

2A2-D07

セッション名: アクチュエータの
機構と制御(2)

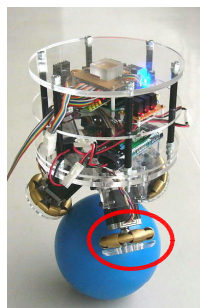
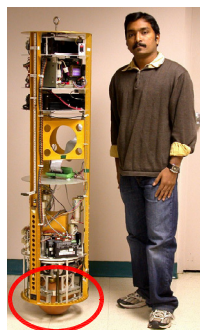
コアタイム: 24日 11:30~12:15

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



背景

- 原点: 球体車輪移動ロボット
 - ・ ballbot (米 CarnegieMellon, RI)
 - ・ BallIP (玉乗り型, 東北学院大)
- 課題: 機構の簡素化→球面モータ
 - ・ 球を回すための機構が複雑.
 - ・ 球を直接回せるモータの開発
→ 球面誘導モータ
- 要求される仕様
 - ・ 実用的な推力 (表面推力で50N程度).
 - ・ 制御に耐えうる線形性と応答性.



球面誘導モータの

ストールトルク特性の評価

Stall Torque Characteristics of a Spherical Induction Motor

概要

- ・ ロボットへの適用を想定した 3自由度 球面誘導モータ
3 DOF Spherical Induction Motor for Robotic applications
- ・ 球面誘導モータの回転特性 と 静止時の3軸トルク特性
Characteristics of the SIM, rotation control and torque.

総括

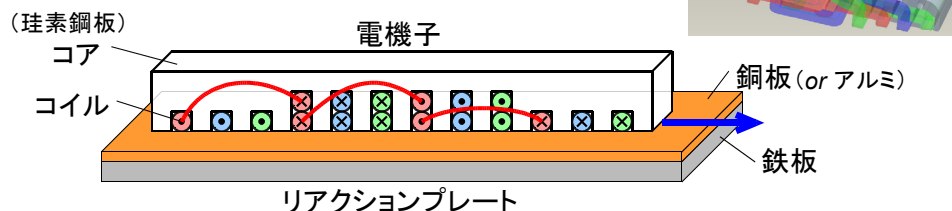
- リニア誘導モータの複合による球面モータの実現
 - ・ 球面にフィットするように設計した電機子+2層誘導球殻.
(←平面誘導モータ, Robomec12, を球面化)
 - ・ 指令トルク実現のための各電機子への推力分配.
 - ・ 電機子を自由に, 非直交に配置できる演算式の提案.
 - ・ 公称最大出力: 表面推力 40N トルク 5Nm
- マウスセンサによる計測 (←Robomec11)
 - ・ 球面の角速度の計測→電機子ベクトル制御用の表面相対速度
 - ・ 球面誘導モータの角速度制御/回転角度制御.
- 有効性検証のためのトルク特性・制御特性測定
 - ・ 静止時のトルク特性の測定. (応答性と直線性)
 - ・ 角速度制御と角度制御のためのPIDフィードバック制御.

球面誘導モータの駆動力生成

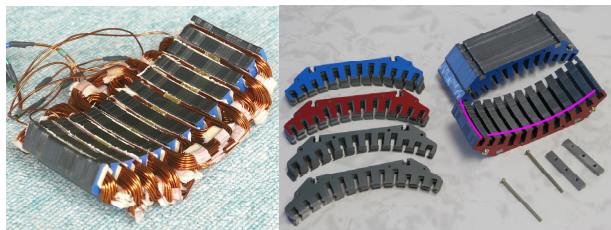
駆動力発生原理

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。

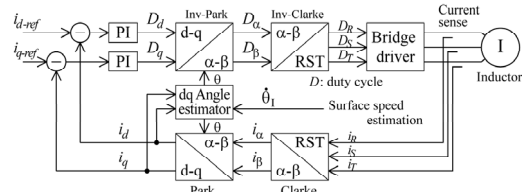


球面誘導モータ用电機子



- ・12スロット 9コイル(3x3)
- ・1コイルあたり25巻き。
- ・ Δ 結線
- ・コア材: 5種計100枚 $\times$ t0.5
- ・内製 (コア, 巻線, 組立)

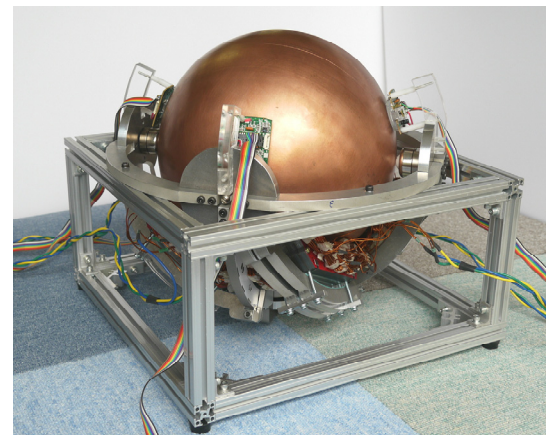
ベクトル制御ドライバ



- ・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:
 i_d : 励磁を決める指令値
 i_q : 推力(トルク)を決める指令値
推力は $i_d \times i_q$ 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

球面誘導モータのハードウェア

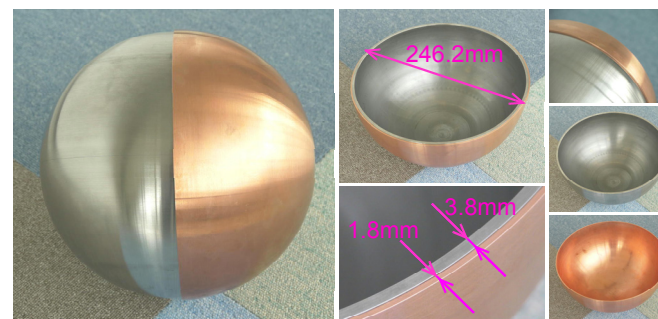
球面誘導モータ



詳細は: ICRA2013,
Masaaki Kumagai, Ralph L. Hollis:
"Development and Control of a
3DOF Spherical Induction Motor"

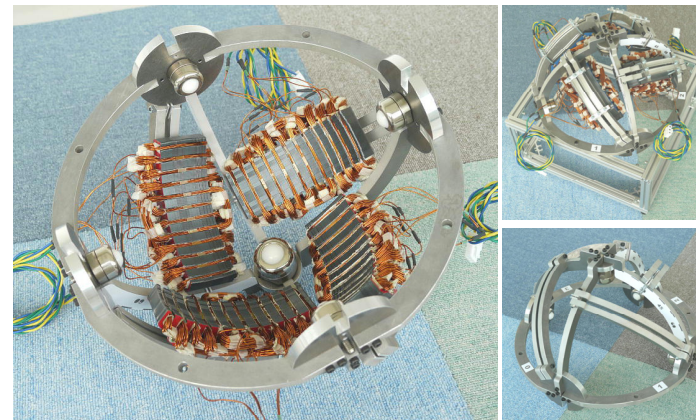
- ・駆動: リニア電機子 $\times$ 4
- ・計測: マウスセンサ $\times$ 4
- ・ロータ: 鉄・銅 2層球殻
- ・最大出力: 40 N (表面)
5 Nm (トルク)
- ・応答速度: 10 ms 未満

ロータ (誘導球殻, リアクションスフィア)



- ・鉄・銅 2層構造球殻
- ・北嶋紋製作所 製
- ・内層:
銅3.8mm $\rightarrow$ 溶接組立
- ・外層:
銅1.8mm $\rightarrow$ 接着
- ・電磁気的特性:
銅の継ぎ目以外は均一

ステータ (電機子+フレーム)



- ・電機子 $\times$ 4
- ・ロータ支持用
ボールキャスタ $\times$ 5
- ・超々ジュラルミン製
固定フレーム
(固定角可変)
- ・電機子配置:
方位90度等間隔,
子午線を30度傾斜

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

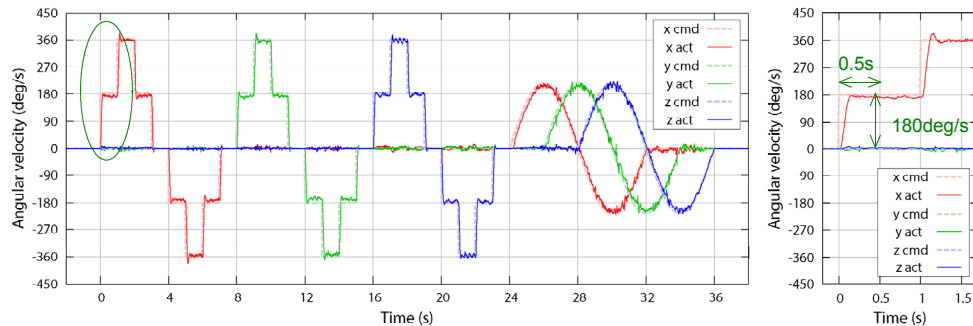
- ・ 推力・トルクの応答性と直線性 → 制御への使いやすさ
- ・ 角速度制御・角度制御を適用しての評価 → 実践的状況

フィードバック制御評価

実験条件

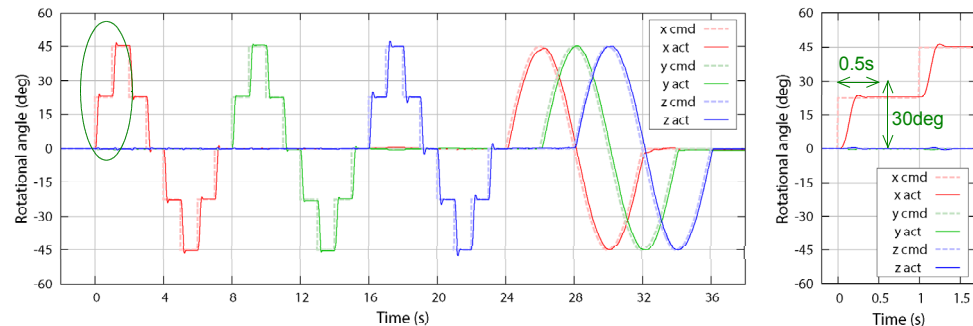
- ・ マウスセンサによる、角速度・姿勢角計測をもとに、フィードバック。
- ・ 測定値(実線)はマウスセンサによるものであり、若干の計測誤差がある。
- ・ 実際の回転は映像を参照(グラフと映像は同一実験のもの)。

角速度フィードバック (角速度誤差→PI→トルク指令)



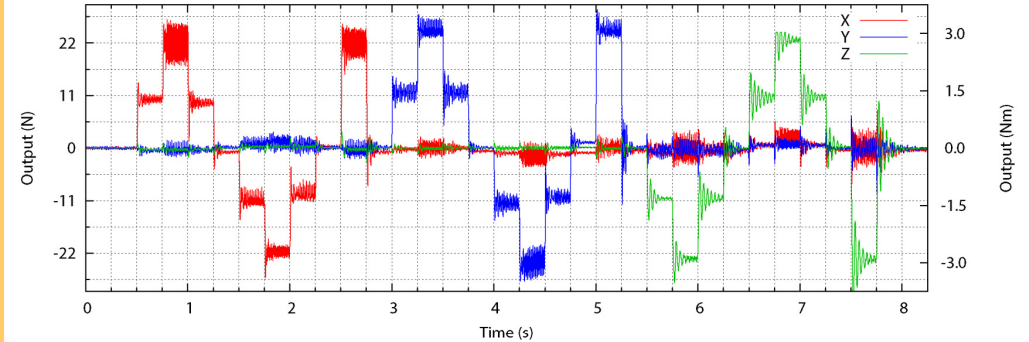
- ・ 追従性良好, 180deg/s あたり 0.1s 程度の立ち上がり時間。

角度フィードバック (姿勢誤差→PID→速度指令→同上)



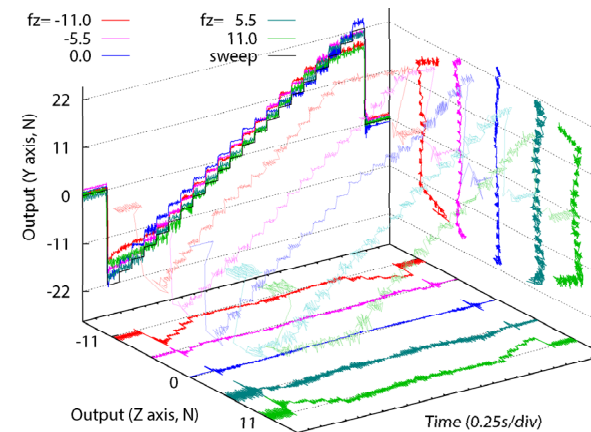
- ・ 追従性良好, 20deg あたり 0.2s 程度の立ち上がり時間。

SIMの推力トルク系データ



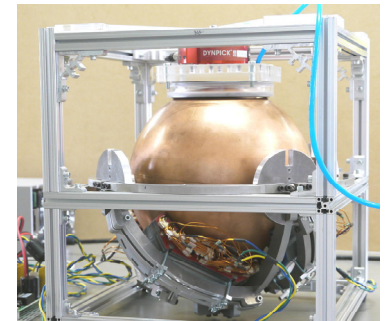
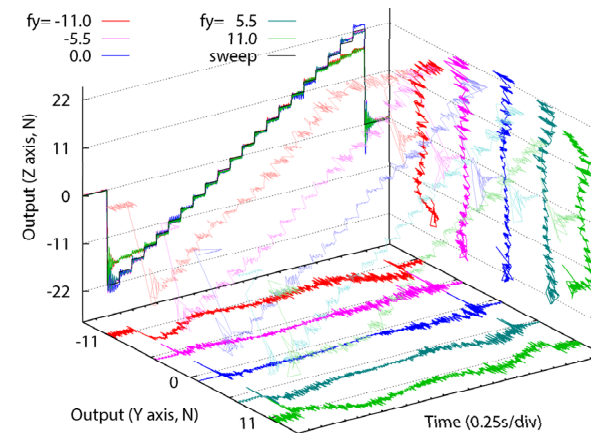
3軸独立ステップ指令 (11,22N目標, X,Y:水平軸 Z:鉛直軸)

- ・ 指令からの立ち上がりは10ms未満であることを確認。



2軸同時に推力指令

- ・ 第1軸: スイープ (限界の±約50%幅)
- ・ 第2軸: オフセット (限界の±約25%幅)
- ・ ほぼ、指令通りの傾向。
- ・ 両出力が高い部分での出力低下は、電機子ごとに設けた出力制限による。

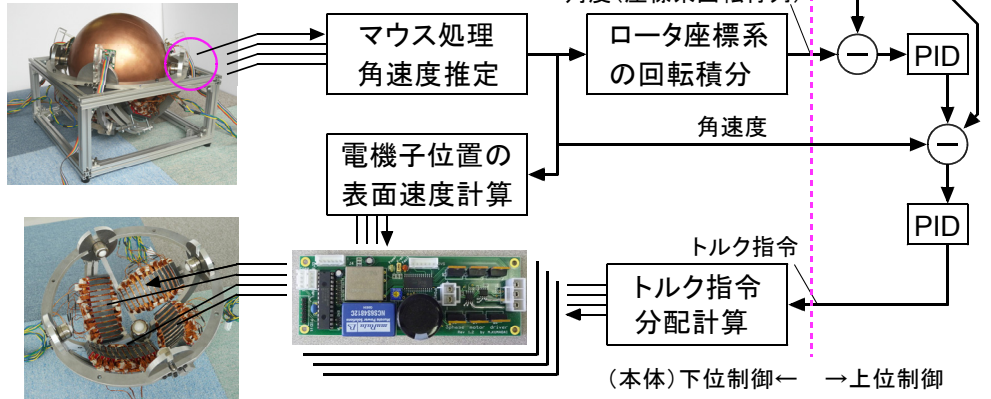


測定方法

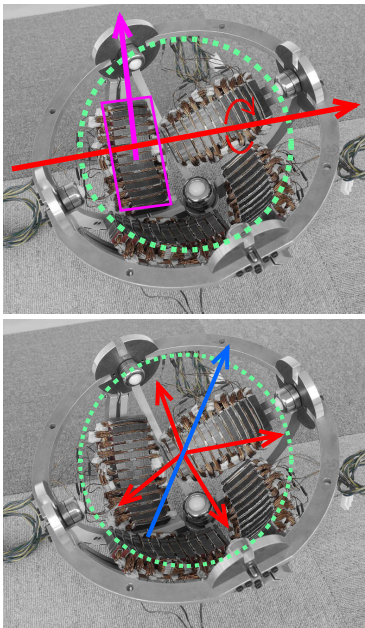
上面に6軸力覚センサ(ワコーテック製)を吸盤で固定し、水平推力と鉛直トルクを測定。

球面誘導モータの制御原理

制御系ブロック図



トルク指令の分配



概念

- 各電機子ごとの推力の指令(iq@ベクトル制御)
→ 電機子の位置に対する軸まわりのトルク
- 個々のトルクの合計 → 全体の出力トルク
- この逆演算をすればよい.

演算方法

f_i : 個々の推力指令

$$\begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{1x} \\ t_{1y} \\ t_{1z} \end{pmatrix} f_1 + \begin{pmatrix} t_{2x} \\ t_{2y} \\ t_{2z} \end{pmatrix} f_2 + \begin{pmatrix} t_{3x} \\ t_{3y} \\ t_{3z} \end{pmatrix} f_3 + \begin{pmatrix} t_{4x} \\ t_{4y} \\ t_{4z} \end{pmatrix} f_4$$

トルクベクトル t = 位置 × 推力生成方向

$$\begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{1x} & \dots & t_{4x} \\ t_{1y} & \dots & t_{4y} \\ t_{1z} & \dots & t_{4z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = A^+ \begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix}, \quad A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$$

A: 電機子配置による固定行列
疑似逆行列

今回の配置パラメータ

90度方位対称, 子午線30度傾斜から:

“直感的にも妥当”な解.

電機子を3個に制限しても解は得られる.

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.000 & 0.577 & 0.500 \\ -0.577 & 0.000 & 0.500 \\ 0.000 & -0.577 & 0.500 \\ 0.577 & 0.000 & 0.500 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix}$$

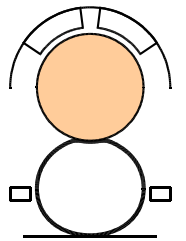
今後の計画

アクチュエータ本体

- 動的特性の測定
 - 回転状態における出力トルクの直線性, リップルなどの検証.
 - 同測定を元にした, 特性の改良. (効率向上, リップル低減など)
- 汎用化に向けた検討
 - 手作り → 量産技術化 (現状でも既存技術のみで構築)
 - 単体のモータとしてのパッケージ化.

応用先

- 球面車輪バランスロボット化
 - 原理的には問題は無い見込み, 耐久性と予備機.
 - 球面を直接車輪に使うことの問題点:
 - 剛体で緩衝作用無し, 表面のコーティングに限度.
 - 球で球を摩擦ドライブする機構など



まとめ , etc.

まとめ

- リニア誘導モータを組合わせ, **3自由度の球面誘導モータ**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, **角速度・角度制御**を可能にした.
- 6軸力覚センサ**を用いることで, 停止状態での**3軸トルクの測定**を行い, その特性を確認した.

文献情報

- Masaaki Kumagai, Ralph L. Hollis: "Development and Control of a Three DOF Spherical Induction Motor", ICRA 2013 :モータ本体の原著
- 国際特許出願 出願:PCT/US2012/050326, 公告:WO2013025499 A1

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(23760234)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.