

精密はめあいロボット

Precision Insertion Control Robot

組立作業のように、人間の手先の感覚を必要とする作業の自動化は、非常に困難とされている。特に、ミクロンの精度を要するはめあい作業は、従来の工業用ロボットや自動組立機械では不可能である。

触覚はめあいロボット“HI-T-HAND Expert”シリーズは、熟練作業者のもつ優れた手先の感覚機能を生体工学的立場で検討し開発したもので、柔軟な手首構造と触覚制御により10 μ 程度のクリアランスのはめあい作業の自動化を可能とした。

汎用誘導電動機及び小形誘導電動機のロータボールベアリングにエンドブラケットをはめあう作業に本ロボット技術を適用し、実用化の見通しを得るとともに、同種の組立工場に一般的に採用することの可能性を確認できた。

後藤達生* Tatsuo Gotô
 武安清雄** Kiyoo Takeyasu
 長野幸夫*** Yukio Nagano
 石村 博*** Hiroshi Ishimura
 松岡 繁**** Shigeru Matsuoka
 磯尾 修**** Osamu Isoo

1 緒 言

生産工程での組立作業は、人間にとっては単調な繰返し作業であっても、これを機械によって自動化しようとするとき非常に高度な制御を必要とし、自動化の波からは全くとり残されてきた。

組立作業のうちでも特にはめあい作業は、二つの物体の相対的な精密位置合わせが難しいこと、また、たとえ位置が合ってもすきまが小さいために、挿入の過程でいわゆるかみつきが生じて挿入不可能になってしまうという問題がある。このため、従来の工業用ロボットや自動組立機械では、ミクロンの精度を要する精密はめあい作業は困難であった。人間でもある程度の熟練を必要とするが、熟練した作業者は精密な位置合わせ及び挿入作業を行なう場合、目よりはむしろ手先の繊細な感覚に頼っていると言われている。

このようなはめあい作業を自動化するアプローチは、最近、ロボットの感覚機能の応用としての研究^{(1)~(3)}、及び適応制御NC(数値制御)組立機の研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾として行なわれている。

我々は、先にロボットの手に接触感覚、圧覚、力感覚及びすべり感覚といった触覚機能を与え、物体を探索してコンパクトに箱詰めする適応的で知能的なロボットの可能性を示した⁽⁶⁾。そして、ここで確立した力感覚利用技術を、更に繊細な制御を必要とするはめあい作業に適用するために、柔軟機構制御という新しい概念のロボット制御技術を開発し、クリアランスが10 μ 程度の精密なはめあい制御を可能とすることができた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この技術は既に日立製作所の電動機組立作業自動化に適用し、実用化の見通しを得ている。

2 はめあい制御に必要な機能

2.1 柔軟機構と触覚

人間の手によるはめあい作業では、特に熟練作業者の場合、対象物体の概略位置決め、手先の柔軟性を利用したシャフトの穴へのあてがい及び繊細な手先感覚のフィードバックによる修正動作と挿入動作が無意識のうちに適切に行なわれている。このようなはめあい作業に必要な制御機能は、図1に示すように、位置決め、感覚、及び機構の柔軟性である。従来の自動組立機やロボットは、これらの要素のうちの位置決め機能だけに依存したものであるとすることができる。人間の場合で

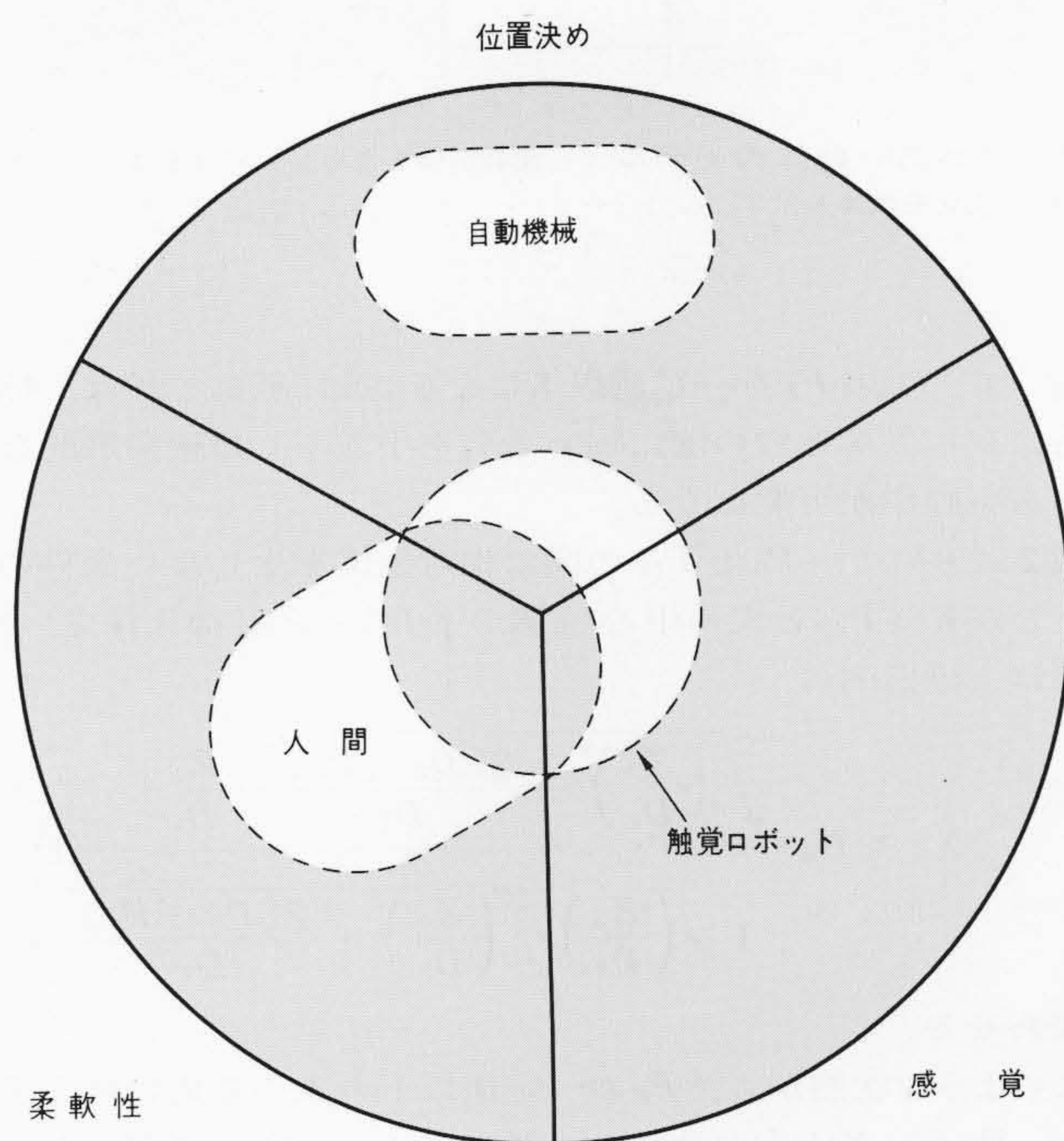


図1 はめあい作業に必要な機能 はめあい作業には、位置決め、感覚及び柔軟性の3機能が必要である。

も、未熟練者は手先の繊細な感覚を持ちながら、これを適切な制御機能に結びつけることができないために、かみつきが起こったり探索のためのすりこぎ運動を繰り返して、挿入に時間がかかるのが普通である。

2.2 はめあい動作の近似モデル

柔軟構造を含むはめあい動作の二次元モデルは、近似的に図2に示すように表わせる。同図において、 P_0 は柔軟機構の変位支点であり、Z方向及びX方向のばねを介して位置決め機構の移動端 P_{00} に結合されている。Z方向のばねは、シャフト及びそのつかみ機構の重量とバランスするように設計されていて、 P_0 のZ方向の相対変位はシャフトと穴との接触関係によって生ずる力 F_z だけで定まる。

* 日立製作所中央研究所 工学博士 ** 日立製作所中央研究所 *** 日立製作所習志野工場 **** 日立製作所多賀工場

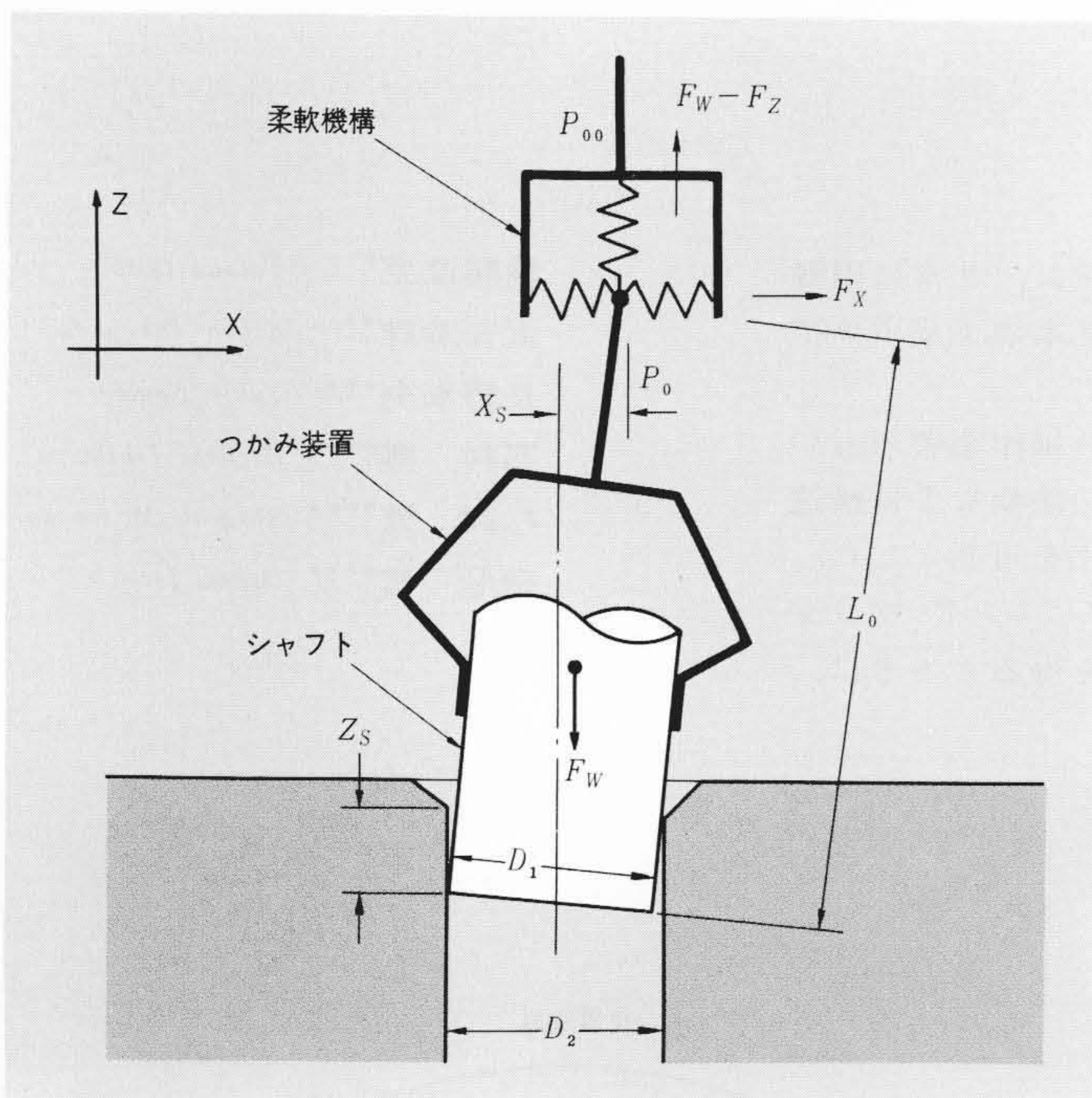


図2 はめあい動作のモデル 柔軟機構を含めたシャフトはめあい動作での一次元モデルを示す。

従って、この F_z を一定値以下になるように制御すれば、挿入時にシャフトと穴の間に加わる力を小さくした軟接触的なはめあい動作が可能になる。

図2において、 P_0 と P_{00} の間に相対変位を生じない条件のもとでの X_s (P_{00} と穴の中心位置のずれ) と Z_s (挿入深さ) の関係は、近似的に

$$X_s \approx L_0 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{Z_s}{D_2}\right)^2 + \frac{2(D_2 - D_1)}{D_2}} - \frac{Z_s}{D_2}}{1 - \left(\frac{Z_s}{D_2}\right) \sqrt{\left(\frac{Z_s}{D_2}\right)^2 + \frac{2(D_2 - D_1)}{D_2}}} \quad \dots(1)$$

と表わせる。

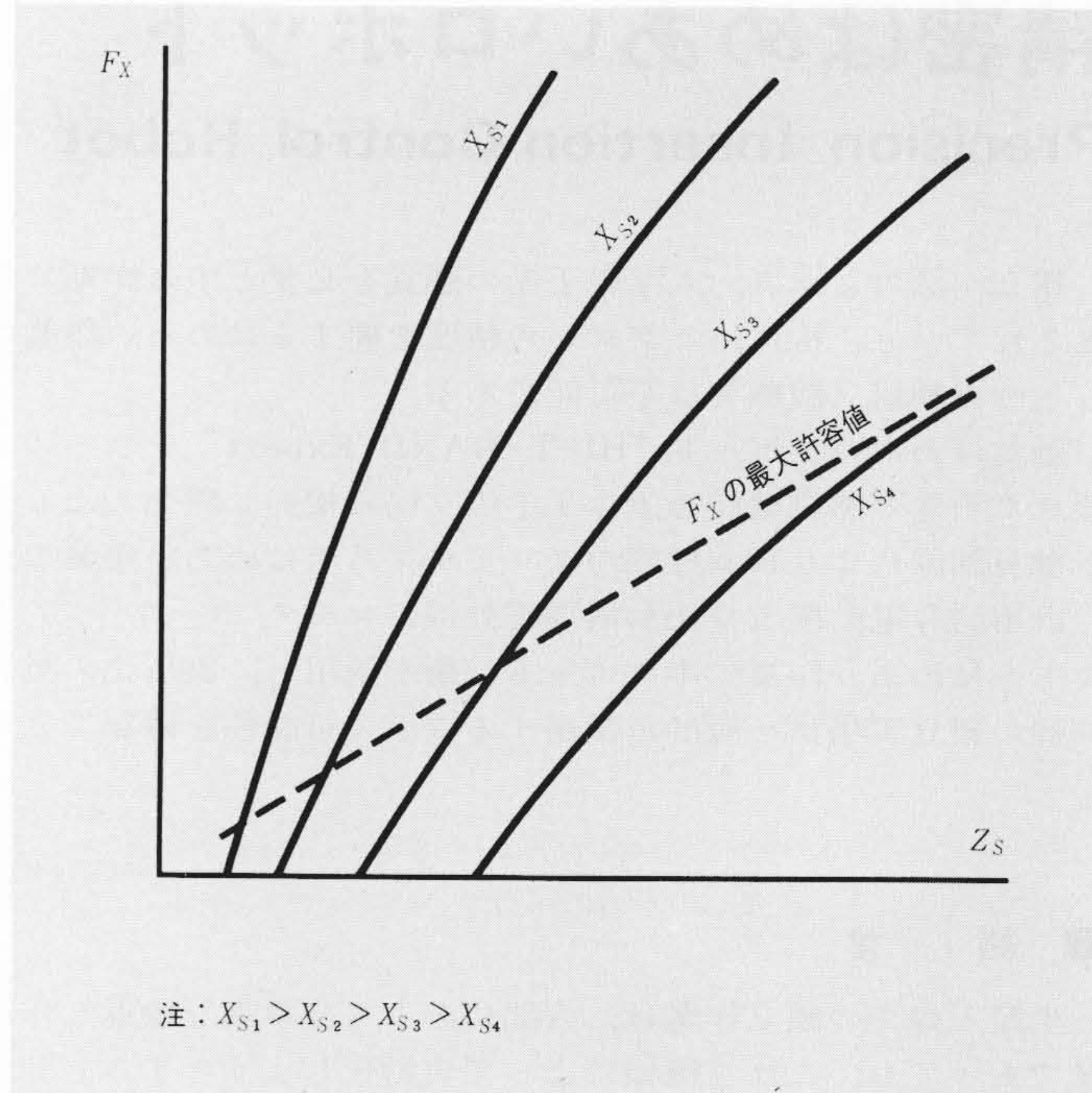
このような状態から、 F_z が一定値以下の条件で更に挿入すると、 P_0 が $-X$ 方向に変位し、 X 方向のばね定数に応じた力 F_x が P_0 点に作用する。この F_x の値が

$$F_x \approx \frac{Z_s}{2\mu L_0} \cdot F_z \quad \dots(2)$$

に達すると挿入が不可能になるが、このとき P_{00} を $-X$ の方向、すなわち穴の中心方向に移動すれば、 F_x が減少し再びシャフトの挿入が可能になる。ここで、 μ は摩擦係数である。

(1)式から分かるように、一定の深さまでは P_{00} の初期位置が穴の中心から若干ずれていても挿入は可能である。更に深く挿入すれば、柔軟機構が変形し反力 F_x が生ずる。そして、図3に示すように、 P_{00} の位置ずれ X_{Si} の大きさによって挿入深さ Z_s と反力 F_x の関係は異なってくる。

一方、(2)式によって定まる挿入限界は、図3に示す破線のようなになるので、初期位置ずれが X_{S4} より小さい場合には柔軟機構によって制御なしに挿入が可能であることが分かる。 X_{S4} より位置ずれの大きい X_{S3} 、 X_{S2} などでは破線との交点の位置で位置ずれの修正が必要となる。 P_{00} の位置修正は、位置ずれの方向と大きさを検出してそれを補正するようにフィードバック制御する方法と、探索動作によって順次中心に近い方向を見つけていく制御方法とが考えられる。



注: $X_{S1} > X_{S2} > X_{S3} > X_{S4}$

図3 位置ずれとはめあい反力 対象穴と柔軟機構の間の位置ずれの大きさによって、はめあい反力が生ずる挿入深さは図のように変わる。

3 はめあい制御方式

3.1 姿勢検出形制御方式

図4は触覚はめあいロボットHI-T-HAND Expert-2の柔軟機構部を示したもので、先に図1に示した3要素を位置決め機構、柔軟な手首及び力感覚の検出機構という形で構成している。触覚センサからは X 、 Y 、 Z 軸方向の相対変位の検出が可能で、手首の柔軟なばね特性と組み合わせて力としての感覚検出ができる。

はめあい制御は、図5に示すように次の3段階に分けて実行する。

(1) 接触動作

対象穴に対するシャフトの供給位置は相対的にばらつくために、穴の中心位置を発見するのは一般には容易でない。しかし、組立作業では部品の供給装置の精度から最悪の場合のばらつき範囲を想定することは可能である。第1段階の接触動作では、このようにしてあらかじめ予想されるシャフトと対象穴の最大ばらつき範囲を想定し、その範囲外の所定の位置にまずシャフトを接触させ、所定の押付け力を与える。このように、あらかじめずらした位置に接触動作をさせることによって、対象穴とシャフトとの位置合わせ及びその確認が容易になる。

(2) 探索動作

接触動作によって所定の押付け力を与えた状態で、穴の中心方向に向かってシャフトを直線的に移動させる。このとき、手首機構の柔軟性によってシャフトはやや傾斜するので、シャフトの先端部は穴位置近辺にいくと、ばね力によって穴に落ち込むことになる。これは柔軟機構部の Z 方向の変位変化を検出することによって分かり、この段階で探索動作を打ち切る。

(3) 挿入動作

探索動作によって位置合わせができた時点では、まだシャフトは穴の中心軸に対して X 、 Y 方向に傾斜している。この

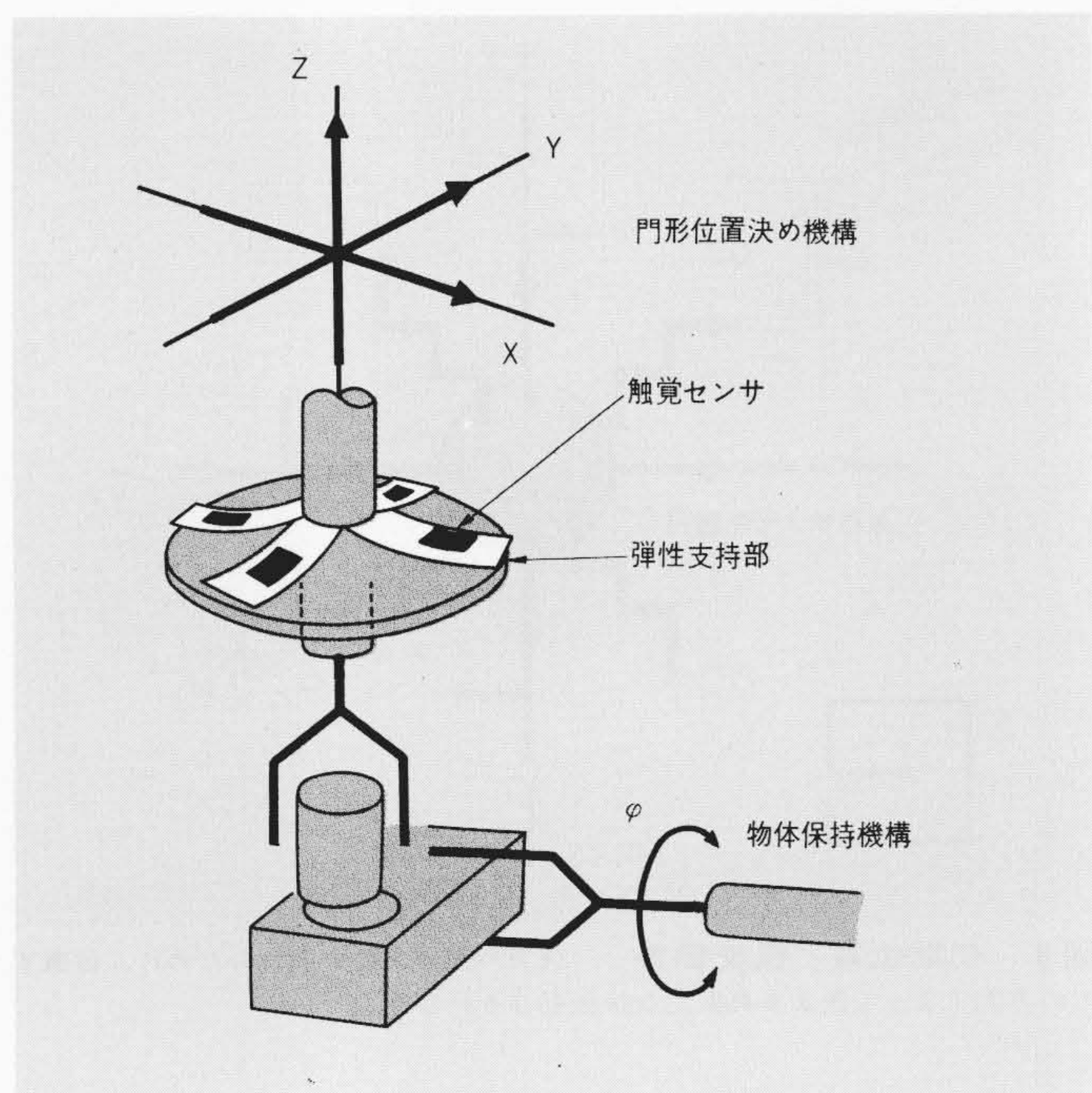


図4 はめあいロボットの手首構造 手首はばねを用いた柔軟機構で構成され、その変形を検出する触覚センサが装着されている。

傾斜の方向は、触覚センサの出力によって分かるので、軸方向の姿勢修正動作を行ないながら挿入していくことになる。軸方向の修正が不完全な状態で挿入を行なうと、かみつきが生じ挿入不可能となるため、X、Y方向の修正と同時にZ方向の押付け力も一定範囲を超えないように制御している。

シャフトの直径 $20\text{mm}\phi$ 、クリアランス $7\sim 32\mu$ 及び挿入深さ 10mm の場合について、対象穴とシャフトの間に許容される位置ずれを測定した結果、探索方向に対して直角方向の位置ずれでも $\pm 2\text{mm}$ まで正常に動作した。また、はめあい動作に要する時間の分布は、図6に示すように約1秒でばらつきも人間の場合より少ない。このことは、人間の場合にしばしば生ずるかみつきが、ロボットの場合では全くなく力の制御が的確に行なわれていることを示している。

図7に“HI-T-HAND Expert-2”の外観を示す。

3.2 探索追従形制御方式

先に図3に示したように、 P_{00} の初期位置が対象穴の中心からずれていても、一定の深さまでは挿入が可能である。従って、X、Y平面内で所定の探索動作を行ない、より深く挿入できる方向が見つければ、穴の中心方向をほぼ判定できることになる。以後この方向を優先して探索すれば、むだな動作を少なくできる。

図8、9は直径が 30mm 、長さ 100mm 、重量約 4kg のシャフトをクリアランス $5\sim 10\mu$ の穴に挿入する実験を本制御方式で行なった結果を示す。初期探索は、図7(a)に示した角形スパイラルを採用しているため、対象穴に対するシャフトの初期位置によって同図(b)に示すような典型的な探索移動を行なうことになる。挿入完了までの探索移動距離は、基本パターンの方向によって顕著な方向性が生ずるので、はめあい作業時間を決める実効的な等距離線は図8の実線で示すようになる。斜線をひいた領域は、探索なしに機構の柔らかさによって挿入可能な位置ずれの範囲であり、破線の内側の領域は、探索によって挿入の可能な位置ずれの許容範囲である。

実験の結果、初期位置のばらつきは $\pm 3\text{mm}$ 、対象穴の傾斜も ± 2 度程度許容された。また、はめあい作業時間は、位置ずれ $\pm 2\text{mm}$ の場合で3秒以内であった。

4 電動機組立作業への適用

4.1 多段はめあい制御装置

電動機のロータベアリング(以下、BBと略す)及びステータハウジングへのエンドブラケット(以下、EBと略す)組立作業を対象とし実用化検討を行なった。自動化にあたっては種々の問題点が提起されたが、まず容量数キロワットの汎用電動機組立ラインでは、

- (1) 組立ラインを流れる機種は単一でない。
- (2) BB部のはめあい比(クリアランス対ベアリング外径比)は $10^{-3}\sim 10^{-4}$ 程度である。
- (3) コンベヤ上のはめあい対象ワークの停止精度は、 $\pm 2\text{mm}$ 程度のばらつきを考える。
- (4) ロータシャフトは段付き構造となっており、その条件は機種によって異なる。

などである。これに対し、前述した姿勢検出形制御方式を基調とする多段はめあい制御装置を開発した。すなわち、コン

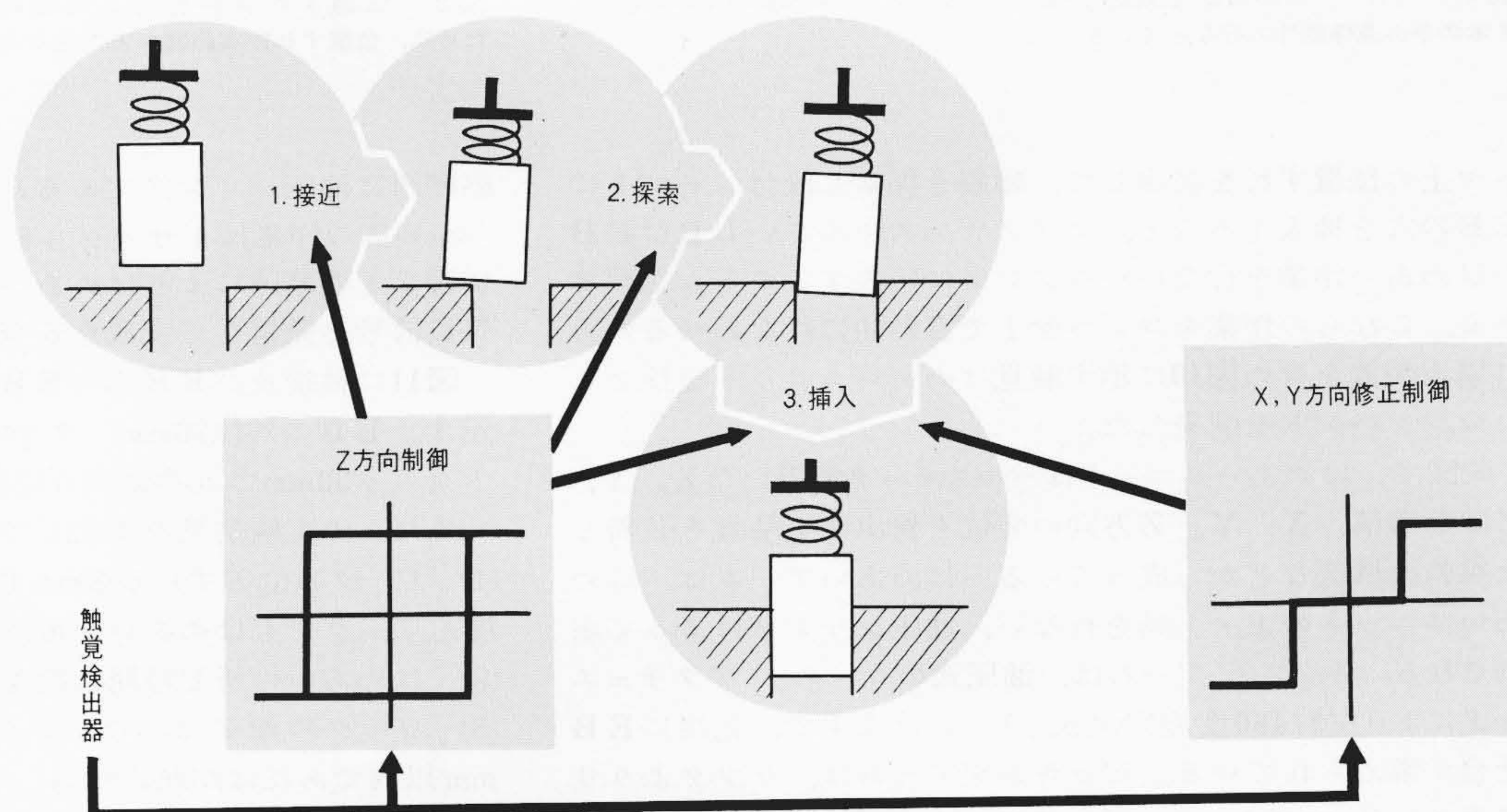


図5 はめあい作業の制御手順 はめあい制御の手順は、シャフトの穴への接触、探索移動及び挿入制御から成っている。

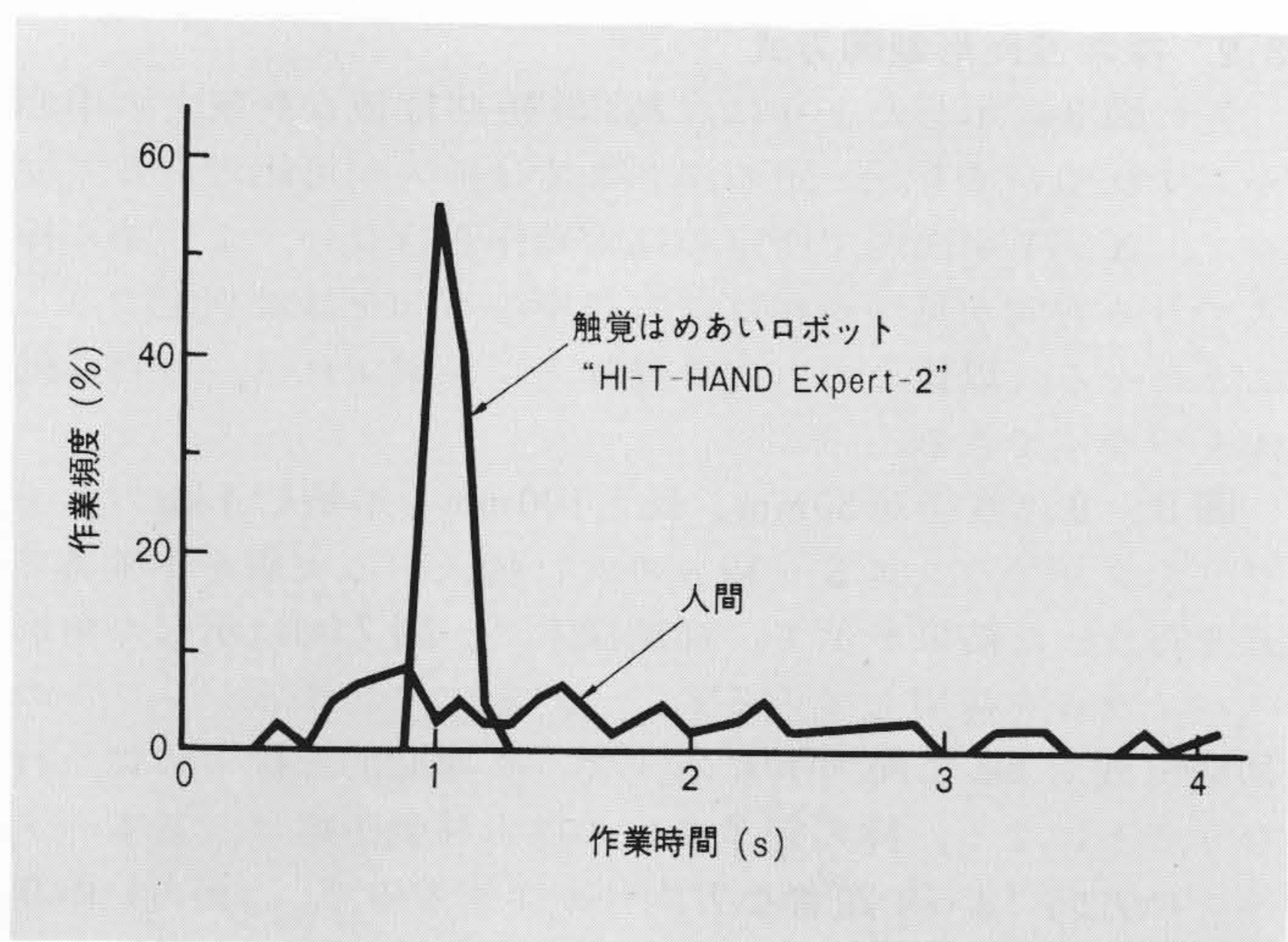


図6 はめあい作業時間の分布 ロボットによるはめあい作業時間の分布は、人間の場合より小さくほぼ一定である。



図7 “HI-T-HAND Expert-2” クリアランス 20μ のはめあいを、2本の手の連係動作で行なっている。

ベヤ上の位置ずれを検出して、軸端を探索し段付シャフトにEBの穴を挿入すること、クリアランスの小さいBBにEBのはめあい作業を行ないハウジングに圧入することが必要である。これらの作業をコンベヤ上で自動的に行なわせるために周辺装置を含め図10に示す触覚はめあいユニットを核としたマシンハンドを開発した。

同図で、はめあいユニットはパルスモータを用いたX、Y、Z駆動機構、X、Y、Z方向の変位を検出する触覚を装着した柔軟機構部などから成っている。はめあいアームは、はめあいユニットの上・下動を行ない、油圧シリンダによって駆動される。スイングアームは、油圧式のロータリアクチュエータにより左右180度旋回する。アームは水平で、先端にEB受台が備えられている。ピッキングアームは、リフタよりリフティングマグネットを用いてワークを吸着するアームで、

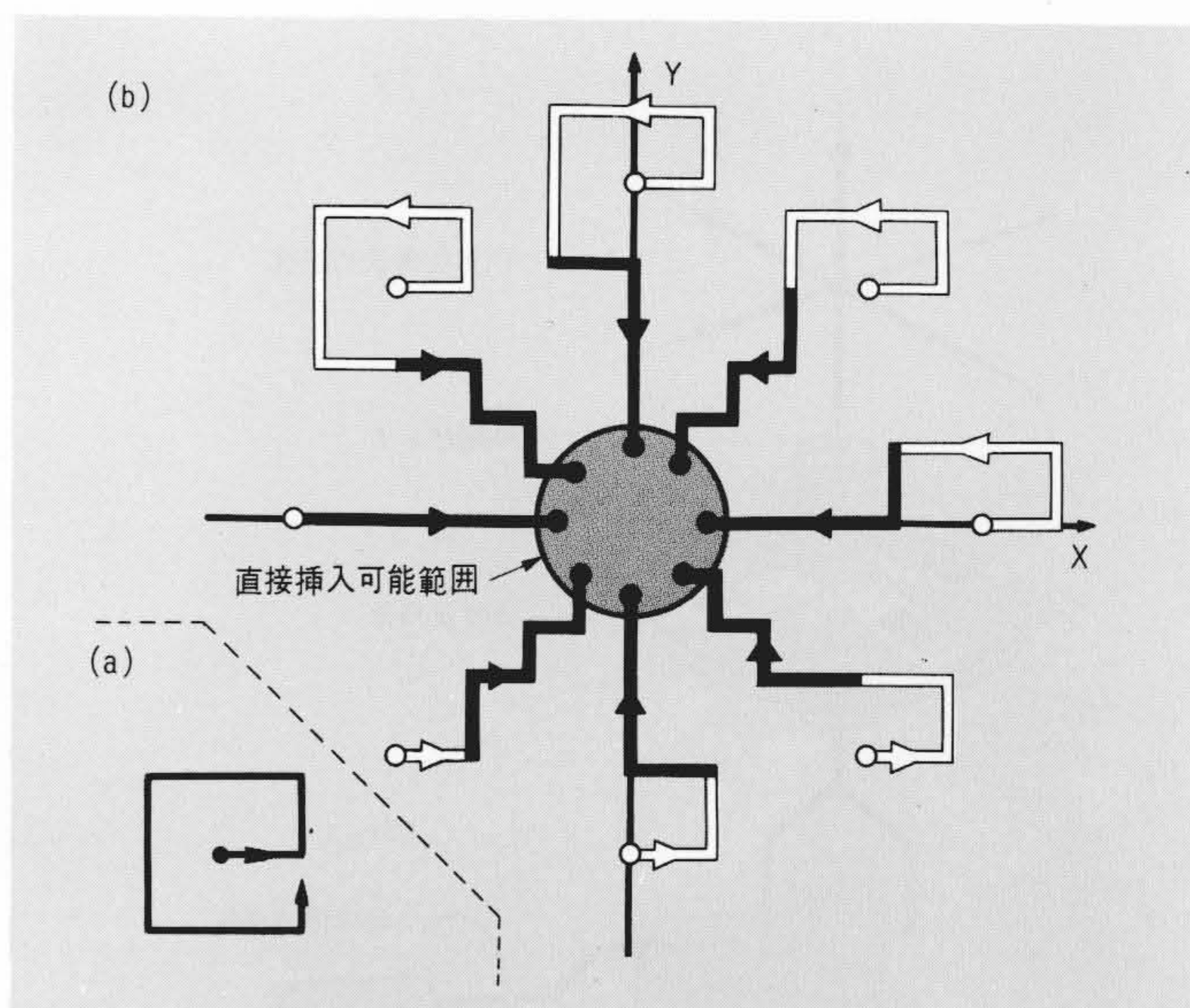


図8 初期位置と探索動作 探索パターンの方角性のために、位置ずれの方角によって決まる典型的な探索動作を行なう。

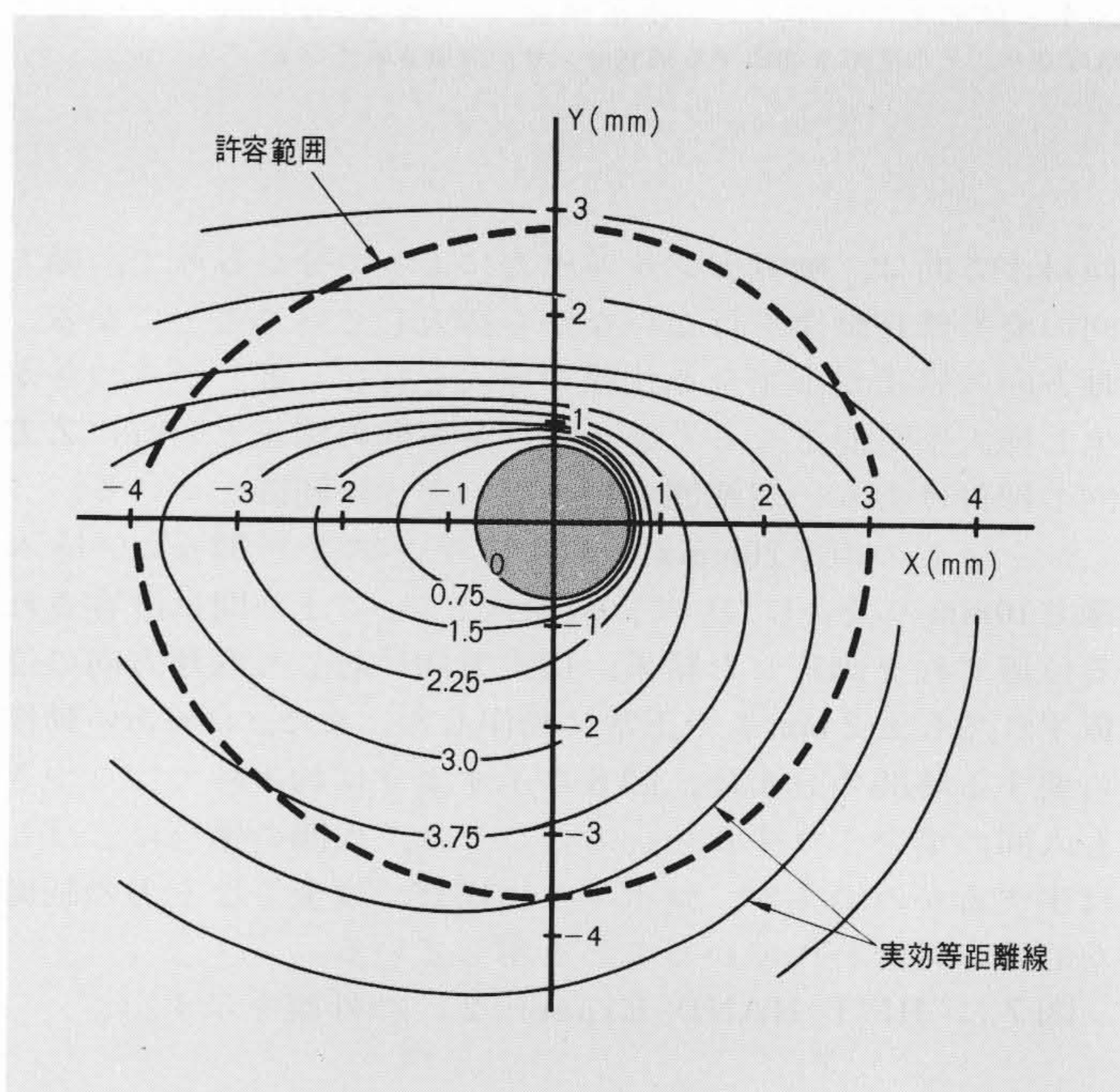


図9 位置ずれ許容範囲と実効等距離線 探索パターンの方角性のために、位置ずれ許容範囲も方向性がある。

駆動源は油圧シリンダである。

本装置の作業は1サイクル約18秒で行ない、仮にばりや切粉などの原因によりはめあいが不成功に終わった場合にはNG信号を発信して装置を安全状態に戻し停止する。

図11に軸端及びBBへのEBはめあいの実験結果の一例を示す。BBの外径70mm、クリアランス 10μ 、Z方向の上下ストローク30mmで両物体間の位置ずれをかえて測定した。

これらの実験結果を要約して以下に述べる。

- (1) ワークの位置ずれが3mm以内であればはめあい比 10^{-4} 程度のワークでもはめあいが可能である。
- (2) はめあいの所要時間は約4秒である。
- (3) ワークの傾斜はハウジングインロー面高さの差で約1mm以内であれば問題はない。
- (4) ワークにマシン油を塗布しても全く影響はない。

図10 汎用電動機のEB組立ロボットシステム(HI-T-HAND Expert-6) 多段はめあい制御装置により、汎用電動機のEBをロータBBにはめあう。

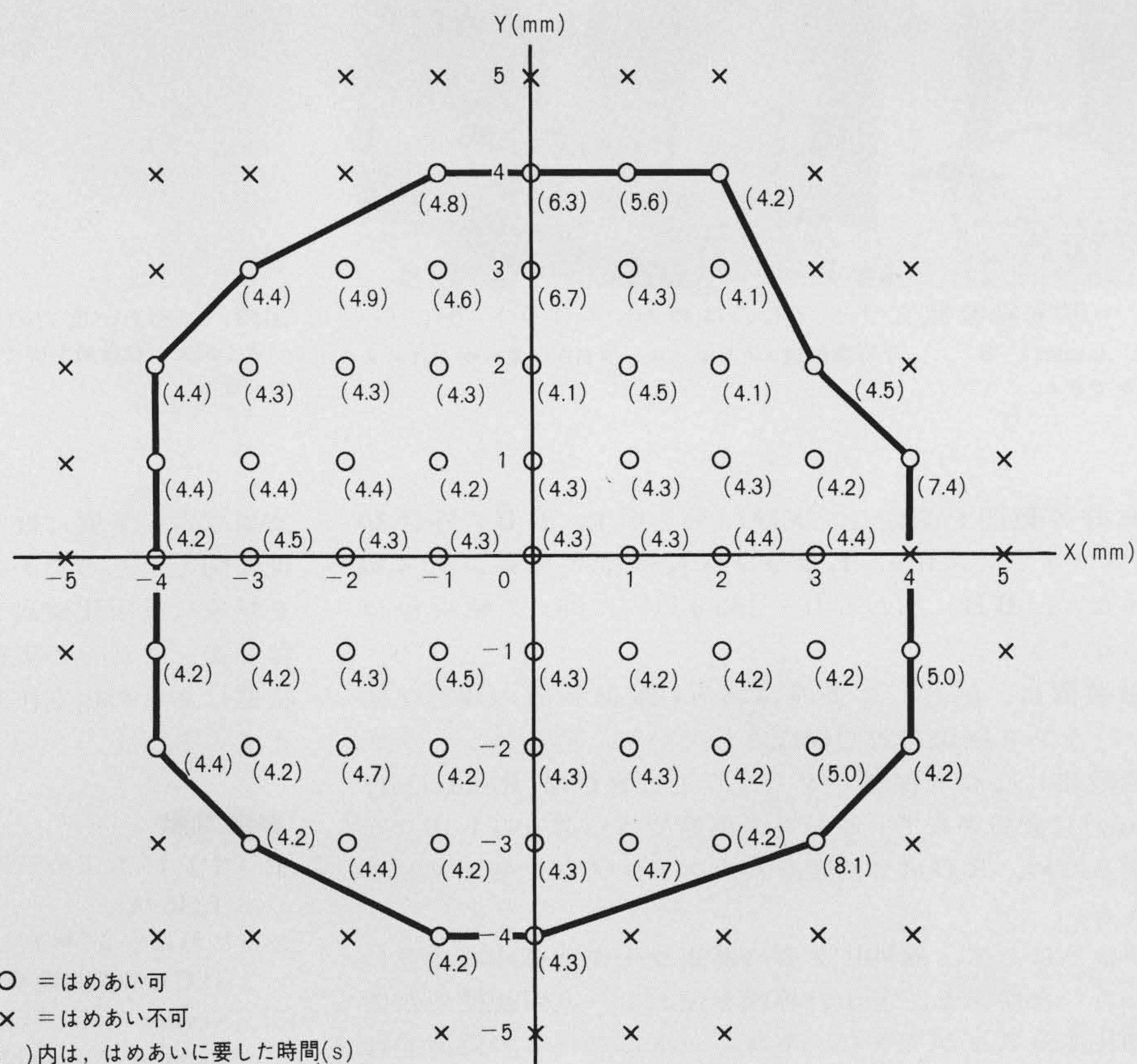
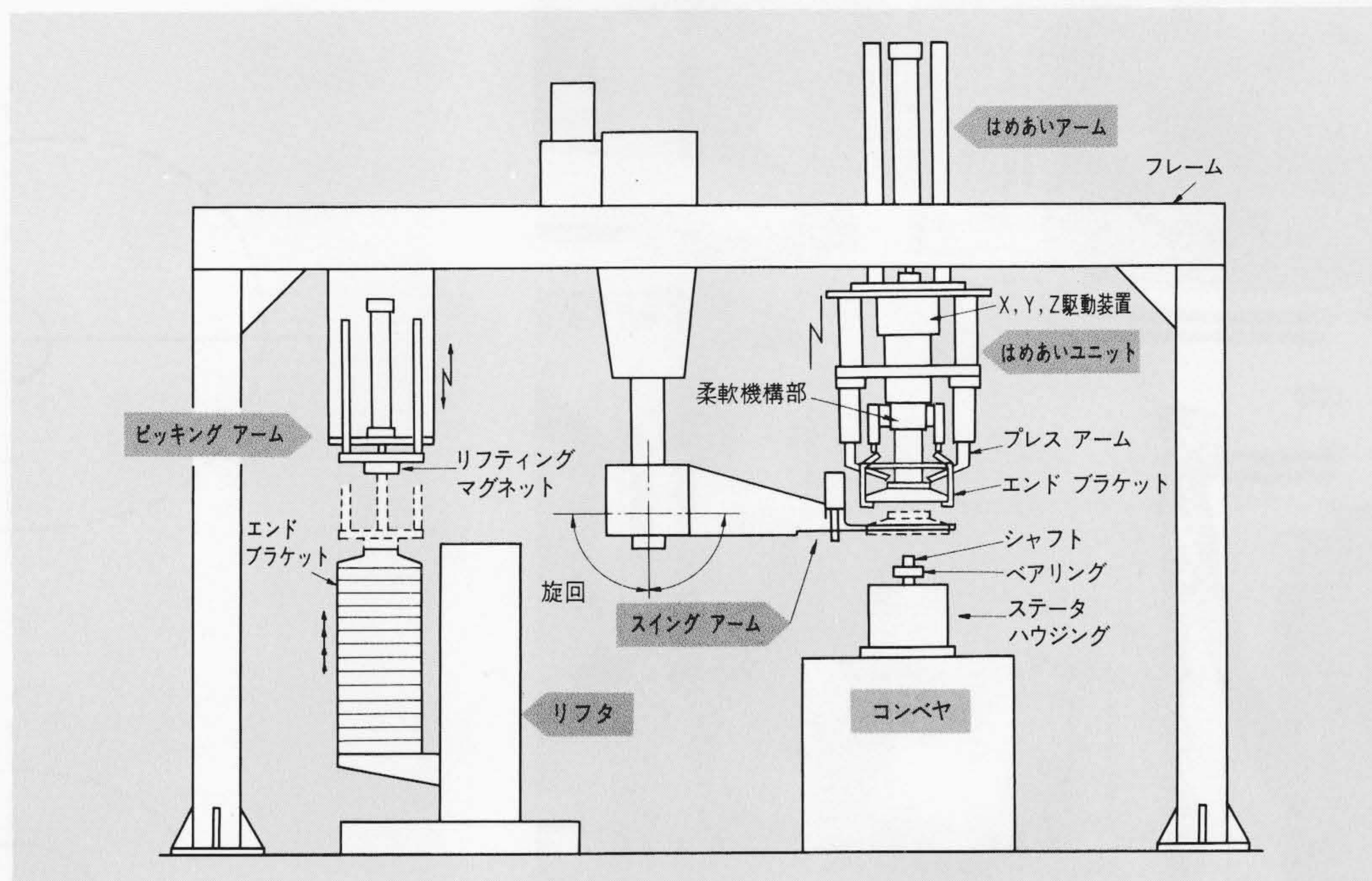


図11 許容位置ずれ測定結果
± 3 mmの位置ずれがあっても、多段はめあい制御装置によって位置修正される。

4.2 軟接触はめあい制御装置

次に数十ワット程度の小形電動機組立ラインでは、特に衝撃的な荷重がBBに加わらないようにすることが強く要求された。このように、作業者が細心の注意と器用さで行なっている作業を自動化するために、前述した探索追従形制御方式を基調とする軟接触はめあい制御装置を開発した。図12に日立製作所工場での電動機組立ラインの一工程で実用化した例を示す。本装置でも触覚はめあいユニットは、パルスモータ

を用いたX, Y, Z駆動機構、Z方向の伸縮を検出するオンオフ触覚を装着した柔軟機構、及びEBを電磁吸着する保持機構などから成っている。はめあいユニットは、エアシリンダによって前後、上下に動作するマニピュレータに結合されていて、EBのピッキング位置とはめあい作業位置との間の移動を高速に行なう。なお、このような高速搬送時には、柔軟機構はロック機構によって剛体化している。

図13に、はめあい反力が200 gと800 gの場合について位

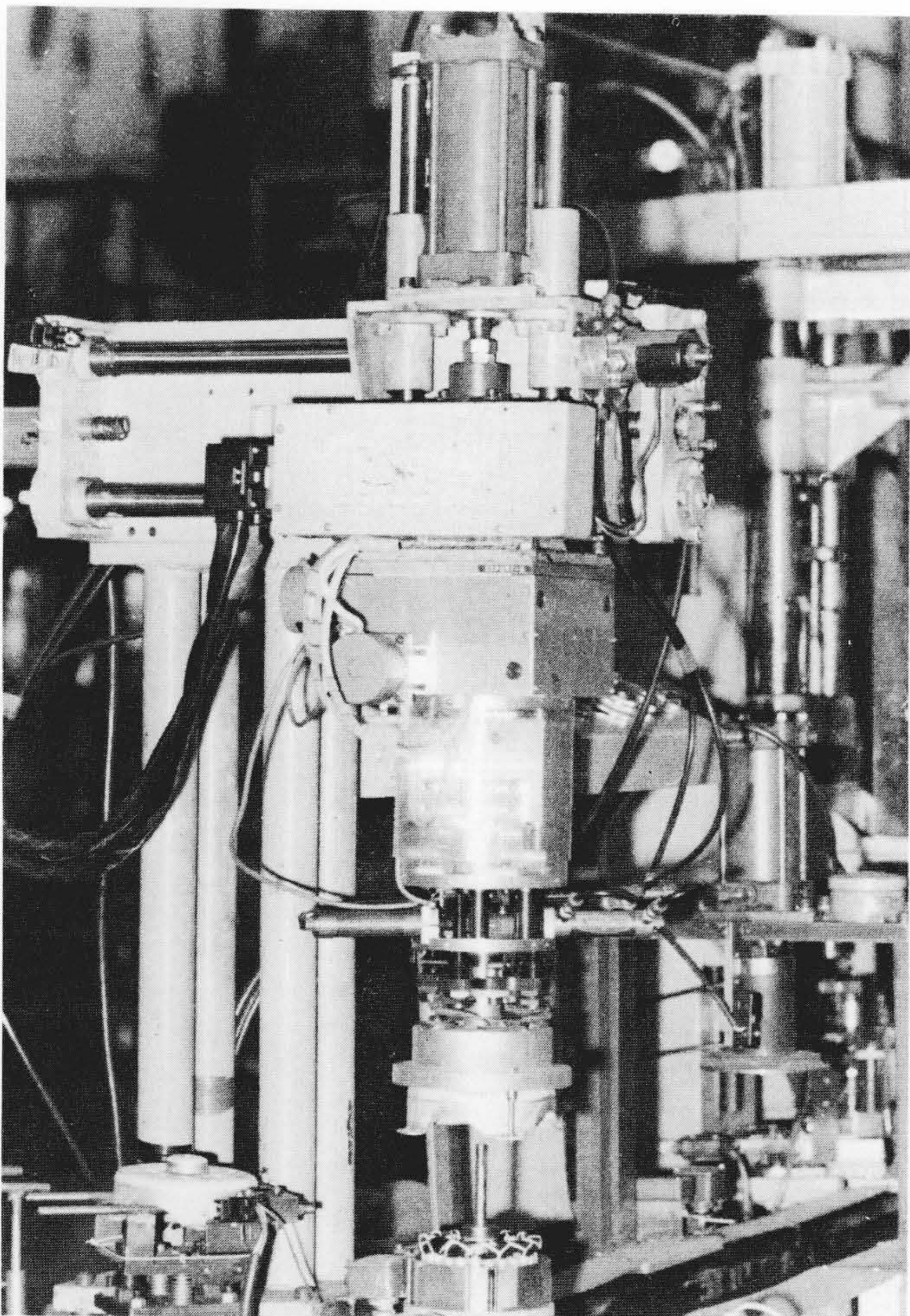


図12 小形電動機組立ラインでのはめあいロボット“HI-T-HAND Expert-5” 小形電動機のEBを、ロータBBに柔らかくはめあうことができる。

位置ずれ許容範囲を測定した実験結果を示す。BBの外径30mm、クリアランス 10μ 、EB及び保持機構の重量は約4kgになったが、BBに加わる力を200g以内に抑えた軟接触はめあいができた。

制御装置は、前述した多段はめあい制御装置の場合と同様にシーケンス制御方式で構成されている。作業のシーケンスや各段階に必要な探索パターンなどはROM(Read Only Memory)に記憶されている。異常事態では作業を打ち切り安全を図るため、ROMで指定されたアドレスにジャンプして停止する。

このようにして、熟練作業者の器用な手先と細心の注意に依存していた作業を、電子計算機を使わない実用規模の装置で自動化することができた。本ユニットはワークの位置ずれや傾斜に対する適応性もあるので、ライン導入にあたっては既設のラインをほとんど変更する必要がなく、不良低減にも貢献している。

5 結 言

従来のロボットや自動組立機では困難な、クリアランスが 10μ 程度の精密はめあい作業をロボットの触覚制御によって可能とした。このような作業は、人間でもある程度の熟練を必要とする高度な機能であるが、電子計算機を使わないシーケンス制御装置で可能とした。既に、昭和49年11月東京、晴海での国際産業用ロボット展、今年4月モスクワでの日本産

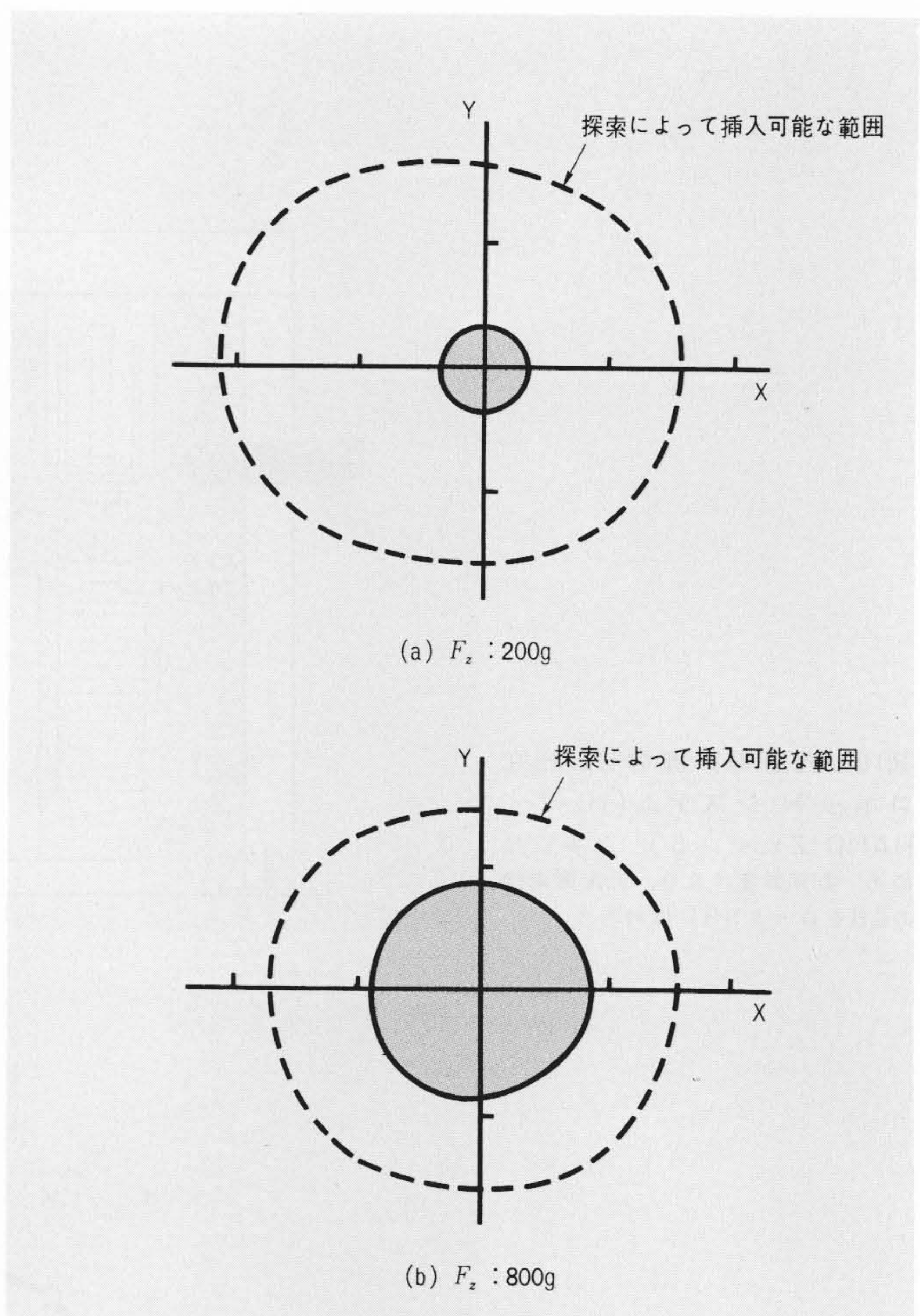


図13 はめあい反力の大きさと位置ずれ許容範囲 はめあい反力を小さく抑えた軟接触制御では、探索によって挿入可能位置ずれ許容範囲は大きくなる。

業用ロボット展に展示し、ロボット機能の新しい方向として世に問うたものである。更に、日立製作所の電動機組立作業を対象に実用化検討を行ない、その見通しを得ている。我々は今後、これらの実績を基に、これまでほとんど手付かずの状態にあった組立作業の自動化に対し貢献していきたいと考えている。

参考文献

- (1) 井上：「人工の手の計算機制御」機械学会誌 73, 618 (昭45-4)
- (2) 後藤ほか：「精密はめあい作業をする触覚ロボット」第12回SICE学術講演会 3710 (昭48-8)
- (3) Nevins et al, "Exploratory Research in Industrial Modular Assembly" Proc. of 4th Int. Symp. on Ind. Robot 65 (1974)
- (4) 木下ほか：「計算機自動組立システム」精密機械学会第26回自動組立研究発表会 37 (昭48-5)
- (5) 光岡：「静圧式力検出による精密はめあい機構」精密機械学会第36回自動組立研究発表会 19 (昭50-5)
- (6) 武安ほか：「触覚ロボットの制御方式」計測自動制御学会論文集 9, 1 (昭48-2)
- (7) Goto et al, "Precise Insert Operation by Tactile Controlled Robot" Proc. of 2nd Conf. on Industrial Robot Technology (1974)
- (8) 武安ほか：「オンオフ触覚による探索追従形はめあい制御方式」電気全国大会 1425 (昭50-4)