

磁気軸受機構を利用した自動組立用ハンドの開発

Magnetically Supported Intelligent Hand (MSIH) for Precision Automated Assembly

樋 口 俊 郎*・藤 原 茂 喜**・津 田 匡 博*

Toshiro HIGUCHI, Shigeki FUJIWARA and Masahiro TSUDA

1. 緒 言

組立作業の自動化にあたって、はめあい・挿入作業は、基本的な課題の1つである。はめあい作業を自動化するためには、図1のような位置・姿勢のずれ（はめあい誤差）を、修正する必要がある。そのため、各種の挿入方法と、それに基づいたロボットハンドが提案されている。それらの挿入方法は、大別して3つに分けられる。A) 弾性変形を利用した柔軟構造により、はめあい誤差を吸収する受動的挿入法。B) 挿入時の反力を検出し、その値をフィードバックして位置の修正をする能動的挿入法。C) 両者の方法を組み合わせた複合挿入法。

われわれは、上記3つのいずれの挿入も実現できる、2方式の組立用デバイスを開発した。1つは、ロボットハンドのリスト部分に磁気軸受の機構を応用することにより、ハンドを非接触支持する、磁力支持方式精密自動組立用ハンド（磁力支持ハンド）¹⁾である。もう1つは、ボイスコイルモータを利用した組立装置²⁾である。

本報告では、前者の磁力支持ハンドの構造・機能・制御系について説明し、それに基づいて製作した実験システムを示す。

2. 磁力支持ハンドの構造

磁力支持ハンドの基本構造を図2に示す。リスト部分に5自由度制御形磁気軸受の機構³⁾を応用し、ワークをつかむグリッパーを備えたハンドシャフトを非接触支持する。リスト機構は、2組のラジアル磁気軸受と1組のアキシャル磁気軸受から構成される。ラジアル磁気軸受は、ハンドシャフトの半径方向の2自由度を制御する4個2対の電磁石と2個のギャップセンサからなる。アキシャル磁気軸受は、ハンドシャフトの軸方向の1自由度を制御する2個1対の電磁石と1個のギャップセンサからなる。計10個5対の電磁石により、ハンドシャフトの

軸回りの回転を除く5自由度を制御する。

3. 磁力支持ハンドの機能

磁力支持ハンドは以下の3つの機能を持つ。これらの機能を用いて、受動的挿入だけでなく、能動的挿入や複合挿入が可能となる。

3.1 可変コンプライアンス機能（フレキシブルRCC機能）

C.S.Draper LaboratoryのWhitney, Nevins等が提案している、組立作業用デバイスRemote Center Com-

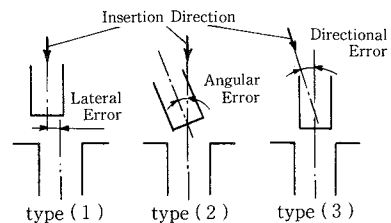


図1 はめあい誤差

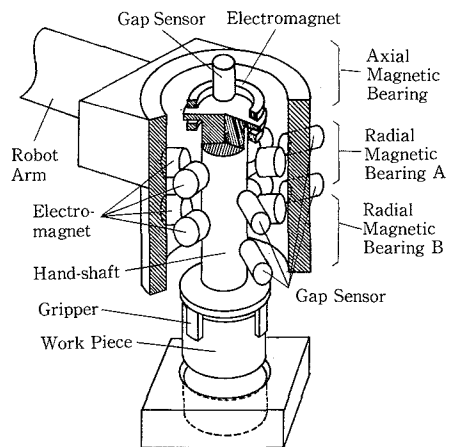


図2 磁力支持ハンドの基本構造

*東京大学生産技術研究所 第2部

**松下電工(株)生産技術研究所

研究速報
pliance (RCC)⁹⁾は簡便でかつ高性能であることから、高い評価を得ている。

多入力（センサ出力値）多出力（電磁石の電流値）の制御系をもつ磁力支持ハンドは、フィードバックゲインマトリクス K の設定により、指定したコンプライアンス、ダンピングでワークを弾性支持することができる。この機能により、RCCと同等の弾性を磁力支持ハンドに持たせることが可能である。

RCCの機能を図3に示す。このように弾性中心が挿入物の先端にある機能をRCCと言う。弾性中心とは、弾性マトリクス K が対角行列となる座標系の原点のことである。Whitney等は、その弾性中心がワークの先端にあるとき、挿入が容易に行われることを示している。

磁力支持ハンドでは、弾性中心を、いろいろな種類のワークに合わせて、それぞれ最適の位置に置くことができる。また、RCCデバイス等の機械式弾性ハンドでは与えることの難しかったダンピング機能（ダンピングマトリクス P ）も付加することができる。

さらに、挿入過程において、そのときの挿入状態に応じ、弾性を変化させるなどの新しい挿入法も可能にする。

3.2 力覚センサ機能⁹⁾

磁力支持ハンドは、ワークに働く挿入接触力・モーメントの検出、およびワークの初期位置からの変位の検出ができる。

挿入力・モーメントは、電磁石がハンドシャフトに及ぼす力とのつりあい関係から導出される。ワークの変位はギャップセンサの出力から求められる。この機能により、挿入物と被挿入物のあいだの位置・姿勢のずれを推定することができる。

これらの力覚センサ機能により、ワークの力・モーメント・変位を監視しながら、自動挿入することが可能となる。

3.3 微小位置・姿勢制御機能

磁力支持ハンドはワークの位置・姿勢を μm オーダー

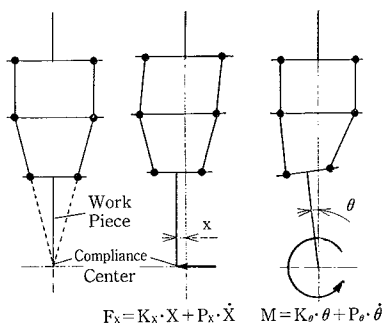


図3 RCCの機能

（ギャップセンサの分解能のオーダー）で制御することが可能である。センサ出力値に基づき、電磁石の電流値をコントロールすることにより、この機能を実現できる。

微小位置・姿勢制御機能を用いて、組立時のはめあい誤差を能動的に修正しながら挿入することができる。

4. 磁力支持ハンドの制御系

電磁石の吸引力による非接触支持は、本来不安定な系であるが、ギャップセンサの出力にゲインマトリクスをかけ、電磁石の電流にフィードバックすることにより、安定化される⁹⁾。制御系のブロック線図を図4に、制御系のパラメータを図5に示す。

制御対象への入力は、各電磁石に流す10個の電流値 I_α 、出力は各ギャップセンサの5個の出力値のベクトル $D_s = (D_{sxA}, D_{sxB}, D_{syA}, D_{syB}, D_{sz})$ とする（ $\alpha = xAP, xAM, xBP, xBM, yAP, yAM, yBP, yBM, zP, zM$ ）。フィードバックゲインマトリクス K_s, P_s を適当に選ぶことにより、制御系を安定にできる。電流 I_α は、定常電流 $I_{0\alpha}$ とフィードバック電流 i_α の和である。フィードバックするのは、センサの出力ベクトル D_s と目標ベクトル D_{s0} の差 d_s である。

5. 磁力支持ハンドの原理

基準座標系O-XYZを定義する。指定された弾性中心の位置を座標原点とする。リスト機構の中心軸に平行にZ軸をとる。X軸、Y軸は電磁石と平行となるように図5のように定める。この座標系は、リスト機構に固定されている。

定常状態では、ハンドシャフトに加わっている力はつりあっている。電磁石 α がハンドシャフトに及ぼす力を F_α とする。 F_α は電磁石とハンドシャフトの空隙 D_α と電流値 I_α の関数 $F_\alpha(I_\alpha, D_\alpha)$ である。つりあい方程式は、 $F_\nu = F_{\nu P} - F_{\nu M}$ （ $\nu = xA, xB, yA, yB, z$ ）として、

$$\begin{aligned} F_{xA} + F_{xB} + F_{xe} &= 0 \\ F_{yA} + F_{yB} + F_{ye} &= 0 \\ F_z + F_{ze} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

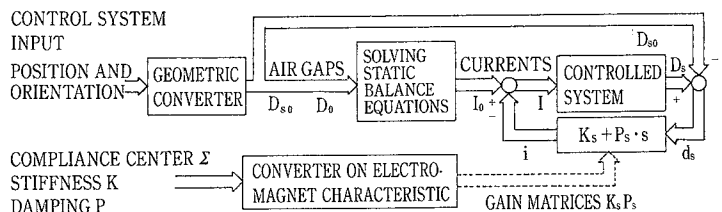


図4 制御系のブロック線図

研 究 速 報

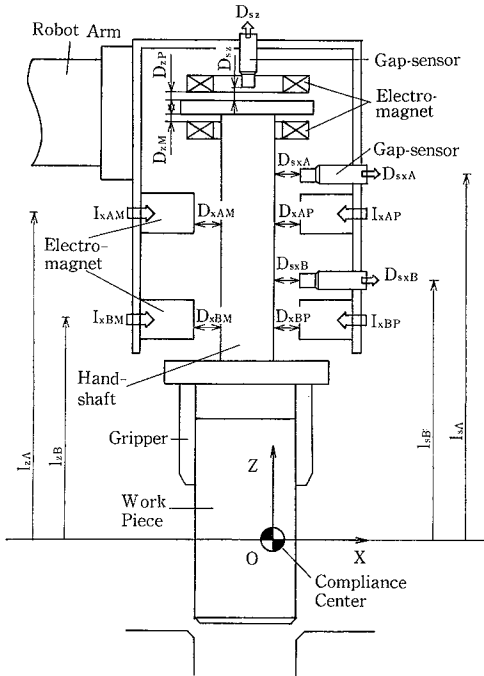


図 5 制御系のパラメータ

$$\begin{aligned}
 &F_z \cdot l_y - F_{yA} \cdot l_{zA} \\
 &\quad - F_{yB} \cdot l_{zB} + M_{xe} = 0 \\
 &- F_z \cdot l_x + F_{xA} \cdot l_{zA} \\
 &\quad + F_{xB} \cdot l_{zB} + M_{ye} = 0
 \end{aligned}$$

$F_{xe}, E_{ye}, F_{ze}, M_{xe}, M_{ye}$ は、座標原点を中心としてハンドシャフトに働く外力・モーメントの総和である。

指示されたハンドシャフトの目標位置・姿勢より $D_{0\alpha}$, D_{s0} がもたらされる。これを $F_\alpha(I_\alpha, D_\alpha)$ に代入し、式(1)より $I_{0\alpha}$ を解く。 $I_{0\alpha}$, D_{s0} を入力することによりハンドシャフトの微小位置・姿勢制御が可能となる。

ハンドシャフトに固定された座標系 $O'-X'Y'Z'$ を定義する。ハンドシャフトが目標位置にあるとき、 Σ と Σ' は一致するようにする。ハンドシャフトが目標位置からずれたときの O' の座標値 (x, y, z) と Z' 軸の X 軸、 Y 軸回りの回転角 (θ_x, θ_y) により、ハンドシャフトの位置・姿勢ベクトル $r = {}^t(x, y, z, \theta_x, \theta_y)$ を定義する。

F_α を $I_{0\alpha}$, $D_{0\alpha}$ のまわりで 1 次近似する。

$$\begin{aligned}
 F_\alpha &= F_{0\alpha} + A_{I\alpha} \cdot i_\alpha - A_{D\alpha} \cdot d_\alpha \\
 &= F_{0\alpha} + f_\alpha
 \end{aligned} \tag{2}$$

つぎのように記号を定義する。

$$\begin{aligned}
 f_v &= f_{vP} - f_{vM} \\
 i_\alpha &= I_\alpha - I_{0\alpha} \\
 d_\alpha &= D_\alpha - D_{0\alpha} \\
 d_v &= -d_{vP} = d_{vM}
 \end{aligned}$$

$i_v = -i_{vP} = i_{vM}$
 $d = {}^t(d_{xA}, d_{xB}, d_{yA}, d_{yB}, d_z)$
 $i = {}^t(i_{xA}, i_{xB}, i_{yA}, i_{yB}, i_z)$
 r, d, d_s はたがいに変換でき、次のように変換マトリクスを定義する。

$$d = T_d r, \quad d = T_s d_s \tag{3}$$

指示されたハンドシャフトの支持弾性・ダンピングを考慮して、式(2)を式(1)に代入する。弾性マトリクス K , ダンピングマトリクス P は、座標原点が弾性中心であるため、ともに対角行列である。

$$K r + P \dot{r} + A_i i + A_D d = 0 \tag{4}$$

のかたちに変形できる。式(4)を i について解くと、

$$\begin{aligned}
 i &= -K_s d_s - P_s \dot{d}_s \\
 K_s &= A_i^{-1} (K T_d^{-1} + A_D) T_s \\
 P_s &= A_i^{-1} P T_d^{-1} T_s
 \end{aligned} \tag{5}$$

ここでもとめられた K_s, P_s をフィードバックゲインマトリクスとおくことにより、指示した弾性中心・弾性・ダンピングでハンドシャフトを支持することができる。つまり、可変コンプライアンス機能が実現できる。

静的つりあい状態では、制御システムは D_α, I_α が既知なので、式(1)より外力・モーメントを求めることができる。

6. 実験システム

実験装置の概観を図6に、実験システムの基本構成を図7に示す。実験システムは、磁力支持ハンド、XYテーブル、Z位置決め装置、制御システムから構成される。

磁力支持ハンドのハンドシャフトの可動範囲は、電磁

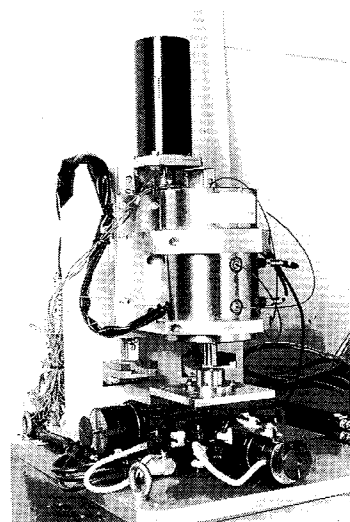


図 6 実験装置の概観

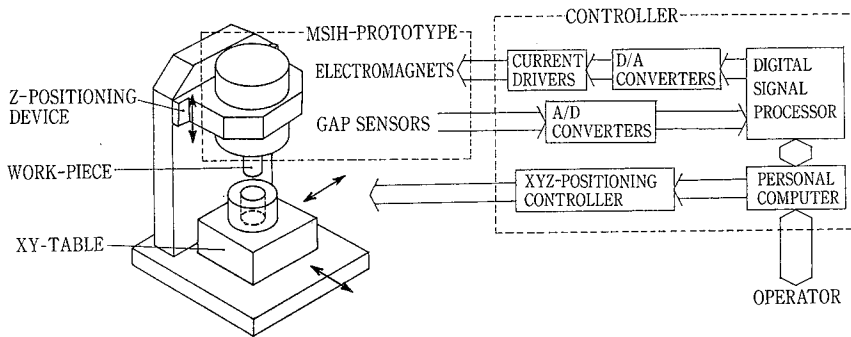


図 7 実験システムの基本構成

石とハンドシャフトの空隙により制限されている。また、本装置では、ワークを X 方向、Y 方向にそれぞれ最大±0.62mm 並進させ、±1 deg 傾けることができる。Z 方向には、±1 mm 動かせる。

Z 位置決め装置は、磁力支持ハンドを Z 軸方向に分解能 1 μm で動かすことができる。XY テーブルは、被挿入物を 1 μm の分解能で X、Y 方向に動かせる。XY テーブルにより、あらかじめ挿入物と被挿入物のあいだにはめあい誤差を作っておくことができる。

制御システムは、複雑な制御が要求されるため、デジタル制御とした。また、制御応答性を高速化するために、Digital Signal Processor (DSP) を用いた⁹⁾。制御システムは、DSP 回路、10 個の D/A コンバータ回路、5 個の A/D コンバータ回路、10 個の定電流駆動回路、パーソナルコンピュータ、XY テーブル制御回路、Z 位置決め装置制御回路からなる。制御周期は、もっとも短い場合で 59 μsec が可能である。

7. 挿入実験

この実験システムを用いて自動挿入作業を行った。径 19.995mm の丸棒を、次の 4 種類の径をもつ丸穴に挿入した。1) 20.003mm, 2) 20.013mm, 3) 20.024mm, 4) 20.052mm である。すべての丸穴は 1 mm, 45 deg の面とりをもつ。丸棒と丸穴の軸心のずれは、それぞれ 1) 0.2mm, 2) 0.35mm, 3) 0.4mm, 4) 0.5mm であった。丸棒と丸穴の姿勢のずれと、挿入方向のずれは無視できる。ワークを RCC 機能により、受動的挿入法で挿入した結果、いずれの場合も、かみつき等を起こすことなく挿入に成功した。

8. 結 論

- 1) 磁力支持ハンドは磁気軸受構造を応用したリスト

機構を持ち、制御された電磁石の吸引力により、ハンドシャフト・ワークを非接触支持する。

2) 磁力支持ハンドは 3 つの主な機能を持つ：A) 可変コンプライアンス機能、B) 微小位置・姿勢制御機能、C) 力覚センシング機能。これらの機能を用いて、受動的挿入や能動的挿入、複合挿入などが可能となる。

3) 磁力支持ハンドに上記の機能を与えるような制御系が設計できる。これは 5 自由度制御形磁気軸受制御系の応用である。

4) 磁力支持ハンドは、RCC などのこれまでに提案されている挿入方法の多くを実現できる。また、磁力支持ハンドの機能を十分に使った新しい挿入法の実現も期待できる。

5) この実験システムで、RCC の弾性を持たせ、自動組立作業を行った結果、挿入に成功した。

(1988年 7 月 5 日受理)

参 考 文 献

- 1) 樋口・津田・藤原 “磁力支持方式精密自動組立用ハンドの開発”，第 5 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp 473-476 (1987)
- 2) 樋口・津田・藤原 “ボイスコイルモータを利用した 2 次元精密自動組立装置の試作”，第 5 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp 477-478 (1987)
- 3) 樋口 “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 Vol. 18, No. 5, pp 507-513
- 4) Whitney “What is RCC and What can it do?”, Proc. of 9th ISIR, pp 135-152
- 5) 樋口・津田・藤原 “磁力支持方式精密自動組立用ハンドの機能”，昭和 63 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，pp 219-220
- 6) 樋口・津田・藤原 “磁気軸受のデジタル制御システムの開発”，昭和 62 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集，pp 851-852