ファジィ制御を用いた面取り面のない精密はめあい作業*

原 敬^{*1}, 横川 隆一^{*2}, 吉中 秀一^{*2}A Precision Inserting Operation for Chamferless Parts
by using Fuzzy Control

Kei HARA, Ryuichi YOKOGAWA, and Syuichi YOSHINAKA

The present paper deals with a precision inserting operation for chamferless parts under ambiguous positional information by using Fuzzy control. The position of parts is recognized by introducing two Fuzzy sets. One is characterized by the membership function of the search areas, the other is by the one of the hole center position. The system consists of the SCARA robot, a force sensor and the RCC device. The matching with two Fuzzy sets decides the ranking of search areas. The membership function of the hole center position is changed by past information of a precision inserting operation. After deciding the search area according to the ranking, the robot performs the assembly by using force sensor. The usefulness in a precision inserting operation is shown by experimental results.

Key Words: Application of Control, a Precision Inserting Operation, Fuzzy Control, RCC, Force Sensor

1. はじめに

最近, 自動車産業や電気機器産業などのマニファクチャ産業においては精密組立作業の自動化が進み, ロボットの機構やアクチュエータの改良がなされて, 繰返し精度も著しく向上している。

しかし, システム全体としての位置決め精度向上には限界がある。例えば, 精密はめあい作業(一方の部品はロボットで操作, 他方の部品は作業台に固定)の場合には, 部品間の相対的な位置決め精度を上げることは容易でない。特に, 一般に多用されている平行はさみ形ハンドの場合には, ハンドの接触面に平行な方向の偏差がロボットのサーボ機構の位置決め誤差よりはるかに大きくなる場合があり, 正確な位置決めは難しくなる。そこで, 正確な位置決めを行う代わりに, 多少の誤差があっても支障がないようなフレキシブルで, しかもインテリジェントなロボットの開発が求められている。このような要求に対応するものとしては, SCARA 形ロボット⁽¹⁾や RCC 装置⁽²⁾⁽³⁾などがある。こ

れらはいずれも, その弾性構造を効果的に利用するものである。部品に面取り面がある場合, これらを用いれば多少の位置決め誤差があっても, 面取り面とその弾性構造により容易に精密はめあい作業を行うことができる。しかし, 部品に面取り面がない場合や位置決め誤差が面取り面の範囲を超えるような場合には, SCARA 形ロボットや RCC 装置でも精密はめあい作業を行うことは難しくなる。

そこで, 本研究では, ファジィ集合論を応用し, 力センサによる位置決め実験を行うことにより, 面取り面がない場合にも効果的に精密はめあい作業が可能な手法の確立を試みた。

2. 本研究の手法

本研究では, 部品には面取り面がなく, 部品間の位置情報はあいまいであるような精密はめあい作業(peg-in-hole)を取扱う。作業対象部品は表1に示すとおりである。そして, 次の三つの手段によって作業を行う。

(1) ファジィ集合の利用 部品間の位置情報のあいまいさから, 状態認識が定性的になるため, ファジィ集合を用いる。精密はめあい作業の達成が可能な範囲(サーチ領域)のメンバシップ関数と hole の中心

* 昭和63年7月15日 東海支部浜松地方講演会において講演, 原稿受付 昭和62年10月23日。

*¹ 正員, 同志社大学工学部 (〒602 京都市上京区今出川通り烏丸東入る)。

*² 学生員, 同志社大学大学院。

位置に関するメンバシップ関数とのマッチング（類似度）によりサーチ領域の順位を決定する。

(2) 力センサの利用 (1)で決めた順位に従ってサーチ領域で、力センサを用いて目的位置（holeの中心位置）をサーチして組立を行う。

(3) RCC装置の利用 RCC装置の弾性構造により、peg挿入時におけるJammingおよびWedgingを回避する⁽⁴⁾。

実験により上述の手法の有効性を示す。

3. ファジィ集合を用いた

サーチ領域の順位決定

精密はめあい作業においてシステム全体の位置決め誤差を $\pm c$ とすると、これは半径 c の円となりholeの実際の中心はこの円の内部に存在することになる〔本研究では $c=1.0(\text{mm})$ 〕。

本研究では、図1に示すように半径 c の円の内部を半径 ϵ の円で構成される19個のサーチ領域に分け（本研究では $\epsilon=0.4(\text{mm})$ 。ただし、各サーチ領域の中心は半径 c の円内にある。）、ファジィ集合のマッチングを用いてそのサーチ領域を順位づける。そして、その順位に従って後述の力センサにより目的位置（holeの中心位置）をサーチして、精密はめあい作業を行う。なお、半径 ϵ の円から成るサーチ領域が互いに重なった部分をもつようにした理由は、力センサの信号が部品相互の位置および姿勢によって大きく変化するため、分割された一つの領域を1回サーチするだけでholeの位置認識が困難な場合があるためである。

各サーチ領域のファジィ数は、一般によく使われている二等辺三角形のメンバシップ関数で与え、 x 座標、 y 座標それぞれに図1に示すように配置する。これらのメンバシップ関数は、あいまい幅を 2ϵ としてプログラム中に固定する。

一般に、精密はめあい作業（peg-in-hole）においては、holeの中心位置はあらかじめコンピュータに与えてある。しかし、組立システム全体の位置決め誤差が存在するため、この位置が実際にhole中心であるかどうかは疑問である。そこで、holeの中心位置に関する情報はあいまいなものと考え、それを二等辺三角形のメンバシップ関数で与える。

サーチ領域の順位決定は、上述のサーチ領域についてのメンバシップ関数と、このメンバシップ関数とのマッチングによって行う。そして、マッチングの大きい順、すなわち実際にholeの中心が存在しそうなサーチ領域を順次に決定する。ただし、サーチ領域に関するメンバシップ関数が固定であるのに対して、この

メンバシップ関数は精密はめあい作業が行われるたびに、過去の作業結果を基にして、その頂点の位置を次のように変更する。

(1) x 座標系について

$$n \geq 2 \text{ のとき } x_n = \frac{x_{n-1} + x_{n-2}}{2} \dots\dots\dots (1)$$

$$n = 1 \text{ のとき } x_1 = x_0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x_n は n 回目の精密はめあい作業におけるメンバシップ関数の頂点の x 座標を、 x_{n-1} 、 x_{n-2} はそれぞれ $n-1$ 回と $n-2$ 回目の精密はめあい作業の結果から得られた x 座標上のholeの中心位置を表し、 x_0 は部品の位置決めによってあらかじめコンピュータに与えてある x 座標上のholeの中心位置を表す。ただし、このメンバシップ関数のあいまい幅は $2c$ であって、一定である。

(2) y 座標系について この場合も x 座標系

表1 作業対象部品

The diameter of the peg	12.74 (mm)
The diameter of the hole	12.76 (mm)
Clearance	0.02 (mm)
But, chamferless

図1 メンバシップ関数の配置

い値への順とする。ただし、同じ値のものについては、サーチ領域番号の小さいものからサーチする。

4. カセンサによるサーチと精密はめあい作業

サーチ領域の順位を決定したあと、図3に示すとおり、peg先端に作用する垂直軸方向(z 方向)の力 F_z とその軸に垂直な2軸 x, y に関するモーメント M_x, M_y によって、後述のようにholeの位置をサーチして精密はめあい作業を行う。 F_z はpegをholeに挿入できるかどうかの判定に、そして、 M_x, M_y はpegのholeへの誘導に用いる。なお、モーメント M_x, M_y はロボットの手首に取付けられたカセンサの中心 e について求め、また、センサ信号には次のような特性がある。

- (1) 部品間の位置姿勢によって信号値が大きく変化する。
- (2) RCC装置の弾性によってあいまいとなる。
- (3) センサ信号のうち特にモーメント信号の符号が変化しやすい。

したがって、本研究ではモーメント信号の符号を無視してその大きさだけを用いる。

サーチのアルゴリズムの概要を図4に示す。また、サーチの一例を図5に示す。図5においてまず、一定の垂直力 F_z でサーチ領域の点Aにpegを接触させ、この点からサーチを開始する。サーチ開始点を点Aとするのは次のような理由による。

ここでは二次元的に考えることにする。部品間の位置決め誤差を考慮すると、図6の(1)~(3)のような三つの状態が生じる。各状態において精密はめあい作業を成功させるためには(1)~(3)の三つのうちのどの接触状態が生じたかを判定しなければならない。しかし、この判定は困難である。そこで、あらかじめ位置決め誤差 c よりも大きい偏差を一定方向へ与えることにする。こうすればpegの操作方向が容易にわかる。例えば、図6(1)~(3)の場合、左側に大きな偏差を与えて、それぞれ図6(1')~(3')のようにする。このとき、pegを右方向へ操作してやればholeの位置を認識できる。本研究の場合には、pegをサーチ開始点A(図5参照)から x 座標系では正方向に、 y 座標系では負方向に操作すればよいことになる。

次に、 F_z の値によってpegの挿入動作を行うかどうかを判定することにする。挿入動作を行うことができない場合には、モーメント M_x, M_y の値によって次のサーチ点を求める。次のサーチ点は、図3から明らかのように、下記の三つの場合のいずれかとなる。図

4において、(1) $+x$ 軸方向に1ステップの点、(2) $\alpha=45^\circ$ の方向に1ステップの点、(3) $-y$ 軸方向に1ステップの点。ただし、1ステップは $80\mu\text{m}$ とする。そして、次のサーチ点が求まれば、pegとhole部品との接触を除いたあと、その点へpegを移動して再び F_z の値による判定に入る。以下この過程を繰返す。ただし、点Aからの操作距離がサーチ領域を超えた場合には、そのサーチ領域でのサーチは中止して、その次に順位の高いサーチ領域へ移動して操作を続ける。

5. 実験

5.1 実験装置 本研究の実験システムの概要を表せば図3のとおりである。プログラムはN 88 DISK-BASICで作成した。図3において、

ロボット：SCARA形ロボット

繰返し精度は水平面($x-y$ 面) $\pm 0.05\text{ mm}$

上下(z 軸) $\pm 0.1\text{ mm}$

手首水平回転 $\pm 0.18^\circ$

カセンサ：Lord社製六軸力センサ

モデル No. 30/100

RCC：水平方向剛性値： 9.1 N/mm

回転方向剛性値： $35\,000\text{ N}\cdot\text{mm/rad}$

実験における作業対象部品は表1に示すとおりである。

図5 サーチの一例

図6 接触状態

表 2 サーチ領域の順位

Ranking	Search area AR (・)	Matching T
1	7	0.582
2	11	0.569
3	12	0.485
4	6	0.456
5	16	0.391
6	3	0.367
7	10	0.358
8	15	0.306
9	5	0.249
10	2	0.231
11	19	0.183
12	14	0.167
13	9	0.147
14	18	0.115
15	1	0.0950
16	4	0.0724
17	13	0.0486
18	17	0.0474
19	8	0.0208

5.2 実験例 ここでは、本実験の一例を示す。

まず、前回と前々回の組立作業で得られた hole の中心座標はそれぞれ、 $(x, y) = (0.417, 0.084)$, $(x, y) = (0.625, 0.152)$ であったとする。ただし、座標軸の原点 $(x, y) = (0, 0)$ は組立部品の位置決めによってあらかじめコンピュータに与えられている hole 中心座標である。

このとき、式(1)からあいまいな hole の中心位置 (x, y) (hole の中心位置に関するメンバシップ関数の頂点) が $(x, y) = (0.521, 0.117)$ と求められる。そして、あいまいな hole の中心位置に関するメンバシップ関数は図1の破線で示される二等辺三角形となる。このメンバシップ関数とサーチ領域に関するメンバシップ関数とのマッチングにより、サーチ領域の順位は表2のようになる。

1 番めのサーチ領域 AR(7) からサーチを開始する(図1参照)。そして、図5に示すように点 A からサー

チして点 G において peg の挿入が成功した。もし、この領域において挿入ができなかった場合には、次に順位の高い AR(11) をサーチすることになる(表2, 図1参照)。

上記の場合、組立終了までに要した時間は 40 s であった。また、これ以外の実験例では、組立に 20~210 s の時間を要した。

6. 結 言

(1) 本研究で提案した方法によって、面取り面をもたない場合の精密はめあい作業も容易に行うことができた。

(2) ファジィ集合を用いた制御は、一般に厳密さを必要としない分野において使用されている。ロボットの分野においても、障害物回避⁽⁷⁾ やくず拾い⁽⁸⁾ などに用いられているが、いずれも厳密さはそれほど要求されていない。本研究の実験結果は、厳密さを要求する精密はめあい作業に対してもファジィ制御方式が有用であることを示している。

(3) 本研究では部品間の位置決め誤差を ± 1.0 mm と考えたが、これより誤差が大きい場合でもサーチ領域の数を増やすことによって対応できると考える。

(4) 組立に要した時間は、部品間の位置決め誤差の大きさによってばらつきがあるが、20~210 s である。

文 献

- (1) 古屋・牧野, 精密機械, 46-12(昭55), 1525.
- (2) 高木, 自動化技術, 15-1(昭58), 90.
- (3) 浅野・浅田・花房, システムと制御, 24-3(昭55), 201.
- (4) Whitney, D.E., *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 104-1(1982), 65.
- (5) 井上, バイオメカニズム, 3(昭50), 194, 東京大学出版会.
- (6) 塚本, 計測自動制御学会論文集, 17-4(昭56), 479.
- (7) Nakaisi, K., ほか2名, An Application of Fuzzy Control to Collision Free Movement Problem of Robot Arm, *Proc. Jpn.-U. S. A. Symp. Flexible Autom.*, (1986), 103.
- (8) 寺野・増井, ファジィロボットに関する研究, 第三回知識工学シンポジウム, (昭60), 137.