

# コンテナケース受渡しタスクにおけるケーシング操作と機械的柔軟性の活用\*

福井 類<sup>\*1</sup>, 森 武俊<sup>\*1</sup>, 佐藤知正<sup>\*1</sup>

## Application of Caging Manipulation and Compliant Mechanism for a Container Case Hand-Over Task

Rui FUKUI<sup>\*1</sup>, Taketoshi MORI<sup>\*1</sup>, Tomomasa SATO<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo. 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo.

This research aims to realize a container case hand-over task between robots. In general approach sophisticated cooperative control is essential to avoid destructive internal force in cooperative delivery task, but we propose a geometrical caging strategy which can simplify the hand-over task. To solve a problem of capture region mismatch during caging state transition, the proposed strategy does not utilize additional actuators and sensors but a compliant mechanism whose displacement range can be changed automatically by its configuration. By experiments, it was confirmed that the caging strategy can make the hand-over task drastically easy and robust, and a winch type compliant mechanism is effective to the problem of capture region mismatch.

**Key Words** : Caging Manipulation, Compliant Mechanism, Object Hand-Over, Home Robot

### 1. 緒 論

ロボット間で物品を受け渡す作業は一般に単体ロボットが物体を操作する作業と比較して実現が困難である。これは各ロボットが相手の動作に協調する高い制御性能が求められ、それに不備があると物体に不要な内力が加わり変形や破損に繋がるためである。

これに対して複数ロボット又は人とロボットの協調搬送の研究が行われてきた。Hirataらは複数ロボットのリーダー・フォロワ型協調として”仮想3-Dキャスト”の概念を提唱し、一台のリーダーの動作に他のフォロアが追従することによって物品を搬送する研究を行った<sup>(1)</sup>。また最近では力センサを用いずに内力状態を推定して協調動作を実現する手法も報告されている<sup>(2)(3)</sup>。これらの研究は2つ以上の操作者が1つの物体を拘束しつつ、搬送を行うという問題に対して解決策を示してきた。

これらの協調搬送は常に複数台のロボットが上手く作用することを目標とした動作である、しかし受渡しは一台のロボットが安定して物品を把持・運搬している状況からもう一台のロボットがその物体を受け取り、安定して把持する状況へと移り変わる遷移の問題を取り扱う必要があるため、従来の協調搬送とは異なるアプローチが求められる。

そこで本論文ではケーシング操作と機械的柔軟性を活用することにより、物体を安定に受け渡す方法について論じる。ここで受渡し対象の物品として、我々がこれまで開発してきた家庭内物流支援ロボットシステム<sup>(4)</sup>の中心となるインテリジェントコンテナ(iコンテナ, Fig.1)を採り上げ、また本システムにおいてiコンテナを操作する必要があるコンテナ運搬ロボット<sup>(5)</sup>と家庭用コンテナ自動収納庫<sup>(6)</sup>におけるiコンテナの受渡しを解決すべき具体的な課題として設定する。

本論文の構成は次の通りである。2章ではコンテナケース受渡しタスクの課題とそれを解決するケーシングの設定指針、そしてケーシング利用における問題を機械的柔軟性を用いて解決する方案を述べる。3章では受渡しタスクを実現するロボットシステムを説明する、つまり運搬対象のコンテナや搬送するロボット、そして受渡し場所となる自動収納庫について述べる。4章では受渡しタスクを実装するために必要な手順においてトレード検討を行い、採用する方式の選定と一連のタスクフローの整理を行う。5章では実装した受渡しタスクの性能を把握する実験を行う。6章は結論である。



Fig. 1 iContainer family

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院 情報理工学系研究科  
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1  
Email: fukui(at,mark)ics.t.u-tokyo.ac.jp

## 2. コンテナケースの受渡しタスク

本章ではまず物体の受渡しタスクにおける課題について述べ、それを克服する戦略としてケーシング操作を活用した戦略を提案する。続いてケーシングに関する従来研究の整理を行い、受渡しタスクに適したケーシングの形態を議論し、受渡しタスクが2つのケーシング間の状態遷移として表現されることを述べる。

2.1 物体の受渡しにおける課題の定義 まず2台のロボットAとBによる受渡しを考える。物体の受渡しでは(1)ロボットAによる安定した単体操作、(2)ロボットA,Bによる安定した協調操作による受渡し、(3)ロボットBによる安定した単体操作の3つの状態が滑らかに遷移することが求められる。前章で述べたように、Fig.2(A)のような複数ロボットで1つの物体を操るとい受渡しの第2ステップについては、従来研究により多くの課題が解決されてきた。しかしFig.2(B)に示すような協調操作から単体操作に遷移する過程については議論しておらず、また協調操作での知見をそのまま活用することは困難である。特に遷移過程ではロボットと物体との接触状態が複雑に変化するため、この複雑な状態遷移を含む受渡しタスクを根本的に単純化させる戦略を検討しなければならない。

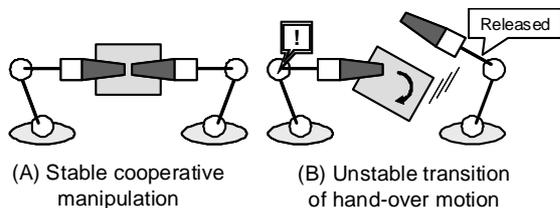


Fig. 2 Difficulty of state transition

2.2 受渡しタスクを単純化させる戦略 受渡しタスクを単純化させる戦略には2つの方向性がある。

### 1. 静的な中継場所を介しての受渡し戦略

2. ケーシングによる緩やかな拘束を用いる受渡し戦略  
戦略1はFig.3(A)に示すように中継地点を介して受け渡す方法であり、この場合受渡しタスクは異なるロボットによるピック&プレイス動作となるが、この方法は中継用場所の確保や一時設置された物体の精確な位置・姿勢認識の必要性などから、作業空間・時間の効率性の観点から適用が不可能な場合がある。そこでFig.3(B)に示すように物体を堅牢に把持するのではなく、ケーシングにより緩やかな拘束状態にし、物体を介してロ

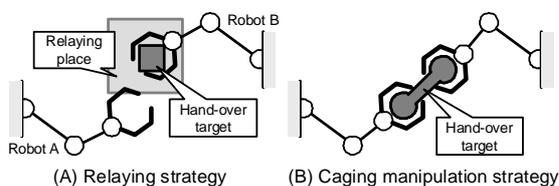


Fig. 3 Conceptual diagram of simplification strategies

ット同士が力を及ぼさないようにする方法を選択する。この方法では受渡し作業の間、少なくとも一方のロボットにより物体は拘束されているため、物体の精確な位置・姿勢認識は必要ない。

緩やかな拘束としてケーシングの他にフォークリフトのように一部摩擦による物体の保持を利用する方法、電磁石などのそもそも精密な位置決めが不要な把持機構を用いる方法が考えられる。しかし、これらは偶発的な接触で位置が変化しロボットがその変化を精確に認識する必要が生じる、また物体の意図しない落下が発生するなどの問題があるため本研究ではロバスタかつ単純な幾何的拘束を活用する。

この戦略を採用するには受け渡す物体に異なる2通りのケーシング形態が求められる。つまり渡す側が拘束する部位と受け取る側が拘束する部位の2通りのケーシングが同時(並列)に実現出来なければならない。またケーシングを活用すれば一般的には内力の発生を抑制出来る。一方で緩やかな拘束は物体の位置決めを困難にする。そこで機械的柔軟性を位置決め誤差吸収構造として活用する。

2.3 ケーシングに関する従来研究 ケーシングを集合論で表現すると式(1)のようになる<sup>(7)</sup>。

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

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),  $q_{obj}$  は現在の物体のコンフィグレーション(位置, 姿勢), 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示しており、つまり物体が補足領域から外に出ないことを保証している。

ケーシングに関する従来研究としてRimonとBlakeがMorse theoryを用いることによってケーシングを定式化<sup>(8)</sup>、Pipatanasompornらによって2次元の凹形状物体の高速なケーシング探索・判定アルゴリズムが提案されている<sup>(9)(10)</sup>。Makitaらは3次元のケーシングに関する定式化を試みている<sup>(11)</sup>。Wangらは複数ロボットによる協調搬送へのケーシング(Object Closure)適用について報告している<sup>(7)</sup>。Object Closureという呼称が示すようにケーシングはClosureの概念とも密接に絡んでおり、Closureを議論した論文の中にはケーシングを整理

する上で重要な概念を示唆しているものも多い<sup>(12)(13)</sup>。例えば Nguyen の Force closure を議論した論文ではエッジやコーナに接触するソフトフィンガの有効性や、重力を接触ではないが物体を拘束する役割を担うものとして取り扱うことに言及している点が興味深い<sup>(13)</sup>。

一方で前述したケーシングの定義では  $C_{free.obj}$  自身に関する制限は加えていない。つまり、ケーシングとは限られた範囲において如何なる状態(位置・姿勢)をも取ることが許された拘束状態のことである。これらは前述の従来研究全般に共通で、ケーシング状態にある物体の位置・姿勢に要求仕様がある場合の問題については取り扱われていない。しかし、物体を搬送するタスクの観点から見ると、物体搬送中に操作対象物体は如何なる姿勢も取ることが可能という条件は必ずしも実用的ではない。例えばコーヒーカップは取っ手に指を通して把持することによって容易にケーシング状態を実現出来るが、カップを水平に維持出来なければ中に満たされたコーヒーがこぼれる可能性がある。

整理すると本研究の操作対象であるコンテナケースのように操作中の姿勢維持が重要となる物体のケーシングの適用の場合、以下の2つの条件を満たさなければならない。(1)ケーシング対象物体の位置・姿勢が要求仕様内に収まること。(2)特に通常の応用では重力方向に特別な制限が加わることが多いため、重力方向の仕様対応が十分であること。次節ではこれらを実現するケーシングの枠組みについて述べる。

2.4 幾何的なケーシング操作の活用 前節の2条件を満たす枠組みとして Geometric Object Closure(以下 GOC) を提案する。ここで幾何的(Geometric)とは、従来のコンフィギュレーション空間を用いて集合論的に表現されていた Caging の概念に対して、作図等の幾何的な設計に利用し易い表現法を導入することを示している。GOC の条件は次の通りである。

- 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確実性を低下させるために作用候補点としない。
- 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。

条件 2 について例えばフォークリフトではパレットはフォークとの接触により拘束状態にあるものの、パレットの上の物品は前、左右方向には拘束されておらず摩擦によって動作が制限されているに過ぎない。この状況下で急旋回した場合には遠心力が摩擦を上回り、落下の可能性があるため、問題の単純化と安定性向上のため摩擦による拘束を検討から除外する。

条件 3 については前述の重力方向(水平)支持の重要性に基づいており、このように重力を作用点として簡略化することで幾何的な取り扱いが可能となる。但し、物体に対して操作者の運動により大きな加速度が加わった場合や重心と物体中心が著しく離れている場合には、この簡略化は適用出来ない。よって準静的な検討が可能となる運動加速度の選定と重心バランスを考えた受渡し物体の設定が重要となる。

条件 4, 5 はケーシング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。

GOC は CAD による作図によって容易に検証出来るというメリットを有する一方で、人間の手を模したロボットハンドでは実現が困難であり、運搬物に適した手先効果器を用いる必要があるという制限がある。

2.5 異なるケーシング拘束間での状態遷移 異なるケーシング拘束間における状態遷移においては Fig.4 に示すような捕捉領域サイズの不整合を回避することが求められる。つまり、移動許容範囲の大きなケーシング状態から小さなケーシング状態に遷移させる場合(Fig.4(B))には何らかの仕事をしなければならない。

これを実現するには次の2つの方向性が考えられる。(1)センサとアクチュエータによってケーシング状態間にある物体の位置・姿勢制御を行う。(2)Fig.5 に示すクレーン巻き上げ機構のように移動許容範囲が形態によって変化する柔軟機械構造を採用し、自動的に物体の捕捉領域サイズが適合するようにする。

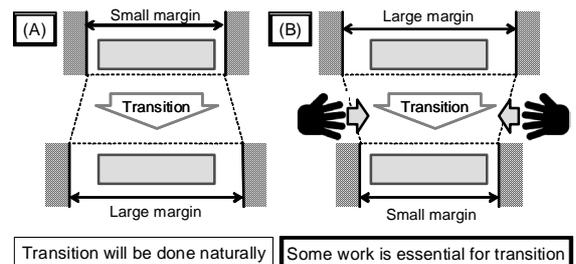


Fig. 4 Capture region mismatch of 2 caging conditions

(1)の方法はパッシブな関節による接触影響を加味して対象物体を操る非常に高度な技術が求められシステムが複雑化する恐れがある,そこで本研究では状態遷移のための仕事を行う専用アクチュエータを省略し,システム全体の簡素化が可能な(2)の方法を採用する.

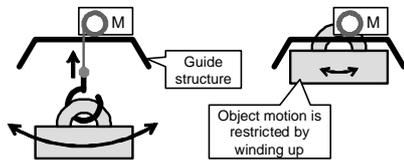


Fig. 5 Margin size variation in a winch mechanism

2.6 受渡しタスクのまとめ 本研究ではまず幾何的なケーシング操作(GOC)を用い緩やかに物体を拘束することとし,同時(並列)にケーシング可能な2箇所以上の幾何形状を操作対象(コンテナ)に付与することで,不要な内力を発生させずに受渡しを可能とする.さらに異なるケーシング間の状態遷移において発生する捕捉領域サイズの不整合に対応するため,機械的柔軟性を活用することで新たなアクチュエータを搭載せずに問題を解決することを計る.

### 3. ロボットの設計

本章ではまず受渡しタスクを実現するシステム構成について整理し,続いて各構成要素の概略を述べる.

3.1 受渡しタスクのシステム構成 Fig.6にシステム構成を示す.コンテナ受渡しタスク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.コンテナ運搬ロボットの天井懸架移動部が運搬するコンテナを,家庭用コンテナ自動収納庫のコンテナ操作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.

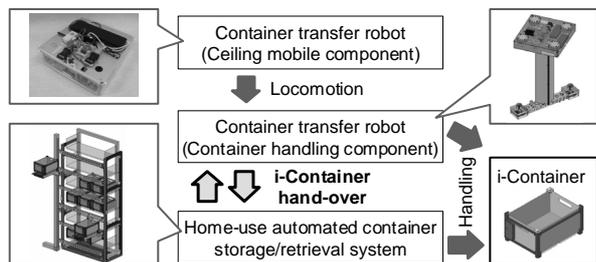


Fig. 6 System configuration of hand-over task

3.2 i コンテナの概要 Fig.7にi コンテナの概要を示す.i コンテナの機能詳細説明は文献<sup>(14)</sup>に譲るとして,ここではケーシングを検討するのに必要な幾何的構造について説明する.i コンテナは上面に天井ロボットと連結するための連結穴が用意されている.この穴の上面にはテーパガイドがあるため,連結ピンと穴の軸位置が10[mm]ずれていた場合でも連結ピン側に機械的な柔軟性があれば挿入動作が実現出来るよう

になっている.またi コンテナの底面はフォーク構造が挿入可能なように凹構造になっており,中央部にはコンテナを前後に操作する際にフック構造を引っ掛けるための溝が用意されている.

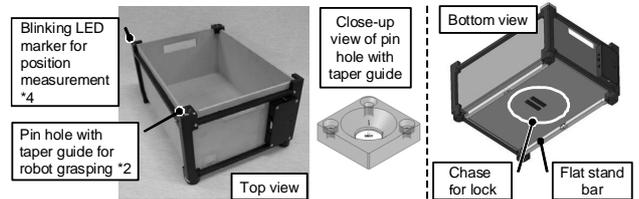


Fig. 7 Overview of intelligent container (Class A)

3.3 コンテナ運搬ロボット(天井懸架移動部)の概要 天井懸架移動部では永久磁石誘導型天井吸着法<sup>(15)</sup>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,上面の磁石を対向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,天井面下のアクチュエータ部の自由な移動を可能とする.本ロボットは非ホロノミックな拘束を受け,さらにホイールと天井面でのスリップが大きいため高速かつ正確な位置決めを行うのは困難である.また動作天井面を2次元コード(QRコード)で覆い,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に搭載されたコードリーダにより自己位置の推定が可能であり,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.

3.4 コンテナ運搬ロボット(コンテナ操作部)の概要 コンテナ操作部の概要をFig.9に示す.マニピュレーション機構(Fig.9下)の特徴は次の通りである<sup>(16)</sup>.(1)コンテナの把持に偏芯連結ピンを用いることにより,ピンを連結穴に挿入するだけでロバスタ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る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柔軟性が低下する.

上記の特徴により把持対象のコンテナの水平±10[mm]の位置誤差,±10[deg]の傾斜誤差を吸収して把持動作が可能である.伸縮機構部(Fig.9右上)はスチールベルトの巻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

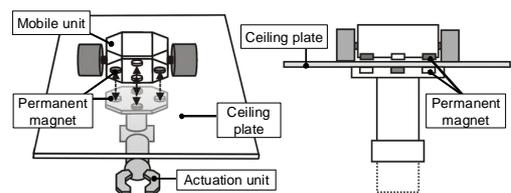


Fig. 8 Permanent magnet inductive traction method

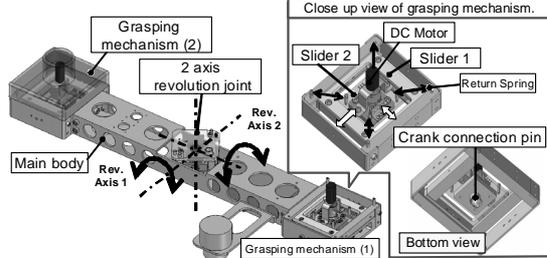
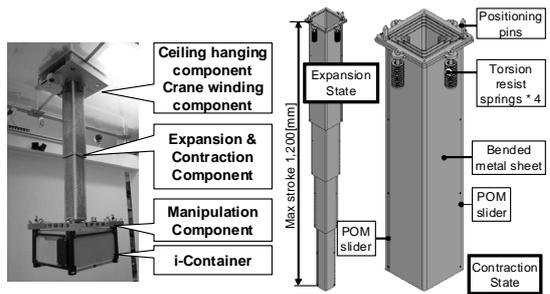


Fig. 9 Abstract of container handling component



Fig. 10 Expansion & contract. component deformation  
 は人の接触など外力が加わった時は Fig.10 に示すように柔軟に変形するため安全が確保される。接触力低減という意味では可能な限り柔軟であることが望まれるが、一方で過度な柔軟性はコンテナ操作時の位置決め制御性を低下させる。本研究ではこの柔軟性の最適値の設定は困難であると判断し、非接触時に伸び時の鉛直度が維持されるよう試行錯誤的に決定した。

3.5 家庭用コンテナ自動収納庫の概要 家庭用コンテナ自動収納庫の概要を Fig.11 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<sup>(6)</sup>。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、水平運搬機構によるコンテナハンドリングでは Fig.12 に示すように GOC を活用した拘束を i コンテナ自身の構造、ガイドプレート、フォークテーブル、ロックプレートにより実現し、ロバストな動作を実現している。具体的にはコンテナのフラットスタンドバー底面が水平運搬機構のコンテナ支持面と接触しているため、重力の作用も含めると水平面内の 2 軸に対する回転 2 自由度と垂直軸に対する並進 1 自由度が拘束されている。次に水平面内の運動について、フォークプレート挿入時は 2 箇所の R 部接触がちょうど 2 箇所の位置決めピンが物体を拘束するような状態になり、さらに R 部の開

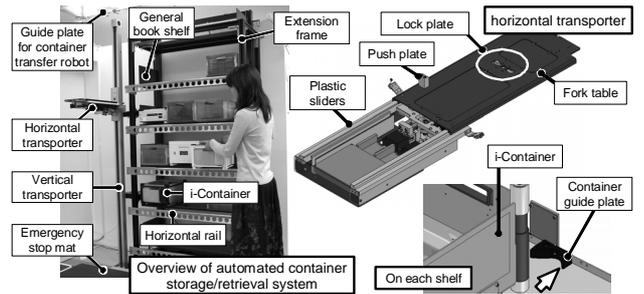


Fig. 11 Home-use container storage/retrieval system

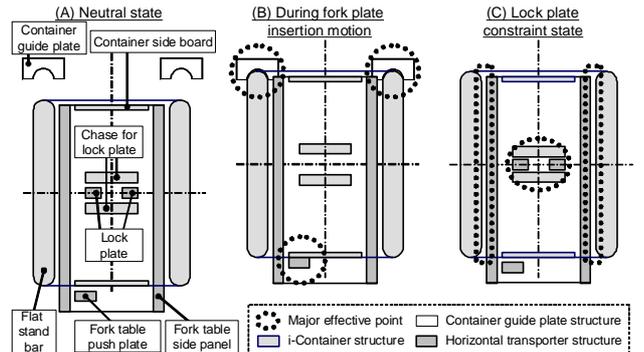


Fig. 12 Caging by i-Container & horizontal transporter

放方向をフォークテーブルのプッシュプレートが拘束しているため、並進 2 自由度、回転 1 自由度が拘束されている。一方のロックプレート拘束時は、2つの直交する平行ガイドによって拘束された状態であり、これも並進 2 自由度、回転 1 自由度が拘束されている。

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スイッチとインデックスによる位置決めを採用しておりその精度もサブミリオダである。またフォークテーブルの板曲げ部にはコンテナ底面のバーをガイドする効果がある。

3.6 受渡し実行時のケーシング状態 Fig.11 に示すように自動収納庫ではコンテナは取っ手を前面として水平に設置され、コンテナ底部にフォークテーブルを挿入することで操作される。またコンテナ運搬ロボットではコンテナ上面の連結穴に偏芯連結ピンが挿入されることによって把持が行われる。よって上記の各要素を統合すると棚型収納庫ではコンテナ底面を利用したケーシング、コンテナ運搬ロボットではコンテナ上面を利用したケーシングが各々実現されており、受渡し時の相互ケーシングは Fig.13 に示すような関係となる。

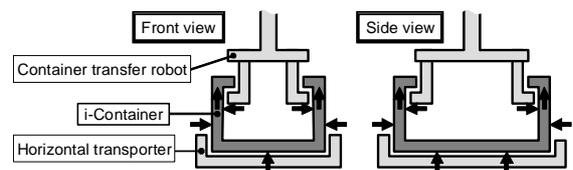


Fig. 13 Caging configuration while hand-over motion

#### 4. 受渡しタスクの実装

本章では、受渡しタスクを実現するために重要な4つのトレードオフ項目について議論する。本章での検討の結果確定するコンテナ受渡し作業の流れを Fig.14 に示す。なおコンテナの受渡しには次の2方向がある。

- 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。

(A) Retrieve hand-over			(B) Store hand-over		
1a	CTR	Move to hand-over point	1a	CTR	Move to hand-over point
1b	ACSRS	Pick up a container from shelf	1b	ACSRS	Move horizontal transporter to hand-over waiting position
2	ACSRS	Move horizontal transporter to hand-over waiting position	2	ACSRS	Actuation of vertical transporter to hand-over execution position
3	ACSRS	Actuation of vertical transporter to hand-over execution position	3	CTR	Release of container
4	CTR	Grasping of container	4	ACSRS	Move horizontal transporter to container placing destination
5	ACSRS	Actuation of vertical transporter to hand-over waiting position	5a	CTR	Move to next target
6	CTR	Move to transfer destination	5b	ACSRS	Place a container to a shelf

CTR: Container Transfer Robot  
ACSRS: Automated Container Storage Retrieval System

Fig. 14 Container hand-over task flow

4.1 受渡し実行場所 コンテナ受渡し場所として(1) 棚段、(2) 固定レール、(3) 上下移動レールの3つ (Fig.15) が候補となるが、上下移動レール上に位置する水平運搬機構との受渡しを行うこととした。なぜならば棚段での受渡しは中継場所を用いる戦略なため、受渡し特有の問題を回避出来る一方で高い天井空間もしくは低い収納庫しか使えないという制限があり、また最上段の固定レールに停止した水平運搬機構と受渡しを行う方法(2)では、受渡し後に上下移動レールへの移動が必ず必要となるため効率的でないためである。

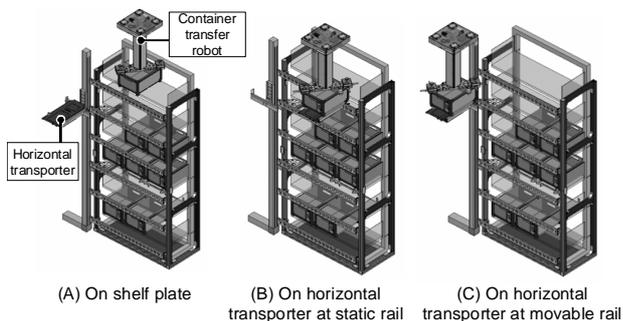


Fig. 15 Comparison of container hand-over place

4.2 水平相対位置決め方法 コンテナ運搬ロボットの受渡し位置への位置決めではまず天井懸架移動部の精確な位置決め性能を利用する方法が考えられるが、天井懸架移動部は天井上面の樹脂面をホイールで移動するため、滑りが発生し易く、位置決め収束性は必ずしも良くない。よって永久磁石誘導型天井吸着法のなじみ性

能を活用するのが効率的である。具体的には Fig.16(左)に示すように、磁石モジュールと接触するガイドプレートを自動収納庫側に取り付けることとした。この磁石モジュールとガイドプレートの左右間隔 2[mm] がコンテナ運搬ロボットの位置決め精度となる。

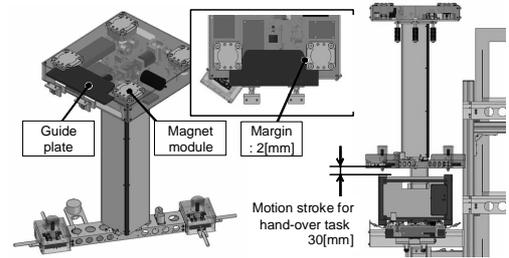


Fig. 16 Guide plate for accurate positioning(Left), Stroke for vertical motion(Right)

4.3 ケージング状態間遷移の実現性 まず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、平面のケージング状態のみ検討すれば良いものとする。またケージング状態の移動許容範囲にはコンテナ運搬ロボットの水平コンプライアンスの動きも含めて検討しなければならない。Fig.17にコンテナ運搬ロボット、水平運搬機構両者のケージング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重なった状態を原点と考え、X,Y 軸各々正負の方向への移動許容距離を描画している。コンテナ運搬ロボットは X,Y 両軸ともに  $\pm 10[mm]$  であるのに対して、出庫受渡し時の水平運搬機構では  $X:\pm 3[mm]$ ,  $Y:\pm 1[mm]$ 、一方の入庫受渡し時は  $X:\pm 9[mm]$ ,  $Y:-10\sim 5[mm]$  となっており、コンテナ運搬ロボットの捕捉領域サイズが水平運搬機構のそれよりも広範囲である。つまりコンテナ出庫受渡し時には容易にケージング状態の遷移が実現される。一方で、コンテナ入庫受渡し時は何らかの仕事により捕捉領域サイズの不整合を補正しなければならない。

そこでコンテナ運搬ロボットの伸縮機構部 Fig.9(右上)を捕捉領域サイズの補正に利用する。なぜならば伸縮機構部は移動許容範囲が形態によって変化する柔軟機械構造であり、コンテナ把持は伸び状態で、コンテナ受渡しは縮み状態で行うことで新たに専用の機構を加えずに、コンテナ持ち上げ動作を捕捉領域サイズを縮小させる仕事として利用可能と考えられるからである。

4.4 垂直相対距離制御方法 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。水平位置決め完了時、Fig.16(右)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。今回は精確な高さ制御が容易であるコンテナ自動収納庫の垂直接構側を稼働させることとした。

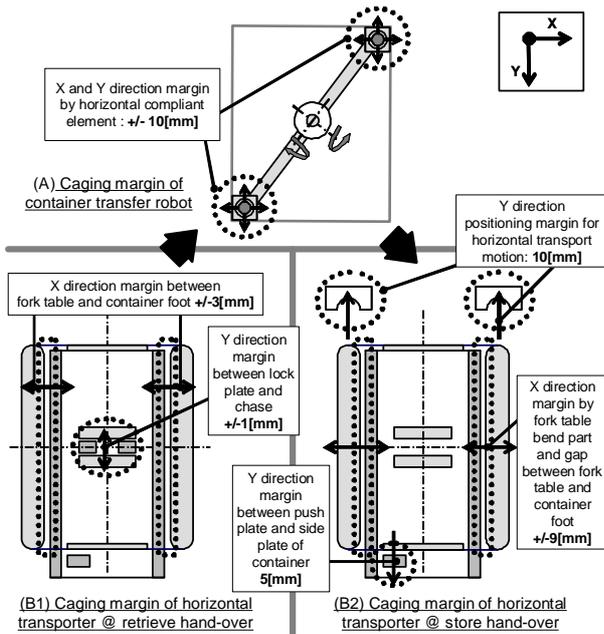


Fig. 17 Caging margins in container transfer robot and horizontal transporter

但しこの場合、位置制御を誤るとコンテナ運搬ロボットを天井に押し付けることとなり破損の原因となる。そこでコンテナ運搬ロボットの伸縮機構部がわずかに伸びの状態を受渡しをすることとし直動機構の押し付け力を回避することとした。このようにベルト(ワイヤ)巻取り式の機構が持つ単方向の剛性特性は、受渡しにおける意図しない内力を回避するのに活用出来る。

## 5. 実験

本章ではコンテナ受渡しに関する3つの実験を行う。

### 5.1 コンテナ運搬ロボット受渡し位置決め性能実験

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が、受渡しを実行するのに十分な性能を有することを確認する。

実験方法: 以下の手順を10回繰り返した。

- 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(位置決め性能、距離: 4[mm], 角度: 0.5[deg])。
- 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。

実験結果と考察: Fig.18(左)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(右)に試験結果を示す。進行方向、左右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、精確に位置決め動作が行えている。ガイドプレートと磁石モジュールの面が接触するY方向にもバラツキがあるが、これは2次元コードによる位置推定誤差と、天井板を挟んだ上下ユニットの誘導誤差が原因と考えられる。

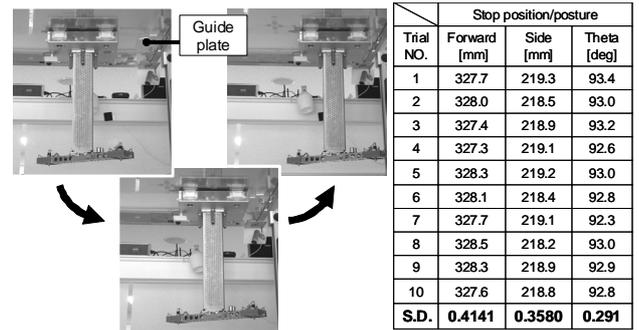


Fig. 18 Snapshot and experimental result of positioning variance with guide plate

### 5.2 コンテナ出庫受渡しタスク実行性能確認試験

実験の目的: コンテナ出庫受渡し時に家庭用棚型収納庫の水平運搬機構上において複数のコンテナ把持(ケーシング)状態を設定し、その状態での受渡し動作の実現可否について確認する。

実験の設定: 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: Fig.19に示す4通り。(X方向 $\pm 3$ [mm], Y方向 $\pm 1$ [mm])
- コンテナ内積載物: 紙カタログ(約2[kg])を搭載

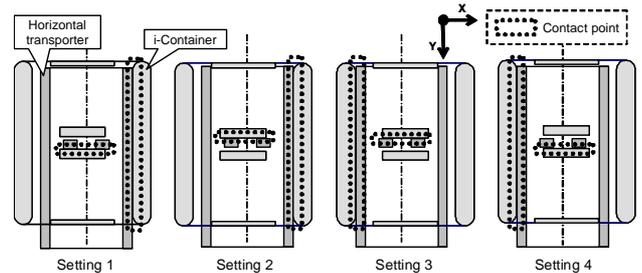


Fig. 19 Initial conditions of retrieve hand-over test

実験結果と考察: 実験の様子を Fig.20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ケーシング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ため妥当な結果である。

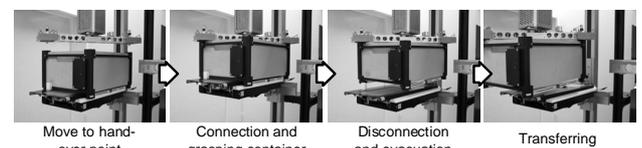


Fig. 20 Sequential images of retrieve hand-over task

### 5.3 コンテナ入庫受渡しタスク実行性能確認試験

実験の目的: 机等に設置されたコンテナをコンテナ運搬ロボットによって把持する際に、複数のコンテナ把持状態を設定した場合のコンテナ自動収納庫との入庫受渡し動作の実現可否について確認する。

実験の設定: 試験項目は次の通りである。

- コンテナ把持時のコンテナ運搬ロボット・コンテ

ナ相対位置: Fig.21 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 通り .

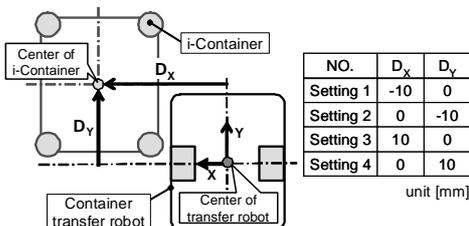


Fig. 21 Initial conditions of store hand-over test

実験結果: 実験の様子を Fig.22 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 Fig.21 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. これはコンテナ運搬ロボットの性能を評価したコンプライアンス要素影響評価試験<sup>(5)</sup>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 (縮み時の水平方向マージンは 1[mm] 以下) に巻き上げられるためと考えられる. この結果より移動許容範囲が形態によって変化する柔軟機械構造が異なるケーシング状態間の遷移における移動許容範囲の不整合を半自動的に調整する効果を有することが確認された.

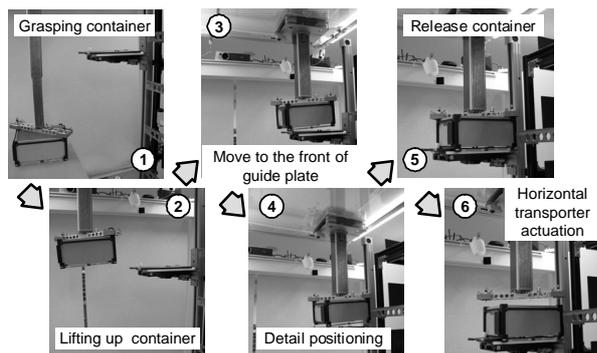


Fig. 22 Sequential images of store delivery task

## 6. 結 論

本論文ではロボット間でのコンテナケースの受渡しタスクの実現を目的として, 一般に物品の協調搬送で問題となる内力発生を防ぐための高レベルな協調制御を行うのではなく, 幾何的なケーシングを用い問題を簡素化する戦略を提案した. 目標とした受渡しタスクではケーシングの活用によって出庫受渡しタスクが円

滑に実現可能なことを示した. 一方で入庫受渡しタスクでは捕捉領域サイズの不整合が発生するためその対処が必要であるが, 巻き上げ機構を自動補正の仕組みとして活用し, コンテナ持ち上げ動作を捕捉領域サイズ補正の仕事として利用することによって, タスクを問題なく実施可能であることが分かった.

本研究が示したように (A) ロボット間での受渡し対象となる物品にはケーシングが可能となる異なる 2 つの構造を用意することにより受渡しタスク問題の簡素化を行い, さらに (B) タスクにおいて必須となる機械的柔軟構造の動作をケーシング受渡しの捕捉領域不整合の補正動作として活用することは強力な戦略である.

## 文 献

- (1) Y. Hirata and K. Kosuge. Distributed robot helpers handling a single object in cooperation with a human. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 458–463, 2000.
- (2) H. Kawasaki, S. Ueki, and S. Ito. Decentralized adaptive coordinated control of multiple robot arms without using a force sensor. *AUTOMATICA*, Vol. 42, No. 3, pp. 481–488, March 2006.
- (3) Y. Kume, Y. Hirata, and K. Kosuge. Coordinated motion control of multiple mobile manipulators handling a single object without using force/torque sensors. In *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4077–4082, November 2007.
- (4) Rui Fukui. Demo movie for home-use logistical support robot system. <http://jp.youtube.com/watch?v=QxILo-Z2eJU>.
- (5) Rui Fukui et al. Measurement and control scheme for a container transfer robot in living space. In *Proc. of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 295–301, July 2009.
- (6) Rui 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, September 2008.
- (7) ZhiDong Wang and V. Kumar. Object closure and manipulation by multiple cooperating mobile robots. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 394–399, 2002.
- (8) E. Rimon and A. Blake. Caging 2D bodies by 1-parameter two-fingered gripping. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1458–1464, April 1996.
- (9) P. Pipattanasomporn and A. Sudsang. Two-finger caging of concave polygon. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2137–2142, May 2006.
- (10) P. Pipattanasomporn et al. Two-finger squeezing caging of polygonal and polyhedral object. In *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 205–210, April 2007.
- (11) S. Makita et al. 3D multifingered caging: Basic formulation and planning. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2697–2702, September 2008.
- (12) B. Dizioglu and K. Lakshminarayana. Mechanics of form closure. *Acta Meehanica*, Vol. 52, pp. 107–118, 1984.
- (13) V.-D. Nguyen. Constructing force-closure grasps. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1368–1373, Apr 1986.
- (14) Rui Fukui et al. Development of an intelligent container prototype for a logistical support robot system in living space. In *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3397–3402, 2007.
- (15) Tomomasa Sato and Rui Fukui et al. Construction of ceiling adsorbed mobile robots platform utilizing permanent magnet inductive traction method. In *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 552–558, September 2004.
- (16) Rui 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 *Proceedings of 11th Int. Symposium on Experimental Robotics*, July 2008.