

2P1-D08

セッション名: アクチュエータの
機構と制御(3)

コアタイム: 29日 14:45~15:30

○ 熊谷正朗 (東北学院大学, **RDE Lab.**)
Masaaki Kumagai (Tohoku Gakuin Univ.)

加茂雅人 堀川みなみ 八巻昌宏
(東北学院大学卒)



背景

○ 原点: 球体車輪移動ロボット

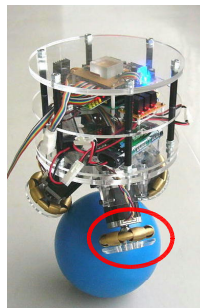
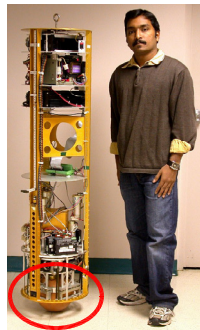
- ・ ballbot (米Carnegie Mellon, RI)
- ・ BallIP (玉乗り型, 東北学院大)

○ 最終目標: 球面誘導モータ

- ・ 球を直接回せるモータの開発.
- ・ 関連する予備開発としての, 同じ3自由度の平面誘導モータ.

○ 要求される仕様

- ・ 実用的な推力(少なくとも50N).
- ・ 制御に耐えうる線形性と応答性.



平面誘導モータの開発と

応用機器の試作

Development of Planar Induction Motor and its Application Systems

概要

・ **ロボットへの適用を想定した 3自由度 平面誘導モータ**

3 DOF Planar Induction Motor for Robotic applications

・ **平面誘導モータによる移動体、倒立振り子、加速床**

Mobile robot, Inverted pendulum, Accelerating floor

総括

○ **リニア誘導モータ(LIM)の組み合わせによる構成**

- ・ 3自由度=3個以上のLIM, 推力/旋回トルク→個々の指令値.
- ・ LIM電機子のベクトル制御による出力の直線性と応答性.
- ・ 公称最大出力: **推力70N トルク9Nm**

○ **マウスセンサによる計測** (→Robomec11)

- ・ 自己位置推定, LIM制御に必要な速度成分の計測.
- ・ PIM本体の位置制御.

○ **有効性検証のための応用事例開発**

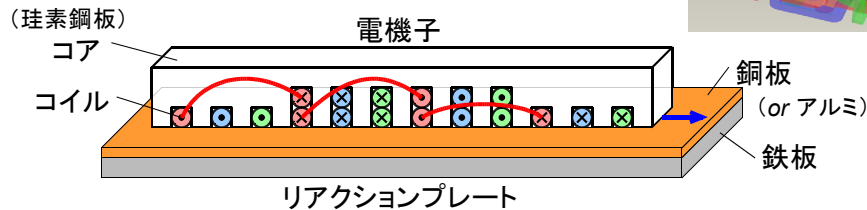
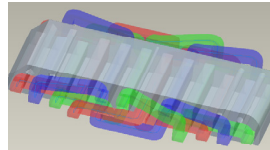
- ・ 平面移動体の開発と, レーザレンジファインダによる追従動作.
- ・ 2自由度倒立振り子の制御実験.
- ・ 台車を任意の方向に加速できる床面推進プレートの試作.

リニア誘導モータの構成と制御

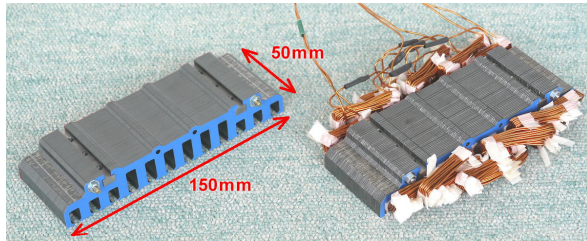
原理の概略

○ リニア電機子とリアクションプレート

- ・三相誘導モータの原理にもとづくリニアモータ。誘導電流と相互作用。
- ・電機子はコアに3セットのコイルを巻いたもの。
- ・リアクションプレートは鉄板(磁気回路を構成する)と銅板(誘導電流が生じる＝推力が生じる)の2層。



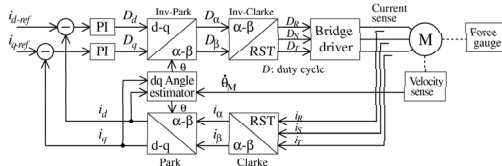
電機子の実装



- ・12スロット 9コイル(3x3)
- ・1コイルあたり25巻き
- ・公称出力 40[N]
- ※電流設定により約2倍可
- ・△結線
- ・内製 (コア, 巻線, 組立)

制 御

○ ベクトル制御ドライバを開発



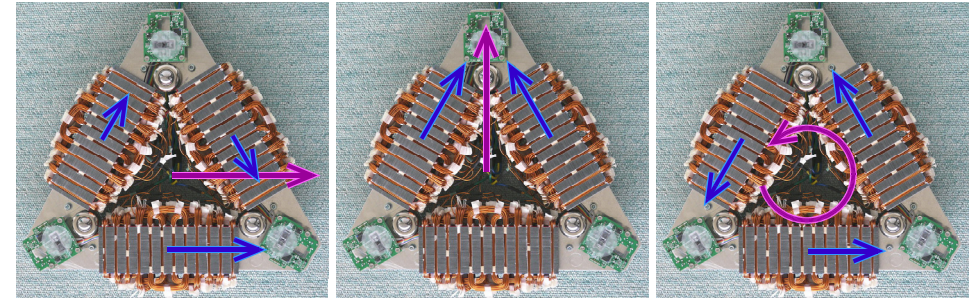
- ・ベクトル制御:
交流モータの制御に用いられる、交流モータを直流モータのモデルで扱えるようにする制御手法。
- ・二つの電流指令値:
id: 励磁を決める指令値
iq: 推力(トルク)を決める指令値
推力は $id \times iq$ に比例する。
- ・仕様:
電圧 50[V], 電流 30[A]/相
制御周期 10[kHz] dsPIC33使用

平面誘導モータの構成と制御

制御の原理

○ 3本のリニア電機子の推力の合成による、全体推力と旋回トルク

- ・各電機子で青矢印の推力を発生させると紫矢印の合力。
- ・目的とする全体の推力と旋回トルクから、各電機子の推力を求める問題。



○ 定式化

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

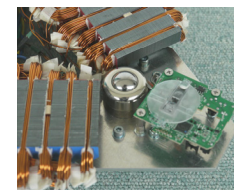
$$t_i = (p_{xi} - x_A)s_{yi} - (p_{yi} - y_A)s_{xi}$$

s_i 推力発生方向単位ベクトル
 f_i 推力指令値
 p_i 電機子位置, (x_A, y_A) 中心位置

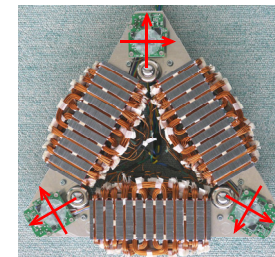
- ・行列Cは設計パラメータ(電機子位置, 方向)と, 全体の姿勢角度で決まる。
- ・特殊な配置でなければ正則。
- ・電機子が4個以上なら疑似逆行列等。

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} = C^{-1} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ T \end{pmatrix}$$

実 装



センサ周辺



センサ計測軸

- ・直 径 360 [mm]
- ・質 量 4.8 [kg]
- ・最大推力 70 [N] (実績)
- ・最大トルク 9 [Nm] (実績)
- ・最大加速度 12 [m/s²] (実績)
- ・最大速度 1 [m/s] (センサ)

性能評価データ

ロボット用アクチュエータとして使えるか？

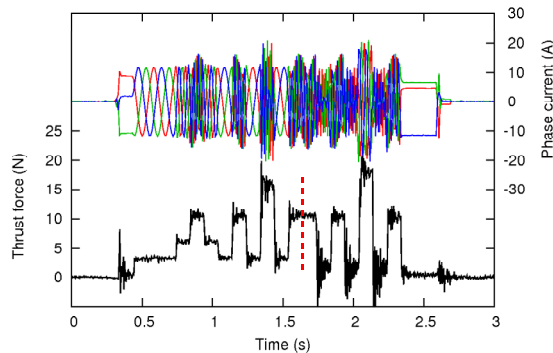
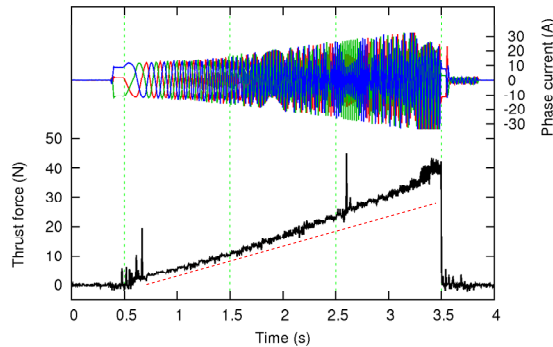
○ 評価項目

- ・ 推力の直線性（指令値 vs 実際の出力） → 制御の線形性
- ・ 応答性（指令 → 応答） → 制御の安定性
- ・ 制御ループに入れての定性的実験 → 実践的状況

リニア電機子の評価

実験条件

- ・ リニア電機子をリニアガイドに取り付け、リアクションプレートに対して直線的に動くように設置。
- ・ フォースゲージを用いて、推力を測定。



直線性試験

- ・ $i_d=11[A]$ にて固定,
 $i_q=1.1 \sim 33[A]$, $1.1A/0.1s$ で
スweep.
- ・ ほぼ直線的.
- ・ 後半の微増は引力増加に伴う
ギャップ現象によると推定.

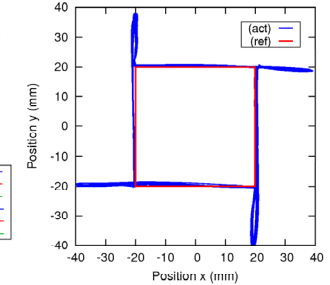
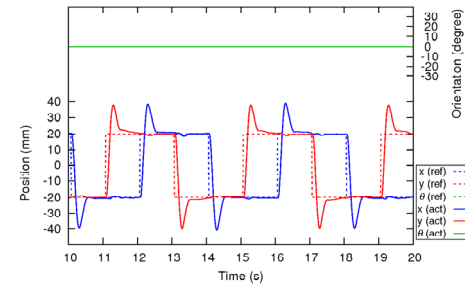
応答性試験

- ・ $0 \sim 1.6s$: i_d 固定,
 i_q はステップ
- ・ $1.6s \sim$: i_q 固定
 i_d はステップ
- ・ i_q 指令であれば、応答が
10ms以内であった.
- ・ i_d は急激に動かせない.

PIM位置制御の追従性

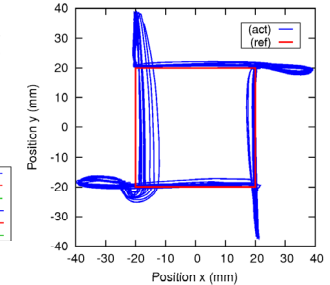
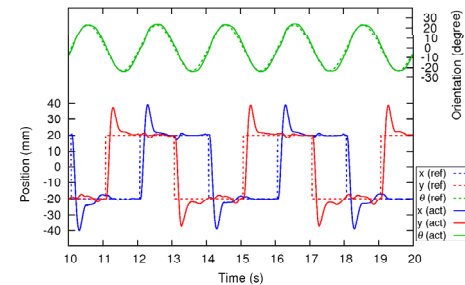
実験条件

- ・ 位置の目標値は周期的なステップで設定. ($\pm 20, 10, 15mm$)
- ・ 角度の目標値は正弦波で設定. ($0, \pm 23deg = 0.4rad$)



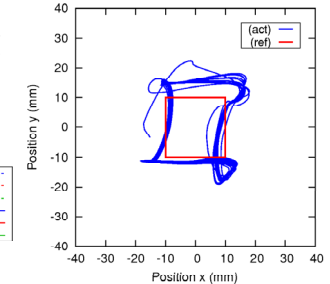
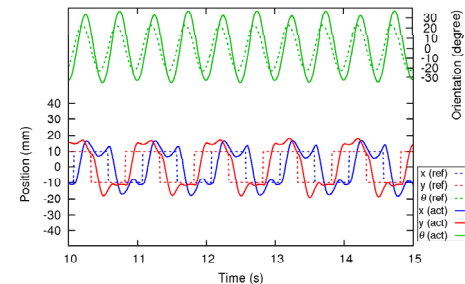
位置のみ

位置 $\pm 20mm$
角度 $\pm 0deg$
周期 4s



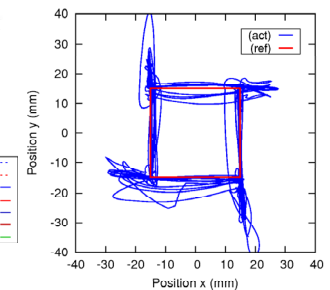
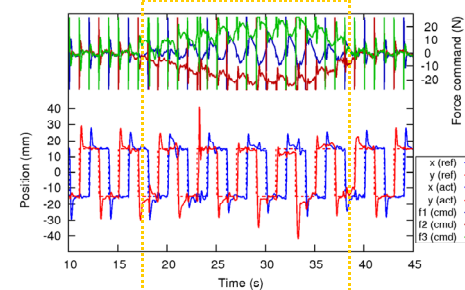
位置+角度

位置 $\pm 20mm$
角度 $\pm 23deg$
周期 4s



周期短縮

位置 $\pm 10mm$
角度 $\pm 23deg$
周期 1s



傾斜面>60deg

位置 $\pm 15mm$
角度 $\pm 23deg$
周期 4s

移動体+LRF / 倒立振り子

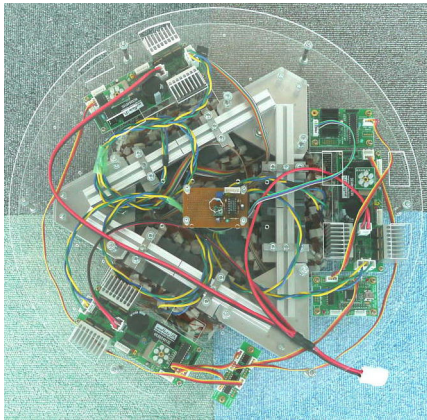
平面誘導モータの移動体への応用

○ 開発事例

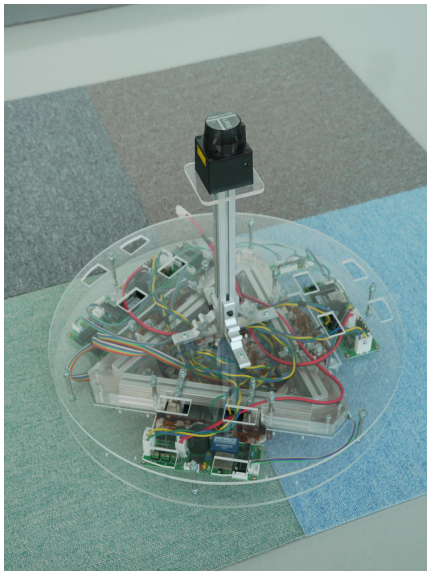
- ・平面誘導モータ+マウスセンサ+ベクトルドライバ+USBシリアル変換
+ レーザレンジファインダ / 2自由度倒立振り子

※電源と主制御PCは外付け

移動体本体部



LRF搭載型



移動体仕様:

- ・ $\phi 450 \times 80$ [mm] 質量 7.5[kg]

LRF搭載型:

- ・北陽電機 URG-04LX-UG01(10Hz)
- ・レンジ情報は、OpenRTM上で
RTCHokuyoAISTと独自コードで
対象物の相対座標抽出。
- ・相対角度, 位置制御。

倒立振り子型:

- ・センサはポテンショメータ もしくは
角速度+加速度センサ。
- ・一般的PDフィードバック制御。

倒立振り子搭載型

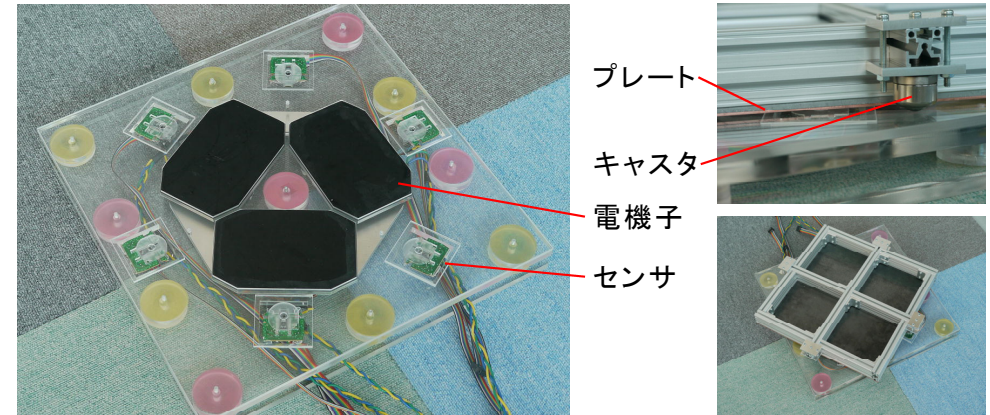


台車加速用床面プレート

床面に埋め込んだ電機子とセンサで台車を操作

○ 電機子とリアクションプレートの上下関係を逆に (固定/移動)

- ・電機子配列は同様, 上面を台車が走れるように樹脂で平滑化。
- ・マウスセンサを6個に増やし, プレートがずれても計測可能なように。



まとめ , etc.

まとめ

- ・リニア誘導モータを組合わせ, **3自由度の平面誘導モータ**を開発した。
- ・電機子の制御にベクトル制御を導入し, **応答性と直線性**を確保した。
- ・マウスセンサによる運動計測により, **位置/回転角制御**を可能にした。
- ・応用例として, **移動体+LRF**, **倒立振り子**, **台車加速プレート**を試作し,
その機能から平面誘導モータの**有用性を確認**した。

今後の予定

- ・平面誘導モータ本体の小型化. 応用事例の拡充。
- ・球面誘導モータの開発。

謝 辞

本研究は米カーネギーメロン大学RI, Ralph Hollis教授との共同プロジェクトの一部です。また, 科研費(11022515)の支援を受けています。
実験装置の大半の部品は東北学院大学工学部機械工場で製作頂きました。