

# 産業用ロボットののためのCAMシステムを用いた発泡スチロール 切削加工における最適な加工条件の実験的検討

Experimental Study of Machining Condition for Foamed Polystyrene Cutting using CAM system  
for Industrial Robot

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 永富 智也 (山口東京理科大学) 非 林 将平 (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  
Tomoya NAGATOMI, Tokyo University of Science, Yamaguchi  
Shohei HAYASHI, Tokyo University of Science, Yamaguchi

Polystyrene mold used in full mold casting is usually machined by a CNC machine tool. The CNC machine costs much and does not move so flexibly. On the other hand, an articulated industrial robot costs lower and can move more flexibly. Attaching spindle motor with ball end mill to tip of the robot, efficient machining will be accomplished. A trajectory following controller system for a machining robot based on CL (Cutter Location) data have been developed. In the system, the discrete trajectories at each sampling time are generated from position and orientation information in CL data made by post processor in CAM system. Using the system and the robot RV1A, many machining experiments were carried out. Quality of machined surface of foamed polystyrene depends on machining conditions. In this paper, the effects of an angular velocity of tool and small vibration control on a quality of machined surface are compared and discussed.

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

## 1 緒 言

消失性模型を用いるフルモールド鋳造法においては、模型材料に発泡スチロールが用いられる。この模型は一般的にCNC(Computer Numerical Control) 工作機械を用いて加工される。しかし、CNC 工作機械は主軸ヘッド部が被加工物と干渉しやすい、工作機械の導入コストおよびランニングコストが高い等の問題点がある。CNC 工作機械の利点である剛性の高さは、柔らかな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考えられる。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、この作業は時間がかかり煩わしい作業となっている。このため、CAD/CAM 上で設計された形状モデルの CL(Cutter Location) データに基づいて自動加工が行えれば、生産性の向上に寄与すると考えられる。

このような背景の中で本研究では、CL データに基づいた多関節産業用ロボットののための軌道追従制御システム (図 1 参照)を開発し、RV1A に適用してきた [1]。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れば、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。簡単に説明すると、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を計算し、それをロボットのサーボ系に転送するシステムである。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も実装している。現在まで、加工対象物の CL データ、多関節ロボット RV1A、ナカニシ製のスピンドルモータ、直径 3mm のエンドミル、そして開発したシステムを用いて、実際に発泡スチロールを自動加工を行い、加工時間および加工品質に与える発泡材料の発泡度、工具の送り速度、加工回数の影響を比較した [2]。その結果、特にエッジ部において加工品質の劣化が観察されたため、加工品質を維持しつつ

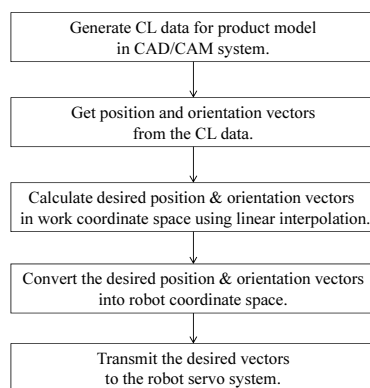
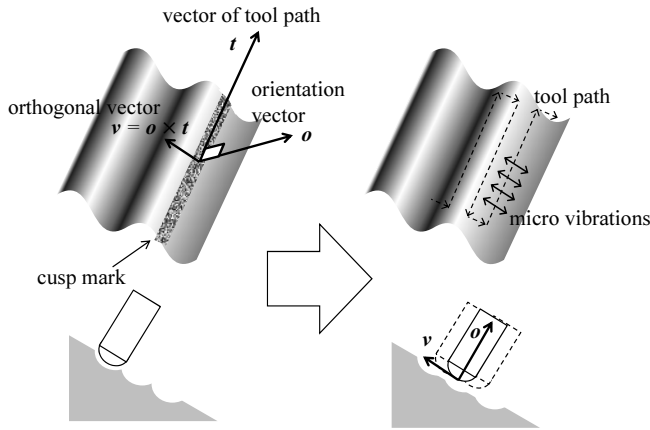


Fig.1 Flowchart of CAM system and Overview of RV1A

加工時間を短縮するための速度調整機能の追加も試みた [3]。これまでの種々の加工実験により、エンドミルの加工痕が残ってしまう問題と、毛れや削り残しが生じてしまう問題が確認されている。前者の問題に対しては、一般的にピックフィードを小さくすることにより改善できるが加工時間の増大を招いてしまう。そこで、工具進行方向に直交する微小振動制御の追加を提案した [4]。また、後者の問題に対して、発泡スチロールのような柔らかい素材の切削加工においては、工具の回転速度を上げることにより毛れが軽減されるという報告がある。現在まで、多関節ロボットの軌道追従システムを用いた加工実験においては、工具の回転速度の影響を調査していない。そこで本稿では、文献 [4] に提案して



**Fig.2** Generation of oscillation orthogonal to tool path vector and normal vector

**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 $\mu$ m

いる振動制御手法，および工具の回転速度の加工品質に対する影響を調査したので報告する．

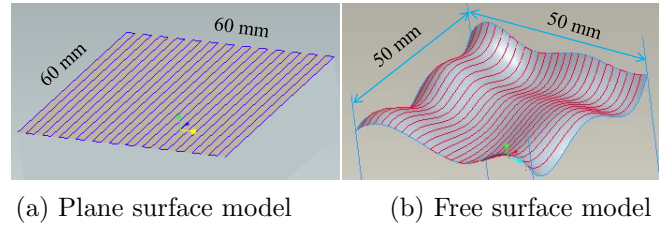
## 2 産業用ロボットのための軌道追従システム

### 2.1 目標軌道の生成

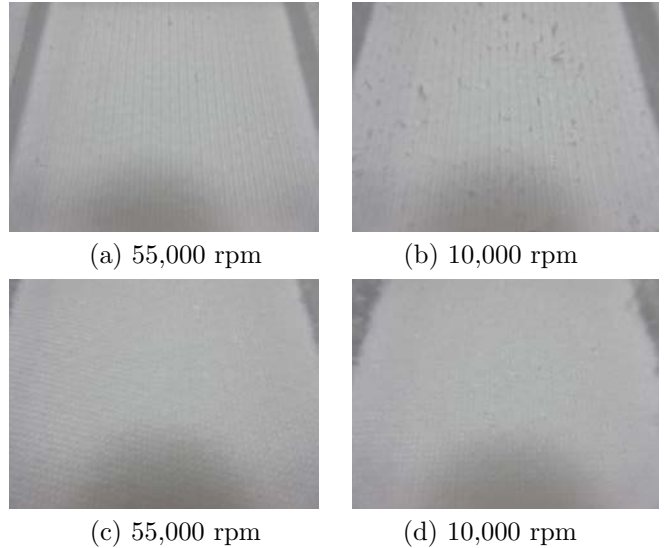
多関節ロボットによる切削加工で所望の形状 (CAD 等で設計した形状) を得るには，その形状の輪郭線を目標軌道としてロボットのサーボ系へ与えてやればよい．CAM が生成する CL データ内の工具の位置姿勢情報はワーク座標系であり，これらは時系列順に 1 行毎に与えられている．多関節ロボットをスムーズに動作させるには，このデータを基に各離散時刻のロボット座標系における目標位置および目標姿勢を計算する必要がある．離散時刻毎の目標位置姿勢ベクトルは，設定された送り速度を考慮した線形補間により算出される．ただし，この手法は CL データで与えられた位置姿勢から外れてしまう場合があるため，その場合は必ず通るよう例外処理を行う．最後に，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．目標軌道の算出法の詳細，およびロボット固有の問題に対する補正等は参考文献 [1] および [2] に委ねることとする．

### 2.2 微小振動制御機能の概要

現在まで，開発した CAM システムと RV1A を用いて，実際に単純な形状モデルから自由曲面の加工を行ってきた．実際の加工面には，刃先形状により生じるカプスマークのような系統誤差と，材質の不均質性により生じる歪れ等の偶然誤差が存在する．カプスマークを小さくするためには，CAM 上で CL データを生成する際にピックフィードを小さくすることが一般的であるが，これは加工時間が増大してしまう．そこで本研究では図 2 に示されるような微小振動を目標軌道生成の際に故意に発生させることで，効率的にカプスマークを軽減する手法提案をした．微小振動制御の振動方向は，各サンプリング時刻毎の目標姿勢ベクトルと工具の進行方向に直交するよう定められ，目標の形状を損なわずにカプスマークの除去のみが行える．この制御手法についての詳細は参考文献 [4] に委ねる．



**Fig.3** Two models and zigzag paths



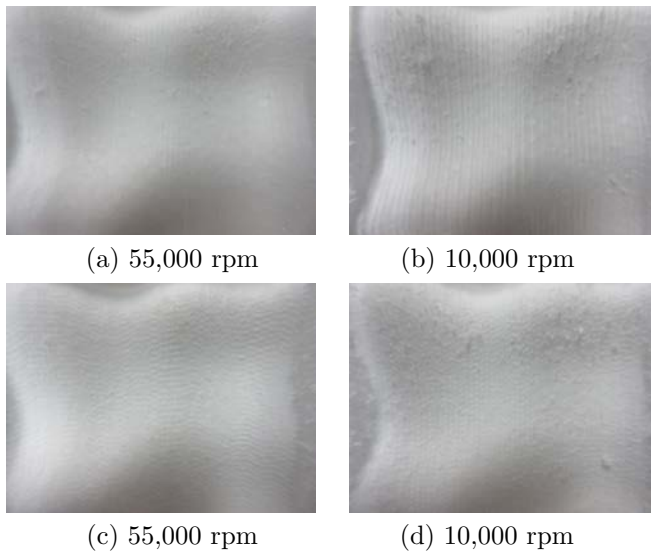
**Fig.4** Machined surface for plane surface model, (a) & (b) without the aggressive vibration control, (c) & (d) with the aggressive vibration control.

## 3 ハードウェア構成

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．位置繰り返し精度は 0.02 mm であるが，絶対精度は負荷および位置姿勢の条件により異なるため保証されていない．この 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．今回の加工実験では，スピンドル先端に直径 3 mm のエンドミルを取り付け，スピンドル回転速度を 10,000, 55,000 rpm の条件で加工した．また，微小振動機能を追加した場合の実験による検証はまだ行っていないため，その検証も合わせて行った．

## 4 加工実験

上記のシステムを用いて平面，自由曲面加工の 2 種類のモデルについて加工実験を行った．モデルおよび加工パスを図 3 に示す．Pro/Engineering の CAD を用いて，平面モデルは  $x$  軸方向 60 mm， $y$  軸方向 60 mm， $z$  軸方向 10 mm の範囲に，自由曲面モデルは  $x$  軸方向 50 mm， $y$  軸方向 50 mm， $z$  軸方向 10 mm の範囲にサーフェスモデルを作成した．CAM を用いて CL データを作成する際，公差値は 1 mm，ジグザグパスのピッチは 1 mm としている．図 3 に描かれているジグザグパスのピッチは見易いように拡大表示されている．発泡スチロールの発泡率は 30 倍，工具の送り速度は 10 mm/s とした．切削加工後の加工品質の検証は，目視と触覚により行った．平面モデルの加工後の写真を図 4 に，自由曲面モデルの加工後の写真を図 5 に示す．



**Fig.5** Machined surface for free surface model, (a) & (b) without the aggressive vibration control, (c) & (d) with the aggressive vibration control.

両図において、上段の (a) および (b) は微小振動制御無しの加工、下段の (c) および (d) は微小振動制御有りの加工結果である。

## 5 考察

まず、工具の回転速度の影響について検証する。図 4(a) と (b) を比較すると、回転速度 55,000 rpm で加工した場合は明らかに筆れが無くなった。自由曲面モデル (図 5) の結果についても同様のことが言える。そして、筆れがなくなり、カプスマークが明確に浮かびあがっていることが分かる。工具の回転速度を速くすることにより、筆れや削り残しを軽減できることを確認した。次に、微小振動制御の有効性について検証する。図 4(a) では微小振動制御を加えてないため縦筋のカプスマークが残っているが、同図 (c) では微小振動制御によりカプスマークが消え、代わりに網目状の模様が浮かび上がった。触覚により確かめたところ、表面の凹凸は (c) のほうが明らかに小さくなっていた。図 4(b) と図 4(d)、図 5(a) と図 5(c) および (b) と (d) についても、同様の結果となった。これより、微小振動制御を加えることにより、カプスマークを軽減できることを確認した。以上より、単純な平面モデルにおいても複雑な自由曲面モデルにおいても、工具の回転速度を大きくし、かつ、微小振動制御を追加することにより加工品質を改善できることを確認した。

## 6 結 言

本稿では、加工実験では、微小振動制御を追加し、工具の回転速度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。回転速度を上げることにより、筆れや削り残しが減少することを確認した。また、微小振動制御を追加することによりカプスマークが軽減されることを確認した。微小振動制御と高速な工具の回転数を組み合わせることにより、より高品質な加工面を得られることを確認した。今後の展開として、力制御による加工品質の向上化、および 3D スキャナと組み合わせたリパースエンジニアリングへの応用等が挙げられる。

## 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] 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.
- [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," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演概要集, 3P1-L01, pp.1-3, 2014.
- [3] 大塚 章正, 永田 寅臣, "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," 第 32 回日本ロボット学会学術講演会 講演概要集, 3N1-06, pp.1-4, 2014.
- [4] 永田 寅臣, 大塚 章正, 永富 智也, 林 将平, 渡辺 桂吾, "ボールエンドミルの進行方向に直交する微小振動制御を用いたカプスマークの除去加工法の提案," 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.1185-1188, 2014.