

CL データを用いたロボット加工システムへの 速度調整機能の追加

大塚章正 (山口東京理科大学) 永田寅臣 (山口東京理科大学)

1. はじめに

フルモールド法の消失性模型は発泡スチロール材から削り出して作られるが、その加工には従来の NC 工作機械が用いられている。しかし、NC 工作機械は導入コストが高く、工作機械が持つ剛性もメリットとして活かされない。発泡スチロールのような柔らかい材料の加工には、導入コストの低い産業用ロボットを活用することが得策であるといえる。そこで、本研究ではこれまでに、金属の研磨加工、木型および発泡スチロール等の柔らかい材料の切削加工に応用可能な CL データに基づいたロボット加工システムを開発してきた [1]。このシステムは、CAM が生成する CL データに基づいてロボット先端に取り付けた工具の刃先の目標軌道を生成し、軌道追従制御させることで、CAD で設計した形状を自動的に削り出せる (図 1)。

最近、このロボット加工システムを用いて異なる実験条件で発泡スチロール加工を行い、加工品質および加工時間の検証を行った [2]。検証の結果、加工品質と加工時間のトレードオフが存在すること、また、加工後にエッジ部で所望の形状が出ていない問題点が浮びあがった (図 2)。この原因として、加工中は工具速度を常に一定としているため、目標軌道の変化の大きいエッジ部において、ロボット先端の位置誤差が大きくなっているからと予測した。この問題に対して、CL データの位置情報を基に、予め目標軌道の変化を割り出し、その変化に応じて加工速度を調整することで改善できると考えた。本稿では、エッジ部での加工品質を保ちながら加工時間をなるべく短くするために、速度調整機能を追加しその機能の検証を動作実験を通して行ったので報告する。

2. ロボットの目標軌道の生成

2.1 作業座標系における目標軌道

CL データの位置姿勢ベクトルを基に、目標軌道を生成する原理を説明する。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、その形状の輪郭線を目標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 $r(k) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ を次式で定義する。ここで $x_d(k) = [x_d(k) \ y_d(k) \ z_d(k)]^T$ は目標位置成分、 $o_d(k) = [o_{dx}(k) \ o_{dy}(k) \ o_{dz}(k)]^T$ は目標姿勢成分であり、 $x_d(k)$ における法線ベクトルである。ロボットサー



図 1 RV-1A を用いた加工システムの外観

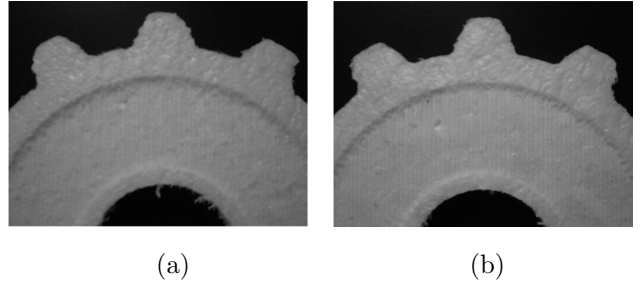


図 2 発泡スチロール加工後の拡大写真：発泡率 90 %、ジグザグパス、加工速度 (a) 2 mm/s、(b) 10 mm/s

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。

2.2 目標位置の計算

まず、目標軌道の位置ベクトル $x_d(k)$ 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 $p(i) = [p_x(i) \ p_y(i) \ p_z(i)]^T$ 、姿勢ベクトルを $n(i) = [n_x(i) \ n_y(i) \ n_z(i)]^T$ とし、CL データ全体 $C(i) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ を次のように定義する (図 3 参照)。

$$C(i) = \begin{bmatrix} p(i) \\ n(i) \end{bmatrix} \quad (1)$$

次に、接線速度を v_{t0} 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

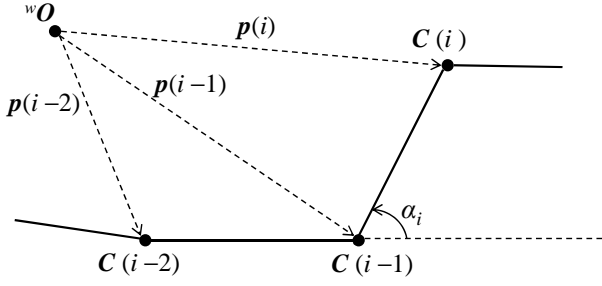


図3 CL データと位置ベクトル

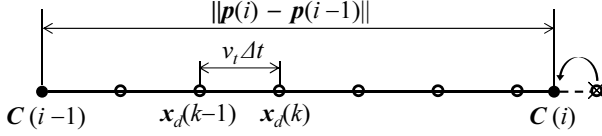


図4 位置ベクトルの補間

えられる．

$$v(k) = v_{t0} \frac{p(i) - p(i-1)}{\|p(i) - p(i-1)\|} \quad (2)$$

v_{t0} はシステム動作開始時に任意に決定できる定数であるので、以降は設定速度と呼ぶ．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 4 参照)．

$$x_d(k) = x_d(k-1) + v(k)\Delta t \quad (3)$$

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．

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 5 参照)．

$$o_d(k) = n(i-1) + \frac{\|x_d(k) - p(i-1)\|}{\|p(i) - p(i-1)\|} [n(i) - n(i-1)] \quad (4)$$

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る．

2.3 ロボット座標系における目標軌道への変換

実際に産業用ロボットを制御するには、ワーク座標系における目標軌道をロボット座標系に変換する必要がある．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 $X_d(k)$ は次式で変換される．

$$X_d(k) = X_d(0) + x_d(k) \quad (5)$$

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 は先端にスピンドル等を装着して加工する場合、

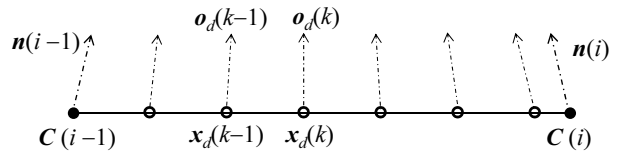


図5 姿勢ベクトルの補間

Z 軸周りの姿勢については考慮する必要が無い．そこで、ロボット座標系における目標姿勢に関しては、 X, Y 各軸回りの回転角 ϕ, θ の 2 つを求めればよい．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、目標姿勢は目標姿勢ベクトル $o_d(k)$ と向きが逆であることを考慮し、一般的回転行列を用いて計算すると、目標姿勢は次式で与えられる．

$$\phi_d(k) = \arcsin\{o_{dy}(k)\} \quad (6)$$

$$\theta_d(k) = \arctan\{o_{dx}(k)/o_{dz}(k)\} \quad (7)$$

なお、RV1A ではさらにロール角の補正が必要になるが、詳細は参考文献に委ねる [3]．

3. 現状の問題点と解決法の提案

3.1 現状の問題点

現在まで、開発したロボット加工システムの性能を検証するために、発泡材の種類、加工速度、加工パスの条件を変えて加工実験を行ってきた [2]．その結果、加工時間と加工品質のトレードオフの関係が確認された．また、加工品質の面においては、図面上で鋭角エッジ部が潰れて丸くなることも確認された．加工中は加工速度を常に一定としているため、加工方向が急激に変化する際に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た．そこで、加工方向の変化に応じて加工速度を自動調整する機能をロボット加工システムに追加する．

3.2 速度調整機能の追加

速度調整方法について説明する．まず、CL データの位置座標 $p(i), p(i-1), p(i-2)$ を基に工具の進行方向の変化角 α_i (図 3 参照) の余弦を算出する．

$$\cos(\alpha_i) = \frac{\{p(i) - p(i-1)\} \cdot \{p(i-1) - p(i-2)\}}{\|p(i) - p(i-1)\| \|p(i-1) - p(i-2)\|} \quad (8)$$

そして、 $i-1$ 番目から i 番目へ移動する際の速度を次式で定義する．

$$v_t(i) = \begin{cases} v_{t0}\{0.1 + 0.9 \cos(\alpha_i)\} & (-\pi/2 < \alpha_i < \pi/2) \\ 1.0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (9)$$

$v_t(i)$ が 0 以下の値になるのを避けるために、また過度に加工速度が遅くなるのを防ぐために、 $(-\pi/2 < \alpha_i < \pi/2)$ で場合分けした．目標軌道を離散化する式 (2) において、 v_{t0} の代わりに $v_t(i)$ を用いることで加工方向の変化に応じて加工速度が自動的に調整されるようになる．例えば、ロボット加工システムにおいて使用者がシステム起動時に v_{t0} を設定すると、加工方向の変

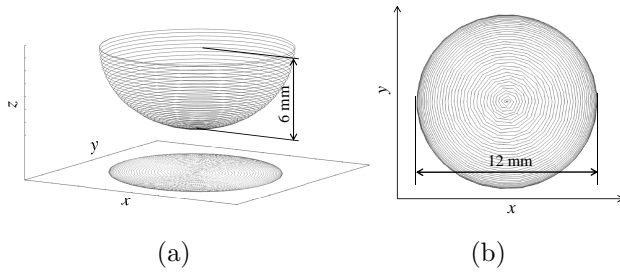


図6 動作検証に用いる加工形状とヘリカルパス

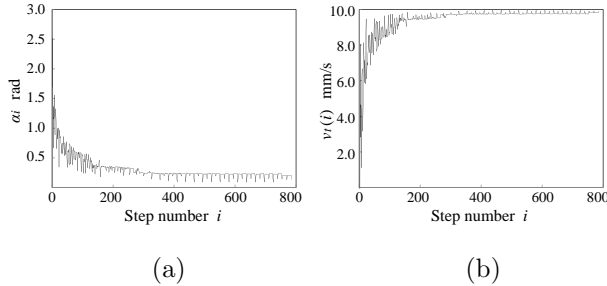


図7 動作開始前に得られる情報：(a) CL データから算出した α_i (b) 設定速度 $v_{t0} = 10.0$ の時の $v_t(i)$

化に応じて加工速度は $0.1v_{t0}$ から $1.0v_{t0}$ の範囲で自動調整される。

4. 実機による動作実験

4.1 ロボットの構成

本研究では発泡スチロール加工に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 を用いている。今回の動作実験も同ロボットにて行う。この RV1A のサーボ系の制御周期は 7.1 ms であるため、ロボット加工システムの制御周期を 7 ms に設定している。このため、サプリング幅 Δt は 7 ms となる。発泡スチロール加工に用いるスピンドルモータはナカニシ製 EM30-S6000 であり、取付け具により RV1A のフランジ面と連結されている (図 1 参照)。スピンドルと取付け具の質量はそれぞれ 0.575 kg , 0.275 kg となっている。発泡スチロール加工ではスピンドル先端にエンドミルを取り付け 10000 rpm で回転させながらロボットを動作させているが、今回の動作実験ではスピンドルは停止状態で行う。この条件で、様々な設定速度 v_{t0} に対して速度調整機能の検証を行った。

4.2 動作実験に用いるパス

速度調整機能の効果の検証には、進行方向が刻々と変化するパスが適していると考えられる。そこで、実験用に Pro/Engineering を用いて半球形状のモデルを作成し、加工経路として半球形状内側にヘリカルパスを作成した (図 6 参照)。今回は動作実験のみであるため、公差は 0.1 mm , xy ピッチは 0.3 mm と粗めに設定している。加工開始点は半球の中央底、加工終了点は上部外側の淵であり、加工開始点から開始終了後までの CL データのステップ数は 788, すなわち $(i = 1, 2, \dots, 788)$ となっている。図 7(a) に CL データのステップ数に対応する目標軌道の角度変化 α_i を示す。加工開始直後は

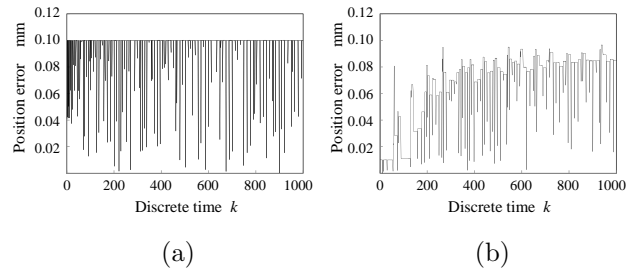


図8 設定速度 $v_{t0} = 10 \text{ mm/s}$ で動作させた時の位置誤差の推移：(a) 加工速度を一定にした場合 (b) 速度調整機能を追加した場合

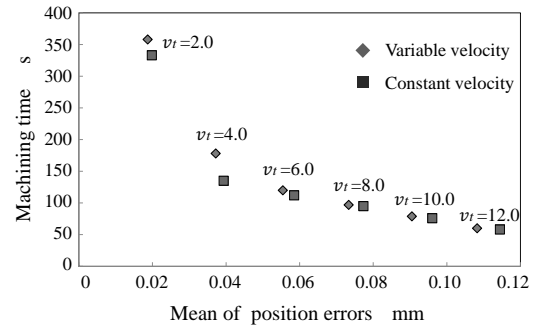


図9 位置誤差の平均と加工時間の比較

加工方向の変化が大きく、加工が進むに従いその変化が緩やかになる。図 7(b) に $v_{t0} = 10.0$ と設定した時に式 (9) から算出される加工速度 $v_t(i)$ を示す。加工開始直後はゆっくり動き、徐々に加工速度が増す傾向が見て取れる。

4.3 実験条件と評価

前節で作成した CL データに対して動作実験を行った。実験条件として、 v_{t0} を 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0 に設定した上で、速度調整機能を用いた場合と、加工速度を一定にした場合それぞれの動作実験を行い、ロボットの位置誤差と加工時間を測定し、比較した。位置誤差の定義は、式 (5) から得られる $X_d(k)$ と、ロボットサーボ系からフィードバックされる各関節の角度情報から逆運動学により推定した実際のロボット先端位置 $\hat{x}(k)$ との幾何学的距離 $\|X_d(k) - \hat{x}(k)\|$ とする。

4.4 実験結果

加工速度一定の場合と、速度調整機能を入れた場合それぞれの動作実験で得られた離散時刻 (k) における位置誤差を図 8 に示す。ただし、どちらの条件も設定速度を $v_{t0} = 10.0$ に設定した時のみの結果を示している。また、図の見易さを考慮し、加工開始から約 7 s 後 ($k = 1000$) までの動きをピックアップしている。両図を比較すると、角度変化の大きい加工開始直後において位置誤差が減少していることが分かる。なお、全ての設定速度条件において、図 8(a), (b) の関係と同様の関係が確認された。

次に、それぞれの実験で得られた位置誤差の平均と加工時間を図 9 に示す。この結果より、速度調整機能を入れた場合は加工時間が長くなる傾向が確認された。これは式 (9) の調整による速度は大きくても設定速度

v_{t0} であることと一致する．即ち，速度調整機能が正常に働いていることを意味する．そして，いずれの設定速度条件においても位置誤差の平均の減少が確認された．いずれの条件においても速度調整機能がある場合は加工時間が微増するが，位置誤差の平均は減少していることも確認された．特に，設定速度 v_{t0} が大きいほど速度調整機能による位置誤差の低減効果が大きくなった．

5. まとめ

本稿では，エッジ部での加工品質を改良し，かつ，加工時間をなるべく短くするために新たに速度調整機能を追加した．この速度調整機能は，CL データの位置情報を基に加工方向の変化を割り出し，その変化に応じて加工速度を調整する．この機能を追加した上で，半球形状のヘリカルパスに対する動作実験を行い，速度調整機能の効果を検証した．その結果，加工方向が急激に変化する場所において，ロボットの位置誤差の減少が確認できた．また，全体的にみると加工時間が微増するものの，位置誤差の平均は減少することを確認した．今後は，実際に発泡スチロール加工後のエッジ部の観察を行うとともに，加工品質を高める新たな機能を追加していく予定である．

参考文献

- [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細制御”, 精密工学会誌, Vol.66, No.3, pp.473-477, 2000.
- [2] 大塚章正, 永田寅臣, 中村航輔: “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”, ロボットメカトロニクス講演会講演論文集, 3P1-L01, 2014.
- [3] 中村航輔, 永田寅臣, 大塚章正, 渡辺桂吾: “産業用ロボットのためのロボット言語を用いない CAM システム”, 計測自動制御学会 SI 部門学術講演会 講演論文集, pp. 1477-1482, 2013.