

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04206

研究課題名（和文）多軸工作機械用構造解析シミュレータの開発と効率的な構造最適化

研究課題名（英文）Development of structure analysis simulator for multi-axis machine tool and efficient structure optimization

研究代表者

高杉 敬吾（Takasugi, Keigo）

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：80710235

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、傾斜軸を許容する非直交型5軸工作機械に対する形状創成理論の一般化および、一般化された5軸工作機械構造において加工スペースを表現するための解析的手法の開発を実施した。本成果では、一般化形状創成理論の導出および、各軸のなす角に応じて、任意の位置、姿勢をとることができるか（フィージビリティ）を決める条件の導出に成功した。また、5軸工作機械を新たに開発する上で重要な指標である「加工スペース」について、機械構造のタイプは限定的であるが、解析的に表現することに成功した。以上の研究成果により、加工領域を最大化できる5軸工作機械構造の導出が可能となることが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑な軸構成を持った工作機械の開発は組立精度や加工精度の観点から現実的でなかったが、今後全く新しい軸構成を持った工作機械を開発する上で、本研究成果はその先駆的な役割を果たしている。例えば、傾斜回転軸を有する5軸工作機械を新たに開発する場合、加工スペースを最大化する機械構造や、特異点を回避しやすい機械構造など、工作機械に求められる種々の特性に対して最適化された機械構造の創発に繋がることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：The research project performed generalization of the form shaping function regarding non-orthogonal type 5-axis machining centers that allow slanted axes. Furthermore, an analysis method to represent the machinable area using the generalized form shaping function was developed. As the results, we achieved to derive the generalized form shaping function, and conditions that can determine arbitrary positions and postures of a tool according to formed angles in each axis. Also, we achieved to represent “machining area” analytically, which is one of important criteria regarding development of new five-axis machine tools. From the above outcomes, it can be expected that the leading method of five-axis machine tools with maximized machining area will be available.

研究分野：生産工学

キーワード：形状創成理論 多軸工作機械

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

5軸工作機械は、高い加工能率が達成されている一方で、加工機の限られたスペースの中に多くの駆動軸を押し込む必要があるため、剛性面での弱体化や加工領域の減少など、機械構造上改善されるべき問題を抱えている。機械構造の改善には、理論上無数とも言える工作機械の軸構成の組み合わせの中から優れた構造を見つけ出さなければならないが、これまでは経験則に頼るしかなく、これらの課題を抜本的に解決するための手段や提案はなされていない。

2. 研究の目的

本研究では、工作機械構造のモデリングと解析に特化した「工作機械構造解析シミュレータ」を新たに開発し、工作機械に要求される種々の特性に対する最適な機械構造の導出、検討および提案を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

工作機械構造解析シミュレータを実現するために、次の三つの機能の開発を行う。(1)5軸工作機械の形状創成関数の一般化。(2)特異点の分布や加工スペースを解析的に表現する手法の開発。(3)効率的な工作機械構造モデラーの開発。

4. 研究成果

非直交軸を許容した5軸工作機械における機械構造を議論する前提の問いとして、従来の直交した軸構成の場合には162通りの軸構成で加工可能となるが、非直交軸を許容する場合にはどのような条件で任意な加工可能となるかという問題が分かっていたため、先に加工可能となる条件を導出した。次に、5軸工作機械による切削加工において特異点と呼ばれる、通過した際に加工精度が下がってしまう姿勢が存在し、非直交軸を許容した場合の特異点の発生条件を機械構造との関係から求め、その回避方法を考察した。最後に、工作機械の機械構造に起因する特性として、非直交軸を許容した場合の加工領域の考察を行い、どのような加工が可能かどうかでその領域を分類した。

(1) 加工可能条件

機構全体の加工可能か否かは姿勢と位置の2つに分けられる。まず、姿勢に対する加工可能かどうかとは回転2軸を用いて任意の姿勢を取れるかという問題であり、位置に対する加工可能とはそのそれぞれの姿勢において並進3軸で任意の方向へ移動可能かという問題である。姿勢に対する加工可能条件として、工作物側の回転軸は工具の初期姿勢と同じ方向に構成され、工具側の回転軸は工作物側の回転軸に対して45~90度傾斜して構成される必要があることが分かった。位置に対する加工可能条件として、回転運動を考慮したうえで並進3軸を駆動させたときにそれぞれの並進方向が線形独立である必要があり、回転軸と並進軸の方向に対してそれぞれのなす角の条件式として導出できた。これは回転軸と並進軸がどの順序で構成されているかによってその関係する軸が変化し、並進軸の間に回転軸が構成されるほど複雑になる。例えば並進3軸が連続して構成される場合はただ単にその3軸の方向が線形独立であればよく、並進3軸の間に回転軸が構成される場合は、連続する並進2軸の外積方向とその回転軸の方向とのなす角と、もう1つの並進軸と回転軸の方向とのなす角の和が90度未満である必要がある。2つ回転軸が並進軸の間に構成される場合はさらに複雑な条件となるが、同様の軸の方向のなす角の条件として導出できた。以上の加工可能条件より、非直交軸を許容した場合に加工不可能となる構造を事前に排除することが可能になった。

(2) 特異点の発生条件と機械構造の関係

5軸工作機械の位置決めでは、工具の位置と姿勢から5つの軸の移動量が算出される。このとき「特異点」と呼ばれる、回転軸の移動量が不定となる姿勢が発生する。この特異点を通る際に回転軸が大きく旋回してしまい、加工精度低下の原因となる。そのため、非直交軸を許容した5軸工作機械に対して特異点が発生する位置の導出は不可欠であり、その発生条件と発生位置の導出を行った。まず、特異点の発生自体を回避するためには上記の加工可能条件を満たさず、工作物側の回転を工具の初期姿勢からずらす必要がある。この場合、特異点は発生しないが一部の姿勢を取ることが出来ない構造となる。また、加工可能条件を満たす場合には特異点が必ず発生し、工作物側の回転軸に垂直な姿勢で発生する。しかしながら、全ての軸が直交した構造では必ず垂直姿勢で特異点は発生していたが非直交軸を許容することで垂直姿勢からずらすことが可能になる。切削加工において最も使われる姿勢は垂直姿勢であり、その姿勢で特異点とならないことは大きな利点と言える。

(3) 加工領域の考察とその分類

5軸工作機械を用いる最大の利点として、5面加工可能であることが挙げられる。一般的な5軸工作機械のスペックとして並進XYZ軸のストローク量は記述されることが多いが、その中で5面加工が可能である領域はその一部であるのにも関わらずその領域が明記されることはほとんどない。そのため、どのような加工が出来るかによりその領域を分類し、その形状や体積を見積もる必要があると考え、本研究では5つの加工領域を定義した。1つ目は特定姿勢加工領域と呼

び、ある姿勢において加工可能な領域である。これは割り出し加工において加工可能な領域と一致する。2つ目は特異姿勢加工領域と呼び、先述の特異点において加工可能な領域である。特異点においてはある回転軸の移動量が不定となるが、それを用いることで特異姿勢における加工領域を大きくすることが可能となる。3つ目は全加工領域と呼び、全ての任意姿勢加工領域を包括する加工領域である。これは何らかの姿勢で加工が可能となる領域で、工作物に対して工具の干渉を考慮すべき領域でもある。4つ目は任意姿勢加工領域と呼び、全ての任意姿勢加工領域に含まれている領域である。これはどのような姿勢でも加工できる領域であり、5軸工作機械において最も重要であると考えられる。5つ目は制限姿勢加工領域と呼び、全加工領域から任意姿勢加工領域を除いた領域である。この領域では何らかの姿勢で加工可能であるものの、取れない姿勢が存在し、経路生成において注意が必要な領域である。非直交軸を許容する場合にはこれらの5つの加工領域を考慮して機械構造を決定すべきである。

本研究の最終目的は特異点の分布や加工領域、空間位置決め誤差などの5軸工作機械に求められる特性を解析しつつ、その構造を効率的にモデリング可能なシミュレータの開発を行い、その結果から全く新しい機械構造を創出することであったが、そこまで到達することは出来なかった。これは非直交軸を許容する場合、考え得る機械構造は全ての軸が直交する場合に比べ遥かに膨大であり、解析手法の確立が困難であったためである。これは理論上では可能であるが、現実には製作不可能な構造や全く利点のない構造などを含むためである。そのため先述の加工可能条件のような解析すべき機械構造の制限を様々な視点から付加することで、部分的に非直交軸を許容し、その条件下での解析を行うことでシミュレータの開発を進めていきたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Naoki Wakai, Keigo Takasugi, Naoki Asakawa	4. 巻 74
2. 論文標題 Condition for machining feasibility for a five-axis machining center	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 414-425
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2021.09.013	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 若井 尚希, 高杉 敬吾, 浅川 直紀
2. 発表標題 傾斜型回転軸を有する多軸工作機械構造の解析 形状創成関数の一般化と5面加工可能性の定義
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Wakai, Keigo Takasugi, Naoki Asakawa
2. 発表標題 Condition of machining feasibility of five-axis machine tools with slanted rotary axes
3. 学会等名 ICPE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究分担者	森本 喜隆 (Morimoto Yoshitaka) (00290734)	金沢工業大学・工学部・教授 (33302)	

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
---------	---------