ファジィパターンマッチングを用いた 発見法的探索による精密はめあい作業*

原 敬*¹, 横 川 隆 一*¹

Precision Insertion by Heuristic Search with Fuzzy Pattern Matching

Kei HARA and Ryuichi YOKOGAWA

The present paper deals with precision insertion for chamferless parts with uncertain positional information by heuristic search. The heuristic search is constructed of fuzzy pattern matching between fuzzy sets of search areas and fuzzy sets of the hole center position. Fuzzy pattern matching evaluates the value of the heuristic function. The search of the hole is started in the search area having the highest value of the heuristic function. RCC (remote center compliance) and a force sensor are used in the search. RCC modifies the position of the peg finely and the force sensor measures whether the insertion has succeeded. The usefulness of this method is shown by experimental results.

Key Words: Robotics, Heuristic Search, Fuzzy Pattern Matching, Peg-in-Hole with Chamferless RCC, Possibility Measure, Necessity Measure

1. は じ め に

精密はめあい作業は一般に, peg による hole の位置探索動作(探索動作)と peg 挿入後の微細な位置修正動作(微細動作)に分けることができる。部品に面取り面があり, 部品の位置決めが正確な場合には, 微細動作だけで十分に精密はめあい作業が行えるので, これについては従来から多くの研究がなされている^{(1)~(3)}。しかし, 部品に面取り面がなく, さらに部品の位置情報があいまいな場合, 微細動作だけで作業を行うことは難しい。このような場合には探索動作によって peg と hole の位置合わせを行った後, 微細動作を行う必要がある。探索動作によって peg と hole の位置合わせを行うためにはセンサ信号からそれらの接触状態を認識する必要がある。しかし, 部品の位置情報が不確定な場合の精密はめあい作業では, あらかじめ定められたクリスプなアルゴリズムで接触状態を認識し, 作業を達成することは難しい。そこで, 本研究ではファジィパターンマッチングを用いた発見法的探索を提案する。面取り面のない精密はめあい作業では, peg

と hole のクリアランス以下で peg と hole の位置合わせを行わなければならないので, 高精度のロボットが必要となる。さらに, 多くの探索点を必要とするため時間的な無駄も多くなる。そこで, 本研究では RCC (remote center compliance)⁽⁴⁾を用いることにより peg と hole の位置合わせの補助を行い, より円滑な精密はめあい作業を行う。

以上のように, 本研究では面取り面のない精密はめあい作業に対して, RCC, 力センサ, そしてファジィパターンマッチングを用いた発見法的探索を適用し, 実験によりその有効性を確かめる。

図 1 面取り面のない精密はめあい作業

* 原稿受付 平成 2 年 3 月 26 日。

*¹ 同志社大学工学部 (〒602 京都市上京区今出川通烏丸東入ル)。

2. サーチ領域の配置とファジィ集合

一般に、精密はめあい作業では部品間の相対的な位置はあらかじめ与えられる。例えば、ロボットが peg を hole へ挿入する場合、peg の位置姿勢はハンドの位置より、また hole の位置姿勢はフィードの位置より既知のものである。しかし、実際の作業環境にはハンドによる peg の把握時やフィードへの hole 部品の固定時に生じる偏差などのさまざまな不確実性が含まれている。そのため、あらかじめ与えられている peg と hole の相対的な位置も不確実なものとなる。この不確実性の範囲を $\pm c$ (本研究では $c=1.0$ [mm]) とすると、これは半径 c の円領域 (誤差領域) で表すことができる (図 2 参照)。精密はめあい作業を行うためには、この誤差領域のどこに実際の hole 中心があるのかを peg によって探索しなければならない。しかし、この誤差領域全体を試行錯誤的に探索するというのは時間的にも無駄が多いので、本研究ではこの誤差領域を半径 ε (本研究では $\varepsilon=0.4$ [mm]) の 19 個のサーチ領域に分割する。これらのサーチ領域は (1) 各サーチ領域は誤差領域の中心について対称、(2) 19 個のサーチ領域は誤差領域を含む、に従って配置する (図 2 参照)。そして、各サーチ領域をファジィ集合で表す。このファジィ集合は各サーチ領域を底面とする円すい形のメン

図 2 メンバシップ関数の配置

バシッブ関数で主観的に定義される。メンバシッブ関数を円すい形にすることは、各サーチ領域内ではその中心付近に実際の hole 中心が存在しうであることを表す。ただし、本研究では簡単化のために、図 3 に示すように x 座標系、 y 座標系についての二等辺三角形で表す。以上のようにして得られた 19 個のサーチ領域の配置とそれについてのファジィ集合は既有知識としてプログラム中に貯えられる。

3. hole の中心座標とファジィ集合

peg と hole の相対的な位置姿勢は、2 章で示したようにさまざまな不確実性が含まれているので、あらかじめ与えられている hole の中心座標が実際の hole の中心座標であるかどうかは疑問である。そこで、この hole の中心座標についての情報をファジィ集合で表す。このファジィ集合は半径 c の円を底面とする円すい形のメンバシッブ関数で主観的に定義する。ただし、本研究では簡単化のために、このメンバシッブ関数を図 3 に示すように x 座標系、 y 座標系についての二等辺三角形で表す。これら二等辺三角形のメンバシッブ関数の頂点は、部品の位置決めによってあらかじめ与えられている hole 中心の x 座標、 y 座標を表す。ただし、各サーチ領域についてのファジィ集合が既有知識としてプログラム中に貯えられるのに対して、このファジィ集合は精密はめあい作業が行われるたびにメンバシッブ関数の頂点の座標を次のように変更する。

(1) x 座標系

$$x_n = 1/2(x_{n-1} + x_{n-2}) \dots\dots\dots (1)$$

$$x_1 = x_0$$

ここで、 x_n は n 回めの作業のマッチングに用いるメンバシッブ関数の頂点の x 座標、 x_{n-1} 、 x_{n-2} は $n-1$ 、 $n-2$ 回めの実際の作業結果から得られた hole 中心の x 座標を表し、 x_0 はあらかじめ作業を行う前に与えら

図 3 メンバシップ関数の簡単化

れている hole 中心の x 座標を表す。

(2) y 座標系

x 座標系と同様。

式(1)に従えば、1回前と2回前の作業結果によって次の作業における hole の中心座標を推論することになる。

4. ファジィパターンマッチング

4.1 パターンマッチング 本研究では、2章で定義した各サーチ領域についてのファジィ集合と3章で示した hole の中心座標についてのファジィ集合とのパターンマッチングを行う。そして、19個のサーチ領域の中から最も実際の hole の中心が存在しそうな領域を推論する。すなわち、既有知識として与えられている各サーチ領域についてのファジィ集合の中で、過去2回前までの作業結果から得られた hole の中心座標についてのファジィ集合に最も近いものを求める。そして、そのファジィ集合をもつサーチ領域から peg による hole の探索を行う。

このマッチングの方法としては

$$\begin{aligned} t &= N(A/B) \\ &= m \cdot \sup(A \cap B) + (1-m) \cdot \inf(A \cup B^c) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2)$$

で示される数値的真理値による逆真理値限定⁽⁵⁾を用いる。ここで、 A, B はノーマルなファジィ集合であり、 $\sup(*)$ は $(*)$ の上限を、そして $\inf(*)$ は $(*)$ の下限を表す。また、 $B^c = 1-B$ である。

式(2)は、可能性測度⁽⁶⁾ $[\sup(A \cap B)]$ と必然性測度 $[\inf(A \cup B^c)]$ との線形結合である。可能性測度はファジィ集合 A と B の交わりの度合を評価し、必然性測度は

$$\inf(A \cup B^c) = 1 - \sup(A^c \cap B) \quad \dots\dots\dots(3)$$

と表されるので、ファジィ集合 B が A に含まれる度合を評価するものであることがわかる。このことより、可能性測度は楽観的な指標であり、必然性測度は悲観的な指標であるといえる。したがって、式(2)の認識において、 m の値を $1/2$ より大きくするか小さくするかによって楽観性と悲観性のどちらを重視するのかが決定することができる。

本研究では $m=1/2$ として

$$\begin{aligned} t &= N(A/B) \\ &= 1/2 \{ \sup(A \cap B) + \inf(A \cup B^c) \} \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

とする。また、 A は hole の中心座標についてのファジィ集合、 B は各サーチ領域についてのファジィ集合を表す。

4.2 サーチ領域の順位決定 本研究では、円すい形のメンバシップ関数を x 座標系、 y 座標系についての二等辺三角形で表したので、それぞれの座標系について、式(4)より t_x と t_y が求められる。そこで、各サーチ領域についてのヒュースティック関数 T を

$$T = t_x \times t_y \quad \dots\dots\dots(5)$$

と定義する。サーチ領域の順位は T の値の大きい順に決定する。すなわち、ヒュースティック関数 T の値が大きいサーチ領域から peg による hole の探索を行う。ただし、同じマッチング値をもつサーチ領域についてはサーチ領域番号の小さいものから探索することにする。

5. 各サーチ領域内での探索

各サーチ領域の順位を決定したあと、決定されたサーチ領域において peg による hole の探索を行う。本研究では、このサーチ領域内での探索を試行錯誤的に行うのではなく、2章において設定した各サーチ領域についてファジィ集合に従って、探索点を決めることにする(図4参照)。すなわち、このファジィ集合は円すい形のメンバシップ関数によって定義されているので、第1の探索点を円すい形の頂点Aとする。これは、各サーチ領域の中心に相当する。第2の探索点以下は第1の探索点から一定の間隔(ピッチ P_t)で正八角形

図4 探索点の設定

の頂点の位置に設定する(図4参照)。このように、メンバーシップ関数の値が最も高い円すい形の頂点からその斜面に沿って下向きに探索点を設定する。

次に、この探索アルゴリズムについて示す(図5参照)。まず、サーチ領域の中心A(第1探索点)においてpegの挿入動作を行う。力センサの垂直軸力 F_z が5[N]以上ならば挿入動作を中止する。そして、pegとholeとの接触を回避したのち次の探索点Bへpegを移動し、再び挿入動作を行い、 F_z による判定を行う。以後これを繰返し、 F_z が5[N]以下でかつ挿入距離が5[mm]になったときに挿入成功として作業を終了する。ただし、最初のサーチ領域内で挿入作業が終了しないときには次に順位の高いサーチ領域において同様の探索動作を行う。以上のように、本研究ではあらかじめ探索点を設定することにより離散的な探索を行っている。探索点が少ないと探索時間は短縮できるが、pegとholeの位置合わせが難しくなる。また、探索点が多くなると探索時間に無駄が生じる。

そこで、本研究ではできるだけ探索点を少なくするために、RCC(remote center compliance)を用いてpegとholeの位置合わせの補助を行い、より円滑な精密はめあい作業を試みる。

6. 実験

6.1 実験システム 本研究の実験システムを以下に示す。なお、プログラムはN88BASICで作成した。

ロボット：3自由度直交形ロボット [日本精工(株)精密位置決めテーブル XY-HS0020-902 を使用]

分解能：0.01 [mm], 位置決め精度：0.03 [mm]

力センサ：U. S. A., Lord 社 6軸力覚F/Tセンサモ

デル No. 30/100

RCC：研究室で製作

並進方向弾性：7.4 [N/mm]

回転方向弾性：26 000[N・mm/rad]

表 1 作業対象部品

Diameter of peg	12.74(mm)
Diameter of hole	12.76(mm)
Clearance	0.02(mm)

図 5 探索動作のフローチャート

Note: Max is total of search points in one search area.

図 6 挿入過程のフローチャート

コンピュータ：NEC PC9801vx21

本実験における作業対象部品は表1に示すとおりである。なお、部品はいずれもアルミニウム合金で面取り面はない。

6・2 実験例と実験結果 本研究では誤差領域の半径を $c=1.0[\text{mm}]$ 、各サーチ領域の半径を $\varepsilon=0.4[\text{mm}]$ とした。図7は探索点のピッチ $P_t=0.2[\text{mm}]$ の場合の一例である。この例の場合、前回の精密はめあい作業の結果から得られた hole の中心座標が $(x, y)=(0.8, 0.346)$ 、前々回の結果が $(x, y)=(0.741, 0.205)$ であり、式(1)より hole の中心座標についてのメンバシップ関数の頂点の座標は $(x, y)=(0.771, 0.276)$ となる。そして、ファジィパターンマッチングの結果から最も順位の高いサーチ領域 AR(7) から peg による hole の探索を行った(表2参照)。まず、AR(7) の中心である点Aにおいて peg の挿入動作を行ったが F_x が $5[\text{N}]$ 以上となり挿入不可と判定された。そこで、次の探索点Bにおいて同様の操作を行ったが、挿入不可と判定された。以後、点C、Dでも同様の判定が行われ、点Eにおいて peg の挿入が成功した。この例では、操作数が5回で挿入が成功したことになる。この場合の

探索時間は15秒であった。ただし、もし AR(7) のすべての探索点で挿入が成功しなかった場合には、次の順位である AR(12) において探索を行うことになる。

本研究では、各サーチ領域での探索点の数と精密はめあい作業との関係を調べるためにピッチ P_t が $0.1[\text{mm}]$ 、 $0.2[\text{mm}]$ そして、 $0.3[\text{mm}]$ の三つの場合において実験を行った。実験回数はそれぞれ50回であり、いずれも精密はめあい作業は成功した。表3に実験結果を示す。

6・3 考察 まず、ピッチ P_t の違いと実験結果について考える。表3より、本実験では $P_t=0.2[\text{mm}]$ の場合が最短時間で作業が行われ、次いで $P_t=0.1[\text{mm}]$ そして、 $0.3[\text{mm}]$ となっていることがわかる。 $P_t=0.1[\text{mm}]$ の場合には、各サーチ領域内での探索点の数が最も多いので、peg と hole の位置合わせは比較的

表2 ヒューリスティック関数の値

Ranking	Search area	Heuristic value
1	AR (7)	0. 5 9 3
2	AR (1 2)	0. 5 5 2
3	AR (1 1)	0. 3 9 1
4	AR (6)	0. 3 6 3
5	AR (3)	0. 3 3 1
6	AR (1 6)	0. 3 0 3
7	AR (1 0)	0. 2 0 2
8	AR (1 5)	0. 1 8 5
9	AR (2)	0. 1 7 1
10	AR (5)	0. 1 3 1
11	AR (1 9)	0. 0 9 8
12	AR (1 4)	0. 0 6 7
13	AR (9)	0. 0 5 4
14	AR (1 8)	0. 0 5 1
15	AR (1)	0. 0 4 6
16	AR (1 7)	0. 0 1 4
17	AR (4)	0. 0 0 8
18	AR (1 3)	0. 0 0 4
19	AR (8)	0

表3 実験結果

Pitch P_t (mm)	Averaged frequency of search points	Average of search time (s)
0.1	17.4	27
0.2	15.1	25
0.3	24.7	34

図7 ピッチ $P_t=0.2[\text{mm}]$ の場合の実験例

円滑に行われている。しかし、部品間の位置決め偏差が大きい場合には無駄な探索点の数も多くなる。 $P_t = 0.3[\text{mm}]$ の場合には、各サーチ領域内での探索点の数が少な過ぎるために、RCCの補正機能を用いても peg と hole の位置合わせがうまく行われず、探索時間に無駄が生じている。 $P_t = 0.2[\text{mm}]$ の場合には、探索点の数と RCC の補正機能とがうまく適合しているために三つの場合の中では最短時間で作業が行われている。また、本研究における探索点の設定では、各サーチ領域の中心に近いほど探索点の数は密になり、中心から遠いほど粗くなる。これはメンバシップ関数の設定時に、各サーチ領域内ではその中心付近に実際の hole 中心が存在しそうだという仮定を行ったためである。しかし、各サーチ領域は互いに重なり合った部分をもつように設定されているので、探索作業への影響は少ないものと考えられる。

次に、精密はめあい作業が成功するまでの探索時間について考える。本研究では、探索時間の中で、peg の初期挿入から挿入終了と判定されるまでにその大半を費やしている(約 10 秒)。しかし、この時間については、挿入時に部品間に生じる抗力を小さくするかどうかで大きく違ってくる。挿入終了判定で垂直軸力 F_z のしきい値を大きくするとある程度強引に押し込むことになるため探索時間は短くなるが、部品に傷などが付く恐れがある。これに対して、 F_z のしきい値を小さくすると抗力が小さくなり滑らかな挿入が行えるので、部品の材質が比較的柔らかい場合には適する。しかし、探索時間は長くなる。このように、 F_z のしきい値は組立部品の材質や組立の用途に対して変更する必要がある。本研究では、 F_z のしきい値を $5[\text{N}]$ に設定し、挿入距離が $5[\text{mm}]$ になったときに挿入終了にしている。

最後に、各サーチ領域内での探索のアルゴリズムについて考える。以前のわれわれの研究⁽⁷⁾では、各サーチ領域内での探索法に力センサのモーメント信号を利用したバイアスサーチ法を用いた。しかし、これでは部品間の位置姿勢に含まれる偏差のためにセンサ信号が不確定なものとなり探索を難しくした。これに対して本研究では、あらかじめ各サーチ領域についてのメ

ンバシップ関数の形状に従って探索点を設定した(図 4 参照)。以前の手法では探索のために peg に作用する垂直軸力 F_z と x 軸、 y 軸についてのモーメント M_x, M_y を必要としたが、本手法では F_z のみで探索が行える。そのため、以前の手法に比べて力センサに頼る度合いが少なくなり、部品間の位置姿勢に含まれる偏差やセンサノイズの影響も受けにくく、アルゴリズムも簡単にすることができた。また、本研究では、誤差領域を半径 c が $1.0[\text{mm}]$ の円領域としたが、 $c > 1.0[\text{mm}]$ の場合でもサーチ領域の数を増やすことにより対応できると考える。

7. お わ り に

本研究では、面取り面のない精密はめあい作業に対して、RCC とファジィパターンマッチングを用いた発見法的探索を適用し、実験によりその有効性を確かめた。まず、誤差領域をより小さなサーチ領域に分割し、誤差領域についてのファジィ集合と各サーチ領域についてのファジィ集合を主観的に決定した。そして、ファジィパターンマッチングを用いることにより探索するサーチ領域を決定した。また、あらかじめ各サーチ領域についてのメンバシップ関数の形状に従って探索点を設定して、部品間の位置姿勢に含まれる偏差やセンサノイズの影響を少なくし、アルゴリズムも簡単にすることができた。実験では、各サーチ領域内での探索点のピッチを変えることにより、RCC の補正機能とピッチの関係を考察した。ただし、これについては厳密な解析を行っていないので、今後の課題とした。

文 献

- (1) Simunovic, S., *5th Int. Symp. Indus. Rob.*, (1975), 415.
- (2) Garg, D. P. and Ellingboe, B. S., *Am. Control Conf.*, 2 (1985), 741.
- (3) Vaaler, E. and Seering, W., *IEEE Int. Conf. Rob. Autom.*, 3(1987), 1357.
- (4) Whitney, D. E., *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 104-1(1982), 65.
- (5) Gupta, M. M., Tukamoto, Y. and Nikiforuk, P. N., *Proc. JACC*, 2(1980), FP10D1.
- (6) Zadeh, L. A., *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1978), 3.
- (7) 原・横川・吉中, 機論, 54-506, C(1988), 2504.