

# 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のデザイン

福井 類 \*\*, 森 武俊 \*\*, 佐藤 知正 \*\* (東京大学)

Design of Compliant Strategy & Mechanism for Home-use Object Transfer/Storage Robot System

Rui Fukui, Taketoshi Mori, Tomomasa Sato

This research describes strategic and mechanism design methodology to realize a robot system that transfers and stores daily use objects in our living space. Unlike industrial applications, there are three specific problems in the home application: (1) variation of living environment, (2) diversity of daily use objects, (3) dispersion of human activity. First, we presented a concept of strategic compliance as a basic solution for these problems and extracted three fundamental functions (Regulation, Assist/Enforce, and Navigation) for the strategy. Second, we aimed to realize a robust robot motion by introducing adequate mechanisms which can be suitable for the strategy. The mechanisms are; (1) passive mechanical compliance and (2) object constraint methodology with “Caging”. As an actual prototype system, a home-use logistical support robot system implemented with those strategies and mechanisms are constructed. By experiments, validity of the presented methodology was confirmed.

**Key words:** Home robot, Manipulation, Compliance, Closure, Logistics system, Intelligent environment

## 1. 緒論

近年、生活環境中において居住者を取り巻くモノ・情報溢れが問題となっている。都市部における居住環境状況は面積、費用の面から言っても厳しさを増し<sup>1)</sup>、一方で消費者を取り巻く商品情報はますます物品購入を助長し<sup>2)</sup>、モノ溢れの状況は一向に解決されず、物品を収納・管理するために非常に多くの労力が浪費されている。本研究ではこのようなモノ溢れの状態を解決するために、生活環境中において物品搬送・収納を実現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)を研究ターゲットとする。ロボットシステムには(1)人間には出来ない方法、機構で物品を操作・収納することが可能であり、非常に高い空間効率で物品収納を実現出来る可能性があり、(2)外部記憶装置を利用することにより(人の曖昧な記憶と違い)永遠に消えることのない物品管理情報を活用出来るという利点があり、上記の問題に対する根本的な解決方法となる可能性がある。

このようなロボットシステムを実現するためには、ロボットの要素技術を洗練させるのはもちろんのこと、システム全体として数々の問題を克服するベースとなる戦略をデザインする必要がある。そこで本研究ではまずシステムを実現する上で有効な戦略デザインについて検討し、そしてその戦略を実現する機械的、情動的な要素技術をデザインすることで、ターゲットとするシステムの実現を目指す。

本論文の構成は次の通りである。第2章ではまず生活環境中で物品搬送・収納を行うロボット特有の課題を整理し、続いてその課題を克服するために必要な3つの主要戦略及び技術のデザインについて述べる。第3章では前章で議論した主要3戦略・技術を活用した家庭内物流支援ロボットシステムの構築と各システム構成要素の基本性能試験結果について述べる。第4章では3章で構築したシステム構成要素を接続することにより実現

されるタスクについて述べ、その統合実験結果を示す。第5章は結論である。

## 2. 生活環境中で物品搬送・収納を行うロボットのシステムデザイン

### 2.1 生活環境特有の課題と研究対象とする3つの戦略・技術

現在、日本では約35万台の産業用ロボットが生産活動に参加しているが、生活環境中で動作するロボットはiRobot社のRoombaなどわずかであり、物品を操作可能なロボットは実験レベルでは複数の取り組みが見られるが<sup>3,4,5,6,7,8,9)</sup>、未だ市販された例はない。これは安全の問題もあるが、生活環境では生産現場と異なり以下の3つの問題があるためである。

- 生活環境の変化 (Variation of living environment)
- 物品の多様性 (Diversity of daily use objects)
- 人の営みのバラツキ (Dispersion of human activity)

これらの問題を解決するために本研究ではまず戦略的コンプライアンスという概念を提案する。以前よりロボットと環境が接触を伴う場合にはロボットのカモしくは柔軟性を制御することが重要であると認識されてきた<sup>10)</sup>。ここでこの柔軟性もしくは俊い性能をコンプライアンスと呼ぶが、Fig. 1に示すように機械的コンプライアンスではロボット側が人及び環境に倣うのに対して、戦略的コンプライアンスでは人を含めた環境側がロボットに倣う仕組みのことを示す。

これは知能化空間や環境構造化の概念<sup>11,12)</sup>とも関係が深いですが、ロボット自体の機能を高めるのは当然のこと、ロボットが動

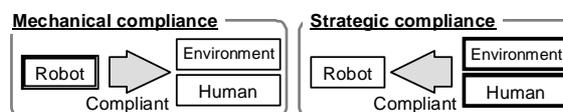


Fig. 1 Difference between mechanical and strategic compliance

\* 原稿受付 平成22年10月15日

\*\* 非会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷7-3-1)

作する環境そしてスキームを整備することでロボットサービスの質を向上させようとする概念とも言える<sup>1</sup>。この戦略としての柔軟さはロボットの機械的な柔軟さとの組み合わせによってその効果を発揮するものであり、機械的コンプライアンスも本研究が取り組む主要技術の一つである。

一方、本研究は物品を搬送・収納するシステムを対象としているため、様々な戦略を導入することによりその難易度は低減可能としても、物体のマニピュレーション問題に取り組む必要がある。従来ロボットマニピュレータにおいては物体の把持安定性の指標としてクロージャ（拘束）に関する議論が盛んに行われてきた<sup>13, 14, 15</sup>。本研究でも物体の運搬・収納作業のロバスト性向上のために、提案する戦略と適合したクロージャの構成法に関しても主要技術として議論する。

以降では戦略的コンプライアンス、機械的コンプライアンス、クロージャの順に議論を進める。

## 2.2 戦略的コンプライアンス

今日の生活で欠かすことの出来ない機械の1つに自動車があるが、その導入・発展の歴史<sup>16, 17</sup>を分析すると、新たな機械であるロボットの導入戦略に求められる要件が整理される。本研究では Table 1 に示すような分析を行い、戦略的コンプライアンスとして (1) タスク、役割、領域・空間の規格化、(2) 補助・強化、(3) 誘導の3つの基本機能が重要であると考えた。

Table 1 Analysis of automobile history and extraction of key strategies

| History of environmental arrangement for automobile   | Generalization of arrangement                                 | Basic function of strategies  |
|---|---|---|
| (1) Establishment of traffic rules (Left-hand traffic, Separation of walk way and road way) | Establishment of basic rules in machine motion area           | <b>Regulation</b><br>(1) Task regulation<br>(2) Role regulation<br>(3) Space regulation |
| (2) Pavement of road  | Configuration of environments that support machine capability | <b>Assist</b>   |
| (3) Installation of signal, traffic sign and white line                                     | Promotion of rule or law compliance                           | <b>Navigation</b>   |
| (4) Construction of high way  | Configuration of environments that elicit machine potential   | <b>Assist, Enforce</b>  |

続いてこれらの基本機能によって生活環境特有の課題を具体的にどのように解決するかの議論が必要となる。

まず家庭内での物品の多様性に関する課題に取り組むため、ロボットが物理的に取り扱う最小単位を個々の物品ではなく1つのコンテナケースとする。これはタスクの規格化 (Task regulation) であり、人はコンテナとの物品の受渡しを行い、ロボットはそのコンテナのハンドリングするという役割の規格化 (Role regulation) 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、ロボットの必要機能・仕様を簡潔に出来る。ロボットマニピュレーションの観点から見ると、操作対象となる物品が限定されることによって、汎用性を求めるあまりにこれまで採用出来なかった技術の導入可能性が出てくるという利点もある。

続いて、生活環境の変化に対応するため、前項の規格化により対象に絞り込まれたコンテナにロボットが物理的・情報的に扱いやすい構造、装備を設けることとした。具体的にはロボットのセンサが安定した特徴量抽出が行えようにするマーカ、またロボットに実装される機械的コンプライアンスの性能を引き出すガイド構造などが挙げられる。これにより家庭用ロボット

<sup>1</sup> 従来のようにロボット側が全てを負うのではなく、人や環境がロボットに歩み寄りを見せるという意味でも“柔軟な”戦略と言える。

に不足する環境変化に対するロバスト性を実現出来る。更にコンテナに収納する物品には識別用の RFID を貼り付けるものとする。これは補助・強化 (Assist, Enforce) の戦略に該当する。

最後に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、人とロボットが同一の物体 (コンテナ) にアクセスする状況が発生する場所 (施設) においては、物理的なガイド及び音・光等の情動的なガイドを用意し、人の操作後のコンテナケースがロボットにとって扱いやすい状態になるように人の動作を誘導 (Navigation) することとした。

以上の検討を Table 2 に整理し、生活環境中の課題と戦略的コンプライアンスの基本機能との対応を示す。

Table 2 Home-use specific problems, solutions, and strategies

| Problems                        | Solutions  | Basic function of strategies |
|---------------------------------|--|------------------------------|
| Variation of living environment | Environmental arrangement for stable measurement                               | Assist, Enforce              |
|                                 | Cooperation of multiple equipments   | Role regulation              |
|                                 | Arrangement of a specific space where robots can concentrate on their task     | Space regulation             |
| Diversity of daily use objects  | Definition of robots' operation target as a container (Not objects themselves) | Task & Role regulation       |
|                                 | Installing special structure or informative equipment to the container         | Assist, Enforce              |
|                                 | Each object is equipped with RFID tag  | Assist, Enforce              |
| Dispersion of human activity    | Mechanical or informative navigation of human casual motion                    | Navigation, Role regulation  |

## 2.3 機械的コンプライアンス

機械的コンプライアンスはその実現形態によって3種類に分類出来る。1つ目の受動的コンプライアンスは Whitney が詳細な解析を行った RCC (Remote Center Compliance)<sup>18</sup> を代表とするバネなどのパッシブな機械要素により実現される方式である。最近ではロボットの学習におけるパッシブな機械要素の重要性に関する指摘<sup>19</sup>や、人と共存するロボットを実現するためにロボットの機構の中にバネ要素を含む例<sup>20, 21, 22</sup>があり、機構的な工夫により学習や制御だけでは実現困難な性能を実現する取り組みが見られる。

2つ目の能動的コンプライアンス集中実装方式は一般に Coarse-Fine Manipulator<sup>23</sup> と呼ばれる方式であり、稼動領域の大きな汎用マニピュレータの先端に高精度かつ短ストロークのアクチュエータを搭載することで、手先における高精度な動作を実現したり、環境との接触力を制御する方式である。Tsuda らがおこなった詳細な実験・解析<sup>24</sup>は能動的コンプライアンス集中実装方式のみならず、受動的コンプライアンスの設計においても重要な知見が含まれている。

3つ目の能動的コンプライアンス分散実装方式は汎用マニピュレータの各関節の制御によって、手先で所望の扱い性能を実現しようとする方式であり、手先での性能と各関節の制御方法に関して様々な研究が行われてきた<sup>25, 26</sup>。

本研究では産業用途での頑健なフェールセーフ技術の実績を考慮して、受動機械的コンプライアンスによって環境との滑らかな接触の実現を狙う。具体的には後に示すコンテナケースを運搬するロボット (3.3 節) において受動機械的柔軟性を導入することでロバストなコンテナ操作を実現することを狙った。

## 2.4 幾何的な検討の重要性とクロージャ

一般の機械設計で最も時間が費やされるのが幾何設計である。エンジニアは図面に前に部品の形状、配置を検討し、必要機能を

実現するよう最適化を行う．一方で物体の把持またはマニピュレーションは物体の準静的もしくは動力学を解く問題として取り扱われる．もし幾何検討を中心として把持状態を実現可能であれば、エンジニアが得意とする「作図」によりマニピュレーションを検討することが可能となり、その効果は大きい．幾何的な拘束としては Form closure<sup>27)</sup> が有名であるが、中村は力学的な拘束である Force closure との双対性を示しており<sup>13)</sup>、純粋な意味での幾何的拘束とは言いがたい．一方で Wang らが提案している Object closure<sup>28)</sup> は拘束内での物体の移動を許容する Caging を実現したものであり、搬送物に対してロボットが十分に反作用力を出力出来る場合、幾何的な検討のみで物体の把持を実現することが可能となる．Object closure の定義を次式に示す．

$$C_{free.obj} \neq \emptyset, C_{free.obj} \neq q_{obj}, C_{free.obj} \cap C_{free.inf} = \emptyset \quad (1)$$

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．

但し Object closure は Fig. 2(a) に示すように物体の任意の姿勢を許容しており、さらに集合論で表現されているため搬送タスクへの応用に適していない場合がある、そこで Fig. 2(b) に示すように物体の姿勢をある範囲に限定し、また作図による確認項目を明確にするために Object closure の条件を以下のように書き下し、Geometric object closure (以降 GOC と表記) と呼ぶ．

#### 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 (水平) 方向を独立に検討する．重力方向では重力を 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、並進方向に因らず規定の範囲で作用する作用候補点が 1 つ以上ある．
- [条件 5] 回転 3 自由度に物体が運動した場合、回転方向に因らず規定の範囲で作用する作用候補点が 2 つ以上ある．

この GOC は後の 3.4 節に示す家庭用コンテナ自動収納庫のにおけるコンテナ操作ロバスタ性向上のために利用されている．

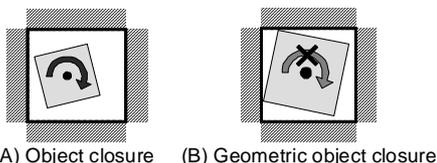


Fig. 2 Difference between object closure and GOC

### 3. 家庭内物流支援ロボットシステムの構築

本章では前章の主要 3 戦略技術を組み込んだ家庭内物流支援ロボットシステムの構築について述べる．システムのコンセプト図を Fig. 3 に示す．システムは 5 つの要素より構成される．

1. インテリジェントコンテナ (i コンテナ): 人とロボットのイ

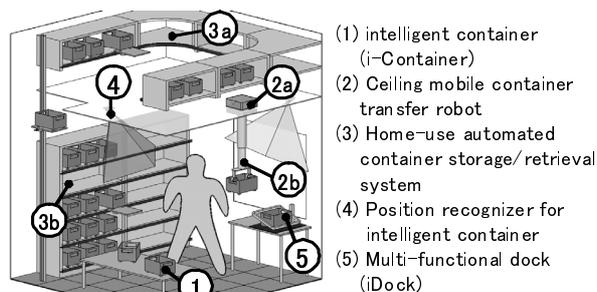


Fig. 3 Logistical support robot system in a living space

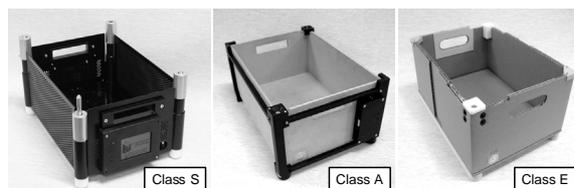


Fig. 4 Snapshot of the intelligent containers

ンターフェイスの役割を担い、物品を収納する<sup>29)</sup>

2. 天井移動型コンテナ運搬ロボット (天井懸架移動部<sup>30)</sup> + コンテナ操作部): 人と低干渉に移動を行い、柔軟な機構によりロバスタにコンテナのハンドリングを行う<sup>31)</sup>
3. 家庭用コンテナ自動収納庫: 人の生活空間・スタイルを侵害せず、自動出納動作と高空間利用効率を実現する収納庫<sup>32)</sup>
4. コンテナ位置認識システム: 部屋内に設置されたコンテナの発見から詳細な位置計測まで網羅する認識・計測系<sup>33)</sup>
5. i コンテナ用多機能ドック (iDock): 個別の部屋における本システムへの窓口、廉価版 i コンテナの機能を補う<sup>34)</sup>

以降では各サブシステムの概要と基本性能試験結果について述べる．なお iDock に関しては参考文献<sup>34)</sup> を参照されたい．

#### 3.1 インテリジェントコンテナ (i コンテナ)

i コンテナは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”の役割を担う存在である．つまり人は i コンテナを仲介してロボットシステムと物品のやり取りをし、ロボットシステムは i コンテナを操作することにより、人の物品搬送・収納要求を実現することになる．よって i コンテナは本システムにおいて戦略的コンプライアンス (タスク・役割の規格化、補助・強化) を具現化する代表的な存在であると言える．内容物の使用頻度によって使い分ける 3 つのバリエーション (Fig. 4) を開発した．

i コンテナの特徴は次の通りである．(1) 現在家庭で使用されている A4 サイズのコンテナケースと同様に収納、持ち運びが可能である．(2) i コンテナに実装された (クラス S) もしくは i コンテナを取り囲むように移動する RFID タグリーダ<sup>34)</sup> によって (クラス A, E) コンテナに収納された物品に貼り付けられている RFID タグを読み取り、内容物を認識することが出来る．(3) 上面の対角に実装されたテーパガイド付き連結穴により、ロボットが容易にコンテナを把持可能である．(4) 上面の 4 つ角に実装された周期点滅 LED により、視力カメラを用いて容易にコンテナの位置・姿勢を計測することが可能である．(5) 無線通信により、コンテナの状態 (内容物、設置状況、電源残量など) やユーザの簡単なリクエスト (コンテナの片付けなど) をホストコンピュータに通信することが出来る (クラス S, A) . 仕

様一覧を Table 3 に示す .

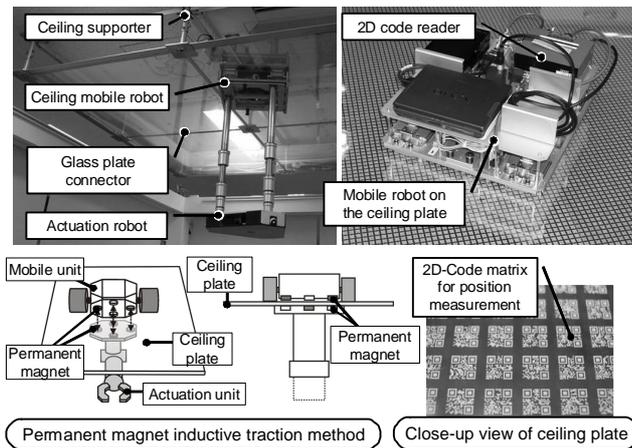
**Table 3** Specification of the intelligent containers

|                 | Class S<br>(Daily use)                                       | Class A<br>(Weekly/Monthly use) | Class E<br>(Long period storage) |
|-----------------|--|---------------------------------|----------------------------------|
| Size, payload   | 370*270*188 [mm], maximum 5 [kg]                             |                                 |                                  |
| Weight          | 2.8 [kg]   | 1.7 [kg]                        | 1 [kg]                           |
| Grasping guide  | POM tapered guide plate (Hole D11[mm], Taper angle 45 [deg]) |                                 |                                  |
| Fork insertion  | Fork gap: 20.5 [mm], Fork width: 206 [mm]                    |                                 |                                  |
| Position marker | Red LED 4 points; blinking 7.5 [Hz]                          |                                 | ---                              |
| Wireless comm.  | Bluetooth Ver2.0, Class2, Serial 57.6 [kbps]                 |                                 | ---                              |
| Load sensor     | Photo reflector type x4: each max range 6 [kg]               |                                 | ---                              |
| Main material   | Aluminum (A5052)   | ABS/MDF board                   | Cardboard/MDF board              |

### 3.2 天井移動型コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)

天井懸架移動部では従来の人間生活環境を侵害しないように、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生活空間へアクセスするという手法を取ることを考えた。これは空間・領域の規格化の戦略を導入した例と言える。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。

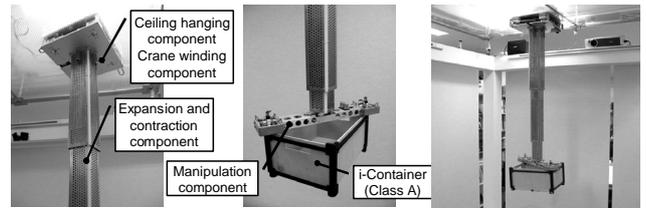
生活環境中の天井面にロボットを吸着させる手法として永久磁石誘導型吸着法 (Fig. 5 下)<sup>30)</sup> を用いた。また複数ロボットの同時位置計測のため2次元コードマトリクスによる位置計測手法<sup>30)</sup> を用いた。天井懸架移動部の概観を Fig. 5(上) に、仕様一覧を Table 4 に示す。実験により永久磁石誘導法は生活環境内で人と低干渉にロボットを動作させるのに有効であることが確認されている。また2次元コードマトリクスを用いた位置計測手法の繰り返し精度は標準偏差で位置 0.33 [mm]、方向 0.30 [deg] 以下であり、ロボットが自律的かつ正確に自己位置を推定するのに十分な性能を有していることを確認している。



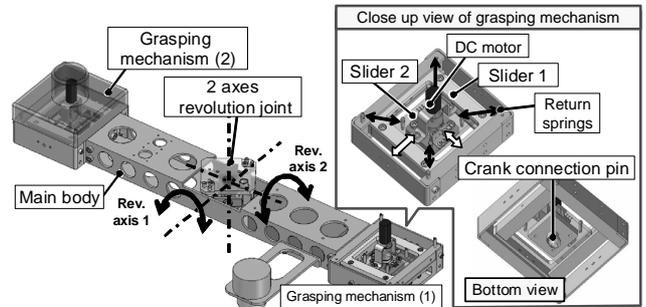
**Fig. 5** Snapshot of the ceiling mobile unit

**Table 4** Specification of the ceiling mobile component

|                            |   |                     |            |
|----------------------------|---|---------------------|------------|
| Drive mechanism            | Two drive wheels and two support ball casters     |                     |            |
| Body size                  | 340 * 320 * 150 [mm]                              |                     |            |
| Position estimate accuracy | Position: 0.33 [mm], Direction: 0.30 [deg] (S.D.) |                     |            |
| Weight                     | 10 [kg]   | Min rotation radius | 0 [mm]     |
| Maximum drive force        | 35 [N]  | Maximum speed       | 125 [mm/s] |



**Fig. 6** Snapshot of the container handling unit



**Fig. 7** Overview of the manipulation component

### 3.3 天井移動型コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)

コンテナ操作部 (Fig. 6) 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。

Fig. 7 に示すマニピュレーション機構部は次の特徴を有する。(A1) i コンテナとの連結・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。偏芯連結ピンはコンテナを把持するという問題を『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』に変換出来る。(A2) 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受動機械的コンプライアンス要素を装備する。(A3) 水平コンプライアンス要素では無負荷時は低摩擦素材と接触しスムーズにスライドするのに対し、荷重加わっている時は高摩擦素材と接触しスライドが停止する<sup>35)</sup>。

伸縮機構部及び巻き上げ動力部では次の特徴を有する。(B1) タケノコ型伸縮機構によりねじりや振動が比較的少なく天井面から生活空間へのアクセスが可能である。(B2) 並進・回転固定構造として樹脂レール+保持カバー構造を採用することにより、動作時は不要な変位を抑制しつつも、Fig. 8 に示すように人やモノとの接触時には柔軟に変形することによって、接触力を低減可能な受動機械的コンプライアンス要素を内包する。(B3) 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。コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)の仕様一覧を Table 5 に示す。

### 3.4 家庭用コンテナ自動収納庫

工場や物流基地などの産業用コンテナ自動収納庫は高い動作速度が求められるため、その動作範囲から人を除外するのが一般的である。一方、家庭用の収納庫では装置の専用空間を用意するのが困難なため、人の生活との調和が求められる。

人との調和を実現するために、家庭用コンテナ自動収納庫 (Fig. 9) は次の3つの特徴を有する。(1) エレベータ収納方式の採用

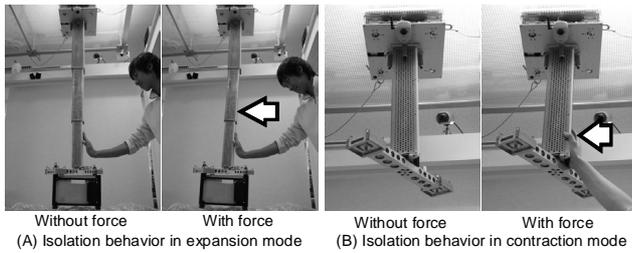


Fig. 8 External force isolation behavior

Table 5 Specification of the container handling unit

|   |  |               |                  |
|---|--|---------------|------------------|
| Size                                    | 340 * 320 * 610 [mm] (Contraction state)                                 |               |                  |
| Pay load                                | 8 [kg] (Including container weight 3 [kg])                               |               |                  |
| Grasping mechanism                      | Jamming free crank connection pin x2                                     |               |                  |
| Compliant capability                    | Horizontal: 10 [mm], Roll/Pitch: 10 [deg]                                |               |                  |
| Mechanisms for external force isolation | Torque limiter, constant load spring and permanent magnet for decoupling |               |                  |
| Safe working load                       | 10 [kg]  | Lift stroke   | 610 - 1,835[mm]  |
| Lift-up speed                           | 100 [mm/s]   | Lifting mech. | Steel belt winch |

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) 垂直・水平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、また占有空間を低減し挟まれが発生する機構の削減が可能、(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・姿勢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。

3つ目の機能は戦略的コンプライアンスにおける誘導を具現化したものであり、人とロボットが同一の対象(コンテナ)を操作する本システムにおいては重要な機能である。

更にもう一つの特徴として、コンテナの水平運搬機構におけるGOCを活用したロボастなコンテナ操作がある。GOC状態を実現するために、i-コンテナと自動収納庫側はFig. 10に示すの構造体が寄与している。Fig. 11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。ここで特徴的なのがコンテナ拘束時(C)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(B)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ボастに実現されるようになる。実験によりFig. 12に示すように人によるコンテナ収納時に位置決め誤差がある場合でも取出動作が可能なることを確認している。家庭用コンテナ自動収納庫の仕様一覧をTable 6に示す。

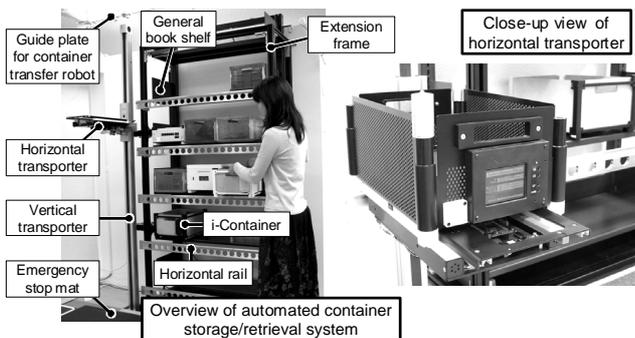


Fig. 9 Snapshot of the home-use automated warehouse

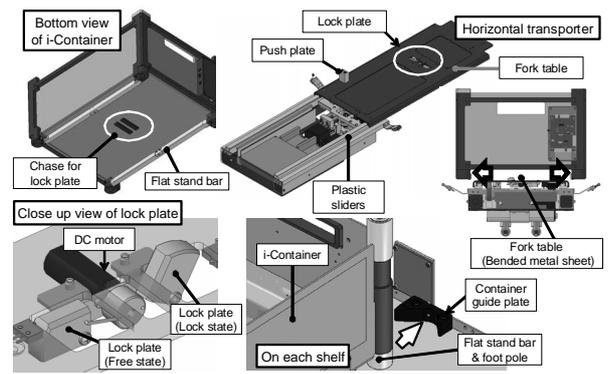


Fig. 10 Structural parts that contribute to GOC

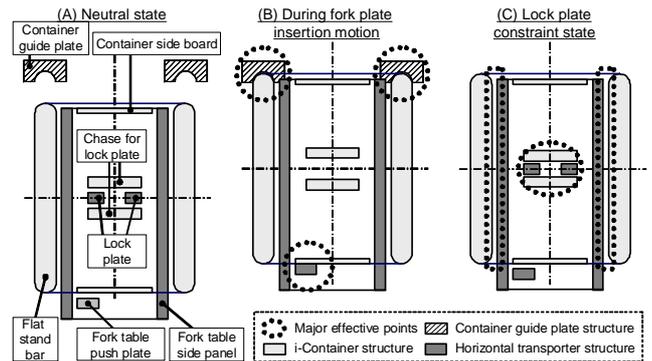


Fig. 11 GOC state realized in horizontal transporter

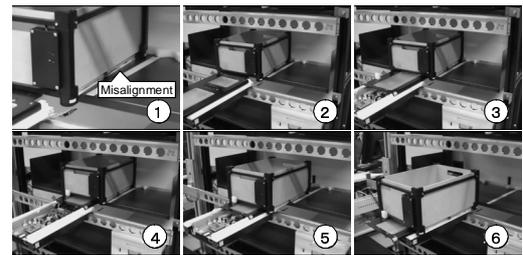


Fig. 12 Sequential images of a container retrieval motion under an artificial misalignment condition

Table 6 Specification of the home-use automated warehouse

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Basic structure       | Elevator type  |
| Size                  | W1,500 * H2,300 * D450 [mm]  |
| Motion layout         | Separated motion layout (Linear actuator and horizontal transporter) |
| Rail type             | Mono rail. Cantilever state.   |
| Pick / Place method   | Fork and simple lock method  |
| Maximum payload       | 8 [kg] (Including container weight 3 [kg])                           |
| Transport speed       | Slow for safety (horizontal: 0.2 [m/s])                              |
| Container recognition | RFID tag and antenna   |
| Space occupation      | Small (Escape mode is available)                                     |
| Human pick/place      | Available  |
| Compliance to errors  | High compliant   |
| Obstacle recognition  | Infra-red sensor and contact switches                                |

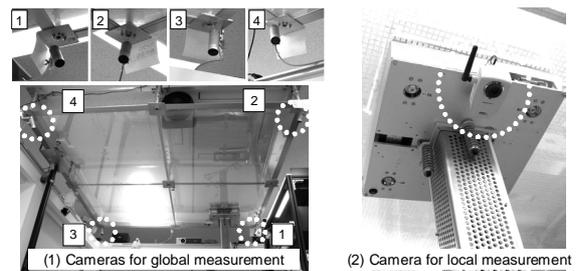


Fig. 13 Snapshot of the container position recognition system

### 3.5 コンテナ位置認識システム

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、最初のコンテナ発見及び大域的的位置計測では、環境中に散在させた固定カメラでデータ取得を行い、続く第2フェーズの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、その移動カメラにてロボットとの正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概観を Fig. 13 に、仕様一覧を Table 7 に示す。実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。

Table 7 Specification of the container position recognition system

|                        |   |
|------------------------|---|
| Two phase measurement  | (1) Global measurement with distributed cameras (iSight)<br>(2) Local measurement with a wireless camera (AXIS207W) on the container transfer robot |
| Accuracy               | Global measurement: maximum horizontal error 67 [mm]<br>Local measurement: maximum horizontal error 7.3 [mm]  |
| Processing time        | Global measurement: 1.5 [min] (Process for 4 cameras)<br>Local measurement: 1 [min]   |
| Environment resistance | Recognition and measurement is available in spite of illumination condition variations  |

### 3.6 システム構築のまとめ

Fig. 14 に家庭内物流支援ロボットシステムの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 適用箇所を整理して示す。本論文で全ての適用詳細について述べられているわけではないため、詳細については各節で参照している文献をご覧ください。

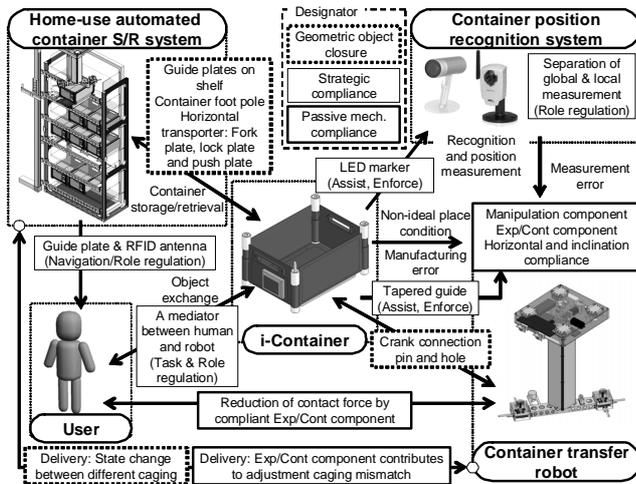


Fig. 14 3 major technologies in the presented system

## 4. システムの連携性能評価実験

サブシステムの連携により実現されるコンテナ把持・運搬タスク及びコンテナ受渡しタスクの性能評価実験を行った。

### 4.1 コンテナ把持・運搬タスク実験

模擬生活環境中に設置されたコンテナをコンテナ位置認識システムにより認識、位置計測し、コンテナ運搬ロボットにより把持・運搬する実験を行う。一般的に物品をハンドリングする際には Fig. 15(上) に示すように、力センサ等によりその把持過程全般に渡ってフィードバック制御を用いるが、本タスクでは Fig. 15(下) のように計測と把持の動作が完全に分離しており、明示的なフィードバック制御を行っていないところが特徴的で

ある。本実験で受動機械的コンプライアンスを活用することによりフィードバック制御の負担が低減可能なことを確認する。

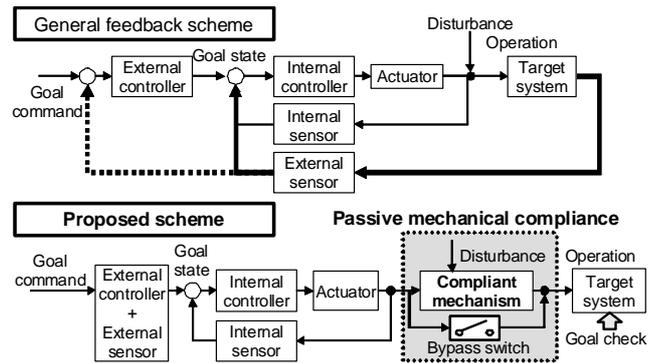


Fig. 15 Difference of measurement and control schemes

#### 4.1.1 コンテナ把持動作ロバスト性試験: 水平誤差発生時

本試験の目的はコンテナ位置認識システムにおけるコンテナの大域的的位置計測誤差の影響と、それに対する局所的的位置計測の計測性能及びコンテナ運搬ロボットの外乱吸収性能を確認することである。Fig. 16 に示すようにコンテナと運搬ロボットの相対位置を基準位置から直交2方向に  $-100, 0, 100$  [mm] ずつずらした9通りの相対位置に設置し、相対角度を  $-15, 0, 15$  [deg] の3通りにした合計27通りの状況において把持を実行する試験を行った。Fig. 17 に示すような実験の結果、把持実行時のコンテナ運搬ロボットの水平移動距離が大きくなる (Fig. 16 の点1や3の状態) と3試行に1回ほど失敗する場面があったが、殆どの場合で問題なく把持を実行可能なことを確認した。把持が失敗する原因は水平移動距離が長い場合、コンテナとの相対位置を計算する際に用いる天井懸架移動部の向き推定誤差の影響が大きくなるためと考えられる。

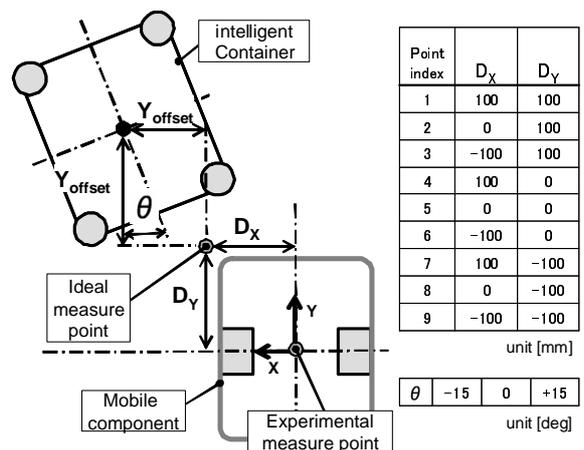


Fig. 16 Experimental position setup

#### 4.1.2 コンテナ把持動作ロバスト性試験: 傾斜誤差発生時

本試験の目的はコンテナが傾斜して設置されている場合でも、ロバストにコンテナの把持動作を実行可能かを確認することである。机上に設置するコンテナの底に障害物を設置し、コンテナを最大でピッチ  $10.3$  [deg]、ロール  $7.4$  [deg] に傾けて把持動作を実行した。実験の結果、いずれの場合にもコンテナの傾き

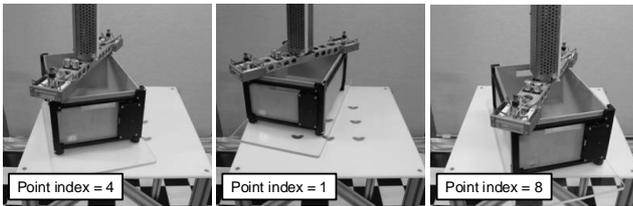


Fig. 17 Snapshot of grasping experiment

を傾斜コンプライアンス要素が吸収して、ロバストに把持可能なことを確認した。Fig. 18 に把持動作の様子を示す。

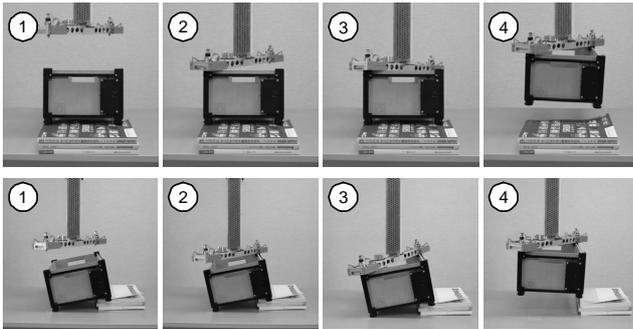


Fig. 18 Snapshot of roll or pitch inclined container grasping

#### 4.1.3 考察

コンテナ把持動作ロバスト性試験では、把持実行時に精密なフィードバック制御を伴わない本システムでのスキームにおいても受動機械的コンプライアンスによって、ロバストな把持動作が可能であることを示した<sup>35)</sup>。

#### 4.2 コンテナ受渡しタスク実験

コンテナ運搬ロボットと自動収納庫間におけるコンテナの受渡し動作の実験を行う。受渡しタスクは異なる Caging 状態間の遷移作業と言える。一般的に Caging 状態では各々に設定された移動許容範囲が存在し、Fig. 19 に示すように場合によってはその不整合を補正するために何らかの仕事が必要となる。本システムの設定では自動収納庫における Caging の移動許容範囲の方が小さいため、運搬ロボットがこの不整合を補正可能であることを確認する必要がある。

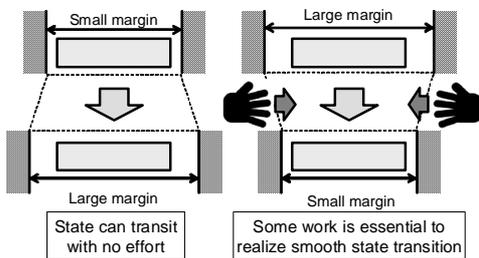


Fig. 19 Mismatch problem of allowable displacement between two caging conditions

#### 4.2.1 コンテナ出庫受渡し試験

自動収納庫から運搬ロボット側への受渡しは移動許容範囲の不整合が発生しないため、Fig. 20 に示すように円滑にタスクを実行可能であった。

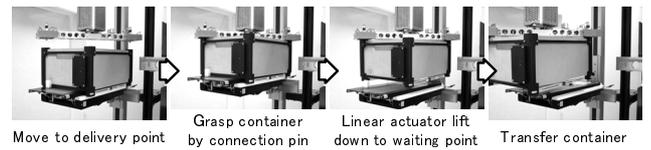


Fig. 20 Sequential images of container retrieve delivery

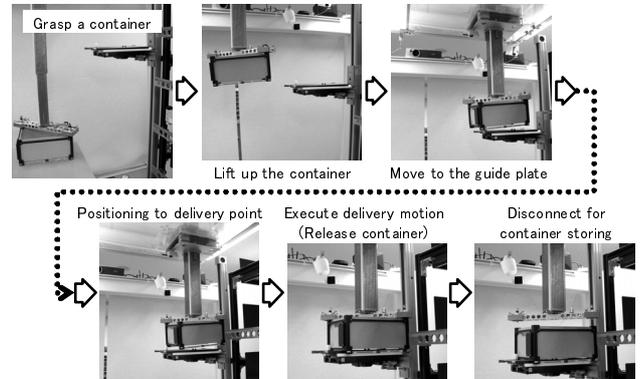


Fig. 21 Sequential images of container store delivery

#### 4.2.2 コンテナ入庫受渡し試験

運搬ロボットから自動収納庫への受渡しは移動許容範囲の不整合が発生する Caging 状態遷移である、水平位置決め誤差が 10 [mm] ある状態で把持を行い入庫受渡しタスクを実行した。実験の結果、Fig. 21 に示すように入庫受渡しタスクはスムーズに実現され、また水平運搬機構に受け渡されたコンテナの位置も、理想中心位置に近い位置であった。

#### 4.2.3 考察

本実験により、入出庫両タスク共に異なる Caging 状態間でのスムーズな遷移動作を実現可能なことを確認した。特に入庫受渡しタスクにおける結果は、コンテナ持ち上げ動作が移動許容範囲の不整合を補正する仕事をしていたためと考えられる。本伸縮機構のように許容移動範囲を状態によって変化させることの出来る受動機械的コンプライアンス構造を用いることによって、明示的な仕事を行うアクチュエータを実装しなくてもロボット間の協調状態遷移作業が実現可能になったことが分かった。スペースの関係上、本論文に含めることの出来なかった詳細は関連文献<sup>36)</sup>を参照頂きたい。

### 5. 結論

本研究では生活環境において居住者を取り巻くモノ・情報溢れの問題を解決するために、物品の搬送及び収納を行うロボットシステムを導入し、ロボットならではの特長(人と異なる構造、永遠に失われない記憶)を活用した物品収納を実現することを目指した。このようなロボットシステムを実現するために、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 の3つの技術がシステムデザインにおけるキーとなることを述べ、それら導入した家庭内物流支援ロボットシステムの構築を行い、性能評価実験を行った。

本研究の提案と知見を以下に整理する。

(1) ロボットのタスクを明確に定義する戦略の導入により、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。

(2) 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、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することが可能である。

(3) 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のみならず、受渡し作業に見られる Caging 間の状態遷移においても性能の向上に貢献する。

本研究が構築した家庭内物流支援ロボットシステムはプロトタイプであり、その実用にはまだいくつも解決しなければならない課題がある。しかし、本システムのデザインにおいて提唱されたアプローチは、生活環境中で動作するロボットにおいて普遍的に利用可能なものであり、多くのロボットシステムが活躍する上で、有効かつ強力なものであると考えている。

将来、本システムを生活基盤として導入し不要な（もしくは過剰な）物品・情報の流れが発生しないような社会が実現されることを望む。本研究の最終的な目標として Fig. 22 に示すような住居、オフィス、商店そしてそれを支える物品収納を含めた各種インフラストラクチャが1つの建造物にコンパクトに収められたような新しい住居のカタチを模索していきたい。

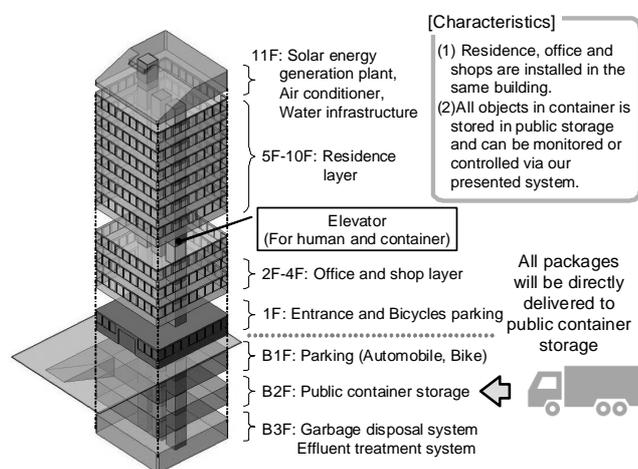


Fig. 22 Conceptual sketch of a future residence installed with our presented system

## 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.
- 2) [Online] 株式会社ハー・ストーリー. 女性の衝動買いについて 2008. [http://www.herstory.co.jp/press/research/200806/20080620impulse\\_buy.html](http://www.herstory.co.jp/press/research/200806/20080620impulse_buy.html).
- 3) L. Petersson et al. Systems integration for real-world manipulation tasks. In *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2500–2505, 2002.
- 4) J. Miura et al. Development of a personal service robot with user-friendly interfaces. In *Proc. of Int. Conf. on Field and Service Robotics*, pp. 293–298, July 2003.
- 5) N. Y. Chong et al. A distributed knowledge network for real world robot applications. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 187–192, Sept.-2 Oct. 2004.
- 6) K. Yamazaki et al. A grasp planning for picking up an unknown object for a mobile manipulator. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2143–2149, May 2006.
- 7) J. Kuehne et al. 6D object localization and obstacle detection for collision-free manipulation with a mobile service robot. In *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 1–6, 2009.
- 8) Z. C. Marton et al. Reconstruction and verification of 3D object models for grasping. In *Proceedings of The 14th International Symposium on Robotics Research*, 2009.
- 9) S. Chitta, M. Piccoli, and J. Sturm. Tactile object class and internal state recognition for mobile manipulation. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2342–2348, may 2010.

- 10) D. Whitney. Historical perspective and state of the art in robot force control. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 2, March 1985.
- 11) 佐藤知正, 森武俊. 環境の知能化と安全・安心・快適社会. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 486–489, 2007.
- 12) 大場光太郎, 大原賢一. コピキタス・ロボティクス. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 505–508, 2007.
- 13) 中村仁彦. 把持とあやつり. 計測と制御, Vol. 29, No. 3, pp. 206–212, 1990.
- 14) K. B. Shimoga. Robot grasp synthesis algorithms: A survey. *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 230–266, 1996.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 佐々木烈. 日本自動車史 (2) 日本の自動車関連産業の誕生とその展開. 三樹書房, 2005.
- 18) 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.
- 19) S. Yun. Compliant manipulation for peg-in-hole: Is passive compliance a key to learn contact motion? In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1647–1652, 2008.
- 20) M. Okada et al. Design of programmable passive compliance shoulder mechanism. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 348–353, 2001.
- 21) H. Iwata et al. Design of anthropomorphic 4-DOF tactile interaction manipulator with passive joints. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1785–1790, 2005.
- 22) B.-S. Kim and J.-B. Song. Hybrid dual actuator unit: A design of a variable stiffness actuator based on an adjustable moment arm mechanism. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1655–1660, may 2010.
- 23) S. Saldudean and Chae An. On the control of redundant coarse-fine manipulators. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1834–1840, 1989.
- 24) M. Tsuda et al. Magnetic levitation servo for flexible assembly automation. *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 4, pp. 329–345, 1992.
- 25) 金子真, 横井一仁ら. 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.
- 26) 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.
- 27) B. Dizioglu and K. Lakshminarayana. Mechanics of form closure. *Acta Meehanica*, Vol. 52, pp. 107–118, 1984.
- 28) ZhiDong Wang and V. Kumar. Object closure and manipulation by multiple cooperating mobile robots. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 394–399, 2002.
- 29) R. Fukui et al. Development of an intelligent container prototype for a logistical support robot system in living space. In *Proc. of 2007 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3397–3402, 2007.
- 30) T. Sato and R. Fukui et al. Construction of ceiling adsorbed mobile robots platform utilizing permanent magnet inductive traction method. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 552–558, Sendai Japan, September 2004.
- 31) R. Fukui et al. Development of a manipulation component for a container transferring robot in living space (design and evaluation of a high compliant manipulation mechanism). In *Proc. of 11th Int. Symposium on Experimental Robotics*, pap114s2, Greece, July 2008.
- 32) R. Fukui et al. Development of a home-use automated container storage/retrieval system. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2875–2882, Nice France, September 2008.
- 33) 福井類ら. 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, 広島県広島市, December 2007.
- 34) R. Fukui et al. iDock: a multifunctional intermediate instrument to improve efficiency of domestic delivery and storage system. In *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1939–1945, Singapore, July 2009.
- 35) 福井類, 勝代雅行, 森下広, 森武俊, 佐藤知正. 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. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 841–852, 2010.
- 36) R. Fukui, T. Mori, and T. Sato. Application of caging manipulation and compliant mechanism for a container case hand-over task. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4511–4518, Anchorage USA, May 2010.