

産業用ロボットを用いた研磨作業の自動化 - 可操作性を考慮したロボットプログラムの生成 -

電気通信大学 ○佐藤裕太, 電気通信大学大学院 ◎森重功一

要旨

本研究では、産業用ロボットを用いた研磨作業の自動化において、可操作性を指標とする経路生成法により、任意の工具経路をロボットの姿勢の急変および特異点通過のないロボットプログラムに変換するオフラインティーチングシステムを開発した。本研究で開発したシステムを用いて研磨実験を行ったところ、姿勢の急変および特異点通過のない経路が得られたことから、その有用性を確認した。

1. 序論

近年の生産現場では、産業用ロボットによる各種作業の自動化が進められている。特に研磨作業は、熟練者の技術や経験が必要なことから自動化が困難とされている。先行研究として、これまでに3次元CADデータをもとに工具経路を自動生成するオフラインティーチングシステムが開発され、産業用ロボットによる研磨作業の自動化が実現されている。

開発されたシステムの汎用性を向上させるための手段として、姿勢の急変や特異点回避などの、ロボットの動作上の特性を考慮した経路生成が考えられる。そのためには、それらの動作を数値的に評価することが必要であり、その指標のひとつとして、ロボットの操作能力を表す可操作性があげられる¹⁾。

本報では、産業用ロボットを用いた研磨作業において、可操作性を指標とする経路生成法を用いたオフラインティーチングシステムを提案する。

2. システムの構成

開発されたシステムの構成を図1に示す²⁾。まず、加工対象形状の3次元CADデータをもとに、自作したCAMソフトウェアを用いて、ロボットの手先の工具中心点の座標値と姿勢で表された研磨経路を生成する。この経路データをPCからロボットコントローラに転送することによってロボットに作業を行わせることができる。ロボットは、FANUC(株)製の垂直多関節型同時6軸制御産業用ロボットS-700を使用した。

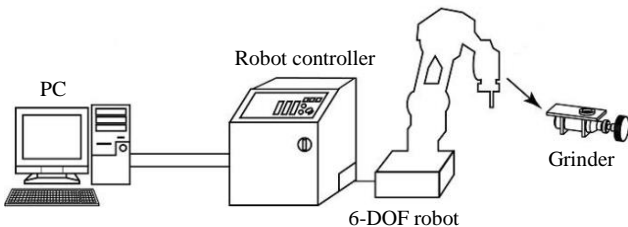


Fig.1 System configuration

3. 従来の研磨経路生成法と想定される問題点

従来の研磨経路生成法について述べる。まず、加工対象形状のCADデータをもとにして、図2のように、加工面における研磨点C、各研磨点での加工面に対する単位法線ベクトルN、工具送り方向ベクトルFを生成する。Fは、研磨点から次の研磨点を指示するベクトルを正規化することで得られる。

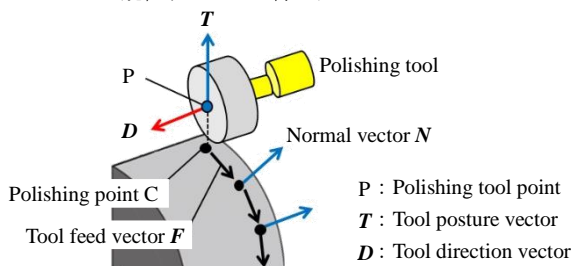
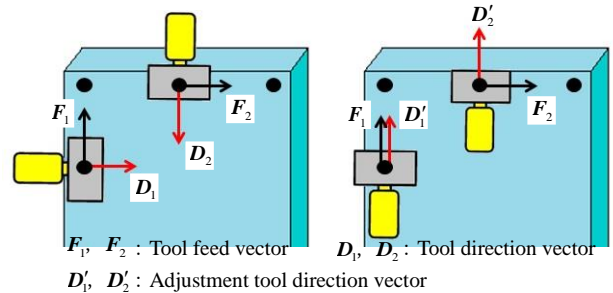


Fig.2 Generation of PTD data

次に、PTDデータを生成する。図2において、Pは円筒形状工具の中心点であり、各研磨点をNの方向に工具半径分オフセットした点である。Tは工具姿勢を表すベクトルであり、従来の経路生成法ではNと同じベクトルとしている。Dは工具方向を表すベクトルであり、FとNの外積によって生成されるベクトルである。このPTDデータからロボットの手先位置・姿勢が決定される。

図3に示すように、加工面の輪郭に沿った研磨経路でロボットを動作させる場合、図3(a)のように、FがF₁からF₂のように急変すると、それに伴ってDもD₁からD₂のように急変するため、ロボットにとって危険な動作となる。この問題の解決策として、図3(b)のように、DをD'₁、D'₂のように一定の方向に限定することによって、姿勢の急変を回避する手法が考えられる。しかし、この手法ではロボットの取り得る姿勢が限定され、作業内容が制限されてしまう。



(a) Before adjustment (b) After adjustment

Fig.3 Adjustment of tool direction vector

4. 可操作性を考慮した経路生成法

ロボットの姿勢表現には、ロボットの手先位置・姿勢による表現と各関節角度の値による表現の2種類がある。それぞれの表現をベクトルで表すと、式(1)、(2)のようになる。

$$r = [P_x \ P_y \ P_z \ \omega \ \rho \ \gamma]^T \quad (1)$$

$$q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T \quad (2)$$

また、式(3)のようにqからrを求めることを順運動学、式(4)のようにrからqを求めることを逆運動学と呼ぶ。

$$r = f(q) \quad (3)$$

$$q = f^{-1}(r) \quad (4)$$

式(3)の両辺を時間微分すると次式が得られる。

$$\dot{r} = J(q)\dot{q} \quad (5)$$

J(q)はヤコビ行列と呼ばれており、J(q)=0となる姿勢が特異点であるとされている。ヤコビ行列J(q)を用いて、可操作性wは式(6)で定義される。

$$w = \sqrt{\det(J(q)J^T(q))} \quad (6)$$

wはw ≥ 0であり、w = 0の姿勢が特異点であるという性質を持つ。したがって、wの値が大きければ大きいほど、そのときのロボットの姿勢は特異点から遠く安全な姿勢となる。

5. PTD データの補正

まず、図 4(a)に示すように、補正前の PTD データの D , T を、それぞれ D_0 , T_0 とする。さらに、図 4(b)に示すように、 D_0 を T_0 まわりに n 度回転させたベクトルを D_n ($n=1, 2, \dots, 360$) とする。

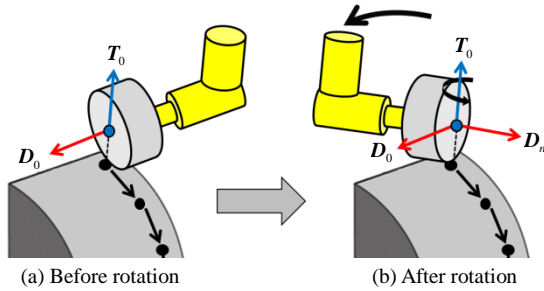


Fig.4 Rotation of tool direction vector

次に、図 5 に示すように、 T_0 を各 D_n まわりに m 度回転させたベクトルを T_{nm} ($m=1, 2, \dots, 360$) とする。

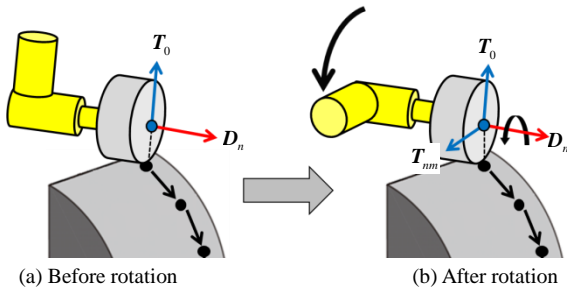


Fig.5 Rotation of tool posture vector

D_n , T_{nm} の組み合わせに対して、ロボットの手先の姿勢を計算する。手先位置に関しては、 P をそのまま用いることで手先位置・姿勢を表す r が決定され、逆運動学を解くことにより、各関節角度を表す q が得られる。得られた q から $J(q)$ を計算し、式(6)を用いて、それぞれの姿勢に対する w の値を算出する。

w の値の中から最大の値 w_{\max} となる D_n , T_{nm} を選択する。 w_{\max} となる D_n , T_{nm} が複数ある場合は、ひとつ前の研磨点における手先姿勢に対して、最近傍の姿勢を取るものを補正後の PTD データとして採用する。

以上の処理を各研磨点において行うことにより、研磨経路を生成する。

6. 研磨実験

図 6(a)に示す研磨対象形状に対して、補正前の PTD データと本システムにより補正した PTD データを用いて、ロボットによる動作実験を行った。研磨経路は、図 6(b)に示すように、最も内側の経路を 1 本目とする計 6 本の経路で構成されている。工具送り速度は 10 mm/sec とした。

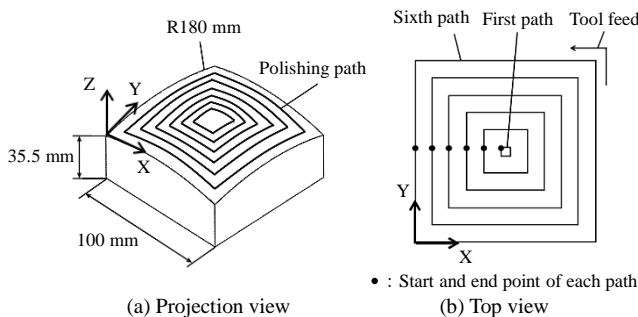


Fig.6 Workpiece model

補正前後で、最も変化が顕著であった 6 本目の経路の PTD データを図 7 に示す。図 7(a)の補正前の PTD データでは、工具方向ベクトル D が急変する箇所がある。一方、図 7(b)の本手法により補正した PTD データでは、滑らかに D が変化しており、急変する箇所はないことが確認できる。

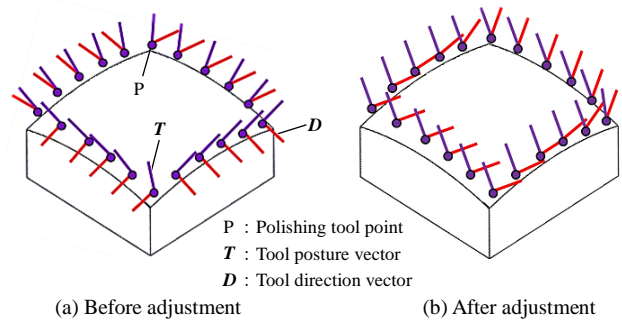


Fig.7 Adjustment of PTD data

全経路の各研磨点における手先姿勢 ω , ρ , γ の角度値の変化の様子を図 8 に示す。補正前の ω , ρ , γ は値が急変する箇所があるが、補正後の ω , ρ , γ は全体を通して滑らかに値が変化しており、急変する箇所はないことが確認できる。

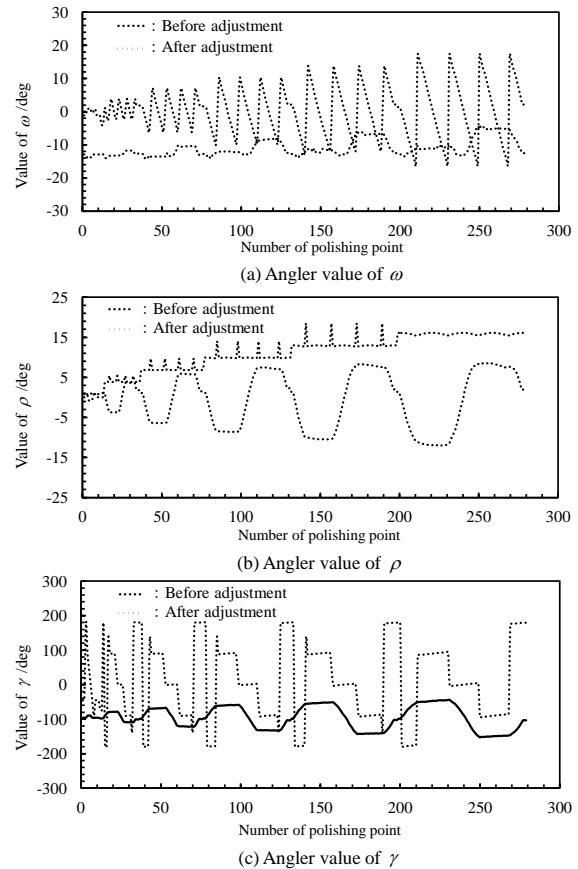


Fig.8 Analysis of hand posture

7. 結論

本研究では、可操作度を指標とした経路生成法により、任意の工具経路に対して、ロボットの姿勢の急変や特異点通過のないロボットプログラムを自動生成するシステムの開発を行い、以下の結論を得た。

- (1) 任意の工具経路に対して、ロボットの姿勢の急変および特異点通過のないロボットプログラムを生成することができた。
- (2) 取り得る手先姿勢を限定することなく、最適手先姿勢による研磨が可能となり、システムとしての汎用性が向上した。

参考文献

- 1) 吉川恒夫: 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.
- 2) 金子英司, 森重功一: 産業用ロボットを用いた研磨作業の自動化 - 加工面上の離散点群に基づいたロボットプログラムの作成 -. 精密工学会学術講演会講演論文集, vol.2014S, pp.1157-1158. 2014.