

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月10日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560283

研究課題名（和文） 予測補正制御に基づく高速高精度加工システムの試作

研究課題名（英文） Development of high-speed and high accuracy machining prototype System based on predictive compensation control for machining error

研究代表者

藤尾 三紀夫 (FUJIO MIKIO)

沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・教授

研究者番号：70238541

研究成果の概要（和文）：

本研究では幾何形状からサーボデータを生成し、直接モータを駆動する形状補間による指令精度の向上と、切削中の誤差の予測補正による加工精度の向上によって高速高精度加工を実現する新たな手法を提案している。これまでの研究において形状補間の有効性および速度制御による切削負荷の低減、工具たわみを考慮した工具経路生成による誤差の低減の有用性が明らかになった。しかし誤差の予測精度の向上に課題が残る結果となった。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is to develop high-speed and high-accuracy machining system according to prediction and compensation of machining errors. In this research the tool path generation system that is able to predict and compensate the tool deflection and fluctuation of cutting load is proposed. These errors are simulated by NC geometric cutting simulator. It is evident that the proposed system has availability for machine tool system. On the other hand, it is required for additional accuracy and implementation to the system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械システム

キーワード：情報機器・知能機械システム・CAM・CNC工作機械・金型加工

1. 研究開始当初の背景

日本の工作機械、金型加工技術は世界のトップレベルの位置にあり、日本が世界に誇れる加工技術のひとつである。しかし近年韓国、台湾、BRICsなどの加工技術の向上はめざましく、日本企業の脅威となっている。この状況を打破するには、アジア諸国ではいまだ困難である複雑な形状や小型精密金型などに

おいて、さらなる技術的優位を保つことが必須であると考えられる。併せて品質、納期、価格におけるさらなる技術的優位を保つことが必須であると考えられる。

特に日本が優位を維持している金型を加工する工作機械においては、これらの技術の優位が重要となる。高能率化に効果的な高速ミーリング加工や曲面を多く加工する業界

において、さらなる高速かつ高精度加工を実現するためには、工具経路および加工中の状態や加工誤差を考慮した新たな加工システムが必要となる。

2. 研究の目的

高能率化に効果的な高速ミーリング加工や曲面の高精度加工において、さらなる高速かつ高精度加工を実現するためには、工具経路および加工中の状態や加工誤差を考慮した新たな加工システムが必要となる。そこで、当該研究では、CAM、NC加工シミュレーション、CNC装置、工作機械の垣根を取り払い、NCプログラムの代わりにCNC装置の最終位置出力であるサーボデータを中心に誤差の予測補正制御を行い、高速高精度加工を実現するシステムの開発を目的としている。

3. 研究の方法

開発する加工システムはこれまでのCAM、CNC装置、工作機械という壁を取り払い、上流から下流までの流れをサーボデータにより統一して取り扱うシステムである。図1は現在の加工システムを示しており、CAM、NC加工シミュレーション、CNC装置、工作機械がそれぞれ個別システムとして扱われ、情報は上流から下流への一方通行であることがわかる。一方、図2は提案するシステムであり、工具経路生成の時点から加工状態や機械の特性を考慮し、高速送りを行った際にNC加工シミュレーションにより得られた情報から、形状と機械に最適なサーボデータとなるよう指令精度の向上と誤差の予測補正を行い、高速高精度加工を実現しようとするシステムである。

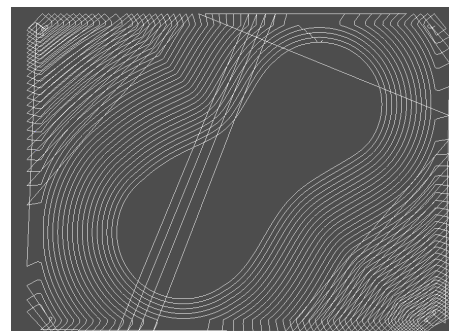
当該システムにおいて高速送りで、高精度な加工を実現するため、「CAMによる高精度指令データの生成と補正」「NC加工シミュレーションによる誤差の予測補正」を実現する必要がある。本研究では具体的に

- ①高速ミーリング加工を可能とする工具経路（工具移動経路）の生成
 - ②高精度な指令データ（形状に適したサーボデータ）の生成
 - ③加工状態（切削負荷や工具のたわみや摩耗）のNC加工シミュレーションによる予測
 - ④予測した誤差を補正した指令データの生成
- の各手法を提案すると共に、試作システムを構築し検証を行う。

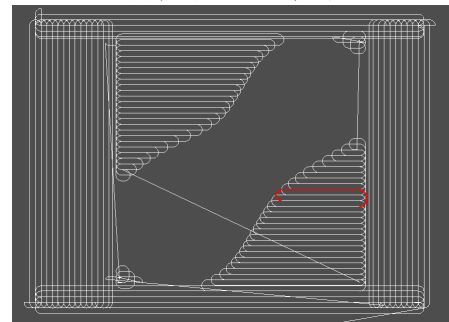
4. 研究成果

(1) 工具経路の生成

加工の効率化に大きく貢献する荒取り加工を対象に、高速ミーリング加工に対応す



(a)従来の工具経路



(b)開発した直線に基づく工具経路

図3 高速ミーリング加工用工具経路

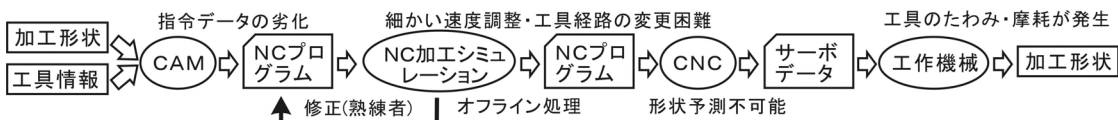


図1 現在の加工システム

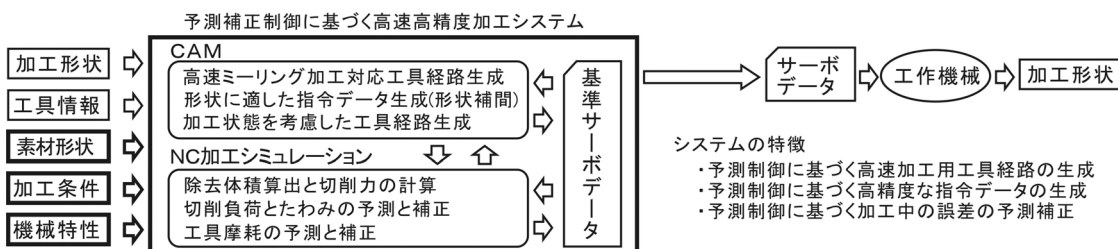


図2 予測補正制御に基づく高速高精度加工システム

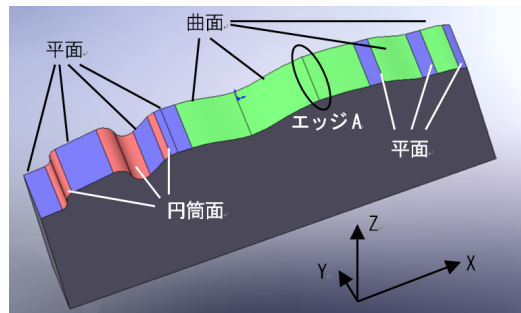
る直線に基づく工具経路生成手法を提案した。図3はひょうたん形状を対象に工具経路を生成した結果であり、(a)に示す従来の手法に比べて提案した手法 (b)は直線が多く、高速加工が可能であることが明らかになった。

(2) 高精度な指令データの生成

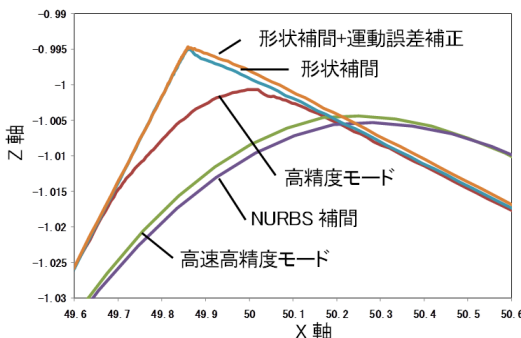
従来の曲面加工における指令データはCAMにより微小線分化されたNCプログラムを元に生成されていた。このため、NCプログラムになった時点でCAMが持つ幾何情報が失われ、CNCでは形状を予測した指令データとなり、曲面加工時の指令精度が劣化していた。そこで本研究では、幾何形状からNCプログラムを介さず、直接モータを駆動するサーボデータを出力し、幾何形状に適した加減速を含んだ駆動データを生成する形状補間を開発した。

図4 (a)は形状補間の効果を検証するための加工対象形状を示し、(b)はエッジAにおける測定軌跡を拡大表示した図である。トレランス $1\mu\text{m}$ 、半径 5mm のボールエンドミルを用いて切り込み量 0.5mm で表面を X 軸方向に $6000\text{mm}/\text{min}$ で移動させる微小線分と NURBS 補間の NC プログラムを作成し、加工精度と加工時間を比較した。また、あわせて CNC が持つ高精度加工用の高精度モードおよび高速高精度モードと比較を行った。

その結果、提案する形状補間あるいは形状補間に運動誤差を補正した手法がエッジを認識することで最も精度が高いことが明らかになった。加工時間は、高速高精度モードと NURBS 補間が精度が悪いが約 38 秒で最も



(a)加工対象形状



(b)測定軌跡

図4 形状補間の効果

早く、形状補間では約 47 秒であった。また精度が良い高精度モードでは 140 秒と多くの時間を要し、形状補間により、高速で高精度な加工が実現できることが明らかになった。

(3) 加工状態の予測

加工誤差の予測補正として、切削負荷(単位時間当たりの除去体積)、切削力、工具のたわみ、工具の摩耗を対象とした。また予測に際しては、当該研究室で開発したNC加工シミュレーションソフトを利用した。さらに工作機械に測定用のデータサーバや通信機能を付加し、開発した手法を統合して試作システムを構築した。そしてこの試作システムを利用して加工実験を行った。

①切削負荷と切削力の予測

NCプログラムの位置指令と指令速度から単位時間当たりの移動量を求め、単位時間当たりでの除去体積をNC加工シミュレーションで求め、これを切削負荷とした。また切削力は、一刀一回転当たりの除去体積から簡易的に求める式を利用した。

この計算式を用いて実際に切削力が求められるか半径 5mm のフラットエンドミル (2枚刃ハイス) を用い、送り速度を $10\text{mm}/\text{min}$ から 10 刻みで $60\text{mm}/\text{min}$ まで変化させ、主軸回転数を $400, 800, 1200\text{rpm}$ 、切り込み量を $2, 3, 5\text{mm}$ と変化させた際の切削力と除去体積の関係を求めた。素材には S50C を用い、側面加工、溝加工、円弧の輪郭加工を行った場合の切削力を切削動力計により測定した。図5は各加工における除去体積と切削力の関係を示している。この結果、切削力は加工方法、切り込み量や送り速度、主軸回転数に関係なく、1刃1回転あたりの除去体積から近似的に求められ、この加工条件では $a=46.99$ 、 $n=0.33$ であることがわかった。

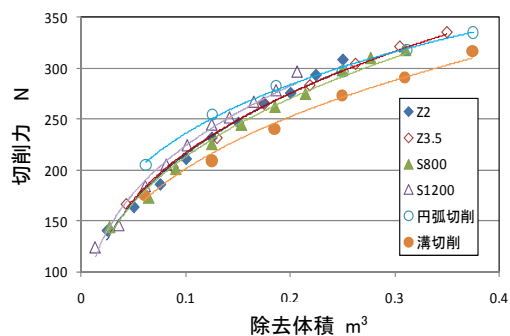


図5 除去体積と切削力

②工具たわみの予測

切削力により生じる片持ちはりとして近似した。図6は半径 50mm の円筒から直径 10mm のフラットエンドミル (2枚刃ハイス) を用いて半径方向に 1mm 、高さ方向 5mm の切り込みで時計回りに円弧を輪郭加工した後の形状輪郭を3次元測定器で測定した結果である。

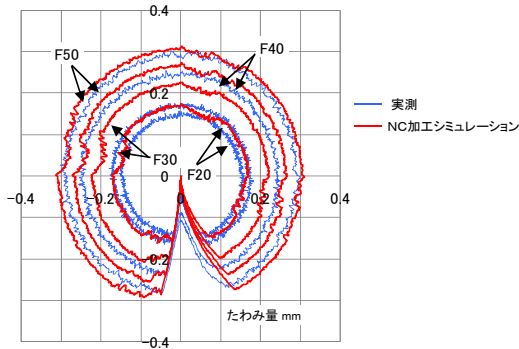
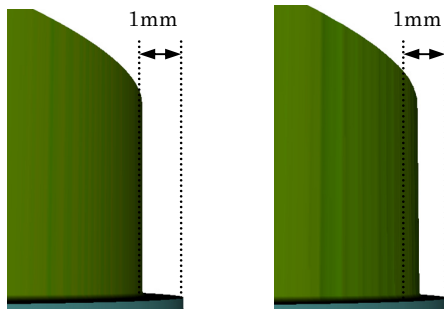


図6 各送り速度毎のたわみ量比較



(a)通常切削 (b)たわみ変形を考慮
図7 NC加工シミュレーション後の形状

また同時に、NC加工シミュレーションで得られた加工後の形状の断面輪郭も示している。この時、工具の突出量80mm、主軸回転数400rpmで、送り速度を20、30、40、50mm/minに変えた場合の半径49mmとの半径誤差をたわみ量として比較した。ここで素材はS50C、測定位置は加工面上面から2.5mmの位置とした。同図より、たわみの予測精度は低いがNC加工シミュレーション結果と実際の工具のたわみの傾向が一致した。

また、図7(a)は現在一般的に用いられている工具を剛体とした場合のNC加工シミュレーション後の形状輪郭、図7(b)は工具のたわみを組み込んだNC加工シミュレーション後の形状の輪郭を拡大表示した図である。同図より切り込み1mmに対して工具たわみによる削り残しが生じ、NC加工シミュレーションにより、誤差を反映した現実に近い結果となっていることが確認できる。同時に、工具経路と加工形状表面に工具のたわみ量をグラデーション表示できるため、加工前に切削負荷が多い場所や多くのたわみが発生する箇所を簡単に見つけることが可能となる。

③工具摩耗の予測

加工時に生じる工具摩耗は、主に加工時間、切削距離や切削量に依存すると考えられ、一般的に工具寿命は加工距離を基準とされることが多い。しかし実際にはエアカットや工

具の加工部位により切削した距離は異なるがこれらは考慮されていない。そこで工具を高さ方向に細かく分割し、分割した高さ毎にNC加工シミュレーションにより除去体積を求め、工具摩耗相当として扱うことができるか確認するため加工実験を行いその関係を調べた。

加工実験は図8に示す工具径16mmの2枚刃ボールエンドミル(超硬コーティングチップ)を用い、S50C素材に対してY方向、Z方向共に2mm切り込み、送り速度300mm/min、主軸回転数4000rpmでX軸方向に加工を行った。図9は36m加工後の工具摩耗の写真と工具の高さ方向に0.1mm刻みでNC加工シミュレーションした除去体積および測定した工具の逃げ面摩耗量を示している。同図より、工具下部において0.05mm程度のオフセット摩耗量が生じているが、工具上部の除去体積増加に伴い、工具磨耗が増加していることがわかる。図10は加工長さを24、36、48mとした場合の工具の高さ方向での除去体積と工具逃げ面摩耗量との関係を示した散布図である。同図より、積率相関係数は $r=0.836$ で、正の相関関係があり、除去体積から工具

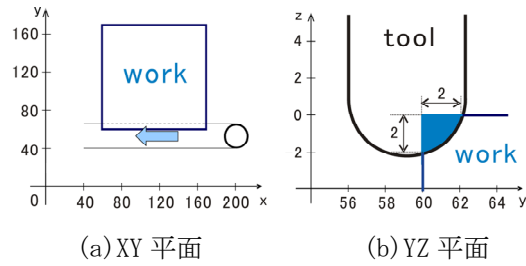
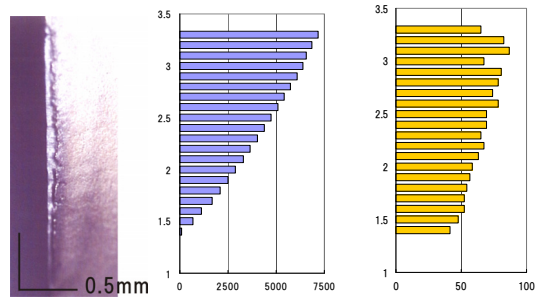


図8 加工対象形状



(a)工具摩耗 (b)予測除去体積 (c)測定結果

図9 工具摩耗の予測と測定結果

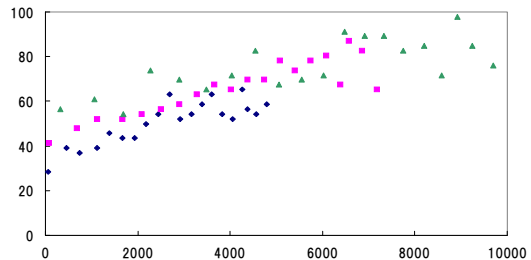


図10 除去体積と工具逃げ面摩耗の散布図

摩耗を予測することが可能であることがわかった。

これらの結果から、除去体積を基準として切削力や工具のたわみ、摩耗を求めることができたが、まだその精度が低く、更なる実験と検証が必要であることも明らかになった。

(4) 予測誤差の補正

誤差の予測補正を行う際、運動誤差補正は形状他に組み込み効果を得られたが、工具のたわみなど加工中の誤差は、切削負荷に要因することが多く、また工具経路の修正が難しい。このため本研究では切削負荷、つまり単位時間当たりの除去量を生成する速度に着目した。

切削負荷は単位時間あたりの除去体積に大きく依存しており、これまでの研究で、除去体積と主軸切削負荷に相関関係が認められた。また切削力が除去体積に依存することから、除去体積を制御することにより切削負荷や工具のたわみを低減することが可能となると考えられる。そこでNC加工シミュレーションで求めた1刃1回転あたりの除去体積を制御する手法として速度を制御する速度制御法と工具経路を制御する経路制御法を開発した。

速度制御の有用性を検証するため、図11(a)に示す素材形状から図11(b)のA点を始点とするオフセット面を基準経路として与えて比較した。加工条件として半径5mmのボールエンドミル(2枚刃ハイス)を用い、S50Cの素材に対して通常加工では送り速度120mm/minで、速度制御加工では除去体積の閾値を11mm³/sec、最高速度180mm/minとなるよう速度制御を行った。

図12は従来のNCプログラムを用いた実加工によって得られた主軸負荷と送り速度を示している。データはCNCからネットワークを介して64ms毎にサンプリングして得られた値である。B点とC点でNC加工シミュレーション予測では急激な除去体積の変動が生じたが、加工実験の主軸負荷には現れていない。しかし、加工後に工具先端の破損を確認した。一方、図13は速度制御で生成された工具経路による実加工で得られた切削負荷と送り速度の推移である。B点とC点におけるピークを減速することで抑えており、工具の破損は生じなかった。さらに負荷が少ない箇所は加速するため、加工時間は従来の加工で200sec、速度制御では165secと速度制御により加工時間を短縮できた。

この結果から、速度を制御することで単位時間当たりの除去体積、すなわち切削負荷を低減でき、工具のたわみによる誤差を低減できることが明らかになった。しかし、工具摩耗については速度では制御できず、位置や経路の補正など新たな手法を検討する必要がある。

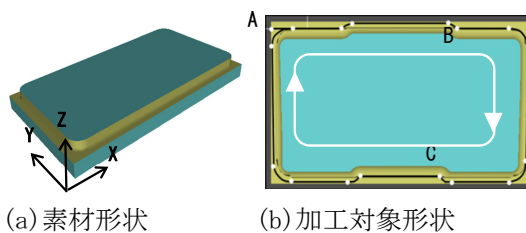


図11 加工実験用工具経路

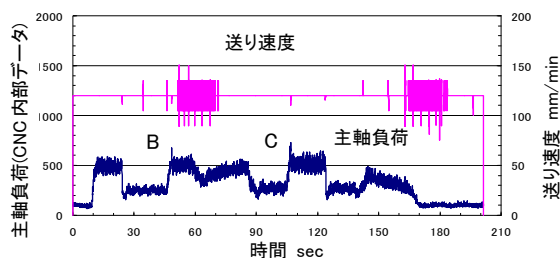


図12 通常加工

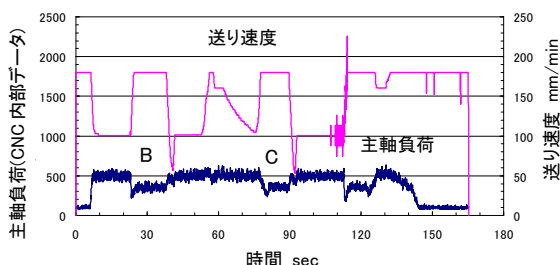


図13 速度制御に基づく送り速度と主軸負荷

(5) まとめ

提案している「予測補正制御に基づく高精度加工システム」の試作システムを構築し、加工実験によりその有用性を確認まで行うことができた。また形状補間による精度の良い指令データの生成はその有用性および優位性を確認することができた。しかし、NC加工シミュレーションにおける工具の切削力と、それに伴うたわみ量および工具の摩耗量の予測精度が低く、実用的なシステムの実現まで至らなかった。切削力やたわみ、摩耗量の予測のために多くの加工実験を行ったが、測定データにばらつきが多く、さらなる実験と予想手法の検討が今後の課題となった。

本研究課題は3年間の研究を終えたが、切削力やたわみ、摩耗量の予測が今後の課題として残された。このため引き続き精度向上のための加工実験と予測手法の検討を行っていく予定である。一方で、本課題で3軸加工でのシステム有用性が確認できたため、今後は5軸加工への展開が考えられる。そのため引き続き誤差の予測補正の高精度化を進めると同時に、提案する加工システムの5軸加

工への適用に取り組む必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① 藤尾三紀夫, 中村幸平, NC加工シミュレーションの高精度化に関する研究-切削力の簡易予測法の検討-, 査読無, 沼津工業高等専門学校研究報告 45号, 2012, pp. 337-340
- ② 藤尾三紀夫, Development of a High-speed and High-accuracy Machining System Based on Servo data Control - Evaluation of Prototype System -, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol5, No5, 2011, pp855-860
- ③ 藤尾三紀夫, 鈴木裕, NC加工シミュレーションに基づくCAMシステムの高度化, 精密工学会誌 Vol.76 No.8 2010 解説記事, 査読無, 76 No.8, 2010, pp.876-880
- ④ 藤尾三紀夫, 鈴木裕, Development of a High-speed and High-accuracy Machining System Based on Servo data Control - Comparison of Accuracy -, The 4th International Conference on Positioning Technology, 査読有, 2010, pp.255-260
- ⑤ 藤尾三紀夫, 村松稔文, 宮代佳奈, サーボデータ制御に基づく高速高精度加工システムの開発 - 加工実験による精度検証 -, 査読無, 沼津工業高等専門学校研究報告 44号, 2010, pp. 269-272
- ⑥ 藤尾三紀夫, 黒山翔太, 白井清二, Development of Advanced NC Geometric Cutting Simulator, Progress of Machining Technology, 査読有, 2009, pp. 284-251

[学会発表] (計11件)

- ① 藤尾三紀夫, 矢野公規, 予測補正制御に基づく高速高精度加工システムの試作-加工中の工具たわみ予測法の検討 -, 2011年度精密工学会秋季大会, 2011年9月21日, 金沢大学
- ② 藤尾三紀夫, 小林亮太, 矢野公規, 長谷川充, 予測補正制御に基づく高速高精度加工システムの試作, -加工中における誤差の簡易予測-, 2010年度精密工学会秋季大会, 2010年9月29日, 名古屋大学
- ③ 藤尾三紀夫, 小林亮太, 宮代佳奈, 中村幸平, NC加工シミュレーションに基づく高速高精度加工用制御システムの構築-加工中の誤差予測-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010

年6月15日, 旭川大雪アリーナ

- ④ 藤尾三紀夫, 宮代佳奈, NC加工シミュレーションに基づく高速高精度加工用制御システムの構築-工具のたわみ変形補正の検証-, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2009年9月12日, 神戸大学六甲台キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤尾三紀夫 (FUJIO MIKIO)

沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・教授
研究者番号: 70238541

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: