

家庭用コンテナケース運搬ロボットにおける 機械的柔軟性を活用したシステム構成法の提案と実証

福井 類^{*1} 勝代 雅行^{*2} 森下 広^{*3}
森 武俊^{*1} 佐藤 知正^{*1}

Proposition and Demonstration of a System Configuration Method Utilizing Mechanical Compliance for a Home-use Container Transfer Robot

Rui Fukui^{*1}, Masayuki Shodai^{*2}, Hiroshi Morishita^{*3},
Taketoshi Mori^{*1} and Tomomasa Sato^{*1}

This paper proposes a system configuration method to realize a robot system which can perform daily-use object storage and management service in a living space. In the method, compliant mechanisms are utilized proactively to overcome position/posture errors and deviations in measurement or control phases. To validate the proposed system configuration method, we developed a home-use container transfer robot that is installed with (1) robust container handling mechanisms implemented by crank shafts and (2) passive compliant mechanisms for horizontal and inclination misalignment. The robot was integrated with a container position measurement system to perform experiments. Experiments confirmed that a robust container transfer motion can be realized without complex feedback measurement and control processes. Several key design points are also described to leverage mechanical compliance.

Key Words: Compliance, System Configuration Method, Manipulation, Human-Robot Symbiosis

1. 緒 論

生活空間中における煩雑な労働をロボットに代替するという根強いニーズにもかかわらず、その実現の困難さから現在製品化されている家庭用ロボットは床面を移動し清掃するロボット (iRobot 社製 Roomba など) やコミュニケーションロボットと呼ばれる、物理的な作業を成しえないロボット (三菱重工製 Wakamaru など) に留まっている。ここで改めて生活環境中で物品を操作するロボットにおける課題を整理すると (1) 物品およびその状態の認識, (2) 物品の操作, (3) 操作状態の認識に要約される。

昨今コンピュータビジョン技術の飛躍的な進歩により物品の認識性能は向上してきているが [1]~[3], まだ人のように柔軟かつ安定して物品の識別, 位置・姿勢などの状態を推定することは実現できておらず, 研究者が取り組むべき課題として存在する。一方物品の操作に関しては, 人の手を真似したロボットハ

ンドにより柔軟に把持・操りを行うことが長い間取り組まれてきたが, 人の巧みさ・器用さを再現するには到っていない [4] [5]. 操作状態の認識についてはさらに研究が遅れており, 例えば正しく把持状態を維持できているかを認識する研究は接触センサ等を用いた例が幾つかあるが [6]~[8], 実用化にはまだまだ超えなければならない性能の壁がある。

上記のような課題を克服するために, 我々の研究では物品を収納・管理するというアプリケーションに特化したロボットの形態を検討し, ロボット能力の不足を運用で補填するという戦略・アプローチをとる。具体的には日常生活において広く使用されている物品収納用コンテナケースに注目し, このコンテナケースをハンドリング可能なロボットを実現することで, 生活環境中での物の流れを管理可能なシステムの実現を狙う [9]. さらにこのコンテナケースにはロボットにとって取り扱いが容易になる物理構造的もしくは情動的な工夫を施すことによって, ロボットの安定した動作を実現することを狙う。本研究ではこのようなコンテナケースのことをインテリジェントコンテナ (iコンテナ) と呼ぶ (Fig. 1) [10]. つまり我々が目標とするシステムにおいて iコンテナは人が物品を収納・管理するのを支援するだけでなく, ロボットが人の依頼により物品の運搬・収納を実現するのを支援する仲介者としての役割を担うことになる。

このようにコンテナを用いた物品管理は産業用途で古くから採用されており, 多くの実績がある [11] [12]. その実績を家庭

原稿受付 2009年12月20日

^{*1}東京大学

^{*2}パナソニック株式会社

^{*3}(有) HMI

^{*1}The University of Tokyo

^{*2}Panasonic Corp.

^{*3}HMI Corp.

■ 本論文は提案性で評価されました。

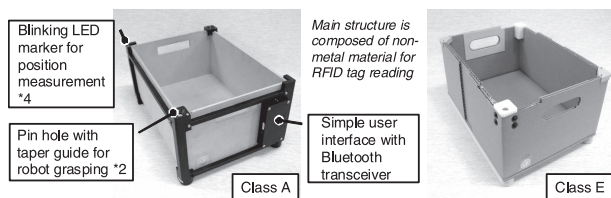


Fig. 1 Overview of intelligent container

用途に応用することは非常に強力な資産・ノウハウの活用が可能となる一方、完全に環境を整備することが許容される工場と異なり、生活環境ではロボットシステムの能力で不完全な整備環境を克服することが求められる。

つまり、上記の戦略を採用する家庭用ロボットシステムにおいて残された課題はやはり、環境の変化により常に計測・制御の誤差にさらされることだと言える。よって、このような計測・制御の誤差に耐える安定した動作を実現可能な新しいスキームに基づくロボットシステムの構成法を確立することが求められる。

本研究ではロボットにとって厳しい誤差・バラツキ条件がおこる生活環境の中で、受動的な機構要素で構成される機械的柔軟性を活用してこれらの問題を克服するシステム構成法について提案し、その有効性を実証するために家庭用コンテナケース運搬ロボットを開発し、性能評価を行う。

本論文の構成は次のとおりである。第2章では機械的柔軟性について関連研究の整理および採用する方式の選定、さらに機械的柔軟性を活用したシステム構成法を述べる。第3章では家庭用コンテナケース運搬ロボットの設計および実装について整理し、続く第4章にてコンテナケース運搬ロボットの主要構成部であるマニピュレーション機構単体の試験について述べる。第5章ではコンテナ運搬動作を実現するために必要なコンテナ位置認識システムとの統合について述べ、そして第6章では統合されたシステムの性能評価試験について示す。第7章は結論である。

2. 機械的柔軟性（コンプライアンス）

本章ではまず機械的柔軟性（コンプライアンス）の歴史およ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について述べる。続いて受動機械的コンプライアンスを活用したシステム構成法について議論する。

2.1 関連研究の整理

物体のハンドリングにおいて環境との相互作用を考慮する場合、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は、大きく次の二つの視点で分類・整理することができる。

- 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柔軟性を実現する受動的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。

以降では各方式の特徴、研究の歴史について述べる。

2.1.1 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 [13]。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 [14] [15]。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。RCCの発展版として所望の剛性を設定可能なVRCC (Variable Remote Center Compliance) [16]も提案されている。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 [17]。

2.1.2 受動的コンプライアンス分散実装方式

人や環境と柔らかく接触するロボットアームの実現を目指す研究では、受動的なコンプライアンスが分散実装されている例がいくつかある。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 [18]。Okada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 [19]。

2.1.3 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 [20]～[24]。

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 [22]～[24]が挙げられる。ただし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MEISTERを開発し、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重要なポイントに関して、能動アクチュエータによる受動状態再現により実験的に確認している [24]。

2.1.4 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。位置と力を相互的に制御する問題はRaibert, Craigらのハイブリッド位置・力制御法の提案 [25]より後、ロボットの制御分野での関心が高まった。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柔軟性を実現するダイレクトコンプライアンス制御を提案している [26]。また横井らは冗長ロボットアームにおける制御法を提案している [27]。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を実現するために、人・環境との接触力を低減する試みが行われている [28] [29]。

2.2 本研究で採用する方式の選定

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

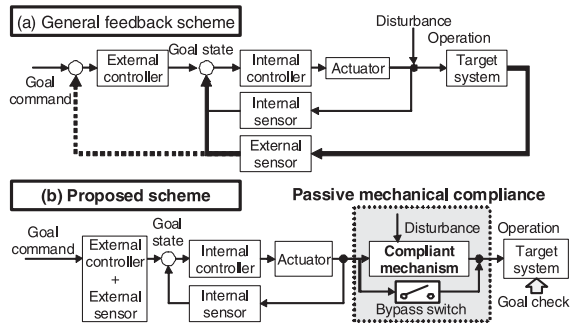


Fig. 2 Difference between measurement and control schemes

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ることとする。なか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が多い、その理由は機械的な要素は動作の安定性が高く、また一般的に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と考えられる。本研究でもロボットと環境の積極的な接触を必要としており、機械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選定する。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。

2.3 機械的柔軟性を活用したシステム構成法

一般には外界との接触が必要なシステムを構成する際にはFig. 2(a)のような、外界の状態を逐次認識するセンサを用いた大域的な計測・制御フィードバックループを構成する。しかし、このような構成の場合ハードウェアおよびコントローラの各性能が混合したループの中でしか性能を把握できないため、個々の要素技術開発でのサブ目標設定とその評価が困難になる傾向がある。

そこで本研究ではFig. 2(b)に示すような、計測や制御要素を含んだ大きなフィードバックループを用いない、簡素なタスクフローで表現されるシステム構成を採用することを考える。ここで外界センサとは対象物の状態を「事前に一度だけ」認識するセンサであり、Fig. 2(a)の外界センサとは役割が異なる。つまり、目標状態と制御状態の差分を受動的コンプライアンスによって吸収することで大域的なフィードバックループを省略することが出来、これにより要素技術の性能を積み上げた結果がそのままシステム全体の性能となる。ここで図の流れからも想像されるように、受動的コンプライアンスの性能を保証することがタスクを簡潔にする要となる。

3. 家庭用コンテナケース運搬ロボットの設計

前章で提案した受動的コンプライアンスを活用したシステム構成法の有効性を実証するために、家庭用コンテナケース運搬ロボットを開発した。本章では開発したロボットについて、まず仕様・構成を示し、続いて各必要機能の実現について述べる。

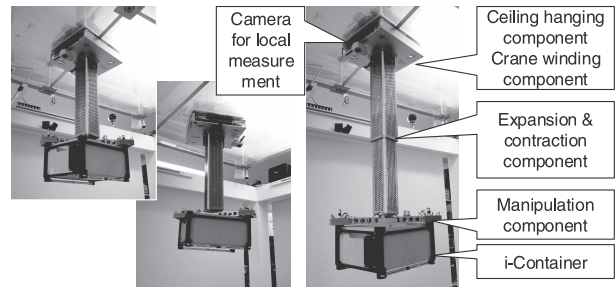


Fig. 3 Abstract of container transfer robot

3.1 家庭用コンテナケース運搬ロボットの概要

家庭用コンテナケース運搬ロボットは生活空間の中でコンテナの把持・運搬を実現する移動ロボットであるため人との共棲、そして変化する生活環境の中で安定に動作することが求められる。本節ではまず本ロボットの要求機能・仕様について整理する。

3.1.1 要求仕様・機能の整理

まず前提として操作対象コンテナの発見および計測は環境に分散されたカメラとコンテナケース運搬ロボットに搭載されるカメラを利用したコンテナ位置認識システム(5.2節に概要を記述)によって実現される。よって本ロボットでは以下に示すコンテナの操作作業に関する要求仕様・機能を議論する。

- 生活者の行動を阻害せずにコンテナ運搬作業が可能なこと。
⇒生活者が常時使用していない天井空間をロボットが利用することを考え、その天井空間で床面移動と差異なくスムーズに移動可能とする。
- 必要に応じて生活空間に設置されたコンテナへのアクセスをしつつ、人や物と偶発的に接触した場合でも、その接触力を柔軟な構造により緩和可能なこと。
- 生活で用いられるコンテナの重量を運搬するのに十分な把持・巻き上げ能力を有すること。また動力源が絶たれた場合にもコンテナ把持状態を維持可能なこと。
⇒可搬重量はコンテナ自重を含めて8[kgf][†]と設定する。
- コンテナ位置・姿勢に因らず頑健な把持動作が可能なこと。
⇒コンテナの姿勢は最大10[deg]^{††}まで、水平位置決めは10[mm]の誤差まで許容すること。

上記の整理により本ロボットには次の機能が必要となる。

- (1) 天井移動機能、(2) 安全な生活空間アクセス機能、(3) コンテナ昇降機能、(4) コンテナ把持機能、(5) 位置決め誤差受容機能。

3.1.2 運搬ロボットの構成

まずコンテナケース運搬ロボットの概観をFig. 3に示す。本ロボットは以下の四つの要素から構成される。

- (A) 天井懸架移動部 ⇒ 天井移動機能を実現
- (B) 巻き上げ動力部 + (C) 伸縮機構部 ⇒ 生活空間アクセス機能とコンテナ昇降機能を実現^{†††}
- (D) マニピュレーション機構部 ⇒ コンテナ把持機能と位置決め誤差受容機能を実現。

以降では各機能の実現方法について示す。

3.2 天井移動機能の実現

天井懸架移動部の概要をFig. 4に示す。天井懸架移動部で

[†]コンテナに書籍を満載したときの重量。

^{††}厚さ15[mm]の書籍3冊の上にコンテナが設置された場合の傾き。

^{†††}位置決め誤差受容機能も一部関係している。

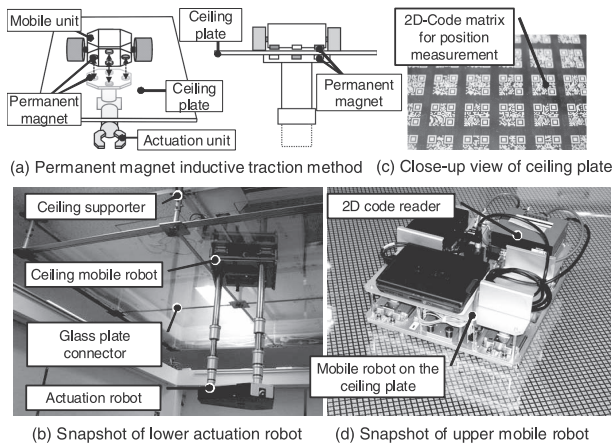


Fig. 4 Abstract of ceiling mobile component

は Fig. 4 (a) に示す永久磁石誘導型天井吸着法 [30] 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、Fig. 4 (b) に示すように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。また動作天井面を Fig. 4 (c) のように二次元コード (QR コード) で覆い、二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 Fig. 4 (d) 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。また二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位置 0.33 [mm]、方向 0.30 [deg] 以下である [30]。

なお文献 [30] での性能は標準偏差で位置 0.57 [mm]、方向 0.67 [deg] であるが、二次元コードリーダーを (株) 東研製の“TFIR31-DM”に変更し、現在の性能になっている。

3.3 安全な生活空間アクセス機能、コンテナ昇降機能の実現

安全な生活空間アクセス機能、コンテナ昇降機能を実現する巻き上げ動力部および伸縮機構部の概要を Fig. 5 に示す。両機構部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を拘束しているが、人との接触時など外力が加わった場合には柔軟に変形し、接触力を低減し安全を確保する。この伸縮機構部のスチールベルトが DC モータとウォーム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。ウォームギアボックスの効果によりブレーキが実現されているため、モータ非駆動時にもコンテナの荷重を支持し続けることが可能である。

3.4 コンテナ把持機能の実現

機能の実現詳細の前に、本機能と次節の位置決め誤差受容機能が実装されるマニピュレーション機構の概要を Fig. 6 に示す。本節では、まず把持の基本方式の選定を行い、続いて連結ポイント数の検討、さらに連結を実現する具体的な構造、最後に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について検討を行う。

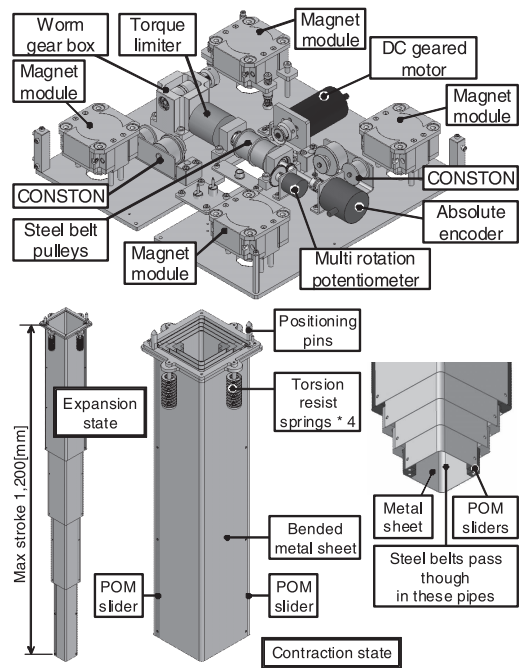


Fig. 5 Abstract of expansion/contraction component (up), and crane winding component (down)

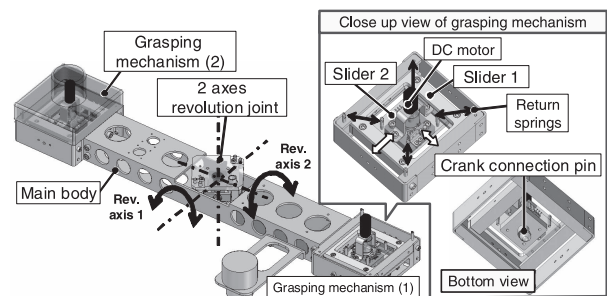


Fig. 6 Overview of manipulation component

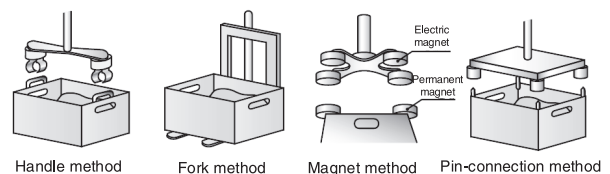


Fig. 7 Candidates of grasping method

3.4.1 コンテナ把持方式

コンテナケースの運搬を行う方式として Fig. 7 に示すような方式が候補となるが、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する。またコンテナ側にピンを搭載すると安全のため各コンテナにカバーを搭載する必要ができてしまうため、コンテナ側に穴を、ロボット側にピンを実装することとした。

3.4.2 把持連結ポイント数

連結ピン方式の場合、最低 2 箇所以上の連結ポイントがないとコンテナの回転を拘束できない。コンテナの構造上、連結ポイントはコンテナの角に設置する必要がある。よって連結ポイ

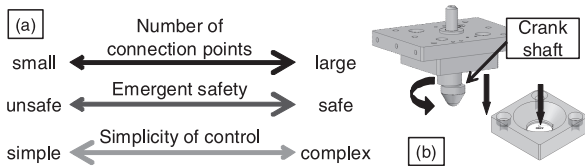


Fig. 8 (a) Number of grasping points and each ability (b) crank rotation method

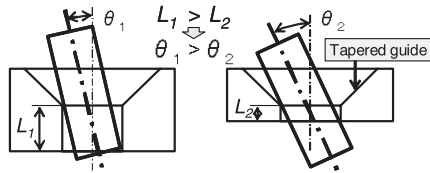


Fig. 9 Pin and hole dimension that can avoid jamming

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 Fig. 8 (a) 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に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（コンテナの対角）と設定した。

ここで大域的な計測・制御フィードバックループを含むシステム構成の場合には、まず片側を拘束し、続いて他方を拘束するという手順が可能となるが、提案するシステム構成法の場合には、2点の連結を一続きの動作で行うこととなる。

3.4.3 連結構造

ピンと穴構造を連結する構造として物流コンテナで用いられているツイストロックピン [31] を参考にして、Fig. 8 (b) に示すような偏心連結ピンによる連結機構を開発した。この機構では偏心ピンが回転することにより一部がピンの断面より突出し、挿入した連結穴の垂直・水平位置をロックすることが可能である。

3.4.4 把持連結ピンの幾何寸法設計

把持連結ピンが穴構造に挿入される際に次の二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およ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：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**：Whitney [14] 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、これを防止すればジャミングを回避可能である。よって Fig. 9 に示すように、可能な限りピン挿入長さ (L_1, 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。

● **確実な把持状態認識の実現**：ピン連結機構では (1) ピンが完全に穴部に挿入されていること、(2) 偏心回転ピンがロック位置で停止していることの両者が認識できれば把持状態を堅牢に認識可能である。これらは接触スイッチやフォトインタラプタにより容易に実現可能であり、本研究ではピンの挿入状態認識、連結ピンの回転位置認識ともに Fig. 10 に示すように接触

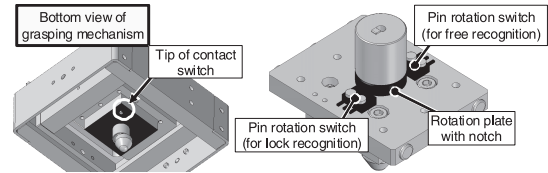


Fig. 10 A switch for pin insertion detection (left), and switches for lock state recognition (right)

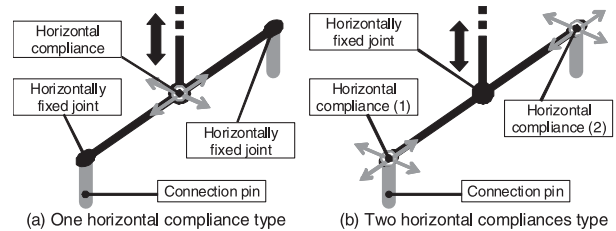


Fig. 11 Layout candidates of compliant elements

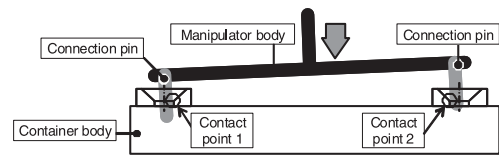


Fig. 12 Jamming state caused by two contact points

スイッチを用いて実現した。

以上のように設計した連結ピン部の代表寸法は次のとおりである。ピン直径 10 [mm]、穴直径 10.5 [mm]、テーパガイド口部直径 22.5 [mm]。

3.5 位置決め誤差受容機能の実現

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おのおの実現方法について検討を行う。

3.5.1 水平、傾斜コンプライアンスの構成

産業応用で活用されている RCC の場合、水平・傾斜の誤差を一つの機構で吸収している。しかし、ゴムの変形を利用した構造のため水平・傾斜変位とも十分に大きく取ることができない。また RCC は1本のピンを一つの穴に挿入することを目的として開発されており、今回の用途とは必ずしも適合しない。

そこで水平、傾斜両者の誤差を吸収するための構成として (a) 1 水平 1 傾斜コンプライアンス要素方式と (b) 2 水平 1 傾斜コンプライアンス要素方式の二つを考える。ここで水平コンプライアンスとは平面 2 自由度で並進変位する柔軟機械構造のことを示し、傾斜コンプライアンスとは直交する 2 軸に対して 2 自由度で回転変位する柔軟機械構造のことを示しており、水平・傾斜おのおの柔軟性を独立して設計可能な機構を検討対象とする。Fig. 11 に両方式のスケルトン図を示す。単純なモデルで検討すると水平コンプライアンス要素は一つでも機能すると考えられる。しかし実際には (1) コンテナの製造誤差によるピンの挿入不良、および (2) 2 本のピンが連動することによるジャミングの可能性も考慮する必要がある。前者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も考えなければならない。また 2 箇所での

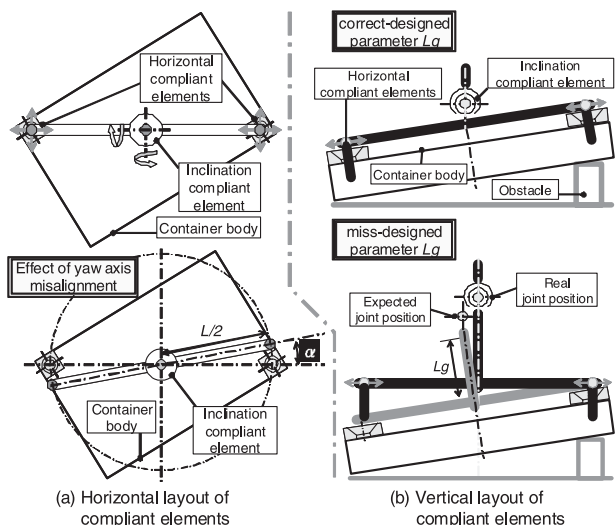


Fig. 13 Designed layout of compliant elements.

連結操作におけるジャミングの問題として Fig. 12 に示すように、2本のピン間距離が固定されている場合、おのおの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2水平1傾斜コンプライアンス要素方式の方がより堅実な方式であると考えられる。

3.5.2 水平、傾斜誤差吸収構造のレイアウト

前項の検討に続き、コンプライアンス構造のレイアウト概要について検討する。水平方向に関しては Fig. 13 (a) 上段に示すように、二つの水平コンプライアンス要素はコンテナ対角に位置することになり、この中心に傾斜コンプライアンス要素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コンプライアンス要素と連結ピンの先端位置との長さは Fig. 13 (b) 上段のように可能な限り小さいほうが好ましい。これは Fig. 13 (b) 下段のように 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。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、この状態を回避できる可能性があるが、コンテナ姿勢の正確な計測が求められ、また制御フローも複雑になってしまう。

3.5.3 水平コンプライアンス要素の実現

水平コンプライアンス要素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ベグ挿入作業では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できない。そこで2種摩擦面スライド機構を開発した。この機構は Fig. 14 (a) 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、また Fig. 14 (b) 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、誤差吸収動作時にスムーズなスライド動作を実現しつつ、コンテナ把持後には不要な振動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。

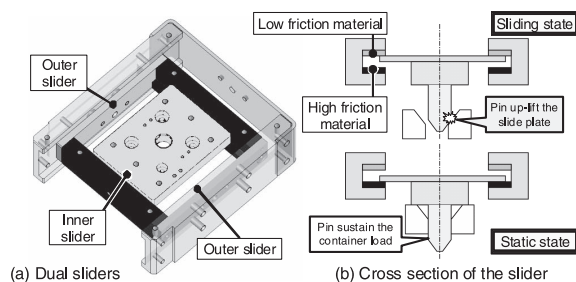


Fig. 14 Horizontal compliant mechanism

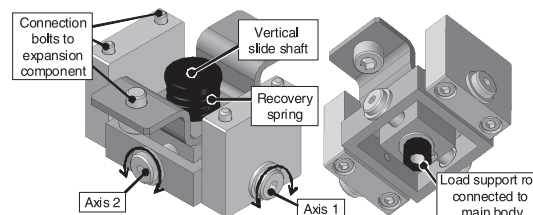


Fig. 15 Inclination compliant mechanism

3.5.4 傾斜コンプライアンス要素の実現

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本要素にはコンテナのピッチ角、ロール角の二つの回転自由度が求められる。2自由度の回転ジョイントを実現する簡易な方式としては3自由度の球面ジョイントを活用し、その1自由度を固定する方法もあるが、球面ジョイントの固定軸がわずかでも動作してしまうと Fig. 13 (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 が大きいため) を発生してしまう。そこで Fig. 15 に示すように部品数は球面ジョイントを用いる方式と比較して多くなるが2軸の回転軸を直交させる構造を採用した。なお水平状態への復帰を実現するために、コイルバネを戻りばねとして利用し、またコンテナ荷重が加わるとテーパ部が溝と接触することで、回転が制限されるような構造とした。

4. 実験1 (マニピュレーション機構単体試験)

本実験ではマニピュレーション機構の単体性能について試験する。まず最大荷重の支持性能を確認し、続いて操作対象コンテナと機構の間に水平、傾斜の位置決め誤差が発生している場合の誤差受容性能を把握する。

4.1 荷重支持性能確認試験

Fig. 16 に示すように、iコンテナ上面模擬板に10[kg]の荷重を吊り下げておき、人の力で持ち上げる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。

4.2 水平誤差受容性能確認試験

本試験では Fig. 17 に示すようなiコンテナおよ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。Fig. 18 (a) に本テストベンチの座標系を示す。Fig. 18 (b) に示すような13パターンコンテナ・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

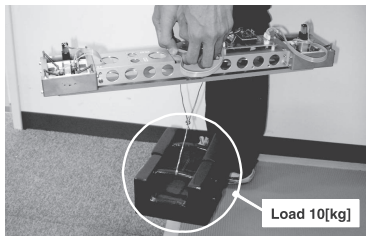


Fig. 16 Experiment of sustain ability at maximum load

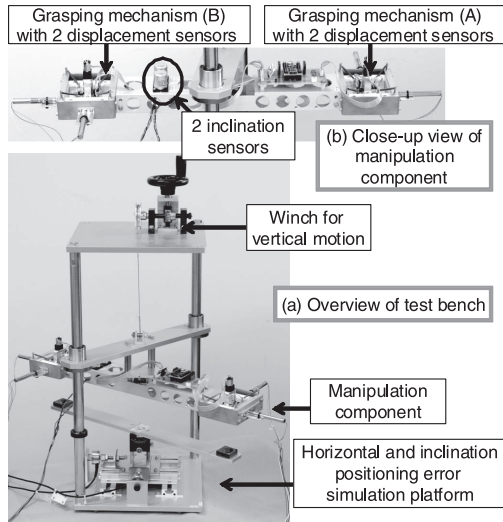


Fig. 17 Test bench for manipulation component

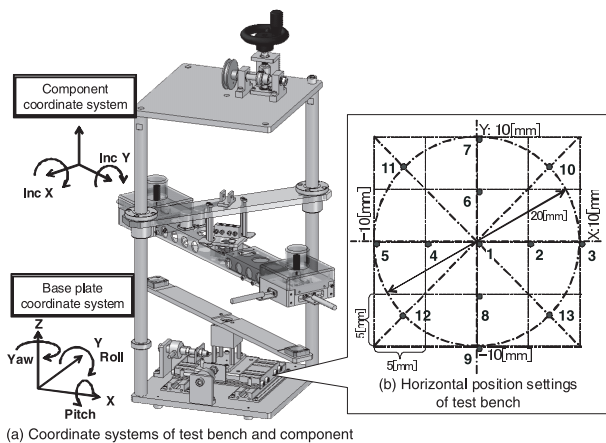


Fig. 18 The coordinate systems of test bench and horizontal position settings

試行回数は3である。Table 1に挿入動作の結果および水平最大発生力（2方向の合力）の一覧を示す。一部で変位センサ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、全般的によく誤差を吸収しており、高い水平誤差受容性能が確認された。今回使用した変位センサはスライド型のリニアポテンショで、スライダ部の摩擦によりバネの戻り初期位置が試行毎に異なるという現象が確認されたが、これは実際のマニピュレーション機構の使用状態では確認されていない。

Table 1 Result of horizontal error tolerance experiment

Measurement point	Position error		Yaw angle					
			0 [deg]		2 [deg] *1		-2 [deg] *1	
	X	Y	state	force	state	force	state	force
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	-	-	-	-

○: Insert motion is completed. Unit: position [mm], force [N]
 △: Insert motion is completed with initial position adjustment.
 -: Not tested. *1: 3 or -3 [deg] at measurement point 1

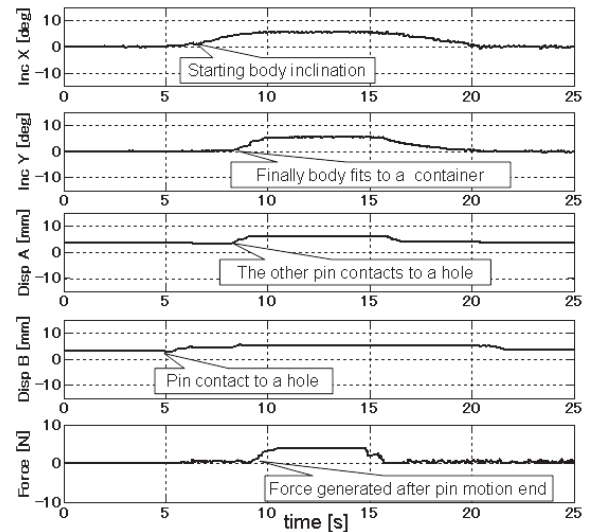


Fig. 19 Displacement and force graph of pin insert and pull motion with horizontal and inclination error

4.3 傾斜誤差受容性能確認試験

本試験では前節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 Fig. 18 の 1, 4, 8 の 3 点である。各ポイントにおいてピッチ、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幾何的限界より設定している。Fig. 19 にポイント 8 において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。このグラフよりコンテナが傾斜している場合、まず片側の連結ピンが水平誤差受容機能によって穴へとガイドされ、続いて筐体全体が傾いた後に反対側の連結ピンが穴へ挿入され始

め、最終的に筐体と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できる。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[†]、本マニピュレーション機構が相対水平誤差 5 [mm] かつ傾斜角が ±10 [deg] の場合でも連結動作を実行可能なことを確認した。

4.4 マニピュレーション機構単体試験のまとめ

本試験により以下のことを確認した。(1) 偏芯連結ピンにより仕様を満たす 8 [kg] 以上のコンテナ荷重を支持可能なこと。(2) マニピュレーション機構と操作対象コンテナに 10 [mm] の位置決め誤差がある場合でも把持動作を安定して実行可能なこと。(3) 操作対象コンテナが 10 [deg] 傾斜している場合でも、連結ピンが挿入可能な相対水平位置に存在すれば傾斜を吸収して把持動作が可能なこと。

5. コンテナ運搬タスクの実現 (システムの統合)

前章までで運搬ロボットが設計・実装され、主要機構部の性能が確認された。本章ではコンテナケース運搬ロボットとコンテナ位置認識システムとを統合し、部屋内に置かれたコンテナの発見、位置計測から把持・運搬までの一連のタスクを実現する。

5.1 コンテナ運搬タスクのシステム構成

Fig. 20 にシステム構成の概要を示す。コンテナ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、コンテナケース運搬ロボットの天井懸架移動部によって、コンテナ操作位置までの移動および輸送を行う、そして同コンテナ操作部によってコンテナのハンドリングを行う。

5.2 コンテナ位置認識システムの概要

コンテナ位置認識システム (Fig. 21) では部屋中に分散配置される低価格な IEEE1394 カメラ、コンテナケース運搬ロボット搭載の無線 LAN カメラ (Fig. 3 参照)、そして i コンテナの 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する「大域的な位置計測」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な相対位置・姿勢を計測する「局所的な位置計測」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に位置を計測できる。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 [32]。なお局所的な位置計測では専用のカメラ校正治具を用いているため、コンテナケース運搬ロボットの座標系での位置情報を取得できる。

5.3 コンテナケース運搬作業の流れ

運搬作業は大きく分けて、収納庫からの運び出しと収納庫への搬入の 2 種類の作業がある。収納庫への搬入は、任意の位置・姿勢に設置されたコンテナを操作する必要があるため動作に精度さが求められる。よって以降ではコンテナをある地点において把持し、移動させる作業に集中して議論を進める。まず Fig. 22 にコンテナ運搬作業の流れ図を示す。図に示すとおり本制御フ

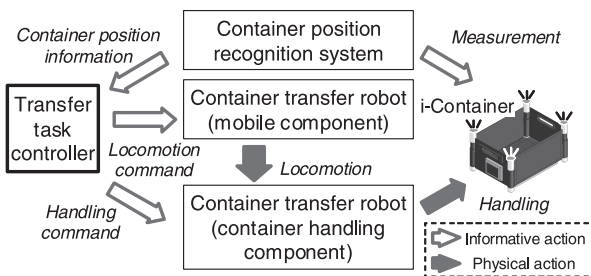


Fig. 20 System configuration for container transfer task

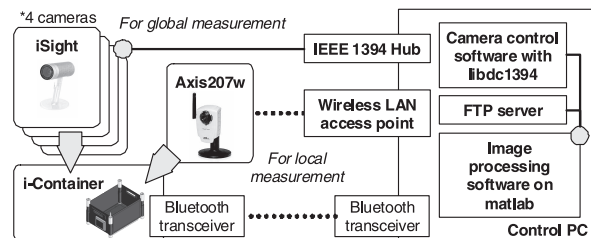


Fig. 21 Abstract of container position recognition system

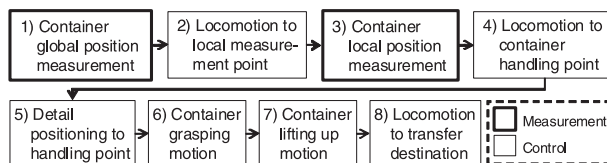


Fig. 22 Container transfer task flow

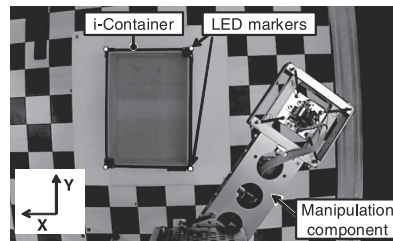


Fig. 23 A sample of camera image for local measurement

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伸縮機構部の内部センサ情報に基づく高さ制御以外は大域的なフィードバック制御を行っていない。

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。(1) コンテナの局所的な位置計測実行ポイント、(2) 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。

5.4 コンテナの局所的な位置計測実行ポイント

コンテナの局所的な位置計測は運搬ロボット搭載の単眼カメラを用いる。Fig. 23 が取得される画像例であるが、マニピュレーション機構が視野内に入り込むため、カメラ中心にコンテナが位置するようには撮影できない。そこでカメラ中心からオフセットして撮影するが、その際に以下の検討が必要である。

(A) 大域的な計測誤差があっても、LED マーカがロボット筐体

[†]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。

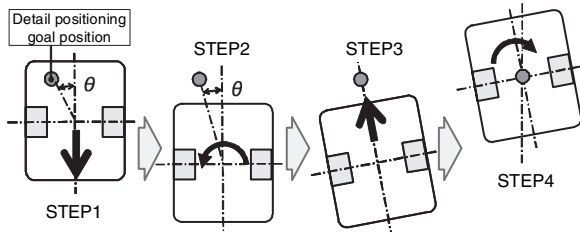


Fig. 24 Locomotion routine for detail positioning

と重ならない十分なオフセットが必要である。
 (B) 過大なオフセットは撮像位置・把持位置間の距離を長くし、計測・制御誤差の影響を受けやすくする。

(B) に関して、例えばオフセットが 500 [mm] のとき、二次元コードによる推定自己姿勢に 0.3 [deg] の誤差があると約 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、この二つの誤差を合わせると 9.9 [mm] となり水平誤差吸収性能の最大値 10 [mm] とほぼ同値になり、天井懸架移動部の位置決め誤差が許されなくなる。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, Y 方向オフセットを 175 [mm], 200 [mm] と設定した。

5.5 コンテナ把持時のロボット位置決めルーチン

コンテナ位置認識システムおよび運搬ロボットの位置決め性能を鑑みると、運搬ロボットの位置決め許容誤差は距離 1.5 [mm] (D_d)、向き 0.2 [deg] (θ_d) となる。この値は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、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 (Fig. 24) を採用した。

STEP1 旋回角 θ の絶対値が θ_{back} 以下になるまで直線的に後退する。

STEP2 その場旋回で目標位置への方向誤差を θ_p 以内とする。

STEP3 前進位置決めを行い、停止した位置での精度が D_d 以上なら STEP1 へ、 D_d 未満なら STEP4 へ。

STEP4 目標向きとの誤差が θ_d 以下になるようその場旋回を行う。旋回後、位置決め精度が D_d 以上なら STEP1 へ。なお現状の設定値は $\theta_{back} : 15$ [deg], $\theta_p : 1.0$ [deg] である。

6. 実験 2 (計測システム・運搬ロボット統合試験)

本章では統合システムの性能を把握する 3 種の実験を行う。

6.1 コンテナ把持動作ロボラスト性試験 (1. 水平誤差)

[実験の目的] 本試験では、コンテナのおよその位置を計測する大域的計測において様々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正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。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ボラストなコンテナ運搬の実現性を示す。

[実験の設定] 実験では Fig. 25 (a) に示すような専用試験テーブルと i コンテナを用いた。試験項目は次のとおりである。

- (1) 設置パターン (位置) : Fig. 25 (b) の 9 とおり

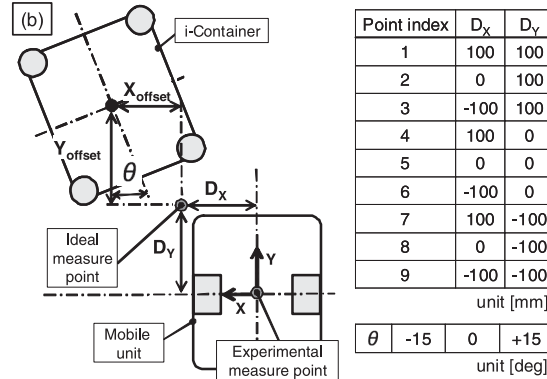
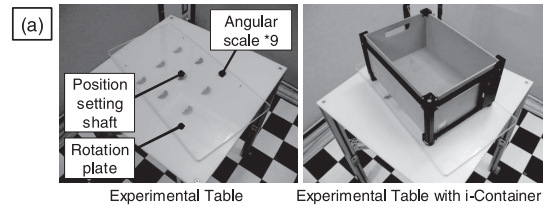
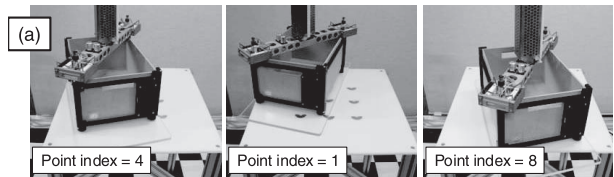


Fig. 25 (a) Experimental table and i-Container, (b) Position setup for experiment



Theta	Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-15 [deg]	state	NA	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	rate	2/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3
0 [deg]	state	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-
	rate	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	-
15 [deg]	state	OK	OK	NA	OK	OK	OK	OK	OK	-
	rate	3/3	3/3	2/3	3/3	3/3	3/3	3/3	3/3	-

OK: Mission completed.
 NA: Mission completed but not in all trials.
 -: Not tested because 1 LED marker is not in image.

Fig. 26 Snapshot and result of grasping experiment

- (2) 設置パターン (向き) : 各 3 とおり (-15, 0, 15 [deg])
 - (3) 試行数 : 各パターン 3 回
- 実験は次の手順にて実施した。
- (1) 実験計測点ヘラフ位置決めモードで移動。
 - (2) コンテナ局所的計測を実行。
 - (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。

[実験結果] 実験の様子を Fig. 26 (a) に、実験の結果を Fig. 26 (b) に示す。全体として安定した把持性能が確認されたが、局所的計測時にコンテナと運搬ロボットとの距離が離れているほど、運搬ロボットの自己姿勢計測誤差の影響が大きくなり失敗の可能性が高くなることが確認された。しかし、これは理想的な相対位置で局所的計測を再実行することにより回避可能であり、この繰り返しが本システム構成における唯一のループフローとなる。

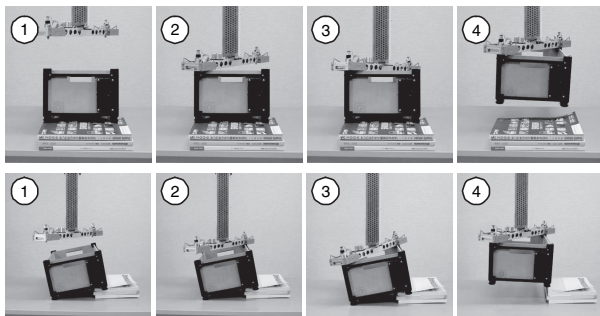
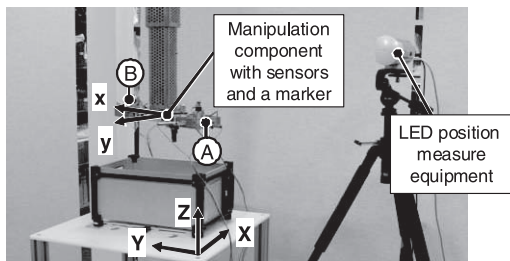


Fig. 27 Snapshot of inclined container grasping



#	Measurement item	Variation	Tools
1	Connection pin displacement	x, y at 2 mechanisms	Linear potentiometer
2	Displacement of expansion component tip	X, Y, Z	LED position measure equipment

Fig. 28 Setup of effect observation for multiple error absorbers

6.2 コンテナ把持動作ロバスト性試験 (2. 傾斜誤差)

傾斜誤差性能を確認するために、Fig. 27 のようにコンテナを高さ 45 [mm] の障害物上に設置し、コンテナの把持動作を実行し、コンテナがロール (10.3 [deg])、ピッチ (7.4 [deg]) 方向に傾斜している場合でも把持動作を実行可能なことを確認した。

6.3 誤差吸収要素影響評価試験

前節までの実験により、コンテナケース運搬ロボットがロバストにコンテナ把持動作を実現可能なことが確認された。一方で把持動作のロバスト性に対して誤差吸収要素がどのように寄与しているかが把握されていない。前述のように、コンテナケース運搬ロボットはマニピュレーション機構部に水平・傾斜の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、伸縮機構部も安全のために柔らかい動作を実現した結果、水平コンプライアンスと同じく水平面内で柔軟に変位することが可能であり誤差吸収要素として活用できる可能性がある。そこで本実験ではこれら複数の誤差吸収要素がどのように相互影響し、ロバストな把持動作を実現しているのか把握する。

Fig. 28 に実験設定を示す。試験では水平最大許容誤差である 10 [mm] の位置決め誤差がある状態にコンテナを設置し、把持動作を実施した。Fig. 29 に把持動作時の各計測項目の時系列データを示す。この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] という変位は伸縮機構部全体の撓み (Body X, Y) で吸収しているこ

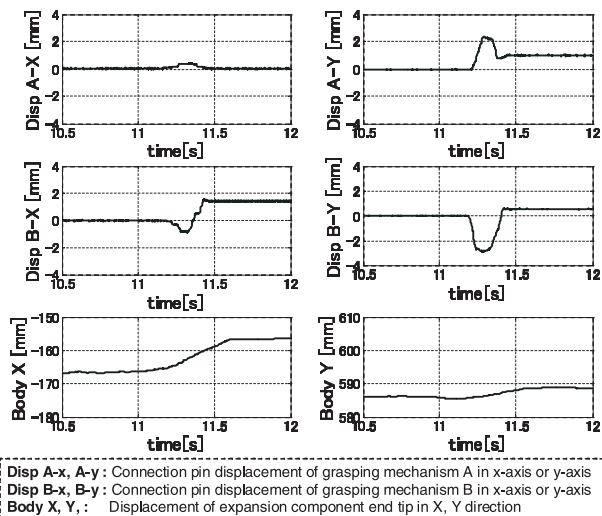


Fig. 29 Result of effect observation for multiple error absorbers

とが分かる。4 章の実験よりマニピュレーション機構単体でも高い誤差吸収性能を有していることが確認されていたが、本実験の結果により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性能で、コンテナの位置誤差を吸収する必要は必ずしもなく、ロボット全体で誤差吸収性能を実現可能なことが確認された。

6.4 計測システム・運搬ロボット統合試験のまとめ

本実験により実験 1 (第 4 章) で確認したマニピュレーション機構のテストベンチでの高いコンプライアンス性能の応用性を、コンテナ位置認識システムと統合し、実際にコンテナの把持動作を行わせることにより確認できた。一方で各誤差吸収要素の動作観察により、複数の要素が連携して位置決め誤差を吸収していることが確認された。

7. 結 論

本研究では生活環境というロボットにとって外乱の多い環境で物品の収納・管理というサービスを実現することを念頭に、受動的な機構による機械的柔軟性を積極的に取り入れることで計測および制御における誤差・バラツキを克服しロバスト性を実現するシステム構成法を提案した。提案したシステム構成法の特徴は受動機械的柔軟性を活用することによって、大域的な計測・制御フィードバックループを含まないフローが可能となるため、各構成技術単体での開発および性能評価が容易であるという点にある。提案したシステム構成法を実証するために、受動機械的コンプライアンス要素を実装した家庭用コンテナケース運搬ロボットを開発し、コンテナ位置認識システムと統合した実験の結果、操作対象の位置と向き (姿勢は不要) が把握できれば、大域的フィードバックループのないオープンループでもコンテナ把持動作を実現できることを示した。

本研究では受動機械的コンプライアンス機構の開発も課題であったが、開発を通して得られた設計ポイントをまとめておく。

- ポイント 1: 受動機械的コンプライアンスによるロボットと対象物体とのぬい動作を阻害しないために、把持を実現する手先効果器の動作方向とぬい動作方向が同一になるような把持・

†伸縮機構部は縦に長い構造をしているため傾斜誤差吸収要素としてはほとんど効果がない。

操作方式を選定することが重要である。⇒本研究では偏芯連結ピンを挿入する動作と、マニピュレーション機構のボディがコンテナの傾きに倣う動作が同方向になるように設計した。

●ポイント2: 受動機械的コンプライアンスは運搬時の不要な振動の原因となる。よって荷重の状態によって柔らかさが変化する構造を採用するのが有効である。⇒本研究の水平コンプライアンス機構では2種の素材を用いたスライダを開発し、傾斜コンプライアンス機構では垂直スライドシャフトがガイドに挿入されることによって柔軟性が低下する仕組みを開発した[†]。

●ポイント3: 複数の受動機械的コンプライアンス要素を組み合わせる際には、単純に単体の性能を確保するだけでなく、柔軟性による相互影響も加味して配置を検討しなければならない。⇒具体的には傾斜誤差吸収要素の初期回転軸平面と離れた位置に手先効果器を配置してしまうことにより、手先効果器の作用点位置が傾斜・回転で移動しジャミングが発生するのを避けなければならない。

本論文が提案したスキームは生活環境における物品のハンドリングを実現するにあたり、人の把持・操作方法をまねるのではなく、目的とする物品の状態に応じた戦略をとるというアプローチであり、本研究のような非人間型のロボット開発において非常に重要な指針であると考えられる。

参 考 文 献

- [1] K. Yamazaki et al.: "A grasp planning for picking up an unknown object for a mobile manipulator," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2143-2149, 2006.
- [2] J. Kuehnle et al.: "6D object localization and obstacle detection for collision-free manipulation with a mobile service robot," Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics, pp.1-6, 2009.
- [3] Z.C. Marton et al.: "Reconstruction and verification of 3D object models for grasping," Proceedings of The 14th International Symposium on Robotics Research, 2009.
- [4] 中村仁彦: "把持とあやつり", 計測と制御, vol.29, no.3, pp.206-212, 1990.
- [5] K.B. Shimoga: "Robot grasp synthesis algorithms: A survey," Int. J. of Robotics Research, vol.15, no.3, pp.230-266, 1996.
- [6] 前川仁: "触覚情報を利用した多指ハンドによる把握・操り", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.6, pp.776-781, 2000.
- [7] 齋藤直樹ら: "柔軟接触センサを備えたロボットハンドによる物体置き動作", 日本機械学会論文集 (C編), vol.73, no.725, pp.206-213, 2007.
- [8] 藤本純也ら: "多種センサ埋め込み型ハンドを用いた能動手探り戦略に基づく食器把握行動", 第14回ロボティクスシンポジウム, pp.509-515, 2009.
- [9] 福井類ら: "家庭内物流支援ロボットシステムの構築 (第1報: 物流支援ロボットシステムのシステム全体設計)", 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2M14, 2006.
- [10] R. Fukui et al.: "Development of an intelligent container prototype for a logistical support robot system in living space," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3397-3402, 2007.
- [11] 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.
- [12] 運搬機械部会・流通整備委員会クレーン分科会: "Millenniumを代表する物流機器—立体自動倉庫編—", 産業機械, no.608, p.14, 2001.
- [13] [Online] BL AUTOTEC Ltd. リストコンプライアンス/RCC デバイス, <https://www.bl-autotec.co.jp/FA/05rcc/05rcc.html>.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] S. 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, Apr. 2005.
- [17] 石塚孝孝, 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.699-710, 2008.
- [18] H. Iwata et al.: "Design of anthropomorphic 4-DOF tactile interaction manipulator with passive joints," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1785-1790, 2005.
- [19] M. Okada et al.: "Design of programmable passive compliance shoulder mechanism," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.348-353, 2001.
- [20] S. Salcudean and C. An: "On the control of redundant coarse-fine manipulators," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.3, pp.1834-1840, 1989.
- [21] W. Chiang et al.: "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.
- [22] Y. Nakamura et al.: "Optimal use of nonlinear electromagnetic force for micro motion wrist," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp.1040-1045, 1991.
- [23] R.L. Hollis et al.: "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, 1991.
- [24] M. Tsuda et al.: "Magnetic levitation servo for flexible assembly automation," International Journal of Robotics Research, vol.11, no.4, pp.329-345, 1992.
- [25] M.H. Raibert and J.J. Craig: "Hybrid position/force control of manipulators," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.103, no.2, pp.126-133, 1981.
- [26] 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.
- [27] 横井一仁ら: "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.
- [28] 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, 2004.
- [29] D. Tssetsrukou et al.: "Intelligent variable joint impedance control and development of a new whole-sensitive anthropomorphic robot arm," Proc. of Int. Sym. on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp.338-343, 2007.
- [30] T. Sato et al.: "Construction of ceiling adsorbed mobile robots platform utilizing permanent magnet inductive traction method," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.552-558, 2004.
- [31] [Online] 大洋製器工業株式会社: コンテナ固縛装置, <http://taiyoseiki.co.jp/>.
- [32] 福井類, 大串和之, 森武俊, 佐藤知正: "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の開発", 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.1294-1295, 2007.

[†]ただし傾斜誤差吸収機構の柔軟性低下の仕組みは十分な性能を有しているとは言えず今後も改良が必要である。



福井 類 (Rui Fukui)

2004年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。2004～2006年三菱重工業株式会社勤務。2008年日本学術振興会特別研究員 DC2。2009年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。現在、同研究科特任助教 (JST/CREST)。環境型ロボット (ロボティックルーム)、人みまもり用センサ、人装着型デバイス等の研究に従事。博士 (情報理工学)。日本機械学会、IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)



森下 広 (Hiroshi Morishita)

1991年東京大学大学院工学系研究科博士課程在学中に (有) エイチ・エム・アイ設立。1992年同博士課程単位取得退学後、電子顕微鏡用マニピュレータの開発に従事。2004～2006年東京大学 21世紀 COE「情報科学技術戦略コア」特任研究員。2007年東京大学 IRT 拠点産学官連携研究員。2008年同特任研究員。現在 (有) エイチ・エム・アイにおいて人間行動センシングシステム、微小力測定装置等の研究開発に従事。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)



佐藤知正 (Tomomasa Sato)

1971年東京大学産業機械工学科卒業。1976年同博士課程修了後、電子技術総合研究所入所。1991年東京大学先端科学技術研究センター教授に移籍。1998年東京大学工学系研究科機械情報工学専攻に移籍。2000年同大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻に改組。知能ロボットの研究に従事。工学博士。日本機械学会、IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)



勝代雅行 (Masayuki Shodai)

2007年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2009年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修士課程修了。在学中は環境型ロボット (ロボティックルーム) や RFID を利用した物品管理装置の研究に従事した。2009年パナソニック株式会社入社。現在に至る。(日本ロボット学会正会員)



森 武俊 (Taketoshi Mori)

1992年日本学術振興会特別研究員 DC1。1995年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年より東京大学先端科学技術研究センター助手。1998年同講師。2001～2002年米国 MIT 客員研究員。2002年東京大学大学院情報学環助教授。現在、同情報理工学系研究科知能機械情報学専攻准教授。行動理解、動作認識、人間状態計測、コンテキストウェア支援、パーベイシブコンピューティング、ネットワークセンシング等の研究に従事。博士 (工学)。IEEE、ACM、日本機械学会、電子情報通信学会、計測自動制御学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)