動作時間を考慮した動力的拘束をもつマニピュレータ 障害物回避軌道生成法の比較*

林 長 軍^{*1}, 尾崎 弘 明^{*1}, 下川 哲 司^{*1}

Comparison of Collision-Free Trajectory Generation Methods of a Manipulator with Dynamic Constraints in Consideration of Working Time

Chang-jun LIN, Hiroaki OZAKI and Tetsuji SHIMOGAWA

Three algorithms are proposed by using Complex Method to generate a collision-free trajectory for a robot manipulator in consideration of working time, under complete constraint conditions of dynamics, kinematics and obstacle avoidance. Each method has its advantage. Method 1 is that joint spatial paths are specified and Time Scale Factor is used to satisfy constraint conditions. Method 2 is that working time is a variable and simultaneously optimized with joint trajectories. Method 3 is that joint paths are not specified and Time Scale Factor is also used. The three methods are compared by applying to a trajectory generation of a manipulator with three links.

Key Words: Manipulator, Collision-Free, Trajectory Planning, Working Time, B-Spline, Complex Method, Time Scale Factor, Optimum Solution

1. 緒 言

マニピュレータの作業は、課せられる拘束条件（例えば作業空間内の障害物回避、速度およびトルクなどの制限）のもとで、あらかじめ作業の終端時刻を指定して計画される場合と、生産性などの観点から動作時間そのものも考慮の対象として計画される場合とがある。著者らは、前者の場合の軌道計画法として、Bスプライン⁽¹⁾とコンプレックス法を用いて軌道生成するアルゴリズム⁽²⁾を提案した。この方法は以下の2点、すなわち(1)Bスプラインは曲線の制御点に対する確定性、連線性および局所制御性を持つこと、(2)コンプレックス法が制御点の最適化に際してこの配の計算を必要としないことなどの長所を利用したものである。提案したアルゴリズムの簡明性と有効性をいくつかの例で示した⁽²⁾⁽³⁾。しかし、このアルゴリズムは、終端時刻が指定されない後者の問題には利用できない。ここでは、完全な動力学、運動学および障害物回避の拘束条件のもとで、動作時間を考慮して最適な関節軌道を生成できるように拡張し、これを可能にする

3つのアルゴリズムを提案する。また、これら3方法の特徴の比較を例を挙げて示す。

2. 動作時間を考慮した軌道生成法

時間を考慮した多自由度マニピュレータの障害物回避軌道を求めるために、次式のような拡張評価関数 J を与える。

$$J = k_P(J_P + k_t J_t) + k_{c1} J_{c1} + k_{c2} J_{c2} + \cdots + k_{cn} J_{cn} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 J_P は軌道の良さを評価する評価関数、 J_t は動作時間を考慮した評価関数である。 J_{ci} ($i=1, \cdots, n$) は第 i 番めの拘束条件を考慮に入れるための評価関数である。また k_P , k_t および k_{ci} は各評価に対する重み係数である。

k_t 以外の重み係数はあらかじめ与えるものではなく、式(1)において拘束条件の評価の優先順位にしたがって自動的に計算される。その計算法は文献(3)を参照されたい。

動作時間 $\tilde{t}_f$ を考慮した評価関数はつぎのように与える。

$$J_t = \tilde{t}_f \quad \cdots \cdots (2)$$

以上の評価のもとでマニピュレータ障害物回避軌道を最適化するには非線形計画法のコンプレックス法を

* 原稿受付 1997年7月30日。

*¹ 正員、福岡大学工学部 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)。

用いた三つの方法が考えられる。

2・1 空間経路を指定し時間スケールファクタを用いる方法 (方法1) この方法はあらかじめ終端時刻を指定して障害物を回避した軌道が得られた場合、それを空間経路として指定し、時間スケールファクタ $\kappa(t)^{(4)}$ を導入して、最適なマニピュレータ障害物回避軌道を生成するものである。式(2)の動作時間 $\tilde{t}_f$ は次式になる。

$$\tilde{t}_f = \int_0^{t_f} \kappa(t) dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

t_f はあらかじめ得られた軌道の終端時刻を表す。また、 $\kappa(t)$ に関しては、 n_f 次の (n_f は奇数) B スプラインで定める。つまり区間 $[0, t_f]$ を等間隔 Δt で N 分割し、その第 i 番めの区間 $[t_i, t_{i+1}]$ における B スプラインで記述した $\kappa(t)$ はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \kappa(s) &= \sum_{l=0}^{n_f} N_l(s) \hat{\kappa}_{i-(n_f-1)/2+l} \quad \dots\dots\dots (4) \\ t(s) &= t_i + s\Delta t \quad (0 \leq s \leq 1) \end{aligned}$$

ここに、 $\hat{\kappa}_{i-(n_f-1)/2+l}$ および $N_l(s)$ は B スプライン曲線の制御点と基底関数である。

この方法において終端時刻 t_f は一定値であるため、 Δt も一定値である。時間スケール変更によって得られた軌道、速度および加速度等の計算は文献(4)を参照されたい。

2・2 終端時刻を探索する方法 (方法2) この方法は動作の終端時刻 t_f をコンプレックス法の一つの探索変数として、マニピュレータ関節軌道を表す B スプライン制御点と同時に最適化することより軌道を生成するものである。式(2)の動作時間 $\tilde{t}_f$ は終端時刻と等しい次式を用いる。

$$\tilde{t}_f = t_f \quad \dots\dots\dots (5)$$

このとき B スプライン上の N 分割した時間間隔 Δt は一定ではなく、探索変数 t_f に応じて変化する。

$$\Delta t = t_f / N \quad \dots\dots\dots (6)$$

以上により式(1)の最適化によりすべての拘束条件を満足し、 $J_p + k_t J_t$ を最適化するマニピュレータ軌道を探索する。

2・3 空間経路の探索と時間スケールファクタを用いる方法 (方法3) この方法は方法2の終端時刻 t_f の代わりに時間スケールファクタ $\kappa(t)$ を導入するものである。つまりマニピュレータ関節軌道および $\kappa(t)$ の軌道を表す B スプライン制御点の同時最適化より障害物回避軌道を生成する。式(2)の動作時間 $\tilde{t}_f$ に関する式は方法1と同様である。

2・4 アルゴリズム マニピュレータの第 j 関節 ($j=1, 2, \dots, K$) の軌道 $\theta^j(t)$ を最適化するには、そ

の軌道を記述するすべての B スプライン制御点および動作時間 $\tilde{t}_f$ を表す変数を一つのベクトル $\hat{\mathbf{Z}} \equiv (\hat{\theta}^{1T}, \hat{\theta}^{2T}, \dots, \hat{\theta}^{KT}, \hat{t}^T)^T$ とする。ここに、 T は転置を表し、 $\hat{\theta}^j \equiv (\hat{\theta}_{-(n-1)/2}^j, \dots, \hat{\theta}_N^j, \dots, \hat{\theta}_{N+(n-1)/2}^j)^T$ 、 $\hat{t}$ については、方法2においては $\hat{t} \equiv t_f$ ；方法1, 3においては $\hat{t} \equiv (\hat{\kappa}_{-(n_f-1)/2}, \dots, \hat{\kappa}_N, \dots, \hat{\kappa}_{N+(n_f-1)/2})^T$ である。したがって、軌道生成のためにはベクトル $\hat{\mathbf{Z}}$ を最適化すればよい。その手段として、ここでは上述した3方法に対してコンプレックス法を用いるアルゴリズムを提案する。コンプレックス法は非線形計画法の一手法であるが、最適化に際して評価関数のみを用いればよいので、こう配の計算を必要としない点が長所である。また関節軌道を表す B スプラインの独立な制御点数を N_1 (方法1に対して $N_1=0$) とし、動作時間を表す変数を N_2 (方法2に対して $N_2=1$ ；方法1, 3に対して $\kappa(t)$ を表す B スプラインの制御点数) とすると、 $\hat{\mathbf{Z}}$ を表す変数の個数は N_1+N_2 になる。コンプレックス法における初期点 M は、収束の信頼性を高める上で、決定すべき変数の2倍程度にした方がいいといわれている。提案するアルゴリズムは以下のようになる。

(a) 上述 $\hat{\mathbf{Z}}$ の初期点 $\hat{\mathbf{Z}}_1$ のほかに $M-1$ 個のベクトル $\hat{\mathbf{Z}}_2, \hat{\mathbf{Z}}_3, \dots, \hat{\mathbf{Z}}_M$ を求める。このとき、つぎのように与える。

$$\hat{\theta}_{q_1, m}^j = \hat{\theta}_{q_1, 1}^j + D_1 r \quad (\text{方法2, 3}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$t_m = t_f + D_2 r \quad (\text{方法2}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\hat{\kappa}_{q_2, m} = \hat{\kappa}_{q_2, 1} + D_3 r \quad (\text{方法1, 3}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$(j=1, 2, \dots, K; q_1=1, 2, \dots, N_1;$$

$$q_2=1, 2, \dots, N_2; m=2, 3, \dots, M)$$

ここに、 t_m は各ベクトルに対する B スプラインの終端時刻を表す。 D_1, D_2, D_3 は探索域に対応して設定する値、 r は区間 $[-0.5, 0.5]$ の一様乱数である。

(b) 各ベクトルで定まる軌道に対して評価関数を計算し、評価値の最大値 J_H を与えるベクトル (最大点) $\hat{\mathbf{Z}}_H$ と最小値 J_L を与えるベクトル (最小点) $\hat{\mathbf{Z}}_L$ とを求める。

(c) ε を収束の判定定数として $J_H - J_L \leq \varepsilon$ のとき終了、 $J_H - J_L \geq \varepsilon$ のとき、(b)で最小点 $\hat{\mathbf{Z}}_L$ を更新した場合、その回数を K_L として、もし K_L が M_L (M_L はあらかじめ与えるある正の整数) の整数倍のとき、初期点 $\hat{\mathbf{Z}}_1$ を最小点 $\hat{\mathbf{Z}}_L$ で置き換え、(a)へ。そうでないとき、(d)へ。

(d) 最大点 $\hat{\mathbf{Z}}_H$ 以外の $M-1$ 個の制御ベクトルの重心 $\hat{\mathbf{Z}}_w$ を求める。最大点 $\hat{\mathbf{Z}}_H$ と重心 $\hat{\mathbf{Z}}_w$ とを結ぶ直線上で改良点 $\hat{\mathbf{Z}}_c$ を求め、その評価値 J_c を求める。

$$\hat{\mathbf{Z}}_c = \hat{\mathbf{Z}}_w + \alpha(\hat{\mathbf{Z}}_w - \hat{\mathbf{Z}}_H) \quad \dots\dots\dots (10)$$

- (e) $J_C < J_H$ なら, $\hat{\mathbf{Z}}_H$ を $\hat{\mathbf{Z}}_C$ で置き換え, (b)へ。
 (f) $J_C \geq J_H$ なら, ε' を十分小さな正の値として, $\alpha \geq \varepsilon'$ なら, α を $\alpha \cdot \beta$ で置き換えて, (d)へ。 $\alpha < \varepsilon'$ なら, α を初期値に戻し, $\hat{\mathbf{Z}}_W$ を $\hat{\mathbf{Z}}_L$ で置き換え, (d)へ。

コンプレックス法では α の初期値は 1.3, β は 0.5 がよいとされている。

3. 障害物回避軌道生成の例

ここでは, 提案するアルゴリズムを平面 3 自由度 3 リンクマニピュレータの障害物回避軌道の生成問題に適用し, その有効性を示す。なお, 運動方程式およびパラメータの値は文献(3)と同じである。

3・1 評価関数の設定 式(1)で一般的な評価関数を与えたが, ここでは, 例題に応じて評価関数を設定する。

マニピュレータ軌道の評価関数 J_P として運動の滑らかさを重視して, 人間の上肢の運動とよく一致する軌道を与えるといわれる各関節のトルク u_j の変化率 du_j/dt の二乗時間積分の評価⁽⁵⁾を用いる。つまり

$$J_P = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{j=1}^3 (du_j/dt)^2 dt \dots\dots\dots (11)$$

拘束条件として, マニピュレータの障害物回避, 各関節最大トルクおよび最大角速度の制限の評価を導入する。

障害物回避条件に対応する評価関数 J_{c1} , 各関節最大トルクの制限に対応する評価関数 J_{c2} および各関節最大角速度の制限に対応する評価関数 J_{c3} は文献(3)と同様である。

計算では, 方法 2 および方法 3 の関節軌道は 5 次ユニフォーム B スプラインを用い, 方法 1 と方法 3 においての $\kappa(t)$ の軌道は 3 次ユニフォーム B スプラインを用い, 積分値をシンプソン則で求める。

3・2 軌道生成 空間分割点数 $N=10$, 重み係数 $k_t=10$, 探索域 $D_1=1.0(\text{rad})$, $D_2=0.5(\text{s})$, $D_3=0..5(\text{s})$ とする。また, 以下の例において各関節トルクの制限条件をつぎのように与える。

$$\begin{cases} |u_1| \leq 50 & (\text{N}\cdot\text{m}) \\ |u_2| \leq 40 & (\text{N}\cdot\text{m}) \\ |u_3| \leq 30 & (\text{N}\cdot\text{m}) \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

各関節角速度の制限はつぎのように与える。

$$\begin{cases} |\dot{\theta}_1| \leq 10 & (\text{rad/s}) \\ |\dot{\theta}_2| \leq 10 & (\text{rad/s}) \\ |\dot{\theta}_3| \leq 10 & (\text{rad/s}) \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

以上の条件のもとに, 動作時間を考慮したマニピュレータ障害物回避軌道を生成する。

(a) Initial joint trajectories and end-effector path

(b) Initial joint velocity and torque trajectories

Fig.1 Initial trajectories for Method 1

(a) Finally obtained joint trajectories and end-effector path

(b) Finally obtained joint velocity and torque trajectories

Fig.2 Finally obtained trajectories with velocity and torque constraints (Method 1)

図 1 は動作時間が指定された問題に対する文献(3)の最終結果であり, 方法 1 の初期マニピュレータの関節軌道およびそれに対するリンクの動き, 各関節トルク, 角速度を示す。方法 1 を適用すると, 図 2 に示すように動作時間を短縮し, 収束条件を満足する障害物回避軌道が得られた。

図 3 は方法 2 に対するマニピュレータの初期関節軌道およびそれに対するリンクの動き, 各関節トルク, 角速度を示す。方法 2 を適用すると, 図 4 に示すような制限条件を満足する障害物回避軌道が得られた。図 3 と同様な初期軌道を用い, 方法 3 を適用すると, 図 5

(a) Initial joint trajectories and end-effector path

(b) Initial joint velocity and torque trajectories

Fig. 3 Initial trajectories for Method 2 and 3

(a) Finally obtained joint trajectories and end-effector path

(b) Finally obtained joint velocity and torque trajectories

Fig. 4 Finally obtained trajectories with velocity and torque constraints (Method 2)

に示すような制限条件を満足する障害物回避軌道が得られた。

得られた評価値および動作時間をまとめて表 1 に示す。この表から、最適化パラメータ数の最も多い方法 3 よりも方法 2 がよい評価値を得ていることがわかる。しかし、方法 2 を用いて得られた結果の図 4 を初期軌道として方法 3 を適用すれば、わずかであるがよい評価値 ($J=0.716\ 252$) が得られることを確認している。適用した問題では評価関数の最適解近傍が多峰的であると考えられ、最適解を見いだすことが困難であるように予想される。計算時間に関しては、NEC

Table 1 Comparison of three methods

	Performance Index	Working Time
Method 1	0.742064	0.8252
Method 2	0.718990	0.8166
Method 3	0.730762	0.8188

(a) Finally obtained joint trajectories and end-effector path

(b) Finally obtained joint velocity and torque trajectories

Fig. 5 Finally obtained trajectories with velocity and torque constraints (Method 3)

PC-9821 V 20/M 7 を用いた場合、方法 1 で図 2 の結果を得るのに 1.5 時間、方法 2 で図 4 の結果を得るのに 22 時間、方法 3 では図 5 の結果を得るのに方法 2 の約 7 倍の計算時間を要した。

4. 結 言

提案した 3 方法のアルゴリズムを用いて、完全な力学および運動学のもとで動作時間を考慮した障害物回避軌道の生成ができることを確認した。これらのアルゴリズムは以下の特長をもつ。

(1) 方法 1 は初期障害物回避経路が利用できる場合、時間スケールを用いることによって問題が簡明な形になり、最適化計算に要する演算時間が少ない。

(2) 方法 2 は経路指定の必要がないため、軌道最適化において方法 1 より良い結果を求めることができる。

(3) 方法 3 は経路指定の必要がなく、問題が簡明な形になる利点があるが、時間スケールを用いることによってコンプレックス法の探索変数が増え、最適化計算に要する演算時間も大幅に増える欠点がある。

文 献

- (1) 山口富士夫, コンピュータディスプレイによる形状処理工学(II), (1988), 69, 日刊工業社.
- (2) 尾崎弘明・林長軍・麻生京子, Bスプライン制御点最適化によるマニピュレータ障害物回避軌道の生成, 機論, **61**-586, C(1995), 2495-2500.
- (3) 尾崎弘明・林長軍, コンプレックス法による動力学を考慮したマニピュレータ障害物回避軌道生成, 日本ロボット学会誌, **15**-1(1997), 139-144.
- (4) 尾崎弘明・秀田保・山本元司・毛利彰, 空間経路が指定されるマニピュレータ動作の時間短縮, 計測自動制御学会論文集, **22**-10(1986), 1074-1080.
- (5) Uno, K., Kawato, M. and Suzuki, R., Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement, *Biol. Cybern.*, **61**(1989), 89-101.
-