

CL データの位置姿勢情報に基づく軌道追従制御器を用いた 発泡スチロール加工ロボット

Foamed Polystyrene Machining Robot using Trajectory Following Controller
based on Cutter Location Data

○正 大塚 章正 (山口東京理科大学) 正 永田 寅臣 (山口東京理科大学)
非 中村 航輔 (山口東京理科大学)

Akimasa OTSUKA, Tokyo University of Science, Yamaguchi, otsuka_a@rs.tus.ac.jp
Fusaomi NAGATA, Tokyo University of Science, Yamaguchi
Kohsuke NAKAMURA, Tokyo University of Science, Yamaguchi

In full mold casting, polystyrene is used as a master mold that is usually machined by a CNC machine tool. The CNC machine tool costs higher and does not move more flexibly than an articulated industrial robot. We have proposed a trajectory following controller system for a machining robot based on CL (cutter location) data. In this system, the discrete trajectories at each sampling time are generated from position and orientation information in CL data that are made by post processor in CAM system. We applied the controller system to foamed polystyrene machining while changing conditions, such as foaming rate of polystyrene, feed rate of end mill and processing number of times. In this paper, machining results of a simple model are shown and discussed. Finally, we consider the method to reduce the machining time while keeping machining accuracy and products quality.

Key Words: Polystyrene cutting, CAD/CAM, Articulated industrial robot, Trajectory following, RV1A

1 緒 言

フルモールド鋳造法による成形加工においては、消失性模型用材料として発泡スチロールが用いられる。この模型の加工には、CNC 工作機械が使用される傾向にある。しかし、CNC 工作機械は主軸ヘッド部が大きいために被加工物との干渉が起きやすい、工作機械の導入およびランニングコストが高い等の問題点がある。また、動作自由度の点においても取りうる姿勢の範囲は産業用多関節ロボットと比較すると狭い。CNC 工作機械の高い剛性は柔らかい材料の加工には必要ないことを考慮すると、発泡スチロール加工にはより低コストかつ取りうる姿勢範囲の広い産業用多関節ロボットが有効である。ところで、産業用ロボットに所望の動作をさせるには、主にティーチングペンダントを使用した教示作業が必要となるが、この作業はコスト面で問題があるためティーチングを必要としない自動制御による加工が求められている。CAD/CAM 上で設計された型の CL データに基づいて自動加工が行えれば、設計・製造工程の短縮化に繋がりコスト削減に寄与すると考えられる。

そこで、本研究では現在までに、CL データに基づいた多関節ロボットの軌道追従制御システムを開発してきた (図 1 参照)。コントローラがオープン化されている産業用ロボットにこのシステムを用いると、ローカルなロボット用言語を用いなくとも CL データに沿った軌道追従制御を行うことができる。具体的には、CAM が生成する CL データ内にある位置姿勢情報から各サンプリング時間の目標軌道が計算され、ロボットのサーボ系に転送されるようになっている。また、製造現場に残されている NC データからも自動加工が行えるよう、NC データを CL データに変換する機能 (本研究では Reverse post processor と呼ぶ) も実装している。本稿では、Pro/Engineering で作成した CL データとこのシステムを用いて、多関節ロボット RV1A により実際に発泡スチロール加工を行った結果を報告する。また、その結果を基に加工品質を維持しつつ加工時間を短縮する方法を検討する。

2 目標軌道の生成

多関節ロボットによる切削加工で望みの形状を得るには、その形状の輪郭線为目标軌道としてロボットのサーボ系へ与えてやればよい。CL データ内の工具の位置姿勢情報はワーク座標系であり、これらは時系列順に 1 行毎に与えられている。このデータを基に多関節ロボットをスムーズに動作させるには、各離散時刻の目標位置および目標姿勢を計算する必要がある。そこで、まず、時刻をサンプリング幅 Δt とした離散時刻 k で表し、ワーク座標系を直交座標系 ${}^wO-xyz$ とする。この座標系における目標軌道ベクトル $\mathbf{r}(k) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ を次式で定義する。

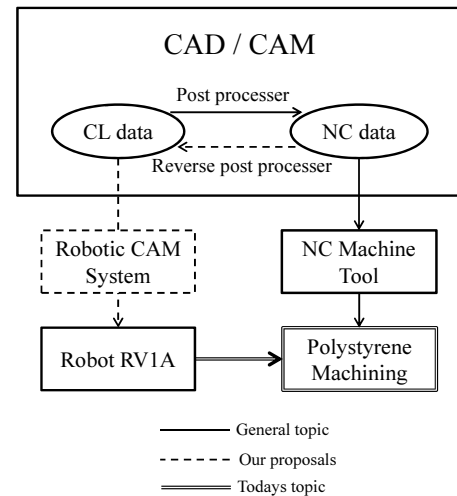


Fig.1 Overview of proposed robotic CAM system

$$\mathbf{r}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_d(k) \\ \mathbf{o}_d(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{x}_d(k) = [x_d(k) \ y_d(k) \ z_d(k)]^T$ は目標位置成分、 $\mathbf{o}_d(k) = [o_{dx}(k) \ o_{dy}(k) \ o_{dz}(k)]^T$ は目標姿勢成分であり、 $\mathbf{x}_d(k)$ における法線ベクトルである。ロボットサーボ系にはロボット座標系での目標軌道を与えなければならないが、この章ではまず、ワーク座標系における目標位置ベクトルと目標姿勢ベクトルを CL データから生成する方法を説明する。

2.1 目標位置の計算

まず、目標軌道の位置ベクトル $\mathbf{x}_d(k)$ の計算方法を示す。CL データ内の i 番目のステップ内にある位置ベクトルを $\mathbf{p}(i) = [p_x(i) \ p_y(i) \ p_z(i)]^T$ 、姿勢ベクトルを $\mathbf{n}(i) = [n_x(i) \ n_y(i) \ n_z(i)]^T$ とし、CL データ全体 $\mathbf{C}(i) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ を次のように定義する (図 2

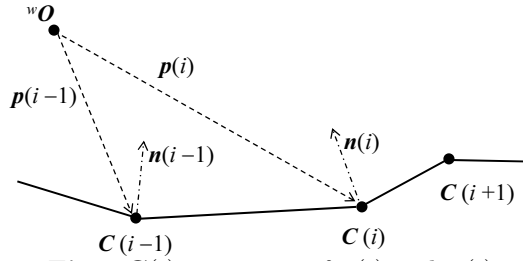


Fig.2 $C(i)$ consisting of $p(i)$ and $n(i)$

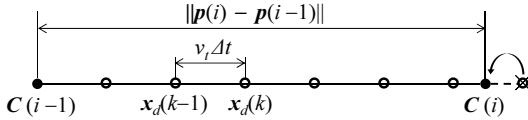


Fig.3 Generation of desired position vector $x_d(k)$ at each discrete sampling time

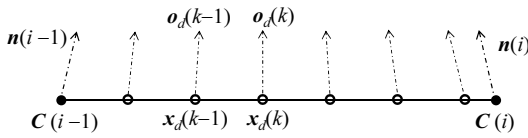


Fig.4 Generation of desired orientation vector $o_d(k)$ using linear approximation

参照).

$$C(i) = \begin{bmatrix} p(i) \\ n(i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

次に、接線速度を v_t とすると、 $i-1$ 番目から i 番目のステップ間の速度ベクトル $v(k) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ は次式で与えられる。

$$v(k) = v_t \frac{p(i) - p(i-1)}{\|p(i) - p(i-1)\|} \quad (3)$$

離散時刻 k における目標位置ベクトルは、式 (3) の速度ベクトルとサンプリング幅 Δt を用いて次式で計算する (図 3 参照)。

$$x_d(k) = x_d(k-1) + v(k)\Delta t \quad (4)$$

ただし、目標軌道が $C(i)$ を超えてしまう場合、所望の形状が得られなくなる。そこで、 $(x_d(k) - p(i))(x_d(k-1) - p(i)) < 0$ となる場合は $x_d(k) = C(i)$ とする例外処理を入れている。

2.2 目標姿勢の計算

ワーク座標系での目標姿勢については、CL データ内の $i-1$ 番目と i 番目の姿勢ベクトルを基に、前項で求めた離散時刻 k における目標姿勢ベクトルを次の線形近似により算出する (図 4 参照)。

$$o_d(k) = n(i-1) + \frac{\|x_d(k) - p(i-1)\|}{\|p(i) - p(i-1)\|} [n(i) - n(i-1)] \quad (5)$$

これにより、姿勢に関しても滑らかな追従制御が可能となっている。

2.3 RV1A への応用

実際に産業用ロボットを制御するには、前章までに述べてきたワーク座標系における目標軌道をロボット座標系の目標軌道に変換する必要がある (図 5 参照)。ロボット座標系を直交座標系 ${}^R O - XYZ$ とし、この座標系におけるワーク座標系の原点 ${}^w O$ の位置ベクトルを $X_d(0) = [X_d(0) \ Y_d(0) \ Z_d(0)]^T$ とすると、ロボットのサーボ系に与えるべきロボット座標系の目標位置ベクトル $X_d(k)$ は次式で変換できる。

$$X_d(k) = X_d(0) + x_d(k) \quad (6)$$

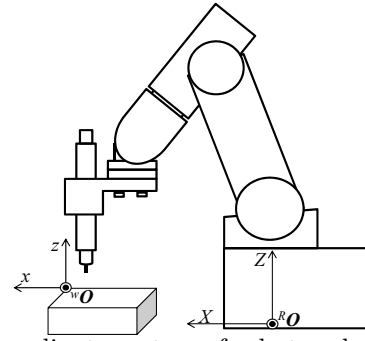


Fig.5 Coordinate system of robot and work space

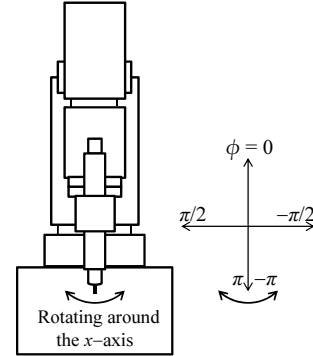


Fig.6 Front view and roll angle of RV1A

次にロボット座標系における目標姿勢について考える。RV1A は 6 自由度多関節ロボットであるが、先端にスピンドル等を装着して加工する場合、 Z 軸周りの姿勢については考慮する必要がある。そこで、ロボット座標系における X, Y 各軸回りの回転角を ϕ, θ 、回転行列を R_x, R_y とすると、一般的な回転行列は次式で与えられる。

$$R_y R_x = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\phi\sin\theta & \cos\phi\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

RV1A の初期姿勢ベクトルはロボット座標系において $[0 \ 0 \ 1]^T$ であること、また同座標系における目標姿勢は前章で求めた目標姿勢ベクトル $o_d(k)$ の向きが逆であることを考慮すると、次式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} -o_{dx}(k) \\ -o_{dy}(k) \\ -o_{dz}(k) \end{pmatrix} = R_y R_x \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

これを解くとロボット座標系での目標姿勢は次式で算出できる。

$$\phi_d(k) = \arcsin\{o_{dy}(k)\} \quad (9)$$

$$\theta_d(k) = \arctan\{o_{dx}(k)/o_{dz}(k)\} \quad (10)$$

ただし、RV1A のロール角は図 6 に示されるように $-\pi$ から π の範囲が設定されている。本研究のように卓上に設置して下向きの加工を行う場合、離散時刻 $k-1$ から k におけるロール角の変化が π から $-\pi$ 、或いはその逆のように、急激になってしまう。RV1A のサーボ系では、急激な変化を持つ目標軌道を与えると正常な指令とみなされずサーボエラーを引き起こし非常停止する。この問題を回避するために次の補正を行っている。

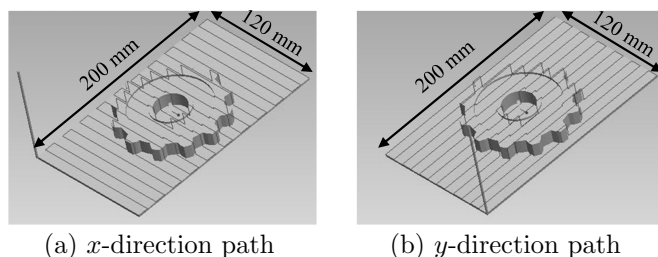
$$\phi_d(k) = \phi(k-1) + \Delta\phi(k) \quad (11)$$

$$\Delta\phi(k) = \begin{cases} K_p \{e_\phi - 2\pi \text{sgn}(e_\phi)\} & (\phi_d(k)\phi(k) < 0) \\ K_p e_\phi & (\phi_d(k)\phi(k) \geq 0) \end{cases} \quad (12)$$

ここで $e_\phi = \phi_d(k) - \phi(k)$ 、 K_p はロール角の比例ゲインであり、本システムでは経験的に 0.01 に設定している。

Table 1 Specifications of EM30-S6000

Outside diameter	30 mm
Weight	575 g
Allowable motor speed	60,000 rpm
Maximum output	350 W
Spindle accuracy	1 μ m

**Fig.7** Model for machining experiment and zigzag paths

3 加工ロボットの構成

3.1 ハードウェアの構成

本研究では、産業用ロボットとしてサーボ系の仕様がオープン化されている三菱電機製 6 自由度ロボット RV1A を用いた。RV1A のフランジ面と発泡スチロール加工に用いるスピンドルモータを連結するために取付け具を作成し固定している。使用するスピンドルモータはナカニシ製 EM30-S6000 であり、その仕様を表 1 に示す。今回の実験では、このスピンドル先端に直径 3 mm のエンドミルを取り付け、スピンドルの回転速度は 10000 rpm に固定する。

3.2 ソフトウェアの構成

OS は Windows XP、開発ソフトは Microsoft Visual C++ 2005 である。RV1A のサーボ系の制御周期が 7.1 ms に設定されているため、マルチメディアタイマを用いて制御周期を 7 ms に設定した。ロボットのコントローラと PC 間の通信は UDP 通信を使用した。パケットのデータサイズは各関節への命令 196 バイトであり、ロボット側への送信時は、式 (6), (9) および (10) で求めた目標軌道 $X_d(k), \phi_d(k), \theta_d(k)$ の情報が含まれる。また、PC 側への返信パケット内には現在の位置と姿勢が含まれており、式 (11) と式 (12) のフィードバックに使用される。式 (3) の接線速度 v_t は刃物の送り速度として、ソフトウェアのダイアグラム上で予め任意に設定できるようになっている。

4 加工実験

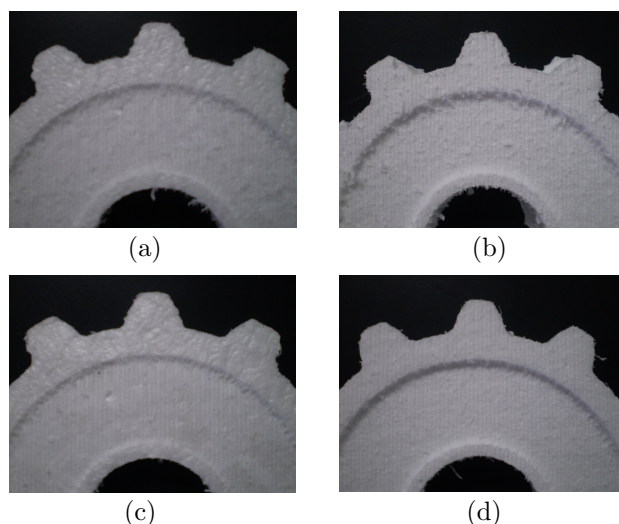
上記のシステムを用いて 4 種類の加工実験を行った。加工モデルおよび加工パスを図 7 に示す。Pro/Engineering の CAD を用いて、 x 軸方向 120 mm、 y 軸方向 200 mm、 z 軸方向 10 mm の範囲にモデルを作成した後、CAM により公差の値を 1 mm とし、CL データを作成した。図 7 に描かれているジグザグパスのピッチは見易いように 10 mm 間隔となっているが、実際には 1 mm ピッチで CL データを作成している。今回の実験では基本的に x 方向に向かうジグザグパス図 7(a) を使用している。加工条件の違いによる影響を検証するために、発泡率、送り速度、加工回数を変えて 4 回加工実験を行った。その結果を図 8 にまとめる。図 8(a) は発泡率 90 倍、送り速度 10 mm/s、(b) は発泡率 33 倍、送り速度 10 mm/s、(c) は発泡率 90 倍、送り速度 2 mm/s であり、いずれも図 7(a) のパスを用いて加工したものである。図 8(d) は (b) と同様の加工後、図 7(b) のパスを用いて再加工をしたものである。加工時間はそれぞれ (a) 約 40 分、(b) 約 40 分、(c) 約 200 分、(d) 約 80 分となった。発泡スチロールの切削加工後の検証は、目視と触覚により行った。

4.1 発泡スチロール材質の検証

まず発泡スチロールの材質の違いによる加工品質への影響を検証する。図 8(a) と (b) を比較すると、発泡率 90 倍では加工面の筆跡が見られ、発泡率 33 倍では削り残しや切り屑の付着が観察された。筆跡は被切削物の不均質性により局所的な剥がれが生じたため、また、切り屑の付着は刃先の形状によるものと考えられる。今後、他の発泡率の材質についても実験を行い検証する予定である。

4.2 送り速度の検証

次に、刃先の送り速度の加工品質に対する影響を検証する。図 8(a) と (c) を比較すると、送り速度 2 mm/s で加工した場合

**Fig.8** Machining results using the proposed system, in which forming rate and feed rate are (a) 90% and 10 mm/s, (b) 33% and 10 mm/s, (c) 90% and 2 mm/s, respectively. (d) is further machined with 33% and 10 mm/s after (b).

は特にエッジ部において削り残しが少なかった。送り速度および刃径の値に対してスピンドルの回転速度は 10000 rpm と十分であるので、目標軌道が急激に変化するエッジ部等においてロボット先端の位置決め誤差が大きくなっていることが原因と考えられる。目標軌道を基に送り速度を自動調整することで、加工時間を短縮しつつ加工品質を改善できると考えられる。

4.3 加工回数の検証

最後に、加工回数による影響を検証する。図 8(b) は x 方向のみのジグザグパスで加工したものであるが、図 8(d) は、その加工に加えて y 方向のジグザグパス (図 7(b) 参照) を用いて 2 度目の加工を行ったものである。双方ともに発泡率 33 倍の発泡スチロールを使用し、送り速度は 10 mm/s としている。比較すると、明らかに後者のほうでは削り残しが少なくなり、形状の輪郭も明瞭なものとなった。金属材料の切削加工と同様に、直交するパスによる仕上げ加工を行う必要があると考えられる。

5 結 言

本稿では、CL データに基づいた多関節ロボットの軌道追従制御システムを用いて 6 軸多関節ロボット RV1A により実際に発泡スチロール加工を行った。加工実験ではエンドミルの形状とスピンドルの回転速度を固定した上で、発泡スチロールの材質、工具の送り速度、加工回数の条件を変えて加工を行い、これらの条件の加工品質への影響を検証した。今後はエンドミルの形状とスピンドルの回転速度についても条件を変えて加工を行い、品質に及ぼす影響を検証する予定である。加えて、全体的に加工に時間をかけるほど仕上がりは良質になる、すなわち加工品質と加工時間のトレードオフが見られた。本システムでは加工前に設定した送り速度を固定している。このため、目標軌道が急激に変化する箇所においてロボット手先の位置決め誤差が他の緩やかな箇所と比べて大きくなっていると推測される。目標軌道に応じて加工中に送り速度を自動調整する新たな機能を追加することで、加工時間を短縮しつつ加工品質を改善できると予測している。

謝 辞

本研究は平成 25 年度 JSPS 科学研究費助成事業 (「基盤研究 (C)」) 課題番号 25420232 の助成により実施している。

References

- [1] 永田 寅臣, 渡辺 桂吾, 泉 清高, “多軸制御用 CL データに基づく位置補償器を用いた産業用ロボットの微制御”, 精密工学会誌, Vol.66, No.3, pp.473-477, 2000.
- [2] F. Nagata, S. Yoshitake, A. Otsuka, K. Watanabe and M. K. Habib, “Development of CAM System Based on Industrial Robotic Servo Controller without Using Robot Language,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.29, No.2, pp. 454-462, 2013.