

# 生活環境中で人と共棲可能な 永久磁石誘導型天井移動ロボットプラットフォーム

福井 類<sup>\*1</sup> 森下 広<sup>\*2</sup> 原田 達也<sup>\*1</sup>  
森 武俊<sup>\*1</sup> 佐藤 知正<sup>\*1</sup>

## A Human-Symbiotic Ceiling Mobile Robot Platform Utilizing Permanent Magnet Inductive Traction Method

Rui Fukui<sup>\*1</sup>, Hiroshi Morishita<sup>\*2</sup>, Tatsuya Harada<sup>\*1</sup>,  
Taketoshi Mori<sup>\*1</sup> and Tomomasa Sato<sup>\*1</sup>

This paper presents a ceiling mobile robot platform which enables multiple robots to move smoothly and execute their own tasks in a living space. An advantage of this platform is potential to actualize sharing space between humans and robots and secure humans' safety, although the robots can access to humans when they need. For realizing the ceiling mobile robot platform, two key techniques are utilized. The first one is permanent magnet inductive traction method for the robots attaching under a ceiling plate, and the second is multi-robots simultaneous position measurement method using matrix of 2 dimensional codes. By experiments, feasibility and characteristics of permanent magnet inductive traction method are confirmed. And also practicality of position estimation method using matrix of 2 dimensional codes is examined.

**Key Words:** Mobile Robot, Intelligent Environment, Human-Robot Symbiosis, Permanent Magnet, 2 Dimensional Code

### 1. 緒 論

昨今、産業用ロボットの活躍を生活環境にまで広げようと様々な家庭用ロボットの研究開発が行われている。家庭用ロボットが実現しようとしているタスクはロボットにより様々であるが、ロボット自身が移動することによってタスクが実行される例が多い[1]~[3]。ロボットの移動機構に関しては山下らの解説論文[4]が詳しいが、生活環境中で動作するロボットの場合特に移動の確実性に関する議論が重要となる。なぜならば、バランスを崩さずに人や家屋に危害を加えないのは当然のこと、生活空間にはその中で生活する人間、設置された家具、一時的にでも放置される物品などが存在し、ロボットが常に安定して床面を移動できるとは限らないからである。例えば車輪移動型の運搬ロボットが一般的な住居の廊下を移動している場合、居住者はロボットとすれ違うことができずにロボットの通過を待たなければならないというロボット主体の生活環境を居住者に強いることになる。

そこで移動の確実性を考えると人とロボットが通常の状態では空間分割をし、人が日常使用しない空間をロボットが利用するのが好ましい。病院や工場でもカルテや部品を運搬するロボットが天井のレールを移動し、患者、工具、他の設備に干渉せず安定して動作可能なように工夫している例が多数見られる。

この空間分割を実現するために、本研究では上記の例でも挙げたように重力の制限があるが故に人が有効に活用することのできない天井面をロボットの移動空間として利用することを提案する。生活環境は人の営みにより、病院や工場以上に時々刻々と変化するために、ロボットはその変化に柔軟に対応することが求められる。また家庭用ロボットは物品の運搬だけでなく、情報支援を含めて様々な支援を実現することが望ましい。

我々の目指す人間・ロボット共棲環境のコンセプトスケッチを Fig. 1 に示す。ここでは物品を操作するマニピュレーションロボットやクレーンロボット、人へ情報提示を行うディスプレイロボットやライティングロボットが天井面を移動することによって、生活空間で人との空間の分かち合いを実現している。

人が日常使用していない空間を活用する例として、収納では天井と同様に床下を活用する例があるが、床上からアクセスするための搬入出口は家具等と干渉しないことが求められるため、人が使用可能な床面積を低減させてしまう可能性がある。一方、現状の天井設備の代表である照明はライティングレールト、フロ

原稿受付 2009年5月25日

<sup>\*1</sup>東京大学

<sup>\*2</sup>(有) HMI

<sup>\*1</sup>The University of Tokyo

<sup>\*2</sup>HMI Corp.

■ 本論文は提案性で評価されました。

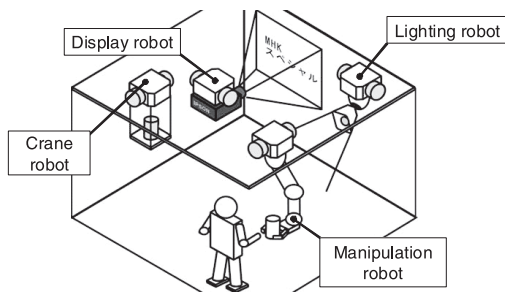


Fig. 1 Conceptual sketch of ceiling mobile robot platform

アスタンドなどにより様々な代替設置方法が存在するため、天井のほうが床下よりも適した空間であると言える。

このように本研究では生活空間でロボットが人と共棲し、人の生活を支援するための天井移動プラットフォームを構築することを目標とする。その実現のために新たに天井面への懸架、移動そして自己位置計測を可能とする機構・手法を開発し、さらに開発した機構・手法の性能を評価することで天井移動ロボット実現コア技術の利点と課題について明らかにする。

本論文の構成は次のとおりである。2章では人と共棲可能な天井移動ロボット実現のための要求仕様の列挙、関連研究の整理、本研究が提案する天井懸架方式について述べる。3章では提案する天井懸架方式のコア技術となる磁石モジュールの開発について述べる。4章では本研究のもう一つのコア技術である、二次元コードマトリクスを利用したロボットの自己位置推定手法について述べる。5章では上記二つのコア技術を統合した天井移動ロボットプラットフォームの構築について述べる。6章では構築したプラットフォームの基本性能を把握する実験について述べる。7章は結論である。

## 2. 人と共棲可能な天井移動ロボット

本章ではまず生活環境における天井懸架方式の要求性能を検討し、従来研究の調査から要求仕様を満たす天井懸架方式を導出する。さらに採用する方式における課題への対応について述べる。

### 2.1 生活環境中における天井懸架方式の要求性能

生活環境中で動作する天井移動ロボットにおける天井懸架方式に求められる要求性能を以下に整理する。

- (1) ロボットが天井を移動する際に安全および実用上、十分な懸架保持力を出せること
- (2) ロボットが天井面を制限無く移動可能であること
- (3) 天井材料が特別なものに限定されず、またその天井の加工・施工も容易であること
- (4) 電力等のエネルギー供給がなくても懸架状態を安全に持続できること

性能(2)の「天井面を制限無く移動可能」に関して、前述したように病院や工場などの天井移動ロボットでは決まったスポット(アクセスポイント)で天井下空間にアクセスできれば要求が満たされることが多い。一方、生活空間内で物品を運搬するロボットを考えた場合、机上に設置される物品が必ず同じ位置・姿勢に設置されるのを期待するのは難しく、また家具の増設や

配置替えなどによりアクセスポイントの位置が変更になった場合、レールを新たに配置し直すという作業は実用上考えにくい。そのため、要求性能の中に含めた。

また性能(3)の「天井材料が特別なものに限定されない」とは、ロボット動作の天井設備を新たに導入することは許容するが、その素材が建築材料として一般的でないものや、高価なものに限定され実用に耐えないことを避けるための要件である。

最後の性能(4)の「懸架持続にエネルギーが不要」は、日常的に動作するロボットの場合、停電などの不慮の事故に遭遇することも十分考えられるため、エネルギーが断絶された場合でも天井懸架を維持することの必要性を示している。工事現場などで専門家が使用している装置と異なり、家庭内で動作するロボットにおいてこのような事故に対する適切な対応を期待するのは困難であるため、天井懸架方式として本質的な対応が求められる。

### 2.2 関連研究の整理と性能実現可能性の検討

前節で述べた要求性能を実現する天井懸架方式を検討するために、これまでに研究・開発されてきた天井移動ロボットを整理する。ここで壁面移動ロボットも吸着という意味では同様な問題を有していると考えて、あわせて取り上げる。この種のロボットを整理する場合、(A)天井(壁面)への吸着方法と(B)吸着面上での駆動方法に注目する必要がある。以下に従来開発・研究された天井(壁面)移動ロボットを列挙する。

- (1) 荷物運搬用トロッコ、介護用リフト:多数のメーカーが販売 [5] [6]
  - (A) レール or レーン, (B) ローラ, チェーン牽引
- (2) 天井走行クレーン [7]
  - (A) 鉄骨構造によるブリッジ, (B) ローラ
- (3) 電気部品組立用ロボットアーム群 (Robot world) [8]
  - (A) 電磁石とグリッド配列鉄板, (B) 平面リニアモータ
- (4) 天井型歩行支援機 (フローラ) [9]
  - (A) 永久磁石+鉄板, (B) ホイール
- (5) 鉄壁面吸着移動ロボット (壁面対応 Vmax) [10]
  - (A) 永久磁石+鉄板, (B) Vmax 方式 (全方向移動)
- (6) 磁気同期駆動型窓掃除ロボット [11]
  - (A) 永久磁石誘導法, (B) 多磁極トルクの旋回を直進に変換
- (7) Six-Legged climbing robot for high payloads [12]
  - (A) 永久磁石・電磁石+鉄板, (B) スカラ型多脚歩行
- (8) 窓清掃ロボット [13]
  - (A) 真空バキューム, (B) ホイール
- (9) 壁面清掃ロボット [14]
  - (A) 真空バキューム, (B) 尺取り移動
- (10) ビル壁面検査等作業ロボット (NINJA I) [15]
  - (A) 真空バキューム, (B) 多脚歩行
- (11) Miniature Climbing Robots [16]
  - (A) 真空バキューム, (B) Pivot 歩行
- (12) 壁面移動ミニロボット [17]
  - (A) 粘着素材, (B) 多脚歩行
- (13) A Wheel/Leg robot for wall climbing (Waalbot) [18]
  - (A) 粘着素材, (B) 不連続ホイール
- (14) ゲル粘着式移動探査機 [19]

- (A) ゲル粘着, (B) ボックスの転がり
- (15) 腕脚統合型ロボット (ASTERISK) [20]
  - (A) 金網へのフック, (B) 多脚歩行
- (16) Inspecting Robot (Spinybot II) [21]
  - (A) 微細な棘+面の凹凸, (B) 2脚歩行

上記の天井（壁面）移動ロボットを天井（壁面）吸着原理と水平駆動方式に基づいて整理したものを **Table 1** に示す. 表中で水平駆動方式が太字かつ下線ありで記されたものは, 吸着と水平移動が複数の機構に分離して実装されるものであり, それ以外は共通構造に統合されて実装される. また “Status” とは 2.1 節で挙げた四つの要求性能の実現性を示している.

前節で挙げた要求性能と Table 1 の比較を行うと天井材料の一般性の確保に難が残るものの, 永久磁石誘導式もしくはフック式が他の三つの要求性能を欠くことがないため有望であることが分かる. フック式の場合, 天井懸架と水平移動が脚機構などに統合されて実装されるためロボットの移動機構には多くのアクチュエータ自由度が必要となる. 一方, 永久磁石誘導式は天井懸架と水平移動を分離して実装できるため水平移動に簡便な機構を採用することが可能である.

**2.3 本研究で採用する天井懸架方式の考案**

前述したように本研究では, Fig. 1 に示すように, 様々なロボットが天井に懸架し人への支援動作をすることを念頭に, 天井移動ロボットのプラットフォームを構築することを目指す. よって, 水平移動機構は従来の床面を移動するロボットに近く簡素な制御で実現されるものが好ましい, 永久磁石誘導方式では水平移動に一般的なホイール移動方式を利用可能であるため本方式を採用候補とする. また簡素な水平移動機構として二つの駆動輪を対向して設置するホイール型移動機構を採用することとした. **Fig. 2** に本研究で採用を検討する永久磁石誘導型天井吸

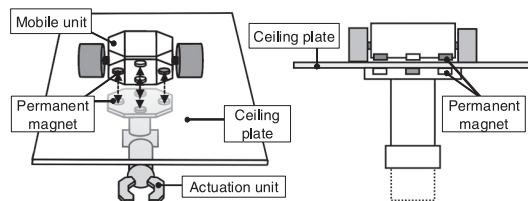
**Table 1** List of adsorb methods and horizontal drive mechanisms in previous works

Adsorb method	Horizontal drive	Robot *	Status
Rail	Roller	(1) (2)	#2
Electro magnet	Sawyer motor	(3)	#3a #4
Permanent magnet	<b>Wheel</b> , Vmax	(4), (5)	#3a
Magnet induction	<b>Bearing rotation</b>	(6)	#3b
Permanent and electro magnet	Legs walk	(7)	#3a
Vacuum suction	<b>Wheel</b> , Pivot walk, Legs walk, Looper	(8) (9) (10) (11)	#4
Adhesive material	Discrete wheel, Legs walk	(12) (13) (14)	#1
Hook	Multi legs walk	(15)	#3b
Spine	Multi legs walk	(16)	#1

\* Robot corresponding to the previous works

**[Implement type of adsorption and drive mechanism]**  
 Normal font: Integration type, **Bold font**: Distributed type

**[Realization of required capabilities]**  
 #1: Defect of max sustain force  
 #2: Defect of motion area  
 #3a: Defect of ceiling material generality  
 #3b: Lack of ceiling material generality  
 #4: Defect of energy free adsorption



**Fig. 2** Permanent magnet inductive traction method

着法の概要を示す.

本方式による天井移動ロボットの実現性確認のために簡易テストモデル (**Fig. 3**) を作成した. 本テストモデルの作成により以下のことを確認した.

- 永久磁石誘導型天井吸着法により, 特別な天井素材を用いずに天井平面を自由に移動可能な天井ロボットが実現可能である.
  - ⇒ テストモデルではアクリル板で天井面を構成した. このほかにも強度と剛性が許す限り木材, ガラス, アルミ, 樹脂といった建築素材が広く使用できる. 鉄板は誘導を妨害するため使用できないが, 鉄板を天井面に利用可能ならばフローラ [9] のような永久磁石吸着方式を採用すればよい.
- ダミーアクチュエータが動作した場合にも天井吸着状態が解かれることはない.
  - ⇒ ただしテストモデルと実際のロボットは大きさ・質量が異なるため, このスケールでの影響を確認したに過ぎない.
- 駆動輪では大きな滑りが生じている. 特に Pivot ターン時に中心位置がずれてしまう.

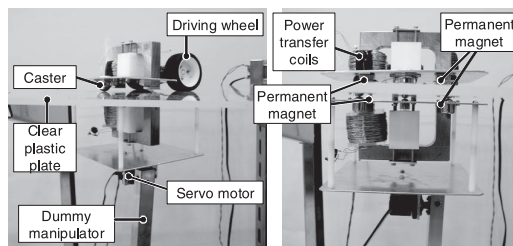
床面を移動するロボットの場合, 自己位置はエンコーダなどの内部センサと測域センサなどの外部センサのデータを統合して推定することが多い. しかし, 本方式ではタイヤの滑りが大きいため内部センサより正しく自己位置を推定するのは困難であるため, 外部センサのみから高精度に自己位置を推定する手法が求められる.

ホイールにおける滑りの問題はああるものの, 天井平面を自由に移動可能なロボットプラットフォームの実現が可能と考えられたため, 永久磁石誘導型天井吸着法を採用することとした.

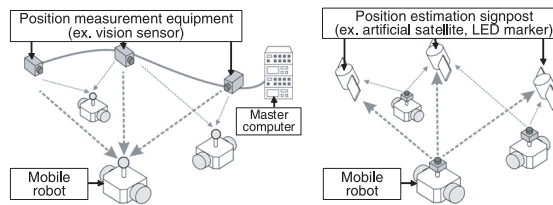
**2.4 自己位置推定手法の検討**

ロボットの自己位置を推定する手法としては **Fig. 4** に示すような 2 とおりの方式が考えられる.

- 計測器統合方式: 複数の計測器の情報を一つのマスタとなるコンピュータに集め, すべてのロボットの位置を探し出し計測する. 例としては光学式モーションキャプチャがある.



**Fig. 3** Test model of ceiling mobile robot



(A) Integrated system approach (B) Individual robot measurement approach

**Fig. 4** Comparison of robot position measurement approach

【利点】 マスタとなる計測器+コンピュータに位置計測の機能を任せることができるので、各ロボットの実装が容易になり、台数の増加時にはコストの面で有利である。

- ロボット自律取得方式：各ロボットにセンサを実装し、そのセンサに対応する環境を用意することで各ロボットが自主的に位置計測する。GPS が代表例である。

【利点】 各ロボットが自主的に動作するので、エリアごとにマスタとなる優秀なコンピュータを設置する必要がなく、行動範囲の拡張も容易である。

今回は行動範囲の拡張の容易さと自律性を優先してロボット自律取得方式を採用した。そして位置推定を支援するサインポストとして、座標データが書き込まれた二次元コードを動作領域にマトリクス状に敷き詰めることとした（本研究ではこれを二次元コードマトリクスと呼ぶ）。二次元コードを利用したロボットの位置取得および作業支援に関しては太田らがロボットによる移動、ハンドリングという一連の作業を実現しており [22]、その応用範囲は広く、天井という専用空間をロボットが移動する本研究においても非常に強力な位置推定ツールになる。なお、ロボットが物体を操作する応用を考えると位置推定精度は誤差数 [mm] 以下の性能が求められる。

### 3. 磁石モジュールの開発

本章では永久磁石誘導型吸着法をロボットに適用するために必要な、磁気回路の設計・解析および吸着力測定について述べる。以降、本吸着法を実現する磁気回路のことを“磁石モジュール”と呼ぶ。まずこの磁石モジュールに求められる基本的な仕様およびその実現方法について考察し、その後に設計・製作・性能試験について述べる。

#### 3.1 要求仕様とその実現方法の考案

今回のアプリケーションにおける磁石モジュールには次のような基本仕様が求められる。

- 安全および実用上、十分な吸着力を持つ  
必要な吸着力は天井下面ユニットの機能や機構によって異なるが物品搬送応用を考え、搬送物品を 10 数 [kgf]+ロボット自重を 10 数 [kgf] と想定すると、オーダとして数 10 [kgf] の吸着力は必要である。さらに人間とのインタラクションが必要な場合、当然安全面での制限が厳しくなる。
- またロボットに搭載した場合、加わる荷重の方向によって磁石モジュールへの負荷も変化するが、鉛直方向以外の力はロボット本体の機構で受け流す仕様とする。
- 必要に応じて吸着力の減少が可能  
ロボットを天井から外しメンテナンスをする際に必要な機能。強力な吸着力を発揮したままの磁石モジュールを保管することは安全管理上好ましくない。

前者の実現のために他の希土類磁石と比較して安価で大きな吸着力を持つ、ネオジウム鉄ボロン系の磁石を採用した。また吸着力の見積りには (株) エルフの解析ソフト“ELF/MAGIC”を使用した [23]。後者の実現のため磁石の数や磁気回路構成を変えて (a) 磁気回路ループ・非ループ切替型、(b) 着脱力内部保持型、(c) 吸着力減少型、(d) 吸着・減磁切替型の四つの方式 (Fig. 5) を検討した。各方式の概要と特徴を以下に示す。

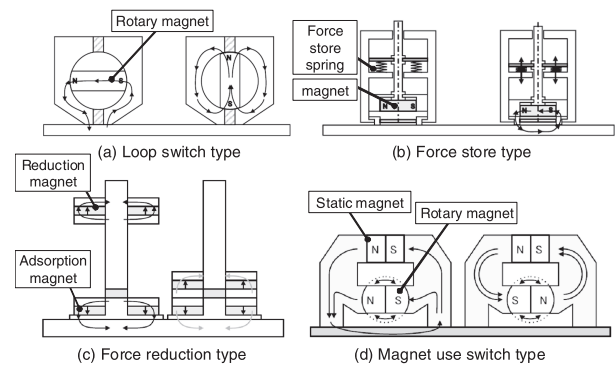


Fig. 5 Basic structure candidates of magnet module

まず磁気回路ループ・非ループ切替型 (Fig. 5, (a)) は市販のマグネットチャックに使用されている方式である。簡素な機構で大きく吸着力を減少させられるが、ヨークの設計・加工に高い技術が必要である。着脱力内部保持型 (Fig. 5, (b)) は鶴らが開発した手法 [24] で、吸着した状態で脱着するための力をモジュール内部に蓄えることができる。これにより高い切替応答性が得られるが吸着力減少状態の保持が困難である。吸着力減少型 (Fig. 5, (c)) は磁石一つを吸着用、もう一つを吸着力減少用とする方式であり、機構が簡素である一方で、高価な磁石一つを吸着力減少のためだけに用いるという無駄がある。最後の吸着・減磁切替型 (Fig. 5, (d)) は磁気回路ループ・非ループ切替型と吸着力減少型のハイブリッド方式で、減磁用のループがそのまま吸着用の磁路として使えるが、複数個の磁石が必要で素材コストが高い。

上記の 4 方式を検討し、今回は部品構成が最もシンプルな磁気回路ループ・非ループ切替型を採用した。また意図せずヨーク内でループしてしまう磁気を減らし、確実に吸着力を得るために、磁気回路ループ用のヨークおよび非ループ用のヨークをそれぞれ独立に用意することにした。

次に磁石モジュールの吸着力仕様および機能の検討を行い、磁石モジュールの要求仕様を次のように設定した。

- (A) 吸着力: 10 [mm] のモジュール間ギャップにおいて 7.5 [kgf]  $\Leftarrow$  自重 10 [kgf]+物品 10 [kgf]+余裕 10 [kgf]=合計 30 [kgf] を 4 点で支持するとして設定した。
- (B) 吸脱着: 3 段階の切替式 (吸着, 脱着, 中間)  $\Leftarrow$  3 段階にすることにより天井下部ユニットの取り外し作業性が向上する。
- (C) 付加機能: 天井面と一定の距離を保持しつつ摩擦を低減。

#### 3.2 磁石モジュールの詳細設計と実装

前述の要求仕様を満たす磁石モジュールを実現するために Fig. 6 (a) のような基本構造を持つ磁石モジュールを設計した。Fig. 6 (b), Fig. 6 (c) に実際に製作した磁石モジュールの外観を示す。使用した磁石は信越化学工業 (株) のネオジウム系磁石“N45H”である。天井面との摩擦を減らしつつ一定の距離を保つボールキャスタが内蔵され、また 3 段階の吸着・脱着切り替え機能は T 型レンチを上方より押し付けることにより磁石を回転させ、位置決めピンにより位置を固定させることによって実現した。

本磁石モジュールの吸着力の測定を Fig. 7 (a) に示すテスト

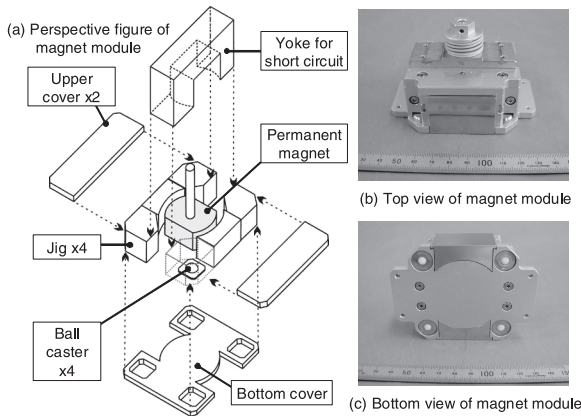


Fig. 6 Perspective figure and snapshot of magnet module

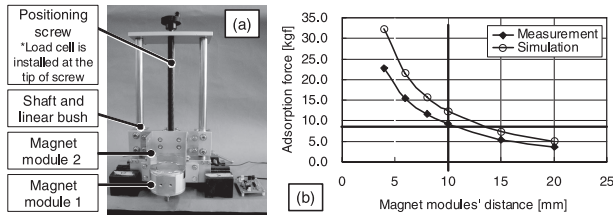


Fig. 7 (a) Force measurement test bench  
(b) Graph of magnet adsorption force

ベンチを用いて行った。本テストベンチでは二つの磁石モジュールを送りネジにより一定の間隔に位置決めし、その状態での吸着力をロードセルによって計測している。測定結果および参考として磁石モジュールの設計に用いたシミュレーションソフト(ELF/MAGIC)の解析結果を Fig. 7(b) に示す。まず要求仕様の「ギャップ 10 [mm] で 7.5 [kgf]」の吸着力という条件を満たしていることが確認された。また解析結果と実測値との差は 30% 程度であるが、これはシミュレーションでは主要部品(磁石とヨーク)のみで解析しており、すべての漏れ磁束を再現できていないためと考えられる。

#### 4. ロボットの自己位置推定手法の開発

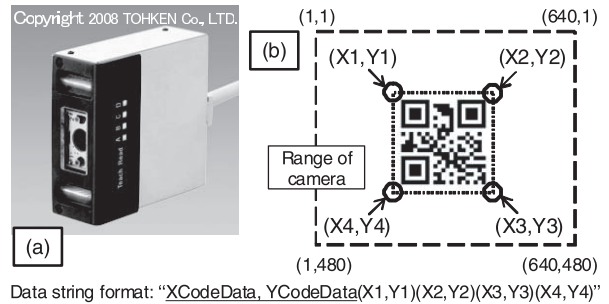
2.4 節で述べたように、本研究では環境側に位置情報を二次元コードによってマークとして記述し、それぞれのマークを各ロボットが読み取ることによって位置推定を行うこととした。本章ではまず、使用したコードのスペックや読み取り方法について述べ、次にそこから得られた情報からロボットの位置・角度を計算する手法について述べる。

##### 4.1 二次元コードと情報の読み込み

まず既存の二次元コードの中から、ロボットの位置推定に使いやすいコードとして(株)デンソーウェーブが開発・規格化した“QRコード”を選定した。その理由は読み取りスピード

†デンソーウェーブ製の QD-20 では本機能を実現するために、ファームウェアを特別に書き換える必要がある。

††ここで注意が必要なのが、コードリーダが出力するコード位置座標は位置検出パターンよりも 4 セル分外側に位置することになる。これは QR コードがコード本体の周辺に最低 4 セル分のクワイエットゾーンを必要としており、このゾーンも含めてコードと認識しているためである。



Data string format: “XCodeData\_YCodeData(X1,Y1)(X2,Y2)(X3,Y3)(X4,Y4)”

Fig. 8 (a) 2D code reader, (b) Output data format of reader

が高速であり、また読み取りの手法(特徴マーカおよびコード位置抽出)がロボットの位置を検出する手法との相性がよいと判断したためである。QRコードはコードの切り出しに三つのシンボルを用い、まず読み取るコードの位置を決定する。このコードの切り出し処理がロボットの位置推定に利用可能である。

QRコードを読み取る装置は(株)東研が販売している組み込み型リーダ“TFIR31-DM”を用いた。リーダの外観を Fig. 8(a) に示す。本装置はプリント基板等に印字されたダイレクトマークを読み込むことに特化した製品であり、内蔵されている照明は透明な天井素材上のコードを読む場合でも反射の影響が少ない。しかしながら(株)デンソーウェーブ製の“QD-20”等の据え置き型のリーダと比較すると、カメラの性能や照明条件が優れているとは言えず、シャッタースピードやゲインなどは環境に合わせて調整する必要がある。

TFIR シリーズの特徴は、リーダ調整用に読み込んだマーカのカメラ画像中の座標を出力するモード†が三つ用意されている点である。本研究では“4 角座標通知モード”を利用してロボットの位置を計算している。このモードを使用すると、コードリーダは Fig. 8(b) に示すように読み取ったコード内のデータに画像内のコードの位置を四つの角の座標という形で付加して通知する††。このコードデータおよび位置データからロボットの位置・方向を計算する。

##### 4.2 二次元コードマトリクス

二次元コードマトリクスを構成する各コードには“X0007Y0023”のように、原点からそのコードが X, Y 方向に何個目のコードかという情報を書き込むこととした。使用した QR コードの仕様は次のとおりである。QR コードモデル: 2, 誤り訂正レベル: M, バージョン: 1, セルサイズ: 8 [Pixel], コードサイズ: 8.03 [mm] 四方(クワイエットゾーン含む)

実装の都合上、1 枚のシートを 500 [mm] × 500 [mm] とし、その中に 10 [mm] ピッチで 50 × 50 = 2,500 個のコードが印刷されている。これらのシートを移動領域に敷き詰めてロボットの位置推定を可能にする。各シートには同一のパターンを印刷しているため、ロボットは跨いだシートの枚数をカウントしてどのシートの上にいるかを記憶する必要がある。

##### 4.3 コード情報からの位置推定計算

位置推定計算は次の手順で行われる。まず(1)ロボットがどのシートにいるかを考慮し、次に(2)どのコードを読み取っているかを調べ、最後に(3)そのコードがカメラのどの位置に写っているかを考慮する。X 座標の場合、式(1)によって計算され

る。Y座標についても同様である。

$$\begin{aligned}
 X_{position} = & (SheetSize \times X_{SheetOffset}) \\
 & + (CodePitch \times X_{CodeData}) \\
 & + ((CodeSize \times X_{PositionCCD}) \\
 & / CodeSize_{CCD}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで  $SheetSize$  とは二次元コードを印刷したシートの大きさ 500 [mm],  $X_{SheetOffset}$  は X 方向に何枚目のシートにいるかを示す変数,  $CodePitch$  は配置した二次元コードの間隔で 10 [mm],  $X_{codeData}$  とはコードに書き込まれた“X00??Y00##”の“??”の部分に相当し, シートの上で何番目のデータであるかを示す変数,  $CodeSize$  は印字されたコードの大きさで 8.03 [mm],  $X_{PositionCCD}$  とはカメラ画像上のコードの中心位置,  $CodeSize_{CCD}$  はカメラ画像上のコードの大きさが何ピクセルかを示す変数であり,  $X_{PositionCCD}$  と  $CodeSize_{CCD}$  は Fig. 8 の X1~X4, Y1~Y4 より計算される。

#### 4.4 コード情報からの角度推定計算

推定角度は次の手順で計算される。

- (1) コード辺ベクトルの計算
- (2) 平均ベクトルの算出と角度への変換
- (3) 移動ユニット座標系への変換

以降で各計算手順の詳細を述べる。Fig. 9 に以下の計算で使用する座標, ベクトルの定義を示す。

まず式 (2) によってコードの各辺のベクトルを計算する。以下の計算におけるインデックス  $i = 4$  は  $i = 0$  と同値であるとす。

$$v_i = [x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i], (i = 0..3) \quad (2)$$

次にベクトル  $v_1, v_2, v_3$  をベクトル  $v_0$  と同じ方向にするためにおおの回転させる。回転させたベクトルを  $v'_i$  とすると, 各ベクトルは式 (3) のように書き下せる。

$$\begin{aligned}
 v'_0 &= [x_1 - x_0, y_1 - y_0], v'_1 = [y_2 - y_1, x_2 - x_1] \\
 v'_2 &= [-x_3 + x_2, -y_3 + y_2], v'_3 = [-y_0 + y_3, x_0 - x_3] \quad (3)
 \end{aligned}$$

続いてこれらの辺ベクトル  $v'_i$  の平均を次式により求め

$$v'_{ave} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 v'_i \quad (4)$$

次式により角度への変換および座標変換を行う<sup>†</sup>。

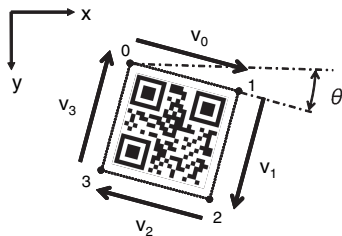


Fig. 9 Coordinate system and vectors for direction calculation

<sup>†</sup>数式中の  $\pi/2$  は移動ユニットの座標系と二次元コードリーダの座標系における, 角度の取り方の違いを吸収する項である。

$$\begin{aligned}
 \theta &= s * \cos^{-1}(v'_{ave}) - \pi/2 \\
 s &= 1 \text{ (if } y_1 > y_0), s = -1 \text{ (else)} \quad (5)
 \end{aligned}$$

### 5. 天井移動ロボットプラットフォームの構築

前章までで説明をしたコア技術を組み込んだ天井移動ロボットプラットフォームを構築した。本章ではプラットフォームを構成する移動ユニットと下部アクチュエーションユニット, そしてそれらが動作するロボット用天井について述べる。

#### 5.1 天井上部移動ユニット

移動ユニットは Fig. 10 に示すように二つのモータおよびタイヤを持つ 2 駆動輪対向型の移動車両で, 二次元コードリーダ, Bluetooth 無線機, リチウムイオンバッテリー, そして緊急停止用の遠隔操作電源遮断回路 ((株) サーキットデザイン, “WR-01”) 等が搭載されており, 総重量は約 10 [kgf] である。ユニット側の磁石モジュールはボールキャストで天井板の上表面に接触しており, 本体とは Fig. 11 のようにリニアプッシュで結合されている。これにより磁石モジュールは移動ユニットの傾きと関係なく天井板と一定の距離を保つことができるようになっている。また, リニアプッシュとプレートとの間には圧縮バネを組み込み, 磁石モジュールの吸着力の 30%ほどが移動ユニットのタイヤのグリップ力になるよう設定している。

#### 5.2 天井下部アクチュエーションユニット

天井下部アクチュエーションユニットとして本研究では単純な昇降ユニット (Fig. 14, (a)) と専用のコンテナ (最大積載量 5 [kgf], 最大自重 3 [kgf]) [25] を持たし・運搬するユニット (Fig. 12) を構築した。コンテナを操作する機構に関する説明は参考文献 [26] に譲り, ここでは天井に懸架する構造部について述べる。

天井懸架部は Fig. 13 に示す構造を有する。永久磁石誘導型

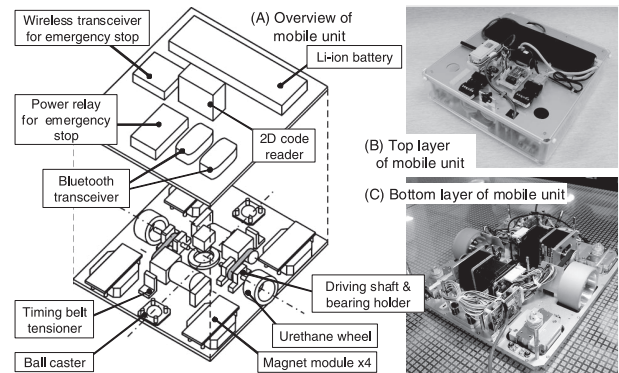


Fig. 10 Overview and snapshots of mobile unit

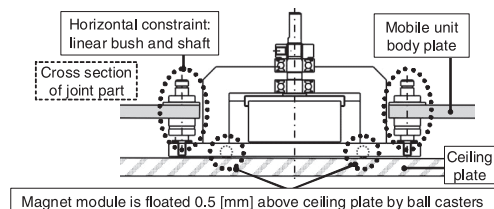


Fig. 11 Joint mechanism of mobile unit and magnet modules

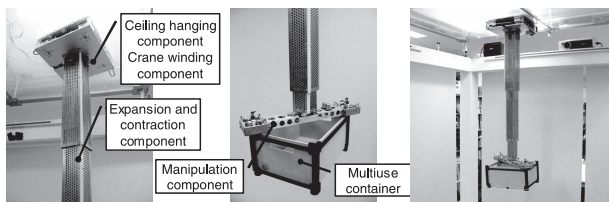


Fig. 12 Overview of a container manipulation unit

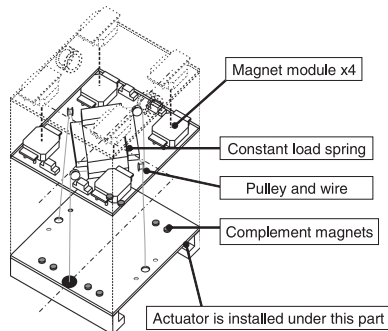


Fig. 13 Abstract of ceiling hanging unit

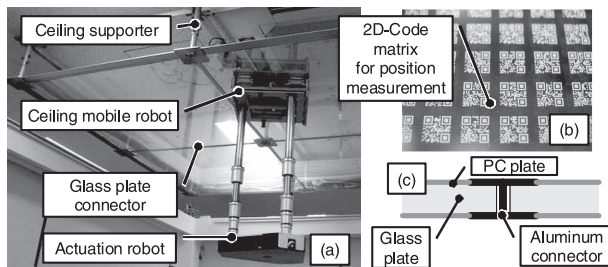


Fig. 14 (a) Special designed ceiling, (b) printed 2D code matrix and (c) glass plate connector

天井吸着法を実現するために、天井上部移動ユニットの磁石モジュールと対向する四つのボールキャスタ内蔵の磁石モジュールがロボット筐体の角に配置されている。天井面上の天井懸架移動部と同様に四つの磁石モジュールのうち、一つはバネで支えられて上下に変位できるようになっており、これにより四つの磁石モジュールがたわんでいる平面上に位置決めされても、可能な限り大きな吸着力を発揮できるようにしている。また人が天井移動ロボットに接触した場合や天井移動ロボットを下方・側方に引っ張った場合に、その外力が直接磁石モジュールに伝わらないようにするため、定格 3.0 [kgf] のワイヤタイプの定荷重バネ（コンストン）4 個を設置した。このコンストンの力を補助するために永久磁石（吸着力 1 [kgf] : 4 個, 2 [kgf] : 4 個の合計 8 個）が搭載してある。

これにより鉛直方向に 24 [kgf] 以上で引っ張ると永久磁石の連結が解除され、コンストンのワイヤが引っ張り出されて定荷重バネの引っ張り力の合計 (12 [kgf]) 以上の力が天井懸架部に加わらないようになっている。ワイヤタイプのコンストンであるので、側方に引っ張った際にも複数コンストンのワイヤが伸びて力がかかわることができるが、その力の大きさは側方に押した位置（高さ）によって異なる。天井下方に長くアクチュエータが伸びた状態で重量物を把持しながら水平移動をする場合に

は、物品の重量による慣性力では外乱緩和機能が働かない範囲で加減速する必要がある。

### 5.3 ロボット動作用天井

天井移動ロボット専用の動作環境として Fig. 14 (a) に示すような天井を製作した。この天井は 1,000 [mm] × 1,000 [mm] で厚さ 6 [mm] の強化ガラスの上に二次元コードマトリクスを白色インクで印刷した透明シート (500 [mm] × 500 [mm], 4 枚) を Fig. 14 (b) のように並べ、その上下にシートおよびガラス表面の保護用に上面 1 [mm], 下面 2 [mm] 厚のポリカーボネート板 (1,000 [mm] × 1,000 [mm]) を貼り付けている。なお以下の二つの利点を考慮し、天井面を透明な素材で製作した。(1) 整備時に天井面上で動作している移動ユニットの様子を下方から確認できる。(2) 既存の天井の下側に取り付けた場合にも照明設備をそのまま利用できる。強化ガラスには重量や落下時粉砕といった問題があるが、市販されている透明樹脂では剛性が不足するため強化ガラスを用いている。また、白色インクで印刷した二次元コードマトリクスは照明を一部反射するが体感できるほどの照度損失はない。

天井移動ロボットは永久磁石の強力な力で天井面を挟み込むため、隣接する天井面間に段差があるとそれを乗り越えるために非常に大きな駆動力（牽引力）が必要となる。よって、動作天井面は上面・下面共に平滑であることが求められる。特に隣接するガラスプレートを接合する箇所は段差が生じやすいため、その対処が必要となる。本研究では Fig. 14 (c) に示すようなアルミ押し出しチャンネル材によるコネクタを製作し、隣り合うガラス同士を接続させることで段差 0.2 [mm] 以下を実現している。

この構成で 4 組の天井面を連結し、2,000 [mm] × 2,000 [mm] の動作用天井を構築した。なお動作用天井は既存天井の下に設置しており、ホコリなどの異物を取り除く特別な仕組みは用意していないが、異物や隣接する天井プレート間の段差に引っかかることなくロボットが移動可能なことを確認した。

## 6. 実 験

本章では構築した天井移動ロボットプラットフォームの性能を評価するために行った以下の実験について述べる。

- (1) 天井吸着力の最大値を計測する実験
- (2) 上下ユニットの水平牽引力を計測し、ガイド追従性能を確認する実験
- (3) 上下ユニットの牽引誤差を計測する実験
- (4) 二次元コードマトリクスを用いた自己位置推定性能を評価する実験
- (5) 自己位置推定結果に基づく位置決め性能を評価する実験

実験 (1) では基本的な安全性を確認し、実験 (2) ~ (4) では本研究が採用した特徴的な移動・計測方式の基本性能を確認し、最後に実験 (5) では天井移動ロボットプラットフォームとして活用するために、移動ロボットとしての性能を確認した。

### 6.1 天井吸着力計測実験

永久磁石誘導型吸着法の基本的な安全性能を評価する実験を行った。まず天井下部ユニットにコンストンの引張力と補助マグネットの吸着力（初期切り離し力：24 [kgf], 下方引っ張り時

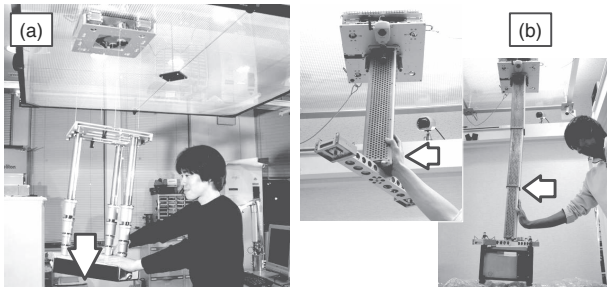


Fig. 15 External force absorbing test

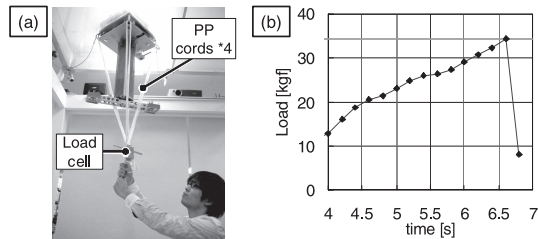


Fig. 16 Intentionally applied maximum load test

支持力: 12 [kgf]) 以上の垂直力が加わったときには Fig. 15 (a) に示すように、コンストン以下の部分に変位して磁石モジュールに過負荷を与えないことを確認した。またコンテナ運搬ユニットの先端に水平方向に力が加わった場合にも Fig. 15 (b) のように下部ユニット側の外力緩和機能によって天井懸架状態に影響がないことを確認した。

次にユーザが恣意的にコンストンより上の磁石モジュールに直接力を加えた場合の落下荷重を計測する試験 (Fig. 16 (a)) を行った。この実験では天井下部ユニットの四隅にポリプロピレンテープを取り付け、ロードセルを介して人が下方に引っ張ることによって吸着力の測定を行った。結果を Fig. 16 (b) に示す。試験により 34.2 [kgf] の負荷を与えたときに天井からの落下が起こった。これは各磁石モジュールの吸着力の総和 40 [kgf] より 15%ほど小さいことになる。この原因は本実験では人の体重を下方に引っ張る力として利用したため、鉛直方向が完全に維持された状態で力が加わっておらず、各磁石モジュールに加わった力が均等ではなくバラツキがあったため、最初に吸着力を超えてしまった磁石モジュールから脱着してしまったためと考えられる。しかし吸着力約 35 [kgf] という性能は家庭内で 5~10 [kgf] のコンテナを運搬するロボットへの適用を考えた場合でも、十分な吸着力であると言える。

6.2 牽引力計測実験・ガイド追従実験

本実験では Fig. 17 に示すように、ばねばかりを移動ユニットの後端に取り付けた状態で直進動作をさせ、ホイールがスリップする限界の牽引力を測定した。測定の結果、直進時の最大牽引力は約 3.5 [kgf] であることが分かった。本測定は天井下部ユニットを吸着させた状態で行っているため、この牽引力はロボットをガイド等へ合わせるための余剰牽引力であるが、ガイドの取り付け固定具に過剰な負荷を与えない適切な範囲の値であり、移動ユニットが適度な牽引力と滑りを実現していることが確認された。

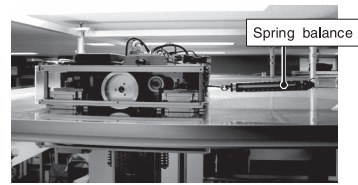


Fig. 17 Mobile unit maximum driving force test

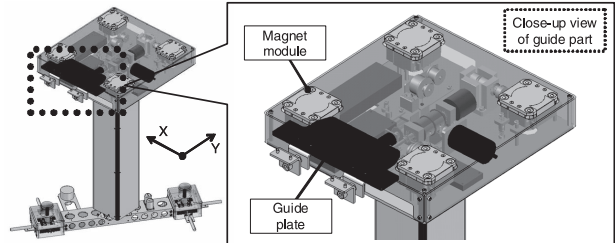


Fig. 18 Experimental setup of guide plate navigation test

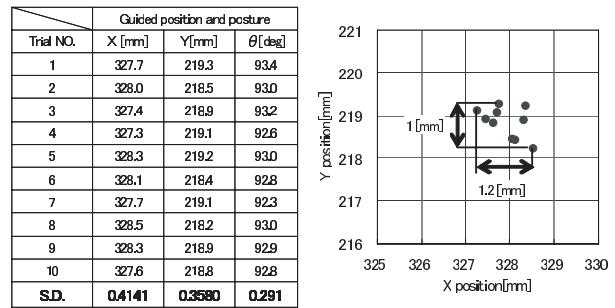


Fig. 19 Result of guide plate navigation test

続いて Fig. 18 に示すように下部アクチュエーションユニットの磁石モジュールと嵌合するようなガイドプレートを天井下面に固定し、移動ユニットを直進させてガイドに下部アクチュエーションユニットを押し付けた場合の位置決め再現性を確認した。一般にガイドを用いた位置決め動作の絶対精度はガイド自体の位置合わせによって確保する。ここではガイドへの追従性能のバラツキを評価することを目的としている。

Fig. 19 に位置決めを 10 試行行ったときのデータを示す。X, Y 方向とも標準偏差 0.5 [mm] 以下、角度も 0.3 [deg] 以下と非常に高い位置決め再現性であり、永久磁石誘導型天井吸着法がガイドを用いた高精度な位置決めに適応可能なことを確認した。

6.3 牽引誤差計測実験

本実験は、天井上面の移動ユニットの移動に対して、天井下部ユニットがどのような追従性能を示すかを簡易的に計測することを目的とする。実際に試験天井面で移動ユニットを走行させ、天井下部ユニットを追従させてみたところ静的な状態での位置のずれはほとんどなく、そのオーダはサブミリ以下であることが確認された。これは機械加工・組み上げの公差に基づくものであり、その正確な測定は困難である。

そのため本実験では動的追従誤差の計測を行った。実験は Fig. 20 のようにワイヤタイプのリニアスケールを各ユニットに取り付け、移動ユニットを一定速度で走行させたときのリニアスケールの出力パルスをカウントすることによって行った。使用し



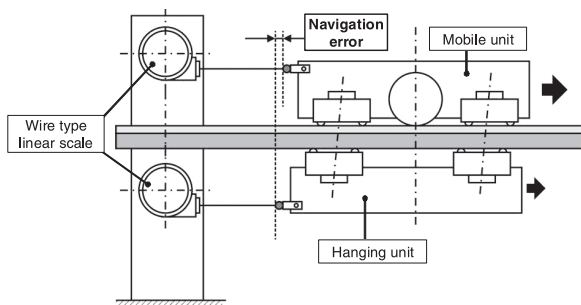


Fig. 20 Experimental setup of navigation error measurement

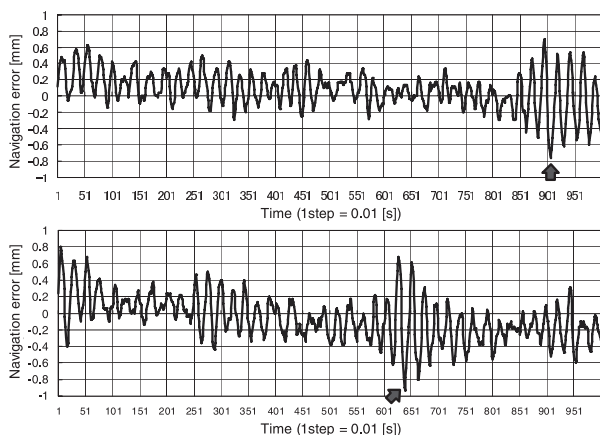


Fig. 21 Navigation error between mobile and hanging units: driving speed 15 [mm/s] (Upper), 30 [mm/s] (Lower), arrows express absolute maximum error

タリニアスケールは Microtech Laboratory 製 “MLS 30-4500-1000” で、測定ストローク 1,000 [mm]、最小分解能 0.02 [mm] のものである。また 2 系統のパルスカウンタは秋月製の “H8-3052” ボードを用いて行った。サンプリングレートは 100 [Hz] である。Fig. 21 に実験の結果を示す。グラフを見ると動的な最大誤差は移動ユニットの速度が 15 [mm/s] のとき約 0.8 [mm]、30 [mm/s] のときは約 1 [mm] であった。

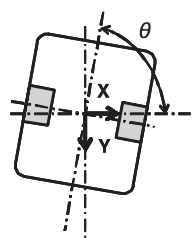
#### 6.4 自己位置推定性能評価実験

本実験では移動ユニットを規定の天井位置において指定の角度 (30 [deg] 刻みの 12 点) に旋回させ、その位置での二次元コードデータからの位置・角度推定結果のバラツキ (50 回分) を調べ、本手法の精度 (再現性) を評価する。絶対的な位置の推定精度 (真値からのずれ) の確認が必要となるが位置・姿勢を二次元コードデータからの推定再現性以上に計測可能な装置は非常に高価であるため、本研究では再現性の確認に留まっている。

実験の結果を Fig. 22 に示す。結果より X 方向、Y 方向、ヨー角度の標準偏差最悪値がそれぞれ 0.22 [mm]、0.33 [mm]、0.30 [deg] であることが分かった。これにより本手法を用いることで、移動ユニットの旋回によって変化する二次元コードリーダ画像中のコード状態 (位置、姿勢) の変化に対してロバストに、ロボットの位置・角度を計測できることが確認された。

#### 6.5 位置決め性能評価実験

前節の実験により、二次元コードマトリクスを利用すること



Mobile unit direction [deg]	Position S.D. of		Angle S.D. of Theta [deg]
	X [mm]	Y [mm]	
-150	0.163	0.199	0.252
-120	0.178	0.189	0.196
-90	0.184	0.149	0.299
-60	0.061	0.051	0.164
-30	0.055	0.061	0.173
0	0.064	0.327	0.177
30	0.224	0.278	0.253
60	0.215	0.139	0.260
90	0.060	0.070	0.139
120	0.162	0.085	0.209
150	0.210	0.293	0.290
180	0.057	0.060	0.166

Fig. 22 Result of position estimation experiment

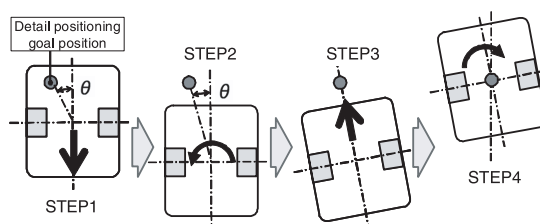


Fig. 23 Locomotion routine for detail positioning

により移動ユニットは非常に高い再現性で自己位置を推定できることが確認された。本節ではこの自己位置推定性能を用い、移動ユニットに位置決め動作をさせた場合の制御性能 (位置決めに必要な時間) について述べる。

天井上面の移動ユニットは非ホロノミックな拘束を受ける 2 輪対向型の移動機構を採用したため、目標位置・姿勢へ漸近安定させる制御則は存在せず、旋回・直進を組み合わせた制御則を構築する必要がある。また本ロボットは Pivot ターンが可能であるが、ホイール幅が広いいため Pivot ターン実行時に中心位置が移動するという問題がある。そこで詳細位置決め時の Pivot ターンでの旋回角度を小さくするために、以下の位置決めルーチン (Fig. 23) を採用した。

**STEP1:** 旋回角  $\theta$  の絶対値が 15 [deg] 以下になるまで後退する。

**STEP2:** Pivot ターンを行い、目標位置への方向誤差が 1.0 [deg] 以内となるよう旋回する。

**STEP3:** 前進位置決めを行う。位置決め精度が「目標位置精度」以上の場合 STEP1 へ戻る。以下であれば STEP4 へ。

**STEP4:** 目標向きとの位置決め誤差が「目標角度精度」以内に収まるよう Pivot ターンを行う。位置決め精度が「目標位置精度」内の場合には終了、それ以外は STEP1 へ戻る。

上記のルーチンの性能を評価する実験を行った。実験ではスタート位置より前方に 100 [mm] 離れたゴール地点にて目標位置精度 1.5 [mm]、姿勢精度 0.2 [deg] に設定して、その位置決め必要時間を計測した。この目標位置・姿勢精度値は天井下部ユニットがコンテナを把持するときの設計時要求精度であるため、自己位置推定性能評価実験の結果から見ると厳しい設定ではあるが他の構成要素との設計余裕分割のため本値を用いて実験を行った。Table 2 に試験結果を示す。経過時間は 100 [mm] の移動に必要な時間を除いた、位置決めに必要な時間のみを記述し

**Table 2** Elapsed time for accurate positioning

Trial #	Time [s]	Loop #	Trial #	Time [s]	Loop #	Trial #	Time [s]	Loop #
1	44.9	2	5	11.7	1	9	28.0	2
2	3.98	0	6	16.0	1	10	13.9	1
3	15.4	1	7	18.6	1	Ave. 17.9 1.1		
4	17.9	1	8	8.9	1			

ている。またループ数とは上記の位置決めルーチンのSTEP1～STEP4までを繰り返した回数を示している。

この結果より、1回の位置決めで平均で17.9[s]、最悪で44.9[s]必要としており、制御収束性が高いとは言えず、またループ数の増加が必要時間を長くしていることが分かる。これはスリップが大きく正確な旋回が困難な移動方式であるにも関わらず、前述のルーチンのように最終的に旋回による姿勢制御を行わなければならないということが大きく影響していると考えられる。しかし、このような位置決め収束性能は前述したガイド追従性能とトレードオフの関係にあることが多く、高いガイド追従性能を有する本ロボットプラットフォームに高い収束性を付与するためには天井下部アクチュエーションユニットに冗長自由度として詳細位置決め用の水平・旋回可動部を搭載するのが有効であると考えられる。

## 7. 結 論

本論文では生活環境中で動作するロボットの移動確実性を高めるために、人がこれまでに活用していない天井面をロボットが移動することを提案した。様々な天井・壁面吸着移動方法を分析・整理することで、生活環境に適した天井懸架・移動方法として永久磁石誘導型天井吸着法を考案した。さらに本手法で問題となるロボットの自己位置推定のために二次元コードマトリクスを利用した再現性の高い自己位置推定手法を考案した。

それらを統合した天井移動ロボットプラットフォームを構築し、考案したコア技術が生活空間において人と空間を分かち合うことができるロボットを実現するための強力な要素技術となることを示した。

プラットフォームの性能把握実験により次のことが示された。

- (1) 床面を移動するホイールタイプの移動ロボットと同様に取扱うことが可能な天井移動ロボットが実現可能である。
- (2) 永久磁石と定荷重バネを用いることにより大きな吸着力と外力緩和機能を実現可能である。
- (3) ガイド追従に適した牽引力を有するため、定位置に繰り返し位置決めする用途には有効である。
- (4) 永久磁石誘導型天井吸着法による上下ユニットの動的誘導誤差は速度30[mm/s]の移動時で1[mm]以下である。
- (5) 非ホロノミック性とホイール・天井面の滑りの影響により制御収束性が高くないがこれはガイド追従性能と二律背反するものとする。

⇒ 移動制御収束性を改善するために天井下部アクチュエーションユニット側にヨー軸の旋回自由度を一つ追加し、冗長自由度を利用する方法があるが、これは各アプリケーションで求められる性能（位置決め精度、時間）に応じて検討すべき事項である。

- (6) 二次元コードマトリクスによる自己位置推定手法は位置・姿勢とも非常に高い再現性を有する。

今後の課題として本ロボットプラットフォームを用いた作業ロボット群の開発およびそれらの応用に求められる安全、作業速度、移動領域サイズといった各種性能の作り込みが挙げられる。

## 参 考 文 献

- [1] J. Miura et al.: "Development of a personal service robot with user-friendly interfaces," Proceedings of International Conference on Field and Service Robotics, pp.293-298, 2003.
- [2] N.Y. Chong et al.: "A distributed knowledge network for real world robot applications," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.187-192, 2004.
- [3] 廣川潤子 他: "ユニヴァーサルデザイン・ウィズ・ロボットのコンセプト提案—生活支援ロボットの家庭内における作業事例の検討—", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.6, pp.476-484, 2008.
- [4] 山下淳, 浅間一, 新井民夫 他: "ロボットの移動機構に関する研究動向", 日本ロボット学会誌, vol.21, no.3, pp.282-292, 2003.
- [5] 村田機械株式会社: ロジスティクス&オートメーション, <http://www.muratec.jp/logistics/index.html>.
- [6] トヨタ L&F: 天井走行台車, <http://www.toyota-lf.com/product/roofcar.html>.
- [7] 株式会社キトー: キトークレーン, <http://www.kito.co.jp/products/cr/index.html>.
- [8] V. Scheinman: "Robotworld: A multiple robot vision guided assembly system," Proceedings of the 4th International Symposium on Robotics Research, 1987.
- [9] 染谷美枝, 杉本旭: "天井吊り下げ型自由移動装置の開発に関する研究—天井面移動機構の明かり取り天井面上の走行特性—", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.215-216, 1998.
- [10] 鶴清, 広瀬茂男: "全方向移動車両 Vmax の原理を利用した凹凸壁面対応型全方向移動ロボットの開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 1A1-D20, 2008.
- [11] 鶴清, 米田完: "磁気同期駆動型窓掃除ロボット", 日本ロボット学会誌, vol.25, no.5, pp.738-744, 2007.
- [12] J.C. Grieco et al.: "A six-legged climbing robot for high payloads," Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, pp.446-450, 1998.
- [13] 三宅徹, 石原秀則, 庄司龍, 吉田俊一: "吸着型窓清掃小型ロボットの開発—独立二輪駆動型壁面移動ロボットの姿勢制御—", 第11回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.146-153, 2006.
- [14] 浦上技術研究所: 尺取り移動式清掃ロボット, <http://www.urakami.co.jp/>.
- [15] S. Hirose et al.: "Machine that can walk and climb on floors, walls and ceilings," Proceedings of Fifth International Conference on Advanced Robotics, pp.753-758, 1991.
- [16] R. Lal Tummala et al.: "Climbing the walls [distributed robotics]," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol.9, no.4, pp.10-19, 2002.
- [17] 田口幹, 石崎篤: "粘着剤を用いた壁面移動マイクロロボットの開発", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.150-153, 1996.
- [18] M.P. Murphy et al.: "Waalbot: An agile small-scale wall climbing robot utilizing pressure sensitive adhesives," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3411-3416, 2006.
- [19] 塚越秀行, 千葉寛之, 北川能: "凹凸のある壁面・天井を移動するゲル粘着式移動探査機", 第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, AC3A2-02, 1998.
- [20] K. Inoue et al.: "Omni-directional gait of limb mechanism robot hanging from grid-like structure," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1732-1737, 2006.
- [21] S. Kim et al.: "SpinybotII: climbing hard walls with compliant microspines," Proceedings of 12th International Conference on

Advanced Robotics, pp.601-606, 2005.

- [22] 太田順 他：“記憶機能付き画像マークによる作業移動ロボットのための環境整備”，日本ロボット学会誌，vol.17, no.5, pp.670-676, 1999.
- [23] (株) エルフ：ELF/MAGIC, <http://www.elf.co.jp/product/elfmagic.html>.
- [24] 鶴清，広瀬茂男：“新しい密閉型 IB マグネットと磁気吸着全方向移動型ロボットの開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集，1P1-H05, 2002.

- [25] R. Fukui et al.: “Development of an intelligent container prototype for a logistical support robot system in living space,” Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3397-3402, 2007.
- [26] 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予稿集，pp.510-516, 2008.



福井 類 (Rui Fukui)

2004年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。2004～2006年三菱重工業株式会社勤務。2008年日本学術振興会特別研究員 DC2。2009年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。現在同研究科特任助教 (JST/CREST)。環境型ロボット (ロボティックルーム)，人みまもり用センサ，人装着型デバイス等の研究に従事。博士 (情報理工学)。日本機械学会，IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)



森下 広 (Hiroshi Morishita)

1991年東京大学大学院工学系研究科博士課程在学中に(有)エイチ・エム・アイ設立。1992年同博士課程単位取得退学後，電子顕微鏡用マニピュレータの開発に従事。2004～2006年東京大学21世紀COE「情報科学技術戦略コア」特任研究員。2007年東京大学IRT拠点産学官連携研究員。2008年同特任研究員。現在(有)エイチ・エム・アイにおいて人間行動センシングシステム，微小力測定装置等の研究開発に従事。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)



原田達也 (Tatsuya Harada)

1996年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2001年3月東京大学大学院工学系研究科機械工学博士課程修了。2000年1月から2001年12月まで日本学術振興会特別研究員。2006年4月東京大学大学院情報理工学系研究科講師，2009年4月同准教授となり現在に至る。博士 (工学)。IEEE，人工知能学会，情報処理学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)



森 武俊 (Taketoshi Mori)

1992年日本学術振興会特別研究員 DC1。1995年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年より東京大学先端科学技術研究センター助手。1998年同講師。2001～2002年米国MIT客員研究員。2002年東京大学大学院情報学環助教授。現在同情報理工学系研究科知能機械情報学専攻准教授。行動理解，動作認識，人間状態計測，コンテキストウェア支援，パーベイシブコンピューティング，ネットワークセンシング等の研究に従事。博士 (工学)。IEEE，ACM，日本機械学会，電子情報通信学会，計測自動制御学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)



佐藤知正 (Tomomasa Sato)

1971年東京大学産業機械工学科卒業。1976年同博士課程修了後，電子技術総合研究所入所。1991年東京大学先端科学技術研究センター教授に移籍。1998年東京大学工学系研究科機械情報工学専攻に移籍。2000年同大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻に改組。知能ロボットの研究に従事。工学博士。日本機械学会，IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)