

磁石誘導型天井移動ロボットプラットフォーム ～天井吸着用磁石モジュールと複数ロボットの位置計測方法～

Platform for Ceiling Mobile Robot Using Magnet Navigation

–Magnet Module to Attach to Ceiling and Multiple Robots Position Measurement Method–

福井 類 (東京大学)

森下 広 ((有)HMI)

原田 達也 (東京大学)

森 武俊 (東京大学)

佐藤 知正 (東京大学)

Rui FUKUI.*¹ Hiroshi MORISHITA.*² Tatsuya Harada.*¹ Taketoshi MORI.*¹ Tomomasa SATO.*¹

*1 The Univ. of Tokyo. 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo *2 HMI Corp.

This paper presents a Platform for Ceiling Mobile Robot that enables multiple robots to move smoothly in an intelligent environment. An advantage of this platform is possibility to reduce sharing space of humans and robots though the robots can access to humans when they need. For realizing the platform, there are two key techniques. The first one is Eternal Magnet Navigation Method for the robots attaching to ceiling plate, and the second is multi robots simultaneous position measurement method using matrix of 2 dimension barcodes. Validity of Eternal Magnet Navigation Method is confirmed by an experiment using a mock-up ceiling plate. Practicality of position estimation using matrix of two dimension barcodes is demonstrated by repeat experiment.

Key Words : Mobile Robot, Intelligent Environment, Human Symbiosis, Eternal Magnet, 2 Dimension Barcode

1 緒論

本研究では人間生活環境中で動作するロボットの実現という大きな目標のもと、その実現の上で課題となる空間共有の問題を取り上げる。つまりロボットが人間生活環境で動作するとき従来の人間生活を阻害しないように、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目的とする。これは長い間ロボット研究において、人間を含む移動障害物が存在する環境における経路探索・動作計画などが大きな研究のテーマとなっていることからその重要性が伺える。

この実現のために、本論文では人間が平常で使用しない空間として天井面に注目し、この天井面を複数のロボットが移動し必要に応じて天井から人間へアクセスし支援をするという方法を取る。天井面をロボットが移動し、なんらかの作業を行うという目的のもとで、さまざまな研究や商品が発表されている。福祉・運送の目的で使用されている介護用リフト¹⁾・荷物運搬用トrolleyは設置が比較的容易であり、移動のロバスト性が高いが、移動の自由度が低く、複数台の移動ロボットがある場合交差・追越しなどに特別な配慮が必要という問題がある。天井走行型クレーンは構造自体が荷重を支えるので大重量のものを運搬できるが、移動部が大きく、狭い空間の中では同時動作台数が限定されてしまう。電気部品組立用・ロボットアーム群 (Robot World)²⁾は複数台が精度高く移動できるが、天井への吸着に能動的な力が必要であり、また天井面に非常に特殊な加工が必要という欠点がある。天井吊り下げ型歩行支援機 (フローラ)³⁾は単純な機構で比較的大重量が運搬可能であるがやはり、天井の材料が鉄材に限定されてしまう欠点を持つ。

これらの手法はそれぞれ利点・欠点を持つが、室内環境で使用することを考えるとその大きさ、施工法および複数ロボットにおける動作自由度の問題から、満足いくものではない。そこで本論文では、「室内生活環境中の天井面において、複数台のロボットが自由度高く動作できるプラットフォームを作ること」を目標とした。この実現のためには2つのキーとなる技術が必要である。一つがロボットを天井に吸着する方法であり、もう一つが複数台のロボットの位置を同時計測する手法である。ここにおける吸着とは広い意味でロボットが「天井面に支持される」ことを示してい

る。本論文ではまず天井吸着方法として採用した永久磁石の対による天井吸着誘導法およびその手法のための磁石モジュールの開発について述べる。次に複数台のロボットの移動制御のために環境のインテリジェント化という発想を踏まえた、2次元バーコードマトリクスを利用した同時位置計測手法に関して述べる。

本論文の構成は次の通りである。2章では本研究が目的とするプラットフォームの概要とそのキー技術の実現方法について述べる。3章では永久磁石誘導型吸着法の実装について述べ、実際に作成した磁石モジュールについてその性能を示す。4章では2次元バーコードマトリクスを利用したロボットの位置計測手法の実装について述べる。5章ではキー技術を用いたプラットフォームの実装について述べる。6章では作成したプラットフォームの基本性能について簡単な実験を行いその結果を示し、7章で本研究を通して得られた結論をまとめる。

2 天井移動ロボットプラットフォーム

本章では最初に本研究が目指すプラットフォームのコンセプトを示す。そして目標とするプラットフォームを実現するために重要な2つのキーとなる技術について考察し、その実現方法を述べる。

2.1 プラットフォームのコンセプト 前節のような問題を踏まえ、本研究が目指すプラットフォームのコンセプトを図1に示す。このコンセプトスケッチは天井面をさまざまな動作目的を持ったロボットが共存・移動し、また必要時には天井下面よりアクチュエータを伸ばすことで、人間への支援を行うということを示している。本プラットフォームのポイントをまとめると次の二つになる。

- 特殊な天井材料ではなくともロボットが天井面で支えられ、移動できること。
- 複数台のロボットが同時にプラットフォーム上で動作することができること。

2.2 本プラットフォームのキーテクニック プラットフォームの2つのポイントを実現するためには、それぞれキーテクニックとなるものが必要となる。特殊な材料ではない天井をロボットに移動させるためには「天井吸着方法」が重

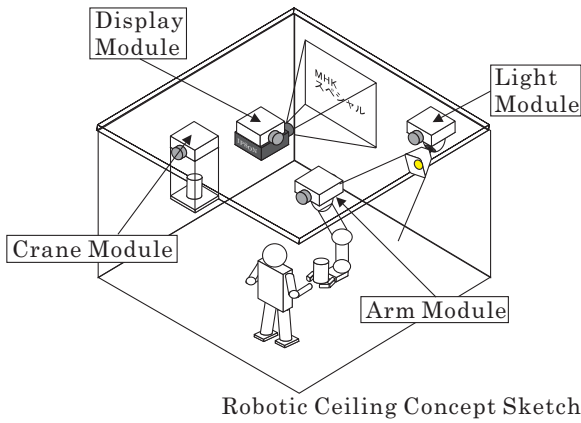


Fig. 1: プラットフォームのコンセプトスケッチ

要となり、複数台のロボットが同一の環境にいて動作するためには「複数ロボットの同時位置制御」が重要となる。この章ではこの二つのキーテクニックについて実装を踏まえて述べる。

2.2.1 天井吸着方法 まず今回のプラットフォームの天井吸着方法の条件を以下にまとめる。

1. ロボットが天井を移動するのに実装面・安全面から十分な吸着力を出せること
2. ロボットが2次元的に制限されることなく動作可能なこと
3. 天井材料として鉄材など特別なものでなく、またその天井の加工・施工も比較的容易であること。
4. 吸着に能動的なエネルギーを必要としないこと。つまり(電力等の)エネルギーの供給がなくても吸着を持続できること

以上の4条件を満たすものとして「永久磁石誘導型吸着法」を検討した。図2にその概要を示す。この方法は非常に単

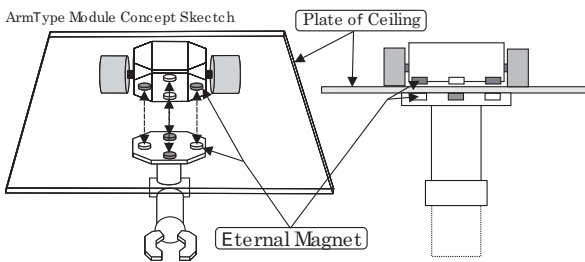


Fig. 2: 永久磁石誘導型吸着法のスケッチ

純な仕組みで、天井面を挟んで2つの永久磁石を対向させ、上側の磁石が移動すると磁路を保持しようと下の磁石が誘導されるというものである。実際には対向する2つの磁石の位置がずれると、磁路が天井面に対して傾くため水平方向の力が発生し、下の磁石が誘導されるという現象を利用している。この方式による天井移動ロボットの実現性を確認するために図3,4に示すようなモックアップを作成した。このモックアップは上部ユニットに移動用の2つのモータおよびタイヤを持ち、下部ユニットにはアクチュエータを模擬し、アクチュエータが吸着状態に及ぼす影響を調べるためにサーボモータが1つ実装されている。図5にモックアップで使用した磁気回路の寸法等を示すが、この時点では磁気回路のシミュレートなどは行っていないので、このヨークは途

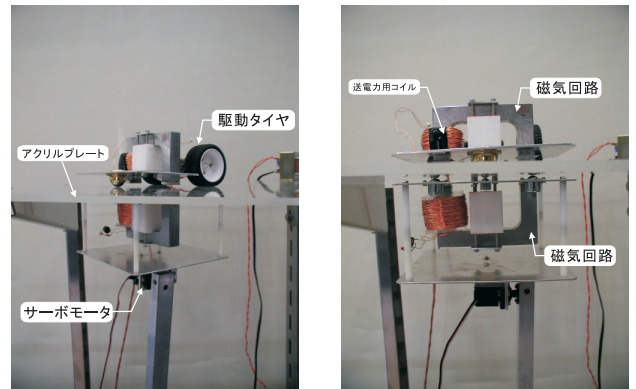


Fig. 3: 作成したモックアップの外観 Fig. 4: モックアップの磁気回路部

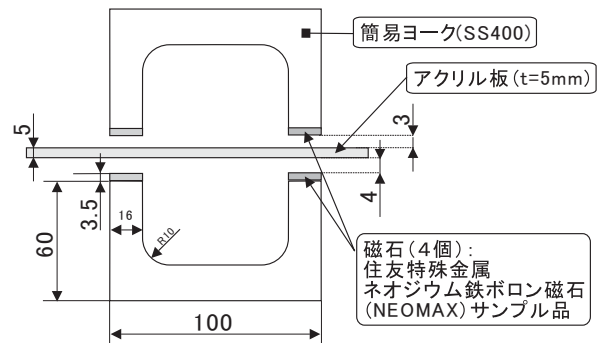


Fig. 5: モックアップで使用した磁石およびヨーク

中で磁力漏れによりヨーク内を通過する磁力線のループが形成されておらず、ほとんど効果がないことが作成の後判明している。磁気回路の構成には問題があるものの、このモックアップの作成により永久磁石誘導型吸着法によって、ロボットを天井面を移動させ、下面においてアクチュエータさせることが可能なことが明らかになった。

2.2.2 複数ロボットの同時位置制御 複数の移動ロボットの位置を同時に計測するためには大きく分けて次の二つの手法が考えられる。その二つの分類およびそれぞれの利点・欠点をまとめる。

- 1つのマスタとなる計測器 + コンピュータが全てのロボットの位置を探し出し計測する。
【利点】マスタとなる計測器 + コンピュータに位置の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楽になり、台数の増加時にはコストの面で有利になることが期待できる。
【欠点】ロボットはマスタの探索範囲に常にいることが求められ、行動範囲が限定されてしまう。
- 各ロボットがセンサを実装し自分の位置を自主的に手に入れる。
【利点】各ロボットが自主的に動作するので、マスタとなる優秀なコンピュータが必要なくまたそのため行動範囲の拡張も容易である。
【欠点】各ロボットのタスクが増え、台数が増えると実装時のコストが上がってしまう。

今回は各ロボットが比較的自由に動作できることを期待し後者の方法を採用することとした。また後者の方法において問題となるのが、各ロボットが如何に正確に自分の位置を取得するかというところである。単体のロボットに実装で

きる位置計測方法でどれだけの精度が出せるかということである。ランドマークとなる画像をカメラで入手し、それを元にロボットの位置を取得するという手法がさまざまな研究で実装されているが、今回は知的環境という観点から、その手法をさらに発展させて、ロボットの移動領域全体にランドマークとなるマーカを埋め込むことを考えた。このとき本来利点として挙げられている「行動範囲の拡張性の容易さ」を妨げるものであってはならない。そこで本研究では安価なマーカとして2次元バーコードを採用した。この2次元バーコードに位置の情報を書き込んだものを移動領域全体に書き込むことで、移動ロボットが自主的に位置を取得できる環境を用意するのである。採用したコードおよび読み取り方法などについては後の4章で詳細を述べる。

3 永久磁石誘導型吸着法の本実装

本章では、モックアップにより実現の可能性が確認できた「永久磁石誘導型吸着法」を実際のロボットに適用するために必要な磁気回路の設計・シミュレーションおよび吸着力測定について述べる。以降この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の考察について述べ、その後実際に設計・作成・計測を行った磁石モジュールについて述べる。

3.1 必要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求められる。

- 実装および安全上十分な吸着力を持つ。
必要な吸着力というのは天井下面でどのような機能や機構をもったユニットを動作させるかによって異なる。人間とのインタラクションを持つことになるユニットの場合、当然安全面での制限が厳しくなる。
- 必要に応じて吸着力を減少させることができる。
永久磁石を用いている関係上、この機能がないと永久に天井面から外すことができなくなりメンテナンスが行えなくなってしまう。また強力な吸着力を持っ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比較的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「ELF/MAGIC」というソフトを使用した。後者の実現のために、磁石の個数や磁気回路構成を考えて、以下のような4つの方法を検討した。

1. 磁気回路ループ・非ループ切替型
2. 着脱力内部保持型
3. 吸着力減少型
4. 吸着・減磁切替型

まず磁気回路ループ・非ループ切替型は図6に示すように一般にマグネットチャックに使用されている方法である。その利点は比較的簡単な機構で完全に吸着力を無くすることができることであるが、一方でヨークの加工が複雑であり、瞬間的に吸着力を減らすことはできない。

次に、着脱力内部保持型は鶴氏が開発した手法⁴⁾で、図

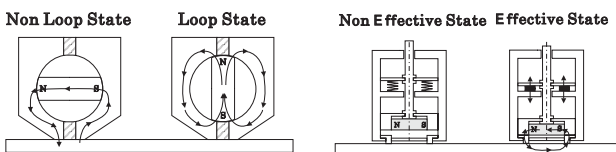


Fig. 6: 磁気回路ループ・非ループ切替型の模式図

Fig. 7: 着脱力内部保持型の模式図

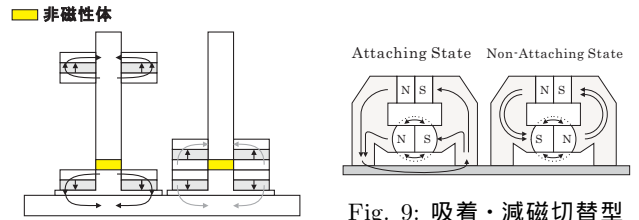


Fig. 8: 吸着力減少型

7に示すように吸着した状態で次に脱着するための力をモジュール内部に蓄えるというものである。この利点は切替のレスポンスの良さであるが、吸着力をなくした状態を保持することが難しいという問題がある。

3つめの吸着力減少型は図8に示すように2つの磁石を用い、1つは吸着用そしてもう1つを吸着力の減少用に用いるというものである。その利点は機構が非常に簡単であることだが、磁石1つを吸着力減少のためだけに用いるという欠点がある。

そして最後の吸着・減磁切替型は図9に示すような、「磁気回路ループ・非ループ切替型」と「吸着力減少型」をあわせたような方法で、その利点は減磁用のループがそのまま吸着用の磁路として使えることである。しかしやはり複数個の磁石が必要ということでそのコストは無視できない。

以上のような方法を検討した結果、今回は一番シンプルな「磁気回路ループ・非ループ切替型」を採用することにした。

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した。

3.2 磁石モジュールの設計・実装・性能評価 磁石モジュールは2つのステップに分けて実装が進めた。最初のステップはシミュレーションの正確さなどの基本事項を確認する1号機、そして次のステップが実際にロボットに組み込むことを念頭においた2号機である。以降でそれぞれのステップについて詳細を述べる。

3.2.1 磁石モジュール1号機・1号機改 磁石モジュールの1号機は基本機能の確認および使用した基本シミュレーションソフトの誤差の見積りを行うために製作した。磁石モ

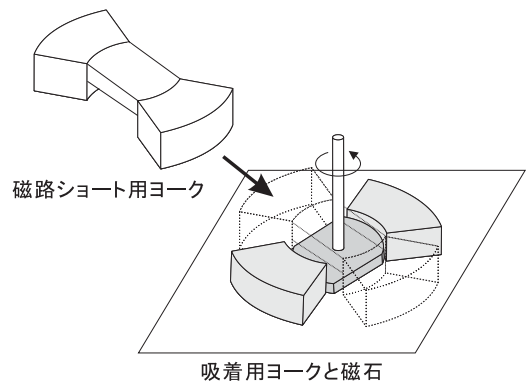


Fig. 10: 磁石モジュール1号機の簡易パース図

ジュール1号機で使用した磁石は住友特殊金属(株)製の希土類磁石「NEOMAX-44H」である。また吸着および減磁の切替は図10に示すように、磁石を90度ずつ回転させて、誘導用ヨークまたは磁路ショート用ヨークと対向させることによって、吸着・脱着を切り替える機構となっている。製作した磁石モジュール1号機を図11に示す。この磁石モジュールは同じもの2つを天井面をはさんで対向させて使用することを想定している。また磁石の回転には比較的大きな力

が必要となることが予想されたので回転軸にウォーム・ギアによる減速機を組み込んだ。しかしこの磁石モジュール1

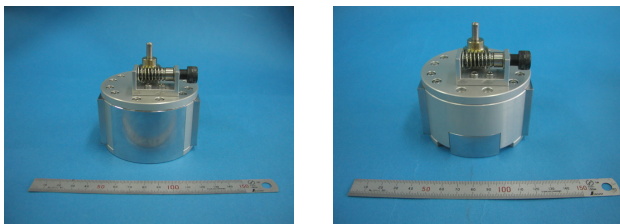


Fig. 11: 磁石モジュール1号 Fig. 12: 磁石モジュール1号機改の外観

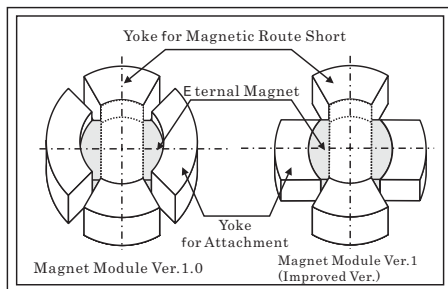


Fig. 13: 1号機から1号機改への変更点

号機はシミュレーションを磁石および吸着ヨークのみで設計を行ったためわずかな吸着力(10mmの間隔で2kgf程度)しか得ることができなかった。そこで新たに吸着用ヨークを設計しなおし、図12に示す磁石モジュール1号機改を作成した。この二つのモジュールのヨーク形状の差異を図13に示す。磁石モジュール1号機がほとんど吸着力を示さなかったのは誘導用ヨークが必要以上に大きく高く作られたため、誘導用ヨークの上端で磁場がショート用ヨーク側へと漏れていたためである。1号機改では誘導用ヨークの背を低くしたので漏れが少なくなった。この1号機改を図14の示すような測定スタンドの上に取り付け、内蔵されたロードセルに加わる力をモニターすることで磁石の吸着力を測定した。なおスタンドを垂直に立てて使用しているのは直進支持用に用いているリニアプッシュの摩擦をなくするためである。図15にその結果を示す。このグラフよりシミュレータの誤差は30%程度であることが分かった。この30%という値は、一般的な永久磁石の磁気回路がサブミリオーダの空隙で使用される中、今回の使用法では数mm以上のギャップを想定しているのが妥当な値と思われる。

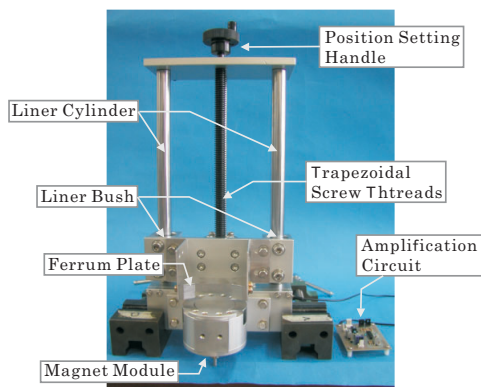


Fig. 14: 磁石モジュールの吸着力を測定するスタンド(この写真は磁石モジュールと金属片を対向させて吸着力を測定している様子である。)

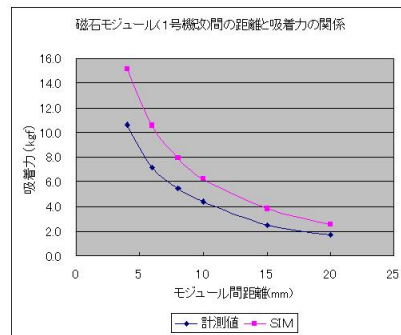


Fig. 15: 磁石モジュール1号機改のシミュレーション結果および実測値の比較

3.2.2 磁石モジュール2号機 磁石モジュール1号機および1号機改の作成により、基本機能の確認およびシミュレーションソフトの誤差の見積りができたので、実際に移動ロボットへの実装を考えた2号機の作成へと移行した。まず1号機の段階では曖昧だった吸着力の仕様および機能を表1のように設定した。なおこの要求仕様は実際にロボッ

Table 1: 磁石モジュール2号機の要求仕様・機能

吸着力	10(mm)のモジュール間ギャップにおいて7.5(kgf)
吸着&脱着	3段階の切替式
付加機能	天井面と一定の間隔を保持する。 天井面との摩擦を小さくする。

トを作成する上での重さの割り振りを考慮しながら行った。図16に磁石モジュール2号機のパース図を図17,18に実際に作成した磁石モジュール2号機の外観を示す。2号機で使用した磁石は信越化学工業(株)のネオジウム系マグネット”N45H”である。1号機で使用した磁石とほぼ同じスペックであるが、2号機は量産化を考慮位置合わせ用の溝を磁石側に加工することを考えたため、加工技術の点から信越化学工業に磁石の作成を依頼した。2号機では基本的な吸着・脱着用の構造は1号機と同じまま天井面と摩擦を減らしつつ一定の距離を保つボールキャストが内蔵され、また1号機ではウォーム・ギアで軸を回転させていたが、2号機では3段階のみの切替えを実装すればよいので、一般的なレンチを上から押し付けながら回すと軸を回転させることができる構造とした。2号機に関しても1号機と同様に吸着力

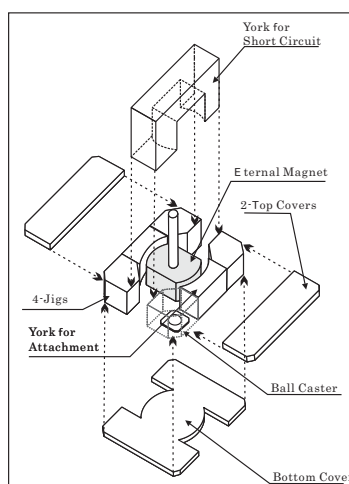


Fig. 16: 磁石モジュール2号機のパース図

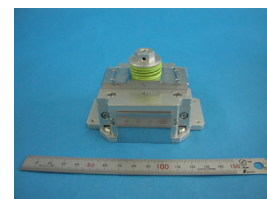


Fig. 17: 磁石モジュール2号機の外観(正面)

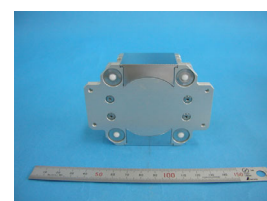


Fig. 18: 磁石モジュール2号機下面ボールキャスト

の測定を行った。その結果を図19に掲載する。シミュレー

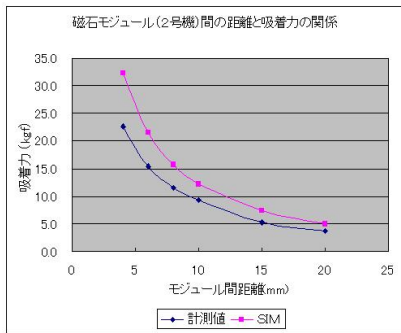


Fig. 19: 磁石モジュール2号機のシミュレーション結果および実測値の比較

シミュレーションと実測値との差は1号機の時とほぼ同じ30%程度であり、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。

4 複数ロボットの同時位置制御の実装

2.2.2節で述べたように、今回の天井ロボットでは環境側に位置情報を2次元バーコードによってマーカとして記述し、それぞれのマーカを各ロボットが読み取ることによって位置制御を行うこととした。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 2次元バーコードと情報の読み込み “ロボットの位置の検出”という用途を考えた場合、本来はその目的に最適なマーカを探し出す必要があるのだが今回は時間の都合上、既に規格化されている2次元バーコードを利用した。今回採用したコードは(株)デンソーウェーブが開発・規格化した「QRコード」である。このコードを採用した理由は読み取り速度が高速であり、またその読み取りの手法がロボットの位置を検出する手法との相性が良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3つのシンボルを用い、まず読み取るべきコードの位置を決定する。このコードの位置の検出方法がロボットの位置推定にそのまま利用できるのである。コードの読み取りには(株)デンソーウェーブ製のFA用2次元コードリーダの“QD20”のファームウェアを改造したものを使用した。具体的に

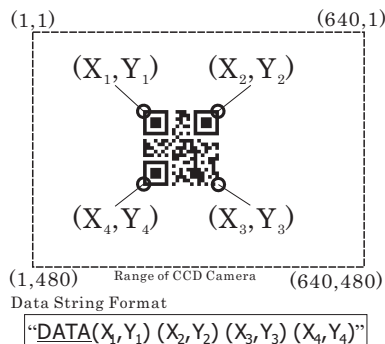


Fig. 20: コードリーダより送られるデータのフォーマット

は図20のようにコードリーダは読み取ったコード内のデータにCCD内のコードの位置を4つの角の座標という形で付加して送ってくるようになっている。このコードデータおよびコードの位置データからロボットの位置・方向を計算するのである。

4.2 2次元バーコードマトリクス 今回用意したコードマトリクスには各コードに“X0007Y0023”のように、原点

Table 2: 2次元バーコードマトリクスに使用したコードのスペック

QRコードモデル	モデル2
誤り訂正レベル	M
バージョン	1
セルサイズ	8 Pixels
コードサイズ	7.112mm 四方

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が含まれている。使用したQRコードのスペックを表2に掲載する。1枚のシートを実装の都合上500mm×500mmとし、その中に10mm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ることによって、ロボットの位置推定を可能にするのだが、ロボットは跨いだシートの枚数をカウントして自分が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 本節ではコード情報からの位置推定計算方法について述べる。まず最初に位置の推定について述べ、その次に角度の推定について述べる。

4.3.1 位置推定 推定位置はX座標の場合、式1(Yについても同様の計算)によって計算される。単位は全て“mm”である。

$$X_{position} = (SheetSize \times XSheetOffset) + (CodePitch \times XCodeData) + ((CodeSize \times XPosition_{CCD}) / CodeSize_{CCD}) \quad (1)$$

ここでSheetSizeとは2次元バーコードを印刷したシートの大きさ500mm、XSheetOffsetは今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2次元コードの間隔で10mm、XcodeData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7.112mm、Xposition_{CCD}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る。

つまり、まずどのシートにいるかを考慮し、次にどのコードを読み取っているかを調べ、最後にそのコードがカメラのどの位置に写っているかを考えることによって現在の自分の位置を計算している。

4.3.2 角度推定 推定角度は次の手順で計算される。

1. コードの向きによる場合分け
2. コードの各辺の傾きを求める
3. 4辺の傾きより、コードの向きの平均値を求める

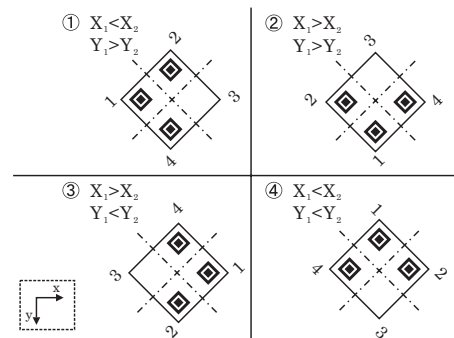


Fig. 21: 2次元コードの向きによる場合分け

まずコードはその向きによって図21のように4つの場合に分けられる。それぞれは角1および角2の座標の関係によ

て分類される。次に式 2 によって各辺の傾きを求める。

$$k_{ij} = \frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i}, \{i, j = (1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 1)\} \quad (2)$$

ここで i, j はコード角の番号である。そして k_{12}, k_{34}, k_{23} の逆数, k_{41} の逆数の平均値を求める (この値を k_{ave} とする) この値よりロボットの角度方向は式 3 のように求められる。

$$\theta = \arctan(k_{ave}) + \theta_{Offset}, \theta_{Offset} = 0(1, 2), \pi(3), -\pi(4) \quad (3)$$

5 システムの設計・実装

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のハードウェア構成および実験用の仮設模擬天井について解説する。

5.1 ハードウェアの構成 本プラットフォームは、(1) 天井上で 2 次元的に動作する移動ユニット、(2) 天井下面でアクチュエータを支えるアクチュエーションユニット共通部、(3) 以上 2 つを天井板をはさんで連結する吸着ユニット (磁石モジュール群) から構成される。以降で (1), (2) のユニットについて詳細を述べる。

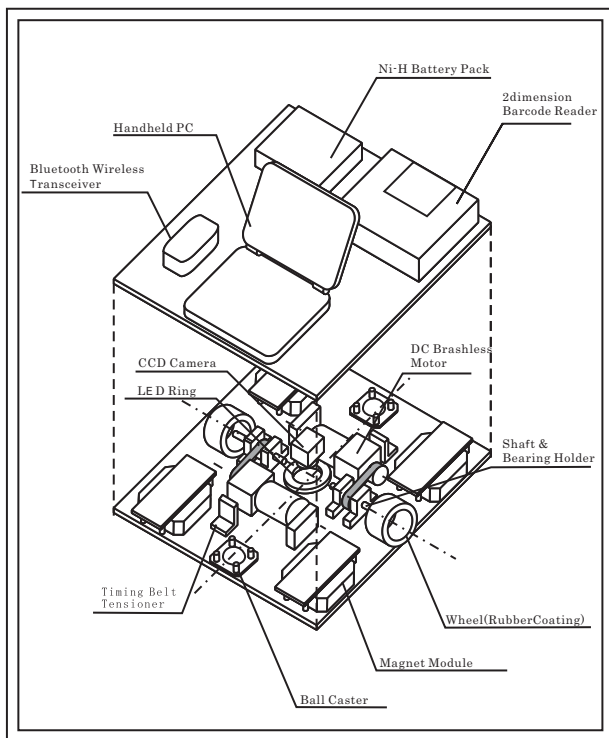


Fig. 22: 移動ユニットのパース図

5.1.1 移動ユニット 移動ユニットは図 22 に示すように 2 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、2 次元コードを読み取るためのカメラ・照明およびコードリーダー制御ボックス、ネットワーク越しで動作命令を受け取りモータ等をコントロールする PC、電源ボックスが搭載されている。移動ユニット側の吸着ユニットはボールキャスタで天井上表面に設置しており、本体とは図 23 のようにリニアブッシュで結合されている。これにより吸着ユニットは移動ユニットの傾き等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。

5.1.2 アクチュエーションユニット共通部 アクチュエーションユニット共通部は図 24 のように 4 つの吸着ユニットにぶら下がる構造になっており、下側に実際に動作するさま

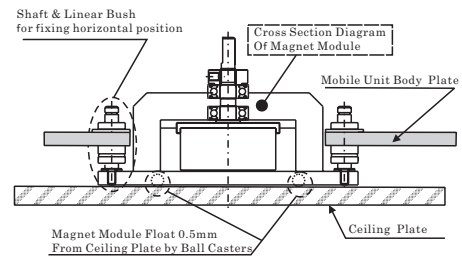


Fig. 23: 移動ユニットへの吸着ユニットの取り付け

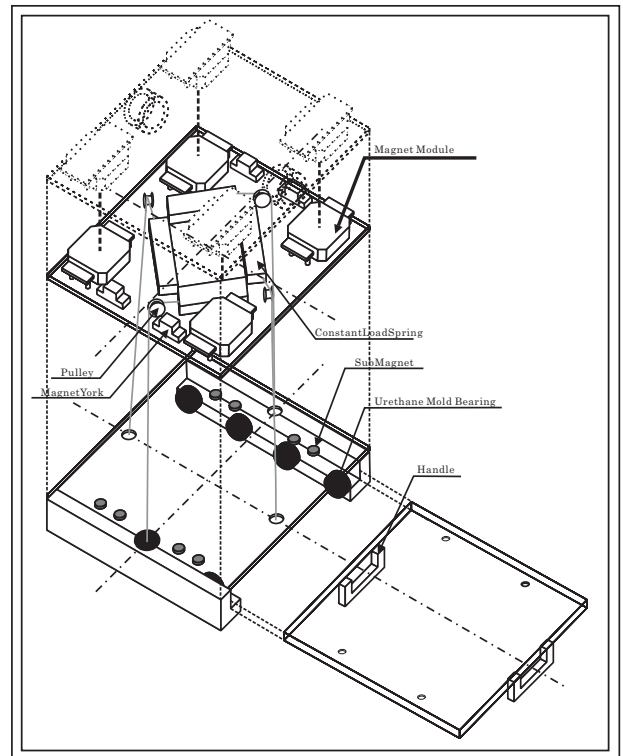


Fig. 24: アクチュエーションユニット共通部のパース図

ざまなアクチュエータと連結できるようにスライダ機構を有する。天井下面にぶら下がるため、吸着ユニットへの過負荷を防止するために定荷重バネ (コンストン (R)) による吊り下げ機構を有しておりスライダ側に大きな力が加わった場合、定荷重バネに巻きつけられたワイヤが自動的に伸びてユニットごと下降することによって吸着ユニットへの負荷を一定以下に保つようになっている。また使用したコンストンはその引張力の合計が下部に取り付けるユニットの全重量を支えられる力に満たないため、それを補うために永久磁石を設置してある。また吸着ユニットの 3 つは完全に固定されているが、1 つはバネを用いて、上下に動くようになっており、これにより 3 つの吸着ユニットで決まる平面に残りの 1 つが位置を合わせる構造になっている。

5.2 仮設天井 今回の移動ユニットおよびアクチュエーションユニット共通部の動作を確認するために、図 25 のような仮設模擬天井を用意した。この天井は 1000mm×1000mm で厚さ 6mm の強化ガラスの上に 2 次元バーコードマトリクスを白色インクで印刷した透明シートならべ、さらにその上にシート保護用に 3mm 厚のポリカーボネート板を重ねたものである。なお今回の天井面を透明な素材で作成したのには、(1) 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られた場合にも照明設備をそのまま利用できる、というような二つの

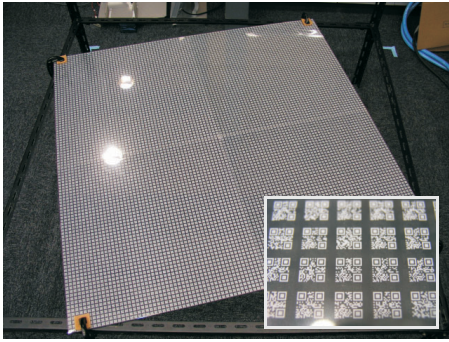


Fig. 25: 仮設天井の様子 (右下: 印字された2次元バーコード)

理由がある。また強化ガラスの安全性に関しては、仮設天井設置の前に強化ガラスを4点自由端支持し、板の中心に60kgほどの重りを載せてみたところ10mm程度のタワミを示したものの亀裂等の問題はなく、大きな衝撃力を加えない限りは安全であることを確認してある。

6 実験

以上のようにして作成された天井移動ロボットプラットフォームの動作確認実験を行った。まず今回実装した天井吸着手法に関して、それぞれの耐荷重の計測および定荷重パネの過負荷防止動作の確認を行った。次の実験では移動ユニットを適宜移動させ、アクチュエーションユニットの追従性能を確認した。3つめの実験では移動ロボットの自己位置計測の性能評価を行った。以降で実験の詳細を述べる。

6.1 天井吸着手法の評価実験 今回作成した天井上側の移動ユニットの重量は10(kg) また実際にぶら下がるアクチュエーションユニット共通部側の重量は8.2(kg)であった。このアクチュエーションユニット共通部の他に22.8(kg)の負荷を直接吸着ユニット側に与えたときに天井からの落下が起こったので、全体としての吸着力は31(kg)であり、これは各磁石モジュールの吸着力の総和40(kg)より2~3割ほど小さいことになる。この原因は今回の測定がアクチュエーションユニットの両端を下方に引っ張ることによって行われたため、一部の磁石モジュールにはねじれの力が加わり、これが測定された吸着力の低下に繋がったと思われる。しかし吸着力約30(kg)という値は今後下部に取り付けるアクチュエーションユニットの応用性を考えても十分な値と思われる。また過負荷防止のためのコンストンであるが下部にコンストンの引張力と補助マグネットの吸着力以上の力(衝撃力)が加わったときにはコンストン以下の部分が下降して、吸着ユニットに過負荷を与えないことが確認された。

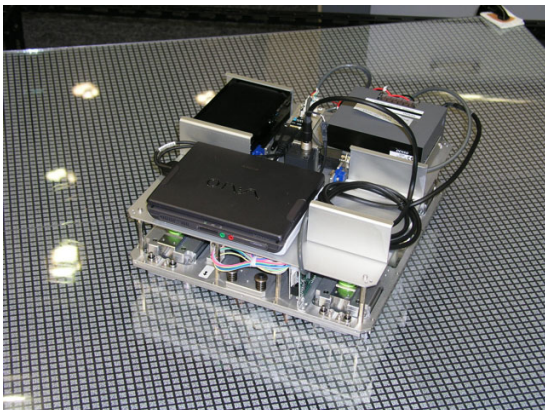


Fig. 26: 実験の様子 (移動ユニット)

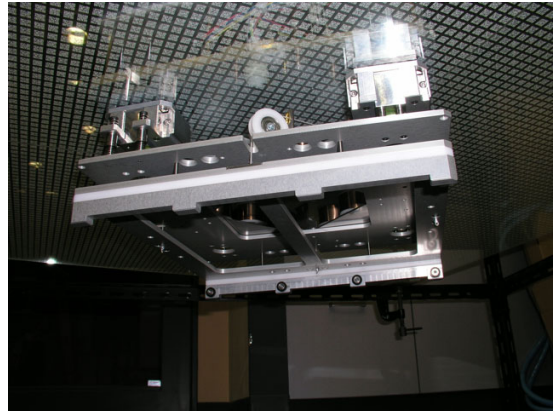


Fig. 27: 実験の様子 (アクチュエーションユニット共通部)

6.2 天井移動ロボットの簡易追従性能実験 本実験では、天井上面の移動ユニットの移動に対して、天井下面のアクチュエーションユニット共通部がどれだけの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。実際に仮設天井面を移動ユニットを走行させ、アクチュエーションユニットを追従させてみたところわずかにスティックスリップ現象を示すものの、静的な状態での位置のずれはほとんどなく、静的な誤差として確認されたのは磁石モジュールの位置決めによるものだけであり、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、現状での測定は困難であるので将来の課題とする。

そこでスティックスリップ現象による動的追従誤差を計測する実験を行った。

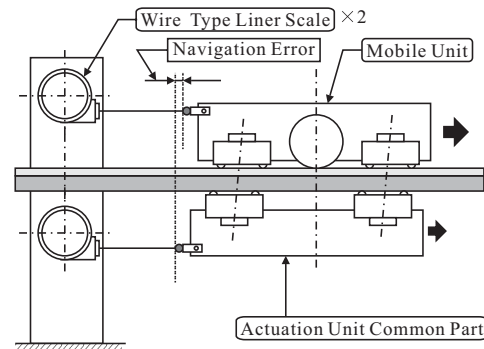


Fig. 28: スティックスリップ現象による追従誤差計測実験のセットアップ

実験は図28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パルス数をカウントすることによって行った。使用したリニアスケールはMicrotech Laboratory製”MLS 30-4500-1000”で、測定ストローク1,000mm、最小分解能0.02mmのものである。また2系統のパルスカウントは秋月製のH8-3052ボードを用いて行った。サンプリングレートは100Hzである。

図29,30に実験の結果を示す。グラフを見ると移動ユニットの速度が15(mm/sec),30(mm/sec)の時も両方とも動的な誤差が最大1mm程度でありこれは移動の様子から推測される誤差の範囲内であった。

6.3 移動ロボットの位置計測実験 本実験では移動ロボットをランダムに動作・停止させ、停止した位置での2次元コードデータからの位置・角度のばらつきを調べ、本手法のロバスト性を評価する。実験の結果はX方向、Y方向

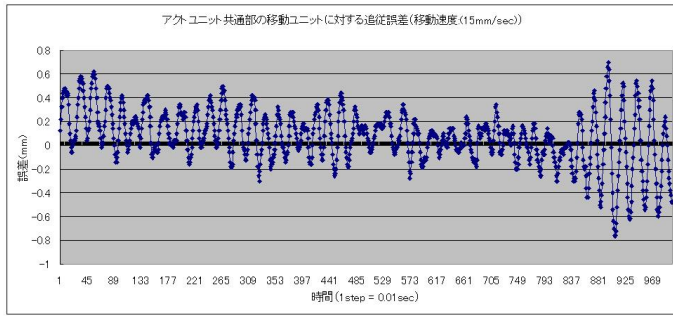


Fig. 29: 移動ユニット動作時のアクチュエーションユニット共通部の追従誤差 (移動速度 15mm/sec)

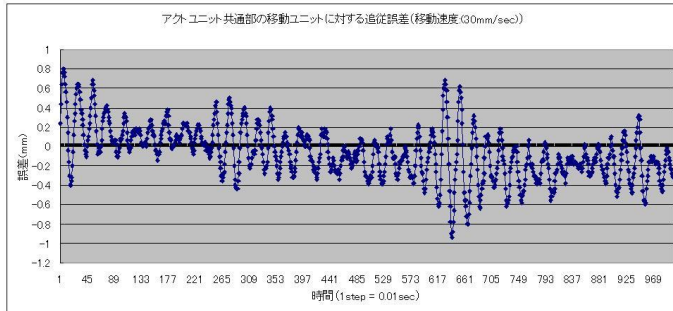


Fig. 30: 移動ユニット動作時のアクチュエーションユニット共通部の追従誤差 (移動速度 30mm/sec)

の標準偏差がそれぞれ 0.011(mm), 0.035(mm)、角度の標準偏差が 0.11(度)であった。CCDの解像度の都合上、潜在的には 0.055(mm)の誤差が含まれているので、この実験結果は妥当であることが分かる。この実験により、本手法を用いることで比較的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。

7 結論

本論文では磁石誘導型天井移動ロボットプラットフォームを提案、実装しその有効性について述べた。本研究では人間生活環境中で動作するロボットが従来人間生活を阻害しないように、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目的と設定した。これを実現するために、人間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天井から人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を用いた「永久磁石誘導法」を提案し、また複数台が同時に動作するために必要な複数移動ロボットの同時位置計測に関しては「2次元コードマトリクス」を用いた位置計測手法を提案した。実験により「永久磁石誘導法」が生活環境内の天井で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が複数台のロボットの位置を同時に取得するために有効であることを示した。将来課題としては、実際に人にアクセスし支援を行うアクチュエーションユニットを作成し、支援方法まで含めた上でプラットフォームの有効性を確認する必要がある。また、永久磁石誘導法の性能評価として、動的な追従性能を確認することも課題として上げられる。

8 謝辞

(株)デンソーウェーブには2次元バーコードリーダの改造においてご協力をいただき、住友特殊金属および信越化学工業には永久磁石の作成にご協力いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 八木昭彦他「天井走行型ロボットアームによる高齢者の在宅自立生活における工学的支援に関する研究」第41回日本エム・イー学会大会抄録・論文集 p191
- 2) Victor Scheinman. "ROBOTWORLD: A Multiple Robot Vision Guided Assembly System" In *Proceedings of the 4th International Symposium on Robotics Research, 1987.*
- 3) 染谷美枝他「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 p215-216
- 4) 鶴清他「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 '02 講演論文集 1P1-H05