

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 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560107

研究課題名（和文） 多軸制御加工のための工具姿勢の数理モデルによる最適化

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

樋野 励 (HINO REI)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号：80273762

研究成果の概要（和文）：

衝突回避のための移動する物体の姿勢の最適化は、5軸の工作機械やロボットなどの生産設備の制御をおこなうための重要な課題の1つである。一般に、回転の写像行列が、対象物の姿勢を適切な方向に変えるために用いられるが、この写像行列が非線形関数である三角関数を構成要素にもつ。この研究では、回転写像行列と等価な拘束条件を与える新しい制約式を提案し、混合整数計画法による対象物の最適姿勢問題を扱う。

研究成果の概要（英文）：

The posture optimization of a moving object for collision avoidance is one of important issues to control production resources such as 5 axis machine tools, robots and so on. In generally, a rotating matrix, which changes the posture of the object in an appropriate direction, consists of trigonometric functions, or no-linear functions. In this paper, a new set of equivalent constraints in the rotating matrix is proposed to plan the optimum posture of the object by mixed integer programming.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：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

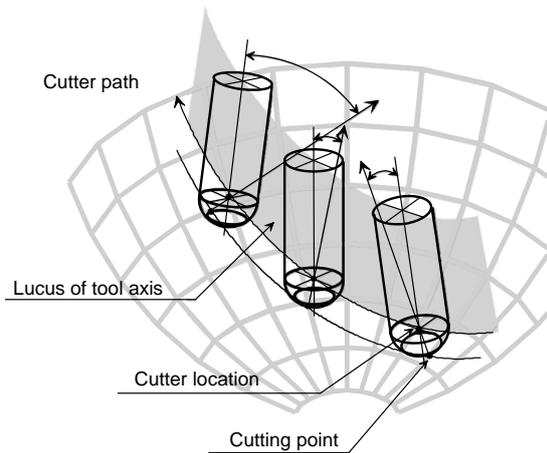
1. 研究開始当初の背景

位置決めのための直交3軸だけを有する工作機械に対して、姿勢変化のための回転2軸が追加された5軸加工機や、工具が高速回転するいわゆるフライス加工機と被削材が高速回転する旋盤の機能を兼ね備えた複合加工機など、いわゆる多軸制御による工作機械が市販されている。これらの多軸制御によ

る工作機械は、加工物と工具の3次元空間内での絶対的な位置と姿勢が複雑に変化する。そのため、熟練工といえども経験や試行錯誤による工具経路の計画はもはや不可能であり、CAM(Computer Aided Manufacturing)システムの利用が不可欠である。本課題では、このCAMシステムの中核となる工具姿勢の最適化に関する検討を行う。

5 軸制御による加工時の工具姿勢の計画に関しては、森重らによる先駆的な研究が国内外を通じて広く知られている。森重らが提案する手法は、加工点に沿って工具と被削材が干渉しない姿勢を予め求めておき、この姿勢の範囲内でさらに工具姿勢変化の少ない加工計画を立案するという、いわば 2 段階的な方策をとる。この方策は、手続きとしては理解しやすく、また実用的でもある。しかし、申請者は、2 段階的な手続きを踏まなくてはならない必然性と、このアプローチをとるが故に利用できる最適化手法が制限されていることに疑問をもつ。

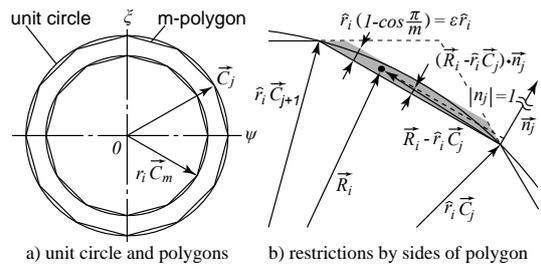
本研究では、加工目的に応じて適切な工具の姿勢を求める課題に対し、最適化の視点から数理モデルを構築する。すなわち、数理モデルに合わせた最適化手法を考案するのではなく、既存の最適化手法が利用しやすいように数理モデルを構築することを特色とする。また、数理計画法の作法に従って段階を踏まない単一の最適化問題として一般化することにより、予断の無い加工計画の立案が期待できる。



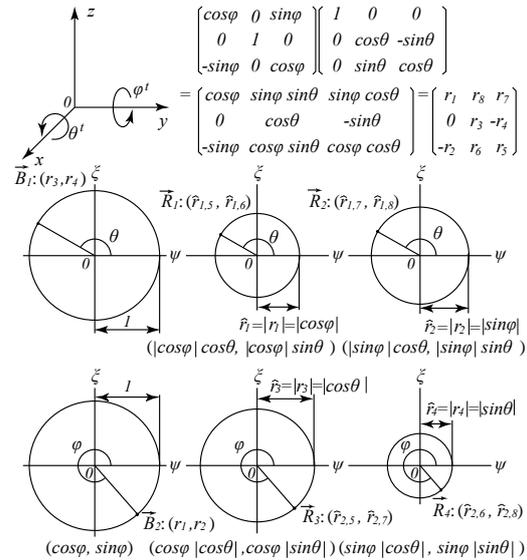
図：自由曲面の加工と工具姿勢の変化

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する。本研究では、これらの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形式によって表現することを試みる。また、物体の干渉を禁止する制約式に関しては、組み立て作業や溶接などに用いられるロボットと加工対象物のように複雑な形状の2つの物体の干渉を防ぐ目的にも用いることができるように制約式の構成を考える。



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

3. 研究の方法

線形計画法の適用のために、非線形関数である三角関数の積により与えられる回転写像を、等価な線形不等式に置き換える。さらに2つの物体形状の干渉回避条件についても分離軸判定により定義し、同様に線形不等式により与える。これらの開発と検討はいずれも計算機上にて行い、オープンソースソフトウェアの最適化ツールを利用してその妥当性の判定を行う。

4. 研究成果

(1) 姿勢変換行列の線形不等式表現

物体の姿勢変化を与える写像変換は、2軸回りの回転角により与えられる。たとえば、x軸回りに角度 θ の回転を行った後にy軸回りの角度 φ の回転を行うことを想定する。

回転を行う写像の成分の内、 $r_1 = \cos\varphi$ 、 $r_2 = \sin\varphi$ 、および $r_3 = \cos\theta$ 、 $r_4 = \sin\theta$ の各値は、単位円上の1点を選び、それぞれの座標値を用いることにより得ることができる。単位円は、 m 多角形により近似的に表現する。このとき、多角形の各辺の近くに座標点の存在範囲を定め、この範囲が結果として近似誤差を与えることになる。具体的には次の制約式を

この目的のために定めることができる。

【 $\vec{B}_1: (r_3, r_4), \vec{B}_2: (r_1, r_2)$ に対する制約】

$$2(\delta_{ij} - 1) \leq (\vec{B}_i - \vec{C}_j) \cdot \vec{n}_j \leq \varepsilon \delta_{ij} \quad (1a)$$

$$\sum_{j=1}^m \delta_{ij} = 1 \quad (1b)$$

$$\delta_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i=1, 2, \quad j=1, 2, \dots, m.$$

一方、回転写像を与える8つの成分のうち残りの4つの成分については次の制約式によって与えることができる。

【 $\vec{R}_1: (\hat{r}_{1,5}, \hat{r}_{1,6}), \vec{R}_2: (\hat{r}_{1,7}, \hat{r}_{1,8})$
 $\vec{R}_3: (\hat{r}_{2,5}, \hat{r}_{2,7}), \vec{R}_4: (\hat{r}_{2,6}, \hat{r}_{2,8})$ に対する制約】

$$2(\delta_{kj} - 1) \leq (\vec{R}_i - \hat{r}_i \vec{C}_j) \cdot \vec{n}_j \leq \delta_{kj} \quad (2a)$$

$$-2\hat{r}_i \leq (\vec{R}_i - \hat{r}_i \vec{C}_j) \cdot \vec{n}_j \leq \varepsilon \hat{r}_i \quad (2b)$$

$$\delta_{kj} \in \{0, 1\},$$

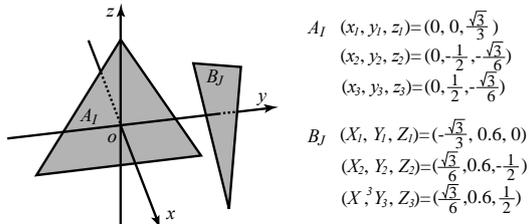
$$(i, k) = (1, 1), (2, 1), (3, 2), (4, 2),$$

$$j = 1, 2, \dots, m.$$

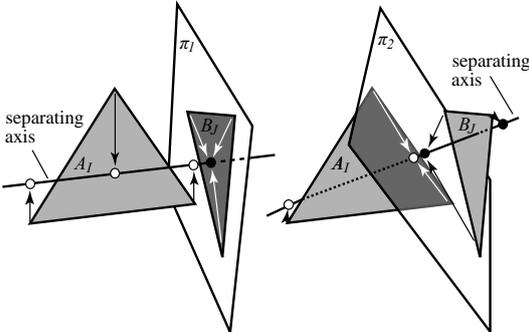
これらの式に、符号を整える制約式を加えることにより、回転写像を与える行列成分を与えることが可能になる。

(2) 干渉の禁止のための制約式

工作機械による機械加工時の工具と被削材の干渉問題を扱うときには、工具を単純な円柱形状として扱うことが多い。しかし、移動中の物体と周囲との干渉を禁じる問題は、ロボットによる組立て作業など、工学的には応用範囲の広い一般的な課題と考えることができる。そのため、本研究では、対象とする物体を単純形状に限定しないことを前提条件におく。具体的には、対象とする物体形



a) two triangle elements arranged in 3D space



b) separation by plane parallel to either triangle element
 c) separation by plane determined by a pair of edges chosen from both triangles

図：基本形状の分離軸による干渉制約条件

状を決定変数のできるだけ少ない基本形状、すなわち三角形要素により表現し、2つの三角形要素間の制約を禁じるための制約式を考える。ここでも、制約条件は線形不等式により与える。

本課題では2つの三角形要素の分離軸の存在を仮定する。まず、2つの三角形要素の1辺ずつを選び、それらの辺が作る法線が分離軸を考える。干渉を禁止するための分離軸上への三角形要素の頂点の投影点は次式で与えられる。

$$l^i (i, j, p, q, k)$$

$$= \{x_{ji} (Y_{qp} \mu_z^t - Z_{qp} \mu_y^t) + (y_k z_{ji} - z_k y_{ji}) X_{qp}\} r_1^t$$

$$+ \{x_{ji} (Y_{qp} \mu_x^t - X_{qp} \mu_y^t) + (z_k y_{ji} - y_k z_{ji}) Z_{qp}\} r_2^t$$

$$+ \{y_{ji} (Z_{qp} \mu_x^t - X_{qp} \mu_z^t) + (z_k x_{ji} - x_k z_{ji}) Y_{qp}\} r_3^t$$

$$+ \{z_{ji} (X_{qp} \mu_z^t - Z_{qp} \mu_x^t) + (y_k x_{ji} - x_k y_{ji}) Y_{qp}\} r_4^t$$

$$+ \{z_{ji} (X_{qp} \mu_y^t - Y_{qp} \mu_x^t) + (x_k y_{ji} - y_k x_{ji}) Z_{qp}\} r_5^t$$

$$+ \{y_{ji} (X_{qp} \mu_y^t - Y_{qp} \mu_x^t) + (z_k x_{ji} - x_k z_{ji}) Z_{qp}\} r_6^t$$

$$+ \{z_{ji} (Y_{qp} \mu_z^t - Z_{qp} \mu_y^t) + (x_k y_{ji} - y_k x_{ji}) X_{qp}\} r_7^t$$

$$+ \{y_{ji} (Y_{qp} \mu_z^t - Z_{qp} \mu_y^t) + (z_k x_{ji} - x_k z_{ji}) X_{qp}\} r_8^t$$

$$i, j, k = 1, 2, 3 \quad p, q = 1, 2, 3$$

$$(x_i, y_i, z_i) \in A_i \quad (i = 1, 2, 3, \quad l = 1, 2, \dots, N_A)$$

$$(X_p, Y_p, Z_p) \in B_J \quad (p = 1, 2, 3, \quad J = 1, 2, \dots, N_B)$$

$$L^J (j, j, p, q, k)$$

$$= x_{ji} (Z_k Y_{qp} - Y_k Z_{qp}) r_1^t + x_{ji} (X_k Y_{qp} - Y_k X_{qp}) r_2^t$$

$$+ y_{ji} (X_k Z_{qp} - Z_k X_{qp}) r_3^t + z_{ji} (Z_k X_{qp} - X_k Z_{qp}) r_4^t$$

$$+ z_{ji} (Y_k X_{qp} - X_k Y_{qp}) r_5^t + y_{ji} (Y_k X_{qp} - X_k Y_{qp}) r_6^t$$

$$+ z_{ji} (Z_k Y_{qp} - Y_k Z_{qp}) r_7^t + y_{ji} (Z_k Y_{qp} - Y_k Z_{qp}) r_8^t$$

$$i, j, k = 1, 2, 3 \quad p, q = 1, 2, 3$$

$$(x_i, y_i, z_i) \in A_i \quad (i = 1, 2, 3, \quad l = 1, 2, \dots, N_A)$$

$$(X_i, Y_i, Z_i) \in B_J \quad (i = 1, 2, 3, \quad J = 1, 2, \dots, N_B)$$

ここで、 A_i あるいは B_j は干渉判定の対象となる形状の*i*番目あるいは*j*番目の三角形要素を表し、小文字と大文字におよび添え字によって区別する。たとえば $L^1(1, 2, 1, 2, 1)$ は、物体 B の*J*番目の三角形要素に、三角形要素 A の辺1-2と B の辺1-2の外積より得られるベクトルを分離軸とし、この軸に物体 B の三角形要素の1つの頂点1を投影したときの値を示している。これらの値には、回転写像を与える行列成分の決定変数 $r_1 \sim r_8$ を線形式の形で含んでいる。このとき一方の三角形要素の3つの頂点の投影値が、もう一方の三角形要素の3つの頂点の何れと比べても大きな値をとるとき、2つの三角形要素は干渉を起こさない。この関係を線形不等式により与えることで、物体全体の干渉を禁じることができる。このほかに、三角形要素の法線ベクトルを分離軸と考えることができる。このときにも同様な考え方で回転写像行列の要素を決定変数とする線形不等式による制約条件を定義することができる。

ここで導いた制約式は、単純な三角形要素

の関係として記述することができる。そのため、機械加工時の工具と被削材の衝突問題のみならず、多くの応用範囲が期待できる。

またこれらの制約式はすべて線形不等式により表現されている。そのため、混合整数計画問題を扱うことができる汎用の最適化ソフトを利用して最適解を導出することができる。その一方で、回転写像行列の要素に関する制約条件を表現するために用いた整数決定変数が、得られる解の精度と規模の限界を決める。言い換えれば、回転写像行列の要素に対しては2次式による制約を与え、2次制約式からなる最適化問題として扱うことにより、複雑な形状および条件に対する姿勢計画の最適化を行うことができると期待している。

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5件)

- (1) 倉田祐輔, 鈴木教和, 樋野 励, 社本英二, 異方性を持つ低剛性工具によるエンドミル加工時のびびり振動安定限界, 精密工学会誌, 査読あり, 77巻, 2011, 97-104.
- (2) Rei hino and Hiroki Tsuji, Modeling of Schedule-Based Path Planning for Automated Vehicles Guided by Uni-directed Rails, International Journal of Automation Technology, 査読あり, vol. 6, No. 2, 2012, 228-234.
- (3) Takehiro Hayasaka, Rei Hino, Multiple Exchanges of Job Orders for No-Buffer Job Shop Scheduling Problem, JSME International Journal, 査読あり, Vol.6, 2012, 661-671.
- (4) Eiji Shamoto, Shunsuke Fujimaki, Burak Sencer, Norikazu, Suzuki, Takashi Kato, Rei Hino, A Novel Tool Path/posture Optimization Concept to Avoid Chatter Vibration in Machining-Proposed concept and its verification in Turning, CIRP Annals Manufacturing Technology, 査読あり, Vol.61, 2012, 331-334.
- (5) 樋野 励, 原田倫孝, 複数台のコンベアベルトを組み合わせた搬送システムの構築(搬送条件の導出とスケジューリング), 精密工学会誌, 査読あり, 78巻, 2012, 1105-1111.

[学会発表] (計9件)

- (1) 長田知也, 樋野 励, 特急仕事に対するスケジューリング手法の一考察, 日本機械学会, 2010.9(愛知県).
- (2) 樋野 励, 長田知也, リエントラントフローショップスケジューリング問題に関する

- る研究, 日本機械学会, 2011.3(東京都).
- (3) 辻裕樹, 樋野 励, 最短時刻経路計画のための合流・分岐・移載における搬送車の通過時刻の定式化, 日本機械学会, 2011.3, (愛知県).
 - (4) 樋野 励, 一方向経路を走行する搬送車の経路計画, 精密工学会・経営知識学専門委員会, 2010.9(愛知県).
 - (5) Takehiro Hayasaka, Rei Hino, Multiple Exchanges of Job Orders for Local Search of No-buffer Job Shop Scheduling Problem, International Symposium on Scheduling 2011(ISS2011), 2011,6(大阪府).
 - (6) 原田倫孝, 樋野 励, 複数台のコンベアベルトを組み合わせた搬送システムに関する研究(同時処理と段取りを考慮にいたした搬送スケジューリング), 精密工学会, 2011,9(東京都).
 - (7) 長田知也, 樋野 励, リエントラントフローショップスケジューリングに関する研究(第2報 総サイクル期間数に着目した最適化), 日本機械学会, 2011,9(金沢県).
 - (8) 樋野 励, 姿勢最適化のための線形制約式の一考察, 日本機械学会, 2012,3(東京都).
 - (9) 樋野 励, 早坂健宏, J. J. Boxberger, S. Gomes, 実行期間が与えられた仕事に対するスケジューリング問題の提案と実行期間の調整法の提案, 日本機械学会, 2013.3(東京都).

[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)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授
研究者番号: 80273762
- (2) 研究分担者
社本 英二 (SHAMOTO EIJI)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号: 20216146
- (3) 連携研究者
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