

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656200

研究課題名(和文)三自由度ロボット関節アクチュエータの開発

研究課題名(英文)Development of a 3-DOF spherical actuator for a robot wrist

研究代表者

平田 勝弘(HIRATA, KATSUHIRO)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00403139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、有限要素法による数値解析を用いて提案したアウトロータ型三自由度球面アクチュエータの動作メカニズムを明らかにし、本アクチュエータの有用性を示した。更にイメージセンサを用いた可動子の位置検知法と新しいフィードバック制御法を開発した。解析により磁気回路パラメータ及び制御ゲインを最適化し、優れた性能を実現した。更に、得られた解析結果をもとに試作機を製作した。今後、本機を用いた実験検証を行っていく予定。

研究成果の概要(英文)：In this study, we confirmed the effectiveness of the proposed outer rotor 3-DOF spherical actuator by clarifying its operational principle employing FEM. Moreover, we developed a new position sensing method of a mover and the feedback control method for this actuator. The excellent performances of the actuator was conformed though the optimization analysis of magnetic circuit and control gain. A prototype was designed using the obtained analyzed results. In future, we are going to verify the effectiveness of the actuator through the measurement of this prototype.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電気機器

キーワード：三自由度アクチュエータ フィードバック制御 ロボット 電磁場解析 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

現在、ロボットに搭載される駆動系として、一自由度の動作を実現するにはサーボモータと減速機の組合せが一般的である。このため、人間型ロボットのような多関節を有するロボットの駆動系には、複数の高トルクモータユニットが必要となり、ロボットの大型化・消費電力の増大、位置決め精度の悪化が問題となる。そこで、1つのアクチュエータで三自由度の動きを実現できる球面アクチュエータへの期待が高まっており、様々な研究機関で開発が進められている。しかし、これらはすべて回転モータの駆動原理を三次元に拡張したものであるため、比較的大きな駆動範囲を得ることができる反面、構造が複雑でトルク/体格比が小さい。また、可動部の支持機構や位置センシング、制御法など多くの技術的課題がある。我々は、早い時期から様々な多自由度アクチュエータの研究開発を進めてきた。特に、ここ数年は人間型ロボット関節部への実装を目指して、高トルク・広角駆動を実現できる三自由度アクチュエータと位置センサ、及びフィードバック制御に関する研究に注力してきた。他機関での研究モデルと比較して、構造・制御がシンプルで優れたトルク性能を有している反面、ロボットの関節部への実装を想定すると駆動範囲が小さいという課題を有している。そこで、我々が開発したインナーロータ型三自由度アクチュエータの基本動作原理をもとに、上記課題を解決するため、可動子球体と固定磁極の構成を逆にして、外側に多極磁石で構成した球殻部を可動子、内側に固定磁極を配した独創的なアウターロータ型三自由度アクチュエータを考案した。(図1)

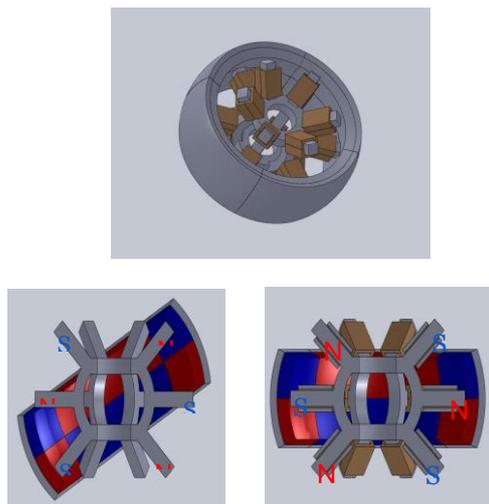


図1 アウターロータ型三自由度アクチュエータの構想

2. 研究の目的

本研究では、有限要素法による数値解析を用いて提案したアウターロータ型三自由度アクチュエータの動作メカニズムに関する理

論的考察を行うとともに、基本性能(トルク、駆動範囲、応答性、効率、位置決め精度)を確認する。また、磁気構造の最適化設計を実施するとともに、位置センサ及びフィードバック制御法を確立し、得られた最適寸法・条件をもとに試作機を製作・実験検証を行う。更に、ロボットの関節アクチュエータとしての有効性を確認するため、ロボット上肢部(肩・手首)へ搭載し実証実験を行う。

3. 研究の方法

本研究は、研究代表者がテーマ企画から、関節アクチュエータ・センシング・制御法の研究全般をリードし、3名の大学院学生は修士論文テーマとして課題に取り組む。また、世界的なロボット開発者である研究協力者が、関節アクチュエータのロボットへの実装・評価を連携して進めていく。

本研究の主な研究の進め方として、駆動範囲を拡大するため考案した“アウターロータ型三自由度アクチュエータ”(特許出願準備中)をもとに、改良したモデルを考案し、有限要素法を用いて動作メカニズムに関する理論的考察を行い、その基本性能(トルク、駆動範囲、応答性、効率)を推定するとともに、技術課題を抽出する。次に、磁気回路の最適化設計により本アクチュエータの最高性能を予測する。磁気回路設計と平行して、可動部の位置センシングに関する検討を行う。イメージセンサによるインクリメンタル位置検知法及び補助磁石とホール素子による原点位置検知法を確立する。また、MATLABモデルを用いてPIDフィードバック制御法、ベクトル制御法の有用性を確認するとともに球面アクチュエータ制御における最適ゲインを推定する。次に、試作機の製作と実験による性能検証し、技術課題を抽出する。更に、ロボットの関節アクチュエータとしての有効性を確認するため、ロボット上肢部(肩・手首)へ実装し、実証実験を行う。

4. 研究成果

①磁気回路を改良したアクチュエータの基本構成を図2に示す。可動子が固定子の外側に設置されたアウターロータ構造となっている。固定子が可動子の内部にあるため。可動子出力軸と固定子の機械的干渉が生じにくくなり、広角駆動が可能である。可動子は、60個の永久磁石片とヨークから構成される(図3)。極配置は、回転方向(Z軸周り)に30度間隔で極が切り替わるように(12極)、チルト方向(X、Y軸周り)に22.5度間隔で極が切り替わるように(16極)永久磁石を配置している。また、固定子の磁極と磁極の間に取り付けたクランピングスクリューにより、可動子を内側から支持し、永久磁石と磁極の距離が一定になるよう保持されている(図4)。固定子は、図5に示すように33個の磁極、コイルおよび支持部で構成され、30度間隔で配置された磁極群(4個)をZ軸周

りに 45 度おきに配置し、加えて固定子の頂点の位置に磁極を一個配置した構造である。なお、可動子および固定子のサイズはそれぞれ $\phi 97\text{mm}$, $\phi 83.6\text{mm}$ であり、可動域は X, Y 軸周りに $-40 \sim 40$ 度, Z 軸周りに ± 180 度で動作可能である。

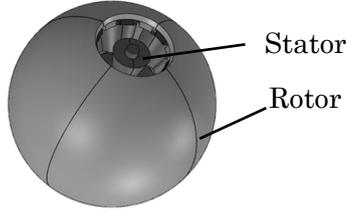


図 2 アウターロータ型三自由度アクチュエータの全体図

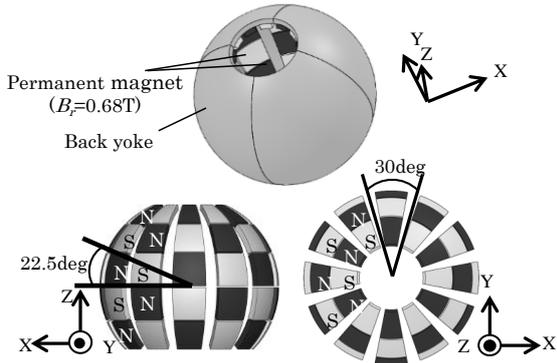


図 3 可動子の構造

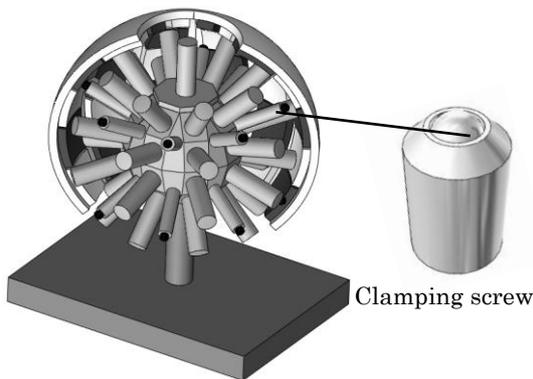


図 4 支持方法

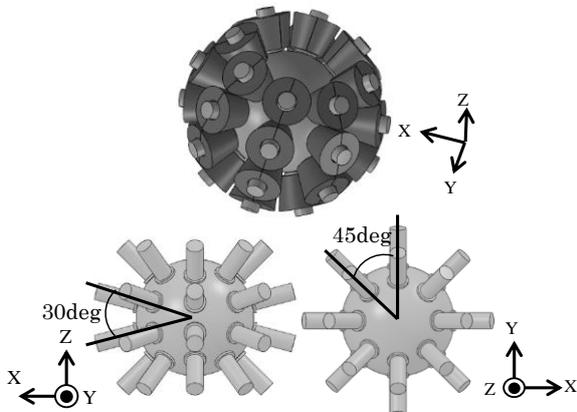


図 5 固定子の構造

②FEM 解析による磁気回路の最適化により高推力化、トルクリップルの低減、高トルク定数の改善設計を実施した。トルク特性を図 6, 7 に示す。駆動角度 40 度以上可能で、トルク

リップルも小さいことが確認できる。

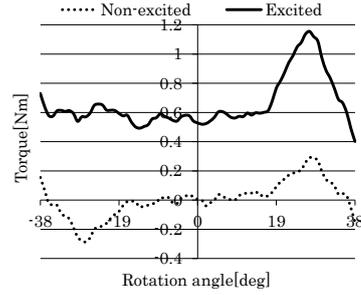


図 6 静トルク特性解析結果 (X 軸周り)

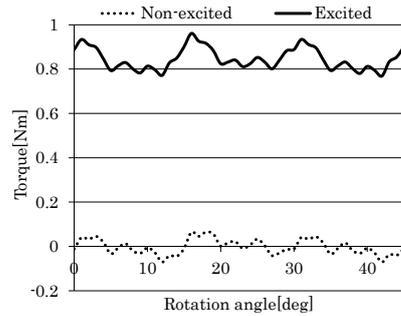


図 7 静トルク特性解析結果 (Z 軸周り)

②本アクチュエータの基本構造は同期機に基づくため、X, Y 軸周りには三相交流、Z 軸周りには四相交流を励磁することで回転させることは可能である。しかし、三相交流、四相交流による制御手法では、単軸周りの回転しか行うことができず、またすべての磁極を有効に使えないため、33 個のコイルそれぞれに対して適切な電流を励磁する新しい制御手法を提案した。ここで、コイルに励磁する電流は、以下に述べるように、図 8 に従った手順により、各コイルと可動子の位置関係から決定する。可動子の姿勢を $x-y-z$ 系のオイラー角で表し、固定子座標系で表された磁極 i の位置を可動子座標系 ($X''-Y''-Z''$) に変換し、可動子座標系での磁極 i の位置ベクトル (\mathbf{p}_i'') を求める (①・②)。可動子座標系の $X''-Y''$ 面と磁極 i との角度 α_i を用いて、チルト方向 (X'' , Y'' 軸周り方向) の電流の位相 (I_{ai}) を決める (③)。ここで、角度 α_i は、式(1)のように求まり、電流の位相 (I_{ai}) は電流の最大振幅を 1A, 可動子磁石のチルト方向の極対数 P_a 式とすると、(2)のようになる。なお、本アクチュエータの場合、永久磁石がチルト方向 (X'' , Y'' 軸周り) に 16 極を形成しているため、極対数 (P_a) は、8 となる。

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{p_{iz}''}{\sqrt{p_{ix}''^2 + p_{iy}''^2}} \right) \quad (1)$$

$$(p_i'' = [p_{ix}'' \quad p_{iy}'' \quad p_{iz}']')$$

$$I_{ai} = -\sin(P_a \alpha_i) \quad (2)$$

可動子座標系の $Y''-Z''$ 面と、磁極 i (位置は \mathbf{p}_i'') と可動子座標系の Z'' 軸を含む面との角度 β_i を用いて、回転方向 (Z'' 軸周り方向) の電流の位相 (I_{bi}) 決める。角度 β_i は、式(3)のよ

うに求まる。ここで、電流の位相 ($I_{\beta i}$) は、電流の最大振幅を 1A, 可動子磁石の回転方向の極対数を P_{β} とすると、式(4)で表される。なお、本アクチュエータの場合、永久磁石が回転方向 (Z'' 軸周り) に 12 極を形成しているので、極対数 (P_{β}) は、6 となる。

$$\beta_i = \cos^{-1} \left(\frac{p_{iy}'''}{\sqrt{p_{ix}'''^2 + p_{iy}'''^2}} \right) \quad (3)$$

$$(p_i''' = [p_{ix}''' \quad p_{iy}''' \quad p_{iz}''']^T)$$

$$I_{\beta i} = -\sin(P_{\beta} \beta_i + 90^\circ) \quad (4)$$

電流の振幅を決める (5)。例えば、X 軸周りに回転させる時、Y-Z 面に近い磁極による発生トルクほど、回転への寄与度が大きい。ここでは、その寄与度を電流の振幅で表す。具体的には、可動子座標系の Z'' 軸上に単位ベクトル k'' と磁極 i の位置ベクトル p_i''' の外積 ($k'' \times p_i'''$), $k'' \times p_i'''$ が X 軸となす角度の余弦の絶対値を振幅 A_i とする。このとき、振幅 A_i は、式(5)で表される。

$$A_i = \frac{1}{\|k'' \times p_i'''\|} |(k'' \times p_i''')_{x''}| \quad (5)$$

電流の最大振幅が 1A の場合、最終的に、磁極 i に流れる電流値 I_i は式(6)で与えられる。

$$I_i = A_i \times I_{ai} \times I_{\beta i} \quad (6)$$

以上の制御アルゴリズムを適用して、その有効性を確認した。

X 軸周りに、-38 度から 38 度まで 350ms で回転させる速度指令値 (228deg/s), Z 軸周りには、0 度から 540 度まで 1000ms で回転させる速度指令値 (540deg/s) を与えて、オープンループ制御、クローズループ制御のそれぞれについて、三次元有限要素法による動作特性解析を行った。クローズループ制御では、可動子各軸の回転角度を利用し、可動子の目標角度と現在の回転角度の差分を取り、PID 制御によりその値を指令値に加えている (図 9)。制御ゲインについては試行錯誤的に最適な値を選定している。

図 10, 11 より、X 軸周りでは、クローズループ制御により、指令値への追従性が向上していることがわかる。Z 軸周りでは、オープンループ制御とクローズループ制御との差はほとんどなく、指令値に追従性良く回転することができる。

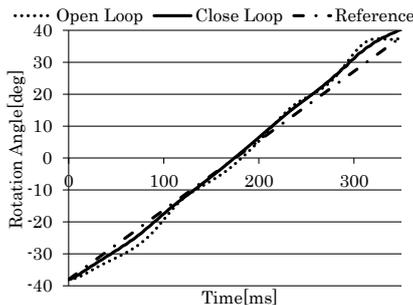


図 11 動作特性解析結果 (X, Y 軸周り)

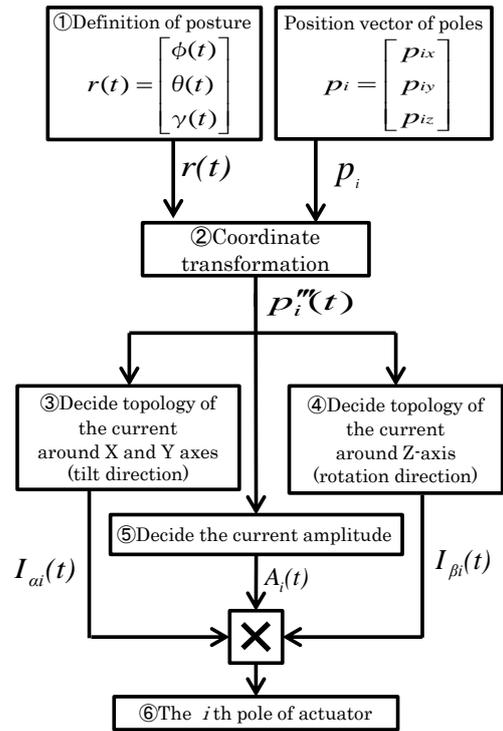


図 8 制御手法のフローチャート

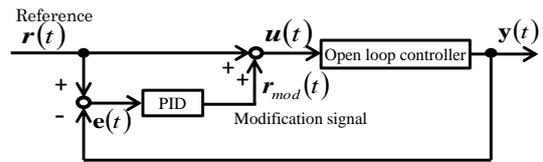


図 10 クローズループ制御系

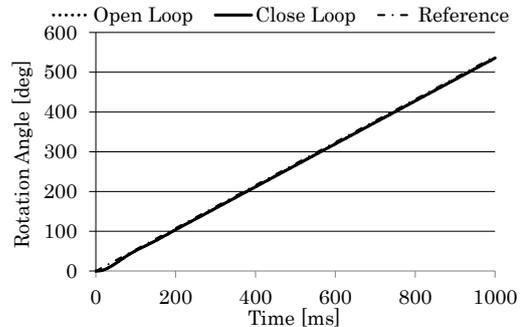


図 12 動作特性解析結果 (Z 軸周り)

以上、解析シミュレーションを用いて提案したアウトロータ型三自由度アクチュエータ及びその制御法の有効性と最適化を実施した結果、非常に有効であることがわかった。現在、試作実験中 (図 13) であり継続して研究を進めていく予定である。



図 13 アウトロータ型三自由度アクチュエータの試作

③アウターロータ型三自由度アクチュエータの位置センシング法の開発を行った。実験検証しやすいモデルとして、ここでは図 14 に示すインナーロータ型モデルを使用している。内側の可動子は 4 つの磁性体と 4 つの永久磁石から構成されている。永久磁石は図で示すように 90°間隔で配置されており、それぞれ図の矢印方向に着磁されている。外側の固定子は、6 つの磁極を有するリング状磁性体を上下に 2 つ配置することで構成されており、各磁極にはコイルが巻かれている。可動子と固定子磁極の対向面はそれぞれ球面にカットされており、可動子はギャップ一定となるように球面軸受により保持される。本システムで用いるイメージセンサについて、その測定原理を説明する。まず、センサが物体の表面を毎秒 1500 回という高速で撮影する。その際の画素数は 16×16 ピクセルと非常に少ないものである。そして、1 つ前に撮影した画像との比較から共通する明暗のパターンを検出し、その共通部分がどれだけ移動しているかにより、撮影表面の移動量を算出する。算出された測定値はインクリメンタルエンコーダのように 2 相のパルス波（単位時間当たりのパルス数で変位量を、2 相の位相差で移動方向を示す）により出力される。

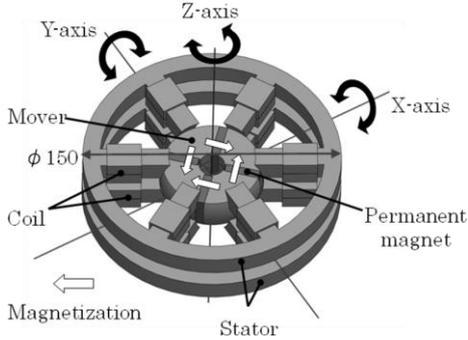


図 14 インナーロータ型モデル

図 15 に撮影画像のイメージを、図 16 にセンサの設置位置を示す。本システムでは 2 つのセンサからの出力を可動子の回転角度に変換し、位置フィードバックに用いる。

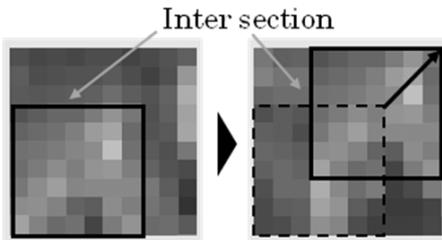


図 15 撮影画像のイメージ

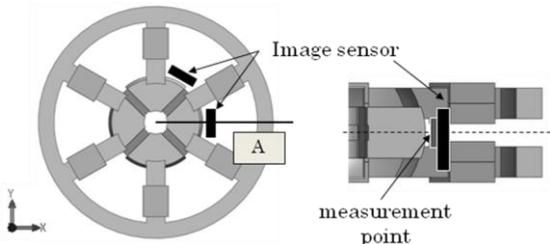


図 16 センサの設置位置

センサ出力を可動子回転角へと変換する行列の導出を、図 17 を用いて説明する。まず、図のように可動子の中心が原点となるような直交座標系をとり、 Z' 軸とベクトル $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ を定義する。 Z' 軸は可動子の軸方向であり、 γ 及び α で表される角度に傾いているものとする。 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ はセンサの設置位置を示すベクトルであり、それぞれ次式で表される。

$$\mathbf{e}_z = [\sin\gamma \cos\alpha \quad \sin\gamma \sin\alpha \quad \cos\gamma]^T$$

$$\mathbf{r}_k = [R \cos\theta_k \quad R \sin\theta_k \quad 0]^T, (k=1,2 \quad \theta_1=0 \quad \theta_2=\theta)$$

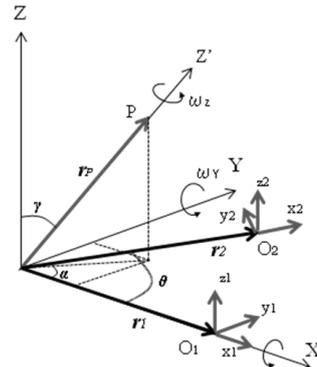


図 17 軸とベクトル定義

ここで、 \mathbf{e}_z は Z' 軸方向の単位ベクトル、 R は可動子半径 [mm] である。可動子の各軸の角速度をそれぞれ $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ とすると、三自由度回転における角速度ベクトルは次式で表される。

$$\boldsymbol{\omega} = \omega_x \mathbf{e}_x + \omega_y \mathbf{e}_y + \omega_z \mathbf{e}_z$$

(12)式及び(14)式より、次式が得られる。

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_x + \omega_z \sin\gamma \cos\alpha) \mathbf{e}_x + (\omega_y + \omega_z \sin\gamma \sin\alpha) \mathbf{e}_y + \omega_z \cos\gamma \mathbf{e}_z$$

また、ベクトル \mathbf{r}_k で表される位置における速度ベクトル \mathbf{v}_k は、次式で表される。

$$\mathbf{v}_k = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_k$$

よって次式となる。

$$\begin{bmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\sin\theta_k \cos\gamma \\ 0 & 0 & \cos\theta_k \cos\gamma \\ \sin\theta_k & -\cos\theta_k & \sin\theta_k \sin\gamma \cos\alpha - \cos\theta_k \sin\gamma \sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

ここで、 v_{xk}, v_{yk}, v_{zk} はそれぞれ XYZ 直交座標系における速度成分であるため、図 16 で示すように、 \mathbf{r}_k と x 軸の向きを一致させた座標系における速度成分に変換する。Z 軸まわりに θ_k だけ回転させた座標系における速度成分は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\gamma \\ \sin\theta_k & -\cos\theta_k & \sin\theta_k \sin\gamma \cos\alpha - \cos\theta_k \sin\gamma \sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

最終的には以下のセンサ出力(可動子表面の速度)から各軸の角速度への変換を表す行列式が導かれる。

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{R \sin \theta \cos \gamma} \begin{bmatrix} -\sin \theta \sin \gamma \cos \alpha & -\cos \theta \cos \gamma & \cos \gamma \\ -\sin \theta \sin \gamma \sin \alpha & -\sin \theta \cos \gamma & 0 \\ \sin \theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ v_{z1} \\ v_{z2} \end{bmatrix}$$

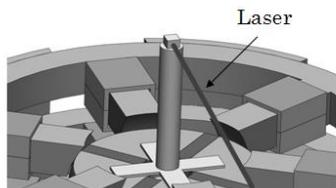
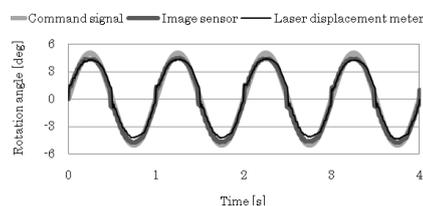
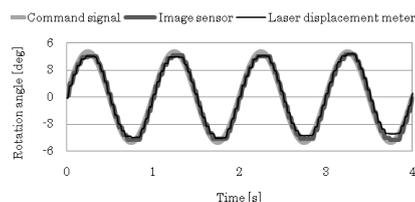


図 18 レーザ変位計を用いた測定本センシングシステムの妥当性を確認し、その有効性を評価するために、試作機による実験検証を行った。X 軸まわり、Y 軸まわりについて実験結果を図 19 に示す。可動子の回転角をイメージセンサとレーザ変位計により測定した。



(a) X 軸周り



(b) Y 軸周り

図 19 イメージセンサを用いたフィードバック実験結果

クローズドループ制御時の実験結果からは、位置フィードバック制御が適切に機能し、可動子が指令角度に追従して駆動していることが分かる。しかし X 軸、Y 軸のどちらの結果においても、回転角が大きくなるに従って指令値とセンサ出力及びレーザ変位計出力との誤差が増え、振幅のピーク値において、X 軸では最大 16.1%、平均 14.9%、Y 軸では最大 13.9%、平均 9.4%の誤差を生じている。イメージセンサによるインクリメンタル位置検知法に加えて補助磁石とホール素子による原点位置を検知して積算誤差をなくすことで検知精度を上げる予定であったが、検知部が大型化するため検討のみに留めて実際のシステムには採用しなかった。

④開発したアクチュエータをロボットの上肢部（肩・手首）へ実装し、実証実験を行う予定であったが、アクチュエータの開発に時間・費用を要したために構想に留まった。本課題については、引き続き推進チームにて研究を進めていく予定。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 7 件）

(1) Masahito Tsukano, Yo Sakaidani, Katsuhiro Hirata, Noboru Niguchi, Shuhei Maeda, and Ariff Zaini, “Analysis of 2-Degree of Freedom Outer Rotor Spherical Actuator Employing 3-D Finite Element Method”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.49, NO.5, pp.2233-2236, 2013.05

(2) Shuhei Maeda, Katsuhiro Hirata, and Noboru Niguchi, “Dynamic Analysis of an Independently Controllable Electromagnetic Spherical Actuator”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.49, NO.5, pp.2263-2266, 2013.05

(3) 塚野聖仁, 平田勝弘, 前田修平, 佟明宇, 新口昇, “アウターロータ型球面アクチュエータに関する研究”, 電気学会論文誌, Vol.133, No.1, pp.639-644, 2013.06

(4) 堺谷洋, 平田勝弘, 新口昇, 佟明宇, 前田修平, “広角駆動可能な二自由度球面電磁アクチュエータ”, 電気学会論文誌, Vol.133, No.1, pp.64-68, 2013.01

(5) Mingyu Tong, Katsuhiro Hirata, Shuhei Maeda, “Dynamic Analysis of 3 DOF Actuator Employing 3 D Finite Element Method”, 電気学会論文誌, VOL.131, No.10, pp.1240-1245, 2011.10

〔学会発表〕（計 20 件）

(1) 大矢桂資, 平田勝弘, 新口昇, 前田修平, 堺谷洋, “三次元有限要素法を用いたアウターロータ型三自由度球面電磁アクチュエータの特性解析”, 電気学会回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, LD-13-64, pp.17-21, 2013.08

(2) 前田修平, 平田勝弘, “カラーセンサを用いた球面アクチュエータの回転角度センシング”, 電気学会回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, LD-13-63, pp.13-16, 2013.08

(3) 塚野聖仁, 平田勝弘, 新口昇, 堺谷洋, 前田修平, “アウターロータ型球面アクチュエータのフィードバック制御”, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-12-109, pp.57-62, 2012.09

(4) Shuhei Maeda, Katsuhiro Hirata, Noboru Niguchi, “Independently Controllable Electromagnetic Spherical Actuator”, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines (ICEM2012), France, pp.676-681, 2012.09

(5) Shuhei Maeda, Katsuhiro Hirata, “Characteristics Analysis of a New Spherical Actuator Employing 3-D FEM”, Proceedings of IEEE COMPUMAG 2011, Sydney, Australia, PB4.1, pp.29-30, 2011.07

6. 研究組織

平田 勝弘 (HIRATA KATSUHIRO)

研究者番号：00403139