NC 塗装ロボットの軌道精度評価法

宮 脇 国 男* 定 家 康 浩*

Accuracy Evaluation of Trajectory for NC Painting Robot

Kunio Miyawaki* and Yasuhiro Sadaie*

Ultimate goal of this study is making up CIM of painting process for large scale steel product. For the purpose of it, the study aims at developing a simple way of accuracy evaluation of trajectory for NC painting robot. First, we made it clear that generation system of operation data for NC robot is one of the most important items and accuracy evaluation of robot trajectory is essential for it. We noticed through experiment that accuracy of trajectory is proportional to the distance between TCP (Tool Center Point) and singular point. We also noticed that there exists one locus of singular points subject to one tool configuration. This means that minimum distance between trajectory and the locus is useful for the evaluation. In this paper, detail of algorithm and characteristic of this method is described. This method is found to be very practical because calculating value of the Jacobian is not necessary.

Key Words: Robot, Painting, Offline Programming, Evaluation of Trajectory, Singular Configuration

1. は じ め に

自動車など量産型製品の製造では、各種の作業工程でロボットが広く実用化されている。一方、船舶や橋梁など大型鋼構造製品においても、溶接工程のロボット化 [1] が精力的に進められ、今やなくてはならない存在となっている。そして、さらに CIM (コンピュータ統合生産システム) の構築に向けて鋭意開発が行われている [2][3]。この分野での次期開発目標とされるのが、溶接と共に重要な基幹技術である塗装のロボット化である。しかし、この分野での塗装ロボット化の試みは極めて少ない [4]。その理由の一つは、技術的な困難だけでなく、溶接に比べて経済効果が十分でないと判断されることにある。しかし、社会の成熟化に伴い、熟練した塗装技能者は急激に減少しつつある。一方、海洋汚染への対策としてオイルタンカーの二重底構造が要請されているように、社会基盤としての鋼構造製品はより複雑な設計となり、より高い塗装品質を求められると共に塗装作業の増大を招いている。

このような状況の下で、我々は鋼構造塗装のロボットシステム開発に取り組んでいる。ロボットの研究成果は数多く発表されているが、応用研究として塗装ロボットを取り上げたもの [5][6] は数少なく、とりわけ大型の鋼構造ワーク塗装への適用についての研究 [7] は極めて少ない。しかしながら、そこには実用化の

ための多岐に渡る研究開発項目が存在する。オフラインでのロボット運転データ生成システムは、そうしたなかで最も重要な項目の一つである。本研究は、生成したロボット軌道の実用的な精度評価に関するもので、運転データ生成システムに必須のサブシステムである。軌道精度に直接影響を及ぼすロボットの機構性能評価については、ヤコビ行列式による評価方法の研究成果 [8][9] が出ており、理論的かつ定量的な取扱いを可能にしているので、原理的に軌道精度評価に使用可能である。しかし、これらの研究は軌道の評価を直接の目的とするものではなく、機構性能の評価や最適軌道生成を目的としている。鋼構造塗装では扱う軌道数は莫大であり、是非とも簡便で短時間のオペレーションですむ軌道評価法が求められる。本報告は、こうした目的に添った評価法として、一定のツール姿勢に対して特異点が決まった軌跡をとることに着目し、その軌跡と軌道との定量的な位置関係によって軌道精度の可否を判定する方法を提案している。そして、鋼構造塗装の特徴を利用することにより、実用的で簡便な評価手順を確立したので、その詳細について述べている。

2. 鋼構造塗装ロボットと軌道の評価

2.1 鋼構造塗装の運転データ生成システム

鋼構造塗装ロボットシステム構築のためには、対象となるワーク構造の特徴、塗装施工法、CIM 化の三面からの検討が必要である。そして、設定されるいくつかの開発課題を実現するために、数多くの要素技術開発が必要となる。これらは、ロ

原稿受付 1998 年 1 月 5 日

*日立造船 (株)

*Hitachi Zosen Co.

Fig. 1 Workpiece of steel product

Fig. 2 View of workpiece from robot

ボットの機構・制御に関するもの、塗装施工技術に関するもの、そしてCAD/CAMなどのシステムに関するものに分類できる。

対象となるワークは橋梁部材や船舶ブロックで、Fig. 1に示すようにパネル構造の組み合わせで構成されている。その構造的特徴は、大寸法で立体的であり、補剛材などが付いていて複雑なことである。一例として、船舶ブロックの一部分をロボットから見た様子をFig. 2に示す。ここではロボットの左右・上面・正面をパネルが取り囲み、しかも、パネルにはさらに部材が縦横に付いている。ロボットによる鋼構造塗装では、塗装品質の確保と共に、このような構造的特徴を持つワークを塗り残しなく、しかも能率よく塗装することが必要である。このためにロボットはプレーサと称する三次元的なロボット移動装置（親ロボット）に搭載されて、塗装面にアクセスされる。またロボット運転のプログラミングは、もはやマニュアルティーチングでは不可能であり、NC制御方式の塗装ロボットとオフラインでのプログラミング機能を持つロボット運転データ生成システムが不可欠となる。CIMの下流に位置づけられる運転データ生成システムの役割は、対象となるワーク構造に応じてNCコードを効率よく生成することにある。運転データ生成システムでは、まずCADデータを基にワーク構造を認識、その構造データと、データベースとして蓄積されている塗装条件・塗装施工法ライブラリをリンクしつつロボット動作を生成し、塗装ロボットへのNCデータを出力する。

2.2 NC 塗装ロボットにおける軌道精度の評価

前節に述べたNC塗装ロボットの運転データシステムにおける動作生成において、生成したロボット軌道が適切であるかどうかを評価する機能は、システムの不可欠なサブシステムである。生成した軌道について評価すべき項目には二つある。一つは軌道中のロボットとワークとの干渉の有無であり、もう一つは軌道精度である。ここで、軌道精度とは、ツール先端（TCP: Tool Center Point）の位置経路精度とツールの姿勢経路精度、

Fig. 3 Operation data generation

および経路速度精度を総称したものである。ワークとの干渉回避は当然であるが、安定した塗装作業や必要な作業スキルを組み込むためには、軌道精度の確保もまた不可欠である。つまり運転データ生成システムには、軌道精度の保証された塗装パスをNC塗装ロボットに渡す義務がある。

ところで、動作生成に関して運転データ生成システムに与えられる情報は、ロボットが設置されている基準座標におけるワーク構造データと、使用するNC塗装ロボットの諸元のみである。前節で述べたように、ここではCADからの情報によりワーク構造を数値認識すると、ロボットの諸元の一つである動作範囲などを基に、ロボット原点の位置を決める。そして、認識したワーク構造と、ここで決めたロボット原点位置に従って、ワーク各部に対応する塗装パスや移動パスを軌道として生成するわけである。しかし、この段階では生成した軌道の精度が必要十分であるか否かは不明である。なぜならば、多関節型ロボットの場合、その動作範囲内における運動性能は等しくなく、ロボット姿勢に依存する。つまり運動性能の低いロボット姿勢では、軌道精度が低下する。マニュアルティーチング方式のプログラミングでは、操作員が直接見るによりその軌道精度を判定できる。悪ければ、ワークから見た作業軌道はそのままにして、プレーサのマニュアル操作でロボット原点を移動することにより、運動性能のより高い領域で、ロボットから見た新たなロボット軌道を再プログラムすることができる。しかし、NCロボットのためのオフラインプログラミングでは、軌道精度を目で見て判定することはできない。これが、運転データ生成システムにおいて、生成した軌道の精度の評価が必要な理由である。干渉チェックと軌道精度チェックを付加した動作生成による運転データ生成システムの概略処理をFig. 3に示す。ここでは軌道評価の結果に基づいて、必要に応じロボット軌道を修正する。このように干渉チェックと共に、軌道精度の評価は運転データ生成システムに不可欠なサブシステムである。

3. 特異領域と軌道精度の関係

3.1 特異姿勢と軌道精度の関係

多関節型ロボットでは、位置経路精度などの軌道精度が運動

Fig. 4 Confusion of paint film by trajectory

Fig. 5 Singular configuration

性能に影響されること、および運動性能がロボット姿勢に影響されることは前章に述べた。多関節型ロボットでは、その動作範囲内にロボット機構とそのパラメータ固有の特異姿勢が存在し、特異姿勢近傍で運動性能が劣化することはよく知られている [10]。これは軌道生成中の特異姿勢において、特定の関節軸に要求される回転速度が過大になることによる。その結果、TCP の位置・ツール姿勢・速度制御性が損なわれ、軌道精度が劣化するのである。これは特に軌道の指定速度が大きいほど、影響が大きい。アーク溶接ロボットでは、作業時に必要な軌道速度は数 100 [mm/min] 程度であるが、塗装ロボットでは、数 100 [mm/s] 程度の軌道速度を必要とする。また、線を対象とする溶接に比べて、面を対象とする塗装に要するロボットの軌道パス数は桁違いに多く、それだけに特異姿勢をとる確率も桁違いに大きい。塗装ロボットでは、特異姿勢による軌道精度劣化は極めて重要な問題なのである。

軌道精度は、TCP の位置経路精度とツールの姿勢経路精度および経路速度精度から成っている。例えば、Fig. 4 にその様子を示すように、軌道精度の劣化は、塗布面での塗装パターンの狙い位置のずれ、塗装ガンから塗布面までの塗装距離の変動による膜厚のむら、速度変動による同じく膜厚のむらなどの原因となる。こうして特異姿勢近傍での軌道精度の劣化により、塗布面は乱れ、塗装品質は確保できなくなる。

3.2 特異姿勢近傍における軌道精度の定量化

特異姿勢のうち、境界特異姿勢については動作範囲の設定で対処できるので実用上の問題はない。問題となるのは動作範囲内にある特異姿勢である。ビューマ型の多関節型ロボットでは、

Fig. 6 NC painting robot for measurement

Fig. 7 Measurement of trajectory accuracy

この種の特異姿勢として Fig. 5 に示す手首特異姿勢と肩特異姿勢があることはよく知られている [11]。手首特異姿勢は、手首軸方向と前腕方向とが一致する姿勢であり、肩特異姿勢は、手首姿勢にはよらず、手首中心が第一関節軸の旋回中心軸上に来る姿勢である。

こうした特異姿勢の近傍での軌道精度劣化を実測により調べた。Fig. 6 は計測対象のロボットで、銅構造研掃・塗装用として開発した NC 制御ロボットである。Fig. 7 に計測方法とその結果の表示例を示す。ロボットに特異点およびその近傍を通過する軌道を与え、オンライン軌道生成における制御周期ごとの関節座標現在値を記憶、順変換によって実際の TCP 位置とツール姿勢を求めて、位置経路誤差・姿勢経路誤差・経路速度誤差を算出している。Fig. 7 の表示例は、刻々の TCP とツール姿勢を水平角 15° ・ふ角 30° で見たものであり、指定速度は、膜厚の大きな重塗装に必要な速度として 300 [mm/s] に設

Fig. 8 Result of trajectory error

Fig. 9 SCP (spray center point) & tool orientation

Fig. 10 Result of SCP error

Fig. 11 Singular space

定している。

特異点近傍を通る軌道において、手首特異点に近づくにつれて軌道精度に誤差が生じることが分かる。計測パラメータとして、特異点を含む軌道からY方向およびZ方向への軌道のシフト量をとることにより、特異点からの距離と軌道精度の関係を把握した。手首特異点に対してはY方向およびZ方向にシフト、肩特異点に対してはY方向にシフトしている。Fig. 8に、特異点軌道からのシフト量、つまり特異点からの空間的距離に対する各軌道誤差の計測結果を示す。特異点において誤差がほとんど見られないのは、手首軸についての逆運動学において、現在値と同じ値の解を選択することができるためである。これらの結果は次のように要約できる。

- (1) いずれの軌道精度項目についても、ほぼ誤差は特異点からの距離に反比例する。
- (2) ツール姿勢経路誤差は、噴霧塗料の塗布面への付着性能には悪影響を及ぼさない程度である。
- (3) 速度経路誤差についても、塗装に必要とする均一な膜厚の確保には十分である。
- (4) TCPの位置経路誤差 Δp_{TCP} とツール姿勢経路誤差 $\Delta \psi_T$ が、相乗して塗布面での狙い位置誤差 δ_T となることはすでに述べた。ツール姿勢経路誤差と塗布面での狙い位置誤差との関係を Fig. 9 に示す。

ここで、塗布面狙い位置誤差のとり得る最大値は、塗装ガンと塗布面との塗装距離を l_s とすれば、次の式で表すことがで

きる。

$$(\delta_T)_{\max} = \Delta p_{TCP} + l_s \cdot \Delta \psi_T \quad (1)$$

Fig. 8 の軌道誤差計測結果と式 (1) から、特異点からの軌道の空間距離と塗布面狙い位置誤差の最大値との関係は、 $l_s = 300$ [mm] として Fig. 10 のようになる。ここでも、誤差は特異点からの距離に反比例している。なお軌道精度は、軌道の指定速度だけでなく、対象となるロボットの最高速度など、その仕様・能力によって異なることを付言しておく。また、誤差は指定速度にも影響される。

3.3 特異領域による軌道精度の評価原理

以上の結果と考察から、特異点を中心とする領域を設けて、評価対象の軌道がこの領域を通るか否かで軌道の可否を評価できることが分かった。例えば、塗布面での狙い位置誤差の許容値が 30 [mm] であるとする、Fig. 10 に示すように、軌道は特異点から 10 [mm] 以上離れている必要がある。このように、軌道精度が劣化する領域を、特異領域として定義できるならば、直線軌道がこの領域を通過するか否かで軌道の可否を評価できる。ここで、Fig. 11 に示すように、特異点の集合として特異点軌跡が定まるならば、特異点からの距離によって、軌跡に沿っ

た特異領域を定義することができる。特異領域を定義する距離を特異領域半径と呼び、 r_s で表す。ここで、必要最小限な特異領域半径の値は、ロボット姿勢によって、つまり動作範囲内での位置によって、厳密には異なる。しかし、評価の簡便性から、必要十分な一定値に設定することが本方式の軌道評価に適している。したがって、軌道評価の具体的方法としては、軌道線分と特異点軌跡線分との空間内での最短距離が、一定値である上記特異領域半径よりも大きければその軌道は可、小さければ不可と判定できる。なお、特異領域半径 r_s は、前節のような精度測定を基に、対象の作業とロボットに対応して、できれば実際の作業を行ったうえで決定することが望ましい。また、同じく特異領域半径 r_s は、指定速度によって必要な値が異なるので、これも測定のうえ設定する必要があることを付言しておく。

4. 軌道精度の評価アルゴリズム

4.1 手首特異点軌跡の定式化

前章で述べたように、特異領域を利用した軌道精度評価の具体化には、まず特異点軌跡を定式化する必要がある。特異点軌跡の定式化とは、軌跡を表す曲線式とその曲線上での特異点のとり得る範囲を、代数式の形で明示することである。Fig.1 のような鋼構造物の塗装では、一般に塗装軌道として、目標点とツール姿勢および経路速度を指定する。一定のツール姿勢を指定したときに、ピューマ型ロボットの手首特異点がいかなる軌跡を描くかを Fig. 12 に示す。ここではツール軸を手首軸と同一軸に配置している。以下、この配置に基づいて議論を進める。この軌跡は、前腕の方向をツール軸方向のベクトル $\mathbf{a}$ と平行に保ちつつ第二関節軸 (θ_2) を可動範囲内で動かしたときに TCP の描く軌跡であって、それは上腕の長さを半径とする円弧 S_1S_2 である。この円弧は、ベクトル $\mathbf{a}$ によって決まる平面 π (x_1-z_1 面) 上にある。以下、手首特異姿勢について特異点軌跡を定式化する手順を示す。

(1) NC データの一部として与えられる、Z-Y-X オイラー角 (α, β, γ) によるツール姿勢より、基準座標系から見たツール軸 (手首軸) 方向ベクトル $\mathbf{a} = [x_a, y_a, z_a]^T$ を求める。ベクトル $\mathbf{a}$ は、ロボット関節角によるツールまでの回転変換行列により、式 (3) のように求まる [12]。

$$[\mathbf{n}, \mathbf{s}, \mathbf{a}] = {}^0R_T \quad (2)$$

Fig. 12 Wrist singularity and singular locus

$$\mathbf{a} = [\cos\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma, \sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma, \sin\gamma]^T \quad (3)$$

ここで、 $c\alpha = \cos\alpha$, $s\alpha = \sin\alpha$ などを表す。

(2) ツール軸方向 $\mathbf{a}$ を含む平面 π に対する第一軸の関節角度 $\theta_1(\mathbf{a})$ を求める。これは平面 π の式でもある。

$$\tan\theta_1(\mathbf{a}) = y_a/x_a \quad (4)$$

(3) 特異点軌跡の式を求める。特異点軌跡は、上腕の長さ l_1 を半径とする円弧である。その中心 C は、Fig. 12 に示すロボット座標系 ($x_0-y_0-z_0$) では式 (5) で表され、平面 π 上では式 (6) で表される。ここで 0R_1 は関節角 θ_1 による回転変換行列である。

$$\mathbf{c} = (l_2 + l_3)\mathbf{a} \quad (5)$$

$$\mathbf{c}' = {}^1R_0 \cdot \mathbf{c} \quad (6)$$

ここで ${}^1R_0 = {}^0R_1^{-1}$ である。

円 C は、Fig. 12 に示す媒介変数式 ϕ により、平面 π 上では式 (7) で表され、ロボット座標系では式 (8) で表される。

$$\mathbf{s}'_c = [l_1 \cos\phi + x'_c, 0, l_1 \sin\phi + z'_c]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{s}_c = {}^0R_1 \cdot \mathbf{s}'_c \quad (8)$$

(4) 特異点軌跡の範囲を求める。円弧をとる特異点集合の範囲 S_1S_2 は、上腕・前腕の各関節角の範囲と指定されたツール軸方向ベクトル $\mathbf{a}$ により決定される。以下、平面 π 上で考える。上腕と前腕の関節角範囲を、Fig. 13 に示すような方向に次のようにとる。前腕の動作範囲は、上腕に対するものである。

$$\text{上腕動作範囲: } \theta_{2\min} \leq \theta_2 \leq \theta_{2\max}$$

$$\text{前腕動作範囲: } \theta_{3\min} \leq \theta_3 \leq \theta_{3\max}$$

S_1 は、式 (9) を満たす上腕関節点 $q_{2cr1}(\mathbf{a})$ の偏角によって式 (11) のように場合分けで定まる。また S_2 は、式 (10) を満たす $q_{2cr2}(\mathbf{a})$ の偏角によって式 (12) のように場合分けで定まる。なお式 (9) (10) の解としては、 $z_{Q2}/x_{Q2} > z_a/x_a$ の解を選択する。

$$q_2 \cdot \mathbf{a} = l_1 \cos\theta_{3\min} \quad (9)$$

$$q_2 \cdot \mathbf{a} = l_1 \cos\theta_{3\max} \quad (10)$$

ベクトルの複素数表示での偏角を $\arg$ で表示し、 S_1 については式 (11) で、 S_2 については式 (12) により、対応する媒介

Fig. 13 Range of wrist singular locus

Fig. 14 Range of shoulder singular locus

変数 ϕ の値が決定できる。

$$\left. \begin{aligned} \pi - \arg\{q_{2cr1}(a)\} < \theta_{2min} : a \text{ は取り得ない.} \\ \theta_{2min} \leq \pi - \arg\{q_{2cr1}(a)\} \leq \theta_{2max} \\ : s_{c1} = q_{2cr1}(a) + (l_2 + l_3)a \\ \pi - \arg\{q_{2cr1}(a)\} > \theta_{2max} \\ : s_{c1} = q_{2max}(a) + (l_2 + l_3)a \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \pi - \arg\{q_{2cr2}(a)\} < \theta_{2min} \\ : s_{c2} = q_{2min}(a) + (l_2 + l_3)a \\ \theta_{2min} \leq \pi - \arg\{q_{2cr2}(a)\} \leq \theta_{2max} \\ : s_{c2} = q_{2cr2}(a) + (l_2 + l_3)a \\ \pi - \arg\{q_{2cr2}(a)\} > \theta_{2max} : a \text{ は取り得ない.} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

4.2 肩特異点軌跡の定式化

Fig. 5 に示すように、肩特異姿勢はツール姿勢とは関係なく、手首中心が第一関節軸 (θ_1) の軸芯上にある姿勢である。つまり肩特異点軌跡とは、手首中心のとり軌跡で、Fig. 14 に示すように第一関節軸上の線分 S_1S_2 である。評価する軌道も TCP ではなく、手首中心 Q_3 の軌道となる。特異点軌跡の Z 座標は、式 (13) を満たす θ_2 と θ_3 により、式 (14) で表される。

$$l_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) = 0 \quad (13)$$

ただし、 $\theta_{2min} \leq \theta_2 < \pi/2$, $\theta_{3min} \leq \theta_3 \leq \theta_{3max}$ である。

$$z_s = l_1 \sin \theta_2 + l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (14)$$

線分 S_1S_2 の上下限は、第二関節軸 (θ_2) と第三関節軸 (θ_3) の関節角範囲および上腕と前腕の長さの比によって定まり、一般に S_1 は $\theta_2(S_1) = \theta_{2min}$ または $\theta_3(S_1) = \theta_{3max}$ により、 S_2 は $\theta_3(S_2) = \theta_{3min}$ によって定まる。

4.3 軌道精度評価アルゴリズム算出の条件

特異点軌跡が定式化できたので、次は特異点軌跡と軌道との最短距離を求める必要がある。しかし、一般に手首特異点軌跡は任意の鉛直面上にある円弧であり、軌道は空間内での任意の

線分である。空間内の任意な円弧と線分の最短距離を代数式の形で表すことは困難である。そこで特異点軌跡と軌道との最短距離算出アルゴリズムは、鋼構造塗装での運転データ生成システムへの組み込みにおける実用性を重視、次の条件で導出する。一番目の条件は、塗装軌道の方である。対象ワークの構造的特徴として、鋼構造ワークの塗装箇所をロボットから見た Fig. 2 が示すように、塗装軌道はすべて水平と鉛直の方向で、しかもロボット基準座標にはほぼ平行と考えてよい。アルゴリズムはこのことを前提とする。二番目の条件は、ツール姿勢角の制限である。ツールである塗装ガンの塗布面に対する姿勢角度は 90° が望ましい。この姿勢角があまりに浅いと、塗布面への塗料の付着が悪くなるからである (Fig. 9 参照)。そこでツールの塗布面に対する姿勢角つまり TCP 経路とツール軸とのなす角度を 45° までとする。以上の条件の下に、塗装方向別のアルゴリズムを定める。

4.4 手首特異点軌跡と軌道との最短距離

TCP 軌道 P_cP_t は、パラメータ $0 \leq t \leq 1$ により次式で表す。

$$p = p_c + t(p_t - p_c) \quad (15)$$

【水平方向塗装での最短距離算出】 水平方向塗装でのアルゴリズムの基本方針は次のようなものである。軌道上もしくは特異点軌跡上に、最短距離に近い点をまず求め、次にこの点を出発点として一定間隔ごとに山登り法で最短距離を探索する。これによって探索に要する時間を最小にし、運転データ生成システムに適したアルゴリズムとする。この方法では、軌道上の点を探索して特異点軌跡との最短距離を見出す方法と、特異点軌跡上の点を探索して軌道との最短距離を見出す方法の二つがある。前者は、空間内での点と円との最短距離問題に帰着でき、空間幾何学的に探索式を求めることができる [13]。後者は、同じく空間内での点と直線との最短距離問題に帰着でき、よく知られている代数幾何の公式によって探索式を求めることができる。ここでは Fig. 15 を参考に、軌道上の探索点と特異点軌跡円弧との最短距離を空間幾何的に求める手順を次に示す。

- (1) 探索点 P_i の平面 π への射影点 $P_{i\pi}$ を求める。
- (2) 特異点軌跡の円弧中心 C と $P_{i\pi}$ とを結ぶ線分と円弧 S_1S_2 との交点 S_{Ci} を求める。
- (3) P_i に対する最短距離 $h(P_i) = P_iS_{Ci}$ は、次式により求める。

$$P_iS_{Ci}^2 = P_{i\pi}S_{Ci}^2 + P_iP_{i\pi}^2 \quad (16)$$

交点がない場合には、円弧の端点 S_1 と S_2 のうち交点に近い点を選択し、直接に線分長を求める。

探索については、軌道の端から順に行うのは効率が悪い。そこでアルゴリズムの前提条件を利用してほぼ最短距離を成す点を探索出発点を選び、その左右で探索することにより最小の探索点数とすることが考えられる。この一例を Fig. 16 に示す。探索出発点 P_0 としては、軌道 P_cP_t と特異点軌跡を含む平面 π との交点 P_π とするのが合理的である。交点が存在しない場合には、軌道端点 P_c と P_t のうち P_π に近い点を選択する。こ

Fig. 15 Horizontal trajectory & wrist singular locus

Fig. 16 Sequence for horizontal trajectory

Fig. 17 Search for minimum answer

れらは極端なツール姿勢をとらないとする条件によるものである。前探索点との最短距離比較は、次のように行う。

$h(P_i) > h(P_{i-1})$: 最短距離 $h = h(P_{i-1})$

$h(P_i) \leq h(P_{i-1})$: 探索継続 ($i = i + 1$)

ここで、 P_0 が軌道内部にある場合には、Fig. 17 のように出発点 P_0 で左右に分けておのおのの最短距離を探索し、最後にそれらの最小値を最短距離 $h_{\min}$ とする。ここでの探索点 P_i は、出発点 P_0 から軌道の式 (15) に従って外側に向かう。また P_0 が P_c または P_t の場合には、一方向に探索していけばよい。なお探索点の間隔は、次式のように特異領域の定義に用いた半径 r_s の 1/2 程度とするようにするのが合理的であろう。

$$|t_{i+1} - t_i| \cdot |P_t - P_c| \leq r_s/2 \quad (17)$$

【鉛直方向塗装での最短距離算出】 塗装軌道がほぼロボット基準座標に平行であるという条件の下に、鉛直方向塗装では、

Fig. 18 Vertical trajectory & wrist singular locus

Fig. 19 Horizontal trajectory & shoulder singular locus

軌道と特異点軌跡を含む平面 π とはほぼ平行である。これによって軌道と特異点軌跡の最短距離は、探索法によらずとも一義的に定めることができる。Fig. 18 を参考に、最短距離を求める手順を示す。

(1) 軌道 P_cP_t の平面 π への射影 $P_{c\pi}P_{t\pi}$ を求める。平面 π での射影軌道 p_π は、軌道 p の回転変換 ${}^1R_0 \cdot p$ において、 y 成分を 0 としたものである。

(2) 平面 π 上で点 C から軌道 $P_{c\pi}P_{t\pi}$ に下した垂線 CH_0 と円弧 S_1S_2 の交点 S_0 を求める。

(3) H_0 に対応する軌道上の点 P_0 を求める。

(4) 特異点軌跡 S_1S_2 と軌道 P_cP_t との最短距離は、 S_0 と H_0 がおのおの特異点軌跡と射影軌道の上にあるか否かで、次に示す場合分けで定まる。点 S_0 が特異点軌跡の円弧 S_1S_2 上にある場合を $S_0 \subseteq S_1S_2$ 、ない場合を $S_0 \supset S_1S_2$ で表し、点 H_0 が射影軌道の線分 $P_{c\pi}P_{t\pi}$ 上にある場合を $H_0 \subseteq P_{c\pi}P_{t\pi}$ で、ない場合を $H_0 \supset P_{c\pi}P_{t\pi}$ で表す。以下、同様の表記法で場合分けする。 $S_0P_0^2 = S_0H_0^2 + H_0P_0^2$ とすると

$$\left. \begin{aligned} S_0 \subseteq S_1S_2 \text{ and } H_0 \subseteq P_{c\pi}P_{t\pi} : h_{\min} &= S_0P_0 \\ S_0 \subseteq S_1S_2 \text{ and } H_0 \supset P_{c\pi}P_{t\pi} : h_{\min} &= \min\{S_0P_c, S_0P_t\} \\ S_0 \supset S_1S_2 \text{ and } H_0 \subseteq P_{c\pi}P_{t\pi} : h_{\min} &= \min\{S_1P_0, S_2P_0\} \\ S_0 \supset S_1S_2 \text{ and } H_0 \supset P_{c\pi}P_{t\pi} : h_{\min} &= \min\{S_1P_c, S_1P_t, S_2P_c, S_2P_t\} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

4.5 肩特異点軌跡と軌道との最短距離

TCP 軌道に対応する手首中心の軌道 Q_cQ_t は、TCP 軌道の式 (15) により、次式で表される。

$$q = p_c - l_3 a + t(p_t - p_c) \quad (19)$$

【水平方向塗装での最短距離算出】 Fig. 19 を参考に、最短距離算出の手順を示す。

Fig. 20 Vertical trajectory & shoulder singular locus

(1) 軌道 Q_cQ_t は、前述の軌道条件よりほぼ水平面内にある。この水平面 π は、例えば Q_cQ_t の Z 座標値平均により決定できる。

(2) 特異点軌跡 S_1S_2 を含む直線と平面 π との交点 S_π を求める。 S_π の Z 座標値は、言うまでもなく平面 π の値である。

(3) S_π から、平面 π 上の軌道 Q_cQ_t を含む直線に、垂線 $S_\pi H$ を下す。

(4) 特異点軌跡 S_1S_2 と軌道 Q_cQ_t との最短距離は、点 S_π と点 H がおのおの特異点軌跡円弧と軌道線分の上にあるか否かで、次に示す場合分けで定まる。

$$\left. \begin{aligned} S_\pi \subseteq S_1S_2 \text{ and } H \subseteq Q_cQ_t : h_{\min} &= S_\pi H \\ S_\pi \subseteq S_1S_2 \text{ and } H \supset Q_cQ_t : h_{\min} &= \min \{S_\pi Q_c, S_\pi Q_t\} \\ S_\pi \supset S_1S_2 \text{ and } H \subseteq Q_cQ_t : h_{\min} &= \min \{S_1H, S_2H\} \\ S_\pi \supset S_1S_2 \text{ and } H \supset Q_cQ_t : \\ h_{\min} &= \min \{S_1Q_c, S_1Q_t, S_2Q_c, S_2Q_t\} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

【鉛直方向塗装での最短距離算出】 鉛直方向塗装では、Fig. 20 に示すように軌道は特異点軌跡にほぼ平行である。この場合は、 S_1S_2 に対して Q_cQ_t が互いに垂線を持つか否かで、次のように場合分けで定まる。

$$\left. \begin{aligned} z_{Q_c} \text{ and } z_{Q_t} > z_{S_2} : h_{\min} &= \min \{S_2Q_c, S_2Q_t\} \\ z_{Q_c} \text{ and } z_{Q_t} < z_{S_1} : h_{\min} &= \min \{S_1Q_c, S_1Q_t\} \\ z_{S_1} \leq z_{Q_c} \text{ or } z_{Q_t} \leq z_{S_2} : h_{\min}^2 &= x_Q^2 + y_Q^2 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

ここで (x_Q, y_Q) は、軌道の平面位置である。

5. 特異領域による軌道精度評価の特徴

特異領域による軌道精度評価法について述べた。ところで、軌道精度を決定するロボットの運動性能評価の手段としては、軌道の各姿勢でのヤコビ行列式を用いたいくつかの有益な方法が提案されている [8][9]。これらは定量的にも優れた評価法であるが、ロボットの各姿勢での関節角を知ることが前提であり、軌道評価に適用する場合には、生成した軌道の各点に対する逆運動学を解いた上でヤコビ行列式を用いた評価計算を実行する必要がある。つまりオフラインとはいえ、計算時間への負担が懸念される。この手順を Fig. 21 に示す。オンライン軌道生成のシミュレーション的な、この方法による計算時間の概略見積りを試みる。対象とする鋼構造ワークは、すでに述べたように大寸法かつ複雑である。つまり極めて多数の軌道を要する。今、

Fig. 21 Evaluation by jacobian

Fig. 22 Evaluation by singular space

Fig. 1 (b) に示す船舶ブロックを例にとると、代表的な規模でその塗装面積と評価対象の推定軌道パス数 (1 [m]/パス) は次のようになる。

塗装面積 ... 1,300 [m²] , パス数 ... 26,000

Fig. 21 に示すような手順で、軌道パスの 10 [mm] ごとに評価計算を行うとすると、1 ブロック当たり 26,000 × 100 点の逆運動学とヤコビ行列式計算を行う必要があり、軌道評価が運動データ生成システムにおいて大きな負担になることを示している。

一方、特異領域による評価法はヤコビ行列式による方法に比べて汎用性には劣るが、鋼構造塗装での運動データ生成システムに供することのできるアルゴリズムという点で、実用性に優れた方法であると言える。特異領域による軌道精度評価のトータルの手順を Fig. 22 に示す。この手順が示すように、本方法では手首特異領域と肩特異領域に分けて評価する必要がある。また手首特異領域ではツール姿勢に応じて特異点軌跡を定式化する必要もある。しかし、逆運動学を計算する必要がなく、しかも軌道と特異点軌跡の最短距離は、第 4 章で述べたように、ワーク構造に基づく条件の下では極めて少ない点数 (数点) の計算ですむ。このため一軌道に要する評価計算時間は、ヤコビ行列式による方法の数十分の一程度ですむ。また、この方法の

もう一つの特徴として、軌道と特異点軌跡の位置関係が把握できることが挙げられる。このことは、軌道精度評価の結果に応じてロボット軌道を修正するために必要な情報が得られることを示唆しており、軌道評価のみならず、実用的な軌道修正法への道を拓くものであることを付言しておく。

6. お わ り に

鋼構造塗装ロボット化の要素技術の一つとして、NC 塗装ロボットの運転データ生成システムにおいて不可欠な、生成軌道の実用的な精度評価方法を提案し、その詳細について論じた。

(1) 軌道精度がロボットの特異姿勢に大きく影響を受けることに着目して、軌道の特異点からの空間距離と精度の定量的関係を実測し、この距離によって軌道精度を評価できることを把握した。

(2) また、軌道の属性であるツール姿勢に応じて一つの手首特異点軌跡が定まることに着目し、特異点軌跡を中心とする一定の領域を特異領域と定義した。そして(1)の原理に従い、軌道がこの特異領域を通るか否かによって、軌道精度の可否を判定する評価法を提案した。

(3) 評価法の具体化として、手首特異点と肩特異点について特異点軌跡の定式化を行い、さらに鋼構造塗装における軌道と軌跡との最短距離を求める手順化を行った。

(4) 特異領域による軌道精度評価法が、計算時間と軌道の修正データを与える点で、運転データ生成システムにとって実用的な手法であることを示した。

本論文では運転データ生成システムでの一機能について論じ

た。しかし、鋼構造塗装ロボットシステム化のためには、軌道精度の評価だけではなく、あらゆる面での技術確立が必要である。引き続き、要素技術研究と実用化開発を実施し、鋼構造塗装 CIM の実現に向けて尽力していきたい。

参 考 文 献

- [1] 中島, 宮脇: “これからの溶接ロボット”, 溶接学会誌, vol.62, no.1, pp.16-22, 1993.
- [2] 宮崎: “造船所 CIMS 構築へ向けたロボット適用技術”, 溶接学会誌, vol.63, no.1, pp.25-32, 1994.
- [3] 伊藤: “造船業における情報技術の展望”, 日本機械学会誌, vol.98, no.919, pp.478-481, 1995.
- [4] 宮崎: “生産技術の現状と今後の課題”, 新しい造船学シンポジウム, pp.165-188, 1995.
- [5] 浅川, 竹内: “ロボットを用いた塗装作業の自動化 (開口面を持つ箱内面の場合)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.62, no.598, pp.419-424, 1996.
- [6] 浅川, 竹内: “ロボットを用いた塗装作業の自動化 (自由局面の場合)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.63, no.610, pp.347-352, 1997.
- [7] 奥本: “エキスパートシステムによる塗装ロボットの動作経路生成”, 西部造船会会報, no.94, pp.205-212, 1997.
- [8] 内山他: “ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価”, 計測自動制御学会論文集, vol.21, no.2, pp.190-196, 1984.
- [9] 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.4-17, 1984.
- [10] 内山: “人工の手の運動制御に関する研究 (第1報)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.45, no.391, pp.314-322, 1979.
- [11] 例えば吉川: ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988.
- [12] John J. Craig: ロボティクス, 共立出版 (株), 1991.
- [13] 春日: モノグラフ最大と最小, 科学新興社, 1988.

宮脇国男 (Kunio Miyawaki)

1949年1月1日生。1972年東京大学工学部機械工学科卒業。同年日立造船(株)入社。生産設備の自動化・ロボット化などメカトロニクスの研究開発に従事。現在、技術研究所生産技術研究センター主席研究員。日本機械学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

定家康浩 (Yasuhiro Sadaie)

1964年4月3日生。1988年鳥取大学工学部生産機械工学科卒業。1991年日立造船(株)入社。ロボット制御・CAMの研究開発に従事。