触覚を用いた精密はめ合い作業*

浅 川 和 雄**

1. ま え が き

産業用ロボットの製造ラインへの導入が盛んに行われているが、位置制御型のロボットでは作業環境からの拘束と関係なく動作してしまうため、組立対象から拘束を受け、かつ微妙な力加減を必要とする組立ラインの自動化は難しい。組立には、部品のはめ合いや取付け作業のように、部品の置かれた絶対的な位置精度でなく、取付け部品と取付けられる部品との相対的な位置精度を必要とする作業が多いからである。位置制御型ロボットで部品のはめ合いを実行するためには、組立対象により決まる移動軌跡をロボット座標に対して正確に記述して、ロボットの先端を所定の軌跡通り正確に制御しなければならない。ところが実際のロボットを見てみると、ロボット自身が持つ機械的誤差や制御上の誤差により絶対的位置精度を高くすることは極めて難しい。このようなことから組立作業には、ロボットと対象物との間の相対位置誤差を補正あるいは吸収するための触覚センサやコンプライアンス・デバイスが必要となる。

本稿では、精密組立用に開発した力センサおよびコンプライアンス・デバイスを通してその原理、構造、応用例等について解説する。

2. コンプライアンスとは

まずコンプライアンスの意味を説明するために、磁気ディスクのスピンデルへの挿入を通してロボットのアームとその作業環境について考えてみる。

挿入時に、アームの移動経路とスピンデルとの間に誤差があると、アームの移動経路と拘束軌跡が一致しないため剛性の高いロボットでは挿入ができない。ところが、バネのようなコンプライアントな手首を持つ図1に示すようなロボットの場合には、バネの働きでハンドをスピ

ンドルの外周に沿って移動することができる。ここでアームは、挿入軸に対し平行に移動し、ハンドはX軸方向のみに自由度を持つ平行板バネを介してアームに取り付けられているとする。この時、磁気ディスクとスピンデルとの間に作用する力 F は、

$$F = k \cdot \Delta x \quad (1)$$

ただし、

k : 平行板バネのスティフネス

Δx : アーム移動軌跡と拘束軌跡間の距離

となる。ここで、スティフネス k が大きいと軌跡誤差が小さくても大きい反力を発生し、アームや作業対象物に過度な力が加わることになる。一方スティフネスが小さいと、軌跡誤差が大きくても過度な反力を発生することなく拘束軌跡になじむ動作が実現できる。スティフネスの逆数をコンプライアンスと呼ぶが、組立ロボット等では拘束軌跡に柔軟に適應できる度合を示す指標と考えることができる。

3. リモート・センタ・コンプライアンス (RCC) ・デバイス

コンプライアントな動作を実現する機構として、ロボット本体とエンドイフェクタとの間にエラストマシェアパッドと呼ばれる特殊なバネ¹⁾で構成されるコンプライ

図1 磁気ディスクの挿入作業

原稿受付 1984年6月27日

* Robot Assembly of Precision Parts Using Tactile Sensor

** (株)富士通研究所制御研究部

図 2 RCC の基本構造

アンス機構と力センサを一体化した RCC デバイスを搭載する方式^{2),3)}が開発されている。RCC はピンと穴のはめ合い作業の際、ピンが穴から受ける反力を受動的に吸収して相対位置誤差や角度ずれを解消する。RCC デバイスの基本構造は図 2 に示すように構成されていて、XY 軸に対する平行移動と回転および Z 軸に対するねじりの 5 自由度を持ち、各反力を各々独立に吸収することができる。また図 3 に示すように、バネのたわみを発光ダイオードと受光ダイオードを組み合わせた変位センサから力ベクトルを検出する方式⁴⁾を採用している。この RCC は既に実用化され、ベアリングの圧入等比較的大きい力でののはめ合い作業へ適用⁵⁾されている。

4. バリャブル・コンプライアンス (VACOM)・デバイス

4.1 VACOM の基本構造

RCC に代表されるバッシュ・コンプライアンス・デバイスは、バネの振動を抑制するため比較的硬いバネを使用しているので、はめ合い時の軌跡誤差が大きくなるとそれに比例して反力が大きくなる。したがって、微小力での組立を要する精密作業への適用には、人のように手首等関節の硬さをアクティブに可変するコンプライアンス・デバイスが必要となる。

この要求を満たすコンプライアンス・デバイスとして開発された VACOM デバイス⁶⁾を紹介する。図 4 に示すように VACOM デバイスは、5 自由度の板バネ機構および 2 自由度の平板型平面モータとを一体化したもので、5 次元力ベクトルセンサおよび硬さ可変機能を持つコンプライアンス・デバイスである。この VACOM デバイスをロボットアーム先端に装着することにより、ロボットの手首の硬さを状況に応じて電気的に変化させ、微小

図 3 RCC と力センサの一体化構造

力で精密はめ合いを実行することができる。

4.2 5 次元力ベクトルセンサ機能

図 5 に示したように、2 層の平行板バネと十字型ダイヤフラムからなる機構は、

- (1) XY 平面に対する変位
- (2) Z 軸に対する変位
- (3) XY 軸に対するねじり

の合計 5 自由度を持つ。したがって、各板バネのたわみ部に歪ゲージを貼ると、5 次元の力ベクトルが検出できる。VACOM デバイスでは、力ベクトルの各成分を略独立して検出できるので、XYZ 軸に対する力および XY 軸に対するトルクの算出が容易である。

ここで、力ベクトルの各成分を求める方法を説明する。VACOM デバイスでは各板バネに貼られた歪ゲージから以下に示す $M_a \sim M_f$ が検出される。

$$M_a = a_1 \cdot F_z + M_y \quad (2)$$

$$M_b = a_2 \cdot F_z + M_x \quad (3)$$

$$M_c = a_3 \cdot F_z - M_y \quad (4)$$

図 4 VACOM デバイスの構造

図 5 5次元力ベクトルセンサ

$$M_d = a_4 \cdot F_z - M_x \quad (5)$$

$$M_e = n \cdot F_y \quad (6)$$

$$M_f = m \cdot F_x \quad (7)$$

ただし、力およびモーメントの符号は、図5に示した矢印方向を正とする。力ベクトルの各成分は、式(2)から式(7)より以下のように求まる。

$$F_x = M_f / m \quad (8)$$

$$F_y = M_e / n \quad (9)$$

$$F_z = (M_a + M_b + M_c + M_d) / (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) \quad (10)$$

$$M_x = (M_b - M_d - F_z(a_2 - a_4)) / 2 \quad (11)$$

$$M_y = (M_a - M_c - F_z(a_1 - a_3)) / 2 \quad (12)$$

ただし、 $F_{x \sim z}$: X, Y, および Z 軸方向の力

$M_{x \sim y}$: X および Y 軸まわりのトルク

$a_1 \sim a_4$: 歪ゲージのダイヤフラム上の位置

n, m : " の平行板バネ上の位置

$M_{o \sim f}$: " の検出したモーメント

4.3 コンプライアンスの制御

VACOM デバイスでは、XY 平面のコンプライアンスが電氣的に制御できる。平行板バネのたわみを正帰還して見掛けのコンプライアンスを大きく制御し、逆にバネのたわみを負帰還してコンプライアンスを小さく制御する。VACOM デバイスは、図6に示したようにバネのたわみを歪ゲージで検出して、その信号から変位および速度を得る。さらに、モータのコイルに流れる電流を検出し、変位、速度、そして電流を帰還して安定にコンプライアンスを制御する。この制御方法を X 軸方向に関して図7に示した制御ブロック図を用いて説明する。このような制御ブロック図で表される VACOM デバイスの入力に対する変位への伝達関数は、

$$\frac{X(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bl \cdot (k_2/k_1) \cdot s + Bl \cdot (k_3/k_1) + K} \cdot \frac{1}{k_1} \quad (13)$$

図 6 コンプライアンスの制御

図 7 制御ブロック図

ただし、 Bl : 平面モータの力定数

K : 平行板バネのスティフネス

k_1, k_2 および k_3 : 各々電流、速度、および変位の帰還ゲイン

M : 可動部の質量

$R(s)$: 入力信号

s : ラプラス演算子

$X(s)$: 変位信号

と近似的に表すことができる。

式(13)から VACOM デバイスは、図8のモデルと等価と看做せるため、式(13)の定数項および s の一次の項が各々のスティフネスおよび粘性制動係数を表していることになる。したがって、スティフネスおよび粘性制動係数は各々、

$$\text{スティフネス} = Bl \cdot (k_3/k_1) + K$$

図 8 VACOM の等価モデル

$$\text{粘性制動係数} = Bl \cdot k_2/k_1$$

となる。この伝達関数は、 s の各項目が正の値でかつゼロでない範囲で安定である。したがって、 k_1 、 k_2 、および k_3 をこの範囲で変化させるとスティフネスおよび粘性を任意の値に制御することができる。

この制御を実現するためのデバイス側のポイントは、平面モータの電流/力およびバネのたわみ/力の関係が各々リニアであることにある。リニアリティを実現するために VACOM デバイスでは、一定の空隙磁束密度の中に空心コイルを置いて電流に比例した力を発生する平面モータと、さらにこれに摩擦のない平面ガイドである 2 層の平行板バネ機構でガイドする方式を採用している。

このようにして制御される VACOM デバイスのスティフネスの可変範囲の実測値を、ボード線図で示すと図 9 のようになる。共振周波数が 6~90 Hz の範囲で変化していることから、VACOM デバイスのスティフネスは 225 倍と広範囲で制御可能であることがわかる。この場合のスティフネスの変化範囲は、0.16~36 N/mm である。

5. 磁気ディスク装置組立への適用

VACOM デバイスは、微小力での組立に威力を発揮する。このデバイスの有効性を確認するため、微妙な力加減が必要で自動化し難いとされている磁気ディスクのスピンドルへの挿入作業への適用を試みたので紹介する。写真 1 はその実験システムで、ロボットの先端に VACOM デバイスを搭載して 8 インチハードディスク

写真 1 磁気ディスク挿入の実験システム

図 9 VACOM のスティフネス可変範囲の測定

の挿入を行う。この挿入条件は、

- 材 質：スピンドルおよび磁気ディスクともアルミニウム
- スピンドル外径： $\phi 100$ mm
- 挿入隙間： $30 \mu\text{m}$
- 磁気ディスク厚： 2 mm
- 面 取：磁気ディスク $1 \text{ mm} \times 15^\circ$
- スピンドル $1.5 \text{ mm} \times 45^\circ$

である。この挿入過程に発生する磁気ディスクとスピンドル間の反力を、力ベクトルセンサ機能で計測することにより VACOM デバイスを評価できる。

この実験では、ベルトコンベアでの磁気ディスク装置の搬送を想定して、ロボットとスピンドルとの挿入軸位置誤差を 1.1 mm とした。さらに、パッシブ・コンプライアンス・デバイスとの比較のため、VACOM デバイスのスティフネスが 12 N/mm と 0.16 N/mm の場合について実験した。図 10 がこの結果で、挿入軸方向を Z 軸としている。

(1) スティフネスが 12 N/mm の場合

スピンドルの面取り部を通過する時にステッキングが発生しているため、アルミの摩耗粉を発生する恐れがあり好ましくない。さらに挿入力が大きくなると、ダイヤフラムが回転してしまい、2 点接触が起き、磁気ディスクとスピンドルは噛み付いてしまう。この時の挿入圧力は 50 N にもなるため、磁気ディスクとスピンドルに傷を付けてしまう恐れがある。このようなことから、位置誤差が大きい場合従来のコンプライアンス・デバイスでは、対象により使用に制限が生ずる。

(2) スティフネスが 0.16 N/mm の場合

スティフネスを小さくすると安定な搬送ができないので、ここでは VACOM デバイスの硬さを磁気ディスクの搬送時は硬く (36 N/mm)、そして挿入時は柔らかく (0.16 N/mm) している。その制御手順は、始めはスティフネスを 36 N/mm に制御し、磁気ディスクのスピンドルへの接触を挿入力 F_z から検知するとスティフネス

を瞬時に 0.16 N/mm に変化させるのである。このようにして VACOM デバイスのスティフネスを制御すると、挿入力は 12 N/mm の場合の $1/100$ の 0.5 N に低減でき安定に挿入できる。この挿入力は、人手では不可能な値である。これは、ロボットの手首の硬さを可変とすることが微小力作業に有効であることを示している。

5. お わ り に

コンプライアンス・デバイスは、ロボットと作業対象物間の位置誤差を吸収するのに有効なデバイスである。特に、微小力はめ合いではアクティブに硬さを可変とする機構が有用なことを、VACOM デバイスの磁気ディスク挿入への適用を通して説明した。この可変コンプライアンス・デバイスは微小接触力での作業に威力を発揮するため、ならい作業、形状計測用接触子、微小力発生機構、等種々の分野での応用が期待できる。

参 考 文 献

- 1) J. Rebman, "Compliance: The Forgiving Factor", Robotics Today, Fall, pp.151-156, 1979
- 2) D. E. Whitney, "The Remote Center Compliance: What Can It Do?", Robotics Today, pp.135-139, Summer 1979
- 3) S.H. Drake, "High Speed Robot Assembly of Precision Parts Using Compliance Instead of Sensory Feedback", presented at 7th International Symposium on Industrial Robots, pp.87-98, 1977
- 4) C. W. Frasier, "The Model 4 Instrumented Remote Center Compliance", CSDL-C-5601, pp.1-40, April 1983
- 5) J. D. Lane, "Applying the Remote Center Compliance Device in Assembly", Robotics Today, pp.160-164, Spring 1980
- 6) K. Asakawa, "A Variable Compliance Device and its Application for Automatic Assembly", AUTO-FACT 5 Conference Proceedings, pp.10.1-10.17,

図 10 磁気ディスク挿入時の力及びトルク

1983

- 7) 谷江和雄ほか, "メカトロニクス技術者のためのセンサ技術入門", センサ技術, Vol.3 No.6, pp.90-95

浅川和雄 (Kazuo ASAKAWA)

昭和 23 年 6 月 12 日生れ。47 年電通大電気通信学部材料科学卒, 47 年富士通入社, 同年富士通研究所入所。小型サーボモータ, リニア誘導モータ, ロボットの機構と制御, 触覚センサ等に関する研究に従事。

電気学会, 精機学会会員。

(日本ロボット学会正会員)