

東京大学 佐藤・森研究室のRT

家庭内で物品収納・アクセスを支援する環境型ロボットシステム

福井類, 勝代雅行, 森下広, 森武俊, 佐藤知正 (東京大学)

RT in Sato-Mori Laboratory, the University of Tokyo: An Intelligent Environment for Supporting Storage/Retrieval Process of Daily-use Objects in Home

*Rui FUKUI, Masayuki SHODAI, Hiroshi MORISHITA, 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 home. The system is supposed to rescue us from a living space over-flown with many objects. This paper describes system overview and core technologies for encountering home-robot specific problems.

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

1. 緒論

近年, 住居環境の厳しさから生活空間中において居住者を取り巻くモノ溢れの状況が散見される [1]. 本研究ではこの問題を解決するために, 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) の実現を目標とする.

2. 生活環境中における物品搬送・収納作業

2.1 生活環境特有の課題と研究対象とする主要技術

現在, 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未だ市販されていない. 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 (1) 生活環境の変化, (2) 物品の多様性, (3) 人の作業のバラツキの問題があるためである. 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力も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. ここでこの柔軟性もしくは扱い性能をコンプライアンスと呼ぶが, 機械的コンプライアンスではロボット側が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ものを示す. 本研究ではこの戦略的・機械的柔らかさを主要技術として取り組む.

一方, 従来ロボットマニピュレータにおいてはクロージャ (拘束) に関する議論が盛んに行われてきた [2]. 本研究では物体の運搬準備である把持におけるロボスタ性向上のためにクロージャも主要技術として議論する.

2.2 戦略的コンプライアンス

Table 1 Home-use specific problems and strategies

課題	解決策	戦略の基本機能
生活環境の変化	安定した特徴量抽出が行える計測環境の整備	補助・強化
	異なる複数の装置が連携可能な環境の整備	役割の規格化
	ロボットが自らの動作に専念出来る空間を用意	領域・空間の規格化
物品の多様性	物品操作単位をコンテナケースと定義	タスク・役割の規格化
	コンテナケースにロボットが扱いやすい構造を付加	補助・強化
	各々の物品にRFIDタグを貼り付け	補助・強化
人の作業のバラツキ	人による作業を機械的・情動的に誘導	誘導, 役割の規格化

今日の生活で欠かせない機械として自動車に注目し, その発展の歴史を分析することにより, 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 に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.

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 [3]RCC (Remote Center Compliance) 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. 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 と呼ばれる方式であり, 稼働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. 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り手先で所望の扱い性能を実現しようとする方式である.

本研究では産業用途での実績を考慮して, 受動的な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) において機械的柔軟性を実装することでロボスタな物品操作を実現している.

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. エンジニアは図面を前に部品の形状, 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 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 [2], 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[4] 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。そこで本研究ではこの Object closure を幾何的に拡張した Geometric object closure をコア技術としてシステム実装の際に活用した。

3. 家庭内物流支援ロボットシステムの構築

前章の主要 3 技術を組み込んだシステムを構築した。コンセプトスケッチを Fig.1 に示す。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 に関しては文献 [5] を参照されたい。

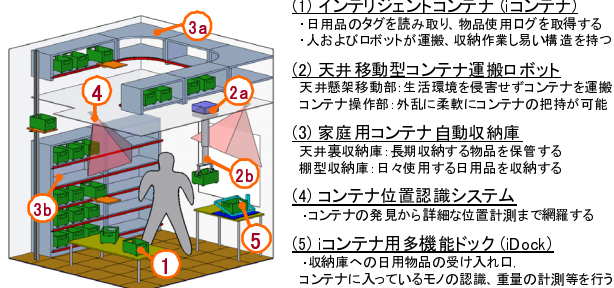


Fig.1 Logistical support robot system in living space

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。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を開発した。i コンテナの概観及び仕様を Fig.2 に示す。



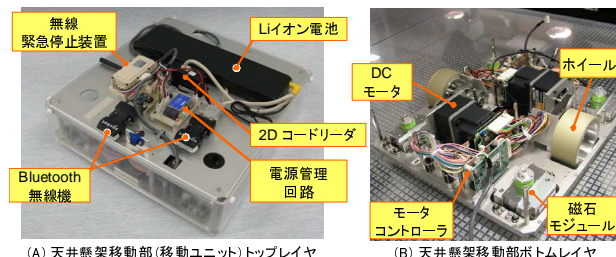
	クラスS(日用品用)	クラスA(中期保管用)	クラスE(長期保管用)
サイズ, 積載重量	370 × 270 × 188 [mm], 最大 5 [kg]		
自重	2.8 [kg]	1.7 [kg]	1 [kg]
把持ガイド	POM樹脂円形テーパーガイド(穴径φ11[mm], テーパー角度45[deg])		
フック挿入部	設置面高さ20.5 [mm]以上, ガイド間隔206 [mm]		
位置計測マーカ	赤色LED: 4箇所7.5[Hz]により点滅	---	
無線通信	Bluetooth Ver2.0, Class2, シリアル57.6[kbps]	---	
荷重計測	フォトフレクタ式, 荷重計測4点, 最大定格6[kg]	---	
ベース素材	アルミ合金(A5052)	ABS樹脂・MDFボード	ダンボール・MDFボード

Fig.2 Snapshot and specification of intelligent containers

3.2 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。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吸着させる手法としては永久磁石誘導型吸着法 [6] 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 [6] を用いた。天井懸架移動部の概観及び仕様を Fig.3 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を示し、2次元コードマトリクスを用いた位置計測手法はロボットが自律的かつ精確に自己位置を推定するのに有効であることを確認した。



駆動方式	2ホイール対向型+2つのボールキャスタによる支持	
筐体サイズ	340 × 320 × 150 [mm]	
自己位置推定精度	位置: 0.33[mm], 角度: 0.30[deg] ※標準偏差	
自重	10 [kg]	最高移動速度: 125 [mm/sec]

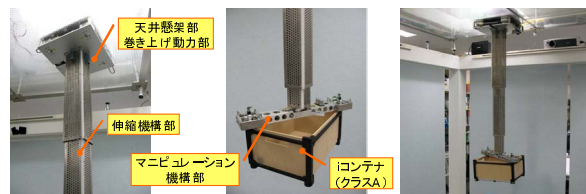
Fig.3 Snapshot and spec. of ceiling mobile component

3.3 コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部)

コンテナ操作部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。マニピュレーション機構部は次の特徴を有する。(1) 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。(2) 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コンプライアンス要素を装備する。

伸縮機構部及び巻き上げ動力部では次の特徴を有する。(1) 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り、また自重を超えた荷重を操作対象に加えることができない。(2) 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、人やモノとの接触時には柔軟に変形することによって、接触力を低減可能である。

コンテナ運搬ロボット (コンテナ操作部) の概観及び仕様を Fig.4 に示す。基本性能試験にてマニピュレーション機構ではジャミングが発生せず、必要な荷重 (10[kg]) を支持可能なことを確認し、コンテナとの水平・傾斜位置決め誤差がある場合でも柔軟にコンテナ把持動作が可能なことを確認した。

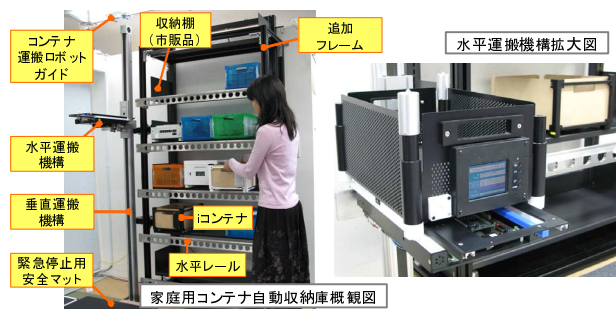


項目	仕様	
サイズ	340 × 320 × 610 [mm] ※縮み時	
可搬重量	8 [kg] ※コンテナ自重3[kg]を含む	
コンテナ把持方式	偏芯連結ピンによって2箇所を拘束※ジャミング無し	
位置・姿勢誤差吸収性能	水平 10 [mm], 姿勢ロール・ピッチ 10[deg]	
外乱絶縁用機械要素	トルクリミッタ, コンストン, 切り離し永久磁石を実装	
コンテナ把持定格重量	10 [kg]	天井懸架長さ: 610 ~ 1,835[mm]
巻き上げ速度	100[mm/s]	昇降駆動方式: スチールベルト巻き上げ

Fig.4 Snapshot and spec. of container handling comp.

3.4 家庭用コンテナ自動収納庫

本システムの特徴は次の3つである。(1)エレベータ収納方式の採用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)自由度分離型スタック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。家庭用コンテナ自動収納庫の概観及び仕様を Fig.5 に示す。実験により人によるコンテナ設置時に位置決め誤差がある場合でも取出・収納動作が可能なることを確認した。



基本構造: エレベータ型 (棚は固定)	大きさ: 約W1,500×H2,300×D450[mm]
自由度レイアウト: 自由度分離型	垂直: タイミングベルトリニアアクチュエータ駆動 水平: オーバーハングローラ駆動
レール構造: モノレール, 片持ち懸架方式	取り出し, 設置方法: フォーク, 簡易ロック統合方式
最大運搬重量: 8 [kg] *コンテナ重量含む	最高移動速度: 安全のため低速(水平0.2 [m/s])
コンテナ位置認識: RFIDタグ及びアンテナ	人間によるコンテナ操作: 可能
空間占有: 非常に小さい→自由度を分離しているため退避モードが可能	障害物認識: 赤外線距離センサ及び接触スイッチ
外乱許容性能: 非常に柔軟に許容可能	

Fig.5 Snapshot and spec. of home-use auto-warehouse

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、最初のコンテナの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、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及び仕様を Fig.6 に示す。実験によりシステムがロボットによる運搬に必要な精度を有していることを確認した。

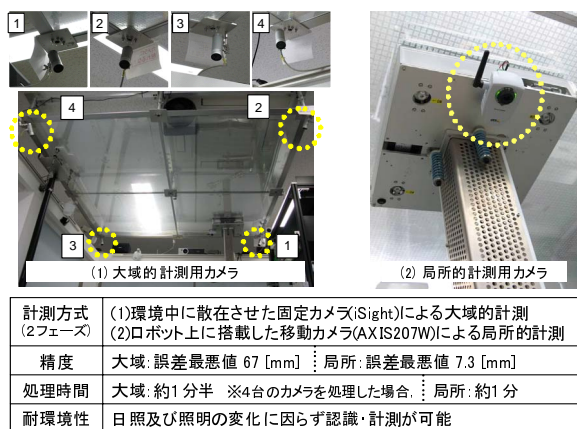


Fig.6 Snapshot And Specification of container position recognition system

3.6 システム構築のまとめ

Fig.7に家庭内物流支援ロボットシステムに実装された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の一覧を示す。

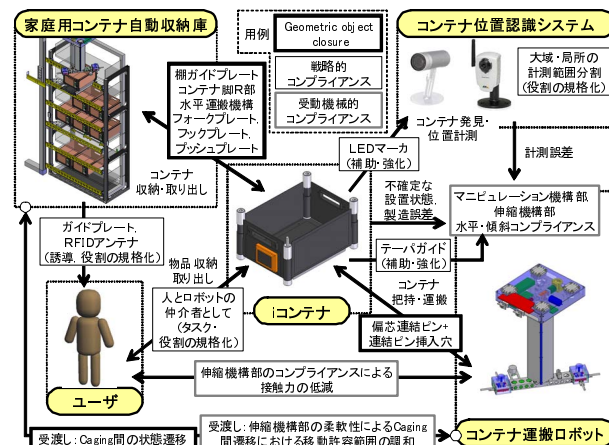


Fig.7 3 major technologies in the presented system

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、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。

4.1.1 コンテナ把持動作ロボラスト性試験: 水平誤差

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。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。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と2次元コードによる自己姿勢推定誤差の影響により失敗する場合があったが、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。

4.1.2 コンテナ把持動作ロボラスト性試験: 傾斜誤差

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、ロボラストにコンテナの把持動作を実行可能かを検証することである。机の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3.4, 6.9, 10.3[deg]の3通り¹に傾けて把持動作を実行した。実験の結果、何れの場合にもコンテナをロボラストに把持可能なことを確認した。Fig.8に把持動作の様子を示す。

¹本を想定した15[mm]厚の障害物を1~3枚設置した場合の傾き

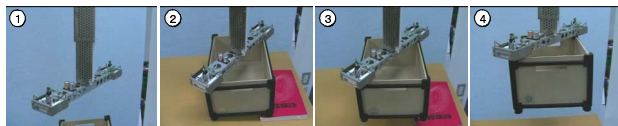


Fig.8 Inclined container grasping motion

4.1.3 コンプライアンス要素影響評価試験

本試験では位置決め誤差吸収性能への各コンプライアンス要素の寄与度を把握する。Fig.9 に示すように、各コンプライアンス要素の変位を計測する装置をコンテナ運搬ロボット（コンテナ操作部）に取り付け、水平位置決め誤差が 10[mm] ある状態で把持動作を実行し変位データを取得した。実験の結果、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連結ピン挿入時に最大で 5[mm] 程度変位しているものの、ピン挿入完了後には変位が 2.5[mm] 程度まで減少し、その代わりに伸縮機構部全体が 8[mm] 程度変位することによって位置決め誤差を吸収していることが分かった。

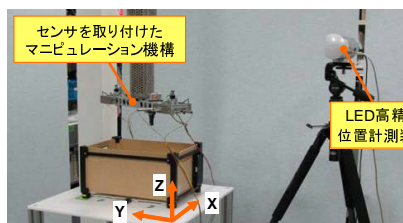


Fig.9 Setup of compliance effect evaluation experiment

4.1.4 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。またコンプライアンス要素影響評価試験では、複数のコンプライアンス要素の協調による誤差吸収の様子を確認した。

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、その大きさ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かを確認する必要がある。

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.10 のように円滑にタスクを実行可能であった。

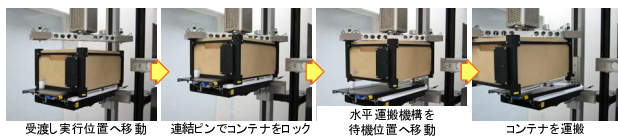


Fig.10 Sequential images of container retrieve delivery

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、Fig.11 に示すように、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、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。

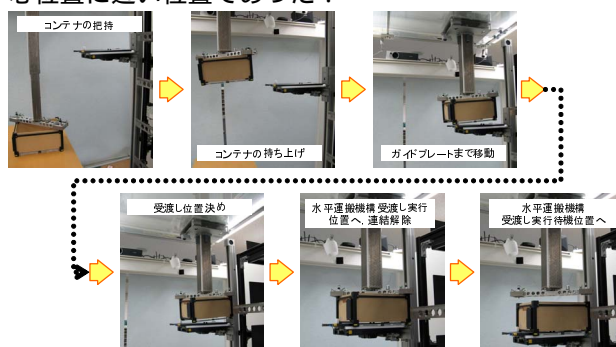


Fig.11 Sequential images of container store delivery

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、許容移動範囲の不整合を調整する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作業が実現可能なが分かった。

5. 結論

本研究では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 つの主要技術を盛り込んだ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。本研究により得られた RT としての知見は次の通りである。

- (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) 幾何的な検討で実現される Caging の活用により、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出来る。
- (3) 受動機械的コンプライアンスの柔軟さは、物体の直接的な操作のみならず、受渡し作業に見られる Caging 間の状態遷移においても、ロバスト性の向上に貢献する。

- [1] 国土交通省住宅局住宅政策課 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] 中村仁彦. 把持とあやつり. 計測と制御, Vol. 29, No. 3, pp. 206-212, 1990.
- [3] D.E.Whitney. Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts. *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 104, pp. 65-77, 1982.
- [4] ZhiDong Wang and V. Kumar. Object closure and manipulation by multiple cooperating mobile robots. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 394-399, 2002.
- [5] 勝代雅行. 家庭内における物品搬送・収納システム効率化のための多機能中継装置に関する研究. Master's thesis, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, March 2008.
- [6] Tomomasa Sato and Rui 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.