

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04198

研究課題名(和文) 工作機械送り速度の数理モデルに基づく加工誤差補正による高精度・高品位加工システム

研究課題名(英文) High precision and high quality machining by machining error correction based on mathematical model of real feed speed of machine tool axes

研究代表者

青山 英樹 (Aoyama, Hideki)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：40149894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、以下の成果が得られた。(1) CNC工作機械の加減速制御時における各軸の送り速度の数理モデルを構築し、切削経路の各点における切削工具の実送り速度を予測するシステムを開発した。(2) 切削工具の実送り速度予測値を基に、切削経路各点における実切削除去量を予測し、切削工具たわみ量と方向を予測するシステムを開発した。(3) 切削経路各点における切削工具たわみ量と方向の予測値を基に、切削工具たわみを補正し高精度・高品位加工を実現する加工データを自動生成するシステムを開発した。(4) ブロック処理時間を同定し、同時間を確保できる最短直線長で切削工具経路を構成する工具経路を生成する独自の技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工作機械の加減速制御に伴う各軸の実送り速度数式モデルを構築し、切削工具の経路各点における実送り速度を同定することに成功した。この成果により、切削工具の経路各点における工具たわみの量と方向の予測が可能になり、その予測を基に工具経路を補正し、高精度加工を実現するシステムを開発した。また、ブロック処理時間の同定に基づき、曲面加工において高速加工を実現する工具経路線分の最短長を同定し、システム化(CAM開発)に成功した。同システムにより、曲面の高速・高精度加工を実現した。

研究成果の概要(英文)：The following results were obtained. (1) A mathematical model of the feed rate of each axis during acceleration/deceleration control of a CNC machine tool was constructed and a system that predicts the actual feed rate of the cutting-tool at each point on the cutting paths was developed. (2) A system that predicts the amount of actual cutting removal at each point on the cutting paths based on the predicted actual feed rate was developed and the amount and the direction of cutting-tool deflection were then predicted. (3) A system that automatically generates machining data to correct cutting-tool deflection was developed and high-precision and high-quality machining based on the predicted cutting-tool deflection and direction at each point on the cutting paths was achieved. (4) A unique technology that identifies the block processing time and generates cutting-tool paths with the shortest straight-line length to secure the block processing time was developed.

研究分野：工作機械，生産システム

キーワード：工作機械 加減速制御 高速加工 高精度加工 ブロック処理時間 工具経路 NCプログラム 曲面加工

1. 研究開始当初の背景

CNC 工作機械の機械制御技術が飛躍的に向上し、その運動精度はサブミクロンと言われている。金型や高精度部品の加工精度は $5\ \mu\text{m}$ 以下にすることが望まれているが、一般的な加工において、通常、 $20\ \mu\text{m}$ 以上の加工誤差が認められる。運動精度がサブミクロンでありながら加工誤差が $20\ \mu\text{m}$ 以上であることは、機械振動の発生や温度変化が原因であることは周知であるが、次に示す(1)の制御により(2)、(3)の現象の発生が大きな原因となっていることも見逃せない。本研究では、下記(3)の加工誤差を補正し、高精度・高品位加工を実現する。

- (1) CNC 工作機械は運動精度を保証するため、指定経路点 (G01 指令点) の手前において大きな減速度制御により送り速度を十分に小さくし、指定経路点 (G01 指令点) を通過後に大きな加速度により送り速度を指令速度まで上げる制御を行っている。(例えば、ファナック制御装置の場合、AI 輪郭制御と称される。)
- (2) 上記(1)の制御により、図 1 に示すように、指定経路点 (G01 指令点) の前後において、切削工具の送り速度が大きく変動する。
- (3) 上記(2)の現象により送り速度が加工点ごとに変動するため、切削工具に与えられる切削抵抗が変動する。結果として 1 回転あたりの切削除去量の変動し、切削工具たわみが変動することとなり、加工点位置で異なる加工誤差が発生する。

上記のとおり、工作機械の運動軌跡を高精度化するために、大きな加減速制御が必要となり、それに伴い切削工具の送り速度が変動し、その結果、切削工具たわみ変動が発生することになり、加工誤差および加工面品位を悪化している原因となっている。切削工具たわみは、例えばプレス金型の意匠面の仕上げ加工のような軽切削においても大きな加工誤差 ($20\ \mu\text{m}$ 以上) を形成している。特に、曲面加工においては、指定経路点 (G01 指令点) 距離が小さく、かつ、変動するため、送り速度の変動が激しくなり、切削工具たわみの大きな変動を発生し、加工面品位の悪化を招いている。工具たわみによる加工誤差・加工面性状悪化を改善することが求められている。

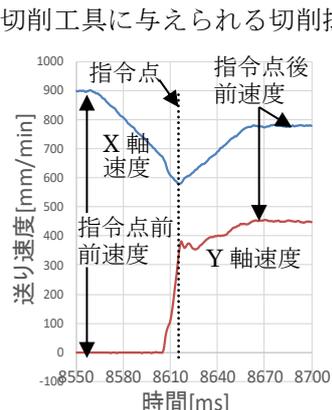


図 1 速度変化

2. 研究の目的

CNC 工作機械による加工において、以下の(1)~(4)の現象が発生する。本研究では、これらの現象を踏まえたうえで、更なる高精度・高品位加工を実現することを目的としている。

- (1) 工作機械の制御軸の加減速制御により、切削工具の送り速度が変動する
- (2) 切削工具の送り速度の変動により、切削抵抗が変動する。
- (3) 切削抵抗の変動により、切削工具たわみ量が変動する。
- (4) 切削工具たわみ量の変動により加工形状誤差が発生し加工面品位が悪化する。

本研究における高精度・高品位加工の具体的な目標は、工作機械の加減速制御に起因する速度変動により発生する切削工具たわみを補正することにより高精度加工を実現するとともに、工作機械制御装置の処理特性を考慮して従来にない独自の高速・高精度加工を実現する。

3. 研究の方法

本研究は、下記の(1)~(4)の方法で実施した。

- (1) 各軸の送り速度数理モデル (速度モデル) の構築

CNC 工作機械の加減速制御時の各軸送り速度数理モデル (速度モデル) を構築し、以下の方法・手順により、切削経路の各点における切削工具の実送り速度を予測する方法を確立した。

- ① X-Y 軸制御において、多角形運動を行う。このとき、進行方向に対して多角形頂点での角度変化を 10° (36 角形), 20° (18 角形), 30° (12 角形), 60° (6 角形), 90° (4 角形), 120° (3 角形), 180° (往復) と設定した。送り速度は 100, 300, 600, 1000, 1500 mm/min とし、多角形の 1 辺の長さは 0.5, 1, 3, 6 mm とした。
- ② 上記①の制御における各軸の実速度を測定した。この測定では、ハイデンハイン製 2 次元直交格子エンコーダ KGM 282, および、ファナック製サーボガイドを用いた。
- ③ 上記①, ②の X-Y 軸制御と同様の測定を、Y-Z 軸制御, Z-X 軸制御において実施した。
- ④ 上記①~③により獲得されたデータを分析し、制御軸ごとに、制御点 (G01 指令点) 前後における時間と軸速度の関係を数式モデルとして構築した。
- ⑤ 上記④で構築した数式モデルを基に、切削経路各点の各制御軸の実送り速度を予測した。

- (2) 切削工具のたわみ量・方向の予測

次の方法・手順により、切削経路各点における切削工具たわみ量・方向を予測した。

- ① 各軸の送り速度数理モデルより、切削経路の各点における切削工具の実送り速度を予測した。

- ② 切削経路各点における切削工具の予測実送り速度より，切削工具微小回転ごとの切削除去体積を算出した．
- ③ 被削材の比切削抵抗（単位体積当たりの切削抵抗）を実験測定により導出した．
- ④ 上記②と③の結果より，切削経路各点における切削抵抗（大きさと方向）を算出した．
- ⑤ 上記④で得られた切削抵抗ベクトルを基に，切削経路各点における切削工具たわみ量・方向を算出した．

(3) 高精度加工データ生成システム-1 (CAM-1) の開発

以下の方法・手順により，切削工具たわみを補正し高精度加工を実現する加工データ（NCデータ）を生成するシステム-1（CAM-1）を開発した．

- ① 上記②の⑤で算出した切削工具たわみ（量・方向）を基に，それを逆方向に移動した点を切削工具経路点として，高精度加工を実現する加工データ（NCデータ）を生成した．
- ② 構造・制御装置が異なる5機種の工作機械を用いて，有用性の評価を行った．

(4) 高速・高精度加工データ生成システム-2 (CAM-2) の開発

以下の方法・手順により，曲面の高速・高精度加工を実現する加工データ（NCデータ）を生成するシステム-2（CAM-2）を開発した．

- ① 図2(a)に示すように，距離 L_b mm の直線セグメントを連続した工具経路を，指令速度 F mm/min で制御するとき，実速度 V mm/min は，式(1)のように，距離 L_b mm とブロック処理時間 T_b ms により制限される．

$$V \leq 60000 \frac{L_b}{T_b} \quad (1)$$

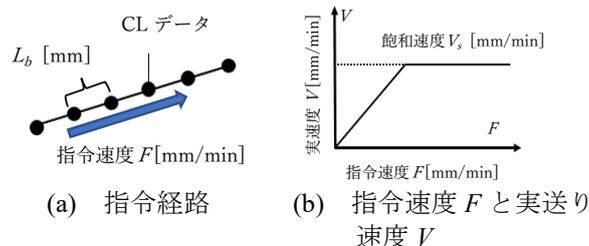


図2 ブロック処理時間算出法

- ② 図2(b)に示すように，指令速度 F mm/min を増加させることにより実速度が飽和速度 V_s mm/min に達し，ブロック処理時間 T_b mm は，飽和速度 V_s mm/min から式(2)で求められる．

$$T_b = 60000 \frac{L_b}{V_s} \quad (2)$$

- ③ 指令速度を F mm/min とした場合の最短直線セグメント長 L_{bm} mm は，ブロック処理時間 T_b ms から，式(3)で求められる．この最短直線セグメント長 L_{bm} mm を，最適直線セグメント長とする．

$$L_{bm} = \frac{F \times T_b}{60000} \quad (3)$$

- ④ 曲面のオフセット面を最短直線セグメント長 L_{bm} mm で近似した経路を高速・高精度加工データとして生成する．

4. 研究成果

(1) 各軸の送り速度数理モデル（速度モデル）の例

送り速度数理モデルは，制御装置のパラメータの設定により異なるため，この研究成果では，工作機械 A の事例で紹介する．速度制御の速度差（制御前速度と制御後の速度差）が許容速度差（本事例では 246 m/min）より大きい場合の速度変化時の X, Y 軸方向の送り速度 $V_x(t)$, $V_y(t)$ は以下の式で表されることがわかった．式(4)～(5)における $t_0 \sim t_4$ は，図3に示す制御時間を表している．また， v_0 , v_1 は，制御前後の送り速度を表す．

$t_0 \leq t \leq t_1$ のとき

$$V_x(t) = v_0 + \frac{v_1 - v_0}{64} (t - t_0) \quad (4)$$

$$V_y(t) = 0 \quad (5)$$

$t_1 \leq t \leq t_2$ のとき

$$V_x(t) = 246 - \frac{246}{11}(t - t_1) \quad (6)$$

$$V_y(t) = \frac{246}{11}(t - t_1) \quad (7)$$

$t_2 \leq t \leq t_3$ のとき

$$V_x(t) = 0 \quad (8)$$

$$V_y(t) = 246 + \frac{v_0 - 246}{T}(t - t_2) \quad (9)$$

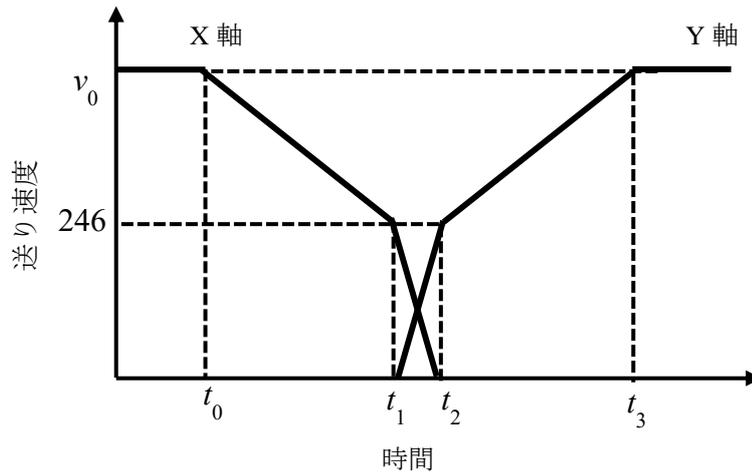


図3 送り速度変化の概要図

(2) 切削工具のたわみ量・方向の予測に基づく高精度加工データ生成システム-1 (CAM-1) による加工例

2枚刃 HSS ボールエンドミルを用いて、被削材 S55C を送り速度 900 mm/min, 主軸回転数 3000 rpm で切削した。図4は、要求形状（加工後に形成したい形状）を示している。図5は同形状を仕上げしろ 0.2 mm で切削する際の Z 方向の工具たわみ量の予測値を予想加工誤差として示している。図6は、予測された工具たわみを補正する工具経路により加工した形状と、工具たわみを補正しない工具経路で加工した形状の Z 方向の誤差を示している。提案手法により加工誤差が小さくなっていることが確認でき、提案手法の有用性が認められた。しかし、まだ誤差が残っている部分があるが、補正の回数を重ねることでより誤差を小さくできると考えられる。

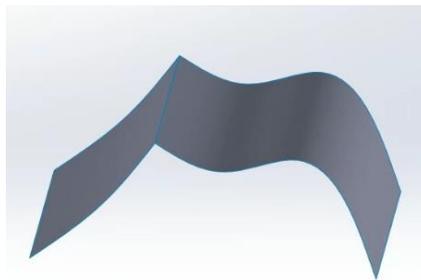


図4 要求形状

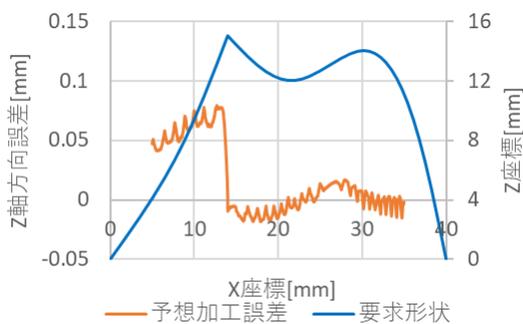


図5 切削工具たわみ量予測値

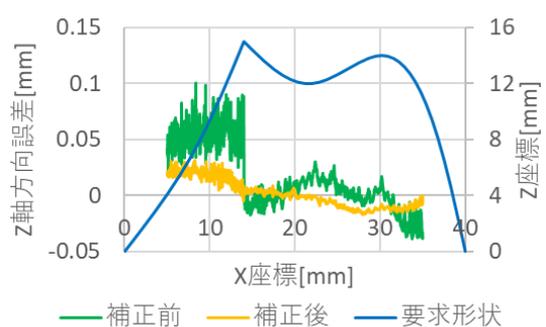


図6 工具経路補正有無の加工形状

(3) 高速・高精度加工データ生成システム-2 (CAM-2) による加工例

図4に示す要求形状の加工に対して、ブロック処理時間の同定に基づく高速・高精度加工法の有用性を検証する切削実験を行った。提案手法により生成した工具経路および市販CAMシステムにより導出した工具経路により、指令送り速度 8000 mm/min で加工した。加工時間はそれぞれ 36.9 [s], 47.9 [s]となり、開発したCAM-2システムにより生成された加工データ (NCデータ) による加工時間が短く、実送り速度が速くなったことが確認された。図7(a), (b)は、開発CAM-2システムにより生成した工具経路と市販CAMシステムにより導出した工具経路により加工を行った際の実送り速度を、ファナック製サーボガイドで測定した結果を示している。これらの結果より、提案手法で生成した工具経路は、2つの曲面の交線 (キャラクタライン) や曲率の大きな凹凸部分の減速が小さく、高速加工になっていることが確認できる。また、サーボガイドで測定した工具位置座標を基に加工シミュレーションを行い、加工誤差の予測を行った結果を図8に示す。この結果より、開発CAM-2システムで生成した工具経路は加工誤差が小さくなっていることが確認できる。

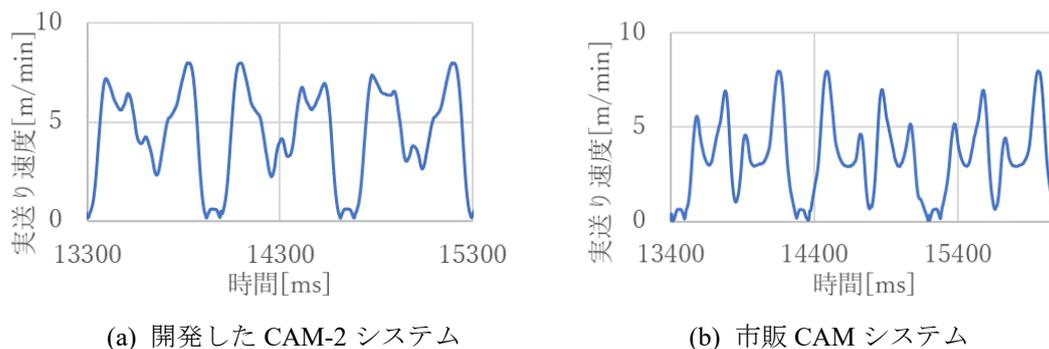


図7 実送り速度の比較

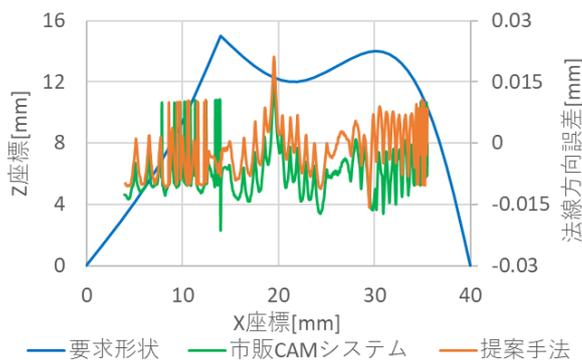


図8 加工誤差予測

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuki Takanashi, Hideki Aoyama, Song Cheol Won	4. 巻 15
2. 論文標題 Generation Method of Cutting Tool Paths for High-Speed and High-Quality Machining of Free-Form Surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 521-528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2021.p0521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 YASUDA Rei, NOGUCHI Tomoya, AOYAMA Hideki	4. 巻 87
2. 論文標題 Improvement of Machining Accuracy by Correcting Tool Deflection Based on Identification of Actual Feed Speed Associated with Acceleration/Deceleration Control of Machine Tool	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 475 ~ 482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.87.475	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Asuka UCHIDA, Hideki AOYAMA	4. 巻 なし
2. 論文標題 High-Precision Machining of Free Curved Surfaces Based on Correction of Ball End Mill Bending	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proccedings of The 10th International Conference on Leading Edge Manyfactuyring in 21st Century (LEM21)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 内田あすか, 高梨雄貴, 青山英樹	4. 巻 36
2. 論文標題 自由曲面加工における高速・高精度加工のための工具経路生成法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 83-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高梨雄貴, 野口知哉, 安田玲, 青山英樹	4. 巻 35
2. 論文標題 工作機械加減速制御誤差・切削工具たわみ誤差・曲面近似誤差の補正による高精度加工法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 36-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内田あすか, 青山英樹	4. 巻 37
2. 論文標題 ブロック処理時間を考慮した工具経路による曲面の高速・高精度加工	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 4-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内田あすか, 青山英樹	4. 巻 38
2. 論文標題 ブロック処理時間を考慮した工具経路による曲面の高速・高精度加工	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 型技術	6. 最初と最後の頁 78-81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 内田あすか, 高梨雄貴, 青山英樹
2. 発表標題 自由曲面加工における高速・高精度加工のための工具経路生成法
3. 学会等名 型技術者会議2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高梨雄貴, 青山英樹
2. 発表標題 自由曲面の高速・高精度加工のための工具経路生成法
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田あすか, 青山英樹
2. 発表標題 ブロック処理時間を考慮した工具経路による曲面の高速・高精度加工
3. 学会等名 型技術者会議2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関