

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420051

研究課題名(和文)加工条件を考慮に入れた多軸制御加工のための工具姿勢の最適化

研究課題名(英文)Optimization of Tool Posture in Multi Axis Machining by Mathematical Programming

研究代表者

樋野 励 (Hino, Rei)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：80273762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：5軸の工作機械やロボットなど、多軸を有する生産設備による機械加工の作業の際の経路計画の支援を行うために、切削工具の姿勢の最適化のための数学モデルの構築を行う。本研究課題では、より複雑な形状、すなわち実際の工業製品を取り扱うために、これまでに申請者が提案しているモデルの修正を行う。本モデルは、制約式に非線形形式を含むため、実行可能解の一つを得るために発見的な探索手法の評価を行う。提案する手法の利用法を明らかにするために、知恵の輪の解、すなわち衝突を避けながら位置を変える2つの物体の相対的な姿勢の探索結果を例題として示す。

研究成果の概要(英文)：A Mathematical model for the optimization of cutting tool posture is constructed in order to aid the path planning in machining operations by multi-axis production resources such as 5 axis machine tools, robots and so on. In this research project, the previous model proposed by the applicants is modified to cope with more complicated 3D-formed products, or the actual industrial products. The model includes non-linear equations in the constraints, therefore a heuristic searching approach is also examined to obtain one of feasible solutions. In order to clarify the availability of the proposed method, a solution for puzzle ring, which is the relative postures between two wired rings moving to avoid their collisions, is shown as the example.

研究分野：工学

キーワード：工程設計 多軸工作機械 姿勢制御 衝突回避 数理計画法 混合整数計画問題

1. 研究開始当初の背景

我々の身の周りには複雑な曲面形状を持つ工業製品が数多く存在する。それらの製品の製造では、製品と同じ滑らかな曲面を有する金型を用いて、大量に作られることはもちろん、最近では仕様の多様性と製造量の少なさに、柔軟にかつ迅速に応じるために、切削加工に代表される方法により直接作られることも決して珍しくない。

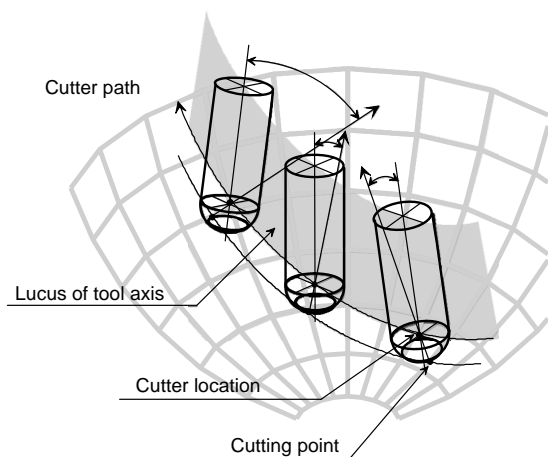
金型を用いるにせよ、機械加工を直接行うにせよ、多くの場面において5軸を基本とする多軸の工作機械の利用を取り除くことはできない。これらの工作機械は、位置決めのための直交3軸に加え、姿勢変化のための回転2軸が追加された形態をとることが多く、その動作の複雑さからCAMシステムによる計画支援が前提となる。

自由曲面の加工には、不要な箇所を除去のために切削工具が加工点で被削材と接触する一方、それ以外の箇所では触れることなく、すなわち、衝突することがあってはならない。いわゆる移動体の衝突回避のための姿勢計画を行わなければならない。

なお、この衝突回避の問題は、多軸の工作機械による加工だけでなく、組み立てロボットの動作計画や、工場内クレーンによる重量物の移動など様々な場面に見出すことができる。

本課題の申請者らは、この衝突回避の問題を最適化問題として一般化し、数理計画法、中でも最も基本的な混合整数計画問題として表すことで、工学的な見地からの検討を行っている。

一方で、制約条件の線形化に伴い、この最適化問題を直接解くことは難しい。特に形状が複雑になると問題規模を表す次数は急激に増大し、汎用のソルバーによる求解は実用的ではない。



図：自由曲面の加工と工具姿勢の変化

2. 研究の目的

移動を行う物体の障害物との干渉回避問題を、数理計画法による最適化問題として扱うために、3次元空間内に定義された2つの

物体の干渉を禁止するための制約式と、移動中の姿勢の変化量を評価値とする目的関数を明らかにし、衝突回避問題の基礎課題を与えることを第一の目的とする。申請者による本課題に対するこれまでの検討は、制約式および目的関数を最も広く検討が行われている線形計画問題の手法によって扱うために、姿勢変化を与える写像行列も線形式によって表現することを前提に検討を行っている。本課題では、姿勢変化を与える写像行列については、2次制約式を用いることにより、組み合わせ最適化問題として性質を与える要因の一部を取り除く。依然として、干渉を禁じる制約式には、選択を意味する整数決定変数が残るが、数理モデルの違いによる影響の評価のためにも段階的な修正と評価についても研究の目的の一つと位置付ける。

2. 研究の方法

姿勢変化を与える写像行列を2次の非線形式で与える。一方、2つの物体形状の干渉回避条件については、申請者のこれまでの検討結果を本課題でも利用する。すなわち分離軸判定に基づいた制約式を定義し、0-1整数決定変数を用いた線形不等式を課す。姿勢変化を与える写像行列に、非線形制約式を利用することにより、汎用の最適化ソフトウェアによる経路計画はできなくなるため、本課題では基礎的な探索により実行可能解の一つを定めるにとどめる。

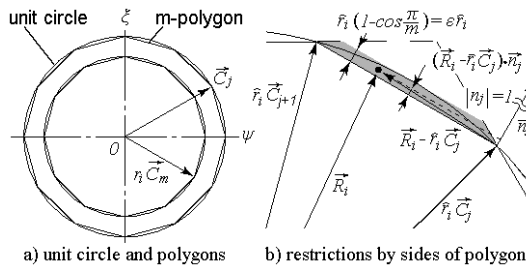
なお、課題の一つに掲げていた加工条件の組み込みについては、研究期間内の申請者の2度の研究機関の異動により研究分担者の見直しと一部検討課題の変更を行っている。

3. 研究成果

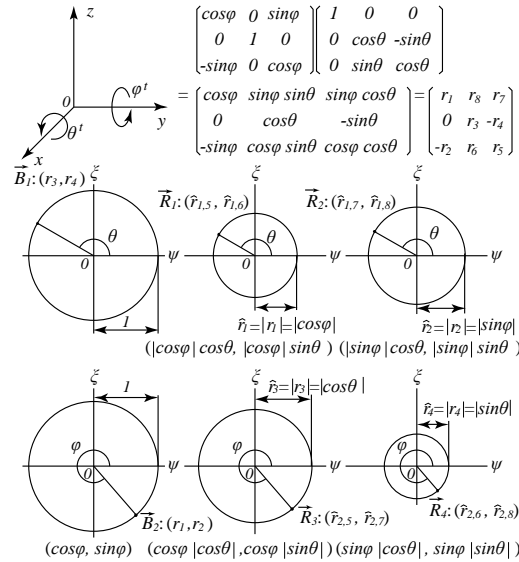
姿勢変化を与えるための写像行列を構成する変数には、図に示すような関係がある。これまでの申請者の検討では、これらの関係を線形によって表すために、6つの基本円に対して位相を共有する多角形に近似し、各々の決定変数の存在範囲に定めることで、姿勢変化を与える制約式の定式化を行っている。

本手法は、本来、非線形式からなる制約条件を線形式によって表すことに独自性を有する。このとき、決定変数の存在範囲をあらかじめ知ることができ、経路計画にかかわる精度は、この近似に依るため、その影響の把握も不可能ではない。なお、写像行列の近似の影響は写像前後での形状の歪みに関係があり、加工点から離れた位置ほどその影響を大きく受ける。

本課題では、この写像変換行列を、非線形式のまま取り扱う。三角関数の値は基準円上の1点として与えることができるため、2次の多項式により表すことができる。具体的には、図中に示す $r_1 \sim r_8$ は、次の制約条件をすべて満たさなくてはならない。一方、工具と被削材に代表される2物体間の干渉を禁じるための制約式はこれまでどおりとする。



図：正弦値，余弦値に関する制約条件

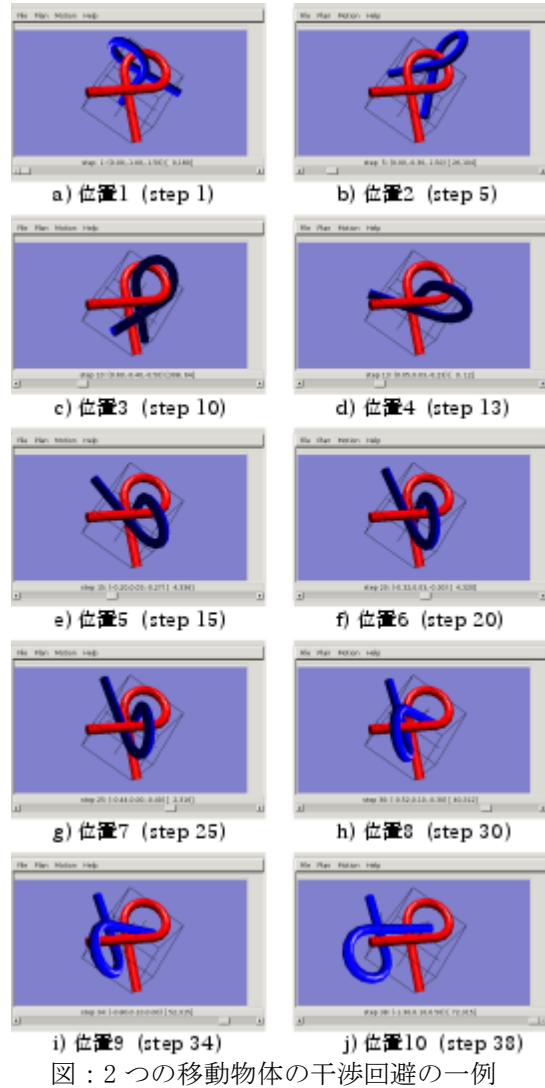


図：回転写像行列に関する制約条件

$$\begin{aligned}
 r_1^2 + r_2^2 &= 1 \\
 r_3^2 + r_4^2 &= 1 \\
 r_1 r_3 &= r_5 \\
 r_1 r_4 &= r_6 \\
 r_2 r_3 &= r_7 \\
 r_2 r_4 &= r_8
 \end{aligned}$$

非線形式を制約式に用いることにより，姿勢計画のために汎用の最適化ソルバーの利用ができなくなる．ここでは，発見的手法に基づいた探索により実行可能解の1つを得ることにする．

相対的な位置関係を変えながら互いの干渉を避けることが求められる2物体の例として，ここでは知恵の輪を取り上げる．具体的には，図(a)に示すように，同一形状の2つの物体が互いに組み合わせられた状態を初期状態とし，図(j)の状態を最終状態の位置関係として与え，その間の36点の位置における干渉しない姿勢を求める．この探索の際，一方の物体の位置および姿勢は固定し，他方の物体の姿勢を変化させる．また，各位置に対して，2物体が干渉を避けることができる姿勢には範囲があるため，ここでは前後の位置との姿勢変化の少ない姿勢を選ぶことで，全体としてなるべく姿勢変化の少ない解を選ぶことにしている．これらの代表的な8つの位置に対する姿勢に，初期位置および最終



図：2つの移動物体の干渉回避の一例

位置の2点を加えた合計10点について，2物体の位置関係を図(a)～(j)に示す．これらの図から，2つの物体が共に比較的複雑な形状の場合について，干渉を起こすことのない姿勢を求めることができていることの確認ができる．

非線形式を制約式に用いることの欠点は，実行可能解の探索をいわゆる経験的手法に頼らざるを得ず，また最適解の保証が困難なことにある．また，本課題が目的として掲げる自由曲面を対象とした機械加工については，少なくとも物体の一方は，本例題に示す形状に比べてさらに多くの多面体によって表すことが求められる意味において複雑であり，実行可能解の探索もより困難である．この点については，物体形状のデータ構造の見直しや，干渉箇所の限定が検討課題として残されている．

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3件)

- (1) Takehiro Hayasaka and Rei Hino, Optimization Problem for Feasibility Evaluation of Schedules Considering Blocking, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読あり, Vol.10, No.2, 2016, 1-14.
- (2) Rei Hino and Yoshiyuki Karuno, An Application of the Linear Partition for Scheduling Identical Jobs in a Restricted Cyclic Production System. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読あり, Vol.8, No.5, 2014, 1-15.
- (3) 早坂健宏, 樋野励, 社本英二, バッファ無しジョブショップスケジューリング問題に対する複数仕事の同時処理順序変更(ガントチャート上の不整合に着目した仕事の選択), 日本機械学会論文集C編, 査読あり, 79巻, 2013, 3951-3964.

研究者番号 : 80273762
(2) 研究分担者(平成26年9月まで)
社本 英二 (SHAMOTO EIJI)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 20216146
鈴木 教和 (SUZUKI NORIKAZU)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 00359754

〔学会発表〕(計 4件)

- (1) 樋野励, 機械加工と最適化問題－多軸工作機械のための工具姿勢計画－, システム制御情報学会, 2015年5月20日, 中央電気倶楽部(大阪府大阪市).
- (2) 早坂健宏, 樋野励, ノーバッファスケジューリング問題における処理順序の変更(線形計画問題に着目した実行可能性の判定), 日本機械学会生産システム部門研究講演会, 2014年3月17日, 電気通信大学(東京都調布市).
- (3) 松栄健太, 早坂健宏, 樋野励, ノーバッファスケジューリング問題における作業の処理順序の変更(数値計画法による制約違反の解消), 日本機械学会生産システム部門研究講演会, 2014年3月17日, 電気通信大学(東京都調布市).
- (4) Rei Hino, Cyclic Re-entrant Flow Shop Scheduling Problem, International Scheduling Symposium, 2013年7月20日, Tokyo International Exchange Center(東京都江東区).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋野 励 (HINO REI)

大阪電気通信大学・工学部・教授