

磁気軸受関節を持つロボットの精密位置決め

Micro-Manipulation of Robot Manipulators with Magnetic Bearing Joints

樋口 俊 郎*・岡 宏 一*

Toshiro HIGUCHI and Koichi OKA

1. はじめに

真空中やクリーンルームで使用される多関節ロボットの問題の一つに、関節に利用される軸受に関するものがある。真空中においては軸受の摺動部の潤滑方法が問題であり、クリーンルームでは潤滑油の飛散などによる汚塵が問題である。この問題の解決のために、筆者らは、関節部に磁気軸受機構を用いて非接触化し、ロボットマニピュレータから摺動部をなくすことを提案し、試作を行った¹⁾。このような磁気軸受を持つマニピュレータにおいては、その磁気軸受を能動的に制御することによって以下に示すような機能を持たせることができると考えられる。

- i) 手先の精密位置決め機能
- ii) 力計測、力制御機能
- iii) 振動制御機能

本報告では、i)のマニピュレータの関節の軸受に磁気軸受を使用したときの手先の精密位置決め機能について考察する。ここで精密位置決め機能とは、対象物との相対的な手先の微小位置、微小姿勢を制御できる機能とする。精密位置決めを、マニピュレータの関節角フィードバックによって行う場合、動力伝達部やリンクのたわみ、ギヤのバックラッシュ、関節角センサの分解能、摺動部の非線形摩擦などが問題となる。この対策として、手先に、対象物との相対位置を検出するセンサと微動駆動機構を付加することによって精密位置決めを行うことが考えられる。磁気軸受関節を持つマニピュレータでは、手先の微小駆動機構の代わりに磁気軸受を利用することが可能である。磁気軸受を能動制御することにより軸受支持方向の微小変位が可能であり、その適当な微小変位により手先の任意の精密位置決めが可能である。以下では、磁気軸受関節などのように関節部に精密位置決め機能があるとき、手先の精密位置決めを行うために必要な関節部の微小変位の決定法を述べ、試作した実験装置に

*東京大学生産技術研究所 第2部

において、実際にその機能の検証を行ったのでその結果を報告する。

2. 非接触磁気軸受関節を持つマニピュレータ

磁気軸受機構を利用した非接触関節を持つロボットの実現性や、上記の機能についての性能を調べるために、Fig. 1に示すようなマニピュレータを試作した。Fig. 2に基本構造を示す。これは、平行リンク形マニピュレータであり、関節1, 2に取り付けられている2つのモーターによって駆動される。手先はFig. 2に示されるリンク4の右端である。上部2つの関節(関節4, 5)に磁気軸受機構が使用されている。この関節4, 5は、受動関節であるため、駆動するためのギヤやベルト、モータのブラシなどの摺動部がないため、軸受を非接触化することによって非接触関節となり、リンク4は、非接触で支持される。

関節4, 5の磁気軸受関節には、5自由度制御形磁気軸受機構を用いる。その基本構造をFig. 3に示す。これは、ロータの回転方向以外の5つの運動の自由度を、A

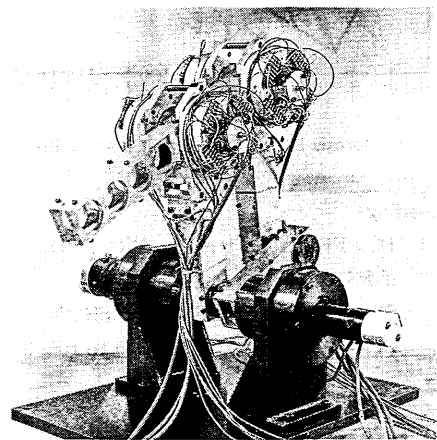


Fig. 1 Photograph of a robot manipulator with magnetic bearing joints

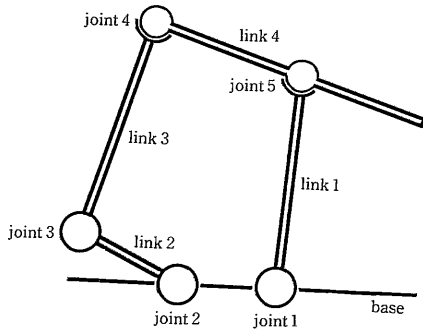


Fig. 2 Basic structure of the robot (joint 4, 5 : magnetic bearing joints)

～Eの5つのセンサによって検知し、その信号に基づいて5対(1-10)の電磁石によって能動的にこの5自由度の運動を制御するものである。この2つの磁気軸受の制御により、リンク4の手先におけるすべての微小運動の自由度を制御することが可能である。

試作したマニピュレータの関節1, 2や通常のシリアルリンク型マニピュレータの各関節には、駆動機構が必要であり、非接触関節実現のために、駆動機構の非接触化も考慮しなければならない。このような視点から開発されたアクチュエータ^{2),3)}の一例をFig.4に示す。シリアルリンク形マニピュレータは、手先側の関節重量をベース側の関節で支持する必要があるため、図に示されるようなアクチュエータをより軽量、コンパクト、高出力化を図ることによって、非接触ロボットが実現可能である。シリアルリンク形マニピュレータの場合、磁気軸受機構は、その駆動機構の自由度以外の自由度を支持することとなり、その方向での微小位置決めを行うことが可能である。

3. 軸受の変位の計算手法

3.1 試作マニピュレータの場合

試作したマニピュレータの2つの磁気軸受関節は、あわせて10自由度の制御が可能である。対してこの2つの磁気軸受関節で制御するべき自由度は、リンク4の6自由度と、リンク3の関節3回りの回転との7つである。よってこのマニピュレータの磁気軸受関節は、3つの冗長自由度を持つ。本報では、関節5については、その5自由度をすべて制御するものとし、関節4については、Fig.2に示される平面内におけるロータの重心位置の2自由度の運動を制御することによって手先の精密位置決めを行うものとする。この方法は、平行リンク形マニピュレータにおいてすべての関節が非接触になった場合においても同様に利用できる。

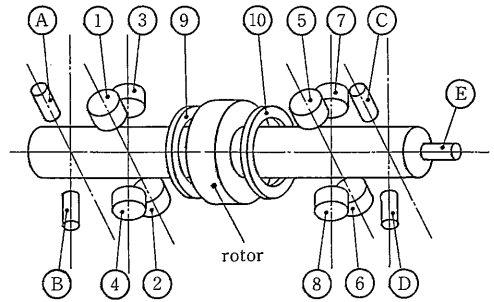


Fig. 3 Basic structure of a 5 d.o.f. active magnetic bearing system (1-10 : electromagnet, A-E : gap sensor)

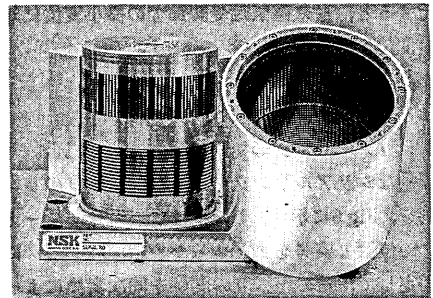


Fig. 4 Contactless actuators

これらの軸受上での微小変位は、Fig.5に示す座標系において、 $\delta_b = (x_b, y_b, z_b, \theta_{x_b}, \theta_{y_b}, x_4, y_4)'$ と与えることができる。ただし x_4 は、磁気軸受のステータに対するロータの相対変位(軸受のセンサ出力)ではなくロータの絶対変位であり、磁気軸受によって任意に制御できない。 x_4 方向の磁気軸受の変位は、関節3回りのリンク3の回転を制御することとなる。Z軸はXY座標から右手系にとるものとし、 $\theta_{x_b}, \theta_{y_b}$ はそれぞれ X_b 軸、 Y_b 軸まわりの微小な回転とする。このとき手先の微小変位が、 $\delta_h = (x_h, y_h, z_h, \theta_{x_h}, \theta_{y_h}, \theta_{z_h})'$ となるとする。 δ_h の微小変位に対する δ_b は、微小変位であることを考慮して、

$$\delta_b = T_c \delta_h$$

$$T_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_5 \cos \theta \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -l_5 \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 & l_5 \cos \theta & l_5 \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(l_5 + l_4) \cos \theta \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -(l_5 + l_4) \sin \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。実際には、手先の微小位置決めのために、 δ_b の x_4 を除いたものを $\tilde{\delta}_b$ 、 T_c の第6行目を除いたものを \tilde{T}_c として

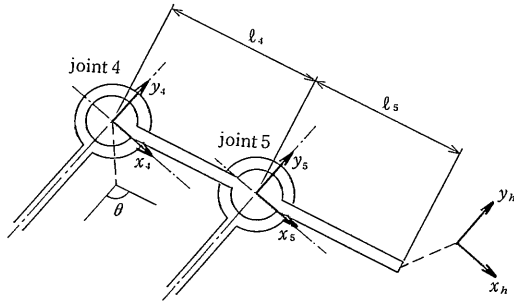


Fig. 5 Coordinate frame

$$\tilde{\delta}_b = \tilde{T}_c \delta_h \quad (2)$$

と表記すると、逆に磁気軸受関節での微小変位に対する手先の変位は、

$$\delta_h = \tilde{T}_c^{-1} \tilde{\delta}_b \quad (3)$$

と表せる。

3.2 シリアルリンク形マニピュレータの場合

一般的なシリアルリンク形マニピュレータのリンク機構の例を、Fig.6に示す。このようなマニピュレータの各リンクの位置と姿勢を表記するために、各リンクに座標系を固定して、その座標間の関係を同次変換によって表すものとする⁴⁾。各関節がすべて1自由度の駆動機構を持つような場合について考察する。まず、リンク*i*の座標系Σ_{*i*}の原点は、関節*i*側の端点にとる。Z軸Z_{*i*}は、関節*i*の関節軸に合わせ、可能なら次の関節の方向に向ける。X軸は、関節*i*と*i*+1の関節軸の共通垂線上にとり、可能なら次の関節の方向に向ける。以上の法則によって決定できない場合には、Σ_{*i*}からΣ_{*i*+1}への変換が、次の手順に従って可能であり、かつなるべく簡単になるように決定する。

- i) X_{*i*}軸に沿ってα_{*i*}の並進
- ii) X_{*i*}軸まわりのα_{*i*}の回転
- iii) Z_{*i*+1}軸に沿ってd_{*i*}の並進
- iv) Z_{*i*+1}軸まわりのθ_{*i*}の回転

ただし直動関節の場合はd_{*i*}が、回転関節の場合はθ_{*i*}が関節変数である。リンク座標の定め方の一例を、Fig.7に示す。i) からiv) に示された同次変換を表す行列ⁱT_{*i*+1}によって

$$\Sigma_{i+1} = \Sigma_i {}^i T_{i+1} \quad (4)$$

と表すことができる。

関節*i*が磁気軸受関節である場合、その微小変位は、同次変換行列ⁱM_{*i*}によって、

$${}^i M_i = \begin{pmatrix} 1 & -\xi_i & \eta_i & u_i \\ \xi_i & 1 & -\zeta_i & v_i \\ -\eta_i & \zeta_i & 1 & w_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

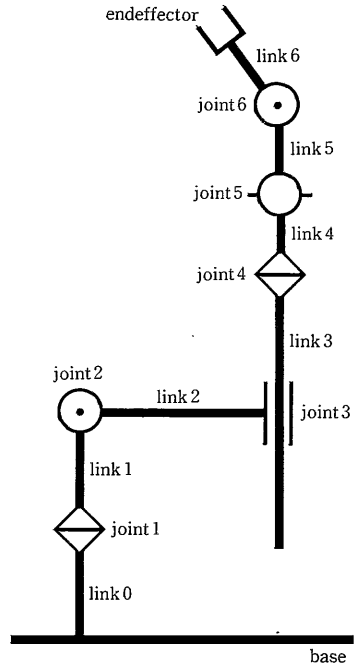


Fig. 6 Basic description of serial link manipulator

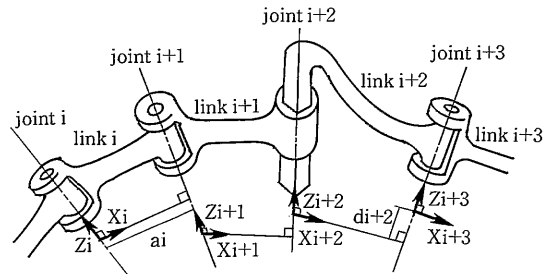


Fig. 7 Coordinate frame for serial link manipulator

と表される。ここでξ_{*i*}、η_{*i*}、ξ_{*i*}およびu_{*i*}、v_{*i*}、w_{*i*}は、それぞれX_{*i*}、Y_{*i*}、Z_{*i*}軸まわりの微小回転位置、および各軸に沿った微小並進変位である。直動関節の場合w_{*i*}=0、回転関節の場合ξ_{*i*}=0である。

最終リンクnの座標系Σ_{*n*}から手先までの変換が、ⁿT_Eで与えられるとき、微小変位ⁱM_{*i*}によって引き起こされる手先の座標T_E上での変換をΔ_{*i*}とすると、

$$\begin{aligned} T_E \Delta_i &= T_i \dots {}^{i-1} T_i {}^i M_i {}^i T_{i+1} \dots {}^{n-1} T_n {}^n T_E \\ &= T_i {}^i M_i {}^i T_E, \\ \Delta_i &= {}^i T_E^{-1} {}^i M_i {}^i T_E \end{aligned} \quad (5)$$

Δ_{*i*}、ⁱM_{*i*}に対応する6次元変位ベクトルをd_{*i*}、δ_{*i*}とすると、(5)式の関係は、ⁱT_Eから決定することができる6×6の行列F_{*i*}によって

$$d_i = F_i \delta_i \quad (6)$$

とすることができる。磁気軸受関節が複数個あるときには、それによる手先の微小変位 d は、

$$d = \sum d_i = \sum F_i \delta_i \\ = (F_1 \cdots F_n) (\delta_1' \cdots \delta_n')' = F \delta \quad (7)$$

となる。手先の微小変位が与えられたときには、(7)式の F の疑似逆行列を求める必要があるが、精密位置決めは、手先に近い位置において有利であると考えられるため、 F の右の列より検査して行き、フルランクとなるように列を選び、それに対して δ を決定するとよい。

4. 試作マニピュレータによる実験

試作したマニピュレータによって Fig.5 の平面内において、軸受を微小変位させ、それに対する手先の並進運動の微小変位を測定する実験を行った。このとき手先の並進変位は、(3)式より

$$\begin{pmatrix} x_h \\ y_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \ell_5 / \ell_4 \tan \theta & -\ell_5 / \ell_4 \tan \theta \\ 0 (\ell_5 / \ell_4) / \ell_4 & -\ell_5 / \ell_4 \end{pmatrix} (x_{s_5}, y_{s_5}, y_4)' \quad (8)$$

となる。
 実験は、 x_{s_5} , y_{s_5} , y_4 それぞれ独立に $-50, 0, 50 \mu\text{m}$ の変位を与え、リンク 1, 4 の角度 θ を $\pi/4 \sim 3\pi/4$ に変化させて、手先の変位を測定した。制御システムは、I-PD 制御方式を用い、PD ループは、アナログ信号によって、I ループは、デジタル計算機を用いて制御した。 $x_{s_5} = 50 \mu\text{m}$ のときの実験結果を、Fig.8 に示す。実線は、(8)式から求めた計算値である。ほぼ期待した位置決めが可能であることがわかる。位置決め誤差は、軸受の取付誤差、軸受の軸間距離の誤差、センサのターゲットの変化による誤差、軸受座標のずれなどのために生じていると思われる。また、より高精度の精密位置決めを行うためには、手先のセンサフィードバックが必要であると考えられる。

5. おわりに

関節に磁気軸受機構を持つマニピュレータにおいて、その磁気軸受機構を能動的に制御することによって、手先の精密位置決めを行うための指針を示した。また試作した装置において実際に位置決めを行いその機能の確認を行った。今後手先のセンサ情報に基づいた位置決めを行いその精度などの性能面での評価を行う予定である。

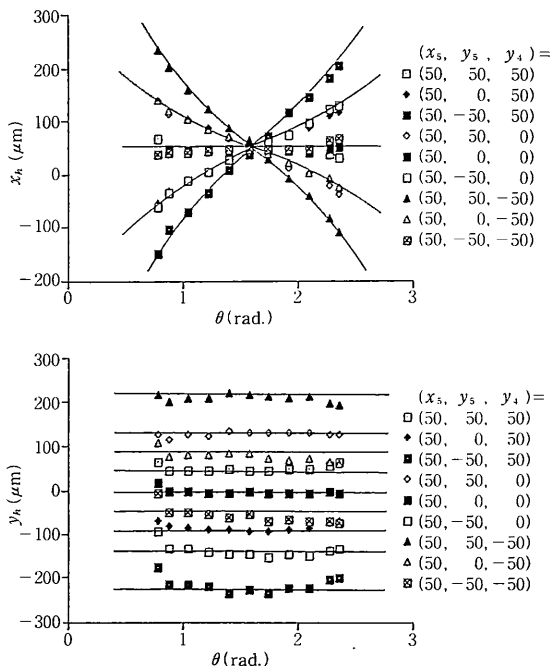


Fig. 8 Micro-manipulation by magnetic bearing joints

謝 辞

本研究を行うにあたり多大な御協力をいただいた山内恒和氏 (アイシン精機株式会社) に謝意を表します。なお本研究の一部は、昭和62, 63年度文部省科学研究費補助金 (一般研究 B 62460104) の助成を受けて行ったものである。

(1991年1月28日受理)

参 考 文 献

- 樋口, 岡, 菅原: 磁気軸受機構による非接触関節を持つクリーンルーム用ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 8 No. 5, 533-540, 1990
- Higuchi, Kawakatsu: Super-clean actuator for machines and robots, Proc. IECON' 87: Motor Control and Power Electronics, 303-310, 1987
- 樋口, 小森: 非接触Z-Q位置決めアクチュエータ, 日本ロボット学会第6回学術講演予稿集, 281-282, 1988
- 吉川: ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988