

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760088
 研究課題名 (和文) 多軸制御工作機械による高能率加工を実現するための
 工程設計支援システムの開発
 研究課題名 (英文) Development of a Support System of Process Planning
 for Multi-Axis Controlled Machine Tools
 研究代表者
 中本 圭一 (NAKAMOTO KEIICHI)
 大阪大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：90379339

研究成果の概要：3+2 軸制御加工の各工具姿勢での除去可能領域を高速に算出する方法を考案した。これに対して、効果的な工具姿勢の候補を予め絞り込み、計算時間の更なる短縮を図った。また、パラレルメカニズム形工作機械の主軸の位置と姿勢の変化が各アクチュエータに与える影響を予測するシミュレータを開発した。ここで得られた加工機の負荷について、実機により検証実験を行い、振動の影響、工具送り方向、段取り位置・向きによる加工結果の違いを確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：多軸制御工作機械, 工程設計, 切削加工

1. 研究開始当初の背景

多品種少量生産化が進む機械加工において、非加工時間となる工程設計の標準化・自動化の達成が求められている。このためには、加工対象形状、加工機、ジグ、工具、加工条件など数多くの組合せの中から加工プロセスを予測し、効率の高い工程設計案を高速に提示できる支援システムの開発が必要である。自動工程設計の実現を指向した取り組みとして、製品形状から加工方法を特徴付ける形状である加工フィーチャを認識することが従来から考えられており、穴加工など比較

的単純な形状で標準化しやすい加工法を対象とした工程設計が自動化されつつある。しかしながら、金型形状部のような自由曲面等の複雑形状については未だに満足な対応ができていないのが実情である。また、製品の幾何学的形状にのみ注目し、加工機それぞれの特徴を考慮して工程設計を行っていないために、結果として、導入が進む多種多様な多軸制御工作機械の利便性は十分なレベルには到達していない。

そこで本研究では、『多軸制御工作機械による高能率加工を実現するための工程設計

支援システム』の開発を目的とする。5軸制御工作機械やパラレルメカニズム形工作機械などの多軸制御工作機械では、被削材に対して任意の工具姿勢を取ることで、加工面品質の向上、工具の長寿命化、段取り替えの省略が期待でき、高能率な加工が実現できる反面、工具姿勢に自由度が存在するために、工程設計は複雑となる。ポケットや溝、穴などの形状は加工フィーチャとして認識し、工具姿勢を一意に決め得るが、複雑形状に対しては、取り得る工具姿勢の中から適切な姿勢を合理的、自動的に選択する必要がある。また、不適切な干渉が発生しないように使用するツーリングなども注意深く選定する必要がある。現状での工程設計は技術者に大きく依存している。高速・高精度化が進む機械加工において加工準備時間の短縮はますます重要な課題となっており、また2007年問題等で注目を集める熟練技術者の代替という意味においても、本研究の意義は大きい。

2. 研究の目的

本研究では、多軸制御工作機械の対象として5軸制御工作機械（マシニングセンタ）とパラレルメカニズム形工作機械を取り上げ、加工準備時間を短縮することと加工機の能力を十分引き出して有効に活用することに主眼を置いた工程設計支援システムを開発する。そしてこれを達成するために、以下の2つの基盤技術を確立する。

(1) 5軸制御工作機械による3+2軸制御加工のツーリング選定・工具姿勢決定法

3+2軸（あるいは簡易5軸、固定5軸）制御加工は、加工前に2軸の回転運動により工具姿勢を決定し、加工中には3軸の直線運動を利用する加工法である。同時5軸制御加工と比較して簡便で、加工精度の向上が期待でき、3軸制御加工用のCAMシステム・ノウハウの転用も可能である。しかしながら、複雑形状に対して様々なツーリングの効果的な工具姿勢（割り出し角）を決定することは非常に困難であり、熟練技術者の経験に頼っていたり、試行錯誤を繰り返したりしている。そこで本研究では、5軸制御工作機械の特長である工具姿勢の自由度を有効に利用した高能率な加工を実現するために、3+2軸制御加工における適切なツーリング・工具姿勢を決定する手法を確立する。

(2) パラレルメカニズム形工作機械のための工具経路生成・段取り位置決定法

パラレルメカニズム形工作機械は、従来のシリアルメカニズム形工作機械と比較して、多自由度の位置決め機能を有しながら高速の運動が可能であり、複雑形状製品の加工時間を大幅に短縮するブレイクスルーとして期待されている。機構が複雑なパラレルメカ

ニズム形工作機械を有効に活用するためには、特定のアクチュエータに多大な負荷が加わらない、言い換えれば、加工機にとって滑らかに加工しやすい工具経路の生成技術が必要である。また、案内面を持たない特性を考慮すれば、従来案内面に沿っていた工具送り方向も限定するべきではなく、加工機の特性に合わせて決定するべきである。機械構成それぞれに適した加工動作はそれぞれ存在するはずであり、本研究では段取り位置・向きを含めて最も加工機に負担の小さい加工動作を決定する手法を確立する。

3. 研究の方法

研究代表者らは、本研究で確立を目指す2つの基盤技術（(1)5軸制御工作機械による3+2軸制御加工のツーリング選定・工具姿勢決定法および(2)パラレルメカニズム形工作機械のための工具経路生成・段取り位置決定法）それぞれに対して基礎的な取り組みを行ってきており、この研究成果を基に、以下の方法で研究に取り組む。

(1) 5軸制御工作機械による3+2軸制御加工のツーリング選定・工具姿勢決定法

本研究では、被削材形状と製品形状をボクセルにより表現することを考え、既にメモリを節約するためのオクツリー構造を採用して複雑形状を表現することが実現できている。また、ボールエンドミルやスクエアエンドミルによる加工を想定し、加工が進むにつれ、被削材を表すボクセルが取り除かれて、被削材形状が変化する様子も再現できる。したがって、用意したツーリングによる各工具姿勢での除去可能領域・体積を高速に算出することは既に可能であり、またこれは被削材形状を表現するオクツリー構造の階層を変化させることで荒加工から仕上げ加工まで一貫した手法で柔軟に対応できる。

この成果を基に、除去可能領域を表すボクセルに対して、製品形状を表すボクセルからのXY平面上の距離を番号付けし、同じ番号のボクセルを結ぶことで簡便な工具経路を生成するとともに、この工具経路を基に加工時間を予測することを目指す。そしてまず、複数のツーリングを用意して、ある製品形状を加工する際に、どのツーリングの組合せで、どの工具姿勢の組合せを用いると高能率な加工が実現できるか検討し、実際に5軸制御工作機械により加工を行い検証する。

以上から、各工具姿勢における除去可能領域の算出および加工時間の予測が可能となっているが、これを全ての工具姿勢において網羅的に行っていたのでは、計算時間が非常に長くなってしまふ。そこで、効果的な工具姿勢の候補を予め絞り込み、除去可能領域や加工時間を予測する計算時間の短縮を目指す。具体的には、工具経路生成の概念を利用

して各 XY 平面で製品形状から最も遠いボクセルを検出し、これらを結ぶあるいは近似してできる直線を工具中心を通る工具姿勢ベクトルと一致させる。これにより、除去可能領域の大きい工具姿勢を早期に見つけることができる。また、この手法を発展させて削り残し部分に対するツーリング形状の最適化について検討する。

(2) パラレルメカニズム形工作機械のための工具経路生成・段取り位置決定法

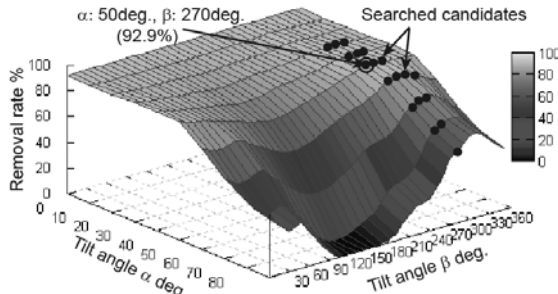
パラレルメカニズム形工作機械の主軸の位置と姿勢の変化が各アクチュエータに与える影響について、シミュレータを開発して解析する。具体的には、NC プログラムにより指令された工具先端の位置・姿勢が変化する際に、主軸を支えている 6 本のストラットと呼ばれる足の長さの変化、その速度・加速度を逐次算出できるようにし、実機 (COSMO CENTER PM600) を用いて検証も行う。そして、主軸ユニットに加わる重力の影響も考慮して、ストラットの長さを制御するサーボモータのトルクを予測する試みを行う。これにより、ある加工動作を行う際の加工機の負荷を判断することができる。まず、比較的大きく複雑な製品形状を対象として段取り位置・向きは固定し、どの工具送り方向で加工を行えば加工機としての負荷が小さくなるか検討し、実機で加工実験を行って検証する。

パラレルメカニズム形工作機械の問題点として、主軸位置・姿勢が異なるとみかけの剛性が変わり、特に稼動範囲の端に近づくとその影響が顕著になると言われている。そこでさらに、実機を用いてモード解析を行い、特に振動の影響の大きな主軸位置・姿勢を判別する。またこの知見を基にして、開発したシミュレータで得られる加工機の負荷と合わせ、被削材段取り位置・向きの最適化について検討する。また、実機により検証実験を行い、振動の影響、工具送り方向、段取り位置・向きによる加工結果の違いを確認する。

4. 研究成果

本研究で確立を目指す 2 つの基盤技術
 (1) 5 軸制御工作機械による 3+2 軸制御加工のツーリング選定・工具姿勢決定法および
 (2) パラレルメカニズム形工作機械のための工具経路生成・段取り位置決定法) それぞれに対して以下の研究成果を得た。

(1) 5 軸制御工作機械による 3+2 軸制御加工のツーリング選定・工具姿勢決定法

ボクセルにより被削材形状と製品形状を表現し、ツーリング・工具姿勢の決定を荒加工から仕上げ加工まで一貫した手法により実現するために、まず用意したツーリングによる各工具姿勢での除去可能領域・体積を高速に算出する方法を考案した。ここでは、

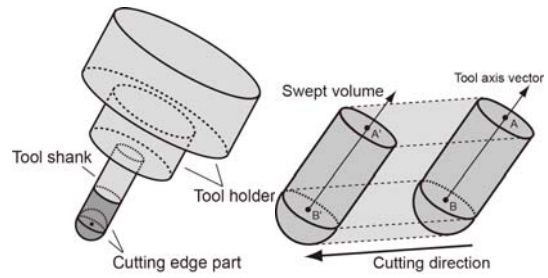


図 1 幾何学的に定義したツーリングと掃引形状

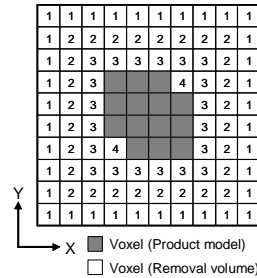


図 2 製品形状からの距離で番号付けしたボクセル

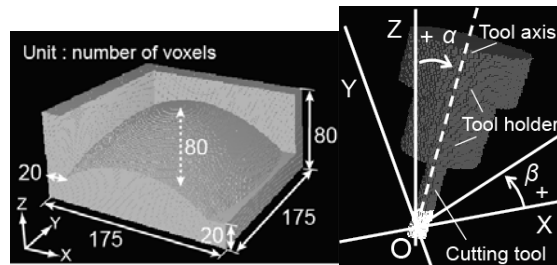


図 3 製品形状

図 4 工具姿勢の定義

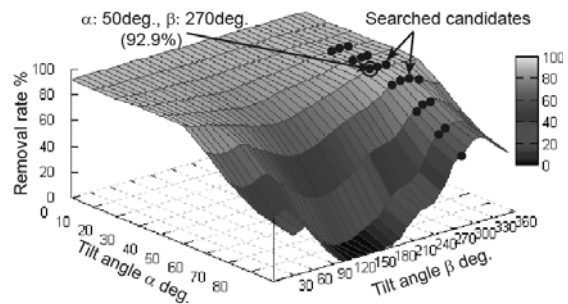
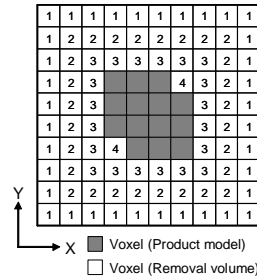


図 5 算出された加工除去領域と工具姿勢候補

1 に示すように、ツーリングを円柱と球の組合せにより幾何学的に定義して、その掃引形状を用いて加工除去領域を算出する方法と、ツーリングもボクセルで表現して被削材形状や製品形状との相互相関を計算して除去可能領域を算出する方法の 2 通りの方法を考案した。そして、得られた除去可能領域を表すボクセルに対して、に示すように、製品形状を表すボクセルからの XY 平面上の距離を番号付けし、同じ番号のボクセルを結ぶことで簡便な工具経路を生成するとともに、この工具経路を基に加工時間を予測できるようにした。また、複数のツーリングを用意して、ある製品形状を加工する際に、ツーリングと工具姿勢の組合せにより変化する加工効率を算出できるようにした。

さらに、効果的な工具姿勢の候補を予め絞

り込み, 除去可能領域や加工時間を予測する計算時間の短縮を図った. 具体的には, 工具経路生成の概念を利用して各 XY 平面で製品形状から最も遠いボクセルを検出し, これらを結ぶあるいは近似してできる直線を, 工具中心を通る工具姿勢ベクトルと一致させた. これにより, 除去可能領域の大きい工具姿勢を早期に見つけることができた. 図 3 に示した製品形状を用いてケーススタディを行った結果を示す. 図中の数字はボクセル数を表している. 製品形状は, 高さ 20 の土台上の 2 辺に幅 20 高さ 80 の壁形状を配置し, 中央部は最大高さ 80 の凸形状としている. また, 被削材形状は製品形状を包含するボクセル数 $175 \times 175 \times 80$ の直方体であり, 計算領域は一辺 256 のボクセルで構成された立方体である. 被削材座標系において図 4 に示した工具姿勢を定義する 2 つの角度 α ($0 \leq \alpha < 90$) と β ($0 \leq \beta < 360$) を 10 deg. ごとに変化させ, 325 通りの工具姿勢において除去可能領域を算出し, また工具姿勢候補数の絞り込み手法により評価値を求めた. 図 5 に全 325 通りの工具姿勢で算出した除去可能領域と, 評価値が上位 20 位までに入った工具姿勢候補を黒丸で示す. 全工具姿勢での除去可能率の平均は 70.0 %であったが, 上位 20 位までに絞り込むと 83.2%となった. 上位 20 位には除去可能率が最大となる工具姿勢 $[\alpha, \beta] = [50, 270]$ も含まれており, 比較的除去可能率の高い候補が選ばれたことが分かる.

(2) パラレルメカニズム形工作機械のための工具経路生成・段取り位置決定法

パラレルメカニズム形工作機械による高速・高精度加工を実現するために, パラレルメカニズム形工作機械の主軸の位置と姿勢の変化が各アクチュエータに与える影響について, シミュレータを開発して解析した. さらに, 主軸ユニットに加わる重力の影響も考慮して, ストラットの長さを制御するサーボモータのトルクを予測できるようにした. 各主軸位置・姿勢において推定した外力の合算値をトルクに変換したものと計測したサーボモータの駆動トルクを比較した結果を図 6 に示すが, 比較的良く一致しており外力の推定手法が妥当なことが確認できた. これにより, 加工動作を行う際の加工機の負荷を判断することができるようになった. そして, 比較的大きく複雑な製品形状を対象として段取り位置・向きは固定し, どの工具送り方向で加工を行えば加工機としての負荷が小さくなるか検討し, 実機で加工実験を行って検証した.

パラレルメカニズム形工作機械の問題点として, 主軸位置・姿勢が異なるとみかけの剛性が変わり, 特に稼動範囲の端に近づくとその影響が顕著になると言われている. そこで, 実機を用いてモード解析を行い, 特に振

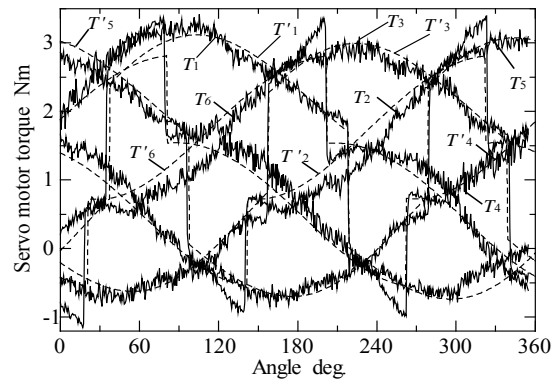


図 6 円運動中のサーボモータトルクの推定値と実測値
Centre location: $(x,y,z) = (0,0,-1000)$, Radius = 150(mm)

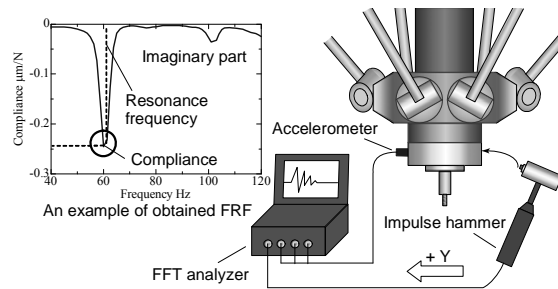


図 7 振動特性の測定実験

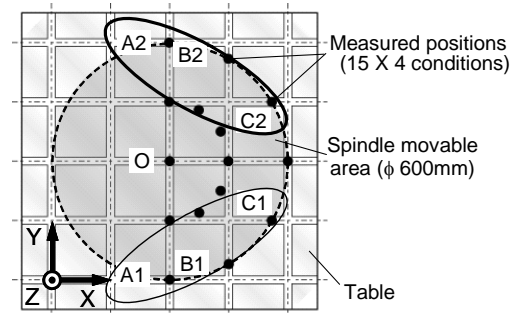


図 8 測定座標(XY)

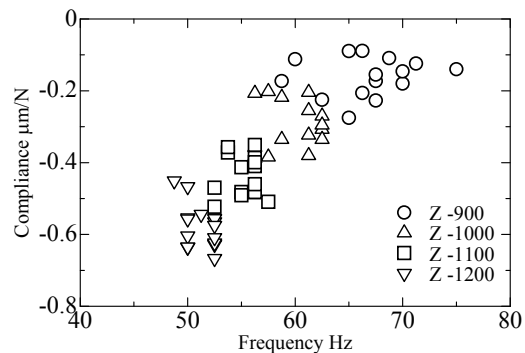


図 9 主軸位置の違いによる振動特性の変化

動の影響の大きな主軸位置・姿勢を判別した. 図 7 に示すように, インパルスハンマでは機械座標系の +Y 方向にのみ加振し, 得られた振動波形の 10 回平均値から周波数応答関数を算出した. そして, 最も低周波数のコンプライアンスのピークとその周波数を基に様々な主軸の位置・姿勢における振動特性を評価した. 予備実験において, +Y 方向に加振した場合, テーブル中心軸 (X0) に対して

左右対称の振動特性が得られることを確認している。このため、測定箇所は図8に示すようにテーブル中心から+X側にのみ設定し、テーブル中心地点(X0 Y0)と主軸稼動範囲端7箇所及びその中間地点7箇所の15箇所において、異なる4つの高さ(Z座標)に設定した。図9に測定結果を示すが、一般的にXY座標の変化に比べてZ座標の変化の方が振動特性に与える影響が大きく、Z座標が小さい、即ち6本のストラットの長さが相対的に長くなるほど固有振動数が低下し、コンプライアンスも悪化することが分かった。この結果は、別途測定した主軸ユニットのX方向への加振試験においても同様の傾向が確認できた。またこの知見を基にして、パラレルメカニズム形工作機械の主軸の位置と姿勢の変化が各アクチュエータに与える影響を予測する開発済みのシミュレータで得られる加工機の負荷と合わせ、被削材段取り位置・向き最適化について検討した。さらに実機により検証実験を行い、振動の影響、工具送り方向、段取り位置・向きによる加工結果の違いを確認した。

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1件)

- ① K. NAKAMOTO, M. TSUNODA, K. SHIRASE, T. MORIWAKI ; Rapid Removal Volume Acquisition for Tool Posture Decision in 3+2-Axis Control Milling, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 2, No. 4, pp. 464-473, (2008). 査読有

[学会発表] (計6件)

- ① K. NAKAMOTO, K. OTAKE, K. SHIRASE, T. MORIWAKI ; Development of a Support System of Operation Planning for Parallel Kinematic Machine Tool, The 7th International Conference on Machine Automation (ICMA2008), Awaji, (2008-09-26).
- ② 角田 充, 中本圭一, 白瀬敬一 ; 5軸制御工作機械のための工程設計支援システムの開発に関する研究-3+2軸制御加工における工具姿勢の高速な決定方法-, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会, 東北大学, (2008-09-19).
- ③ K. NAKAMOTO, M. TSUNODA, K. SHIRASE, T. MORIWAKI ; A Study on Rapid Search Method of Effective Tool Postures in 3+2-Axis Control Milling, 2008 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2008), Atlanta, (2008-06-24).

- ④ 中本圭一, 大竹香太, 森脇俊道, 白瀬敬一 ; パラレルメカニズム形工作機械のための工程設計支援技術に関する研究-様々な工具の位置姿勢における振動特性-, 2008年度精密工学会春季大会学術講演会, 明治大学, (2008-03-18).
- ⑤ K. NAKAMOTO, M. TSUNODA, T. INAOKA, K. SHIRASE, T. MORIWAKI ; Rapid Removal Volume Evaluation for Tool Posture Decision in 3+2-Axis Control Milling, The 4th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Fukuoka, (2007-11-08).
- ⑥ 大竹香太, 中本圭一, 森脇俊道 ; パラレルメカニズム形工作機械のための工程設計支援技術に関する研究-サーボモータ負荷と振動特性の評価-, 2007年度精密工学会秋季大会学術講演会, 旭川市ときわ市民ホール, (2007-09-13).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中本 圭一 (NAKAMOTO KEIICHI)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 90379339

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者