

# 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)\*

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

## Development of a manipulation component for a container transferring robot in living space (Design and evaluation of a high compliant manipulation mechanism)

Rui FUKUI\*<sup>1</sup>, Masayuki SHODAI\*<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 Tokyo.

This paper describes development of a manipulation mechanism for a container transferring robot in living space. The mechanism has two characteristic functions; (1) Robust grasping function realized by a pin connection method utilizing crank connection shaft. (2) Horizontal and inclination compliant function actualized by combination of horizontal sliders and revolution joint. By experiments, it's confirmed that the developed prototype can sustain maximum 10 [kg] load, tolerate horizontal 10 [mm] miss-alignment between mechanism and a container, and adapt 10 [deg] inclination of a container.

**Key Words** : Home Robot, Logistical System, Manipulator, Compliance

### 1. 緒 論

少子高齢化による労働力人口低下の流れに伴い、ロボット研究に対する要求の1つとして『生活環境中におけるロボットによるさりげない(人と低干渉な)物理支援の実現』が求められている。本研究ではFig.1に示すような、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4要素より構成される。

(1) 人とロボットのインターフェイスの役割を担い、物品を収納するインテリジェントコンテナ<sup>(1)</sup>

(以降では i コンテナと表記する。)

(2) i コンテナの運搬を担う天井移動ロボット

(3) i コンテナを収納する棚型(天井裏)収納庫

(4) i コンテナ収納作業を行う i コンテナ収納ロボット  
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開発として Fig.1 右に示すような、天井からの伸縮機構の先端に取り付けるマニピュレーション機構の開発について述べる。

本論文の構成は次の通りである。2章では運搬マニ

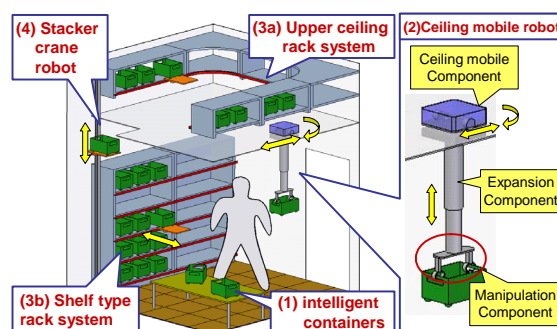


Fig. 1 Conceptual sketch of logistical support robot system in living space

ピュレータの関連研究を整理し、生活環境における課題の抽出と要求性能・機能について検討する。3章では各要求機能を実現するための機構の方式・配置・構造について述べる。4章では開発した試作機の性能評価のための実験について説明する。5章は結論である。

### 2. コンテナケース運搬用マニピュレーション機構

2-1 運搬マニピュレータの研究 これまで工場、物流基地向けに多くの自動化運搬装置が研究・開発されてきている。Cosmaら<sup>(2)</sup>は工場における軽量物流作業を行うロボットの開発を行っている。また港湾においてコンテナの荷揚げを行うガントリークレーンの操縦者支援の研究として画像を用いたコンテナ位置の計

\* 原稿受付 2008 年 01 月 11 日

\*<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

測, 誘導<sup>(3)</sup>なども行われている。一方で, 人間が活動するオフィス環境において物品の運搬を担うロボットも数多く試みられたが<sup>(4)</sup>, 工場において高効率な運搬性能が実現されているのと比較して, 完成度が高いとは言えず, 未だ普及していないのが現状である。これは人間と自動化装置が同一環境に共棲する際の安全の問題もあるが, 人間が活動する環境(特に生活環境)は日々状態が変化し, 自動化装置のロボスタな動作を妨げる外乱が多いという問題がある。我々はこの問題に対してiコンテナを用いることで, 物品一つ一つを操作するのではなく, 専用のコンテナを操作するという規格化を行い, ロボスタな運搬を実現することを狙ってきた。加えて生活環境における計測・制御においては必ず誤差が含まれるものとし, その誤差を受動的コンプライアンス構造により吸収し把持を実行する把持機構の開発<sup>(5)</sup>を行ってきた。本稿ではこれまでに開発してきた把持機構の問題点を修正し, マニピュレーション機構にアセンブリすることを目的とする。

2.2 要求性能・機能の抽出 iコンテナ運搬作業のうち, 天井からのアクセス(上下駆動)は別途開発する伸縮機構部によって実現するため, マニピュレーション機構に求められる性能は「iコンテナの把持(連結, 開放)」に集約される。生活環境においてiコンテナの把持を実現するためには, 次の機能が必要となる。

- iコンテナ連結・開放機能: マニピュレーション機構はiコンテナの連結・開放の状態遷移及び状態認識が出来る必要がある。
- 無動力把持維持機能: 安全のため連結の状態維持に動力が不要で, 停電時にもiコンテナとの連結を維持出来る必要がある。なお最大荷重はiコンテナ本体+積載物重量併せて8[kg]と設定する。
- 水平, 傾斜誤差受容機能: 生活環境でのiコンテナの位置計測<sup>(6)</sup>は誤差を含む。そこでマニピュレーション機構にはその誤差(水平誤差 $\pm 10$ [mm])を吸収するコンプライアンス性能が必要となる。またiコンテナは水平面に設置されるとは限らないため, ある程度の傾斜状態(最大傾き角10[deg]と設定)でも把持が行える必要がある。

### 3. マニピュレーション機構の実装

本章では各必要機能の実装について述べる。まずFig.2に開発したマニピュレーション機構の概要を, Fig.3に機能ブロック図を示す。以降で実装の詳細を述べる。

3.1 iコンテナ連結・開放機能及び無動力把持維持機能の実装 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

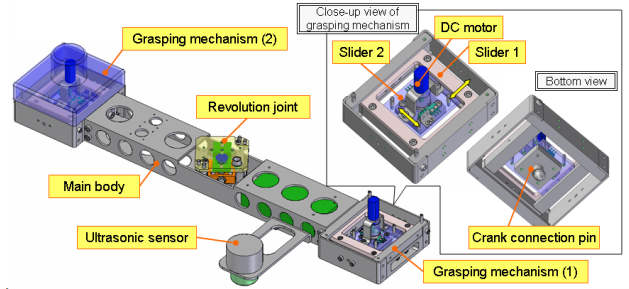


Fig. 2 Overview of manipulation component

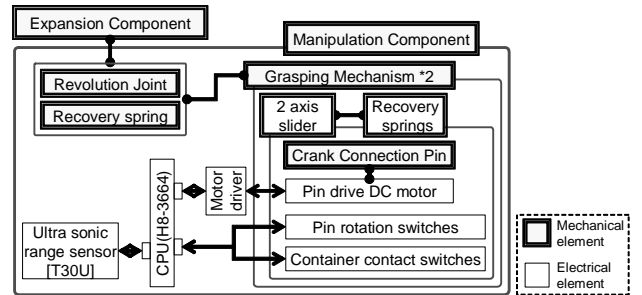


Fig. 3 Block diagram of manipulation component

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。

3.1.1 iコンテナ把持方式の検討 コンテナケースの運搬を行う方式としてFig.4に示すような方式が一般的であるが, 本研究では確実な把持が可能で, かつ連結状態の認識が容易であるという意味でピン連結方式を採用した。次にピン構造と穴構造をそれぞれiコ

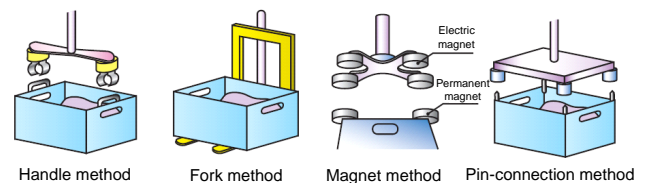


Fig. 4 Candidates of grasping method

ンテナ側, マニピュレーション機構側のどちらに設置するかを検討が必要となる。把持機構単体の開発<sup>(5)</sup>においてはレイアウトの容易さから, 把持機構側に穴構造を設置していた, このためiコンテナに設置されたピンの安全保護用カバーが必要となり, 多数のiコンテナを用いる際にはコスト高となってしまふ。そこで本研究では把持機構側にピン構造を設置することとした。

3.1.2 把持連結ポイント数の検討 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iコンテナの回転を固定出来ない。iコンテナの構造上, 連結ポイントはiコンテナの角に設置する必要がある。よって連結ポイント数は2~4箇所の中から決める必要があ

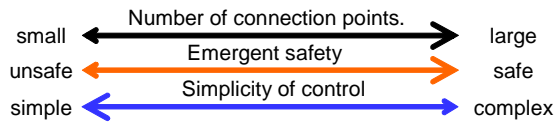


Fig. 5 Number of grasping points and each ability

る。連結ポイント数と各種性能はFig.5 に示すような関係にある。連結ポイント数を増やすほど安全性は高くなるものの、把持動作の複雑さが増し、結果として把持動作失敗の可能性が高くなる。そこで今回は連結構造を安全性の高いものを選択することとし、連結ポイント数は最小の2箇所（i コンテナの対角）と設定した。

3-1-3 連結構造の検討 続いてピンと穴構造を連結する構造の検討を行う。連結構造としてFig.6 に示す3方式が考えられる。各々の概要と特長を整理する。

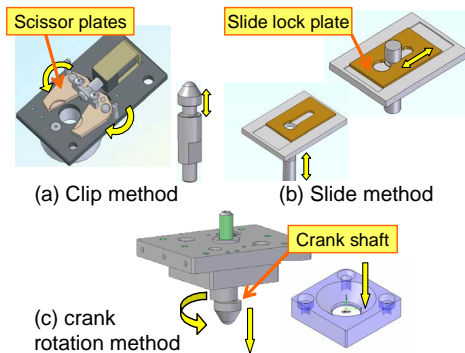


Fig. 6 Candidates of pin and hole connection structure

- クリップ方式：ピンの溝をプレートで挟み込み連結する方式。プレートをわずかに駆動するだけなので、構造が容易である反面、過大な荷重が加わった場合プレートが開放してしまう恐れがある。
- スライド方式：スライドプレートのカギ溝とピンの溝が重なることで、連結を実現する方式。連結のための稼動方向とピンに荷重が掛かる方向が異なるため、荷重が加わることでピンが外れることはなく、安全な構造である一方で、水平に大きなストロークのアクチュエータが必要となる。
- 偏芯回転方式：物流コンテナで用いられているツイストロックピンの連結構造と同様に挿入ピンの一部が元のピンから突出変形し、固定を行う方式。小さな水平面積内に実装可能であり、またスライド方式と同様な理由で安全な連結が可能。

本研究では把持機構側にピンを設置するため、ピンの駆動で連結を実現可能な偏芯回転方式を採用した。

3-1-4 把持連結ピン幾何寸法の検討 把持連結ピンが穴構造に挿入される際に次の2つのことを考慮し

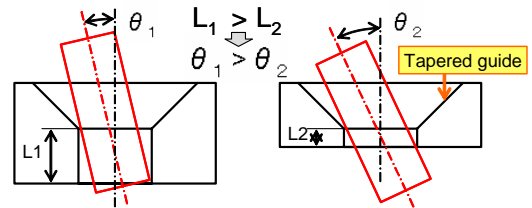


Fig. 7 Pin and hole dimension that can avoid jamming.

なければならない。

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

- ジャミングの回避： ジャミングの回避に関して、Whitney<sup>(7)</sup>が工場のペグ・ホールの挿入作業に関して2次元モデルを用いて非常に簡潔な結論を導き出している。これによると多くのジャミングはピンと穴部が2箇所接触する場合に発生するため、この2箇所での接触を防止すればジャミングを回避できることになる。ペグ・ホールの場合ペグの長さは対象部品の要件により固定されてしまうため、RCC(Remote Center Compliance)等を用いて回転中心とペグ先端の距離を短くすることによって、2箇所での接触を防止しているが、今回はピン挿入長さを自由に設定することが可能なため、Fig.7 に示すように、可能な限りピン挿入長さ ( $L_{1,2}$ ) 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： まずピンが確実に穴部に挿入されていることを認識するセンサが必要となる。そしてもう1つ偏芯回転ピンが確実にロック位置で停止しているのを認識するための、ピン回転位置を計測可能なセンサが求められる。今回のピン、穴構造はFig.8

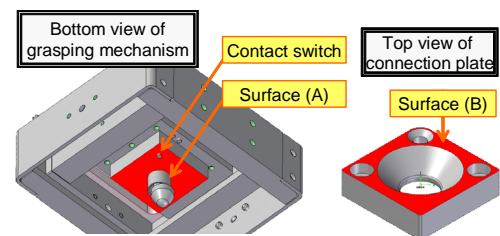


Fig. 8 Structure of pin and hole

のような構造をしているため、平面(A)が平面(B)と完全に接触していることがピンの穴への挿入と同義になる。そこで平面(A)上に接触スイッチの先端を配置する

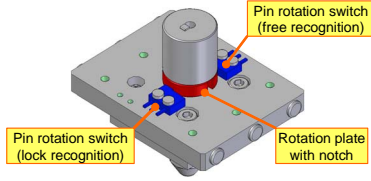


Fig. 9 Plate and switches for lock state recognition

ことで、この接触を認識させることとした。スイッチの先端はピンの根元付近に位置するため偶然に他の物体と接触することは希であるが、さらに2つの把持機構のスイッチ入力 of "and" を取ることで、より確実な認識が可能となる。また偏心回転ピンは「連結位置にあること」と「開放位置にあること」の二つの状態が認識出来ればよいので、Fig.9に示すように偏心ピンの周りにノッチをつけた円形プレートを用意し、ノッチが連結認識用、開放認識用のそれぞれのスイッチを OFF にすることで認識が出来るようにした。

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

3.2.1 水平、傾斜誤差吸収構造の構成検討 水平、傾斜両者の誤差を吸収するための構成として「1水平誤差吸収構造 + 1回転ジョイント方式」と「2水平誤差吸収構造 + 1回転ジョイント方式」の2つが考えられる。Fig.10に各々のスケルトン図を示す。単純に誤差を

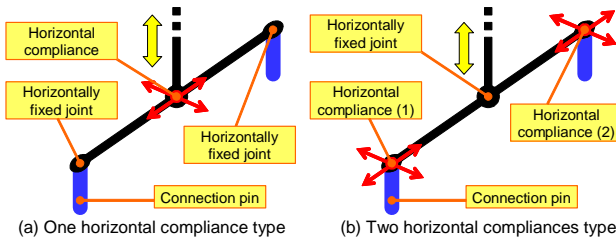


Fig. 10 Layout candidates of compliant elements.

吸収する観点では水平誤差吸収構造は1つでも機能すると考えられる。しかし(1) i コンテナの製造誤差によるピンの挿入不良、及び(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。またジャミングの問題は i コンテナの2箇所での連結するため、Fig.11に示すように、2本のピン間距離が固定されている場合、各々1箇所、合計2箇所の接触点が発生し、結果としてジャミング状態になるということが考えられる。以上より「2水平誤

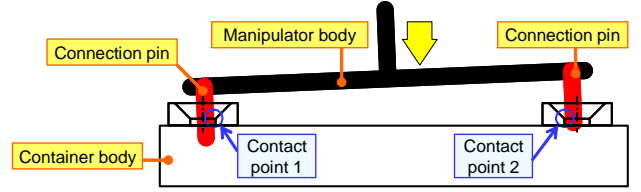


Fig. 11 Jamming state caused by two contact points.

差吸収構造 + 1回転ジョイント方式」の方がより堅実な方式であると考えられる。

3.2.2 水平、傾斜誤差吸収構造のレイアウト検討 前節の検討に続き、次に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

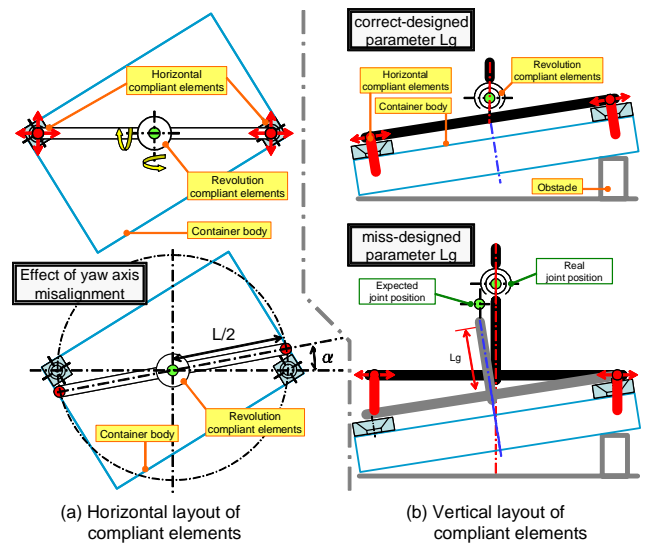


Fig. 12 Designed layout of compliant elements.

Fig.12(a) 上段に示すように、2つの水平誤差吸収構造は i コンテナ対角に位置することになり、この中心に傾斜誤差吸収構造を配置するのが左右の質量バランス的に妥当であり、特に工夫の必要はない。一方で垂直面のレイアウトに関しては傾斜誤差吸収構造と連結ピンの先端位置との長さは Fig.12(b) 上段に示すように可能な限り小さいほうが好ましい。これは Fig.12(b) 下段に示すように、 $L_g$  が不要に長い場合、マニピュレーション機構自身の傾きと i コンテナの傾きが一致せずに静止してしまう現象が発生するからである。実際にはマニピュレーション機構を昇降させる位置を筐体の傾きを計測しながら緻密に制御することにより、この状態は回避可能ではあるが、そもそも i コンテナの傾斜角を正確に計測することは困難なため、 $L_g$  を可能な限り小さくするほうが現実的な解法であると言える。

3.2.3 水平誤差吸収構造の検討 水平誤差吸収構造では連結ピンの垂直方向は保持しつつ、連結ピンと穴の水平位置誤差を滑らかに吸収する構造が必要となる。前述した工場内でのペグ挿入作業では RCC を用い

るのが一般的であるが、RCCはゴムの弾性変形を利用した構造のため変位を大きくとることは出来ない。そこで把持機構の試作機<sup>(5)</sup>でも用いた「2種摩擦面スライド方式」を採用することとした。この方式はFig.13(左)に示すような二重のスライダ構造によって水平X,Y方向の変位を実現し、またFig.13(右)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、iコンテナ把持後には不要な振動などが発生しないよう連結ピンを固定可能という特長を持つ。またスライダ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。

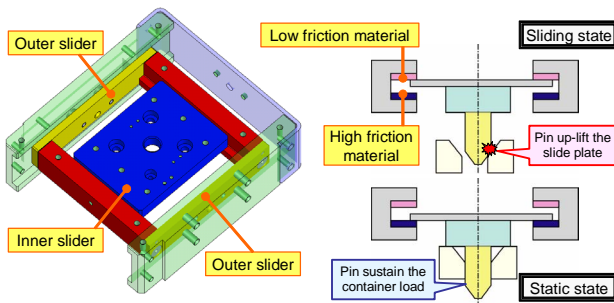


Fig. 13 Horizontal compliant mechanism

3.2.4 回転ジョイントの実現方法 iコンテナの傾斜に合わせてマニピュレーション機構を傾ける回転ジョイントにはiコンテナのピッチ角、ロール角の2つの回転自由度が求められる。2自由度の回転ジョイントの実現方式としては2つの方式が考えられる。各々の方式の概要と特長を整理する。

- 2軸直交方式：二つの回転軸を直交配置することで2自由度の回転ジョイントを実現する。部品数が多く、またレイアウトの規制も大きいが必要な軸回転がないため制御しやすい。
- 球面ジョイント方式：3自由度の回転が可能な球面ジョイントの1軸を固定することで、2自由度の回転ジョイントを実現する方式。部品数は少ないものの、1軸を完全に固定することが難しい。

今回の使用の場合、球面ジョイントの3軸目がわずかでも動作してしまうとFig.12(a)下に示すように、連結ピンの位置では非常に大きな位置ずれ ( $\epsilon = \alpha \times (L/2)$  でLが大きい) を発生してしまう。そこで部品数は多くなってしまいが2軸直交方式を採用することとした。実装した回転ジョイントをFig.14に示す。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iコンテナ荷重が加わるとテーパ部が溝と連結することで、回転ジョイントが固定されるような構造とした。しかし、コイルバネの状

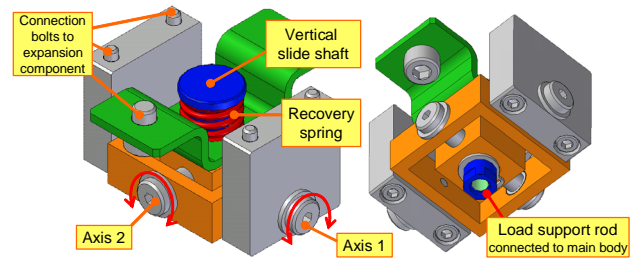


Fig. 14 Revolution compliant mechanism

態により戻り位置が必ずしも水平状態とはならないことが判明したため、今後は軸毎に水平位置に戻るバネを配置することで対処する予定である。

#### 4. 実験

本試験ではまず、本マニピュレーション機構の幾何設計においてジャミング状態が発生しないことを確認し、続いて最大荷重の支持性能を確認する試験を行う。最後にコンプライアンス性能を確認するため水平、傾斜の両位置合わせ誤差吸収性能を確認する試験を行う。

4.1 ジャミング発生確認試験 本試験ではFig.15(上)に示すiコンテナ上面模擬板を、Fig.15(下)に示すようにマニピュレーション機構の連結ピンに挿入したまま姿勢を変化させ、任意の相対姿勢においてジャミングが発生しないことを確認した。

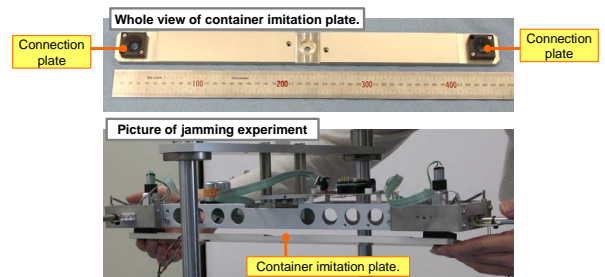


Fig. 15 Confirmation experiment of no jamming

4.2 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]の荷重をぶら下げて、荷重支持性能の試験を行い、マニピュレーション機構が設定最大荷重(8[kg])以上を支持可能なことを確認した。

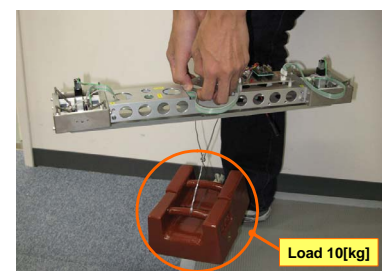


Fig. 16 Experiment of sustain ability at maximum load

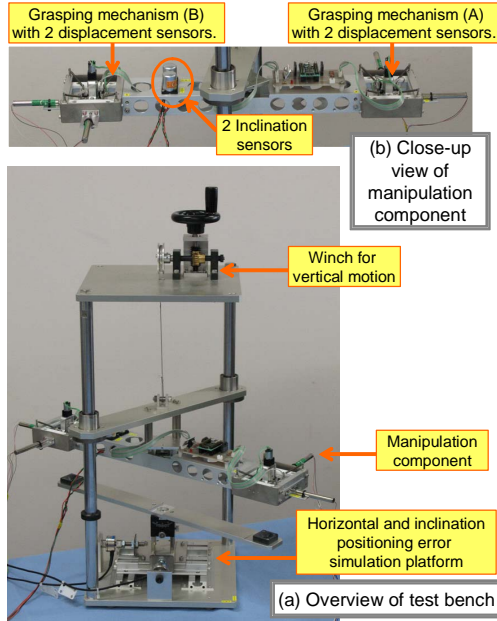


Fig. 17 Test bench for manipulating

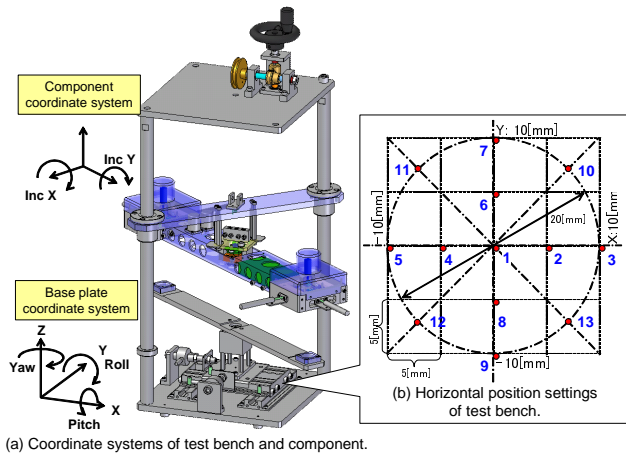


Fig. 18 The coordinate systems of test bench and horizontal position settings

**4.3 水平誤差許容性能確認試験** 本試験では Fig.17 に示すような i コンテナ及び伸縮機構部模擬用のテストベンチを用いて、ピン連結試験を実施した。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 パターンの i コンテナ・機構相対位置において、ヨー角度を-3,0,3[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 N 数は 3 である。Fig.19 に挿入・引抜動作における機構 A,B それぞれの連結ピン水平変位量及び、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。

続いて Table 1 に挿入動作の結果及び水平最大発生力（2 方向の合力）の一覧を示す。結論として今回の試作

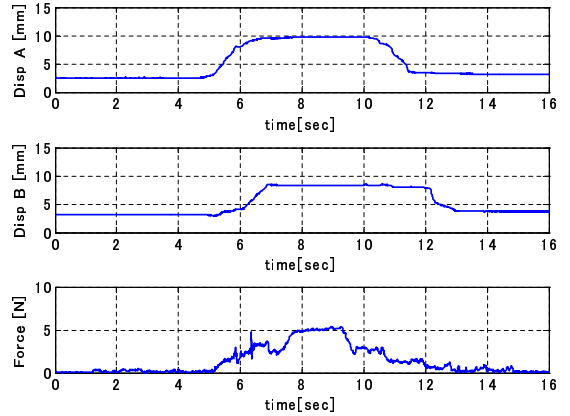


Fig. 19 Displacement and force graph of insertion motion with only horizontal error

機では回転ジョイント部のスライドシャフトの公差が緻密でなかったため、不要なヨー軸の回転によって初期位置が安定せず、挿入動作の前に位置の校正が必要となってしまったが、水平誤差吸収機能としては十分な性能を発揮していると言える。また発生力は当初の設計許容値である i コンテナ静止力 2.5[N]（i コンテナと木製の机における実測値<sup>(5)</sup>）を超えてしまうことが発覚した。そこで木製の机にビニール製のテーブルクロスを設置し、i コンテナ静止力を測定し直したところ 10[N] まで i コンテナが移動しないことが確認された。そこで、i コンテナを設置する机上には適宜テーブルクロス等の摩擦増強シートを用意することとした。

Table 1 Maximum force generated by insertion motion with only horizontal error

Measurement point	Position Error		Yaw angle					
			0 [deg]		3 [deg]		-3 [deg]	
	X	Y	state	force	state	force	state	force
1	0	0	○	2.2	○	4.1	○	8.3
2	5	0	○	5.1	○	3.6	▲	4.4
3	10	0	△	6.2	-	-	-	-
4	-5	0	○	4.8	▲	3.9	○	4.3
5	-10	0	△	5.0	-	-	-	-
6	0	5	○	5.8	○	5.0	▲	7.6
7	0	10	△	5.7	-	-	-	-
8	0	-5	○	3.4	▲	6.1	○	8.7
9	0	-10	△	3.8	-	-	-	-
10	7.1	7.1	△	4.3	-	-	-	-
11	-7.1	7.1	○	6.1	-	-	-	-
12	-7.1	-7.1	△	4.1	-	-	-	-
13	7.1	-7.1	○	5.5	-	-	-	-

Unit of force : [N]

○ : Insert motion is completed.

△ : Insert motion is completed with initial position adjustment.

▲ : Insertion motion is impossible in design, but is completed with initial position adjustment.

- : Not tested.

#### 4.4 傾斜誤差許容性能確認試験

本試験では前節の試験と同様にテストベンチを用いて試験を実施した。計測位置は 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ための幾何的な限界より設定している。

Fig.20 にポイント 8 において i コンテナピッチ角を +10[deg] にした場合の挿入・引抜動作におけるマニピュレーション機構全体の傾斜, 連結ピンの水平変位量, そして模擬コンテナ部に加わった外力(2方向の力の合成値)の様子を示す。このグラフより i コンテナが傾斜している場合, まず片側の連結ピンが水平誤差受容機能によって穴部へとガイドされ, 続いて筐体全体が傾いた後に反対側の連結ピンが穴へ挿入し初め, 最終的に筐体と i コンテナの傾斜が一致して静止するという把持動作の一連の流れが確認出来る。本試験により連結ピンの水平位置が i コンテナの連結ガイド穴の水平領域内にあれば<sup>1</sup>, 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  $\pm 10$ [deg] の場合でも連結動作を達成可能なことを確認した。

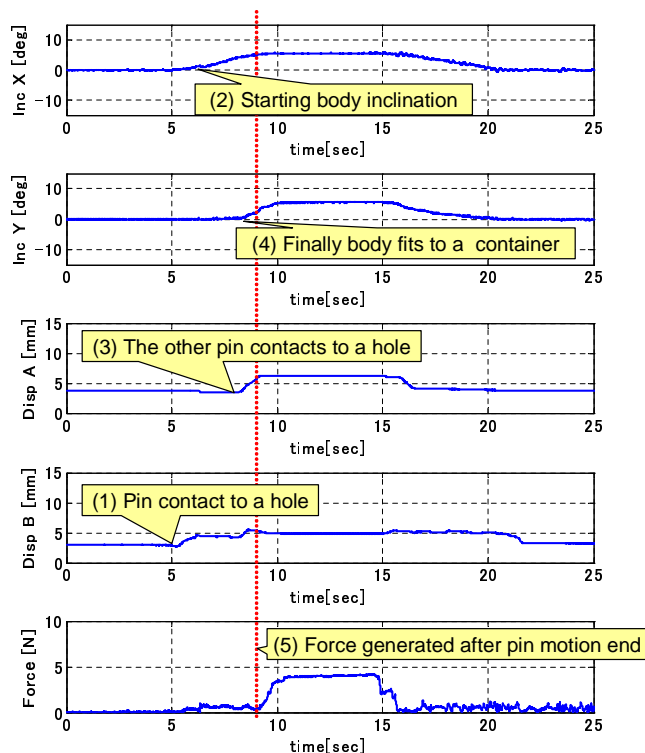


Fig. 20 Displacement and force graph of insertion motion with horizontal and inclination error

<sup>1</sup>相対水平誤差 5[mm] かつピッチ or ロール角 10[deg] の一部の状態ではピンの鉛直下方に i コンテナ連結ガイド穴が位置しなくなるため, ピンの挿入動作が実現出来ないものがある。

## 5. 結 論

本研究では生活環境中で動作するコンテナケース運搬ロボット用のマニピュレーション機構を開発した。

本機構は以下の二つの特徴的な機能を有する。(1) 偏心回転ピンを用いた連結ピン方式による堅実な把持機能。(2) 水平スライダと回転ジョイントを用いた, i コンテナの水平, 傾斜位置誤差受容機能。

開発した試作機を用いた性能確認試験を行い, 本論文で提案した把持機能が設定荷重 8[kg](i コンテナ自重含む) を支持可能なことを確認し, また最大  $\pm 10$ [mm] の水平誤差または最大 10[deg] の傾斜誤差があっても, 高コンプライアンス性能により誤差を吸収し, i コンテナ把持動作を実現可能なことを確認した。将来課題として, 回転ジョイント部の不要な回転軸の動作を防止する寸法公差の検討, さらに本マニピュレーション機構を伸縮機構を有する天井移動ロボットに取り付けて, 実際に把持・運搬動作を実現することが挙げられる。

## 文 献

- (1) Rui FUKUI, Masayuki Shodai, Taketoshi MORI, Tomomasa SATO, "Development of an intelligent Container Prototype for a Logistical Support Robot System in Living Space, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3397-3402, San Diego USA, 2007.
- (2) C. Cosma, M. Confente, M. Governo, P. Fiorini, "An Autonomous Robot for Indoor Light Logistics", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3003-3008, Sendai Japan, 2004.
- (3) 國光 智, 淺間 一, 川端 邦明, 三島 健稔: "部分と全体のマッチングによる屋外環境下における対象物の検出", 電学論 C, Vol. 125, No. 1, pp.57-66 (2005)
- (4) E. Prassler, E. Stroulia, M. Strobel, and T. Kaempke, "Mobile Robots in Office Logistics", Proceedings of the 27th International Symposium on Industrial Robots, pp.153-159, Milan, Italy, October 6-8 1996.
- (5) 福井類, 勝代雅行, 森武俊, 佐藤知正: "家庭内物品収納コンテナ用把持機構の開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 2P1-O03, 2007.
- (6) 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 回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門大会 (SI2007), pp.1294-1295, 2007.
- (7) 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.