

# 磁気軸受を利用したクリーンルーム用ロボットの開発

Development of Clean Room Robot Using Magnetic Bearings

樋口 俊郎\*・岡 宏一\*・菅原 宏\*

Toshiro HIGUCHI, Koichi OKA and Hiroshi SUGAWARA

## 1. はじめに

近年、半導体製造工程、生体工学、特殊材料製造工程、宇宙空間などでの作業への要求が、高まってきている。これらの非常にクリーンな環境や真空中では、ほこりの発生や安全性などの面から、作業をロボットなどの自動機械に行わせることが望まれている。しかし、現在のほとんどの多関節ロボットに用いられるボールベアリングやローラベアリングなど機械的接触による軸受は、潤滑の必要性や摺動面の存在のため、潤滑法や塵埃の発生の問題点がある。

ロボット関節の軸受に磁気軸受機構を利用することにより、軸受部を非接触にすることが可能である。軸受部に機械的接触および潤滑油を排除することによって、ほこりの発生、潤滑に対する配慮の必要、非線形摩擦の影響などのないロボットマニピュレータを開発することが可能となる。また磁気軸受を能動的に制御することにより、ロボットに以下のような機能を持たすことができる。

- 1) 磁気軸受のステータに対するロータの位置制御を行うことによる手先の精密位置決め。
- 2) 磁気軸受の発生力を制御することによる力制御。
- 3) コイルの電流やロータ位置の検出による関節の支持力や手先に加わる力の計測。
- 4) 磁気軸受の剛性や減衰特性を変えることによる振動制御。

本報では、磁気軸受を応用した非接触支持関節を持つロボットの構造、制御方式、機能などの検討、および試作したロボットマニピュレータの紹介を行う。

## 2. ロボットの構造

完全に機械的接触を排除した理想的なクリーンルーム用ロボットを実現するためには、すべての関節のアクチュエータと軸受を非接触にしなければならないが、今回の報告では、その第一段階の研究として、重要な一部

\*東京大学生産技術研究所 第2部

の関節についてのみ磁気軸受を利用した構造のロボットについて考察する。

### 2.1 ロボットの基本構造

図1にロボットの基本構造を示す。ロボットは平行リンク型であり、リンク1、2は、ジョイント1、2に取り付けられたモータによって駆動される。リンク4は、出力リンクであり、その先端は手先を表している。磁気軸受は、上部2つの関節（ジョイント4、5）に使用されており、リンク4は非接触支持される。クリーンルーム内の空気は、通常天井から床の方向へ流れることを考慮すると、上部2つの関節は、最も環境に与える影響が大きいと考えられる。また、この2つの磁気軸受関節を制御することによってリンク4の運動の自由度を制御できるため、提案した機能を検証することができる。

### 2.2 磁気軸受の基本構造

図2に5自由度制御型磁気軸受の基本構造を示す。これは、センサによって計測された信号をもとに、ロータの3自由度の並進運動と2自由度の回転運動をすべて能動的に制御するものである。すなわち、ロータの半径方向におかれた8個の電磁石(①～⑧)と軸方向におかれた2個の電磁石(⑨、⑩)とによって、ロータの回転軸回りの回転を除く5自由度の運動を制御する。

### 2.3 実験装置

試作したロボットの外観を写真1に示す。このロボッ

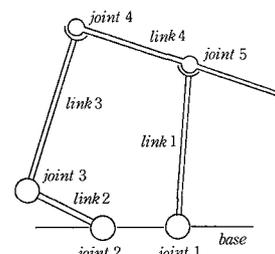


図1 ロボットの基本構造

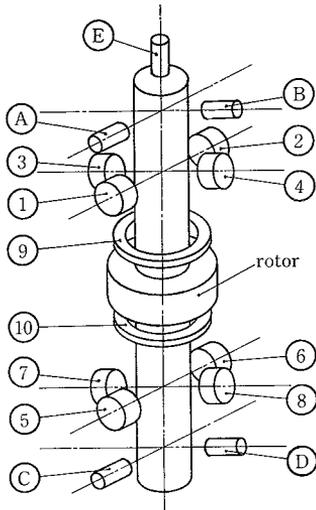


図 2 5 自由度制御形磁気軸受の基本構造

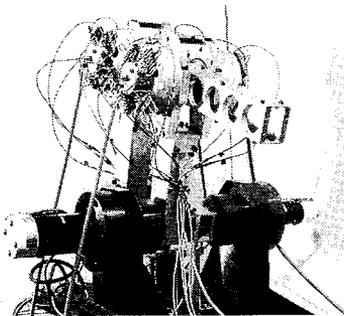


写真 1 ロボットの外観

トの構造は、ジョイント 1, 2 の軸が一致し、向き合うリンクが平行となっている。リンク 1 とリンク 3 の長さは 300mm、リンク 2 とジョイント 4, 5 の軸間距離は 170mm である。ジョイント 1, 2 に取り付けられた DC モータは、減速器を介してリンク 1, 2 を駆動する。

磁気軸受関節の構造を図 3 に示す。斜線部は、写真 2 に示されるリンク 4 の部分であり磁気軸受のロータに相当する。その他の部分はリンク 1, 3 に固定されているステータ部であり、10 個の電磁石と 5 個のギャップセンサが取り付けられている。軸方向の電磁石を写真 3 に、半径方向の電磁石を写真 4 に示す。ロータが中心位置にある場合、磁石の空隙はすべて 0.7mm であり、ロータの稼動範囲は、半径方向に 0.5mm、軸方向に 0.7mm である。電磁石の仕様を表 1 に示す。ギャップセンサは、渦電流式変位計を用い、その分解能は 0.5 $\mu$ m である。ステータ部の重量は、約 6.5kg、リンク 4 の重量は、約 7kg である。

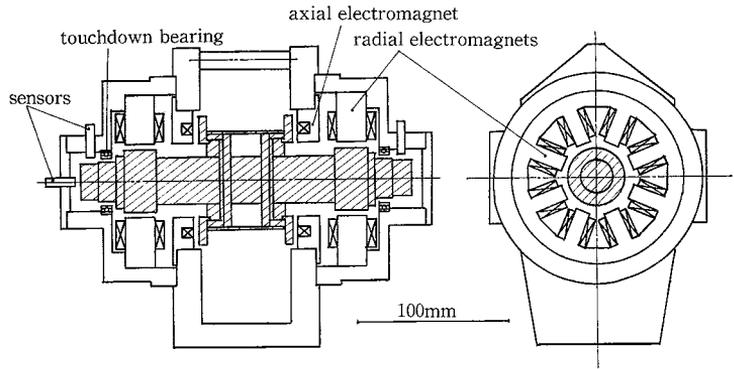


図 3 磁気軸受関節の構造

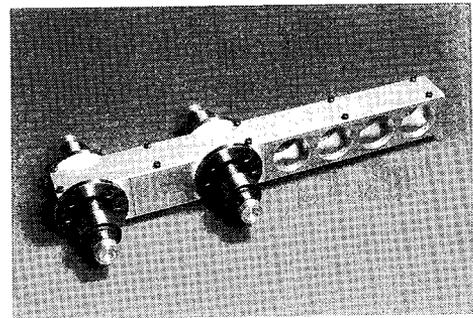


写真 2 リンク 4 の外観

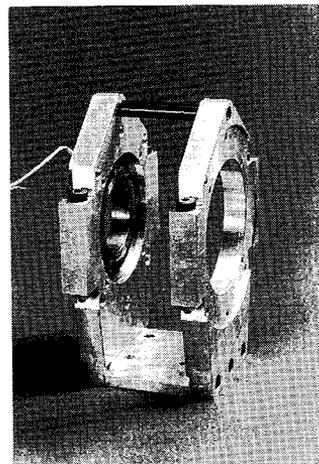


写真 3 軸方向の電磁石

### 3. ロボットの運動方程式

磁気軸受関節によって制御が必要な自由度は、リンク 4 の 6 自由度と、リンク 3 のジョイント 3 回りの回転との合計 7 つである。1 つの磁気軸受関節は、5 自由度を独立に制御することができるため、このロボットは、3

研 究 速 報

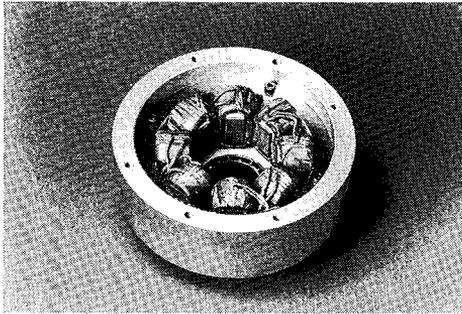


写真 4 半径方向の電磁石

表 1 電磁石の仕様

	Radial Magnet	Axial Magnet
No. of Turns	300	140
Max. current (A)	1.5	1.5
Magnetomotive Force (AT)	450	210
Diameter of coil winding (mm)	0.5	0.5
Attractive force (gap=1mm, kgf)	5.2	2.8
Flux density (Wb/m <sup>2</sup> )	0.8	0.25

つの冗長自由度を持つ。本報の考察では、図 1 に示される平面内の運動に制限するため、冗長自由度は存在しない。

図 4 に以下の式で利用する記号を示す。

- $O$  ; 座標原点 (ジョイント 1 の回転軸)
- $X, Y$  ; 座標軸
- $x_{gi}, y_{gi}$  ; リンク  $i$  の重心位置の座標
- $l_i$  ; リンク  $i$  の長さ
- $m_i$  ; リンク  $i$  の質量
- $q_i$  ; 関節から重心位置までの距離
- $I_i$  ; リンク  $i$  の重心回りの回転モーメント
- $\theta_i$  ; リンクの  $X$  軸となす角度
- $\tau_i$  ; モータの駆動トルク

$F_{xi}, F_{yi}$  ; 磁気軸受がロータに及ぼす力  
 $g$  は重力加速度、 $\dot{\phantom{x}}$  は時間微分を表すものとする、各リンクの運動方程式は以下ようになる。

リンク 1

$$(I_1 + m_1 q_1^2) \ddot{\theta}_1 = \tau_1 + F_{5x} l_1 \sin \theta_1 - F_{5y} l_1 \cos \theta_1 - m_1 g q_1 \cos \theta_1 \quad (1)$$

リンク 2

$$(I_2 + m_2 q_2^2) \ddot{\theta}_2 = \tau_2 + F_{3x} l_2 \sin \theta_2 - F_{3y} l_2 \cos \theta_2 - m_2 g q_2 \cos \theta_2 \quad (2)$$

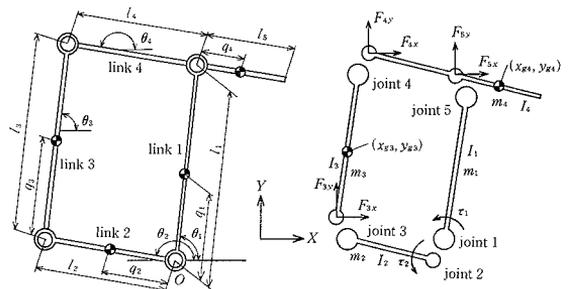


図 4 記号

リンク 3

$$F_{3x} - F_{4x} = m_3 \ddot{x}_{g3},$$

$$F_{3y} - F_{4y} - m_3 g = m_3 \ddot{y}_{g3} \quad (3)$$

$$(F_{4x}(l_3 - q_3) + F_{3x} q_3) \sin \theta_3 - (F_{4y}(l_3 - q_3) + F_{3y} q_3) \cos \theta_3 = I_3 \ddot{\theta}_3 \quad (4)$$

$$x_{g3} = l_2 \cos \theta_2 + q_3 \cos \theta_3,$$

$$y_{g3} = l_2 \sin \theta_2 + q_3 \sin \theta_3 \quad (5)$$

リンク 4

$$F_{4x} + F_{5y} = m_4 \ddot{x}_{g4} \quad (6)$$

$$F_{4y} + F_{5y} - m_4 g = m_4 \ddot{y}_{g4} \quad (7)$$

$$-(F_{4x}(l_4 + q_4) + F_{5x} q_4) \sin \theta_4 + (F_{4y}(l_4 + q_4) + F_{5y} q_4) \cos \theta_4 = I_4 \ddot{\theta}_4 \quad (8)$$

(5) 式の 2 階微分を (3) 式に代入し、(2)、(4) 式の  $F_{3x}, F_{3y}$  を消去すると、

$$(I_2 + m_2 q_2^2 + m_3 l_2^2) \ddot{\theta}_2 + m_3 q_3 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) \ddot{\theta}_3 = \tau_2 + F_{4x} l_2 \sin \theta_2 - F_{4y} l_2 \cos \theta_2 - m_2 g q_2 \cos \theta_2 - m_3 g l_2 \cos \theta_2 - m_3 q_3 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_3^2 - m_3 q_3 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_2 + (I_3 + m_3 q_3^2) \ddot{\theta}_3 = F_{4x} l_3 \sin \theta_3 - (F_{4y} l_3 + m_3 g q_3) \cos \theta_3 + m_3 q_3 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_2^2 \quad (9)$$

となる。ロボットの運動方程式は、(1) 式と、(6) - (10) 式で表される。

4. ロボットの制御方式と機能

磁気浮上システムは、開ループ系では不安定であるため、フィードバック制御することが必要である。本報で提案する磁気軸受関節は、単にリンク 4 を安定浮上させるだけでなく、能動的な制御を行うことによって、ロボットに機能的な作業を行わせることを可能にする。

制御システムのブロック図を図 5 に示す。システムは、2 つの部分で構成されている。1 つは、図 5 の上部に示されるモータの制御ループである。他の 1 つは、下部に示される磁気軸受の制御ループである。磁気軸受の制御部は、安定化のための P.D. 制御に加えて、ロボットの姿

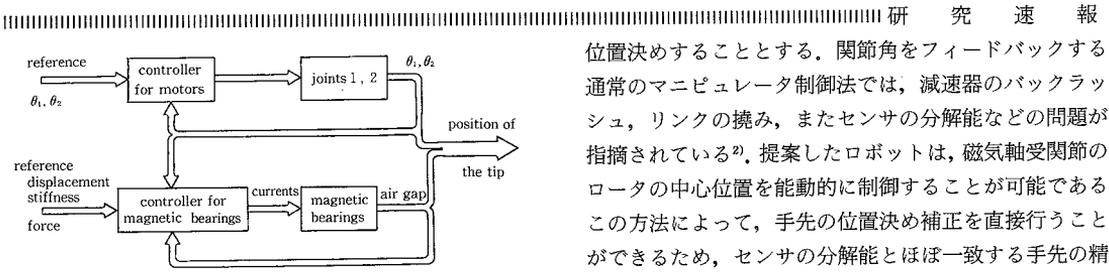


図5 制御システムのブロック図

勢やダイナミクスの影響の考慮や、機能的動作の実現のための補償を行う。

4.1 ロボットの姿勢とダイナミクスの考慮

磁気軸受関節に働く力は、ロボットの姿勢や、ダイナミクスの影響により変化する。これらの影響を考慮することにより、ロボットは、より精密かつ高速な動作を行うことが可能になる。

磁気軸受関節において、ロータの中心とステータの中心が一致するように動くとき、

$$x_{g4} = l_1 \cos \theta_1 - q_4 \cos \theta_4, \tag{11}$$

$$y_{g4} = l_1 \sin \theta_1 - q_4 \sin \theta_4 \tag{12}$$

$$\theta_3 = \theta_1, \theta_4 = \theta_2 \tag{12}$$

の関係が成立する。このとき、ジョイント4, 5の磁気軸受関節に働く力をFとし、(11), (12)式を(6), (7), (8), (10)式に代入すると、以下の式が与えられる。

$$T_m f = g_v \tag{13}$$

ただし、

$$T_m = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -q_4 \sin \theta_2 & q_4 \cos \theta_2 & -(q_4 + l_4) \sin \theta_2 & (q_4 + l_4) \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & -l_3 \sin \theta_1 & -l_3 \cos \theta_1 \end{pmatrix}$$

$$F = (F_{5x}, F_{5y}, F_{4x}, F_{4y})'$$

$$g_v = \begin{pmatrix} -m_4 l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + m_4 q_4 \cos \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \\ -m_4 l_1 \sin \theta_1 \ddot{\theta}_1 + m_4 q_4 \sin \theta_2 \ddot{\theta}_2 \\ -m_4 l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + m_4 q_4 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \\ + m_4 l_1 \cos \theta_1 \ddot{\theta}_1 - m_4 q_4 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 + m_4 g \\ I_4 \ddot{\theta}_2 \\ (I_3 + m_3 q_3^2) \ddot{\theta}_1 + m_3 l_2 q_3 \cos(\theta_1 - \theta_3) \ddot{\theta}_2 \\ + m_3 l_2 q_3 \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2^2 - m_3 q_3 g \cos \theta_1 \end{pmatrix}$$

磁気軸受関節は、 $F = T_m^{-1} g_v$ によって求められる力を発生することによって、ロボットの姿勢やダイナミクスの影響を無視することができる。

4.2 ロボットの機能

高精度位置決めとは、対象物に対して、手先を精密に

位置決めすることとする。関節角をフィードバックする通常のマニピュレータ制御法では、減速器のバックラッシュ、リンクの撓み、またセンサの分解能などの問題が指摘されている<sup>2)</sup>。提案したロボットは、磁気軸受関節のロータの中心位置を能動的に制御することが可能である。この方法によって、手先の位置決め補正を直接行うことができるため、センサの分解能とほぼ一致する手先の精度を得ることができると考えられる。

ロボットが研削やはめ合いなどの作業を行う場合、手先で発生する力を制御したり、手先の剛性を変化させることにより、複雑な作業への応用が可能になると考えられる。磁気軸受関節のバイアス電流を変えたり、位置フィードバックゲインを変えることによって、リンク4の手先に発生する力や剛性を制御することができる。

ロボットに精密な動きを行わせる場合には、手先に加わる重量などを推定して制御を行う必要がある。磁気軸受関節では、電磁石のコイルに流れる電流やロータの変位から、静的な力のバランス方程式を解くことによって、手先に加わる力を推定することが可能である。求めた力をもとに制御パラメータを修正することによって、より正確な動きを実現させることができる。

磁気軸受がリンク4に加える力の方向は、ロボットの姿勢により変化する。このため、手先の持つ重量の変化や衝突などの衝撃的な力によるリンク4の振動を速やかに減衰させるために、2つの磁気軸受関節が、ロボットの姿勢を考慮しながら、協調して制御することが必要である。この制御をより積極的に行うことにより、ロボットのベース部の振動を手先に伝えない制御法も可能であると考えられる。

5. おわりに

関節の一部に磁気軸受を用いたロボットを提案した。これによって軸受の摩擦の問題や、潤滑の問題を解決することが期待できる。また磁気軸受の機能を能動的に利用することにより高精度位置決め、力計測、力制御などを行える可能性を示した。現在、高精度位置決め、力計測、力制御などの実験による確認を行っている。

(1988年7月29日受理)

参考文献

- 1) 樋口, 水野: 5自由度制御形磁気軸受制御系の研究, 計測自動制御学会論文集, 18-5, 507/513 (1982)
- 2) 高野: DDロボットの問題点, 日本ロボット学会誌, 5-1, 12/13 (1987)