ロボットの可姿勢マップに基づくロボットの動作軌跡生成システム*

藤本 公三**, 亀山 雅司***, 仲田 周次**

Generation of Moving Trajectory Based on Movable Posture Map of Robot Hand*

by Kozo Fujimoto**, Masashi Kameyama*** and Shuji Nakata**

An intelligent robot system in which the working procedure and the moving trajectory of a robot can be generated based on the design data of the assembled objects and the working specification is needed for the flexible manufacturing. It is easy to calculate the position of the endeffector and the robot posture based on each joint angle of the robot. But, it is difficult to calculate each joint angle of the robot based on the position of the endeffector and the robot posture. Moving trajectory of the robot is determined in the area where the robot can move and the posture can be settled in each position of the endeffector. In this report, generation system of moving trajectory based on the movable posture map is proposed. Movable posture map is generated easily based on the posture calculated by each joint angle. Movable posture map is expressed by maximum posture angle and minimum posture angle for the distance from a basis joint of a robot to a endeffector. By using this movable posture map, moving trajectory and posture on its trajectory can be selected easily in the movable posture range of a robot.

Key Words: Computer integrated production system, Intelligent system, Moving trajectory, Movable posture map, Robot, Configuration space

1. はじめに

ロボットの導入により生産の自動化が進められ、オフラインティーチング¹⁾、アークセンサ²⁾、視覚による倣い制御³⁾などの開発・研究により適用範囲が広まってきている。しかし、現状のロボット利用は大量生産システムが主流であり、多品種少量生産へのロボットの利用には、コンピュータで統合化された生産システムの構築が必要となる。コンピュータ統合生産システムにおいてロボットを効率よく用いるには、作業計画、対象・環境認識、運動計画・制御技術、マンマシンインターフェイスなど開発しなければならない課題が多い⁴⁾。

本研究では、ロボットの運動計画に焦点を当てて検討したものである。ロボットに作業をさせる時、その作業を遂行するためのロボット先端位置と姿勢を選定し、それに基づいて各関節角が算出される。つまり、ロボットの運動計画では、与えられた作業を行うのに適したロボットの先端位置と姿勢の決定問題が重要課題となる。ロボットは、個々にロボット先端（エンドイフェクタ）の動作範囲、およびその動作点における可姿勢範囲が存在し、どのような作業経路、姿勢でもとれるとは限らない。このため、ロボットの可動範囲、可姿勢範囲をもとにしたロボットの選定、配置計画⁵⁾もシステム化にとって重要である。

ロボットの駆動経路・姿勢の決定において、作業候補点の個々の点で動作範囲、可姿勢範囲のチェックを行うのは非常に困難である。ロボットの可操作度を定義し、この可操作度を基にロボットの設計、作業計画に利用する研究⁶⁻⁸⁾も行われているが、これは、基本的に個々の作業点における移動ベクトルを基準としており、ロボットの設計には有

用な方法であると思われるが、オンラインでのロボットの動作経路生成およびロボットの配置計画にこれを直接使用するのは非常に煩雑であると考えられる。また、ロボットの動作軌跡生成でロボットの関節角空間を利用する方法がPerezらにより提唱されている⁹⁻¹³⁾。彼らはこのConfiguration spaceを用いてロボットの干渉回避経路の探索を提唱しているが、彼らの示しているConfiguration spaceは、障害物を回避するためのマップを作成しており、個々の障害物に対するマップの生成が必要となる。

本研究では、障害物回避を主目的としたものではなく、ロボットで作業を行うときのエンドイフェクタの制約となる

○一定な姿勢角で移動する

○ハンドリングにおいて把持した時と移動した後でワークを離すときで同一姿勢をとる

などのもとで作業を行うとき、どのような姿勢で作業を行うことができるのか。また、指定された姿勢で作業を行うときにロボットとワークの位置関係をどのようにすればよいのかを判断するためのものである。このため、本研究では、あらかじめ、ロボットの先端位置に対する可姿勢範囲を算出し、ロボットの基準となる関節からエンドイフェクタの先端位置までの距離を基準としたロボット固有の可姿勢マップを生成し、この可姿勢マップを基に与えられた作業仕様に対するエンドイフェクタの動作軌跡(位置、姿勢)を効率よく選定可能な方法を提案し、ハンドリングによる作業物体移動システムにおいて本手法の検証を行ったものである。

2. ロボットの各関節角とロボット先端姿勢の関係

多関節型ロボットは各関節角を制御することによって姿勢の制御が行われる。ここで、Fig. 1に示す n 軸の関節を有するロボットについて、各関節角とエンドイフェクタの位置の関係について検討する。

関節の回転は i 番目の関節の x_i, y_i, z_i 軸のうち、いずれかの軸が $i-1$ 番目の関節の一つの軸に平行にとられるとする。あるベクトル $\vec{A}$ を i 番目の関節の座標系から見たとき

*原稿受付 平成7年5月24日 平成6年度春季全国大会で発表、平成6年度11月溶接法研究委員会で発表

**正 員 大阪大学工学部 Member, Osaka Univ. Faculty of Eng.

***正 員 大阪大学(現:関西電力㈱) Member, Osaka Univ. Faculty of Eng. (present; The Kansai Electric Power CO., INC.)

Fig. 1 Structure of a manipulator and associated set of coordinate axis.

$\overline{A(i)}$ と表すとすると、 $\overline{A(i)}$ は $i-1$ 番目の関節の座標系から見ると、 $\overline{A(i-1)}$ と表され、 $i-1$ 番目の関節から i 番目の関節へのベクトルを $\overline{i-1} \cdot \overline{i}$ とすれば、両者の間には

$$\overline{A(i-1)} = \overline{i-1} \cdot \overline{i} + C_{i-1}^i \overline{A(i)} \quad (1)$$

の関係がある。 C_{i-1}^i は $i-1$ 番目の座標系と i 番目の座標系との変換行列で i 番目の座標系が x, y, z 軸の回りに θ_i だけ回転した場合、各軸回りにそれぞれ、

x 軸回り

$$C_{i-1}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ 0 & \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

y 軸回り

$$C_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

z 軸回り

$$C_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。

エンドイフェクタの位置は各関節角の回転とアームの長さによって決まり、それぞれの腕の長さを T_i とすると式(1)を展開して、

$$A(0) = \sum_{i=1}^{i-1} C_0^i(0, 0, T_i)^T + C_0^i A(i) \quad (5)$$

ただし、

$$C_0^i = C_0^1 C_1^2 \cdots C_{i-1}^i C_{i-1}^i \quad (6)$$

である。したがって、ロボット座標系でのエンドイフェクタの位置 E_n は

$$E_n(0) = \sum_{i=1}^n C_0^i(0, 0, T_i)^T \quad (7)$$

で表すことができる。

ロボットのエンドイフェクタの位置と姿勢が指定された場合の各関節角の角度は式(1)~(7)を逆算することで求めることができる。

3. ロボット可動空間におけるロボット可姿勢マップの算出法

ロボットに作業をさせる場合、ロボットが指定された場所で目的の姿勢がとれるか否かを判断する必要がある。この判断は目的の姿勢を達成できる各関節角の組み合わせが存在するか否かでわかるが、指定された個々の姿勢において、その都度各関節角を計算していたのでは作業性が大幅に低下する。

そこで、ロボットの作業空間内での任意の場所でのロボットの可姿勢範囲を事前に計算しておき、ロボットの駆動時に必要とされるデータを参照もしくは簡単な変換をかけて用いれば、大幅な高速化がはかれる。しかし、ロボットの作業空間内の全ての動作点における可姿勢データを持たせることは、データ量、データの検索性からも妥当とはいえない。

Fig. 2(a)に示す第1軸が回転、第2軸が施回転である n 軸垂直多関節型ロボットの場合、第2軸の回転中心とロボット先端を結ぶ軸 X_r を規定し、 X_r 上の先端位置に対して軸 X_r に対する最大および最小姿勢角をエンドイフェクタの可姿勢範囲として登録したデータテーブルを持たせておく。これにより、任意の座標値でのエンドイフェクタの姿勢は、座標値から簡単に求めることができる X_r 軸自体の姿勢と、登録されている可姿勢範囲データから、要求されている姿勢をとることが可能か不可能かを簡単に判別することができる。以後このデータテーブルをロボット可姿勢マップと呼ぶことにする。

6軸以上の垂直多関節型ロボットで各ロボット先端位置での最大および最小姿勢角を各関節角の逆算から求めることは難しい。そこで、ロボット可姿勢マップの算出はロボット各関節角を一定角度ずつ、それぞれ最小角から最大角まで回転させた時の X_r 軸の値 X_0 とエンドイフェクタの姿勢 θ_x を(7)式から算出することにより行う。ここで、

$$X_0 = [E_n(0)_x^2 + E_n(0)_y^2 + (E_n(0)_z - T_0)^2]^{1/2} \quad (8)$$

エンドイフェクタの姿勢は $E_{n-1}(0)$ か $E_n(0)$ へのベクトルで表され、

$$\theta_x = \overline{E_{n-1}(0)} \cdot \overline{E_n(0)} \quad (9)$$

となる。

姿勢データは同じ X_r 軸値をとったとき、最大姿勢角値、または最小姿勢角値が更新され、全ての関節が回転し終わったとき X_r 軸の各位置でのエンドイフェクタの可姿勢範囲データが得られる。

エンドイフェクタの姿勢 θ_x のロボット可姿勢マップ上での記述の方法であるが、ロボット座標原点と X_0 を通り、 xy 平面に対して垂直な平面を考え、その平面に対して投影されたエンドイフェクタの影とエンドイフェクタのなす角度を θ_{x2} 、また投影されたエンドイフェクタの影 T_n と X_r 軸がなす角度を θ_{x1} と定義する。このようにして求めた n 軸垂直多関節型ロボットの可姿勢マップを Fig. 2(b)に示

Fig. 2 Movable posture map for robot with n degree freedom. (a) robot posture, (b) movable posture map.

す. n 軸垂直多関節型ロボットの可姿勢マップは距離 X_r を変数として待ち, 姿勢データを参照する際には, θ_{x1} , θ_{x2} のどちらかを決定しなければもう一方の解は定まらない。

また, この方法でのロボット姿勢データ算出は, 計算にかかると, エンドイフェクタの可姿勢範囲データはロボット1種類につき1回算出すればよく, また, ロボットを運用する前に用意しておけばよいものなので, 時間的な問題は大きなデメリットにはならない。また, アルゴリズムは単純でロボットの軸数には関係がないというメリットがある。

なお, 最も単純な垂直多関節5軸ロボットの場合, 対象となる軸回転が xy 平面に対して垂直方向だけになっている。したがって, ロボット可姿勢マップは Fig. 2(b) に示したロボット可姿勢マップの θ_{x1} が 0 の場合に相当している。

以下, ロボットの姿勢角を簡単に表現するため, 単に θ_k と記述する。

ここで示した可姿勢マップは第1軸が回転, 第2軸が旋回軸となる一般 n 軸の多関節型ロボットの場合, 同一のアルゴリズムで求めることができる。

4. 物体移動におけるハンドリング手順の決定

4.1 ハンドリング点とハンドリング姿勢の算出

ロボットにより作業対象物体をハンドリングして移動作業を行わせる場合, まず物体のどの部分をどのような姿勢で把持すればよいのかを決定しなければならない。いま, Fig. 3 に示すように, 作業対象物体を A の状態から B の状態に移動させる作業について検討する。この時, ロボットハンドの位置は X_0 から X_1 へと変わる。この X_0 を初期位置, X_1 を終了位置と呼ぶことにする。

ハンドリング位置およびハンドリング姿勢を決定する場

合, 物体上のハンドリング位置 P_g に対して, 次の要求事項を満足していなければならない。

- ① ハンドリング位置 P_g は法線ベクトルが逆向きの平行する 2 面の面上で, その 2 面の間隔がロボットハンドで把持できる範囲内であること。
- ② ロボットハンドが物体と干渉しないこと。
- ③ 物体に対するハンドの姿勢が変化しないこと。
- ④ ハンドリング位置 P_g でその姿勢がとれること。

要求②は Fig. 4 に示すように, ハンドの指の長さ w_3 に対して aw_3 の部分で把持する場合, ロボットハンドの把持部のワーク面に対して $\pm \theta_{hc}$ の範囲の姿勢をとることができる。ロボットハンドの幅を w_4 とすると, 姿勢範囲 θ_{hc} は,

$$\theta_{hc} = \tan^{-1} [2(1-a)w_3/w_4] \quad (10)$$

となる。

要求③は, Fig. 3 に示すように, ワーク移動後のワークの姿勢, ロボットの姿勢は変化をするが, ロボットハンドのワークに対する相対的な姿勢は変化してはいけないということである。つまり, Fig. 3(b) に示すように, 物体を把持する面の稜線に平行な基準線 l_s に対して, ロボットハンドの姿勢が同じ姿勢 θ_s をとらなければならない。Fig. 3(c) に示す可姿勢マップは, ロボットの基準軸と先端を結ぶ X_r 軸に対する姿勢を表しているため, このマップ上でワークに対する姿勢を直接比較できない。このため, 移動後の姿勢を比較できるように, ハンドリング位置, ワークとの相対姿勢を考慮して, 姿勢角範囲を

$$\{\theta_s\} = \{\theta_k\} + \tan^{-1} [(z - T_0)/(x^2 + y^2)^{1/2}] + \theta_{s0} \quad (11)$$

と変換する。第2項は X_r 軸のロボット座標系における姿勢であり, ロボット座標系に対する姿勢への変換項である。第3項はワーク姿勢に対する姿勢変換項である。この式により変換された可姿勢マップ上で, 共通姿勢の判定・選定が可能となる。

(b) range of handling posture under consideration of collision between handling object and hand

Fig. 3 Selection of operating trajectory on movable posture map for handling procedure.

4.2 掴み換え位置、姿勢の選定

Fig. 3 で示したロボット姿勢は、初期位置から終了位置まで、ワークに対するハンドの姿勢を変更せずに作業が行われる場合を示したが、初期位置から終了位置にワークを

Fig. 4 Range of handling posture under consideration of collision between handling object and hand.

移動させる時にワークに対して同一姿勢をとれない場合がある。Fig. 5 は、掴み換えが必要な場合の一例を示したものである。初期位置 X_0 におけるハンドの姿勢範囲と終了位置の X_2 におけるハンドの姿勢範囲において Fig. 5 (b) の可姿勢マップから分かるように、共通姿勢が存在しない。このため、掴み換えが必要と判断され、初期位置、終了位置と相互に同一姿勢をとることのできる掴み換え位置 X_1 でのハンドリング位置、ハンドリング姿勢がマップ上で選定される。

4.3 可姿勢マップによるハンドリング動作軌跡生成

本研究で構築したロボットの動作軌跡生成システムは、Fig. 6 に示すオフライン処理系とオンライン処理系から構成されている。オフライン処理系では、ワークの CAD データ生成と可姿勢マップの生成処理が行われる。オンライン処理では、以下の処理が行われる。

- ① 作業座標系におけるワークの初期位置と終了位置および各位置でのワークの姿勢をコンピュータに入力する。
- ② 視覚システムにより、初期位置に置かれたワークの位置計測を行い、ロボット座標系にワークの形状データを変換する。
- ③ 可姿勢マップデータを基にハンドリング位置、ハンドリング姿勢を選定する。
- ④ ハンドリング移動経路を選定し、ロボットの関節角を算出する。
- ⑤ ロボットに作業を行わせる。

③のハンドリング位置、姿勢の決定方法は4.1, 4.2に基づいて行っており、④の移動経路の選定は次のように行っている。

Fig. 7 に示すハンドリング移動経路において、初期状態と終了状態におけるハンドリング位置 $Ph(l)$, $Ph(n)$ およ

(b) operation trajectory on movable posture map

Fig. 5 Selection of operating trajectory on movable posture map for handling procedure.

びその姿勢は③で選定される。この初期状態から終了状態までの移動経路は無数に存在し、その経路の決定方法は作業の目的によって異なる。本研究では、作業制約下でのエンドエフェクタの位置、姿勢の決定方法について検討を行ったものであり、移動経路の探索を主目的としたものではないため、移動において作業台との干渉を起こさず、姿勢の取り得る裕度が大きくなる経路を採用している。まず、

Fig. 6 Algorithm for selection of operating trajectory on movable posture map for handling procedure.

Fig. 7 Handling position $Ph(n)$ in handling procedure.

ハンドをワークに近づくための位置 $Ph(0)$ 、および、ワークからハンドを放し、遠ざけるための位置 $Ph(n+1)$ は、物体の CAD データから非干渉移動範囲を算出して求めている。また、初期状態のハンドリング位置 $Ph(1)$ から終了状態のハンドリング位置 $Ph(n)$ の間の経路は、物体が環境と干渉しない点 $Ph(2)$, $Ph(n-1)$ を選定(本研究では、環境としては作業台だけを対象としているので、作業台の法線方向で選定している)し、そのときのロボットハンドの可姿勢をマップから求めて、移動経路における位置と姿勢の決定を行っている。なお、姿勢の決定は可姿勢範囲の中心角を採用している。この姿勢はハンドの動きに対して最も裕度が高い。このようにして求めたロボットハンドの移動経路(位置、姿勢)に対して、ロボットの各関節角の回転角度を算出している。

なお、図中の網掛けを行った部分が本研究により新たに開発した処理である。

Fig. 8 はこの可姿勢マップに基づくロボットの動作軌跡生成システムにより、ロボットにハンドリング作業を行わ

Fig. 8 Handling procedure selected on movable posture map.

せた一例である。ワークを最初 step 1 の場所に置いておき、step 6 に示した位置にワークの姿勢を変化させて移動させる指示をコンピュータに与え、自動生成された処理結果である。これから分かるように、step 3 と step 4 の間で掴み換えが行われ、作業が終了している。

5. 結 論

本研究では、ロボットの可姿勢範囲をマップ表現する方法を提案し、このマップ表現された可姿勢範囲データを基にロボットの動作軌跡を自動生成するシステムの構築を行った。以下に本研究で得られたことを要約する。

- 1) 第1軸が回転、第2軸が回転軸である n 軸垂直多関節ロボットの場合、第2軸の回転中心とロボット先端とを結ぶ X_r 軸に対するエンドイフェクタの先端位置と可姿勢範囲で表現した可姿勢マップを利用することにより、ロボット可動空間の全ての点での可姿勢範囲を容易に変換・参照可能である。
- 2) ロボットの全ての回転軸を最小駆動回転角ごとに回転させて得られるエンドイフェクタ先端位置における姿勢角データから X_r 軸上の距離 X_0 における最大姿勢角と最小姿勢角を抽出することにより、一般 n 軸ロボットに対して容易に可姿勢マップが作成される。
- 3) 可姿勢マップを利用することにより、以下のことが可能となる。
 - ① 姿勢裕度を考慮に入れた連続した経路決定が容易にできる。
 - ② 非干渉姿勢範囲をマップ上に重ねることができるので、容易に干渉を考慮したロボットの姿勢決定ができる。
 - ③ 作業対象ワークとの相対姿勢で姿勢決定が可能なので、ハンドリングにおけるワークの姿勢変化にも適用

できる。

参 考 文 献

- 1) 前川, 山本, 仲田; “アーク溶接ロボットのオフラインプログラミングシステムにおける溶接線上のトーチ動作軌跡処理”, 溶接学会論文集, Vol. 7, No. 2, pp. 268-275 (1989).
- 2) Y. Sugitani, W. Mao, M. Ushio; “Adaptive Control of Weld Bead Shape Utilizing Arc Sensor in One Side GMAW Process with Backing Plate”, IIW Doc. XII-1360-94.
- 3) 藤田, 松本; “視覚センシング技術”, 溶接学会誌, Vol. 63, No. 7, pp. 511-515 (1994).
- 4) 藤本; “コンピュータ統合生産システムと産業用ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 8, pp. 1115-1119 (1994).
- 5) 三橋; “ロボット配置計画とシミュレーション”, 『日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 2, pp. 136-142 (1985).
- 6) T. Yoshikawa; “Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy”, Preprints of the 1st. International Symposium of Robotics Research, Aug. 28-Sept. 2, 1983.
- 7) 吉川; “ロボットアームの可操作度”, 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 63-67 (1984).
- 8) 古荘, 臼井, 佐野; “障害物の影響を考慮したマニピュレータの可操作度”, 日本ロボット学会誌, Vol. 6, No. 3, pp. 184-192 (1988).
- 9) T.L. Perez; “Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements”, IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-11, No. 10, pp. 681-698 (1981).
- 10) T.L. Perez; “Spatial Planning: A Configuration Space Approach”, IEEE Trans. on Computers, Vol. C-32, No. 2, pp. 108-120 (1983).
- 11) W.E. Red and H.V.T. Cao; “Configuration Maps for Robot Path Planning in Two Dimensions”, Trans. on the ASME, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 107, December, pp. 292-298 (1985).
- 12) T.L. Perez; “A Simple Motion-Planning Algorithm for General Robot Manipulators”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 3, pp. 224-238 (1987).
- 13) 原功, 長田正; “Configuration 空間における障害物記述に関する考察”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 255-262 (1993).