

Development of a Planar Induction Motor and its Application Systems

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2015-10-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 熊谷, 正朗, 加茂, 雅人, 堀川, みなみ, 八巻, 昌宏 メールアドレス: 所属:
URL	https://tohoku-gakuin.repo.nii.ac.jp/records/432

平面誘導モータの開発と応用機器の試作

Development of a Planar Induction Motor and its Application Systems

正 熊谷正朗 加茂雅人 堀川みなみ 八巻昌宏 (東北学院大学)

KUMAGAI Masaaki, KAMO Masato, HORIKAWA Minami, YAMAKI Masahiro,
Tohoku Gakuin University, Tagajo, Miyagi

This paper reports a planar induction motor that can output 70N translational thrust and 9Nm torque with a response time of 10ms and three practical systems using the motor. This motor consists of three linear induction armatures with vector control drivers. The motor is used with a position and orientation sensing system employing three optical mouse sensors. Distribution of the force commands and implementation are discussed. To confirm usefulness of the motor, three applications were developed; a planar inverted pendulum, a mobile base with a laser range finder reacting to human motion, and a carriage acceleration system built in floor. Experimental results indicate potential of the planar motor and ideas to use it.

Key Words : Induction motor, Planar motor, Inverted pendulum, Carriage transport

1 はじめに

多数の移動ロボットが開発されてきたが、面上(床面等)で移動するロボットの多くは車輪やクローラなどを用い、摩擦によって推進を行う⁽¹⁾。そのため、車輪等と接触面の摩擦力を超える推進や旋回を行うことができず、加速や登坂力に限界がある。この解消のため、摩擦係数を向上させる工夫や、磁力や吸気による吸着力で垂直抗力を増加させて摩擦力の増大を図る手法等が用いられる。

摩擦による制約の解消のため、直接的な推力を発生させる手法も用いられる。リニアモータはその一つで、たとえば鉄輪では摩擦推進の制約が厳しい鉄道において、リニアモータで直接推進することで登坂力を向上した地下鉄などがある。ただし、リニアモータは直線運動の1自由度であり、平面上を移動するロボットの3自由度を実現するには不足する。そこで、熊谷らは、3個のリニア誘導モータ(以下LIMとする)電機子と3個の光学式マウスのセンサを組み合わせ、平面上で3自由度運動が可能な平面誘導モータ(PIM)を開発した⁽²⁾。

平面モータの開発はこれまでも様々な研究事例がある。これらの多くは回転式のモータの原理を元にしており、たとえば、Lauwersらはステッピングモータの原理を応用した精密位置決めが可能な平面モータを開発した⁽³⁾。また、様々な種類の平面モータの研究は文献⁽⁴⁾にまとめられている。

平面モータには、誘導モータの原理を応用したものもある。LIMは電機子とリアクションプレート(以下、単にプレートとする)を用いた構造の単純なモータであり、前述の地下鉄でも用いられている。このLIMを3個以上使うことで、移動と旋回の3自由度の平面モータを構成できる。Dittrichらはこの原理に基づき、4個のLIMを組み合わせたPIMを開発した⁽⁵⁾。位置の閉ループ制御に関する記述はあるが、応答性などは不明であった。Fujiiらは一体型の円形のPIMを開発した⁽⁶⁾。LIMの組み合わせより効率が良いとされるが、機構配置的な観点からは制約がある。

そこで、応答性、動特性も含めた、PIMの開発と検証を行った。さらに、実際に応用機器を開発することで、PIMの実用性の検証を行うこととした。本論文では、PIM本体の概要と、平面移動体と台車搬送システムの試作について報告する。

2 平面誘導モータ

平面誘導モータの詳細は文献⁽²⁾(ICRA2012で発表予定)で述べており、ここでは、概要を述べる。

本研究で開発したPIMは3個のLIM用の電機子によって3自由度、すなわち並進2自由度と旋回1自由度の駆動を行う。また、リニア電機子の制御には速度計測が必要であり、

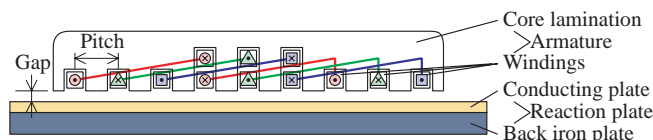


Fig. 1: A model of linear induction motor.

位置制御などにも有用であるため、マウスセンサを用いた平面の運動計測⁽⁷⁾を併用している。

2.1 リニア誘導電機子とその制御

本研究では、リニアモータの原理に三相誘導式を用いた。交流リニアモータには大別して同期式と誘導式がある。前者は電機子と対向して永久磁石を規則的に配列し、電機子と永久磁石の吸引によって動作し、推力は相対的に大きい。後者は図1に示すように、電機子と対向して、鉄板と銅板(アルミ板)を重ねたプレートを用い、電機子で生成した交流磁界によって生じる銅板内の渦電流と磁界の相互作用によって推力が生じる。構造が単純で低コストであるが、相対的に推力は小さく効率も悪い。今回は、並進2自由度、旋回1自由度を同時に可能とすることが目的であるため、異方性のある同期式ではなく、均質素材による誘導式を用いた。

LIMの制御にはベクトル制御を用いる。文献⁽⁸⁾で述べた原理から、制御に関わる主要な式を引用する。

$$f \propto i_0(t) i_q(t) \quad (1)$$

$$i_d(t) = i_0(t) + \frac{L}{R} \frac{d}{dt} i_0(t)$$

$$I_0(s) = \frac{1}{1 + (L/R)s} I_d(s) \quad (2)$$

$$i_q(t) = \frac{L}{R} i_0(t) \omega_c \quad (3)$$

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (4)$$

ここに、 f は電機子-プレート間で得られる推力、 $i_0(t)$ (ラプラス変換後 $I_0(s)$)は磁化電流、 i は三相交流電流の振幅であり、これを誘導された磁極とともに回転する直交座標系(dq)について分離したものが i_d と i_q である。 ω_c はこの座標系の回転角速度である。 L, R はプレートの抵抗、インダクタンスを表すパラメータであり、直接の測定はできないが、実験的にその比を求めることができる。これらの式に基づいた制御がベクトル制御である。まず、 i_d を一定に保つことで i_0 を一定とすることができる。その結果、式(3)によって計算される角速度によりdq座標系を回転させ、 i から i_d と i_q を求める。この制御下で式(1)により、推力 f と i_q が比例するため、

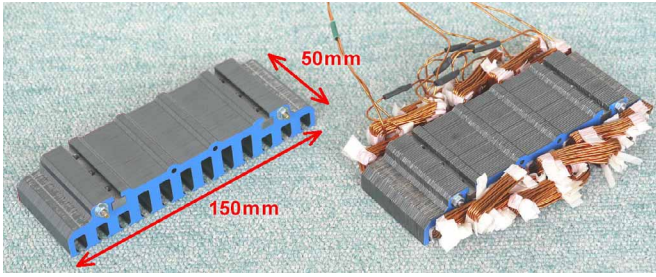


Fig. 2: LIM armature unit.

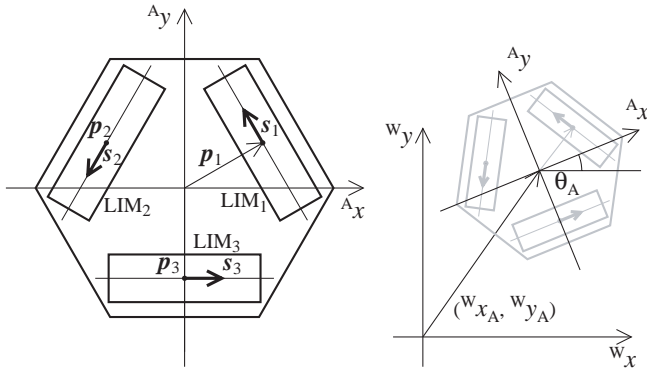


Fig. 3: Arrangement of LIMs on a PIM and coordinate frames.

i_q を指令値とする (直流モータの電機子電流に相当). 推力は i_0 でも操作できるが, i_0 は i_d 経由の操作となるため i_q に比べて遅くなる.

本研究で試作した電機子を図2に示す. これは三相交流用3極で, 12本のスロットに9本のコイルを巻き, 接続したものである. コアは厚さ 0.50[mm] の電磁鋼板を積層して厚さ 50[mm] とした. この電機子について式 (1) の関係が成立し, 最大で 70 [N] の推力が得られることを確認した.

2.2 平面誘導モータとその制御

3個のLIM電機子により, 平面モータPIMを構成する.

図3にLIM電機子の配置を示す. 電機子の配置は, 以下の演算で独立性があれば任意であるが, 実機では単純に正三角形のフレーム上に対称に配置した. LIM(番号 $i = 1, 2, 3$) の位置ベクトルを $p_i = (p_{xi}, p_{yi})$, その推力の正方向を示す単位ベクトルを $s_i = (s_{xi}, s_{yi})$, $|s_i| = 1$ とする. ここで二つの座標系を定義する. 一つはワールド座標系 W でプレート (床) に固定する. 一方, 座標系 A はPIM(移動体) に固定する. A の原点 (PIM 中心) を $(^W x_A, ^W y_A)$ とおき, その姿勢角を θ_A とする. この $(^W x_A, ^W y_A)$, θ_A とその速度は後述のマウスセンサによって計測する. また, PIMの構造設計によって $^A p_i$ と $^A s_i$ が定まる.

まず, LIMの位置姿勢を座標系 W に変換する.

$$\begin{pmatrix} ^W p_{xi} \\ ^W p_{yi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_A & -\sin \theta_A \\ \sin \theta_A & \cos \theta_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ^A p_{xi} \\ ^A p_{yi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} ^W x_A \\ ^W y_A \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} ^W s_{xi} \\ ^W s_{yi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_A & -\sin \theta_A \\ \sin \theta_A & \cos \theta_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ^A s_{xi} \\ ^A s_{yi} \end{pmatrix} \quad (6)$$

また, LIMの位置における対地速度は

$$\begin{pmatrix} ^W v_{xi} \\ ^W v_{yi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ^W x_A \\ ^W y_A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -(^W p_{yi} - ^W y_A) \\ ^W p_{xi} - ^W x_A \end{pmatrix} \dot{\theta}_A \quad (7)$$

にて得られ, LIMの推力方向 s_i の成分は内積

$$v_{si} = (^W v_{xi}, ^W v_{yi}) \cdot (^W s_{xi}, ^W s_{yi}) \quad (8)$$

で得られる. これはベクトル制御に必要な, 電機子とプレートの相対速度のフィードフォワードに用いる.

つぎに, PIMの W 座標系における推力 $(^W f_x, ^W f_y)$, 旋回トルク (T) 指令から, 個々のLIMの推力指令値 f_i を求める. 以下はすべて座標系 W で演算し, 添え字 W を省略する.

LIM 推力 f_i とPIM全体の出力 f_x, f_y, T の関係は以下のよう近似できる.

$$f_x = \sum_{i=1}^3 f_i s_{xi}, \quad f_y = \sum_{i=1}^3 f_i s_{yi} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^3 \{(p_{xi} - x_A)(f_i s_{yi}) - (p_{yi} - y_A)(f_i s_{xi})\} \\ &= \sum_{i=1}^3 \{(p_{xi} - x_A)s_{yi} - (p_{yi} - y_A)s_{xi}\} f_i \end{aligned} \quad (10)$$

式 (10) はトルクの定義 $(r \times f)_z$ から導出した ($r = (p_{xi} - x_A, p_{yi} - y_A, 0)$, $f = (f_i s_{xi}, f_i s_{yi}, 0)$).

この関係式は行列で表すことができる.

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{x1} & s_{x2} & s_{x3} \\ s_{y1} & s_{y2} & s_{y3} \\ t_1 & t_2 & t_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} = C(f_1, f_2, f_3)^T \quad (11)$$

$$t_i = (p_{xi} - x_A)s_{yi} - (p_{yi} - y_A)s_{xi}$$

この変換行列 C が逆行列を持つなら,

$$(f_1, f_2, f_3)^T = C^{-1}(f_x, f_y, T)^T \quad (12)$$

によって, LIM 推力 (f_1, f_2, f_3) をPIM指令値 (f_x, f_y, T) から得ることができる.

なお, 厳密にはLIMの推力は中央一点で出力されるのではなく, 電機子の面全体の分布の積分値であるが, このように一点で近似して問題ないことは実験的に確認している. また, 今回は3個の電機子で自由度に過不足無いが, 4個以上を用いる場合は疑似逆行列のような手法を用いる必要がある. ただし, 全ての電機子の総消費電力を低減することが重要な一方で, 推力が低いときは励磁周波数が下がり, 推力のリプルも目立つ. そのため低出力時には, 使用する電機子数をあえて最低限にしたほうが制御性がよいと考えられる.

2.3 運動計測

装置の制御, およびベクトル制御に必要な運動計測のために, 光学式マウスのセンサを用いた. 同センサは画像を用いた直交2方向への変位センサであり, 一定の周期で読み取ることで速度センサとなる. この計測値3個 (1センサからは2個得られる) を変換し, 並進速度と旋回角速度を得る⁽⁷⁾. 以下の応用例では3個および6個のセンサを用いた.

2.4 プロトタイプの評価実験

以上の原理をもとに, 図4に示すPIMを試作した. 正三角形のフレームに3個のLIM電機子, 3個のマウスセンサ, 3個のボールキャストと, マウスセンサの制御回路のみ搭載し, LIMの制御回路, 電源装置 (50[V], 20[A]) や主な制御を行うPC(Windows XP, 7) は外置きした. このPIMでは, 並進推力 70[N], 旋回トルク 9[Nm] を実現した⁽²⁾.

使用した1個の電機子の推力測定結果の一例を図5に示す. これはステップ応答を示し, 1.6[s] までは i_d を固定し i_q を変化, 以降は i_q を固定し i_d を変化させたが, 前述の通り, i_q を変化させた方が良かったことが分かる.

PIMの位置制御 (PID) を行い, そのステップ応答を検証した実験の一例を図6に示す. 実験では 4[s] 周期で, 角度を ± 0.4 [rad] 振幅の正弦波で変化させつつ, 位置指令を ± 20 [mm] のステップで与えた. 多少の振動が見られるが, 3自由度の位置制御に問題ないことが確認できる.

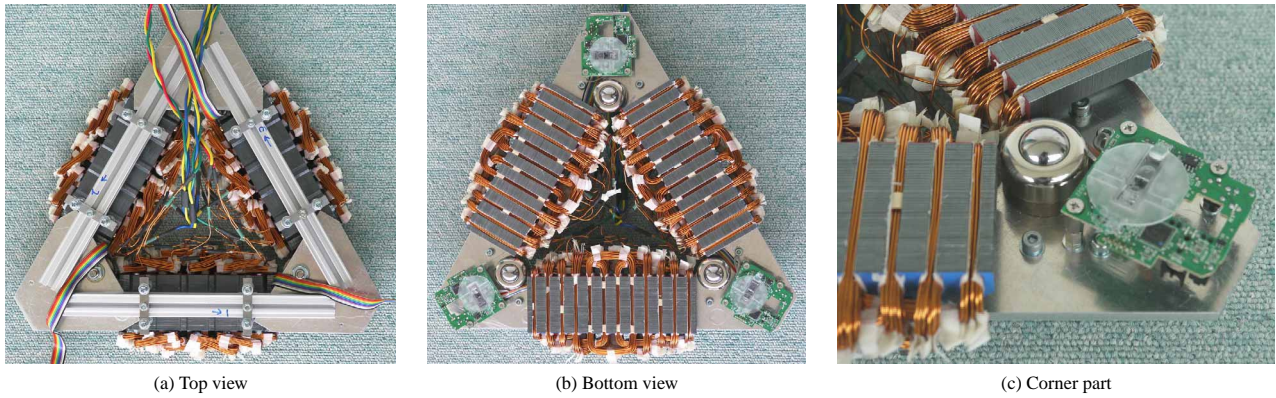


Fig. 4: Developed planar induction motor.

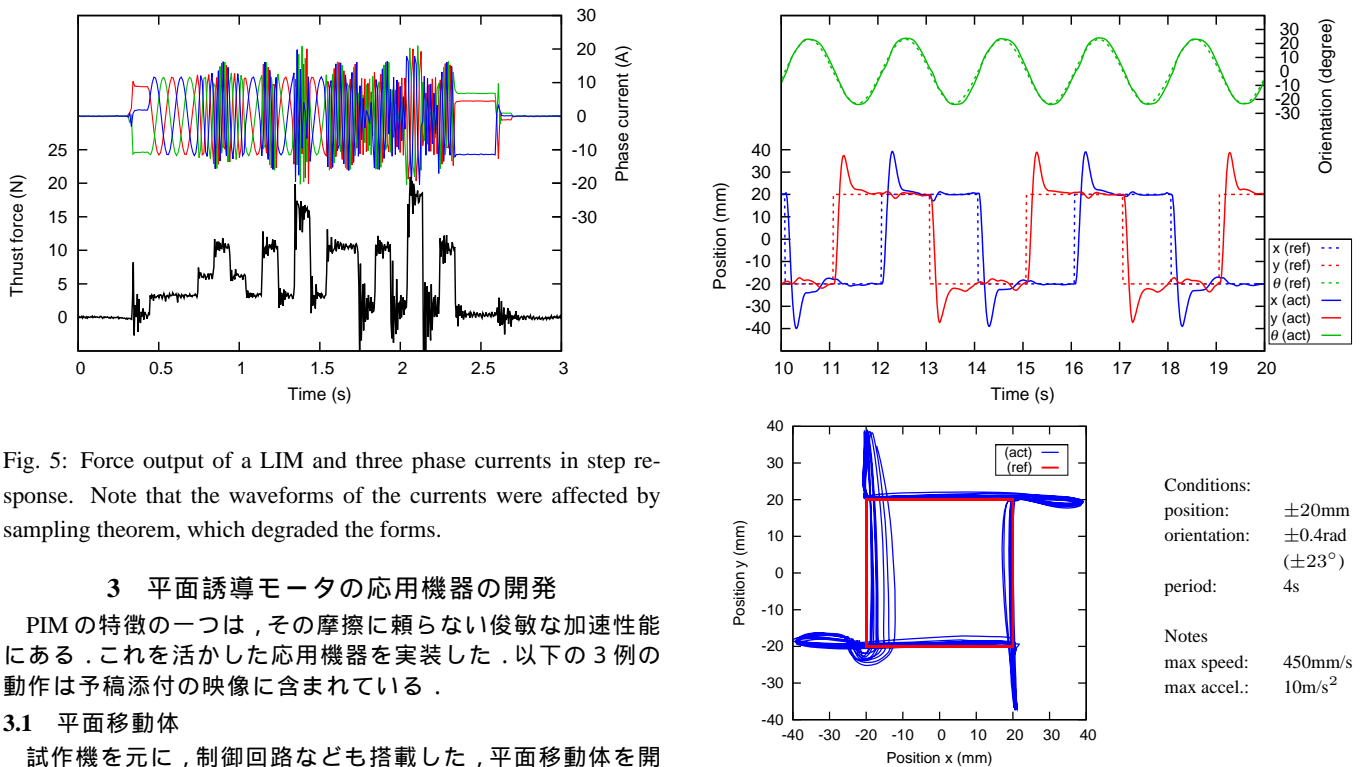


Fig. 5: Force output of a LIM and three phase currents in step response. Note that the waveforms of the currents were affected by sampling theorem, which degraded the forms.

3 平面誘導モータの応用機器の開発

PIMの特徴の一つは、その摩擦に頼らない俊敏な加速性能にある。これを活かした応用機器を実装した。以下の3例の動作は予稿添付の映像に含まれている。

3.1 平面移動体

試作機を元に、制御回路なども搭載した、平面移動体を開発した。図7(a)に示すように電機子を固定した正三角形のフレームと、それを取り囲み、電機子制御回路類を搭載した2枚の円形プレートで構成されている。フレーム周辺は試作機と同様である。この移動体に外部から50[V]の電源を供給し、USBで接続したWindowsPC上のプログラムによって制御を行った。図には含まれていないが、本移動体は床面に重ね置いた鉄板(3.2[mm]厚)と銅板(1.5[mm]厚)の上で運動する。

この移動体を2台製作し、1台には倒立振り子(図7(b))を、もう1台にはレーザーレンジファインダ(LRF,北陽URG-04LX)を搭載した(同(c))。倒立振り子は、根本がクロスジョイントになっており、内部に置いた2自由度のポテンショメータによってその角度を検出する。一般的な倒立振り子制御である、姿勢角度($\theta_{x(y)}$)と移動部の位置($x(y)$)のそれぞれに対するPDフィードバック

$$f_{x,cmd} = K_A \theta_x + K_{AV} \dot{\theta}_x + K_X x + K_V \dot{x} \quad (13)$$

を直交2軸方向に行った(K は実験的に求めたゲイン)。また移動体の旋回角は目標値ゼロでPID制御した。実験により、倒立振り子制御が可能であることを確認した。

LRFを搭載したもう一台は、近くを動く人間との相対的な位置関係を制御する実験を目的として開発した。人間の近く

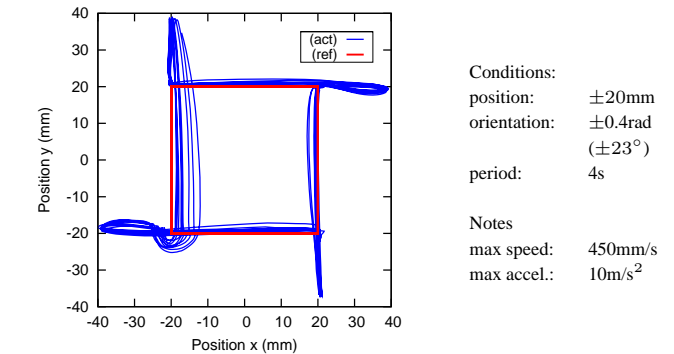


Fig. 6: Time responses and geometrical plots. 'ref' and 'act' mean reference value and measured actual value. Maximum speed and acceleration are typical values measured from the data.

で動くロボットには、突発的な人間の動きを避けるだけの俊敏性が重要と考えられるが、車輪移動の場合は摩擦係数で加速が制限される。PIMでは摩擦の制限を受けない他、床面への磁力による吸着力もあるため、急激な運動での転倒への耐性も高いと考えられる。LRFのスキャンデータから最も近接した点を抽出して、対象とした上で、(1)対象の方向を向く(2)対象との距離を一定に保つ制御を試した。移動体には位置制御を施し、位置指令値を与える形とした。LRFのスキャン速度が10[Hz]と低速であったため滑らかさに欠けたが、応答の速さは確認できた。

いずれも、平面アクチュエータの機能検証には有用であったが、プレートの範囲内でしか移動できないという制限があるため、実用面には課題が多い。

3.2 物流用台車加速装置

一般に物流搬送では、コンベア類(動力付き・重力による等)が、能動的に移動する装置(搬送ロボット等)による運搬が主

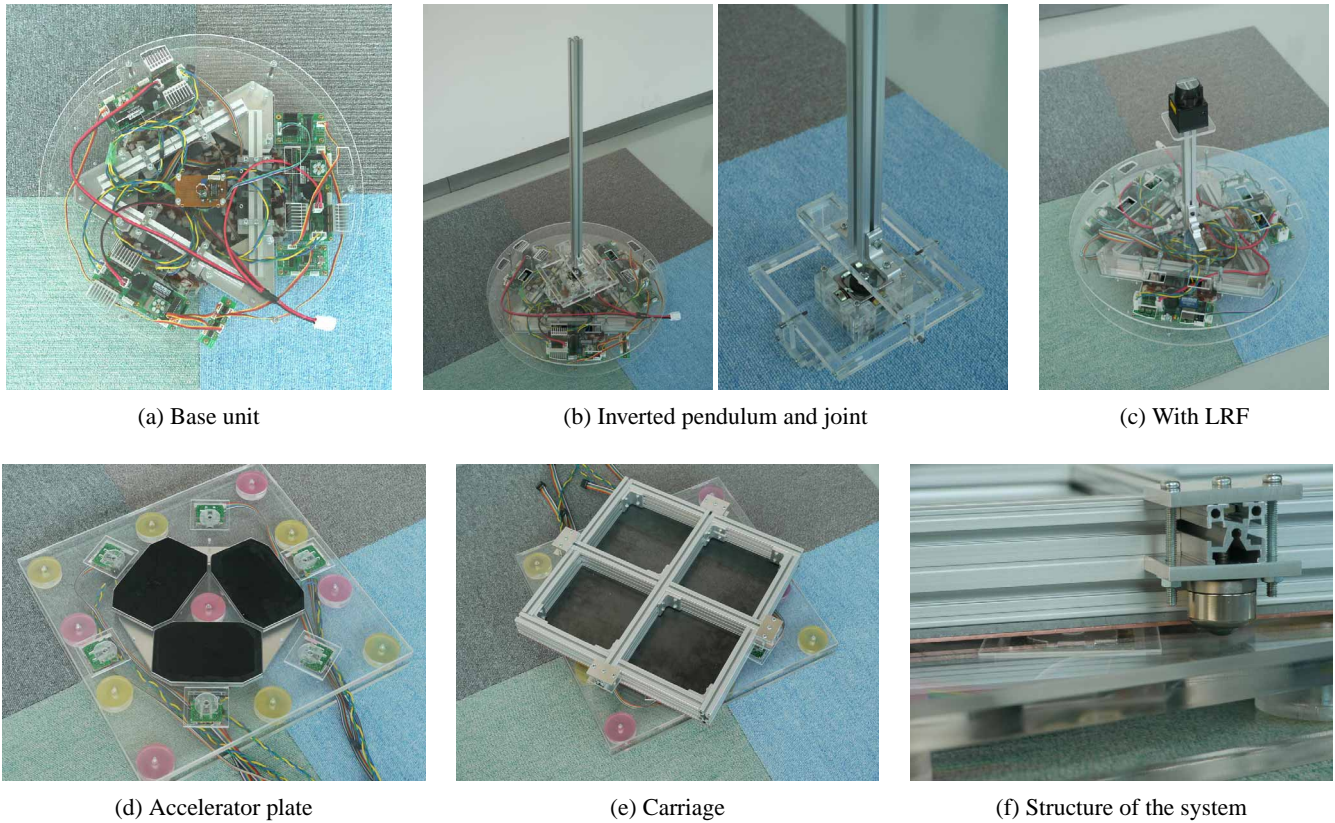


Fig. 7: Applications of the planar induction motor.

流である．一方で，ある程度広い場所での人間による作業では，動力なしの台車に荷物を乗せて勢いを付けて送り出すという手段がある．つまり方位を制御した短距離での加速で，目的地近辺に送り届ける手法である．これを機械的に行うためには，任意の方向に適切に送り出す機構が必要となり，既存の方法では構造的，コスト的に見合わないと思定される．一方，本PIMを用いれば，これが可能になると考えた．

試作した装置を図7(d)(e)(f)に示す．(d)はPIMを中心とした加速装置本体で，床面に埋めて用いる．中央部に樹脂(黒)で固めて平滑にしたPIM，その周囲に6個のマウスセンサを取り付けた．(e)はキャスト付きの台車である．(f)に示すように，キャストで支持したフレーム下部に鉄板と銅板を固定した．PIMによりこの板部に推進力が発生し，台車を送り出す事ができる．前述の移動体と大きく異なる点は，移動体はプレートから外れることを想定していない(十分な広さを用意する)が，対して本装置では台車と共にプレートが移動して対面関係が無くなる．そのため，マウスセンサ6個を外周に配置し，少なくとも3個は加速終了までその運動を計測できるようにした(無効なセンサは演算から排除)．また，センサの反応によって台車の到来や大まかな位置が推定できる．

試作機で行った実験により，(1)台車単体で1[m/s]までの任意の方向への加速(約5[m/s²]) (2)目標ゼロの速度制御による，走行中の台車のキャッチ (3)10[kg]の物体を載せての動作確認等を行った．ただし，現状で台車の相対的な運動は計測できるが，絶対的な位置姿勢を計測するセンサは用いておらず，キャッチのタイミング調整や再加速前の位置の調整などはできない．今後，台車のID検出などもかねて装置にカメラを埋め込むなどの改良が必須である．また，送出後の軌道や姿勢の修正はできないため，実用上は受け側もしくは経路に工夫が必要である．

4 おわりに

本研究では平面誘導モータの開発と，それを応用した機器の試作について報告した．この平面誘導モータは，リア誘導モータの電機子を3個用いて3自由度の推力，旋回トルクを出力する．最大で70[N]，9[Nm]を10[ms]の応答時間で出力できる．

また，このモータが実践的な用途に適用できるか，アクチュエータとして制御に組み込むことができるかを検証するために，3種類の応用機器を試作し，実験で検証した．各々の完成度は低いが，モータの適用性とコンセプトは確認できた．

本研究の一部は科研費(11022515)の助成を受けたものである．また装置の開発にあたっては，東北学院大学機械工場に多大なる協力を頂いた．ここに謝意を表す．

文献

- (1) 日本ロボット学会編，“新版ロボット工学ハンドブック”，pp375-，2005
- (2) M.Kumagai, R.L.Hollis, “Development and Control of a Three DOF Planar Induction Motor,” *Proc. ICRA 2012*, 2012 (発表予定)
- (3) T.B. Lauwers, Z.K. Edmondson, R.L. Hollis, “Free-Roaming Planar Motors: Toward Autonomous Precision Planar Mobile Robots,” *ICRA 2004*, pp. 4498-4503
- (4) J. Pan, N.C. Cheung, J. Yang, “Structure and characteristics of closed-loop two-dimensional surface motors – a literature survey”, *proc. Power Electronics and Drive Systems 2003*, 2003, pp.236-241
- (5) P. Dittrich, D. Radeck, “3-DOF Planar Induction Motor”, *proc. Electro/Information Technology 2006*, 2006, pp.81-86
- (6) N. Fujii, M. Fujitake, “Two-dimensional drive characteristics by circular-shaped motor”, *IEEE trans. Industrial Application*, vol.35, no.4, 2002, pp.803-809
- (7) M.Kumagai, R.L.Hollis, “Development of a Three-Dimensional Ball Rotation Sensing System using Optical Mouse Sensors,” *Proc. ICRA 2011*, pp.5038-5043, 2011
- (8) 熊谷正明, “誘導リアモータとベクトル制御駆動回路の試作”, *SICE 東北支部研究集会資料*, 資料番号 262-9, 2010