

# 家庭用コンテナ運搬ロボットのための計測・制御スキームの提案

福井類, 森武俊, 佐藤知正 (東京大学)

## Measurement and Control Scheme for a Container Transfer Robot in Living Space

\*Rui FUKUI, Taketoshi MORI, Tomomasa SATO (The Univ. of Tokyo)

**Abstract**— We aim to realize a home-use container logistical system, which transfers, stocks and manages daily objects in our living space. We have developed key technologies for (1) robust robot locomotion infrastructure, (2) accurate container position measurement and (3) compliant container manipulation. The purpose of this paper is to integrate the 3 elemental technologies into measurement and control system. There are two characteristics in our measurement and control scheme. (A) Mechanical compliant elements can absorb measurement and control errors. (B) In an object handling phase, there is no feedback control. By experiments, robustness of the presented scheme was confirmed.

**Key Words:** Control Scheme, Home Robot, Intelligent Environment

### 1. 緒論

技術革新により社会が豊かになるにつれ、人の生活環境にはモノ・情報が溢れるようになってしまった。このモノ溢れの問題を解決するため本研究では Fig.1 に示す、生活の大きな部分を占めるモノへのアクセスを支援する環境型ロボットとして”家庭内物流支援ロボットシステム”の実現を目標として開発を行っている。

システムは次の要素より構成される。(1) 人とロボットの仲介者の役割を担い、物品を収納するインテリジェントコンテナ (i コンテナ)[1], (2) 天井移動型コンテナ運搬ロボット, (3) 家庭用コンテナ自動収納庫, (4) コンテナ位置認識システム, (5) i コンテナ用多機能ドック。

本論文では i コンテナの運搬を担う天井移動ロボットのために開発した以下の要素技術を統合し、コンテナのロバストな運搬を実現可能なスキームを提案する。(A) 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て高精度な位置決めを行える天井移動ロボットプラットフォーム [2]。

(B) 部屋内に散在させたカメラで対象コンテナを発見し、ロボットが接近するのに必要な精度の大域的的位置計測を行い、続いて移動ロボット搭載のカメラでコンテナの詳細な局所的的位置計測を行うシステム [3]。

(C) 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 [4]。

[本研究の位置付け]

物体のハンドリングとは外界との接触を意味しており、

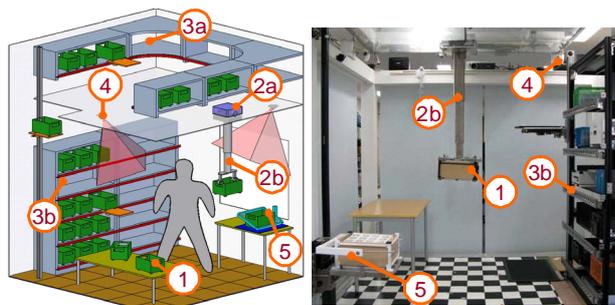


Fig.1 Conceptual sketch and snapshot of logistical support robot system in living space

位置・力のハイブリッド制御や把持・操り [5] に関して多くの研究が行われ、重要な基礎的知見が得られてきた。一方で産業用マニピュレータを見ると RCC (Remote Center Compliance) [6] や空気圧装置などの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らにより学習における機械的柔らかさの重要性が指摘されている [7]。そこで本研究では、複雑な計測や制御がなくてもコンテナの操作が可能な柔軟なスキームの構築を目的とする。その実現手段として、一般には外界との接触においては必須と考えられるフィードバック制御 (Fig.2 上) には頼らずに、機械的な柔らかさ (コンプライアンス) でスムーズな接触を実現すること (Fig.2 下) が本研究の狙いである。

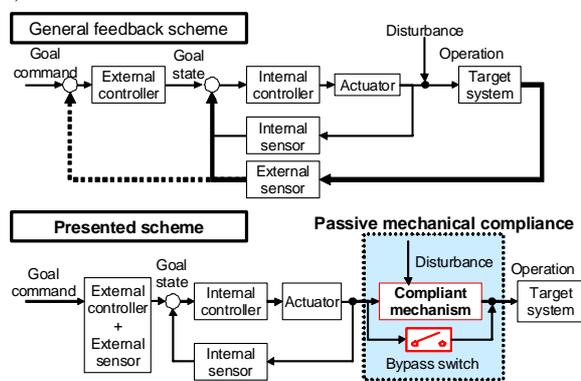


Fig.2 Difference of measurement and control scheme

### 2. ロボットによるコンテナケースの運搬

本章ではまずシステムの全体構成を示し、続いてシステム構成要素の概要と性能を整理する。

#### 2-1 コンテナケース運搬タスクのシステム構成

Fig.3 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。

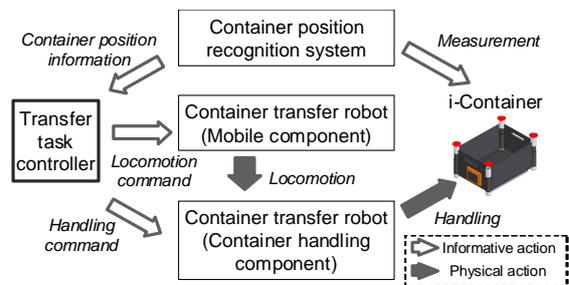


Fig.3 System configuration for container transfer task

## 2.2 コンテナ位置認識システムの概要と性能

コンテナ位置認識システム [3] 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搭載の無線 LAN カメラ、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「大域的的位置計測」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「局所的的位置計測」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バ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器具を用いているため、コンテナ運搬ロボットの座標系での位置情報を取得出来る。

## 2.3 天井懸架移動部の概要と性能

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 Fig.4 に示す。天井懸架移動部では Fig.4(左下) に示すように永久磁石誘導型天井吸着法 [2] 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。

また動作天井面を Fig.4(右下) のように 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 Fig.4(右上) 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

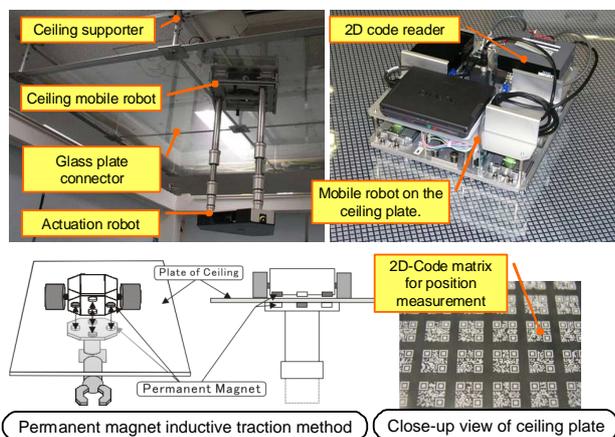


Fig.4 Abstract of ceiling mobile component

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位置 0.33[mm]、方向 0.30[deg] 以下である。

## 2.4 コンテナ操作部の概要と性能

天井移動型コンテナロボット (コンテナ操作部) の概要を Fig.5 に示す。マニピュレーション機構 (Fig.6,[4]) 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  $\pm 10$ [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。このスライダは無負荷時はねじれを拘束しているが、人の接触など外力が加わった時は柔軟に変形するため安全が確保される。

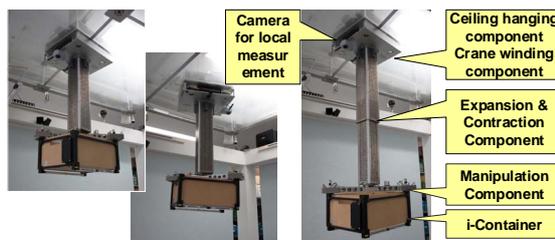


Fig.5 Abstract of container handling component

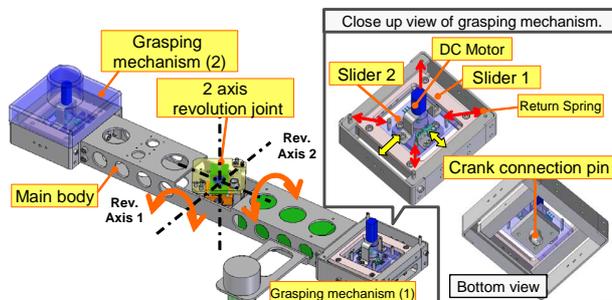


Fig.6 Overview of manipulation component

## 3. コンテナ運搬タスクコントローラ的设计

コンテナケース運搬作業の流れを整理し、把持タスクコントローラ的设计項目を整理する。続いて各设计項目の詳細な検討を示す。

### 3.1 コンテナケース運搬作業の流れ

コンテナケースの運搬作業は大きく分けて、収納場所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.7 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ローの特徴はコンテナの位置の”

計測”とコンテナの把持の”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許容誤差。以降では各項目について検討を行う。

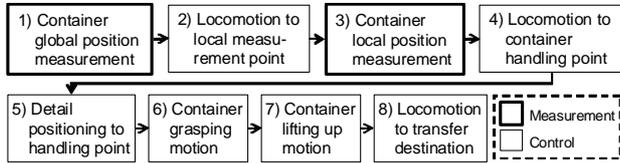


Fig.7 Container transferring task flow

### 3.2 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.8 が取得される画像例であるが、自身の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出来ない。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) 大域的計測誤差があっても、LED マーカがロボット筐体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、2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。局所的な位置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。

### 3.3 コンテナ把持時のロボット位置決め許容誤差

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を設定する際には次の項目を検討する必要がある。(A) 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。(B) 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。(B) 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最悪値は距

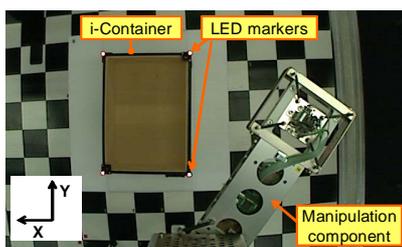


Fig.8 Camera image for local measurement

離 0.33[mm], 方向 0.30[deg] 以内であるため、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。

$$Allow = D_{hor} - (\sqrt{X_{offset}^2 + Y_{offset}^2} \times (Err_{2D-direct}/180) * \pi + Err_{Local}) \quad (1)$$

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

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、 $X, Y_{offset}$  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となってしまう。そこで実装では、多少の余裕をみて位置決め距離誤差は 1.5[mm] と設定した。

## 4. 実験

コンテナ運搬性能を確認する 3 種類の実験を行った。

### 4.1 コンテナ把持動作ロバスト性試験 (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バ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。試験項目は次の通りである。(1) 設置パターン(位置): Fig.9 の 9 通り。(2) 設置パターン(向き): 各 3 通り (-15, 0, 15[deg]) (3) 試行数: 各パターン 3 回

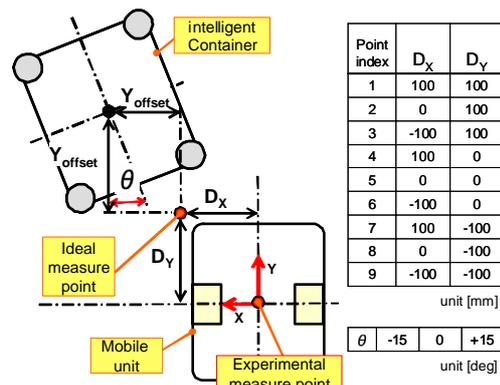


Fig.9 Position setup for experiment

実験は以下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] 実験の様子を Fig.10(上) に、実験の結果を Fig.10(下) 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。

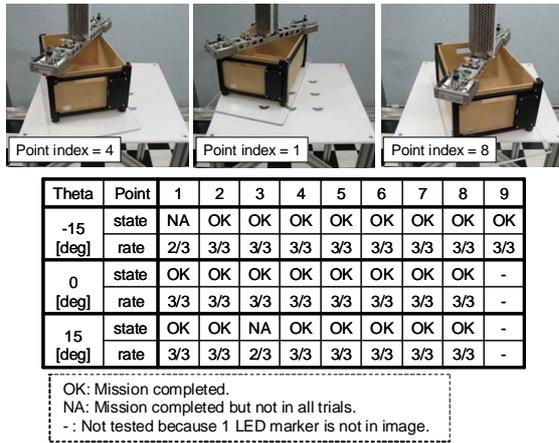


Fig.10 Snapshot and result of grasping experiment

4.2 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.11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。

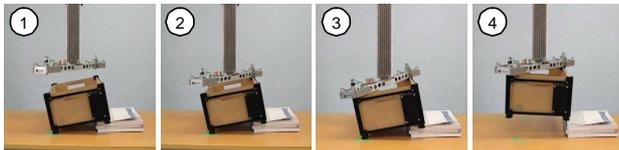


Fig.11 Snapshot of inclined container grasping

4.3 コンプライアンス要素影響評価試験

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、コンプライアンス要素として活用出来る可能性がある。本実験ではこれら複数コンプライアンスの相互影響を把握することを目的とする。

Fig.12 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.13 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

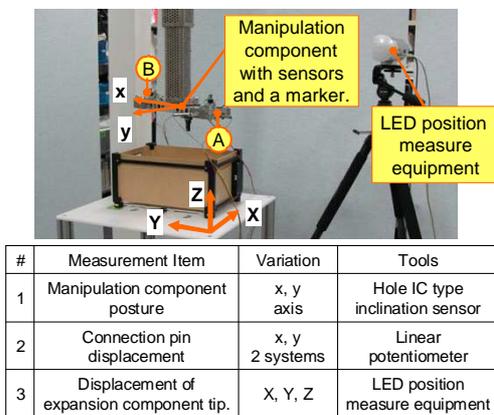


Fig.12 Setup of compliance effect experiment

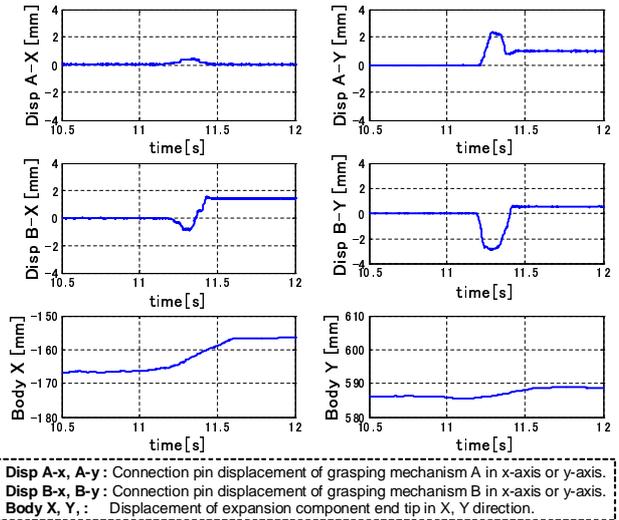


Fig.13 Result of compliance effect experiment

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、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なく、ロボット全体でコンプライアンス性能を実現可能なことが確認された。

5. 結論

本論文では、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搬送を実現する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・制御スキームの特徴は次の2点である。

- (1) 計測制御過程で発生する誤差を複数のコンプライアンス機構の連動によりメカニカルに吸収する。
- (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。

実験によりコンテナ把持動作のロバスト性を確認し本計測・制御スキームの有効性を確認した。

- [1] 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.
- [2] Tomomasa Sato 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, 2004.
- [3] 福井類他. 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.
- [4] 福井類他. 生活環境中で動作するコンテナケース運搬ロボット用マニピュレーション機構の開発 (高コンプライアンスマニピュレータの設計と性能評価). 第13回ロボティクスシンポジウム, pp. 510-516, 2008.
- [5] 中村仁彦. 把持とあやつり. 計測と制御, Vol. 29, No. 3, pp. 206-212, 1990.
- [6] 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.
- [7] Seung kook 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.