き概ね大域的計測と同様である。ただし、カメラ固有のサンプリングレートの安定性、自動ホワイトバランスの設定に応じて、フィルタの閾値を調整する必要がある。

3.6.4 基本性能実験1：大域的計測における位置計測実験

コンテナ模擬ベンチ (図 3.132) を用いて計測を行った。同一点の計測における高い再現性が確認されたため、コンテナの設置位置による精度への影響を確認する試験 (各計測点での N 数は 1) を行った。また、計測誤差として計測された LED 位置と真位置の水平誤差の最大値を採用した。模擬ベンチを図 3.135 に示す 16 点に設置して計測を行った。ここで 16 点の中心が部屋の中に該当する。表 3.24 に示す結果より大域的計測の最大誤差が 67[mm] であることが確認された。これは局所的計測のためロボットが対象に接近するために十分な精度であると言える。

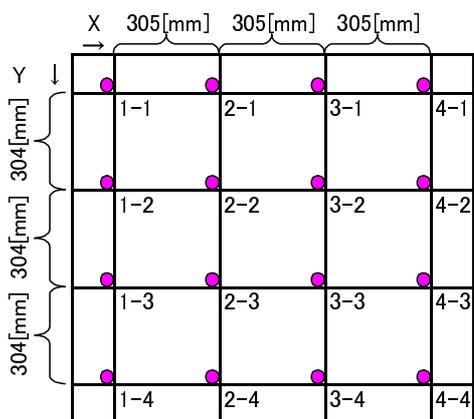


表 3.24 大域的計測の結果 (水平誤差)

Y \ X	1	2	3	4
1	12	14	19	67
2	15	18	11	42
3	19	12	18	26
4	6	24	15	16

単位: mm

図 3.135 大域的計測実験の計測点

3.6.5 基本性能実験2：局所的計測における位置計測実験

模擬ベンチを図 3.136 に示す 9 点に設置して計測を行った。ここで”2-2” がカメラ中心に該当する。^{*22} 表 3.25 に示す結果より局所的計測の最大誤差が 7.3[mm] であることが確認された。これは目標精度 ±10[mm] を満たしており、十分な精度を有していると言える。

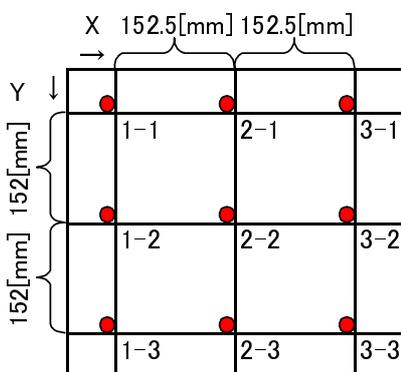


表 3.25 局所的計測の結果 (水平誤差)

Y \ X	1	2	3
1	7.3	7.2	5.3
2	4.7	5.7	3.3
3	3.8	5.2	4.0

単位: mm

図 3.136 局所的計測実験の計測点

^{*22} 本実験は無線 LAN カメラ単体で行っている。コンテナ運搬ロボットではマニピュレーション機構が視界に入るため、カメラ画像中心では計測が出来ない。

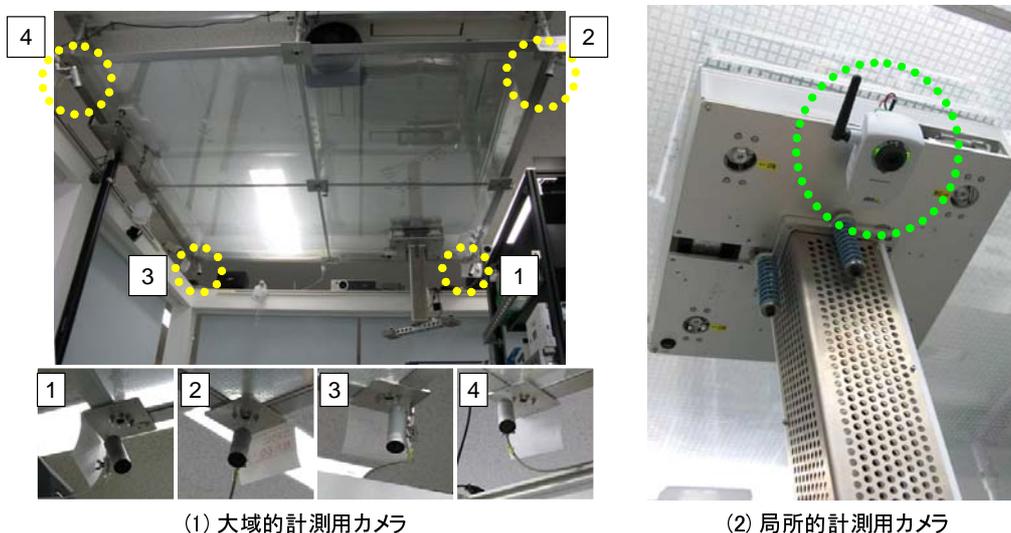
3.6.6 コンテナ位置認識システムのまとめ

本節では家庭用コンテナケース位置把握のための光学計測システムを開発し、試験によりシステムがロボットによる運搬準備に必要な精度を有していることを確認した。

本システムの特徴は、コンテナ位置計測を2つのフェーズに分類し、最初のコンテナの発見及び大域的計測においては、環境中に散在させた固定のIEEE1394カメラで処理を行い、続く2つめのフェーズである局所的計測においてはコンテナ運搬ロボットに無線LANカメラを搭載し、その移動カメラにてロボットとの精確な相対位置を計測している点にある。

コンテナ位置認識システムのスナップショット

コンテナ位置認識システムの概観を図3.137に示す。



(1) 大域的計測用カメラ

(2) 局所的計測用カメラ

図 3.137 コンテナ位置認識システムのスナップショット

仕様一覧

コンテナ位置認識システムの仕様一覧を表 3.26 に示す。

表 3.26 コンテナ位置認識システムの仕様一覧

(A) コンテナ位置認識システム全体仕様

計測方式	2フェーズ方式 (1)環境中に散在させた固定カメラ(iSight)による大域的計測 (2)ロボット上に搭載する移動カメラ(Axis207W)による局所的計測
精度	大域的計測: 誤差最悪値 67[mm] 局所的計測: 誤差最悪値 7.3[mm]
処理時間	大域的計測: 約1分半 ※4台のカメラを処理した場合 局所的計測: 約1分
耐環境性	日照及び照明の変化に因らず認識・計測が可能。

(B1) 大域的計測用カメラ “iSight” の仕様

(B2) 局所的計測用カメラ “Axis207W” の仕様

メーカー	(株)アップル	メーカー	アクシスコミュニケーションズ(株)
センサ	1/4 " CCD Image Sensor	センサ	1/4 " CMOS Image Sensor
解像度	640 * 480 (VGA)	解像度	640 * 480 (VGA)
フォーカス	Auto Focus (50mm~∞)	フォーカス	Manual Focus (500mm~∞)
フレームレート	MAX 30(fps)	フレームレート	MAX 30(fps)
通信	IEEE1394	通信	Ethernet, WiFi
		プロトコル	HTTP,FTP等に対応

クロージャ、コンプライアンス技術の適用箇所

- Geometric object closure
 - － 本装置では物理的な操作は行っていないため該当項目なし。
- 戦略的コンプライアンス
 - － コンテナの位置の認識・計測を2つのフェーズに分割し、各々のレンジを得意とする装置構成で要求性能を実現した。
 - ⇒ 設定の異なる装置の協調可能な環境整備という意味で、“役割の規格化”に該当する。^{*23}
- 機械的コンプライアンス
 - － 本装置では物理的な操作は行っていないため該当項目なし。

^{*23} i コンテナの LED 点滅マーカは 3.2 節で述べたように”補助・強化”である。

3.7 i コンテナ用多機能ドック (iDock)

本節では家庭内物流支援ロボットシステムにおいて物理的・情動的な中継点（ハブ）となる存在である iDock について述べる。なお前述したように iDock の実現に関しては勝代の論文 [83] にて詳細を述べているため、本論文では iDock の概要のみを述べる。

3.7.1 システム設計（要求機能の整理）

家庭内物流支援ロボットシステムにおける iDock の位置付けを図 3.138 に示す。図 3.138(左) に示すような住宅（マンション）の間取りにおいて家庭内物流支援ロボットシステムを実現すると、図 3.138(右) のようなコンテナフローのネットワークが必要となる、ここで iDock は i コンテナの流れの中継を行う存在となる。

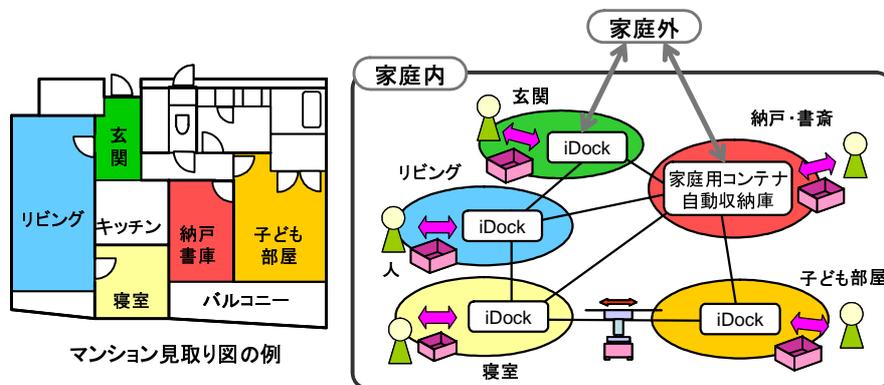


図 3.138 家庭内物流支援ロボットシステムにおける iDock の役割

円滑なコンテナフローの中継を行うためには、次のような機能が必要となる。

- i コンテナバッファリング機能
人が iDock と i コンテナのやり取りするタイミング及び速度とロボット動作のタイミング・速度には必ずギャップが生じてしまう。そこで iDock は複数の i コンテナを一時的に保管することにより、これらのギャップを埋めることが可能となる。
- i コンテナ積載物情報読み取り・伝達機能
ユーザが i コンテナの収納場所を指定しない場合、システムはコンテナの行き先を搭載物より決定する必要がある。そこでコンテナの搭載物情報は実際に運搬作業を開始する事前情報として必須であるため、中継地点である iDock を通過する場合にはその情報が最新の情報に更新されることが好ましい。
- コンテナ運搬ロボット把持・運搬支援機能
iDock とコンテナ運搬ロボット間におけるコンテナの受渡しは、机やサイドボードなどに自由に設置されたコンテナと比較してスムーズに実施されるべきである。

3.7.2 iDock の概要

上記の機能を実現する iDock の概要を図 3.139 に、実現した iDock の概観を図 3.140 に示す。

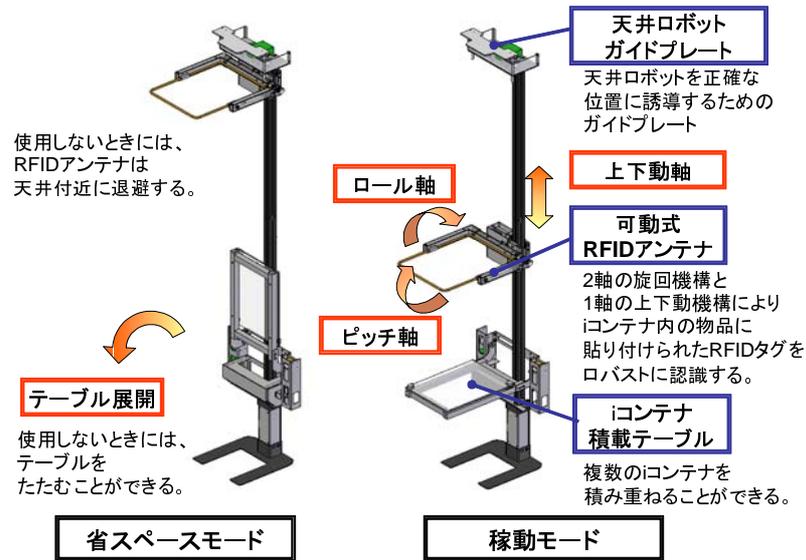


図 3.139 iDock の概要

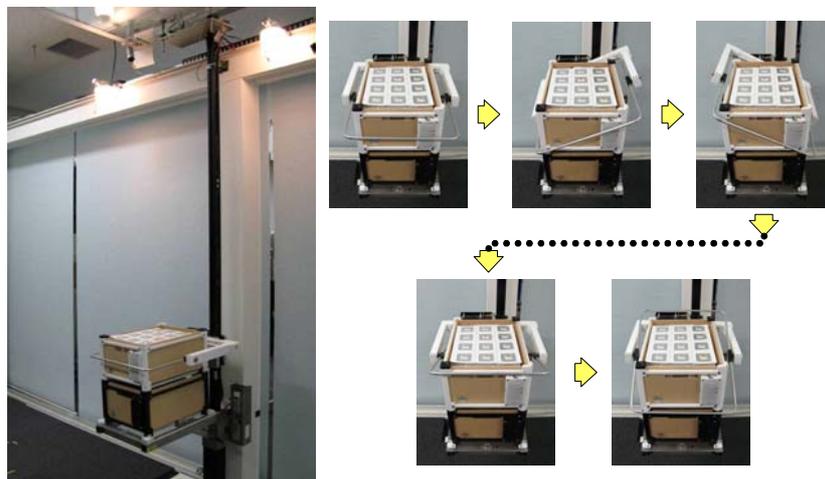


図 3.140 iDock のスナップショット (左), 稼動アンテナの動作の様子 (右)

iDock の特徴

実現した iDock の特徴は次の通りである。

- 折りたたみテーブル
必要に応じてテーブルを展開し、人・ロボットがコンテナを一時保管する場所を提供する。
→ テーブルには最大で 3 個のコンテナを積層可能である。

- 可動 RFID アンテナ
コンテナを覆う RFID を上下及びロール・ピッチに旋回させることでコンテナに搭載された RFID タグの位置・向きに因らずロボストに読み取りを行うことが出来る。
→ この稼動 RFID アンテナは省スペースモード時には人によるコンテナへのアクセスを阻害しないように、天井付近に退避する。
- コンテナ位置決めガイド、天井ロボットガイドプレート
テーブルには人がコンテナを設置する際に自然とコンテナの位置が規定されるようなガイドプレートが組み込まれており、また天井ロボットガイドプレートにコンテナ運搬ロボットが連結することにより、容易にコンテナとの相対位置決めを行うことが可能となっている。

仕様一覧

iDock の仕様を表 3.27 に整理する。

表 3.27 iDock の仕様一覧

項目	仕様
サイズ（テーブル展開時）	590[mm](※1)×460[mm]×2300[mm](※2)
一時保管コンテナ数	3個
最大支持コンテナ重量	24[kg]
RFID アンテナ出力、サイズ	1 [W], 450[mm]×350[mm]
可動アンテナ昇降駆動方式	ワイヤ巻上げ
可動アンテナ昇降速度	200 [mm/s]
可動アンテナ最大傾斜	ピッチ: ±25 [deg], ロール: ±25 [deg]
可動アンテナ傾斜速度	ピッチ: 10 [deg/s], ロール: 8 [deg/s]
読み取り時間	60 [s/コンテナ]
コンテナ位置誘導方式	コンテナガイドブロック×4個

※1: テーブルを折り畳んだ時のテーブル部奥行きは150[mm]

※2: 本体高さは、各家庭の天井高さに合わせてボールの長さを変えることで調整可能

クロージャ、コンプライアンス技術の適用箇所

- Geometric object closure
 - コンテナ運搬ロボット側をメインとして実現されているため該当項目なし。
- 戦略的コンプライアンス
 - 人による iDock へのコンテナ設置作業時のコンテナ位置を規定するために、ガイドプレートを整備し、人によるコンテナ位置決めを誘導している。
⇒ 人による作業を機械的に誘導している点で戦略的コンプライアンスの”誘導”に該当する。
 - iDock を家庭内におけるコンテナフローの窓口として活用する。⇒ 人・コンテナ運搬ロボット間の中継役となる環境を整備しているという意味では”役割の規格化”と言える。
- 機械的コンプライアンス
 - 機械的コンプライアンスはコンテナ運搬ロボット側の実装されているため該当項目なし。

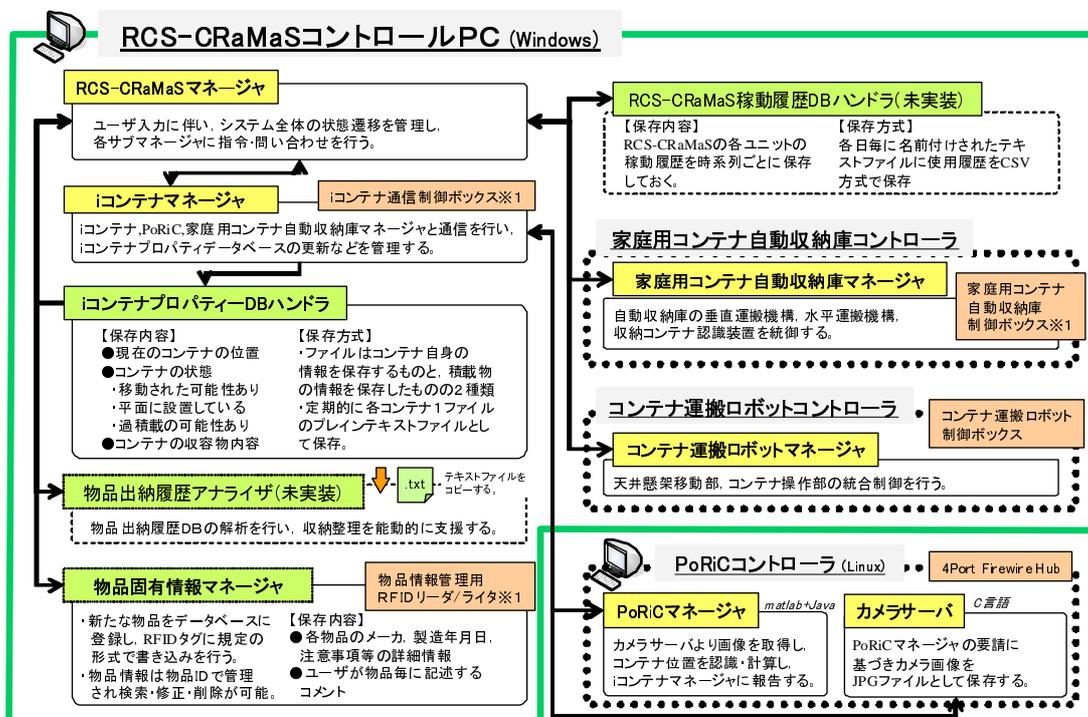
3.8 家庭内物流情報管理システム

本節では家庭内物流支援ロボットシステムにおける情報管理システムについて述べる。このサブシステムはi コンテナに積載された物品情報を収集し、それらを分析することにより物品の収納場所・形態の最適化、または廃棄時期の助言などを実現することを目的としている。本研究では上記のような支援を実現するために必要となるコンテナの積載物情報が収集可能なインフラストラクチャーの構築を行った。具体的な支援手法の確立に関しては今後の研究課題とする。

3.8.1 システム設計（要求仕様，機能の検討）

まず図 3.141 に家庭内物流情報管理システムの全体像を示す。システムの必要機能は次の通りである。

- i コンテナ (iDock) 通信機能
i コンテナ (iDock) と通信を行い、i コンテナの状態や積載物情報に関する通信を行う。
- i コンテナプロパティ情報管理機能
通信により取得された情報をもとに、i コンテナプロパティ情報データベースの更新を行い、必要に応じてユーザインタフェースの情報を更新する。
- 物品固有情報管理機能
現状では日用品に RFID タグは貼り付けられていないため、システムの稼動には物品情報を登録する機能が必要である。また物品の破棄・改修に伴うデータの修正・更新を行える必要がある。
- ユーザコマンド応答機能
i コンテナ、iDockそしてPCのGUIからのユーザコマンドに応答・処理する機能が必要となる。



※1: これらの制御ボックスは1つの筐体内に実装されている。

※RCS-CRaMaS: 家庭内物流支援ロボットシステムのこと。
※PoRiC: コンテナ位置認識システムのこと。

図 3.141 家庭内物流情報管理システムの概要

3.8.2 基本設計・細部設計（方式の選定と実装）

i コンテナ (iDock) 通信機能の実装

前述した様に i コンテナ及び iDock には i コンテナ通信制御ボックスと交信するために Bluetooth 無線機が搭載されている。この Bluetooth 無線機は通常、接続待ち受け状態になっておりコントロール PC からのコマンド受信待ち状態になっている。しかし i コンテナ上に設置されたインタフェースによりユーザからのコマンド入力があった場合、Bluetooth は通信制御ボックスとの交信状態へと移行する。そこで、通信制御ボックスでは図 3.142 に示すように i コンテナのプロパティ情報を更新するための循環通信の Bluetooth 無線機とユーザコマンド受信用の無線機の 2 つを用意し、定期通信と割り込み通信の両方を実現している。なお i コンテナの通信規格に関しては技術メモ「i コンテナ通信規格仕様書」[105]を参照すること。

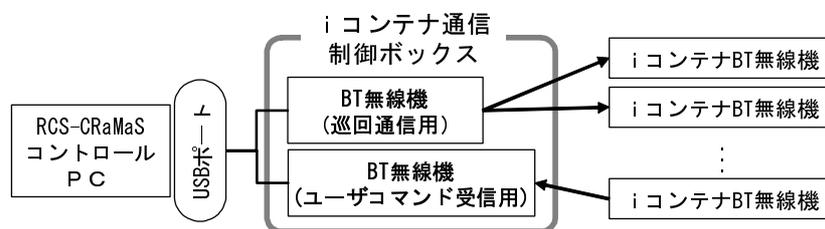


図 3.142 i コンテナ通信制御ボックスの機能ブロック図

i コンテナプロパティ情報管理機能の実装

i コンテナのプロパティ情報として次のような情報が管理される必要がある。

- 静的情報
 - コンテナ ID
 - コンテナ無線機 BluetoothID
- 動的情報 (非 Boolean)
 - コンテナラベル*1
 - コンテナカテゴリ (食品, 生活用品, 洋服, 書籍, 雑誌, CD, DVD など)*1
 - コンテナ設置場所 (コンテナ自動収納庫上, iDock 上, その他)*2*3
 - 自動収納庫及び iDock 上での詳細位置*3
 - 詳細位置, 姿勢 (その他に設置されている場合)*2
 - GUI 上での表示プロパティ (色など)*1
- 動的情報 (Boolean)
 - 内容物変化の可能性
 - 人間によって運搬されたか
 - 平坦な面に設置されているか
 - 過積載か
- コンテナ積載物情報
 - 搭載物品の物品 ID

これらのうち動的情報 (boolean) は i コンテナ (iDock) との通信によって取得する情報である。一方で動的情報 (非 Boolean) はユーザにより直接入力される (*1), もしくはコンテナ認識システム (*2), コンテナ自動収納庫や iDock (*3) との通信により更新する情報である。コンテナの搭載物情報は物品 ID によって管理され, 詳細な物品情報は次に示す物品固有情報管理機能から検索することにより取得する。



図 3.143 RCS-CRaMaS コントロール PC 用 GUI (メインウィンドウ)

ユーザは RCS-CRaMaS コントロール PC 上に表示される図 3.143 のような GUI(メイン Window) によって、これらの情報の確認及び修正が出来る。この GUI について簡単に説明する。左から (A) コンテナ設置情報表示パネル、(B) コンテナプロパティ情報表示パネル、(C) 物品固有情報表示パネルとなっている。コンテナ設置情報表示パネルではコンテナ自動収納庫の設置位置がグラフィカルに表示され、各コンテナのボックスをクリックすることによって、コンテナプロパティパネルに情報を表示させることが出来る。続いてコンテナプロパティ情報表示パネルではコンテナの動的プロパティ情報が確認出来、非 Boolean の情報に関してはこの画面にて更新が可能である。最後の物品プロパティ情報表示パネルでは物品固有の情報が表示・編集可能となっている。このように本来、部屋や収納庫中に散在しているコンテナ、物品を同一の GUI 上で確認出来ることは、物品の仮想可視化技術として非常に強力であり、従来の収納設備において問題であった、内容物の確認のために物品を取り出すといった無駄な労力を大幅に削減することが期待される。

物品固有情報管理機能の実装

本システムでは各物品について次の情報が管理される。

- 静的情報 (RFID に書き込まれる)
 - － 物品 ID
 - ⇒ 物品 ID は現状標準的な規格が定まっていないため、ここでは簡便的に 13 桁の JAN コードに各物品を識別するための固有コード 3 桁を付加した 16 桁のコードを採用している。
- 動的情報 (RFID に書き込まれる)
 - － 物品名
 - － 製造者
 - － 消費期限
 - － 製造年月日

- 使用上の注意
- 関連情報掲載 URL
- 動的情報 (RFID に書き込まれず、データベースのファイルに保存される)
 - アイコン画像の PATH
 - カテゴリ
 - コメント

これらの情報を初期登録作業において物品 RFID タグに書き込み、データベースに登録する必要がある。そこで図 3.144 に示すような物品固有情報登録・修正 GUI ウィンドウを用意した。物品登録時の基本的な使用法は次の通りである。

STEP1 バーコードリーダーにより物品のパッケージに印刷されたバーコードを読み込む (図 3.145 左)。

STEP2 類似物品がすでにデータベースに登録されているか検索・表示する。登録されている場合 STEP4 へ。

SPTE3 JAN コードデータベースを検索し、登録されている物品情報を取得する。

SPTE4 不足または修正する情報を手入力する。

SPTE5 物品に貼り付けた RFID タグに情報を書き込み (図 3.145 右)、データベースを更新する。

現状 JAN には製造年月日や賞味期限などの固有情報は含まれていない。そのため、個別の物品を登録を行うたびに、かなりの量の情報を手動で登録しなければならない。RFID タグをベースとして物品固有情報が管理される社会基盤の整備が早急に進むことを期待するが、まず本システムでは書籍、雑誌、CD、DVD など賞味期限の情報が欠如もしくは誤っていても致命的な問題を起こさない物品を対象としてシステムを稼動していくことが好ましいと考える。ちなみに登録されている物品を検索する場合には図 3.146 のような GUI を用いて検索を行うことが出来る。

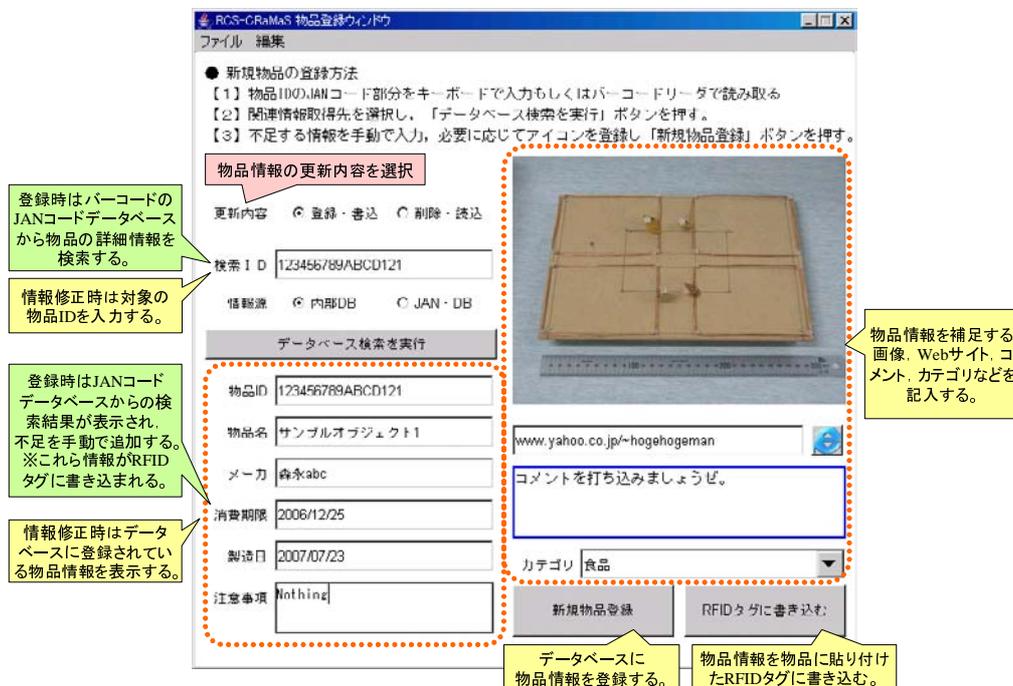


図 3.144 物品固有情報登録・修正 GUI ウィンドウ



図 3.145 物品登録作業：バーコードの読み取り(左)とRFIDタグへの情報の書き込み(右)

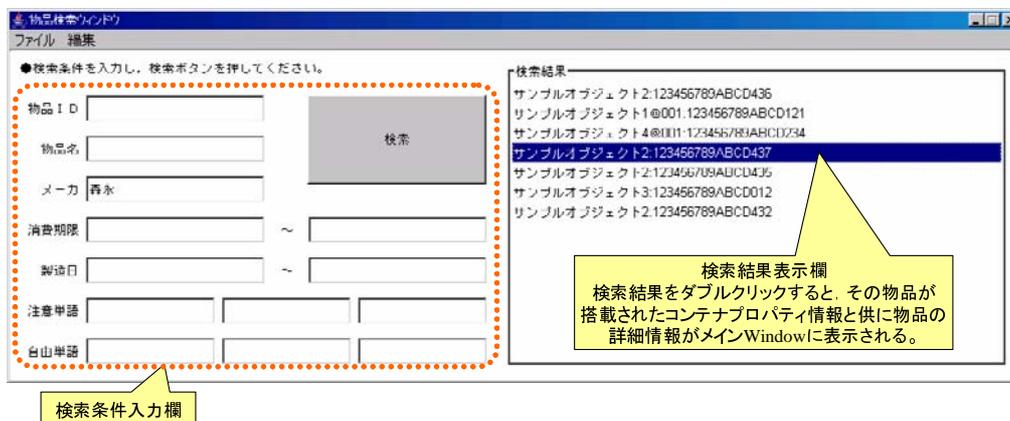


図 3.146 物品検索 GUI ウィンドウ

ユーザコマンド応答機能の実装

ユーザコマンドは i コンテナ (クラス S, A), iDock, またはコントロール PC の GUI を介して, システムに伝達される。コントロール PC は伝達されたコマンドを FIFO キューに一時保管し, 順次処理を行うようになっている。現在, システムへのリクエストは以下の 8 つが定義されている。

1. NO COMMAND : 通信状態確認用の空コマンド。
2. STORE REQUEST : 指定のコンテナをコンテナ自動収納庫に運搬・収納する。
3. CANCEL LAST TASK : 1 つ前のコマンドをキャンセルする。
4. CANCEL ALL TASK : コマンドバッファをクリアする。
5. AUTO FIX REQUEST : 全自動での収納作業を要請する。
6. RETRIEVE REQUEST : コンテナを棚から取り出し所定の位置へ運ぶ
7. REPLACE REQUEST : コンテナを棚内で移動させる
8. TRANSFER REQUEST : コンテナをある場所からある場所へ運ぶ

3.8.3 家庭内物流情報管理システムのまとめ

クロージャ, コンプライアンス技術の適用箇所

Geometric object closure 本サブシステムでは物理的な物体のハンドリングは行っていないので該当項目なし。

戦略的コンプライアンス 物品に貼り付ける RFID タグへの情報の書き込みは, ロボットの物体認識能力の補助・強化に該当する。

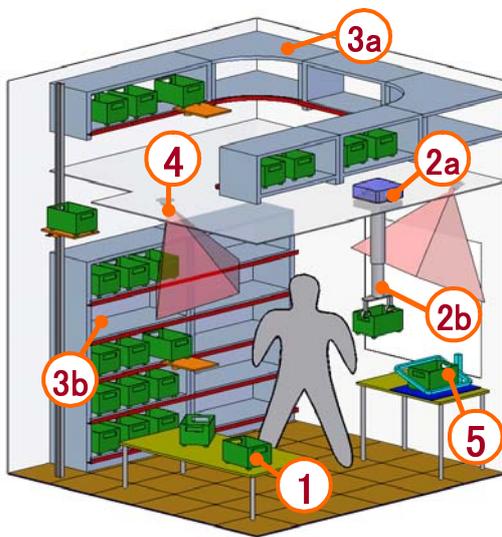
機械的コンプライアンス 本サブシステムでは物理的な物体のハンドリングは行っていないので該当項目なし。

3.9 サブシステムのまとめ

本章では家庭内物流支援ロボットシステムを構成する各要素についてシステム設計・基本設計・細部設計の検討を行い、サブシステムの構築を行った。

構築したサブシステムの概要

本章で構築したサブシステムを生活空間を模擬した実験設備に設置した様子を図 3.147 に示す。比較のため本システムのコンセプトスケッチも再掲する。



(1) インテリジェントコンテナ (iコンテナ)

- ・日用品のタグを読み取り、物品使用ログを取得する
- ・人およびロボットが運搬、収納作業し易い構造を持つ

(2) 天井移動型コンテナ運搬ロボット

- 天井懸架移動部: 生活環境を侵害せずコンテナを運搬可能。
- コンテナ操作部: 外乱に柔軟にコンテナの把持が可能。

(3) 家庭用コンテナ自動収納庫

- 天井裏収納庫: 長期収納する物品を保管する。
- 棚型収納庫: 日々使用する日用品を収納する。

(4) コンテナ位置認識システム

- ・コンテナの発見から詳細な位置計測まで網羅する。

(5) iコンテナ用多機能ドック (iDock)

- ・収納庫への日用物品の受け入れ口、コンテナに入っているモノの認識、重量の計測等を行う。

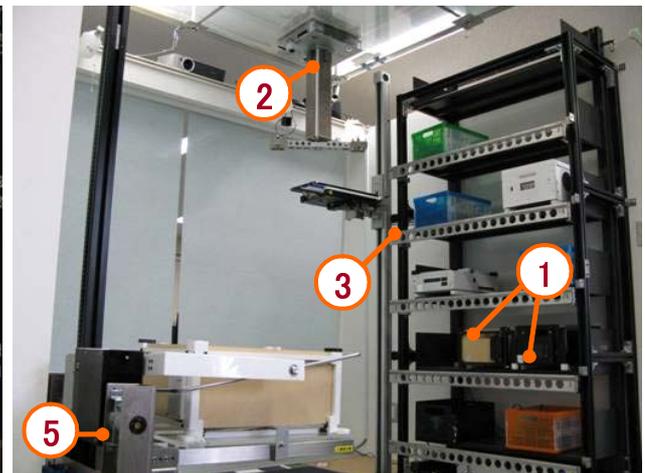
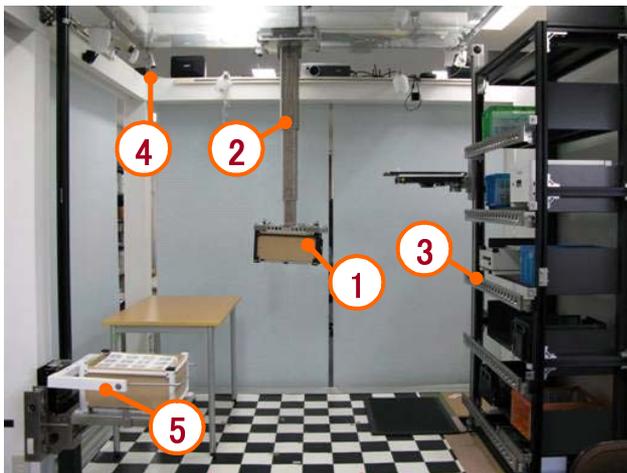


図 3.147 構築した家庭内物流支援ロボットのサブシステム群

家庭内物流支援ロボットシステムにおける主要3技術 (Geometric object closure, 戦略的コンプライアンス, 受動機械的コンプライアンス) の適応

家庭内物流支援ロボットシステムに導入された主要3技術の一覧を表3.28に示す。また主要3技術を可視化した様子を図3.148に示す。

表 3.28 家庭内物流支援ロボットシステムに導入された主要3技術の一覧

	戦略的コンプライアンス	受動機械的コンプライアンス	Geometric object closure
iコンテナ	<ul style="list-style-type: none"> ・iコンテナ自体: タスク・役割の規格化 ・構造・光学マーカ: 補助・強化 ・フラットスタンドバー: 誘導 	<ul style="list-style-type: none"> ・(連結ピン, テーパガイド) 	<ul style="list-style-type: none"> ・連結ピン挿入穴 ・コンテナ底面のフックプレート, フットR部, フラットスタンドバー
コンテナ運搬ロボット	<ul style="list-style-type: none"> ・天井懸架移動法: 領域・空間の規格化 ・2次元コードマトリクス: 補助・強化 	<ul style="list-style-type: none"> ・マニピュレーション機構の水平・傾斜コンプライアンス ・伸縮機構部の並進・回転コンプライアンス 	<ul style="list-style-type: none"> ・偏芯連結ピン
家庭用コンテナ自動収納庫	<ul style="list-style-type: none"> ・ガイドプレート, RFIDコンテナ認識装置による人の収納作業の誘導: 誘導, 役割の規格化 	なし	<ul style="list-style-type: none"> ・格段の棚: ガイドプレート ・水平運搬機構: フォークプレート, フックプレート, プッシュプレート
コンテナ位置認識システム	<ul style="list-style-type: none"> ・異なるレンジの計測を2種の装置により実現: 役割の規格化 	なし	なし

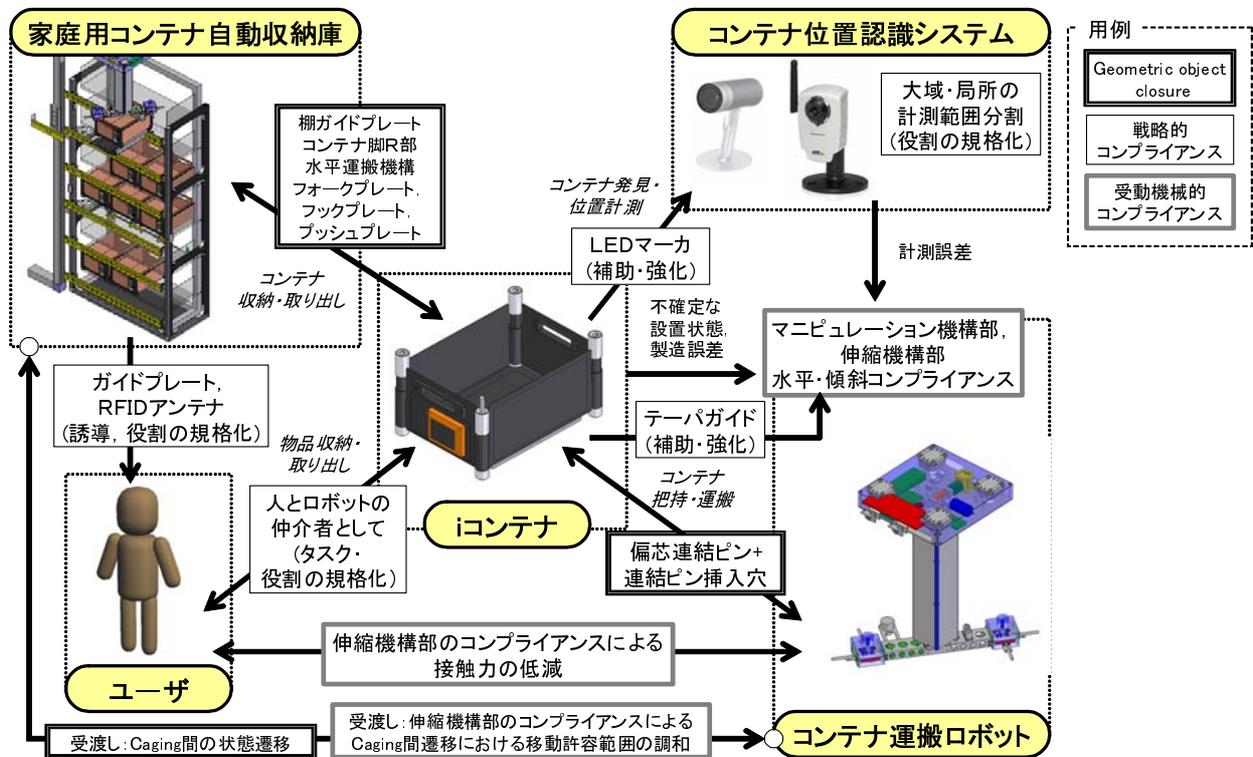


図 3.148 家庭内物流支援ロボットシステムに導入された主要3技術の可視化

本研究で構築したサブシステムと産業用途で用いられる物品搬送・収納システムとの比較

表 3.29 では、家庭内物流支援ロボットシステムの各サブシステムにおいて家庭用途であるからこそ要求され、また実装されている技術・機能を産業用途における物品搬送・収納システムと比較しながら示す。

表 3.29 産業用と家庭用における物品搬送・収納システムで用いられる技術・機能の比較

	産業用物品搬送・収納システム	家庭内物流支援ロボットシステム
コンテナ (iコンテナ)	<ul style="list-style-type: none"> ○基本的に一つのコンテナ内には同一の物品が収納されていることを想定しており、コンテナに貼り付けられたバーコード等によりコンテナと内容物の対応を取っている。 ○ガイド付きベルトコンベアなどでの搬送を想定しているため、ロボットがハンドリングしやすい構造は必ずしも必要ではない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○多品種少量の物品を収納し、分別可能なようRFID技術による物品情報が取得される仕組みを採用している。 ○人によって環境中の任意位置・姿勢に設置されることから、ハンドリングロボット側には高い操作能力が求められる。 ロボットの能力を補うため、ロボットが扱い易い構造をコンテナ側に実装している。
コンテナ 運搬ロボット	<ul style="list-style-type: none"> ○コンテナの受渡し場所、状態は常に固定であるので、ガイドプレートなどを用いて確実な繰り返し運搬動作が実現されるようになっている。 ○また運搬には他の装置との干渉が問題になる場合にはレール式の天井トrolley等が使用されるが、一般には床面を走行する自動搬送車両が広く使用されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ○複数の受動機械的コンプライアンスを融合し、生活環境中における環境変化やそれに基づく誤差を機械的に吸収する構造が採用されている。 ○また自由に設置されたコンテナを操作・運搬する必要性からロボットの移動方式として、永久磁石誘導型天井吸着法を採用しており、これにより一部の天井設備以外は任意の天井面を移動可能である。
コンテナ 自動収納庫	<ul style="list-style-type: none"> ○コンテナの収納効率及び入庫・出庫効率を優先するため、収納空間内及びスタッカークレーン動作範囲から人を排除している。 	<ul style="list-style-type: none"> ○生活空間を侵害しないこと、また居住者の安全を優先しているため、自由度分離型のコンテナハンドリング装置とし、動作速度も安全を考慮して低く設定している。
コンテナ位置 認識システム	<ul style="list-style-type: none"> ○ガイドや治具などを用いて位置決めするため、位置決め不良を検出するリミットスイッチ等以外には詳細な位置計測は行わない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○人が自由に設置したコンテナの位置を計測可能なよう、環境中に分散したカメラとロボット搭載のカメラを2種協調させて使用。 ○また環境変化に対応するためLEDマーカを用いロバストな計測を実現している。

第4章

家庭内物流支援ロボットシステムの統合

本章では前章までで構築したサブシステムを統合し、生活環境中で物品搬送・収納を行うシステムを構築する。まず家庭内物流支援ロボットシステムを稼働させる上で、ユーザから見てこのシステムを利用するに当たって実現が求められるシステムのモード及びタスクの整理を行う。続いてシステムタスクのうち、複数のサブシステムの連携が必要なものに関して統合手法の検討を行い、各タスクの性能を確認する試験を行う。

4.1 コンテナの物理的フローのためのシステムモード・タスクの整理

家庭内物流支援ロボットシステムではコンテナを利用した物品の物理的な流れと搭載された日用品の情報的な流れの両者を支援するシステムである。

これまで示したように本研究ではコンテナのハンドリングを中心とする物理的な流れの実現に注力しシステムの構築を行ってきた。よってここでは本システムにおける物理的なコンテナのフローに注目し、システムに必要なモードについて検討を行う。物理的なコンテナのフローに注目した場合、本システムでは大きく分けて次の5つのシステムモードが必要と考えられる。

1. i コンテナ収納モード
任意の生活空間 (iDock を含む) に設置された i コンテナを収納庫に移動・収納するモード。
2. i コンテナ取り出しモード
収納庫から i コンテナを取り出し指定の場所へ移動させるモード。
3. i コンテナ移動モード
任意の場所^{*1}から指定の場所へ i コンテナを移動させるモード。
4. i コンテナ収納位置変更モード
収納庫の中での i コンテナの設置位置を変更するモード。
5. i コンテナユーザ自己探索モード
ユーザ自らが i コンテナを探索するモード。

これらの5つのモードの状態遷移について図 4.1 に簡単に示す。ちなみに 3.1 節で検討したシステムの主機能とシステムモードは1対1には対応しない。それはユーザに必要なのはシステムの主機能がもたらす(出力する)結果であり、その結果の集合体がシステムモードとなってユーザへの支援を実現するからである。

*1 収納庫の場合は取り出しモードになる。

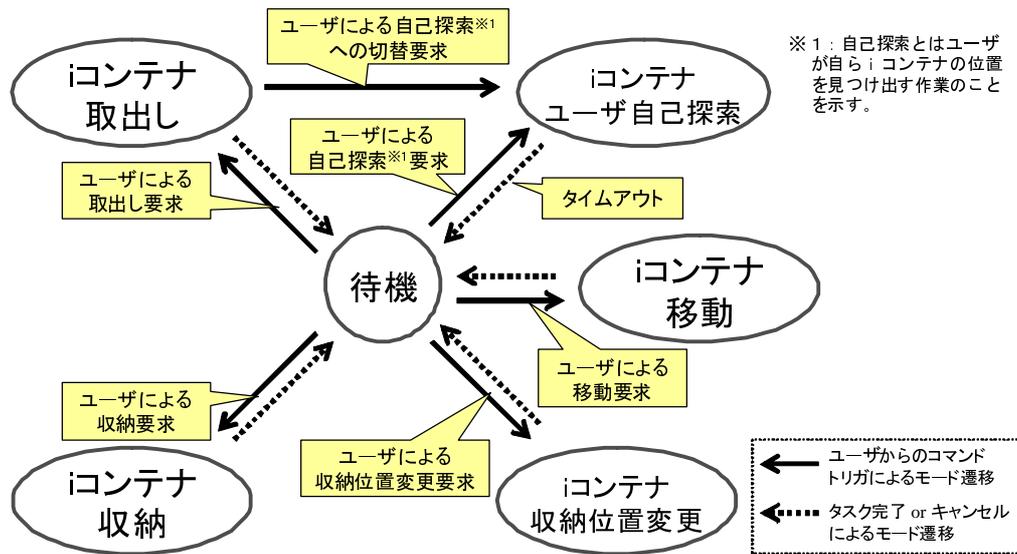


図 4.1 家庭内物流支援ロボットシステムにおけるシステムモードの状態遷移

続いて、これらのモードをタスクへと分解し、各タスクの実行に係わるサブシステムを整理する。表 4.1 にタスクへの分解結果を示す。上記のタスクへの分解により、本システムでは以下の7つのタスクを実現する必要がある。

1. コンテナ把持タスク
コンテナ位置認識システム、コンテナ運搬ロボット（天井懸架移動部、コンテナ操作部）を協調させてコンテナの把持を行うタスク。
2. コンテナ運搬タスク
コンテナ運搬ロボット（天井懸架移動部）によりコンテナを移動するタスク。
3. コンテナ受渡しタスク (A, B)
家庭用コンテナ自動収納庫とコンテナ運搬ロボットの間でコンテナの受渡しを行うタスク。
4. コンテナ収納タスク
家庭用コンテナ自動収納庫にコンテナを収納するタスク。
5. コンテナ取り出しタスク
家庭用コンテナ自動収納庫からコンテナを取り出すタスク。
6. コンテナ設置タスク
把持・運搬後のコンテナを任意の場所に設置するタスク。
7. コンテナ位置強調タスク
ユーザが探索中のコンテナの位置が分かるように LED 点滅を用いてコンテナの位置を強調するタスク

これらのタスクのうち、コンテナ運搬、収納、取り出し、設置、位置強調の5つのタスクは単独のサブシステムで実行可能であるため、これまでに行った基本性能試験でその性能の確認は出来ている。一方のコンテナ把持タスクとコンテナ受渡しタスクは2つ以上のサブシステムの協調が求められるタスクであり、各々の単独性能だけではない、組み合わせの性能が重要となるタスクである。また運搬タスクは把持タスクとの継続として実施されるタスクである、そこでここでは把持・運搬タスクとして整理する。

以降ではこの把持・運搬タスク及び受渡しタスクの実現について述べる。

モード名	タスクNO	タスク名	タスク実行サブシステム
iコンテナ収納モード	1	コンテナ把持タスク	コンテナ位置認識システム コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部) コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)
	2	コンテナ運搬タスク	コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)
	3	コンテナ受渡しタスク(A)	コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部) 家庭用コンテナ自動収納庫
	4	コンテナ収納タスク	家庭用コンテナ自動収納庫
iコンテナ取り出しモード	5	コンテナ取り出しタスク	家庭用コンテナ自動収納庫
	3	コンテナ受渡しタスク(B)	家庭用コンテナ自動収納庫 コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)
	2	コンテナ運搬タスク	コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)
	6	コンテナ設置タスク	コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)
iコンテナ移動モード	1	コンテナ把持タスク	コンテナ位置認識システム コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部) コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)
	2	コンテナ運搬タスク	コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)
	6	コンテナ設置タスク	コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)
iコンテナ収納位置変更モード	5	コンテナ取り出しタスク	家庭用コンテナ自動収納庫
	4	コンテナ収納タスク	家庭用コンテナ自動収納庫
iコンテナユーザ自己探索	7	コンテナ位置強調タスク	iコンテナ

表 4.1 システムモードのタスクへの分解

4.2 コンテナ把持・運搬タスクの実現（コンテナ運搬ロボットとコンテナ位置認識システムの接続）

本節ではコンテナ運搬ロボットとコンテナ位置認識システムを接続することによって、生活環境中に設置された i コンテナを把持・運搬するタスクの実現について述べる。

まずコンテナ把持・運搬タスクに求められる要求性能について整理を行い、続いて関連するサブシステムの基本性能について概要を示す。更に把持・運搬タスクを統括するコントローラ的设计を行い、最後に実験にて性能の確認を行う。

4.2.1 把持・運搬タスクの要求性能の整理

タスクの目的

本タスクにおいてはコンテナ位置認識システム，コンテナ運搬ロボット（天井懸架移動部，コンテナ操作部）を協調させ，ロバストにコンテナの把持・運搬を実現することを目的とする。

タスク実現に関連する技術

本タスクを実現するに当たって，各サブシステムにて実現された次のような要素技術を統合することが求められる。

- コンテナ運搬ロボット（天井懸架移動部）で実現される，永久磁石を利用して天井面を自由に動作し，また2次元コードを活用し精確に位置決めする技術（3.3節）。
- コンテナ位置認識システムで実現される，部屋内に設置されたコンテナを環境に散在させたカメラで発見しロボットが接近するのに必要な精度の位置計測（大域的計測）を行い，続いて移動ロボットに搭載した単眼カメラによってコンテナの詳細な位置を計測（局所的計測）する技術（3.6節）。
- コンテナ運搬ロボット（コンテナ操作部）で実現されている，コンテナの位置決め誤差を柔軟に吸収することの出来るマニピュレーション機構（3.4節，[106]）。

タスク実現におけるポリシー

これまで物体の操作を行うマニピュレーションの研究が多く行われてきた。物体のハンドリングとは外界との接触を意味しており，位置・力のハイブリッド制御 [68] や把持・操り [34] に関して非常に重要な基礎的知見が得られてきた。一方で産業用途で用いられているマニピュレータを見ると，RCC(Remote Center Compliance)[54] やエアシリンダ等を活用した柔らかい操作が活躍している。またロボット研究においても Yun らによりロボットの学習における機械的柔らかさの重要性も指摘されている [58]。

そこで本タスクの実現では，複雑な計測や制御がなくてもコンテナのハンドリングが可能な “柔軟なスキーム” を構築することを目指す。その実現手段として，一般には外界とのマニピュレーションにおいては必須と考えられるフィードバック制御（図 4.2 上）には頼らずに，図 4.2(下) に示すように機械的な柔らかさ（コンプライアンス）で，外界との接触をスムーズに実現することが狙いである。

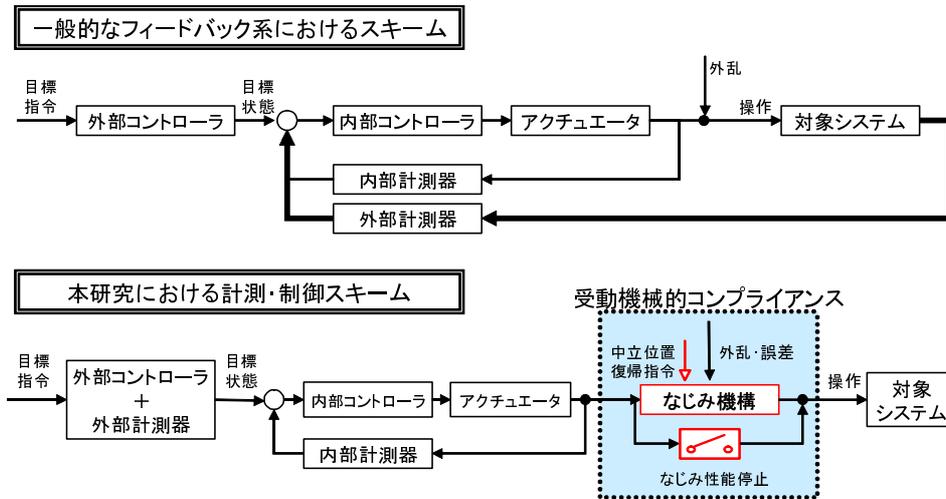


図 4.2 一般的なフィードバック制御スキームと本研究が採用するタスク実現スキームとの違い

4.2.2 コンテナ把持・運搬タスクに関連するサブシステムの整理

本章ではまずコンテナケース把持・運搬タスクを実現するシステムの構成について述べ、続いて各サブシステムについて 3 章の情報を要約して示す。

コンテナ把持・運搬タスクのシステム構成

図 4.3 にシステム構成の概要を示す。コンテナ把持・運搬タスクコントローラはコンテナ位置認識システムより、運搬対象コンテナの位置を取得し、コンテナ運搬ロボットの天井懸架移動部によって、コンテナハンドリングまでの移動及び輸送を行う、そして同ロボットのコンテナ操作部によって実際のコンテナのハンドリングを行う。以降では、各構成要素の概要について述べる。

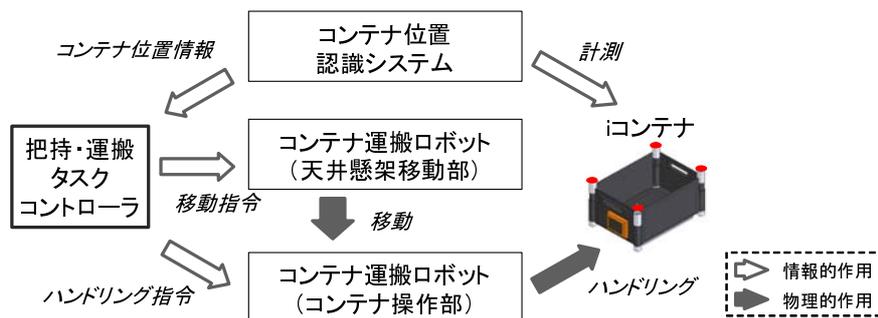


図 4.3 コンテナ把持・運搬タスクを実現するシステム構成

コンテナ位置認識システムの概要と性能

図 4.4 にコンテナ位置認識システムの構成概要を示す。このシステムでは部屋中に分散配置される低価格な IEEE1394 カメラ、コンテナ運搬ロボットに搭載される無線 LAN カメラ、そして i コンテナ上の LED マーカによって認識が実現される。分散配置カメラでは部屋の中からコンテナを発見し凡その位

置を計測する「大域的計測」が実現され、ロボット搭載のカメラによりコンテナのハンドリングに必要な詳細位置・姿勢を計測する「局所的計測」が実現される。マーカとして周期的(7.5[Hz])に点滅するLEDを用いているため、部屋の照明などによらずロボストに位置を計測出来る。大域的計測では最大水平位置誤差67[mm]の精度で位置の把握が可能である。一方、局所的計測では最大水平位置誤差7.3[mm]で詳細な位置の計測が可能である。なお局所的計測では専用の校正治具を用いているため、コンテナ運搬ロボットの座標系における位置情報を取得出来る。

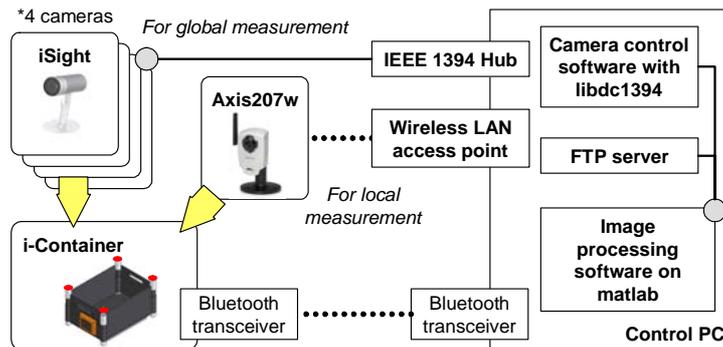


図 4.4 コンテナ位置認識システムの概要

天井懸架移動部の概要と性能

図 4.5 に天井移動型コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)の概要を示す。天井懸架移動部では図 4.5(左下)に示すように永久磁石誘導型天井吸着法[81]を用いている。この方式は天井面を強力な永久磁石で挟み込み、上面の磁石をホイール型の移動ロボットによって牽引することによって、天井面下でのアクチュエーションロボットの自由な移動を実現可能である。

また動作天井面に図 4.5(右下)のように2次元コード(QRコード)を敷き詰めて2次元コードマトリクスを構成し、天井上面の移動ロボット図 4.5(右上)に搭載されたコードリーダーにより自己位置の推定が可能である。永久磁石誘導型天井吸着法による天井下面のロボットの牽引誤差は動的なものでも1[mm]以下であり、静的な位置決め誤差はサブミリオーダーと考えられる。また2次元コードマトリクスによる位置計測精度は標準偏差で距離0.33[mm]、方向0.30[deg]以下である。

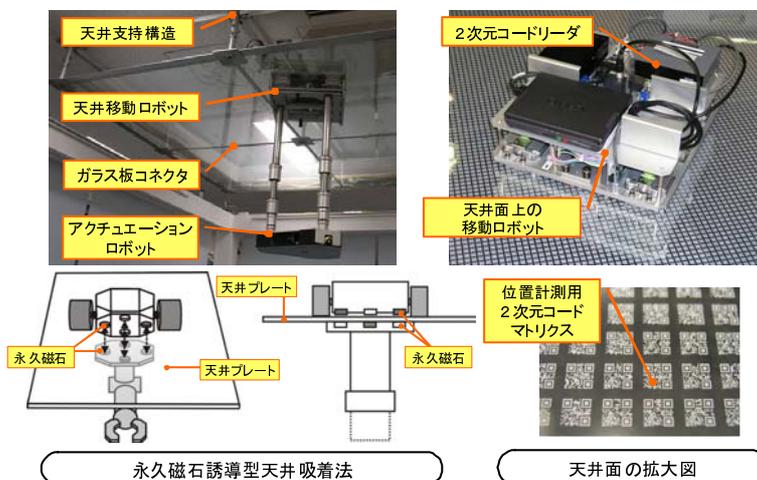


図 4.5 コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)の概要

コンテナ操作部の概要と性能

図 4.6 に天井移動型コンテナロボット（コンテナ操作部）の概要を示す。コンテナ操作部は天井面からコンテナへの上下アクセスを担う伸縮機構部・巻き上げ機構部とコンテナの把持を担うマニピュレーション機構部から構成される。図 4.8 にマニピュレーション機構部の概要を示す。本マニピュレーション機構部の特徴は次の通りである。(1) コンテナの把持に偏芯連結ピンを用いることにより、ピンをコンテナの連結穴に挿入するだけでロバストな把持動作が可能である。(2) 2軸のスライダと引張りバネを用いた構造により連結ピンが水平に柔軟に動く水平コンプライアンス要素を有する。(3) 把持対象のコンテナの傾斜を吸収可能なように筐体中央部に2軸の回転ジョイントにより実現された傾斜コンプライアンス要素を有する。(4) 各コンプライアンス要素は荷重負荷時にオフまたは柔軟性が低下するようになっている。

上記の特徴により把持対象のコンテナの水平 $\pm 10[\text{mm}]$ の位置誤差、 $10[\text{deg}]$ の傾斜誤差を吸収して把持動作を行うことが可能となっている。伸縮機構部は図 4.7 に示すタケノコ型伸縮機構を用いている。この方式ではスチールベルトの巻き上げにより昇降動作を実現し、回転・ねじれを防止するためにスチールベルトの周囲を樹脂レールと板金アングルで実現したスライダで覆っている。

このスライダは無負荷時はねじれ等を拘束しているが、人が接触した時など外力が加わった場合には柔軟に変形する構造となっており、安全が確保されている。この伸縮機構部のスチールベルトが DC モータとギアボックスを介して駆動されるプリーによって巻き上げられ、昇降動作が実現されている。

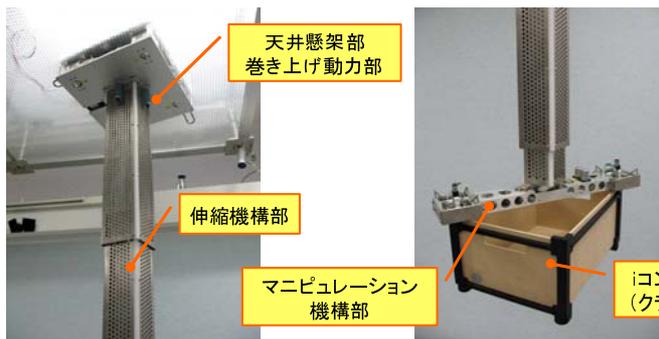


図 4.6 コンテナ運搬ロボット（コンテナ操作部）の概要

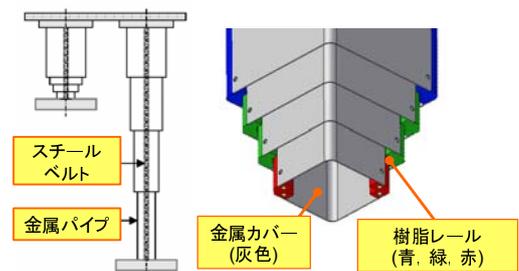


図 4.7 伸縮機構部の概要

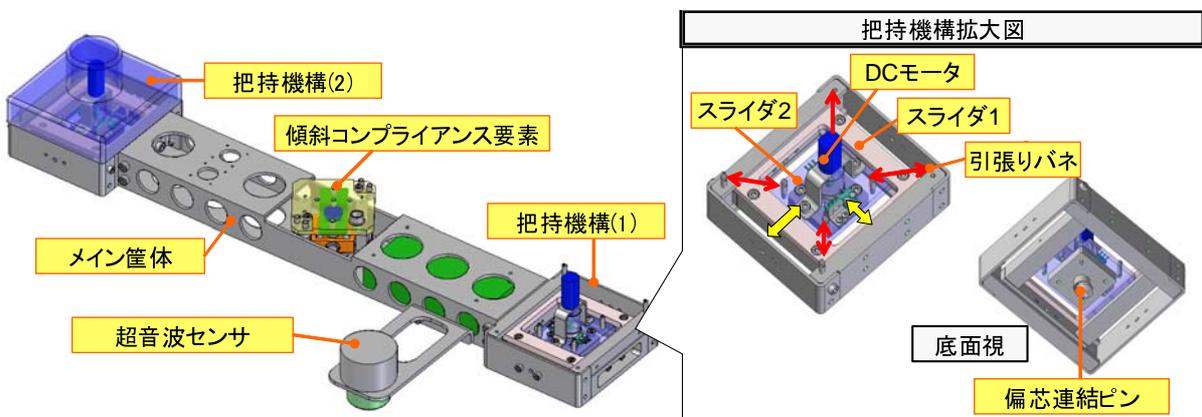


図 4.8 マニピュレーション機構部の概要

4.2.3 コンテナ把持・運搬タスクコントローラの設計

本章では、まずコンテナケース運搬作業の流れの整理を行い、把持タスクを実現するコントローラにおける設計項目を整理する。続いて各設計項目についての詳細な検討を示す。

コンテナケース把持・運搬作業の流れ

まず図 4.9 にコンテナ把持・運搬作業の流れを示す。コンテナ運搬作業の流れに示すとおり、本制御フローの特徴はコンテナ位置の”計測”とコンテナ把持の”制御”を完全に独立に行っているところにある。つまり、コンテナの把持動作実行時はマニピュレーション機構の高さ制御以外の制御フィードバックは行っていない。

本タスクフローにおいては、運搬性能に関連する以下の設計検討項目が存在する。

- コンテナの局所的計測実行ポイント
- コンテナ把持時のロボット位置決め許容誤差
- コンテナ把持時のロボット位置決めルーチン

以降では各項目について検討を行う。

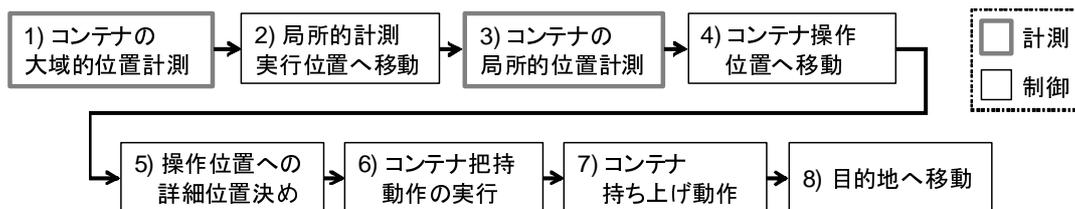


図 4.9 コンテナ把持・運搬タスクの流れ

コンテナの局所的計測実行ポイントの検討

コンテナの局所的計測は運搬ロボットに搭載された単眼カメラによって実行される。カメラで取得される画像のサンプルを図 4.10 に示す。図 4.10 を見ると分かるように、運搬ロボットは自身のマニピュレーション機構部がカメラ視野内に入り込んでしまうため、カメラ中心にコンテナが位置するように撮像することが出来ない。そこでカメラの中心より若干ずれた位置で撮像をすることになるが、この位置を決める際には次のことを検討しなければならない。

- 大域的計測誤差があっても、コンテナ LED マーカがマニピュレーション機構と重なってしまわない十分なオフセットが必要である。
- オフセットが大きいと撮像位置から把持位置までの距離が大きくなり、計測誤差が大きくなる。

後者に関して、例えばコンテナ中心までのオフセットが 500[mm] のとき、2 次元コードによる自己姿勢に 0.3[deg] の誤差があったとすると、約 2.6[mm] の誤差が発生することになる。局所的計測の水平最大誤差は 7.3[mm] のため、この二つの誤差をあわせると 9.9[mm] となってしまう、天井懸架移動部の位置決め許容誤差などが十分取れなくなってしまう。

本研究では大域的計測誤差の最悪値である 67[mm] を考慮して、X 方向オフセット 175[mm]、Y 方向オフセット 200[mm] と設定した。

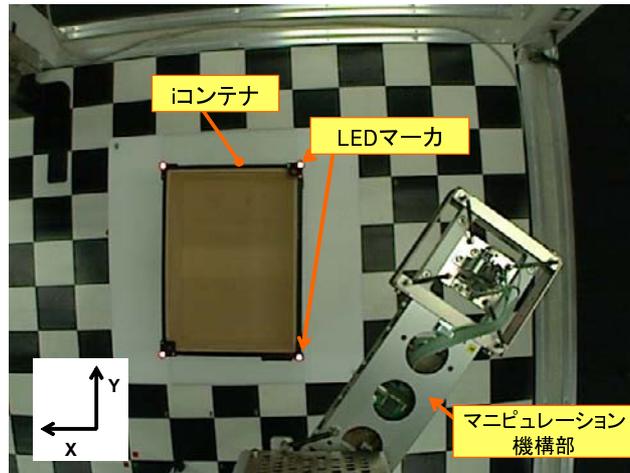


図 4.10 コンテナの局所的な位置計測実行時のカメラ画像

コンテナ把持時のロボット位置決め許容誤差の検討

コンテナの把持を行う準備として詳細位置決め許容誤差の検討を行う。本許容誤差を検討する際には次の項目を考慮する必要がある。

- コンテナの局所的な位置計測誤差も踏まえた十分な精度の位置決めを行わなければならない。
- 2次元コードによる位置計測の偏差及び移動部の位置決め性能に見合う許容値を設定する必要がある。

後者の条件に適合しない厳しい許容誤差を設定すると位置決めルーチンの収束性が悪くなり、タスク実行に必要な時間が長くなる（終了しない）可能性がある。

まず向きの位置決め誤差であるが、繰り返しになるが2次元コードによる位置計測の標準偏差は距離 0.33[mm]，方向 0.30[deg] 以下であるため、最終的な向きの位置決め誤差は若干の余裕を持たせた 0.20[deg] と設定した。

一方の位置決め距離誤差余裕は前節のオフセット距離と角度計測誤差より次式で計算される。

$$Allow = D_{hor} - (\sqrt{X_{offset}^2 + Y_{offset}^2}) \times (Err_{2D-direct}/180) * \pi + Err_{Local} \quad (4.1)$$

$$= 10 - (\sqrt{175^2 + 200^2}) \times (0.3/180) * \pi + 7.3 = 1.3[mm] \quad (4.2)$$

ここで $Allow$ は許容位置決め誤差， D_{hor} は水平コンプライアンス要素の最大誤差吸収性能， X_{offset}, Y_{offset} は局所的な位置計測を実施する際のロボットとコンテナとの位置オフセット， $Err_{2D-direct}$ は2次元コードによる位置計測の向き標準偏差， Err_{Local} は局所的な位置計測の最大水平誤差である。本計算では全体として最悪値で計算をしているため安全側である一方、必要以上に厳しい設定値になってしまう。そこで実装では余裕をみて位置決め距離誤差は 1.5[mm] と設定した。

コンテナ把持時のロボット位置決めルーチンの検討

前節で設定した位置決め許容誤差の距離 1.5[mm]，向き 0.20[deg] という値は非ホロノミックな拘束 [107, 108, 109] の中で動作するホイール移動型のロボットにとっては非常に厳しい値である。天井懸架移動部は2輪対向型の移動機構を採用しているため Pivot ターンが可能であるが、ホイール幅が広いた

め Pivot ターン実行時に中心位置がずれてしまうという問題は回避できない。そこで詳細位置決め時の Pivot ターンでの旋回角度を可能な限り小さくするために、以下の位置決めルーチンを採用した。

- STEP1 旋回角 θ が 15[deg] 以下になるまで後退する。
 STEP2 Pivot ターンを行い、目標位置への方向誤差が 0.4[deg] 以内となるよう旋回する。
 STEP3 前進位置決めを行う。位置決め精度が 1.5[mm] 以上の場合 STEP1 へ戻る。
 STEP4 目標向きとの位置決め誤差が 0.2[deg] 以内に収まるよう Pivot ターンを行う。

図 4.11 に上記の位置決めルーチンの様子を模式図で示す。

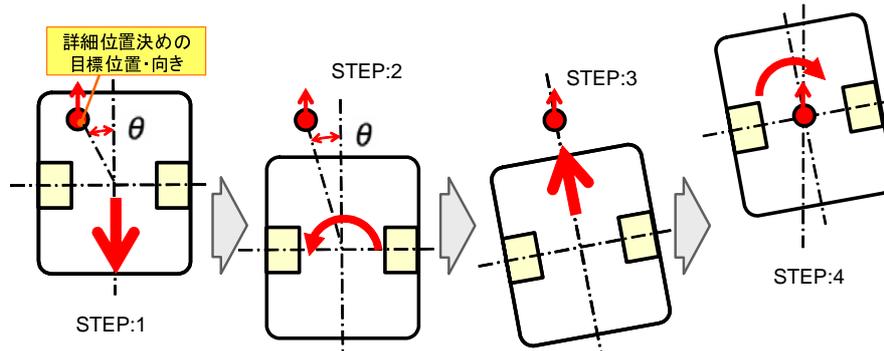


図 4.11 コンテナ把持時のロボット位置決めルーチン

4.2.4 コンテナ把持・運搬タスクの性能検証項目の検討

コンテナ把持・運搬性能を確認するためには次の実験が必要となる。

- コンテナ把持動作ロバスト性試験 (1. 水平誤差発生時)
 本試験ではコンテナの凡その位置を把握する大域的計測において誤差が含まれていた場合でも、局所的計測によってコンテナ運搬ロボットとコンテナの相対位置を精確に計測し、コンテナ把持動作を実行可能かどうかを確認する。
- コンテナ把持動作ロバスト性試験 (2. 傾斜誤差発生時)
 本試験では、コンテナが障害物の上に設置され傾斜している場合にもロバストに局所的計測を実施し、把持動作が実行可能かどうかを確認する。
- コンプライアンス要素影響評価試験
 本実験では、コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) でコンプライアンス性能を有する 2 つの機構部 (マニピュレーション機構部、伸縮機構部) が、各々どのように性能を発揮しているかを把握することで、複数のコンプライアンス要素が融合可能かどうかを確認する。

各実験について次節以降で詳細を述べる。

4.2.5 コンテナ把持動作ロバスト性試験 (1. 水平誤差発生時)

実験の目的

前述したようにコンテナの搬送作業のうちコンテナの設置は比較的容易に出来るため、コンテナの把持に注力して試験を行った。よって本試験では、コンテナの凡その位置を計測する大域的計測においてさまざまな位置誤差が発生した状況を再現し、ロボットとコンテナの相対位置を精確に計測する局所的計測からタスクを開始し、ロボットの把持動作の実行（連結ピン挿入）まで行う^{*2}。

これにより、本研究で構築してきた各システム要素を統合することによるロバストなコンテナ把持・運搬の実現性を示すことを目的とする。

実験の設定

実験では図 4.12 に示す試験用テーブルと i コンテナを用いた。

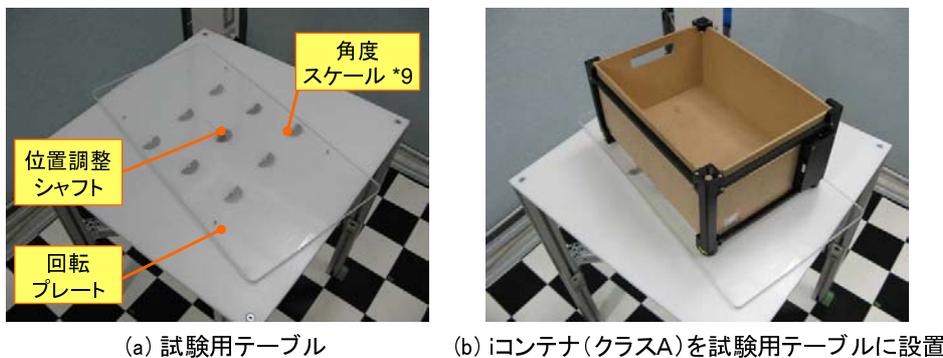


図 4.12 試験用テーブルと i コンテナ (クラス A)

試験項目は次の通りである。

設置パターン (位置) 図 4.13 に示す 9 通り。

設置パターン (向き) 各 3 通り (-15, 0, 15[deg])

試行数 各パターン 3 回

^{*2} 実際にはコンテナ操作部のコンプライアンス性能は詳細に把握されているので、局所的計測の結果が精確であれば、把持動作を実施する必要は必ずしもない。

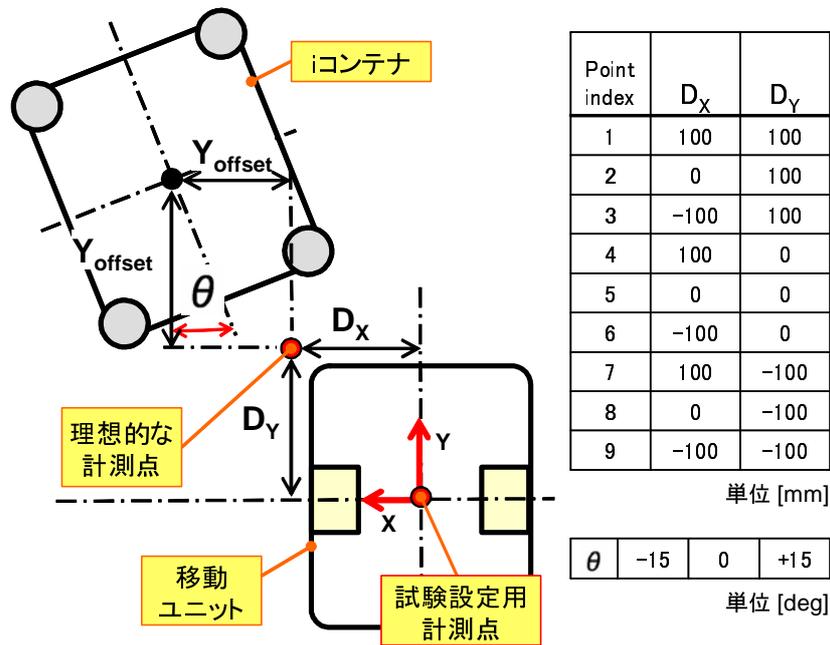


図 4.13 試験実施時のコンテナ運搬ロボットと i コンテナの位置関係

実験は以下の手順にて実施した。

1. 試験設定用計測点へラフ位置決めモードで移動
2. i コンテナの LED を点滅させ、コンテナ局所的な位置計測を実行
3. 把持位置へ詳細位置決めモードで移動
4. コンテナ把持動作を実行 (ピン挿入まで)

実験結果と考察

実験の様子を図 4.14 に、実験の結果を表 4.2 に示す。全体として非常にロバストな把持性能を有していることが確認された。一方で図 4.15 に示すように、局所的な位置計測時にコンテナと運搬ロボットとの距離 (L) が離れているほど、コンテナ運搬ロボットの自己位置推定誤差 (θ) の影響が大きくなり、失敗する可能性が高くなっていることが確認されている。

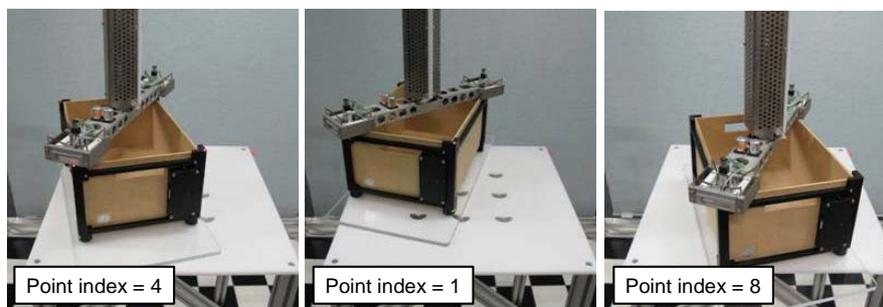


図 4.14 水平誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の様子

表 4.2 水平誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の結果

Point index	旋回角度					
	-15 [deg]		0 [deg]		15 [deg]	
	結果	成功率	結果	成功率	結果	成功率
1	▲	2/3	○	2/3	○	2/3
2	○	3/3	○	3/3	○	3/3
3	○	3/3	○	3/3	▲	2/3
4	○	3/3	○	3/3	○	3/3
5	○	3/3	○	3/3	○	3/3
6	○	3/3	○	3/3	○	3/3
7	○	3/3	○	3/3	○	3/3
8	○	3/3	○	3/3	○	3/3
9	○	3/3	-	-	-	-

○: タスク成功.
 ▲: タスクが一部成功
 -: 試験未実施
 ←LEDマーカが画像中に映らないため。

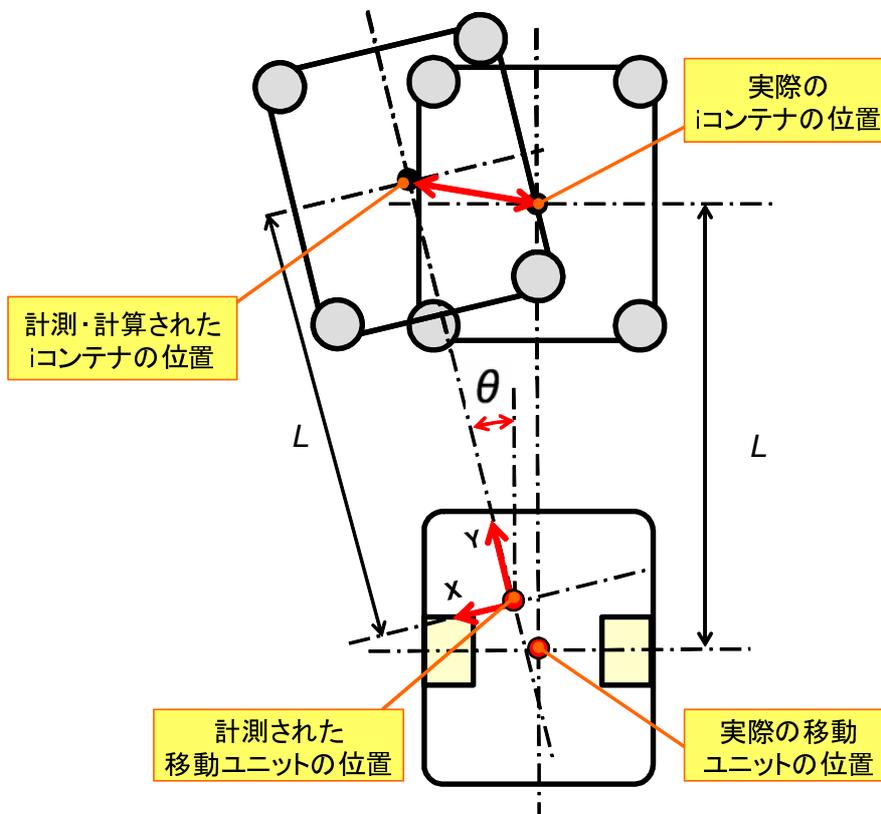


図 4.15 コンテナ・ロボット間の相対位置と局所的位置計測誤差の関係

4.2.6 コンテナ把持動作ロバスト性試験 (2. 傾斜誤差発生時)

実験の目的

本試験では、コンテナが障害物の上に設置され傾斜している場合にでもロバストに局所的計測を実施し、ロボットの把持動作が実行可能かを確認する。

実験の設定

前節の実験によってコンテナが水平に設置されている場合、コンテナとコンテナ運搬ロボットの初期相対位置が近ければ、つまり局所的計測後のコンテナ運搬ロボットの移動量が小さければロバストに把持動作を実現可能なことを確認している。そこで本節ではコンテナとコンテナ運搬ロボットを標準的な水平相対位置関係に設置した際のコンテナ傾斜の影響を試験する。試験項目は次の通りである。

設置位置 図 4.13 の位置インデックス 5。

傾斜角度 ロール、ピッチ各々 3 通り：厚さ 15[mm] のスペーサ^{*3}を 1~3 枚コンテナの下に敷く。ピッチ側に 3 枚のスペーサを敷いたときの傾斜角度が 7.4[deg]，ロール側に 3 枚のスペーサを敷いたときの傾斜角度が 10.3[deg] である。

試行数 各パターン 3 回

試験手順

1. i コンテナを試験設定の状態に設置
2. 移動ユニットをインデックス 5 の位置にラフ位置決めモードで移動させる
3. i コンテナの LED を点滅させ、局所的計測を実行する
4. 把持位置へ詳細位置決めモードで移動
5. コンテナ把持動作を実行（一部はピン挿入動作まで終了）

図 4.16 にロール側に最大傾斜させた場合の把持動作の様子を、図 4.17 にピッチ側に最大傾斜させた場合の把持動作の様子を示す。

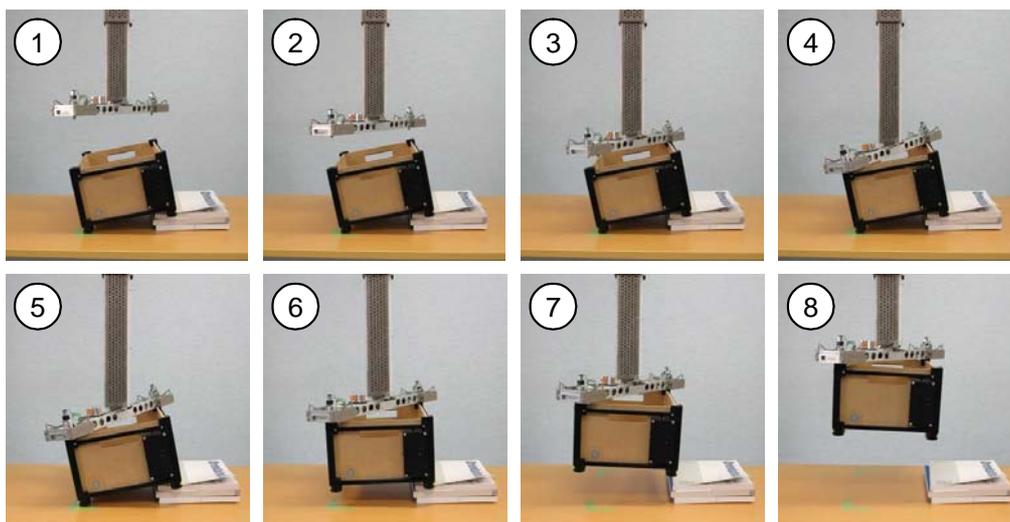


図 4.16 傾斜誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の様子 (ロール傾斜 10.3[deg])

^{*3} 15[mm] の厚さ設定は書籍 1 冊を想定している。

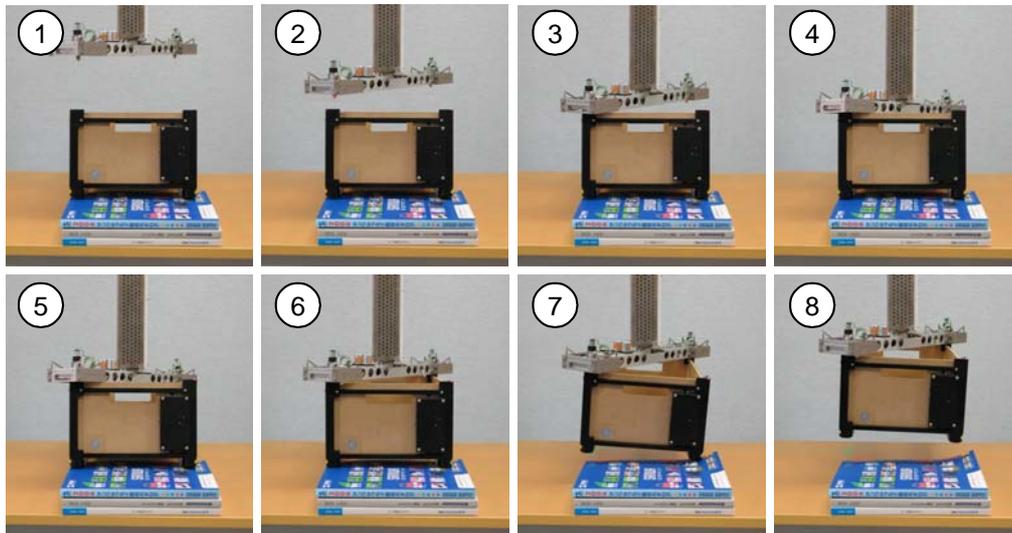


図 4.17 傾斜誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の様子 (ピッチ傾斜 7.4[deg])

実験結果と考察

表 4.3 に実験結果を示す。実験の結果，局所的計測実行の際のコンテナとコンテナ運搬ロボットの相対位置が適切であれば，コンテナがロール角で 10.3[deg]，ピッチ角で 7.4[deg] 傾斜している場合でもコンテナの把持動作を実現可能なことを確認した。但し成功率は 100[%] ではなく，コンテナが傾斜していることの影響と局所的計測実行の誤差の最悪状態が重なると表 4.3 の試験 NO.4 のように失敗してしまう場合があることが確認された^{*4}。本実験でのトータル試行回数 18 回のうち失敗は 1 度のみだったため，十分なロバスト性を有していると言える。

表 4.3 傾斜誤差発生時のコンテナ把持動作ロバスト性試験の結果

NO.	ロール スペーサ数	ピッチ スペーサ数	結果	成功率
1	1	0	○	3/3
2	2	0	○	3/3
3	3	0	○	3/3
4	0	1	▲	2/3
5	0	2	○	3/3
6	0	3	○	3/3

○: タスク成功.
▲: タスクの一部が成功

^{*4} この条件のみ失敗した特別な理由を見出すことは出来なかった。

4.2.7 コンプライアンス要素影響評価試験

実験の目的

コンテナ運搬ロボットはマニピュレーション機構部に水平・傾斜コンプライアンス要素が集中的に実装されている一方で、伸縮機構部も人に安全な柔らかい動作を実現した結果、副次的なコンプライアンス要素となっている。本実験では、これらの2つの機構部のコンプライアンス要素が各々どのように性能を発揮しているかを把握することで、複数のコンプライアンス融合の可能性を把握することを目的とする。

実験の設定

まず図 4.18(左) に実験のセットアップを示す。試験では、水平最大許容誤差である 10[mm] の誤差がある状態にコンテナを設置し、把持動作（連結ピン挿入動作）を実施した。ここでコンテナ運搬ロボットとコンテナの相対位置を図 4.18(右) に示す 4 パターンに設定した。

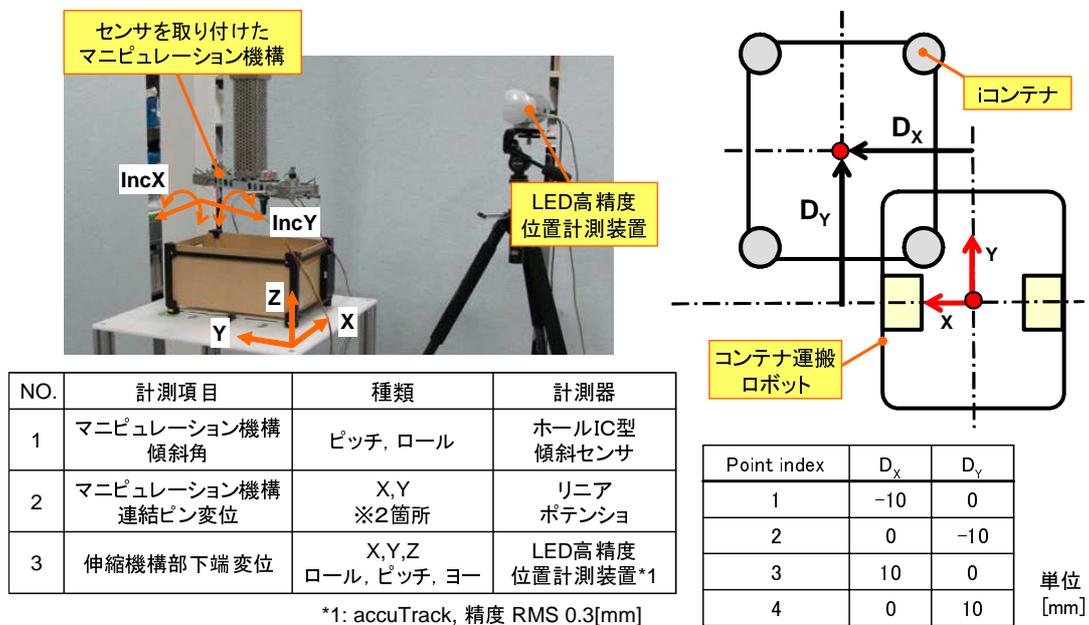


図 4.18 コンプライアンス要素影響評価試験のセットアップ

実験結果と考察

図 4.19~4.22 に各セットアップでの把持動作時の各計測項目の時系列データを示す。グラフよりマニピュレーション機構の水平コンプライアンス要素はピン挿入の初期にその性能を発揮しているものの (DispA,B-X,Y), コンテナの 10[mm] のズレは伸縮機構部全体の撓み (Body X,Y) で吸収していることが分かる。よって伸縮機構部を伸張した状態で把持を行うタスクを実行する限りは、構成が複雑なマニピュレーション機構の水平コンプライアンス要素単体のスペックのみで、コンテナの位置誤差を吸収する必要はなく、ロボット全体でコンプライアンス性能を実現することにより機構の小型化が期待出来る。^{*5}

*5 今回のアプリケーションではコンテナ受渡タスクにおいて伸縮機構部が縮んだ状態でも誤差を吸収する必要があるため、水平コンプライアンス要素の ±10[mm] の誤差吸収性能は必要である。

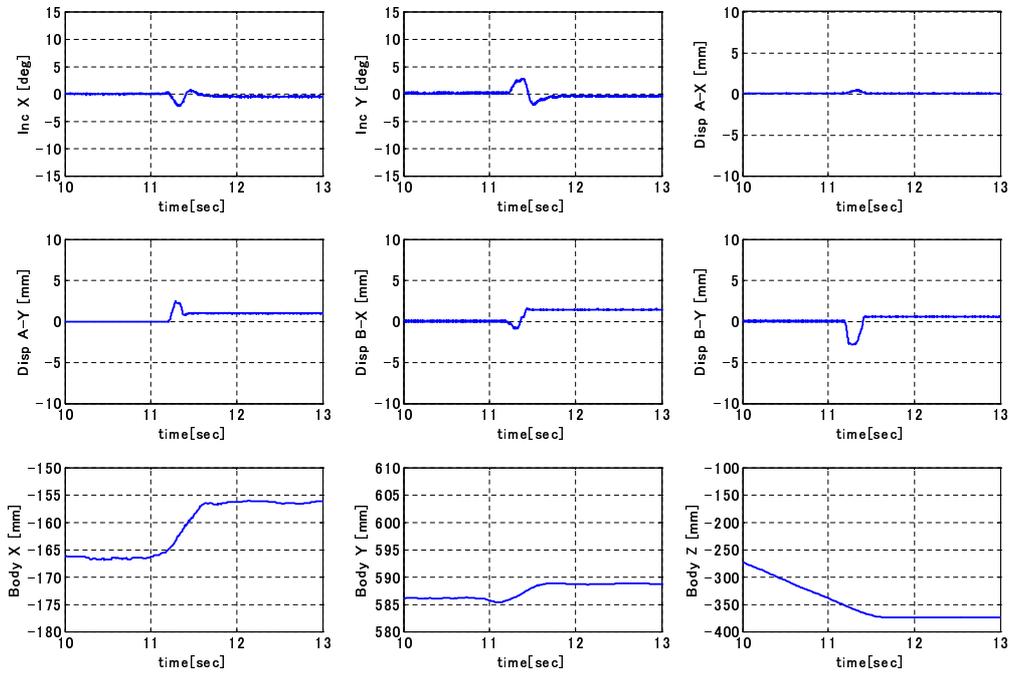


図 4.19 コンプライアンス要素影響評価試験の結果 (Point index: 1)

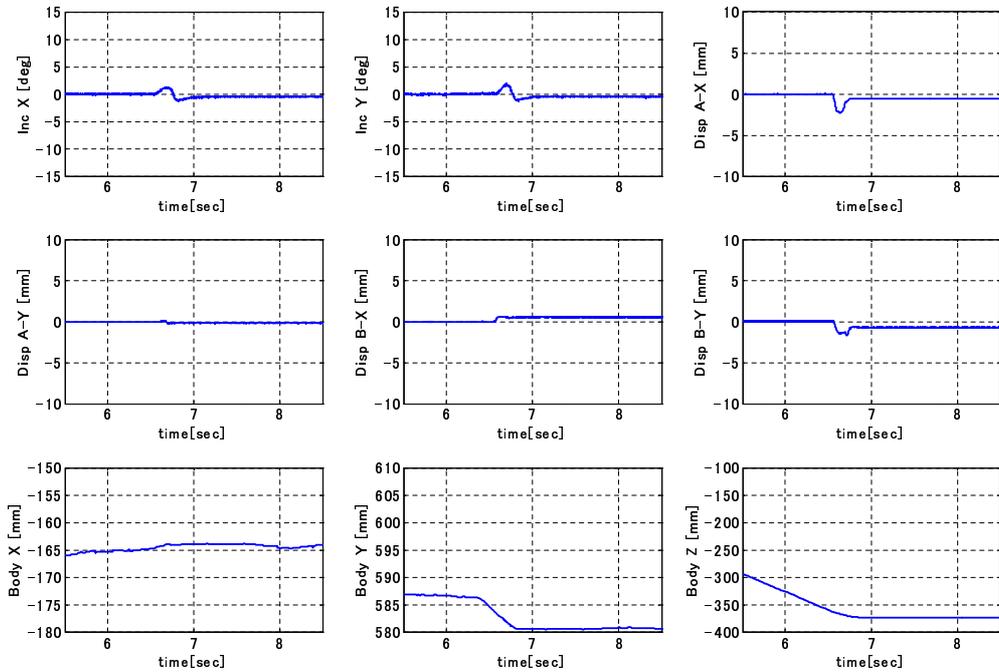


図 4.20 コンプライアンス要素影響評価試験の結果 (Point index: 2)

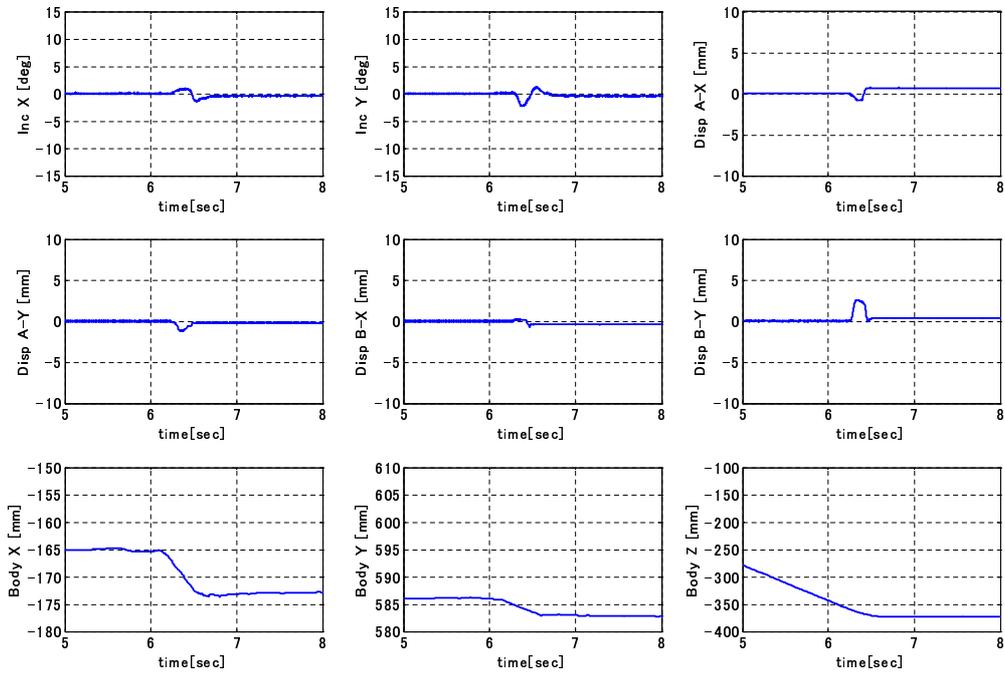


図 4.21 コンプライアンス要素影響評価試験の結果 (Point index: 3)

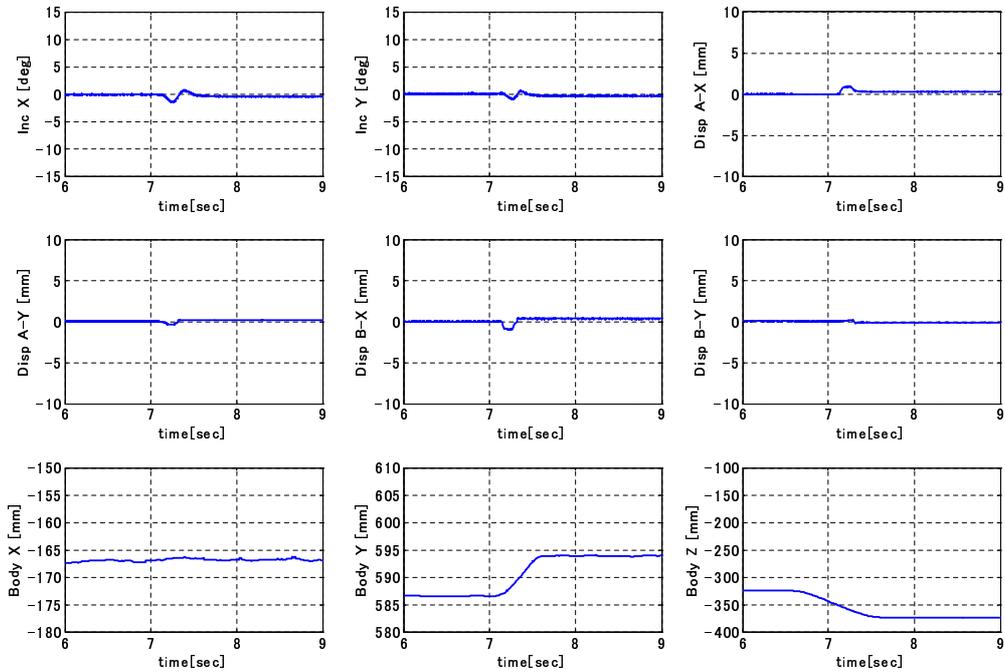


図 4.22 コンプライアンス要素影響評価試験の結果 (Point index: 4)

4.2.8 コンテナ把持・運搬タスク実現のまとめ

本節では、これまで開発してきたコンテナケースの位置を認識するシステム，柔軟にコンテナケースをハンドリングするマニピュレータ等の要素技術を統合し，生活空間中に設置されたコンテナの把持・運搬を行う一連のタスクを実現した。本システムで採用している計測・制御手法の特徴は次の2点である。

- (1) 計測フェーズで発生する誤差をコンプライアンス機構により機械的に吸収する。
- (2) コンテナ操作（把持）フェーズではセンサによるフィードバックを行わない。

実験により，本計測・制御システムを用いたコンテナ把持動作のロバスト性を確認した。また，コンプライアンス要素の影響評価により，複数のコンプライアンス要素を複合することにより，設計上の制約が大きいコンプライアンス要素のスペックを低くしても，全体として高いコンプライアンス性能が実現出来る可能性があることを確認した。

4.3 コンテナ受渡しタスクの実現（コンテナ運搬ロボットと家庭用コンテナ自動収納庫の接続）

本節ではコンテナ運搬ロボットと家庭用コンテナ自動収納庫間でのコンテナの受渡しタスクの実現について述べる。

まずコンテナ受渡しタスクに求められる要求性能について整理を行い，続いて関連するサブシステムの基本性能について概要を示す。更にコンテナ受渡しタスクを統括するコントローラ的设计を行い，最後に実験にて性能の確認を行う。

4.3.1 コンテナ受渡しタスクの要求性能の整理

タスクの目的

本タスクにおいてはコンテナ運搬ロボット（天井懸架移動部，コンテナ操作部）と家庭用コンテナ自動収納庫を協調させ，ロバストにコンテナの受渡しを実現することを目的とする。コンテナの受渡しには2種類の方向があり，説明の都合上それぞれを以下のように呼称する。

- コンテナ出庫受渡し：家庭用コンテナ自動収納庫からコンテナ運搬ロボットに i コンテナを受け渡すタスク。
- コンテナ入庫受渡し：コンテナ運搬ロボットから家庭用コンテナ自動収納庫に i コンテナを受け渡すタスク。

タスク実現に関連する技術

本タスクを実現するに当たって，各サブシステムにて実現された次のような要素技術を統合することが求められる。

- コンテナ運搬ロボット（天井懸架移動部）で実現される，永久磁石を利用して天井面を自由に動作し，また天井下面に懸架するユニットを柔らかくに牽引する技術（3.3 節）。
- コンテナ運搬ロボット（コンテナ操作部）で実現されている，コンテナの位置決め誤差を柔軟に吸収することの出来るマニピュレーション機構（3.4 節）。
- 家庭用コンテナ自動収納庫で実現される幾何的な拘束（Geometric object closure）を活用したロバストなコンテナハンドリング技術（3.5 節，[110]）。

タスク実現における環境的制約とポリシー

3.5 節に示した様に，コンテナ受渡しタスクの実行には受渡し場所の差異により次の3つの方式がある。

- 棚段受渡し方式
- 固定レール上受渡し方式
- 上下移動レール上受渡し方式

各々の方式の概要と特徴は表 3.19 に掲載した通りである。棚段受渡し方式では基本的にコンテナ運搬ロボットと自動収納庫の水平運搬機構のそれぞれの基本機能が十分高ければタスクを実行出来るため，本節での検討ポイントは多くない。一方で上下移動レール上受渡し方式は，二つのロボットの直接的な連携が必要となるため，前者の2つと比較して検討の必要な課題項目が大きい。そこで本研究では上下移動レール上受渡し方式の実現に取り組むこととした。

以前から人・ロボット間，もしくは複数のロボット間における物品の協調搬送が取り組まれてきた。人・ロボット間そして複数ロボット間の協調作業実現において，各ロボットにとって協調する人・ロボッ

トの動作は支援であると同時に外乱にもなるという問題があり，これを解決する必要がある。橋本らは4台の台車による協調搬送において並進自由度は2輪独立駆動のホイールと直動機構により制御を行っているものの，旋回自由度は受動的な自由度を加えて検討を行っている [111]。大田らは2台のトレーラ型協調搬送ロボットにおいて，機械的なコンプライアンス要素を共通の把持物体との間に入れることにより，不要な内力の発生を抑え協調作業を可能にしている [112]。平田らは実物のキャストの追従挙動にヒントを得た仮想 (3-D) キャスタをロボットに実現させることで，リーダ・フォロア型ロボットにおけるスムーズな協調運搬作業を実現している [113, 114]。

コンテナの受渡しタスクにおいては，瞬間的には2種のロボットが同時に1つの構造体を拘束する状態となるため，戦略によっては上記の協調ロボットと同様の問題が発生する可能性がある。しかしある1つの Caging 状態にある物体が別の Caging 状態に移行する過程を適切に設計することにより過剰拘束 (Over constraint) を回避することが出来，その結果，複数のロボットが1つの対象を操作した場合でも各々の動作を阻害しないスキームを実現することが可能である。

よって本研究ではコンテナの受渡しを2つの Caging 状態間での移行により実現するものとする。

4.3.2 コンテナ受渡しタスクに関連するサブシステムの整理

本章ではまずコンテナケース受渡しタスクを実現するシステムの構成について述べ，続いて各サブシステムについて3章の情報を要約して示す。

コンテナケース受渡しタスクのシステム構成

図 4.23 にシステム構成の概要を示す。コンテナ受渡しタスクコントローラはコンテナ運搬ロボットと家庭用コンテナ自動収納庫の間で行われるコンテナの入出庫受渡しを制御するコントローラである。コンテナ運搬ロボットの天井懸架移動部によって運搬されるコンテナを家庭用コンテナ自動収納庫の構造・機構を利用して運搬ロボットのコンテナ操作部に渡す，またはコンテナ操作部から受け取るタスクである。以降では，各構成要素の概要について述べる。

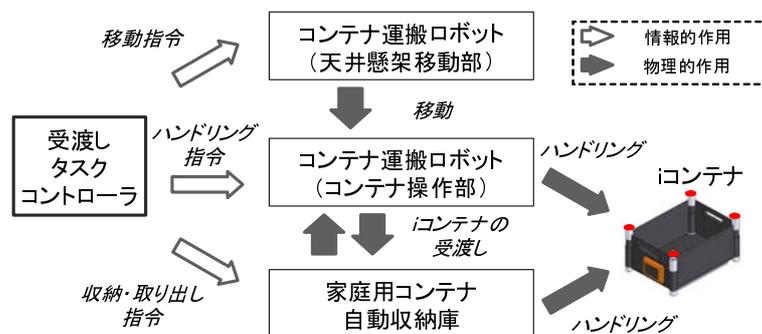


図 4.23 コンテナ受渡しタスクを実現するシステム構成

コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) の概要と性能

コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部) に関しては 4.2 節でも触れているため，ここでは本タスクの検討に必要な仕様を再掲するに留める。永久磁石誘導型天井吸着法による天井下面ロボットの牽引誤差は動的なものでも $1[\text{mm}]$ 以下であり，静的な位置決め誤差はサブミリオーダーと考えられる。また 2 次元コードマトリクスによる位置計測精度は標準偏差で距離 $0.33[\text{mm}]$ ，方向 $0.30[\text{deg}]$ 以下である。

コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) の概要と性能

コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) に関しては 4.2 節でも触れているため、ここでは本タスクの検討に必要な仕様を再掲するに留める。

把持対象コンテナの水平位置誤差 $\pm 10[\text{mm}]$ ，傾斜誤差 $10[\text{deg}]$ を吸収して把持動作を行うことが可能となっている。

なお受渡し作業は基本的に伸縮機構部が縮んでいる状態で行うため、伸縮機構部のコンプライアンス性能は本タスク実行時は直接的には関係してこない。

家庭用コンテナ自動収納庫の概要と性能

家庭用コンテナ自動収納庫の概要を図 4.24 に示す。家庭用コンテナ自動収納庫は家庭内で複数のコンテナを空間効率高く収納し、収納庫内でのコンテナの移動や他のロボットとの連携によりコンテナの搬出・搬入などを実現する自動収納庫である。基本構造として市販の棚を利用でき、拡張フレームを実装することで自動収納庫が実現される。垂直・水平駆動を分離した自由度配置により生活空間への侵食を可能な限り低減し、水平運搬機構で実現されるコンテナのハンドリングにおいては Geometric object closure を活用した拘束を i コンテナ自身の構造、コンテナガイドプレート、フォークテーブル構造、ロックプレートなどにより図 3.115 に示したように 2 次元平面内で実装し、ロバストなコンテナのハンドリングが実現されている。

水平運搬機構上で実現されている Caging ではプレート挿入方向で $2[\text{mm}]$ ，左右方向で $6[\text{mm}]$ のコンテナの移動が許容されている。但し、左右方向の許容移動量はコンテナガイドプレートへの挿入動作時は $2[\text{mm}]$ に低下する。

垂直運搬機構は市販の位置決め機能内蔵の駆動モータを用いているためサブミリオダでの位置決めが可能である。一方の水平運搬機構は水平レールをウレタンの駆動ローラにて移動する方式を採用しているため、上下移動レールや水平 (固定) レールの乗り移り時にローラのスリップが発生する可能性があり、ローラの回転から水平運搬機構の位置を推定するのは必ずしも信頼出来ない。しかし、図 3.107 に示したように、水平運搬機構には位置決めスイッチを含めた合計 3 つのスイッチが搭載されており、これらを利用することで安定した位置決め動作が可能となる。左右の位置決めスイッチを用いた場合の位置決め精度はサブミリオダである。

またフォークテーブルは図 3.110 に示したように板金曲げ構造により構成されており、その曲げ部がコンテナ底面のフラットスタンドバーをガイドする効果を有する。

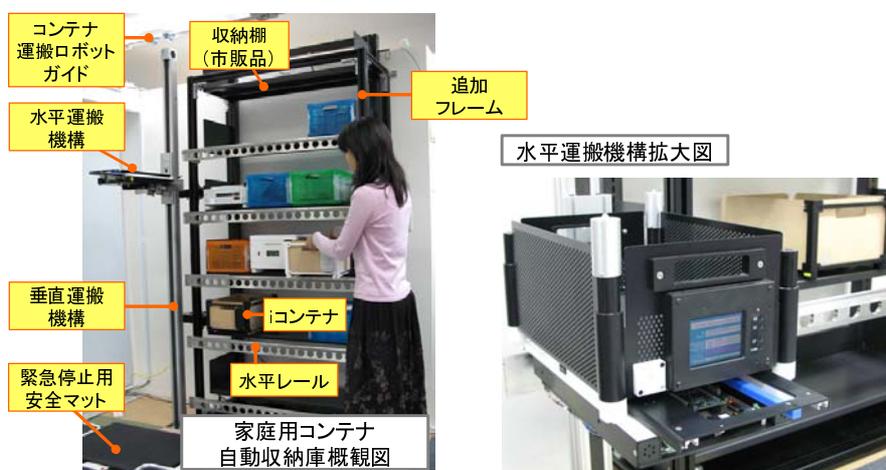


図 4.24 家庭用コンテナ自動収納庫の概要

4.3.3 コンテナ受渡しタスクコントローラ的设计

本章では、まずコンテナ受渡し作業の流れの整理を行い、タスクを実現するコントローラにおける設計項目を整理する。続いて各設計項目についての詳細な検討を示す。

コンテナ受渡し作業の流れ

まず図 4.25 にコンテナ受渡し作業の流れを示す。本タスクフローにおいては、運搬性能に関連する以下の設計検討項目が存在する。

- コンテナ運搬ロボットの受渡し位置への位置決め方法
- 受渡し実行時の両ロボット間の相対距離制御方法
- コンテナの把持・解放時に発生する Caging 状態間遷移の実現性の確認

以降では各項目について検討を行う。

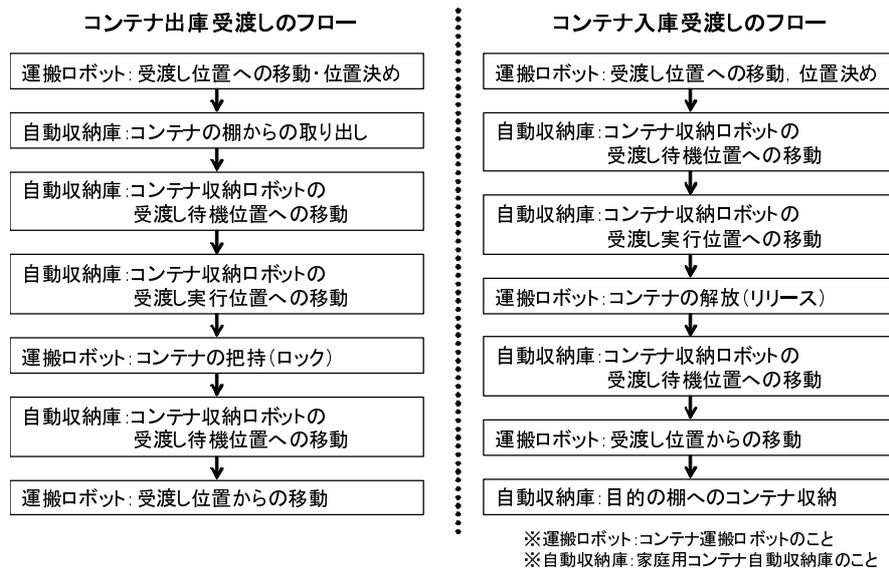


図 4.25 コンテナ受渡しタスクのフロー

コンテナ運搬ロボットの受渡し位置への位置決め方法の検討

コンテナ運搬ロボットの受渡し位置への位置決めにおいては時間を評価軸として以下の2つの方法を検討する必要がある。

- コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)の正確な位置決め性能を利用する方法
- コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)の永久磁石誘導型天井吸着法のなじみ性能を利用する方法

前述したようにコンテナ運搬ロボットは2次元コードマトリクスを用いた位置計測手法により、位置でサブ mm オーダ、方向でもサブ deg オーダの非常に高精度な位置決めが可能である。一方で二輪対向型の移動ロボットの位置・方向を制御するには非ホロノミックな拘束 [107, 108, 109] における制御問題を解く必要があり、そこには経験的な制御指針を導入した制御則を組み込む必要がある。しかし、コンテナ運搬ロボットの天井懸架移動部は天井上面の樹脂面を移動するため、滑りが発生し易く、その位置決め制御

の収束性は必ずしも良くない。

一方で永久磁石誘導型天井吸着法では天井上面を移動する移動ロボットのタイヤの摩擦が大きく出来ないという性質上、天井下面に吸着しているユニットが何かしらの物体に接触している場合、その物体を押して移動させることは出来ない。つまり、天井下面のユニットを誘導する何かしらのガイド構造を用意することにより、詳細な制御をせずとも自動的に天井下面のユニットが位置決めされるような仕組みを実現することが可能である。

以上のように制御に必要な時間を評価軸として検討すると、なじみ性能を利用する方法が優勢であることは明らかなため本研究ではこの方式を採用した。

実装としては、図 4.26 に示すように、磁石モジュール自体をガイドと接触する構造として選定し、その磁石モジュールが押し込まれるガイドプレートを用意することとした。これにより非常に手軽に位置決めをすることが可能となる。この磁石モジュールとガイドプレートの左右間隔は 2[mm] であり、その隙間がコンテナ運搬ロボットの位置決め精度となる。

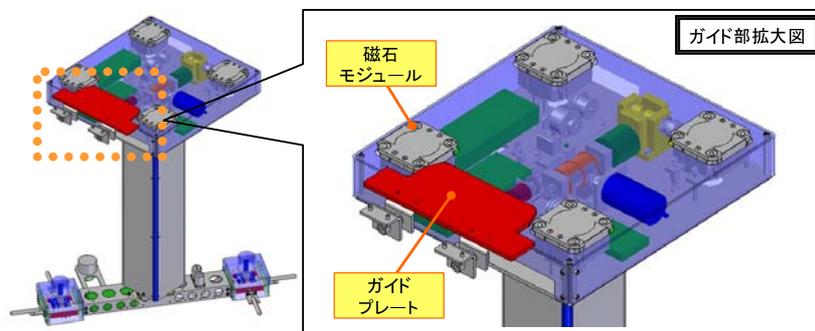


図 4.26 コンテナ運搬ロボットガイドプレート

受渡し実行時の両ロボット間の相対距離制御方法の検討

ガイドプレートを用いた位置決め方法により、水平方向で 2[mm] 以内での位置決めが可能となった。続いて、コンテナの受渡しを行う垂直方向の動作について検討を行う。前述の水平位置決め完了時、受渡し待機時、図 4.27 のようにコンテナ運搬ロボットと家庭用コンテナ自動収納庫の水平運搬機構には垂直方向に連結ピン挿入のために 30[mm] ほどの距離がある。

ここで垂直駆動を実現するには以下の 2 つの方法が考えられる。

- コンテナ運搬ロボットの巻上げ機構により垂直動作を実現する。
- コンテナ自動収納庫の垂直運搬機構により垂直動作を実現する。

これらの二つは位置決めや運搬速度の性能的には殆ど差異がない、しかしコンテナ運搬ロボットはバッテリー駆動のロボットのため、エネルギー効率から考えるとコンテナ自動収納庫側を動作させるのが好ましいと考えられる。そこで本研究ではコンテナ自動収納庫の垂直運搬機構により受渡し実行位置までの移動動作を実現することとした。

コンテナの把持・解放時に発生する Caging 状態間遷移の実現性の確認

Caging 状態間での遷移をスムーズに実現するためには、二つの caging 状態でのコンテナの許容移動範囲における重なりが重要となる。Caging における移動許容範囲の不整合がある場合、状態遷移になんらかの仕事が必要とする。つまり図 4.28(左) のように移動許容範囲が小さい側から大きい側への状態遷移には特に問題がないが、図 4.28(右) のように移動許容範囲が大きい側から小さい側への状態遷移では仕事が必要である。

ここで問題の単純化のためにコンテナ運搬ロボットと水平運搬機構間では、水平面合わせが実現出来、平面の Caging 状態のみ検討すれば良いものとする。また、コンテナ運搬ロボットには水平コンプライア

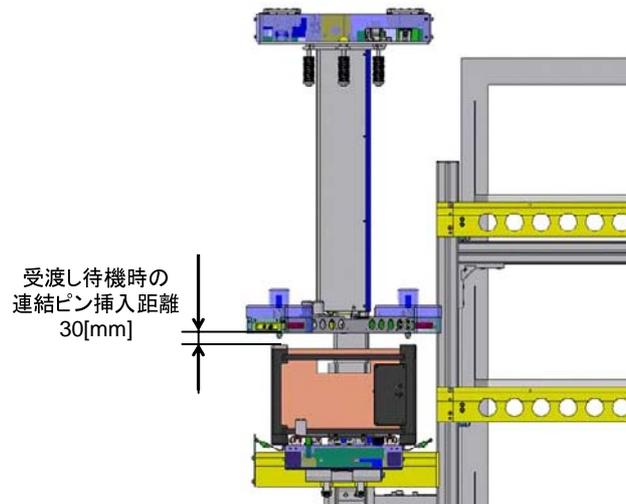


図 4.27 コンテナ受渡し待機時のコンテナ運搬ロボットと水平運搬機構の位置関係

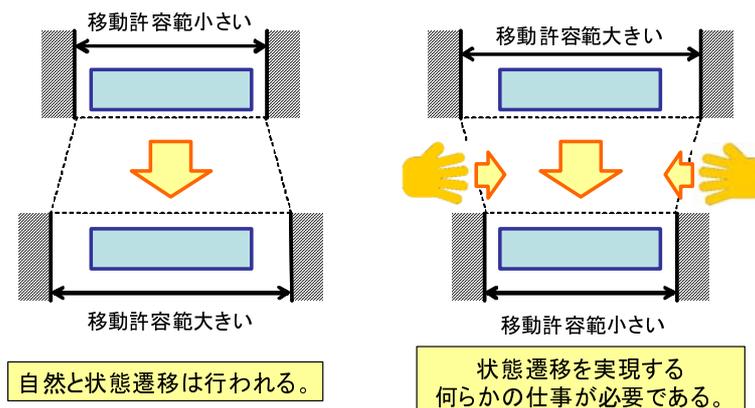


図 4.28 移動許容範囲の不整合における問題

ンスが実装されているため、Caging 状態の移動許容範囲にはこの動きも含めて検討しなければならない。

まず図 4.29 にコンテナ運搬ロボット、水平運搬機構両者の Caging 状態での移動許容範囲を示す。なお図中では各ロボットとコンテナの中心位置が完全に重なった状態を原点と考えて、そこから X,Y 軸各々正負の方向への移動許容距離として検討をしている。

図 4.29 を見ると明らかなようにコンテナ運搬ロボットの移動許容範囲が水平運搬機構のそれよりも広範囲である。つまり、水平運搬機構からコンテナ運搬ロボットにコンテナを受け渡すコンテナ出庫受渡し時には、容易に Caging 状態の移行が実現されることが分かる。その一方で、コンテナ入庫受渡し時は水平運搬機構の許容隙間だけではコンテナ運搬ロボット側の移動許容範囲を網羅出来ないため、(1) コンテナプッシュプレートのテーパ部、(2) フォークプレートの曲げ R 部、さらに (3) フォークテーブルの挿入動作によってコンテナの位置が補正されることを加味したコンテナの位置決め許容範囲の 3 つを検討項目に加えることが必要となる。これにより X 方向は合計 $\pm 9[\text{mm}]$ の移動許容範囲を持つことになり、ほぼコンテナ運搬ロボットの移動許容範囲を網羅出来る。一方の Y 方向に関してはフォークテーブル挿入側は $10[\text{mm}]$ と十分な移動許容範囲を持つものの、テーブル引き出し側はテーパガイド分の $5[\text{mm}]$ しか移動許容範囲を持たず、静的な検討では何かしらの作業が必要と考えられる。

但し前節のコンプライアンス要素影響評価試験により、コンテナ運搬ロボットと把持対象のコンテナに

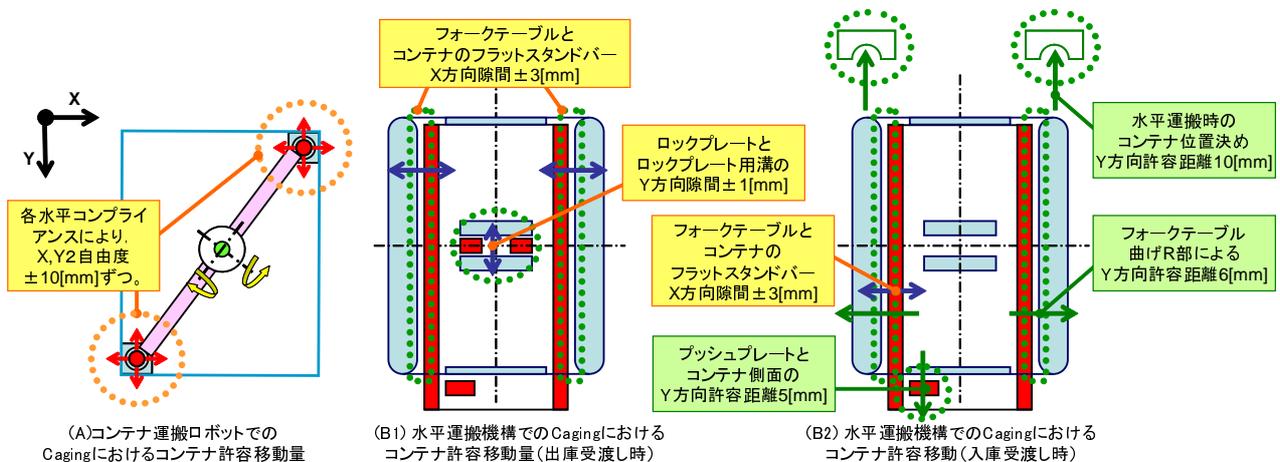


図 4.29 コンテナ運搬ロボット，水平運搬機構両者の Caging 状態での移動許容範囲

10[mm] の位置決め誤差がある場合でも，水平コンプライアンス要素の最大変移は数 mm 程度であり，今回の使用においては問題がないことが予想されるため，これは実験的に確認する必要がある。

4.3.4 コンテナ運搬ロボット受渡し位置決め性能試験

実験の目的

ガイドプレートによるコンテナ運搬ロボットの受渡し位置への位置決め性能を確認する。

実験方法

以下の手順で実験を行った。

- コンテナ運搬ロボット（天井懸架移動部）のラフ位置決めモードで，ガイドプレート挿入準備位置に移動させる（位置決め許容誤差，距離：4[mm]，角度：0.5[deg]）。
- コンテナガイドプレートに直進モードで連結させる。
- 連結完了後，コンテナ運搬ロボットの自己位置推定機能で位置を計測する。

上記の試験を 10 回繰り返した。

実験結果と考察

図 4.30 にコンテナ運搬ロボットによる受渡し位置決め動作の様子を示す。結果を表 4.4 に示す。表左は各試行における最終停止位置及び姿勢を計測した値とその標準偏差を示し，右グラフは最終停止位置をプロットしたものである。ここでコンテナ運搬ロボットにおいて天井懸架移動部の位置とコンテナ操作部の位置は厳密には一致しないことを考慮しつつデータを見ると，X 方向，Y 方向の標準偏差が両者とも 0.5[mm] 以下，姿勢の標準偏差が 0.3[deg] 以下と，非常に精密に位置決め動作が行えている。実際に 2 次元コードマトリクスからの位置推定精度を考えると，プッシュプレートは非常に精度高く位置決め出来ていると言える。ちなみに Y 方向の位置決めに関して，ガイドプレートのストッパは図 4.26 に示したように，押し込み方向にはガイドプレートと磁石モジュールの面同士が接触する構造になっており，またこの接触面はほぼ X 軸と平行になっているため，Y 座標のバラツキは実際にほとんど発生していないと考えられるが，標準偏差でみると X 軸同様にバラツキが発生している。これは前述の 2 次元コードによる位置推定のバラツキと永久磁石誘導型天井吸着法における上下ユニットの誘導誤差が原因^{*6}と考えられる。

*6 ガイドプレートはコンテナ操作部側のみ設けられているため，誘導誤差は比較的大きなものになっている。

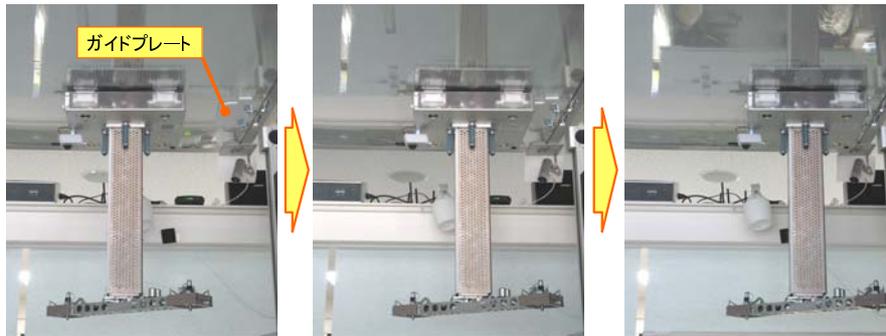
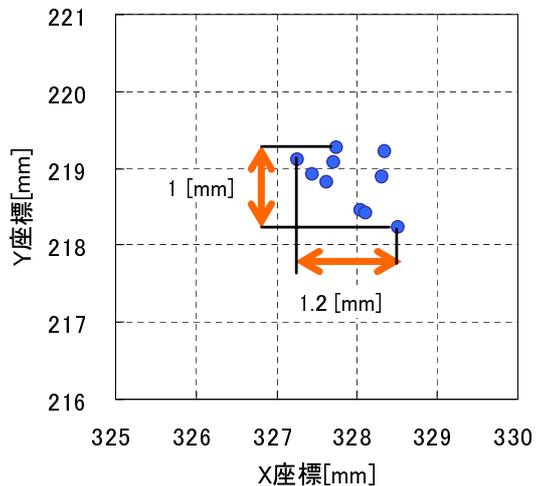


図 4.30 コンテナ運搬ロボットによる受渡し位置決め動作の様子

表 4.4 コンテナ運搬ロボット受渡し位置決め性能試験の結果

試行NO.	最終停止位置・姿勢		
	X [mm]	Y [mm]	θ [deg]
1	327.7	219.3	93.4
2	328.0	218.5	93.0
3	327.4	218.9	93.2
4	327.3	219.1	92.6
5	328.3	219.2	93.0
6	328.1	218.4	92.8
7	327.7	219.1	92.3
8	328.5	218.2	93.0
9	328.3	218.9	92.9
10	327.6	218.8	92.8
標準偏差	0.4141	0.3580	0.291



4.3.5 コンテナ受渡しタスク実行性能確認試験

実験の目的

コンテナ受渡し時のコンテナ把持 (Caging) 状態を様々に設定し，その状態での受渡し動作の実現可否について確認することで，受渡しタスクの実行性能を確認する。

試験ではまずタスク実行が容易と予想される出庫受渡しタスクの試験を行い，続いて入庫受渡しタスクの試験を行う。

実験の設定 (出庫受渡しタスク)

試験設定は次の通りである。

- 水平運搬機構上のコンテナ位置: 図 4.31 に示す 4 通り。
- コンテナ内積載物: 紙カタログ (約 2[kg]) を搭載

実験は以下の手順にて実施した。

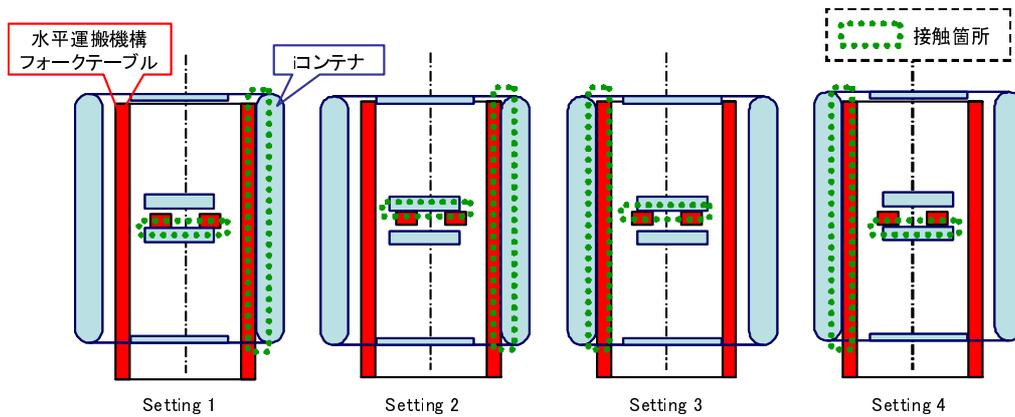


図 4.31 出庫受渡しタスクロバスト性試験の設定

1. コンテナ運搬ロボットを受渡し位置に位置決めする。
2. コンテナ自動収納庫の垂直運搬機構を受渡し待機位置に移動する。
3. コンテナを試験設定の位置に設置する。
4. コンテナ自動収納庫の垂直運搬機構を受渡し実行位置に移動する。
5. コンテナ運搬ロボットのコンテナ接触スイッチを確認し、把持動作を実行。
6. コンテナ自動収納庫の垂直運搬機構を受渡し待機位置に移動する。

実験結果と考察 (出庫受渡しタスク)

実験の様子を図 4.32 に示す。試験の結果、4通りの全てのコンテナ位置においてスムーズに出庫受渡しタスクが実行可能なことを確認した。これはコンテナ運搬ロボットにおける Caging 状態の移動許容範囲が水平運搬機構のそれよりも広範囲であることを考えると妥当な結果である。

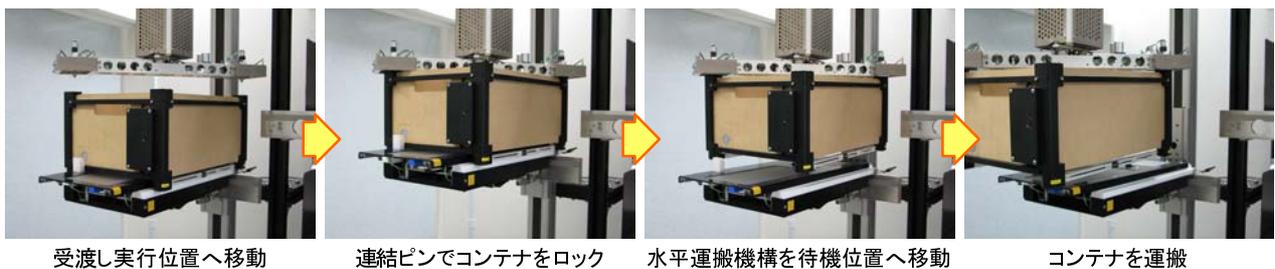


図 4.32 出庫受渡しタスクの連続写真

実験の設定 (入庫受渡しタスク)

試験項目は次の通りである。

- コンテナ運搬ロボット・コンテナ相対位置: 図 4.33 に示す 4 通り。
- コンテナ内積載物: 積載物なし, 紙カタログ (約 2[kg]) を搭載の 2 パターン

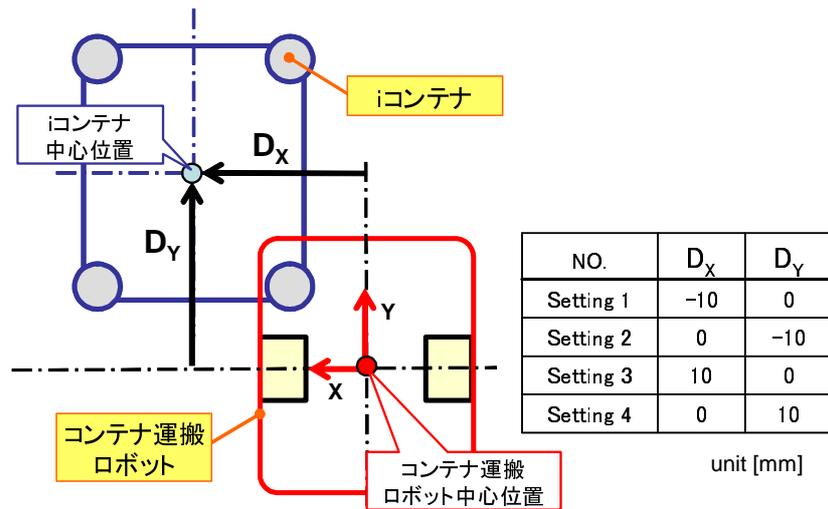


図 4.33 入庫受渡しタスクロバスト性試験の設定

実験は以下の手順にて実施した。

- i コンテナとコンテナ運搬ロボットに図 4.33 に示す相対位置決め誤差を設定する。
- コンテナ運搬ロボットが i コンテナを把持し, 持ち上げる。
- コンテナ自動収納庫の垂直運搬機構を受渡し待機位置に移動する。
- コンテナ運搬ロボットを受渡しポイントへ移動させる。
- コンテナ自動収納庫の垂直運搬機構を受渡し実行位置に移動する。
- コンテナ運搬ロボットの連結ピンを解放状態にする。
- コンテナ自動収納庫の垂直運搬機構を受渡し待機位置に移動する。

実験結果

実験の様子を図 4.34 に示す。試験の結果, コンテナ運搬ロボットとコンテナの相対位置が図 4.33 の 4 通りの状態で把持を行った場合でも, 入庫受渡し動作を実行可能なことを確認した。特に, 2[kg] の積載物を積載している場合には, 水平運搬機構上のほぼ (理想的な) 中心にコンテナが受け渡されることが確認された。これは 4.2.7 節のコンプライアンス要素影響評価試験でコンテナとの相対位置誤差がある場合でも, 最終的には伸縮機構部の柔軟性が位置決め誤差を吸収し, マニピュレーション機構の水平コンプライアンス要素は大きな変位を残さなかったことから, コンテナ持ち上げ時にはコンテナ把持時の相対位置誤差によらずほぼ同一の位置に巻き上げられるためと考えられる。

またコンテナ積載物がない状態で受渡し動作を行った場合, いずれの設定においても図 4.35 に示すように水平運搬機構の中心位置とはフォークテーブル挿入方向で約 4[mm], 左右方向で 3[mm] ほどずれることが分かった。これは積載物が搭載されていない場合, 傾斜コンプライアンスを低減させる機能が働かないため, コンテナ自身の重量バランスの悪さによりマニピュレーション機構全体が傾いたままで受渡し動作が実行されるためと考えられる。しかし, このずれは水平運搬機構のコンテナ収納・設置動作を阻害

するほどではないため、特に問題とはならない。

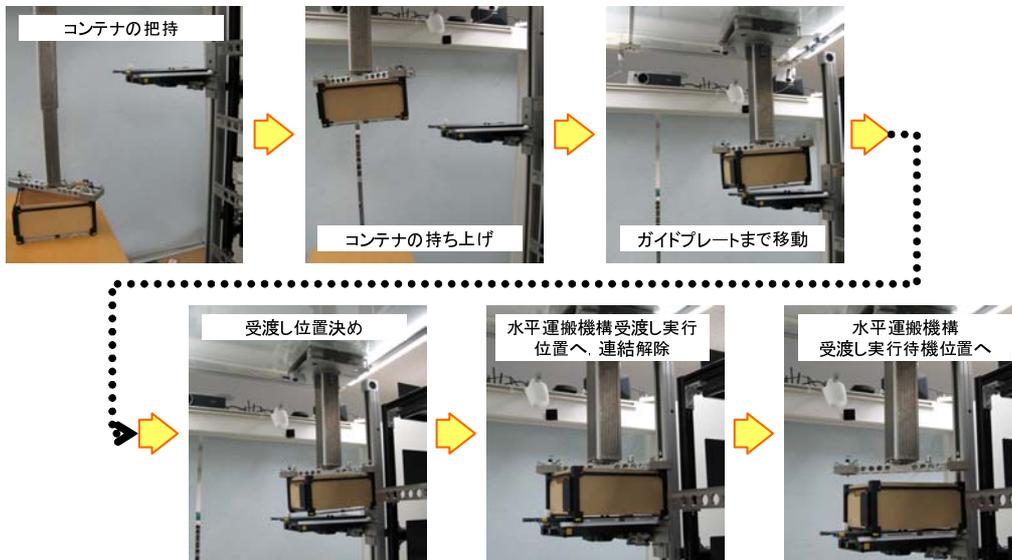


図 4.34 入庫受渡しタスクの連続写真

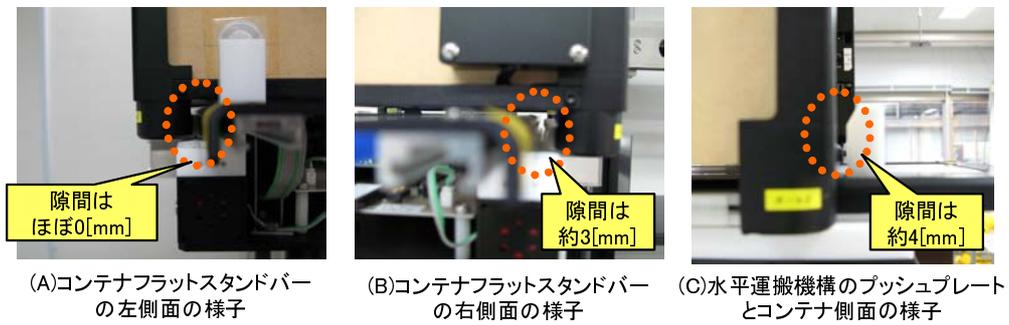


図 4.35 積載物がないコンテナを入庫受渡しした場合の水平運搬機構上に設置されたコンテナ状態

4.3.6 コンテナ受け渡しタスク実現のまとめ

本節では、コンテナ運搬ロボットと家庭用コンテナ自動収納庫間で行われるコンテナの受渡しタスクの実現について述べた。本受渡しタスクの特徴は、2つのロボットに把持されているコンテナはそれぞれ異なる Caging 状態にあり、その Caging 状態間の遷移により実現されている点にある。

一般的に Caging 状態では各々に設定された移動許容範囲があり、許容範囲が小さい側から大きい側に状態を遷移させる場合、そのタスクの実現は容易になる反面、許容範囲が大きい側から小さい側に状態を遷移させる場合には何らかの仕事をを行わなければならない^{*7}。

今回のタスクの場合、コンテナ運搬ロボットの Caging の方が移動許容範囲が広いので、棚型収納庫から i コンテナを他の場所に移動させる出庫受渡しは容易に実現された。一方の i コンテナをコンテナ自動収納庫に収納する入庫受渡しにおいては、コンテナ運搬ロボットの Caging 状態のうち、コンテナ自動収納庫の水平運搬機構の Caging の範囲を超える領域の状態にある場合には、そのままでは受渡しを実現することが出来ない。そのため、水平運搬機構上のフォークテーブルの R 曲げ構造やプッシュプレートに設けたテーパ部などにより、移動許容範囲の差を吸収する工夫を行った。

実験により、入庫・出庫の両受渡しタスクを実現可能なことを確認した。また、入庫受渡しタスクで懸念された移動許容範囲の差は、複数のコンプライアンスを組み合わせているコンテナ運搬ロボットにおいては、問題にならないことが確認された。

このように複数のコンプライアンスを組み合わせることにより、通常の枠組みでは実現出来ない Caging 間の遷移をスムーズに実現出来る可能性を発見した点は、本タスク実現における非常に重要な知見である。

*7 これは情報論におけるエントロピーの概念からも説明することが出来る。

第5章

結論

本章では本研究を通して得られた知見を整理し、本研究で提案しているシステムの実用化に向けて取り組むべき課題について述べる。

5.1 本論文のまとめ

本論文では近年の先進国における生活空間中でのモノ・情報溢れを改善するために、家庭内物流支援ロボットシステムを提案し、その実現に必須であった生活環境特有の課題解決のため、問題を総括的に取り扱うスキームとしての解決策（戦略的コンプライアンス）、そしてロボット自身に実装される機構的な解決策（Geometric object closure(以降ではGOCと記述)と受動機構的コンプライアンス)を整理し、実際のシステムとして実装することでその技術的要点及び有効性を示した。

各章の概要を以下に示す。

第1章 緒論

生活空間中にモノや情報が溢れる原因の検討として、都市部における住宅事情、消費者を取り巻く物品情報の変化などに注目し、以下の4点が原因であると分析した。(1) 狭小な居住空間、(2) 必要以上にモノを購入、(3) モノを捨てられない、(4) 核家族化による資源共有の低下。これらの原因を解決するためには、(A) 物品の入出力フローを適正化する、(B) バッファ（収納空間）を増設することが必要であると考え、将来的に実現を狙う未来の集合住宅の姿を示しつつ、本研究の目標を生活環境中で物品の搬送・収納を行うロボットシステムの実現と定めた。さらに生活環境中でロボットがロバストな動作を実現する上で、阻害要因となる(1) 生活環境の変化、(2) 物品の多様性、(3) 人の作業のバラツキに対する対策が必須であるとした。

続いてモノを取り扱うシステムとしてロボットマニピュレーションの研究を、物体の拘束の概念から整理し、Closureの概念がロボットの現実性を検討する上で重要な概念であることを示した。

一方、自動車の発展の歴史を分析し、ロボットに必要なスキームを”戦略的コンプライアンス”の概念で整理し、”規格化、補助・強化、誘導”という3つの基本機能を導出した。更にそれらのスキームが機構的なコンプライアンスと融合することにより、実際の性能を実現可能であることを述べた。

以上より本研究の目的を、『生活環境においてロバストに物品搬送・収納動作をするロボットシステムを実現するために必要な、戦略的・機構的な方法論・設計論についてクロージャ及びコンプライアンスをキーワードとして整理し、それらを家庭内物流支援ロボットシステムの実現を例として具現化し、その有効性について検証を行うこと』と設定した。

第2章 生活環境中で動作する物品搬送・収納ロボットシステム

まずクロージャについて、拘束及び受動・能動により分類を行った。そして完全拘束ではない形態受動拘束である Object closure(Caging) に注目し、さらに機械設計の現場における幾何的な考察に対する重要性から GOC を提案した。このクロージャは集合論で定義されている Object closure と比較して、作図による条件判定が容易であるという利点を持つ。この GOC の設計手順を示す中で、従来より機械の組立で活用されてきた手法とクロージャとが密接に関係することを述べた。

続いて戦略的コンプライアンスについて検討を行った。生活環境の変化を受容するためには、ロボットにとって”見えやすい”計測用特徴の整備、複数台の計測システムによるタスクの分割、そしてロボットが自身のタスクに専念出来る環境を整備することが必要であると述べた。続いて物品の多様性を受容するために、ロボットの作業対象単位を物品1つ1つではなく”1つのコンテナ”とし、さらにそのコンテナ及び搭載物がロボットにとって物理的・情動的に扱いやすい構造・仕組みを有することとした。また人の作業のパラッキに関しては、人の作業を機械的・情動的に誘導する仕組みを用意することとした。

最後に機械的コンプライアンスに関する整理と本研究のポリシーについて検討した。従来研究におけるコンプライアンス性能の実現をアクチュエータの有無と実装形態によって分類した。そして本研究ではその中でも産業界での実績が多い、受動的な機構により実現されるコンプライアンスに注目し、”受動機械的コンプライアンス”と呼称することとした。

第3章 家庭内物流支援ロボットシステムを構成するサブシステムの実現と基本性能評価

前章で整理した3つの技術要素(GOC, 戦略的コンプライアンス, 受動機械的コンプライアンス)を活用した家庭内物流支援ロボットシステムを実現した。

家庭内物流支援ロボットシステムは次の6つのサブシステムより構成される。

(1) インテリジェントコンテナ(iコンテナ)

本システムにおいて人がロボットに望む物品搬送・収納支援、そしてロボットが人間に与えられる支援の間を埋める”接点”の役割を担う存在である。搭載する物品の性質(使用頻度, 保管期間)によって3種類のバリエーション(クラスS, A, E)を有し、それぞれにおいて実装される筐体の構造や素材が異なる。共通の構造としてはコンテナ運搬ロボットの連結ピンがスムーズに挿入可能なテーパガイド穴, 自動収納庫が容易にフォークテーブルを挿入可能なフラットスタンドバーなどのロボットに扱いやすい工夫が施された筐体を有する。一方, 電装品としてはクラスSでは積載物認識用のRFIDリーダが内蔵されている, またクラスSとAではコンテナの四隅に実装されたLEDがロボットによるコンテナの発見及び位置計測を補助する。

(2) 天井移動型コンテナ運搬ロボット

永久磁石誘導型天井吸着法により天井面を自由に動作可能であり, 人や障害物と干渉することなく移動することが可能である。またコンテナを把持するマニピュレーション機構では, 動力源が断絶された場合でもコンテナ把持を維持可能な偏芯連結ピン機構及びコンテナの水平及び傾斜誤差を吸収可能なコンプライアンス機構が実装されている。天井面からコンテナへのアクセス機構として採用された柔軟なタケノコ型伸縮機構には, 人との接触力を低減する機能もある。

(3) 家庭用コンテナ自動収納庫

基本構造として市販の棚を利用でき, 拡張フレームを実装することで自動収納庫が実現される。垂直・水平駆動を分離した自由度配置により生活空間への侵食を可能な限り低減し, 水平運搬機構で実現されるコンテナのハンドリングにおいてはGOCを活用した拘束により, ロバストなコンテナのハンドリングが実現されている。またコンテナ運搬ロボットと接続するための構造を有しているため, スムーズにコンテナの受渡し作業を実現可能である。

(4) コンテナ位置認識システム

コンテナ位置計測を2つのフェーズに分類し, 最初のコンテナの発見及び大域的計測では環境中に散在させた固定カメラでデータ取得を行い, 続く2つ目のフェーズである局所的計測ではコンテナ運搬ロボットに無線LANカメラを搭載し, ロボットとの正確な相対位置を計測しているところが特徴的である。生活環境中での照明変化に対応するためにiコンテナのLEDを周期点減させ, フィルタリングを容易にしている。なお大域的計測においては誤差100[mm]以下, 局所的計測においては誤差10[mm]以下

の高精度な計測を実現している。

(5) i コンテナ用多機能ドック (iDock)

個別の部屋におけるシステムへの窓口の役割を担う要素である。自動突出型折りたたみテーブルによって人・ロボットに対してコンテナを一時保管する場所を提供し、稼動式 RFID アンテナによりコンテナ内の物品の姿勢に因らずロバストな内容物の認識が可能となっている。また自動収納庫同様にコンテナの受渡しを容易にする構造を有している。

(6) 家庭内物流情報管理システム

稼動しているサブシステム，そして収納してある物品情報を統合的に管理する情報処理システムである。ユーザに物品の検索，登録などのインタフェースも提供する。

以上のサブシステムについて基本性能を確認する試験を実施し，仕様を満たす十分な性能を有していることを確認した。

第4章 家庭内物流支援ロボットシステムの統合

本システムで必要となる動作モード及びタスクについて整理し，タスクのうち複数のサブシステムの統合が必要なコンテナ把持・運搬タスクそして受渡しタスクについてシステム統合を行った。コンテナ把持・運搬タスクにおいてはコンテナ位置認識システムにより計測されたコンテナの詳細位置に誤差がある場合でも，その誤差をコンテナ運搬ロボットのマニピュレーション機構に実装されたコンプライアンス要素により滑らかに吸収可能なことが確認された。これにより受動機械的コンプライアンスを活用することによって，複雑なフィードバック制御が無くても物体のハンドリングを実現可能なシステムが構成可能なことを確認した。

一方のコンテナ受渡しタスクにおいては，家庭用コンテナ自動収納庫に適用された GOC により受渡し作業対象のコンテナの位置・姿勢が”Caging” 状態に拘束され，コンテナ運搬ロボットのコンプライアンス要素が効果的に作用可能であり，受渡し作業がロバストに実現可能なことを確認した。これにより GOC 状態に物体を拘束し，さらに受動機械的コンプライアンスを位置決め誤差受容及びロボットの相互干渉緩和機構として活用することにより，複数のロボットが複雑な協調動作を実装しなくても物体の受渡し動作を実現可能なことを確認した。

第5章 結論

本研究で実現されたシステム及び得られた知見についてまとめ，さらに本システムの実用化にあたって取り組むべき将来課題について整理した。

5.2 本研究で得られた知見

家庭内物流支援ロボットシステムの実現を通し、生活環境で動作する物品搬送・収納システムにおける戦略及び機構に関して、統計データの分析、理論思考、試作、実験を行い、以下のような知見を得た。

戦略的コンプライアンスの提案と家庭内で物品を取り扱うロボットシステムに導入すべき戦略の整理

- 産業用ロボットと異なり、生活環境中で物品を取り扱うロボットにおける特有の課題を (1) 生活環境の変化, (2) 物品の多様性, (3) 人の作業のバラツキであると分析した。(1.3.2 節)
- システムを設計するにあたってスキームとしての扱い, 柔軟性の必要について自動車の発展を例として整理し, 基本機能として (1) タスク, 役割, 領域・空間の規格化, (2) 補助・強化, (3) 誘導の3つが必要であると定義した。そしてそれらの基本機能を有するスキームを機械的な柔軟性との連携を考慮して戦略的コンプライアンスとして提案した。(1.3.4 節)
- 規格化の代表例としては, 家庭内での物品の多様性という課題に取り組むため, システムが取り扱う物品をコンテナケース単位とした。これはロボットのタスクの規格化であり, 人がコンテナとの物品の受渡しを行い, ロボットがそのコンテナのハンドリングを行うという役割の規格化でもある。この戦略の導入により, 家庭内で物品を取り扱う人とロボットの関係が明確化され, ロボットに必要な機能を仕様として明文化することが可能となった。(2.2.3 節)
- 補助・強化の代表例として生活環境の変化にロボットが対応するため, まず前項の規格化によってロボットの取り扱い対象と定義されたコンテナにロボットが物理的・情報的に取り扱いやすい構造, 設備を実装することとした。この中にはロボットの目であるセンサにとって安定した特徴量抽出が行える計測環境を整備するために実装した周期点滅する光学マーカなどが含まれる。これらの導入により, 日照条件に係わらずコンテナの位置・姿勢が計測可能となり, またロボット側に実装される受動機械的コンプライアンスの性能を引き出すことが出来る構造をコンテナが有することになり, 家庭用ロボットに不足しがちな環境変化に対するロバスト性を実現することが可能になった。(2.2.2 節)
- 誘導の代表例として生活環境中における人の作業のバラツキを低減させるため, 棚へのコンテナ収納作業を例として実験を行い, 物理的なガイドを用意することにより人の高い位置決め性能を誘導することが可能であることが確認された。また音・光等のインタラクティブな情報ガイドを利用することで, 作業者に特定の作業 (詳細な位置決め) の必要性や反対に作業完了の安心感を実現出来ることを確認した。これにより人とロボットが共通の対象にアクセスする場合でも, 相互の作業の実行を阻害しない仕組みを実現することが可能になった。(2.2.4 節)

Geometric object closure の概念に基づくロバストな物体操作手法の実現における知見

物体の移動という動力学的な問題を静的な幾何検討のみで整理することを提案し, 物体の操作手法の安定性を評価するための指標として Geometric object closure の概念を提案し, その指標に基づく具体的な設計検討内容を示し, その有効性を示した。

Geometric object closure の概要は次の通りである。(2.1.4 節)

- Geometric object closure は幾何的な検討に基づいて, 完全拘束でない (常時の接触を必要としない) 形態受動拘束つまり”Caging” を実現する拘束状態のことである。
- これまで提案されている Object closure ではその定義が集合論的な表現で記述されているが, Geometric object closure は幾何的な接触条件により定義されており, 作図によって実現を確認することが出来る。また, 拘束状態にある物体の姿勢を規定の範囲に制限することが出来るため実用的なマニピュレーションが実現出来る。

Geometric object closure の概念に基づく設計検討により以下の効果が期待される。

- 幾何的な検討は CAD ソフトウェアを含めた設計ツールが豊富であるため設計者の負担が少なく,

また製造時のばらつきも管理しやすいという点で実用上非常に強力である。

- 自由度の拘束であれば、静力学的な考え方のみで足りるため、動力学に精通していない設計者でも検討が行える。
- 摩擦の影響を可能な限り無視出来る方式を採用しているため、操作物体の環境（温度、湿度）変化や経年変化による影響を受けにくく、ロバストな動作が実現出来る。

Geometric object closure を実際にコンテナ運搬ロボット及び家庭用コンテナ自動収納庫に導入し、その性能を確認することで本手法の有効性を示した。

- 家庭用コンテナ自動収納庫では、コンテナ移載動作を実現する機構部（水平運搬機構）に Geometric object closure を導入し、コンテナの初期位置に誤差があるような場合でも Caging を実現して、ハンドリング可能なことを確認した。水平運搬機構においては、コンテナを把持するための準備段階、そしてコンテナを実際に把持する状態の両者ともに Caging 状態を実現するような工夫がしてある。このように作業の準備段階から Caging を取り入れることにより、外乱に対してロバストな動作が実現されることを示した。（3.5.5 節）
- コンテナ運搬ロボットにおけるコンテナ把持状態においても Geometric object closure を導入し、偏心連結ピンによってコンテナを拘束する機構を採用した。この方式により、非常にロバストにコンテナを把持し続けることが可能になり、また Caging が持つ対象物体の移動を許容する性質からコンプライアンス機構との相性が非常に高く、外乱や誤差に対して柔軟な把持動作を実現可能なことを示した。（3.4.3 節）

複数の受動機械的コンプライアンスを組み合わせることによる誤差吸収性能の実現における知見

- 並進コンプライアンス要素及び傾斜コンプライアンス要素を適切な幾何レイアウトで組み合わせることによって、対象物の位置・姿勢誤差を吸収し物体の把持動作を実現可能なことをテストベンチを用いた実験により示した。（3.4 節）
- コンテナ運搬ロボットにおけるコンテナ把持動作ロバスト性試験によって、複数の受動機械的コンプライアンスを組み合わせることによって、一般的にロボットのマニピュレーションで行われる力フィードバックやヴィジュアルフィードバックを行わずに、制御スキームとしてはオープンループの状態であっても物体のロバストな操作を実現可能なことを示した。（4.2.5 節,4.2.6 節）
- コンテナ運搬ロボットの把持タスク実現におけるコンプライアンス要素影響評価実験により、マニピュレーション機構部の並進・傾斜コンプライアンス要素のみだけでなく、伸縮機構部の並進・回転コンプライアンス要素も誤差吸収性能に大きく寄与することが分かった。ここで複数のコンプライアンス要素が協調するためには、コンプライアンス要素作動前の初期位置復帰性能が重要であることを示した。（4.2.7 節）
- 荷重負荷が加わったときにはコンプライアンス機能を停止もしくは低減させる機能が必要である。なぜならば、コンプライアンス機能は荷重負荷時に操作対象物体を不安定な状態にさせることがあるからである。これはコンテナ運搬ロボットと家庭用コンテナ自動収納庫間における i コンテナの入庫受渡しタスクの実現において受渡し完了後のコンテナの位置の誤差より確認された事項である。（4.3 節）

受動機械的コンプライアンスとの協調による Caging 間の状態遷移の実現における知見

- 一般的に Caging 状態では各々に設定された移動許容範囲が存在する。また、受動機械的コンプライアンスを用いている場合には、その稼働範囲も移動許容範囲の中に入れて検討をする必要がある。ここで許容範囲が小さい側から大きい側に状態を遷移させる場合、そのタスクの実現は容易である反面、許容範囲が大きい側から小さい側に状態を遷移させる場合には移動許容範囲を縮小させるための何らかの仕事を行うか、もしくは仕事を自動的に誘導する構造を有する必要がある。（4.3.3 節）
- コンテナ運搬ロボットにおいては、マニピュレーション機構部と伸縮機構部の両者にコンプライアンス要素が含まれており、コンテナとロボットの位置決め誤差を各々が分割して吸収をしている。

伸縮機構部は伸び時は柔軟なコンプライアンス性能を有し、縮み時はスライダの重なりが多くなるため柔軟性が低下する。つまりこの伸縮機構は移動許容範囲が形態によって異なる受動機械的コンプライアンス構造であると言える。

このように形態によって本来の伸縮という仕事と平行で移動許容範囲の縮小という仕事を行うことの出来る構造を採用したことによって、明示的に仕事をするアクチュエータを付与せずとも、2つの Caging 状態間を遷移させることが可能であることを示した。(4.3.5 節)

知見のまとめ

本論文での知見を整理すると次のように要約される。

- ロボットのタスクを明確に定義するための戦略を率先して導入することにより、これまで実現が困難とされた生活環境中で物品をロバストに取り扱うロボットシステムの実現が可能となることが分かった。
- 幾何的な検討により実現される Caging の拘束状態を活用することにより、一般にエンジニアが得意とする図面での検討によってロボットのロバストな物品操作を実現可能なことを示した。
- 受動機械的コンプライアンスの柔軟さは、物体の直接的なハンドリングにおいても、受渡し作業に見られる Caging の状態遷移においても、ロバスト性を向上させるために有効であることが明らかになった。

5.3 将来課題

本研究において実現した家庭内物流支援ロボットシステムを実用化するために必要な課題について以下に整理する。

家庭内物流情報管理システムの充実

本研究では物品の出納履歴を蓄積するフレームワークを構築したに過ぎない。一方で家庭内物流支援ロボットシステムの利点として考えられる、i コンテナ内での物品収納組み合わせの適正化や、コンテナ収納庫中での収納位置の調整などを実現するためには、出納履歴を分析する機能が必要となる。また、これらの分析を実現する機能はシステムが長時間稼働した際に始めて得られるものであり、そのためには次項の例外処理の充実も必要である。出納履歴情報の分析においては、従来のFFTのような硬い周波数分析だけでなく、人の生活リズムなども考慮した頻度、周期分析技術が必要となることが予想される。

長時間稼働用のインフラの整備

システムを長時間稼働させるためには、各ロボットのバッテリーの自動充電や、稼働領域の自動清掃機能、そして定期メンテナンスを実行するために稼働ログの蓄積などのインフラを整備する必要がある。このインフラには次項の例外処理機能も含まれる。

直近の改良項目としてエネルギーソースの改善が挙げられる、これはi コンテナ、コンテナ運搬ロボット、コンテナ自動収納庫の水平運搬機構の3者がバッテリーを用いており、バッテリー自身の大容量化はもちろんのこと、急速充電設備の組み込みなどが必要となる。バッテリーに関しては、現状全ての装置でLiイオンバッテリーを用いているが、電気自動車などで開発が進められている燃料電池やスーパーキャパシタなどの開発に注目して、今後の展開を見極めたいところである。

また長時間稼働する場合、装置の故障を判断する仕組み、そしてロボットの稼働範囲の状態をロボット自身が保全する機能が求められる。具体的には、天井裏や棚はホコリや汚れにより摩擦状態が変わってしまい、コンテナ運搬ロボットや家庭用コンテナ自動収納庫の水平運搬機構の動作に障害が発生することが考えられる。定期メンテナンスの仕組みを用意するのはもちろんのこと、ロボットのアクチュエータの一部に清掃が可能となる構造を付与することで、ロボットの動作自身が稼働範囲の状態維持に繋がるような工夫が必要となる。

例外処理機能の充実

生活環境中で長時間ロボットを動作させるためには、本論文でも議論したロバスト性の確保がまず大切である。一方で、システムが何らかの不具合によりタスクを実行出来ない状態に陥ってしまった際に、その状況を認識し、回避する手段を講じることが求められる。具体的にはエラー状態をユーザに通知する、もしくはシステム管理会社に通知するなどの対策が求められる。これらは既存の生活環境中での自動装置（エレベータや立体駐車場など）でも用いられており、インフラとしての充実が求められるため、是非生活インフラ系のサービスを提供している企業との共同研究・開発により取り組みたい課題である。

大量生産に適したi コンテナ構造の模索

家庭内物流支援ロボットシステムの効果を発揮するためには、家庭内の物品が(ほとんど)全てコンテナ内に搭載されているといった状態が好ましい。この状態を実現するためには、i コンテナを製造するコストの低減が必須のタスクであり、それに適した構造への設計変更が求められる。具体的には樹脂部品の射出成型可能形状の変更、木材部品の一部樹脂への変更、電子回路部品の表面実装部品への変更、導線ハーネスのフレキシブル基板への変更などが上げられる。

5.4 将来展望

家庭内物流支援ロボットシステムによるユーザの支援をより効果的なものにするためには、本システムを介して取得される物品の使用に関する情報を分析し、ユーザへの支援情報としてもしくはロボットシステムの動作基準としてフィードバックする必要がある。しかし、本研究における取り組みではそのような分析が可能なデータを取得出来る環境を構築するに留まった。そこで本節ではシステムの完成形として将来を見据えて、物品情報がどのように処理されるべきかについて議論する。

物品の新規購入及び廃棄タイミング検討の支援

本研究の動機である家庭内でのモノ溢れを改善するためには、モノの入出力フローを適正化することが重要であることは第1章で述べた。フローの適正化には、(1) 現在の在庫を把握すること、(2) その在庫から不要であるものを判断して廃棄すること、そして(3) 在庫に不足している、本当に必要な物品を新規購入することの3つが重要となる。従来の収納方法では廃棄のタイミングを正しく見積もることが難しく、また納戸の奥深くに収納された物品は引越し等の機会に廃棄されるのみという、廃棄品へのアクセスの問題があった。

家庭内物流支援ロボットシステムにおいては、i コンテナを用いて全ての物品に同様にアクセスすることが可能となる。また物品の使用履歴により使用頻度が著しく低い物品を把握することが可能となり、廃棄のタイミングを定量的に計画することが可能となる。さらに廃棄のタイミングが早まることによって、オークションやフリーマーケットなどを介して新しい不用品を市場に流すことが可能となり、資源の節約にも効果があると考えられる。また、食料品など賞味期限や消費期限が明確なものに関しては、それらの期限を人に通知することによって、無駄に廃棄される食料が減り、昨今話題となっている食料自給率の問題が改善されることが期待される。

購入・廃棄のタイミングは最終的には人間の判断が求められるため、システムが一意に結論を出すことは難しい。システムが行うべきは購入・廃棄の決断を下すのに過不足のない情報をユーザに提供することで、ユーザが決断を下すのが負担にならないよう支援することにある。

今後の研究課題としては、人が物品の購入・廃棄を決断する際に重要と考えている、物品パラメータの抽出と、そのパラメータをどのように整理・可視化すれば容易に結論が下せるようになるかを明らかにすることが挙げられる。

人の緩やかな繰り返しに対応した物品の搬送・収納

佐藤が指摘するように [79]、人は緩やかな繰り返しの中で生活をしていると考えられる。つまり1日24時間、1年365日全く同じ時間、日の過ごし方はないが、朝起きて、夜寝るまでにある一定のパターンで生活を送っていると推測される。ここで人はコンピュータや自動機械と異なり、完全に同一のパターンではなく、ある程度の誤差を内包するという点で緩やかな繰り返しと呼んでいる。さらに、家庭内で使用される物品はその生活パターンの中で使用され、そして収納されるということを繰り返す。

更に日本のように四季がはっきりとしているものは、季節というパターンによっても使用する物品が異なってくる。例えば寒さを防ぐマフラーや手袋は冬のある特定期間に頻繁に使用するものであるし、寝具や調理器具に関しても季節に応じて使用頻度は異なると考えられる。

このように様々な周期で訪れる、人の生活の緩やかな繰り返しを分析することで、人がある特定の物品を要求する前に、ロボットがその物品を用意することが可能となる。

例えば朝起床したら、朝の出かける仕度に必要な道具（化粧品、ネクタイなど）が収納されたi コンテナが一番アクセスしやすいサイドボードの上に設置してある。また寝る前になったら、お気に入りの書籍や雑誌が収納されたコンテナがベットの脇に設置してあるなどが考えられる。

このような支援を実現するためには、各々の物品、そしてそれらが収納されたコンテナの使用頻度及び使用間隔の分析を行い、数値的な表現が難しい緩やかな繰り返しを認識するアルゴリズムの確立が求められる。

このアルゴリズムの確立のためには、本研究で構築したi コンテナ内の物品認識技術及びデータ蓄積技

術が活用される。

i コンテナの収納場所適正化

家庭用コンテナ自動収納庫の節においても述べたが、本システムは収納スペースとして天井裏空間を活用することを提案している。これまでも天井裏空間を収納として利用している家屋は比較的多く見られたが、天井裏のアクセスの悪さから中短期的なものを保存するのには向かなかった。しかし、収納空間の出入庫をロボットに任せることでアクセスの問題は解決されるため、天井裏空間をこれまで以上に活用することが期待される。

しかし、それでも日々何度も使用するものは可能な限り身近に設置してあった方が、アクセスの手間・待ち時間が少なく便利である。前述の人の緩やかな繰り返しへの対応と同様に、モノ及びコンテナへのアクセス頻度を解析し、アクセス頻度の高いものは身近に設置し、頻度の低いものは天井裏の奥に設置するなどの処理が必要となる。また、ここでアクセス頻度は季節や、時間帯によっても変化するため、棚型自動収納庫の収納位置はそれらの情報も踏まえて検討されなければならない。

このような技術を実現するためには、まず自動収納庫におけるアクセスのしやすさの解析とそれに基づく設置優先度の決定。そして、モノ・コンテナの使用頻度分析に基づくアクセス優先度の設定、そして両優先度に基づくコンテナの並べ替えアルゴリズムの構築などが考えられる。さらに、自動で並べ替えを行うとユーザが物品の所在を見失う可能性があるため、人の記憶とアクセスのしやすさに関する分析が必要となる。

おわりに

本研究はこれまでに多くの実績が存在する産業用ロボットとは異なり、人とロボットが共存することが求められる生活環境中において実際に人への物理支援を行うロボットシステムを構築し、その構築に必要な戦略及び機構上の基礎的概念を整理した点で新しい研究である。

現在、ロボット研究は未だその多くが基礎技術の開発を行うフェーズであるが、本研究は生活環境中で人の支援をするロボットシステムというアプリケーション側から技術を見直し、一つ一つの技術を積み重ねた上でロボットシステムとして全体を構成している点で、ロボット研究の中で実用時の問題という課題に取り組むことが出来る数少ない実践例である。

本システムにおける議論が必ずしも全てのロボットに当てはまる普遍的な議論であるとは言えないかもしれない。しかし、実装された各サブシステムにおいて積み重ねられた議論そして問題の解決方策は、他の構成を採用したロボットシステムにおいても必ず取り組む必要があるものであり、その意味では今後のロボット研究における応用時の基礎的課題を網羅した研究であると言える。

今後のロボット研究において本研究が提案する”戦略と機構の最適化”の重要性が広く認識され、より多くのロボット・知能化システムが人の役に立つようになり、人がより創造的な活動に従事することが出来るような社会が築き上げられることを期待する。

参考文献

- [1] 国土交通省住宅局住宅政策課著 住宅法令研究会 (編集). 最新 日本の住宅事情と住生活基本法. ぎょうせい, 2006.
→ 国勢調査等の結果を元に日本の住宅事情についてデータを整理し, 1問1答形式にした非常に分かりやすい書籍。2006年6月に新たに公布・施行された住生活基本法の要旨を簡潔にまとめている。ISBN-13:978-4324079850.
- [2] 内田青蔵. 「間取り」で楽しむ住宅読本. 光文社新書, 2005.
→ タイトルの”楽しむ”という言葉とは裏腹に, 明治以降の日本の住宅の歴史・変容について詳細に述べている, 歴史資料としての価値も高い書籍。本書では明治以降の文明開化(西欧化)によって, 日本の住宅がどのように変わっていったのかについて特に詳しく述べている。注目すべきは, 明治の西欧化においては和風のモノと西欧風のモノ(例えば和装, 洋装など), 両者が生活に必要であったため, 住宅ではモノ溢れが起こっていたという事実。また戦後においても, 狭い日本の住宅について想いを馳せた建築家たちが, 吹き抜けを上手く活用した住宅を設計したり, ひいては”玄關のない”住宅まで設計していたという事実である。本書より日本における住居改善の努力は少なくとも100年前から続けられていたことになり, その努力の歴史そのものが非常に興味深い。ISBN-13:978-4334032890.
- [3] 吉田桂二. 納得の間取り 日本人の知恵袋 日本人らしい生活空間とは. 講談社, 2000.
→ 住宅の間取りについて, 日本人の古くからの知恵を活用することを提案している。具体的には部屋に機能を割り振り専用化するのではなく, 複数の目的に使用することを提言し, その実現には小間取りをやめて, 広がりのある空間を家の中心に作ることを提案している。理論的な話の流れとしては, やや一方的なものもあるが他の多くの間取り Howto 本と比較すると, そのもののポリシーにまで言及しているという意味で非常に意義深いと言える。ISBN-13:978-4062720519.
- [4] 佐藤和歌子. 間取りの手帖 remix. 筑摩書房, 2007.
→ 特徴的な間取りについて, 1件1文ずつの端的なコメントを添えた間取りの手帳。間取りから推測される居住者の生活スタイルを, 著者の想像により膨らませコメントしている点が面白い。中には設計者の涙ぐましい努力が感じられる間取りもあり, 日本独特の居住環境へのこだわりが感じられる書籍であると言える。ISBN-13: 978-4480422897.
- [5] 長岡一三. ハンドリング機器工学の基礎 -搬送技術のすべて-. 工業調査会, 1988.
→ クレーン, コンベア, 無人搬送者, ロボットなど産業に用いられる搬送機械について総括した書籍。いわゆるマテハン(マテリアルハンドリング)が産業の現場でどのように実施されているかを知るために重要な書籍である。一方でタイトルの工学というほど学術的な整理がされているとは言い難く, 様々な装置を列挙している参照資料としての分析に留まっている。ISBN-13:978-4769320777.
- [6] E. Guizzo. Three engineers, hundreds of robots, one warehouse. *Spectrum, IEEE*, Vol. 45, No. 7, pp. 26–34, July 2008.
→ 配送センターの中でパレットの搬送を行う実用化されたロボット群について紹介した記事。従来ベルトコンベア等により固定的に実現されていた物品搬送をロボット群に置換することにより, 柔軟な物流を実現することが可能となる。対象パレットの認識やロボットの自己位置計測にバーコードを利用していたり, 運搬するパレットを規格化していたりと, 採用している手法は本研究と

の関係が浅くない。何よりも多数のロボットを同時に動作させているだけでも、実用面では賞賛に値する。

- [7] 中原智治, 山根剛志. 自律移動ロボット用人検出方法. 松下電工技報, Vol. 53, No. 2, pp. 81–85, May 2005.
- 松下電工が開発した病院内でのカルテ搬送ロボット”HOSPI”の人検出に用いられている手法に関する論文。人検出のためにカメラを用いており、人の頭部の形状が円形状に近似されることを利用して、円ハフ変換を用いて抽出を行い、サポートベクタマシンにより認識を行っている。HOSPIは人検出用のカメラのほか、足首を検出する Laser Range Finder や障害物を検出するための超音波センサなどが実装されている。基本的にマーカやラインなどのガイドは用いずに LRF の値等から自己位置同定を行っているようである。
- [8] [Online] 慶応義塾大学. 病院搬送用ロボット”mkr-003”. http://autos.goo.ne.jp/news/industry/image_406605.html.
- Robo Japan 08 に出展された村田機械と慶応義塾大学との共同開発のロボット。詳細は不明。
- [9] C. Cosma, M. Confente, M. Governo, and R. Fiorini. An autonomous robot for indoor light logistics. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3003–3008, 2004.
- 日用品を扱う倉庫において、パッケージ単位の運搬を実行する軽量物流ロボットの開発について述べた論文。画像によるパッケージ位置の認識、真空ポンプを用いたパッケージのハンドリングなどの個別の技術要素の統合に主眼を置いた論文。各技術要素単位では特に珍しいものはないが、システムの統合という意味で評価出来る研究である。
- [10] E. Prassler, E. Stroulia, M. Strobel, and T. Kaempke. Mobile robots in office logistics. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Industrial Robots*, pp. 153–159, Milan Italy, 1996.
- オフィス内においてメールを回収したり配達したりする移動ロボットの開発に関する論文。筆者らも言及しているように、開発されたロボットに用いられている技術要素1つ1つは1996年当時でも決して新しいと言えるものではないが、各要素を統合することによって見えてくる技術課題について整理を行っているという意味で評価出来る論文である。
- [11] 高橋隆行, 王志東, 中野栄二, 大久保宏樹. オフィス・メッセンジャロボット『正宗 ii』による書類運搬作業の実現. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, pp. 2BII1–3, 仙台市, June 1998.
- オフィス環境で軽量の物品を搬送するために開発したロボットに関する論文。マニピュレータにおける力制御の必然性やシステムソフトウェアのモジュール化の重要性について言及している。
- [12] L. Petersson, P. Jensfelt, D. Tell, M. Strandberg, D. Kragic, and H.I. Christensen. Systems integration for real-world manipulation tasks. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2500–2505, 2002.
- (模擬)生活環境内で物品搬送を行うロボットのシステム統合に関する論文。統合の対象となったロボットでは典型的な物品搬送ロボットと同じく、移動台車の上にロボットアームを搭載し、アームの先端には Barrett Hand が実装されている。ヴィジュアルサーボ、把持ガイドなどが統合されている点では評価出来るが、実現されている作業がボックス形状の物品を把持して人に渡すのみで、実際に人の役に立つロボットの実現までには、まだまだ課題が多い研究である。マニピュレーションの研究としてみても、対象物体をボックス形状で単純化してモデリングしているのは議論の必要があるだろう。
- [13] Jun Miura, Yoshiaki Shirai, Nobutaka Shimada, Yasushi Makihara, Masao Takizawa, and Yoshio Yano. Development of a personal service robot with user-friendly interfaces. In *Proceedings of International Conference on Field and Service Robotics*, pp. 293–298, July 2003.
- 冷蔵庫の中の物品を取り出し人に受け渡す支援の実現を目指したサービスロボットの統合に関する研究。Vision による物体認識、ロバストな音声認識、物品のマニピュレーションの3つの機能に関して言及している。前者の2つに関しては特別に新しい枠組みを利用しているとは言えない

- が、3つめのマニピュレーションにおいてはアームの軌道計画に関して、人の教示や実行軌道の補正など基礎的な部分が記述されており、参考になる。
- [14] K. Yamazaki, T. Tsubouchi, and M. Tomono. Modeling and motion planning for handling furniture by a mobile manipulator. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1926–1931, Oct.-Nov. 2007.
→ 家具の扉を開けるという作業を画像処理と人による教示により実現する研究。採用されている基礎技術においては特別に目新しいものはないが、システムインテグレーションの研究として評価すべきであろう。
- [15] K. Yamazaki, M. Tomono, T. Tsubouchi, and S.-i. Yuta. A grasp planning for picking up an unknown object for a mobile manipulator. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2143–2149, May 2006.
→ 未知形状の物体をカメラにより撮影した複数の画像より3次元サーフェイスデータとして復元し、安定した把持を実現する研究。把持の安定性に関して、接触面積、重力バランス、マニピュレータ姿勢、ロボットの可操作性などからなる評価関数を定義し、その評価関数のポテンシャル場の中から最適解を探索することにより把持戦略を選定している。但し、評価関数における重み付け係数は現状では経験的な値を使用しているようで、それらの値と選択される把持戦略との対応の明確化が期待される。
- [16] Nak Young Chong, H. Hongu, K. Ohba, S. Hirai, and K. Tanie. A distributed knowledge network for real world robot applications. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 187–192, Sept.-2 Oct. 2004.
→ 知識（情報）環境を構築することにより、ロボットによる動作全般そして物品のハンドリングを容易にすることを試みた研究。物品（食器）や机にRFIDタグを埋め込み、そこに物品のハンドリング特性などを記述し、ロボットはその情報を頼りにタスクを実行するというフレームワークを提案している。コンセプトとしてロボティックルームと近いところがあるが、ロボットの代表としてPA10を用いており、ロボットの形態をも環境型にするというポリシーではないようである。
- [17] 大場光太郎, 大原賢一. ユビキタス・ロボティクス. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 505–508, 2007.
→ 環境中にロボットの様々なモジュールを散在させることを”ユビキタス・ロボティクス”と呼称し、その中でも環境構造を以下に多くのロボットにとって汎用に（筆者らはユニバーサルという形容詞を用いている）構成するかという議論をしている。実際に構築しているシステムとしてはRFIDタグを用いてロボットの動作情報を記述したり、アクティブキャストと呼ばれる分散型のキャストを用いた協調ロボット運搬作業などを提案している。本論文自体は「環境情報構造化プロジェクト」の概要を示すプロジェクトの紹介論文に位置付けられる。
- [18] 神田真司, 村瀬有一, 岡林桂樹, 浅田務. サービスロボット: enon. *FUJITSU*, Vol. 57, No. 3, pp. 12–26, May 2006.
→ サービスロボット”enon”について紹介した、富士通株式会社の技報の記事。開発の動機やスペックの概要、想定アプリケーション、安全対策への取り組みなど”enon”の概要について述べている。
- [19] [Online] Fujitsu Automation Ltd. Enon. <http://www.frontech.fujitsu.com/services/products/robot/servicerobot/>.
- [20] 廣川潤子, 松日楽信人, 小川秀樹, 和田達也. ユニヴァーサルデザイン・ウィズ・ロボットのコンセプト提案—生活支援ロボットの家庭内における作業事例の検討—. 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 6, pp. 476–484, 2008.
→ 東芝研究開発センターが開発した”ApriAlpha”を拡張し、ユニバーサルデザインの概念を拡張することで、家庭内における搬送作業の実現を狙った研究。東芝研究開発センターは多摩美術大学との産学連携による、新しいデザインの創出に取り組んでいるが、本論文はその成果の1つである。専用のトレーやコンテナを用いるという意味ではiコンテナとコンセプトとして近いところがあるが、機構やロバスト性まで検討が行き渡っておらず、あくまでコンセプトの提案論文に留まって

いる。

- [21] 福頼一平, 中村泰, 松本吉央, 石黒浩. 生体ゆらぎを規範とした多自由度アームロボットの柔軟な制御. 第 13 回ロボティクスシンポジウム, pp. 517–522, 香川, March 2008.
- ロボットアームの位置制御をアームの明示的なモデルを構築せず実現しようという試み。実際に実現されているのが, アーム先端が特定の高さになるように維持し続けるというシンプルな例のため, そのまま本手法の応用性を評価することは困難であるが, 複雑化するロボットの機構及び知能モデルを解決する 1 手法として興味深い。
- [22] 太田順, 山本正和, 池田和生, 相山康道, 新井民夫. 記憶機能付き画像マークによる作業移動ロボットのための環境整備. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 5, pp. 670–676, 1999.
- QR コードを利用したマーカを空間に配置し, ロボットの支援を行う空間知能化研究の 1 つ。QR コード内のメモリデータとしてマーカの座標や作業方法などを記憶させている。1999 年当時はまだ 2 次元コードもそれほど普及しておらず, カメラ・リーダも整備されていない時代であったので, システム統合としての苦勞が感じられるものの, 書き込むデータの構造や規格化などに関しては言及しておらずあくまで試作的な研究と位置付けられる。
- [23] R. Katsuki, J. Ota, T. Mizuta, T. Kito, T. Arai, T. Ueyama, and T. Nishiyama. Design of an artificial mark to determine 3D pose by monocular vision. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 995–1000, September 2003.
- ロボットマニピュレータによる Pick&Place 操作を支援するための人工マーカに関する研究。QR コードなどの 2 次元コードの普及前の研究であり, 空間知能化の研究としてはさきがけ的な研究であると言える。一方で, マーカ自体の性能としては AR タグなどと比較して必ずしも優位にあるとは言えず, また Vision 特有のオクルージョンの問題など解決しなければならない課題は多い。
- [24] K.B. Shimoga. Robot grasp synthesis algorithms: A survey. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 230–266, 1996.
- ロボットハンドの統合アルゴリズムに関して整理したサーベイ論文。次のような項目に分けて, これまでの研究が整理されている。(1) 冗長ロボットハンド (アーム) における器用さの指標。(2) Robotic grasp における平衡。(3) Robotic grasp における安定。(4) Robotic grasp における動的挙動の実現 (1) の器用さの指標に関しては多くの指標が把持行列 (G) の最小特異値に依存するため, それらに依存しない 2 つの方法 (関節角度の偏差を最小化する方法, タスク楕円体の体積を最大化する方法) が有効であると指摘している。これらの方法以外では, 結局把持行列の最小特異値を最大化するのが重要であることになる。(2) の把持平衡問題では, 拘束条件からのユークリッド距離を最大化するような目的関数を設計することで安定化することが可能であり, これは線形計画法により解くことが出来るとしている。(3) の安定の問題ではインピーダンス行列 (M,B,K) を正定値にすることが安定に繋がるとしている。(4) の動的把持の問題に関しては, 未だ取り組んでいる研究が少ないとコメントしつつ, 動的挙動を固有振動数行列と減衰比行列によって表現することにより, 取り扱いが容易になると指摘している。また論文の最後では, これまでの数多くの研究を時系列に整理した一覧が掲載されており, その整理に目を通すだけでも読む価値のある論文である。
- [25] 吉川恒夫. マニピュレーション技術. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, pp. 408–410, 2005.
- 吉川先生がロボットに取り組むに至った歴史から始まり, 可操作性, 動的ハイブリッド制御などの重要な功績がどのような背景により導き出されてきたのかを記した論文。マニピュレーション技術の発展を時系列的に把握する意味では参考文献も豊富で貴重な資料である。
- [26] 相山康道, 稲葉雅幸, 井上博允. グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 114–121, 1996.
- グラスプレス・マニピュレーションの分類と中でも Pivot 操作による物体の移動作業について述べた論文。環境との接触状態によるグラスプレス・マニピュレーションの分類は非常に簡潔で理解し易い。また物体の拘束状態による分類は中村が提言している Work Closure との関連性に言及し, 整理している。結論で述べられている pushing, tumbling, pivoting の定性的な比較表は Closure の概念を整理する上で非常に重要なポイントとなる。本論文で特徴的なのはグラスプレス・マニピュレーションも環境との接触を 1 つの仮想指とみなすことで, グラスプマニピュレー

ションの知見を生かそうという姿勢が見られるところである。

- [27] Matthes T. Mason. Mechanics and planning of manipulator pushing operations. *Proceedings of International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 53–71, 1986.
- 2次元平面物体の Pushing 作業に関する論文。主に Pushing 作業時の物体の回転方向及び回転中心に関して詳細な分析を行っている。Closure との関連として考察すると、エンドエフェクタの運動方向によらず平面物体の回転方向が同一になる Pushing 方法が存在するという点は興味深い。関連研究の章は良く整理されており 1970, 80 年代の (グラスプレス) マニピュレーション研究を理解するのに必要な論文が列挙されている。
- [28] K.M. Lynch. The mechanics of fine manipulation by pushing. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2269–2276, May 1992.
- Mason と比較的近い手法により pushing の解析を行っている。運動学的な分析と動力学的な分析の2段階に検討を分け、それらを最後に統合しているところが特徴的である。一方で動摩擦も静止摩擦も全て同一であるという仮定を置いているところには、Mason の論文と同様、議論の余地があるだろう。
- [29] 大川善邦, 横山乾. 移動ロボットによる箱押し作業の制御. *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 1, pp. 148–155, 1993.
- ロボットによる箱押し作業の制御のための運動方程式の導出に関する論文。ロボットに実装されたモータの特性も含めた定式化を丁寧に行っている。実験により摩擦係数のパラメータなどを適切に同定することにより、導出した運動方程式と実機の挙動が適合することを確認している。
- [30] 栗栖正充, 吉川恒夫. 押し作業における対象物の軌道計画. *日本ロボット学会誌*, Vol. 13, No. 8, pp. 1115–1121, 1995.
- 水平な床面状に設置された対象物を目標位置、姿勢に1つのアームで押して移動させる軌道計画に関する論文。状態方程式を導出し、そこに物理的な意味の拘束条件を加えることによって定式化された問題に対して、最適制御問題として数値解を求めるという、ロボットの動作計画としてはある意味でオーソドックスな研究。本論文は計算機上の検証に留まっているが、問題の設定の中で仮定としておいている摩擦力の作用点及びその力の大きさが普遍であるという仮定は通常的环境下では妥当とは言えない仮定であり、その実用性において疑問が残るところである。
- [31] Y. Maeda, Y. Aiyama, and T. Arai. Planning of quasi-static graspless manipulation. In *Proc. of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, pp. 98–103, 2001.
- 準静的な力学条件における物体の可動方向を検討することで、グラスプレスマニピュレーションの作業計画を実現するアルゴリズムに関する研究。関連研究も良く整理されており、読みやすい論文である。段差の乗り越えにおいて、人が直感的に妥当だと理解可能な Pushing と Tumbling の切り替えが自動的に実現出来ている点は非常に評価出来る。
- [32] ZhiDong Wang and V. Kumar. Object closure and manipulation by multiple cooperating mobile robots. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 394–399, 2002.
- 物体の運搬時に一般的にはエンドエフェクタと対象物体との常時の接触を仮定する”grasping”を想定していることが多い。しかしこの常時の接触を実現するのは非常に困難であり、故にロボットハンド分野における未達成の課題は多い。一方で本論文では常時の接触を必要としない”caging”による物体の搬送を想定しており、この”caging”状態で物体を常時拘束していることを”Object Closure”と定義し、その実現方法について議論している。また本論文では集合論的に”Object Closure”の議論をしているため幾何的な検討についての更なる検討が必要であると言える。
- [33] 榎田諭, 前田雄介. 多指ハンドによる3次元ケーシングの基礎的考察. 第8回(社)計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 689–690, 広島県広島市, Dec 2007.
- 多指ハンドによって3次元空間内でのケーシング条件について考察した論文。考察では球とリングの基礎的な構造物のケーシング条件を導出している。球やリングは直感的にケーシングを導出可能な対象物のため3次元的に取り扱うことも容易であるが、複雑な形状の場合、解析的にケーシングの判定をするのはなかなか困難であろう。その意味ではまだまだ課題の多い研究分野である。

- [34] 中村仁彦. 把持とあやつり. 計測と制御, Vol. 29, No. 3, pp. 206–212, 1990.
→ 物体の把持とあやつりの問題について整理・紹介した論文。ここでは把持とあやつりを「(A) 対象の運動に必要な並進力, 回転力の合力を求め, (B) その合力を作り出す各指力に分配し, (C) 各指力を実現する制御系を実現する」問題と簡潔に定義している。また把持とあやつりの双対性として Form Closure と Force Closure の概念を示し, それらが線形計画法における最適化問題において双対であることを紹介し, 幾何的な完全把持 (Form Closure) と摩擦なし点接触でのあやつり (Force Closure) が等価な条件の下で成立することを紹介している。
- [35] Tsuneo Yoshikawa, Masanao Koeda, and Hiroshi Fujimoto. Shape recognition and optimal grasping of unknown objects by soft-fingered robotic hands with camera. In *Proceedings of 11th International Symposium on Experimental Robotics*, pap102s2, Athens, Greece, July 2008.
→ ハンドの指の1つに全方位カメラを取り付け, 物体の断面形状を計測し, その形状に合わせて把持戦略を決定するという研究。但し, 安定した把持状態を記述する数式に関しては現状, 議論の余地がある。ハンド自体は指先を柔軟構造にしており, これまで指を点接触として表現することにより, 厳密に拘束状態を解析してきた吉川先生のロボットハンドの研究とは少し方向が異なる。
- [36] 斉藤俊彦. くるまたちの社会史-人力車から自動車まで. 中央公論社, 1997.
→ 日本における”くるま”(自動車だけでなく輪で動く機械全般) の発展, 歴史について整理した新書。自動車に関する記述は書籍の半分程度であるが, 関東大震災後の社会的背景, 円タクなどエンドユーザと自動車との関係などが簡潔に整理されている資料である。 ISBN-13: 978-4121013460.
- [37] Erik Eckermann(原著), 松本廉平(翻訳). 自動車の世界史. グランプリ出版, 1996.
→ 自動車開発の歴史について整理した書籍。自動車の技術的な開発経緯に関しては, 各時期の平行した技術開発について詳細に記述してあり, 現在の自動車への技術の変容が把握出来るという意味でも非常に有用な本である, 一方で自動車を取り巻くインフラ等の環境に対する直接的な記述は少なく, 技術の移り変わりから推測出来る範囲でしか議論出来ないのが少々物足りないところである。 ISBN-13: 978-4876871759.
- [38] 大場光太郎. 環境と作業構造のユニバーサルデザイン. 第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3G3-04, 兵庫, September 2008.
→ ロボットのための環境構造化についての概念論文。環境構造化を物理的な方策と知識的な方策の2種類に分類し, それぞれにおいて自動車との発展と比較して整理している。
- [39] 日本ロボット学会(編集). 新版 ロボット工学ハンドブック. コロナ社, 2005.
→ ロボット関連の技術一覧を把握出来る資料。ロボット研究で著名な先生方が執筆されており, 参照論文も多く, 各技術の概要を短時間に理解するためには重要な書籍である。 ISBN-13: 978-4339045765.
- [40] 吉川恒夫. 把持と操りの基礎理論 1. 受動拘束と能動拘束. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 7, pp. 950–957, 1995.
→ マニピュレータ, ロボットハンドの基本的な考え方となる「拘束」について解説した論文である。拘束を大きく形態受動拘束 (Passive Form Closure), 力受動拘束 (Passive Force Closure) そして力能動拘束 (Active Force Closure または単純に Active Closure) の3つに分類・整理し, 各々の具体的な例を提示している。Closure の概念を理解するために非常に有用な解説記事であり, Form Closure の必要十分条件の導出においてはオリジナルの Lakshminarayana の論文よりも簡潔で理解しやすい。
- [41] Matthew T. Mason. *Mechanics of Robotic Manipulation (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, 2001.
→ いわゆるロボットマニピュレータに関する教科書ではなく, 物体の操作全般に関する教科書。そのため, 機構学, 摩擦, 準静力学, 打撃, 動力学と物体の運動に関して基礎的な内容から幅広く解説を行っている。多自由度アームやロボットハンドではない方法による物体の操作を行う場合においても参考になる書籍である。 ISBN-13: 978-0262133968.
- [42] 平井慎一, 若松栄史. ハンドリング工学 (ロボティクスシリーズ). コロナ社, 2005.
→ ロボットによる物体のハンドリングに関する基礎情報を整理した本。摩擦, 接触, 剛体の運動

- など基礎的なことが簡潔にまとめられており，非常に読みやすい。しかし，クロージャやコンプライアンスに関する記述はあまり詳細ではないため，文献を参照する必要があるだろう。 ISBN-13: 978-4339045253.
- [43] 平井慎一. 凸多面錐理論に基づくマニピュレーションの運動学・静力学とそのマニピュレーション計画問題への応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 68–83, 1999.
- 位置・力ハイブリッド制御, Form closure, Force closure などこれまで個別に取り扱われてきたマニピュレーションにおける運動学・静力学を, 凸多面錐理論を導入することで統一的に取り扱う方法論に関して述べた論文。凸多面錐理論における Span 及び Face 型式のベクトル集合の表現方法とそれらの集合論としての取り扱いに基づく, 演算アルゴリズムの整理は非常に簡潔であり理解し易い。マニピュレーション計画問題へのアルゴリズムの適用例も示しているが, 結論としてマニピュレーション問題の多くは不等式問題として定式化されるため凸多面錐理論の適用により簡潔な解法が示される, また計画問題においては一般的に評価関数を最大化(最小化)する問題として表現されるが, 繰り返し収束演算における各々のステップにおいては評価関数を増加(もしくは現象)させるという不等式問題として定式化されるため, ここでも凸多面錐理論が適用可能ということになる。ロボット学会の総合論文として相応しい, 普遍的な知見を示している重要な論文であると言える。平井の著書である”ハンドリング工学”のベースとなる総合論文。教科書的な扱いであるハンドリング工学と比較して, 数式の記述が詳細であるため, 一部の項目に関しては, こちらの論文の方が理解が容易である。
- [44] Franz Reuleaux. *Kinematics of Machinery*. Dover Publications Inc, June 1976.
- 物体の拘束, リンク, そしてその軌跡など, 機構学における重要な検討事項を広く網羅した重要な書籍。挿絵も豊富で実物の機械構造を例に解説をしているので, 非常に有用な情報が多い。一方, 比較的古い文体の英語で記述されているので, 多少読みづらい点は否めない。 ISBN-13: 978-0486611242.
- [45] B. Dizioglu and K. Lakshiminarayana. Mechanics of form closure. *Acta Meehanica*, Vol. 52, pp. 107–118, 1984.
- フォームクロージャについて解説した論文。Lakshiminarayana が第 1 著者の論文は現在では入手が困難であるが, 本論文は Web 上より入手が可能である。物体の 3 次元空間内の動きを幾何的に完全拘束する Form closure に必要な接触点数などの解析が行われている。しかし, その定式化, 証明はあまり丁寧にはされておらず大枠を把握するためには吉川の論文を読んだ方が理解は容易である。
- [46] V.-D. Nguyen. Constructing force-closure grasps. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1368–1373, Apr 1986.
- 2 次元平面の物体を操作する際に Force Closure を構成するための条件について整理した論文。Force Closure とはある物体を把持(拘束)している際にその接触点での作用により, 任意の力・モーメントを対象の物体に対して加えることの出来る状態のことを指す。基本的な接触の解析から Force Closure の一歩手前である Torgue Closure などの解析まで非常に丁寧に解説されている。また特徴的であるのがエッジやコーナに接触するソフトフィンガの扱いにおいて丁寧に解析しており, 人間が物体を把持する際にエッジやコーナを掴む理由についても記述している。また重力は接触ではないが物体を拘束する役割を担うものだと言及している。
- [47] V.-D. Nguyen. Constructing force-closure grasps in 3D. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 240–245, Mar 1987.
- 1986 年に執筆された論文を 3 次元の検討に拡張した論文。2 次元で検討された緻密さはない。
- [48] 中村仁彦. 指の制御. 計測と制御, Vol. 30, No. 5, pp. 395–399, 1991.
- 把持とあやつりにおける安定性に注目し, 指の制御に関して整理した論文。把持における安定性を 3 種類に分類し, 各々の安定性とコンプライアンス制御, 内力(強く握る, 弱く握る), Force Closure との対応を整理している。
- [49] J.D. Morrow and P.K. Khosla. Manipulation task primitives for composing robot skills. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3354–

3359, Apr 1997.

→ ロボットマニピュレータのスキル実現をロボットのプログラムベースで行うのではなく、タスクベースで行うという提案をしている論文。2つの剛体の相対自由度の関係を記号ベースで整理している点などは非常に簡潔で評価出来る。一方で筆者が”Sensorimotor Primitives”と呼んでいる、制御 primitive の構築部に関しては基礎的なものが実装されているに過ぎず、筆者も認めているが、本論文で提案しているタスクベースの制御スキームの実現性を訴えるには少々不足した内容であると言わざるを得ない。

- [50] 王志東, 脇田淳一, 平田泰久, 小菅一弘. 複数モバイル・マニピュレータによる物体の caging の制御. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2P2-1F-D2, 函館市, May 2003.
- Object closure の概念をモバイルロボット上に設置したマニピュレータにより実現しようとする試み。概念としては IROS2002 の論文から大きく進捗はしていないが実際の移動ロボットに実装する上での問題に触れている点で重要である。
- [51] David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoint. *Proceedings of 11th International Symposium on Experimental Robotics*, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110, July 2004.
- [52] Shunji Yamanaka. Solutions by design : The power of steady experimentation and observation reveals new directions for technology. *AXIS*, Vol. 111, pp. 29–33, 2004.
- 山中によって開発(デザイン)された Suica 用自動改札機の Suica 読み取りコンポーネントに関する記事。デザインにより技術を克服するというアプローチの実例を示している。山中は 1996 年の報告書の最後を「これらのデザインガイドラインが、技術的過渡期の対処療法であることを忘れてはならない。人が自然にとる動作に技術を合わせることが理想であり、デザインの誘導によって、恣意的な動作を誘導する事は次善の策である」と結んだという。エンジニアとデザイナー両者*1共に、この結びの言葉から得るものは大きいであろう。
- [53] [Online]BL AUTOTEC Ltd. リストコンプライアンス / R C C デバイス. <https://www.bl-autotec.co.jp/FA/05rcc/05rcc.html>.
- 、日本国内で RCC(Remote Center Compliance) を販売しているメーカ。最近ではトルクセンサなどのほかに小型のホビーロボットの販売も行っている。
- [54] D.E.Whitney. Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 104, pp. 65–77, 1982.
- 機械的なコンプライアンスに関する詳細な研究の起源とも言われる論文。Peg-In-Hole 作業におけるピンと穴との接触状態について、その断面形状を用いて詳しく準静的なモデリングを行い、実験との比較を行っている。解析の中でジャミングの発生する原因がピンと穴との 2 点での接触であることが示され、2 点での接触状態を可能な限り回避するために、RCC を用いて仮想的に回転中心を配置することの有効性を訴えている。その一方でスライド機構により位置ミスを吸収する float 機構に関してジャミングを回避するのに有効でない指摘している点も興味深い。
- [55] D.E.Whitney and J.M. Rourke. Mechanical behavior and design equations for elastomer shear pad remote center compliances. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 108, pp. 223–232, 1986.
- RCC の弾性ゴム構造の非線形性について注目し、より正確な RCC 設計を実現するための設計計算法に関して議論をしている論文。ここでは RCC の剛性中心距離を正確に求めることに主眼を置いている。代数的な表現(高次関数)によってバネの非線形性を表現する静的な設計方法と弾性の行列モデルを用いた数値解析による動的モデルの 2 手法が示されている。両モデルとも実験結果との高い相関を見せており、ゴム構造の非線形性を考慮に入れることが設計に重要であることが示されている。またその非線形性に対処するために 2 つの弾性体によって可動プレートを上下から与圧をかけて挟み込む構造が提案されている。私見としてはゴム弾性体に与圧をかけた状態を維持すると、剛性特性が経年劣化することが知られており、実用には多くの課題があると考えられる。

*1 そもそもこの日本の分け方こそが間違っているとも考えられる。機械エンジニアも何かを最適化する作業を行っているという意味においてデザイナーであるのだから。

- [56] Southern W. R. and Lyons C. G. The study of a passive accommodation device in robotic insertion processes. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 124, pp. 261–266, March 2002.
- Whitney の提案した準静的なモデルの再検討を行っている論文だが、特に新しい指針が示されているわけではない。
- [57] Sangcheol Lee. Development of a new variable remote center compliance (vrcc) with modified elastomer shear pad (esp) for robot assembly. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 193–197, April 2005.
- 、ゴム弾性体の中心部に剛体（ボルト）を貫通させ、そのボルトの貫通深さによって RCC の特性を変化させる VRCC の開発に関する論文。非常にシンプルな構造で RCC の特性を変更出来ることは産業実用においては重要であり、注目に値する論文である。一方で RCC 設計においては可動プレートを支える複数のゴム弾性体の特性のパラツキによって性能が安定しないことが D.E. Whitney らによって指摘されており、マスコプロダクトとしての性能確保が今後課題になると推測される。
- [58] Seung kook Yun. Compliant manipulation for peg-in-hole: Is passive compliance a key to learn contact motion? In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1647–1652, 2008.
- Peg-in-Hole 作業における受動的コンプライアンスの重要性について議論した論文。論文の中では、2次元の挿入作業をバネ・ダンパ系を持つマニピュレータに強化学習によって学習させた場合のコンプライアンス要素の影響について、Simulation を用いて議論をしている。結論としては関節が柔軟であればあるほど、学習の収束は早く、またノイズ耐性が強くなる傾向があることを示している。またサンプリング周期が低くても機械的柔軟性が高ければ作業を遂行可能なことを示している。挿入の模擬が比較的単純なモデルで構築されている上、Peg と Hole のはめ合いが非常にゆるい場合の Simulation なので、その評価の妥当性については議論が分かれるところだと考える。しかし、直感的にはソリッドなマニピュレータで緻密な力制御をするためには、非常に高精度な位置フィードバックを行う必要があることが容易に想像出来、受動コンプライアンスの意味については、機械的ローパスフィルタと認識をすることで多くの説明が可能となると言える。
- [59] 石塚康孝, 小金澤鋼一. 複合遊星ギアを用いたロボットフィンガの新機構. *日本ロボット学会誌*, Vol. 26, No. 6, pp. 231–242, 2008.
- 複合遊星ギアを用いることによって、対象物体の形状に指の構造体が自動的に沿う状態に変形する機構の開発に関する論文。ギアの固定状態の変更により指のひねりなども実現しているところが興味深い。自由度を増やすことによってロボットハンド内への実装が困難になってしまっているのが今後の実用面での課題と言えよう。
- [60] H. Iwata, S. Kobashi, T. Aono, and S. Sugano. Design of anthropomorphic 4-DOF tactile interaction manipulator with passive joints. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1785–1790, 2005.
- 早稲田大学で開発している”Wendy”向けに開発されたロボットアームに関する研究である。人との接触力を低減するためのバネ構造や、腕全体を覆う触角センサなどが実装されており、システムの統合という意味では非常に重要な研究である。一方で、接触力の検証は十分ではなく、腕が暴走した時にその柔軟性が釣竿のようにエネルギーを蓄えることによって、大きな衝撃力を加えてしまうことが懸念される。
- [61] M. Okada, Y. Nakamura, and S. Ban. Design of programmable passive compliance shoulder mechanism. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 348–353, 2001.
- 可変受動的コンプライアンスを実現するヒューマノイドロボット用の肩部コンポーネントの開発に関する論文。コンプライアンス性能の調整にはゴム弾性リンクによる閉リンク機構の撓みを利用している。肩部に吊り下げた重りを切り離すという実験により、コンプライアンス性能が変化させられていることを確認している。この論文ではコンプライアンス性能の使用方法としてエネルギー

を蓄えることによって、小さいアクチュエータで高い運動性能を実現出来ることに注目しており、人・環境などとの接触のために機械的柔らかさを実装しているアーム等とは若干視点が異なることが特徴的である。

- [62] S. Salcudean and Chae An. On the control of redundant coarse-fine manipulators. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1834–1840, 1989.

→ Coarse-Fine Manipulator の一般的な制御法の実現に関して論じた論文。ロバストネスに関する一定の条件を満たせば Coarse-Fine Manipulator 全体の周波数特性を Fine Manipulator のそれと近づけさせることが可能であると議論している。シンプルなモデルを用いた Simulation ではその高い性能が確認された一方で、実機では Coarse Manipulator の共振周波数と Fine Manipulator の制御限界周波数が近かったため、大きな効果が得られなかったとしている。

- [63] Wen-Wei Chiang, Raymond Kraft, and Jr. Robert H. Cannon. Design and experimental demonstration of rapid, precise end-point control of a wrist carried by a very flexible manipulator. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 30–40, 1991.

→ 柔軟な構造物（マニピュレータ）の先端に高速・精密なエンドポイントを設置した場合のマニピュレータの挙動分析に関する論文。一般的な Coarse-Fine Manipulator と異なり、非常に柔軟な Coarse Manipulator を用いているため、周波数応答も非常に悪く、また自励振動に対して Fine Manipulator が何らかの補償が必要であるという点が他の研究と異なる点である。興味深い点としては、エンドポイントの位置を直接計測する精密な装置があれば、手先の高速な応答性を損なうことなく制御が可能であるという点である。また複数の計測系の切り替えにおいても特に発散などの問題を起こすことなく制御が出来ている点も興味深い。

- [64] 松本潔. 力のセンシングとアクチュエーションの統合に関する研究. PhD thesis, 東京大学大学院工学系研究科, December 1998.

- [65] Y. Nakamura, Y. Kimura, and G. Arora. Optimal use of nonlinear electromagnetic force for micro motion wrist. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1040–1045, 1991.

→ 電磁石の磁気浮上を用いた出力の大きな能動リストコンプライアンス（6自由度）の開発を目的とした論文。主として電磁石の力を有効に活用するための設計手法（電磁石とのギャップ、ストローク）に関して論じている。戻りバネを設置することで“Useful work”が飛躍的に上昇しているが、論文の中では実装していない。

- [66] R.L. Hollis, S.E. Salcudean, and A.P. Allan. A six-degree-of-freedom magnetically levitated variable compliance fine-motion wrist: design, modeling, and control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 320–332, Jun 1991.

→ 電磁石の磁気浮上を用いた6自由度能動リストコンプライアンスに関する論文。論文前半で Manipulation task domain を Multifingered hand と Fine motion device に分割している議論が注目に値する。論文の半分程度が LED を用いたリストコンプライアンスの挙動計測に用いられており、デバイスの周波数特性に関しても簡単に論じられている。

- [67] Masahiro Tsuda, Toshiro Higuchi, and Shigeki Fujiwara. Magnetic levitation servo for flexible assembly automation. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 4, pp. 329–345, 1992.

→ 磁気浮上方式を採用した Coarse-Fine Manipulation システム (MEISTER) の開発と実験に関する論文。この論文の成果は Integrated Active Compliance を実現するために必要な一通りの機能を有したプロトタイプを実装することにより、これまで実機で確認することが出来なかった Compliance 要素の性能評価について実証しているところにある。MEISTER は摩擦、バックラッシュレスの構造を採用することにより、プログラブルコンプライアンス、精密な多自由度アクチュエーション、多軸の力センサとして機能することが可能である。一方で磁気浮上方式を用いているため電磁石による非線形性の取り扱いが常に課題となり、アクチュエータとしての制御、センサとしての計測における誤差が確認されているため、これらは大きな課題である。MEISTER を用いた実験により明らかになった注目すべき事項を以下に整理する。Whitney による理想的な RCC

デバイスはペグ挿入動作の過程全体において回転中心を穴の入り口に維持出来るものであるとしている。実験により理想的な RCC デバイスはジャミング回避という意味では非常に有用であることを確認した一方で、挿入力の観点からすると必ずしも最小となるものではなかった。よってジャミングを回避する性能と挿入力を最小にする性能は一対一に対応しないものである。Float Assembly Method ではピンがまるで空間中に浮いているような挿入動作を実現するものであるが、ピンの挿入力低下には有効であるものの、ジャミング回避には効果が低いことが確認された。ペグ・ホールのクリアランス比^{*2}が大きい場合でも whitney が提案した挿入の数学モデルは適応可能である。

- [68] J. J. Craig M. H. Raibert. Hybrid position/force control of manipulators. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 103, No. 2, pp. 126–133, 1981.

→ マニピュレータの位置と力を同時に制御するための制御手法を提案した論文。手首に搭載した力センサを利用した力制御とマニピュレータの各関節のエンコーダ出力値から計算される位置・姿勢を利用した位置制御とを直交関係を適用して分割することにより、各自由度において力・位置を各々独立に制御するという制御則を提案した。当時のロボット制御としては非常に画期的なアプローチであり、その後多くの研究がなされた結果、力を拘束と運動に一意に分類する手法が存在せず、汎用なハイブリッド制御は実現不可能なことが確認されている。

- [69] 杉本浩一. 位置と力のハイブリッド制御に関する理論的考察. *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 3, pp. 453–460, 1993.

→ 位置と力のハイブリッド制御に関して、汎用的な意味でのハイブリッド制御が実現可能かどうかについて整理した論文。結論としては、次元の異なる力の空間と速度の空間において直交補空間の概念を適応するのは妥当ではないことを指摘し、力を拘束と運動に一意に分類する方法は存在しないため、運動機構モデルの設定をしなければならないと述べている。ハイブリッド制御における問題点を非常に簡潔に指摘し、その解決方法の難しさを示したという意味で、本論文の意義は大きい。

- [70] 小菅一弘. 力制御法の分類と制御システムの設計法. *日本ロボット学会誌*, Vol. 9, No. 6, pp. 751–758, 1991.

→ ロボットマニピュレータの力制御に関して非常に簡潔に整理された論文。力制御を直接的な制御と関節的な制御に分類し、各々ハイブリッド制御やインピーダンス制御等について概説している。参考文献も著名なものが一通り参照されているので、1980年代のロボットアームの制御を概観するためには非常に有用な論文である。

- [71] 金子真, 横井一仁, 谷江和雄. シリアルリンクアームのダイレクトコンプライアンス制御: 第1報, 基本概念と非干渉化条件. *日本機械学会論文集. C編*, Vol. 54, No. 503, pp. 1510–1514, 1988.

→ 各関節を独立に制御することにより、ロボットマニピュレータの先端にて所望のコンプライアンス性能を実現する制御手法に関する論文。直感的にも予想されることだが、手先で実現されるコンプライアンス特性はマニピュレータの姿勢に大きく依存することをシミュレーション・実機で確認している。ちなみに本手法では先端のコンプライアンス行列の独立な要素と同数のアクチュエータが必要なため、複雑な柔軟性を持つロボットは構成出来ない。

- [72] 横井一仁, 前川仁, 谷江和雄. 冗長ロボットアームのためのコンプライアンス制御の一手法. *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 1, pp. 121–130, 1993.

→ 冗長ロボットアーム(マニピュレータ)においてアームの姿勢を一意に決定しつつ手先でのコンプライアンス制御を実現する制御手法に関する研究。本手法ではまず基準関節コンプライアンスを設定し、姿勢の一意性を確保しつつ適当なコンプライアンス性能を手先に付与する。続いて生成される性能と目標のコンプライアンス性能との差異を各々の関節に割り振ることによって、最終的に目的のコンプライアンス性能を実現するというアプローチを用いている。

- [73] P.L. McAllister and R.E. Ellis. An eigenscrew analysis of mechanism compliance. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3308–3313, April 2000.

→ 機械要素, ロボットなどのコンプライアンス行列を実験データより計算する手法に関する論文。

^{*2} クリアランス比の定義は文献によって異なるので注意が必要

Jacobian を用いる方法と異なりシステムの幾何的な特性を知らなくてもコンプライアンス行列を取得することが可能な方法である。Simulation により性能を評価しているが、データに 10[%] のノイズが加えられている場合でも、4[%] 以内の推定誤差を誇っているのはすばらしい結果である。論文本体としてはシステム同定の研究の 1 つと言えるが、Previous work も充実し、さらに Wrench と Twist の定義に関しても丁寧に定義がしてあるため、参考になる。

- [74] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, and J.K. Salisbury. Playing it safe [human-friendly robots]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 11, No. 2, pp. 12–21, June 2004.

→ 一般にマニピュレータと人・モノとの干渉時に発生力を低下させるためにアクチュエータとリンクとのカップリングに柔軟剤を用いる方法 (Series Elastic Actuator) が用いられる。しかしこの柔軟アクチュエータでは位置決め等の応答性が悪化することが避けられない。この対応策として、本研究では DM2 と呼ばれる低応答・大出力のアクチュエータと高応答・低出力のアクチュエータを組み合わせる方式を提案している。実験により、DM2 が応答性を確保しつつ、接触力を小さくすることが可能であることを示している。

- [75] D. Tsetserukou, R. Tadakuma, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi. Intelligent variable joint impedance control and development of a new whole-sensitive anthropomorphic robot arm. In *Proceedings of International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 338–343, 2007.

→ 人と共存可能なロボット実現のための、環境との接触力を計測可能なロボットアームの開発に関する論文。ロボットアームのトルクを計測可能な小型光学トルクセンサの開発と、インピーダンスコントロールの係数可変制御が本論文の特徴である。センサ自体の構造は興味深い内容だが、環境との接触力を制御により解決するという点に関しては、検証が不十分であり有効性を確認出来ていない。

- [76] D. Whitney. Historical perspective and state of the art in robot force control. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, March 1985.

→ ロボットマニピュレータにおける剛性制御、ダンピング制御、インピーダンス制御、力制御、ハイブリッド制御などの広義の力制御開発の歴史を整理した論文。1980 年代中盤までのロボットの研究では一般的に環境との接触がない軌道制御であり、実用性に欠けることを指摘し、環境との接触問題の重要性について言及している。また環境との接触においては、ロボット自身のイナーシャではなく外界との接触剛性 (コンプライアンス) に注目することが必要であると、それらをロボットマニピュレータの制御のみで実現するのではなく、RCC (Remote Center Compliance) などの機構との組み合わせで実現するべきだとの持論を展開している。

- [77] Daniel E. Whitney. Historical perspective and state of the art in robot force control. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 3–14, 1987.

→ 1985 年の ICRA の Proceedings に掲載された論文と同内容の記事。IEEE Explorer の PDF データは画素が荒いため、こちらを方が読みやすい。

- [78] 大隅久, 新井民夫. 弾性部の導入による産業用ロボットの協調作業への適用. *日本ロボット学会誌*, Vol. 12, No. 8, pp. 1192–1197, 1997.

→ 複数のマニピュレータが同一の対象物をハンドリングする協調作業においては閉ループ機構を構成してしまうため、そこでの不要な内力発生を防止するためには柔軟な (コンプライアンス) 機構を実装することが必要となってくる。この論文ではコンプライアンス機構を等価関節変数によってモデル化することによって、これらの柔軟構造もマニピュレータの 1 つの機械要素と見なすことを提案している。一般的にこれらの柔軟構造はパッシブな関節と同義であり、そのような構造を持つマニピュレータにおける対象物の運動自由度と柔軟構造の特性に関する解析により、機構が持つべき条件について簡潔に示している。過拘束が発生する構造のロボット設計においては、まず参照したい論文である。

- [79] 佐藤知正. 生活を支えるネットワーク知能機械 ロボティックルームの試み. *東芝レビュー*, Vol. 56, No. 9, pp. 28–32, September 2001.

→ 東京大学佐藤・森研究室で開発を進めているロボティックルームの紹介記事。現在開発中のロボ

ティックルーム3では、微妙な変化を伴いつつも緩やかな繰り返しによって成り立つ我々の生活を観察することによってパーソナルコンテンツを蓄積し、再現することによって人を支援することを提案している。

- [80] 福井類, 森下広, 原田達也, 森武俊, 佐藤知正. 磁石誘導型天井移動ロボットプラットフォーム～天井吸着用磁石モジュールと複数ロボットの位置計測方法～. ロボティクスシンポジア, pp. 146–153, 沖縄, March 2004.
- [81] Tomomasa Sato, Rui Fukui, Hiroshi Morishita, and Taketoshi Mori. Construction of ceiling adsorbed mobile robots platform utilizing permanent magnet inductive traction method. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 552–558, Sendai Japan, September 2004.
- [82] 田中秀幸, 矢入健久, 町田和雄. 視覚 ID タグを利用した形状モデリングとロボティクスへの応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 7, pp. 848–858, 2008.
→ AR タグを環境や物体に貼り付け幾何的なモデリングを行う研究。観測されたタグ位置の復元, 多面体形状モデルの作成法など非常に丁寧に執筆された論文である。こういった環境モデリング手法は実際にロボットを特定の環境中で動作させるためには非常に有効であるため, ソフトウェアパッケージとしての公開が期待される。一方でタグ情報にロボットのタスク情報を記述している点に関しては, あくまで補足的な成果として捉えておくべきと考える。
- [83] 勝代雅行. 家庭内における物品搬送・収納システム効率化のための多機能中継装置に関する研究. Master's thesis, 東京大学大学院 情報理工学系研究科知能機械情報学専攻, March 2008.
- [84] Klaus Finkenzeller. *Rfid Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. John Wiley&Sons Inc., 1996.
→ RFID の入門書。RFID 仕様の概要を説明している。詳細な技術情報が必要な場合には別途高周波回路や発振回路の技術書が必要。
- [85] 春日智恵. デジタル標識パターンを用いた自己位置同定法. 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 857–862, 1994.
→ グレイコードで表現したデジタル標識パターンによりロボットの自己位置同定を行う研究。特定のデジタルコード(時期テープや光学反射テープではなく)を空間中に配置する研究としては, 初期の研究に当たる。但し具体的な位置計測精度が言及されていないため, その性能が評価出来ない。
- [86] 田代健治, 太田順, 林遠球, 新井民夫. 人工ランドマークの最適配置設計法. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 6, pp. 896–902, 1996.
→ ロボットの自己位置同定を補助するためのランドマークの配置最適化について述べた論文。ロボットの自己位置同定スペックが規定された場合に, 最小の個数で仕様を満たすランドマークの配置方法を最適化問題として解く方法について述べている。一般的に最適化問題は初期状態に依存するがランドマークの配置も例外でなく, 真の意味での最適化を行うためには全探索を行わなければならない(現在では計算機が十分高速であるので全探索も可能であるかもしれない。)が, 本研究ではランドマークが一つ少ないときの最適解にマークをランダムに追加することによって最適解を求めようとしている。
- [87] 本村暁, 松岡毅, 長谷川勉, 倉爪亮. 二つのランドマーク方位計測とデッドレコニングに基づく実時間自己位置同定法. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 3, pp. 311–320, 2005.
→ 2次元平面におけるランドマークベースの自己位置同定の場合, 最低3つのランドマークがセンサレンジ内に入っている必要がある。一方で, 動的環境においては3つのランドマークが常に見えていることは期待出来ない。そこで本研究では最低2つのランドマークが観察された時点で自己位置同定候補を作成し, さらにデッドレコニングと組み合わせることで絞込みを行う方法を提案している。また, 位置の算出においては複数の候補集合の結果をクラスタリングしてバインドするという方法を用いており, パーティクルフィルタと同様な方法論によってロバスト性を確保しているところが特徴的である。
- [88] 大川光吉. 永久磁石磁気回路入門～マグネティクスのA・B・Cと演習～. 総合電子リサーチ, 1994.

- 永久磁石の基本的項目について整理した入門書。磁石メーカーのカatalogを理解するために、まず目を通しておきたい書籍である。ISBN-13: 978-4915449734.
- [89] 鶴清, 広瀬茂男. 新しい密閉型 I B マグネットと磁気吸着全方向移動型ロボットの開発. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1P1-H05, 島根, June 2002.
- 鉄製の壁面等に吸着して移動する移動ロボット用に開発した磁石モジュールに関する論文。永久磁石により吸着して移動するロボットにおいては, 吸着力の ON-OFF を短時間にスムーズに行える機構の実現が重要となる。この研究では, 磁石を OFF にする際の力を内部のバネ力として蓄えることで, スムーズな吸着力切り替えを実現している。
- [90] 福井類. 永久磁石誘導型天井吸着移動ロボットプラットフォームの構築に関する研究. Master's thesis, 東京大学大学院 情報理工学系研究科知能機械情報学専攻, March 2004.
- [91] 高橋輝夫. 立体自動倉庫の動向と課題 (小特集: 荷役・運搬設備). 日本機械学会誌, Vol. 775, No. 86, pp. 646-652, June 1983.
- 1960年代から1980年初頭まで立体自動倉庫の導入の歴史について記された論文。自動倉庫の形式毎による導入件数の推移や, 生産システムとの連動を重視した自動倉庫の開発の遍歴など知るための貴重な資料である。
- [92] E. Frazelle. Design problems in automated warehousing. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 486-489, April 1986.
- 自動物流倉庫を設計する上での最適なハードウェア選定の問題と運用上の問題について解説した論文。物流倉庫を設計する上で考慮すべき要素 (I/O の数, 物品の収納場所の検討等) について簡潔に整理されていて読みやすい。
- [93] T. Suesut, V. Tipsuwanporn, S. Gulphanich, J. Rodcumtui, and P. Sukprasert. A design of automatic warehouse for internet based system. In *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology*, Vol. 1, pp. 313-316, 2002.
- 物流倉庫における最大の課題であるリードタイムの削減を実現するためにインターネットを介して情報の伝達を可能とする自動倉庫の開発に関する論文。実際の物流現場のニーズを汲んだ開発として評価出来るが, システム構築におけるポイント・コツなどのまとめ方が不十分であり学術的価値は必ずしも高くない。
- [94] [Online] MURATA MACHINERY LTD. Innovation in logistics. <http://www.muratec-1-system.com/en/>.
- [95] C.-I. Liu, H. Jula, and P.A. Ioannou. Design, simulation, and evaluation of automated container terminals. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 12-26, March 2002.
- 貿易・流通の拠点であるコンテナターミナルの効率化に関する論文。流通量, コストなどを組み込んだ Simulation を行い, 自動運搬車両, リニアモータコンベアシステム, 天井レール運搬装置, 高積層型自動収納庫などの評価を行っている。
- [96] 日本工業出版. 自動倉庫システム・オールガイド. 流通ネットワークキング, Vol. 206, pp. 48-55, April 2006.
- (株)IHI, (株)イトーキ, (株)岡村製作所, トヨタ L & F, 村田機械製作所 (株) などの日本の大手物流装置メーカーの自動倉庫システムが各社 1 頁ずつで紹介されている。現在の自動倉庫の流行を知るために有効な資料である。
- [97] Makoto Nikaido, Jun Ota, Toyokazu Kobayashi, Tomio Ito, Toshimitsu Higashi, and Hirofumi Tamura. Warehouse-design support considering seasonal products. In *Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference*, pp. 2702-2707, October 2006.
- 本研究では, 季節に応じた物流量変化を取り組んだ物流倉庫の設計アルゴリズムを提案している。一般的に物流倉庫の装置選定は熟練技能者の経験と直感に基づくタスクであり, またその設計時間も様々な要因を検討する必要から, 大きな初期費用を発生するという問題があった。これらに対して, 物流倉庫を数値モデル化し実際の物流倉庫のデータを用いることで, 物流倉庫の設計の短時間化及び (初期コストと臨時の運用コストにおける) 最適化を実現している。鉄道のダイヤなどで

も最近では計算機による最適化が実現されているがトラブルが発生した際の、処理に関しては未だ人間の柔軟な処理能力に分があるように思われる。初期の設計段階で最適化を実現した後にこのような突発的なトラブルに対しても柔軟且つ迅速に対応出来るアルゴリズムとシステムの開発がこの種の研究においては重要な課題であろう。

- [98] [Online] Itoki Corp. Systema streamer SAS. <http://www.itoki.jp/english/products/distribution/>.
→ 垂直・水平分離型の自由度レイアウト採用の図書館用自動収納庫。但し Cantilever 方式ではない。
- [99] 福井類, 勝代雅行, 森武俊, 佐藤知正. 家庭内物流支援用インテリジェントコンテナプロトタイプの開発. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-O02, 秋田, May 2007.
- [100] Rui Fukui, Hiroshi Morishita, Taketoshi Mori, and Tomomasa Sato. Development of an intelligent container prototype for a logistical support robot system in living space. In *Proceedings of 2007 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3397–3402, 2007.
- [101] Atracsys LLC. The accutrack compact tracking system. http://www.atracsys.com/_products/accuTrack_compact.php.
- [102] 宙外園, 純一山田, 隆山中, 由紀夫古賀, 睦渡邊. 天井ステレオカメラと移動ロボット搭載センサの統合処理による環境学習 (卒論セッション). 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 2007, No. 42, pp. 167–174, 2007.
→ 環境マップを構築する際に, 部屋中の天井に設置されたステレオカメラで取得したデータでは欠損してしまう環境の情報を, 移動ロボットが接近し超音波センサ等によりデータを取得することで補う手法に関する研究。環境マップを構築する際の戦略としては非常に重要なアプローチであるが, 実装では天井のステレオカメラのデータ処理アルゴリズムに工夫を施すことで解決してしまうような課題までしか試行されておらず, 今後の進捗に期待したいところである。
- [103] 國光智, 淺間一, 川端邦明, 三島健稔. 2 値エッジ画像のテンプレートによる屋外環境下にある対象物の検出. 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 124, No. 2, pp. 480–488, 2004.
→ 屋外環境下において外乱 (照明, 天候条件) が存在する中でのテンプレートマッチングに関する研究。テンプレートマッチング自体は非常にベーシックな方法を用いているが, 特徴量の表現方法においてエッジ画像の 2 値化, 重み付けなどの工夫を行っている。
- [104] Jean-Yves Bouguet. Camera calibration toolbox for matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
→ Web 上に公開されている無償の Matlab 用のカメラキャリブレーションツールボックス。操作は非常に簡便であるが, エラーが出たときの処理, ソースコードの構造はかなり複雑であり, 解説するにはかなりの労力が必要と考えられる。
- [105] 福井類. i コンテナ通信規格仕様書. [Online]<http://home.p01.itscom.net/fukui/publication/index.html>.
→ i コンテナと管理 PC 間の通信型式及びコマンドについて規定した仕様書。
- [106] Rui Fukui, Hiroshi Morishita, Masayuki Shodai, Taketoshi Mori, and Tomomasa Sato. Development of a manipulation component for a container transferring robot in living space (design and evaluation of a high compliant manipulation mechanism). In *Proceedings of 11th International Symposium on Experimental Robotics*, pap114s2, Athens, Greece, July 2008.
- [107] 中村仁彦. 非ホロノミックロボットシステム 第 1 回非ホロノミックなロボットって何? 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4, pp. 521–528, 1993.
→ 非ホロノミックな拘束を受けるロボットシステムに関する解説記事。2 輪移動型のロボットではこの非ホロノミックな拘束が問題となり, それらを直感的な手法 (制御プログラム) によって解決していることが多い。この記事では, 非ホロノミックな拘束をベースとなる数学から解説しながらも, 超平面を用いた視覚的 (直感的) な解説を加えることで, その理解を容易にしている。非ホロノミックな拘束は 2 輪移動型のロボットをプログラムする上で, 基本となる問題であるため, その大枠だけでも把握しておきたい知識である。

- [108] 中村仁彦. 非ホロノミックロボットシステム 第2回幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動計画. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 655–662, 1993.
→ 移動ロボットの2輪モデルや4輪モデルにおける定式化において, どのように非ホロノミックな拘束が現れるのか, そしてその拘束下においてどのようにヒューリスティックな制御方策を基に可制御性を判別し, さらに軌道計画を行うかについて整理した論文。第1回と併せて参照したい。
- [109] 中村仁彦. 非ホロノミックロボットシステム 第3回幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 837–844, 1993.
→ 第2回で運動計画を行った非ホロノミック拘束をうける移動ロボットにおいて, 軌道計画にそって運動を制御する方法について開ループ, 閉ループそれぞれについて議論をしている。非ホロノミック拘束下での閉ループ位置決めは天井移動ロボットにおいても必要な制御過程であり, 重要である。本論文に書かれているその設計ポイントは次の4つである。(1) 目標を状態空間の1点ではなく点の集合である多様体に設定する。(2) 目標を状態空間の静止した1点ではなく運動する点とする。(3) 滑らかでない(区分解析的な)状態フォードバックとする。(4) 時変状態フィードバック則とする。本研究では目標に大きさを持たせており, その意味ではポイント1を適応している。また精密位置決めルーチンではその場旋回と直進を組み合わせしており, ポイント3の滑らかでない状態フォードバックにも該当すると言える。このように(少なくとも経験的には)非ホロノミック拘束を受けるシステムの設計における最小限の知識を持つことは問題を可能な限り短時間に解決するためにも必須なことであると考えられる。
- [110] Rui Fukui, Hiroshi Morishita, Taketoshi Mori, and Tomomasa Sato. Development of a home-use automated container storage/retrieval system. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2875–2882, Nice France, September 2008.
- [111] 橋本雅文, 大場史憲, 江口透. 複数の移動ロボットによる動的搬送制御法. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 6, pp. 886–893, 1995.
→ 4台の移動ロボットを用いて1つの物体を搬送するシミュレーションを行った研究。4つのロボットが完全にデータの同期を行う方式の協調搬送を採用しており, また協調作業に必要なコンプライアンス要素を実現するために1自由度の能動並進関節と1自由度の受動旋回関節を搭載する設定で検討を行っている。協調搬送においては路面とタイヤの摩擦の変化, 受動関節の回転摩擦, データ通信の同期や制御遅延といったことが実際には問題となるため, シミュレーションのみでその有効性を確認するのは難しい。またこの論文の後ではリーダー・フォロアタイプでデータ同期を必要としないロボットが多く開発されていることから, 上記のような問題が実機では相当に影響したということが推察される。
- [112] 太田順, 武衛康彦, 新井民夫, 大隅久, 陶山毅一. 2台の移動ロボットの協調による搬送制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 3, pp. 263–270, 1996.
→ リーダー・フォロワ型の協調により2台の移動ロボットで1つの物体の搬送を行う際に, フォロワに搭載するコンプライアンス機構の位置・姿勢を一定に保つように制御することにより, 協調搬送を実現することを提案した方法。実験により単純なトレーラ型と比較して, 搬送物体との相対的な位置・姿勢が一定の状態に安定化されていることを示している。制御則内のパラメータ調整は試行錯誤で選ばれているため, その制御パラメータと挙動の関係の整理・解析が期待される。
- [113] Y. Hirata and K. Kosuge. Distributed robot helpers handling a single object in cooperation with a human. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 458–463, 2000.
→ 複数ロボットの協調における仮想キャストの概念を提案した論文。2000年のこの時点ではロボットアームを搭載しない移動ロボットの協調動作が実現されている。
- [114] 平田泰久, 久米洋平, 沢田拓郎, 王志東, 小菅一弘. ロボット間の幾何学的関係を必要としない複数移動マニピュレータによる単一物体のハンドリング. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 139–146, 2005.
→ 複数台のマニピュレータ搭載型移動ロボットのリーダー・フォロア型協調によって, 1つの物体を搬送する研究。“仮想3-Dキャスト”の概念により, ロボット間の幾何学的情報を用いずに, フォ

ロアの移動戦略を組み立てているところが特徴的である。一般に協調動作においては、相互の動作の影響を吸収するために柔軟性（コンプライアンス）を有する必要があるが、本研究ではマニピュレータにインピーダンス制御を組み込むことにより実現している。単腕ロボット及び相腕ロボットにより実機でその動作を確認しているところが非常に先進的であるが、マニピュレータの動作と移動ロボットの動作の協調に関する説明が短く、一般的に考えられるマニピュレータの特異点や稼働範囲制限、そして移動ロボットの経路計画、障害物回避などにどのように対応しているのかが興味があるところである。