2 台のマニピュレータの衝突回避軌道計画

(Virtual Coordination Space を用いる場合)

毛利 彰* 圓 島 信 也* 山 本 元 司*

Collision-Free Trajectory Planning for Two Manipulators (The Case of Using Virtual Coordination Space)

Akira MOHRI Shinya MARUSHIMA Motoji YAMAMOTO

In this paper, we propose a method of planning collision-free trajectory for two manipulators along specified joint paths. The joint path of each manipulator is represented by a path parameter and two path parameters generate a two-dimensional space which contains the collision region of two manipulators. In order to connect the path parameter with time, a time scale factor is introduced. In a three-dimensional space constituted by the two-dimensional space of the path parameters and the time scale factor, minimum time trajectories for two manipulators are searched under joint torque constraints and collision-free condition by dynamic programming. There are two advantages in this method. One is that deadlock does not occur in the search because the collision region is obtained beforehand. And the other is that the proposed method considers manipulator dynamics, therefore, not only collision avoidance but also minimization of traveling time is carried out at the same time.

Key Words : Two Manipulators, Trajectory Planning, Collision-Free, Minimum Time, Manipulator Dynamics

1. は じ め に

様々な作業環境にマニピュレータを適用していく上で、マニピュレータ同士の衝突回避は避けて通れない重要な問題の一つである。本論文では、同一作業空間内で同時に動いている2台のマニピュレータに対し、それらの動作経路が予め計画されている場合の衝突回避問題を考える。マニピュレータの動作すべき経路が既知であるとしても、それらの経路を時間と対応づけるか、または動作経路に沿ったマニピュレータ同士の位置関係を決定しなければ衝突するかしないかは不明である。したがって、動作経路が指定される2台のマニピュレータの衝突回避に関する問題に対して、いくつかの研究がなされている。

B. H. Lee¹⁾はタイムスケジューリングによりエンド

エフェクタ同士が衝突しない軌道を求めている。また、P. A. O'Donnell²⁾はコンフィギュレーション空間上でデッドロックを生じない衝突回避軌道を探索している。しかし、これらの方法ではカインマティクスしか考慮していない。実際には衝突回避のみでなくいかに生産性の向上を図るかということも問題であり、動作時間の短縮や入力エネルギーの節約などの要求を満たす軌道を計画することが望まれる。すなわち、マニピュレータダイナミクスを考慮して衝突回避軌道を生成する必要がある。毛利³⁾は関節経路が指定される2台のマニピュレータに対して、衝突回避の条件と駆動力の制限のもとで動作時間の短い軌道を求めている。この方法では、ほぼ最短時間に近い軌道が得られるが、衝突回避を局所的にしか行っていないためデッドロックに陥ってしまう場合がある。Shin⁴⁾は2台のマニピュレータのそれぞれの動作経路を経路パラメータを用いて表わしている。そして、

原稿受付 1992 年 2 月 8 日

* 九州大学工学部

これら2つの経路パラメータにより生成される2次元空間 (Virtual Coordination Space, 以下これを VCS と略す) 上にマニピュレータ同士の衝突が生じる領域を作成し, この衝突領域と干渉しない曲線 (Collision-Free Coordination Curve, 以下これを CFCC と略す) を与えている. この CFCC に沿って2台のマニピュレータを動作させれば衝突は生じないので, 駆動力と速度の制限を考慮して動作時間を評価とする軌道を求めている. この方法では予め衝突領域を作成しているため, CFCC が決まれば衝突回避軌道が得られるという利点がある. しかし, 実行可能な CFCC は無限に存在し CFCC の選び方によっては評価がかなり異なってくるにもかかわらず, この研究では CFCC の最適化は行われていない.

本論文では Shin らの方法に基づき, 駆動力の制限のもとで動作時間が短くなるように CFCC をも最適化し衝突回避軌道を求める方法を提案する. この方法では, ダイナミクスを考慮した衝突回避軌道が大域的探索により得られるという利点がある.

2. 問題の定式化

2台のマニピュレータを $r=a, b$ として区別する. 一般に n リンク n 関節のマニピュレータのダイナミクスは次のように表わせる.

$$H^r(\theta^r)\ddot{\theta}^r + h^r(\theta^r, \dot{\theta}^r) + g^r(\theta^r) + D^r\dot{\theta}^r = u^r. \quad (1)$$

ここで, $\theta^r \in R^n$ は関節変数ベクトル, $H^r(\theta^r) \in R^{n \times n}$ は慣性マトリクス, $h^r(\theta^r, \dot{\theta}^r) \in R^n$ は遠心力・コリオリ力ベクトル, $g^r(\theta^r) \in R^n$ は重力ベクトル, $D^r \in R^{n \times n}$ は粘性摩擦係数の対角マトリクス, $u^r \in R^n$ は駆動力ベクトルを表わす. ただし, $r=a$ のとき $n=l$, $r=b$ のとき $n=m$ とする. 2台のマニピュレータにそれぞれ関節経路 θ^r を与える. 境界条件として軌道の始端と終端の速度を与え, ゼロとする.

$$\dot{\theta}^r(0) = \dot{\theta}^r(t_e^r) = 0. \quad (2)$$

制限条件として駆動力の制限を与える.

$$u_{i\min}^r \leq u_i^r(t^r) \leq u_{i\max}^r \quad (i=1, \dots, n). \quad (3)$$

任意の時刻でのマニピュレータの占有空間を $x^r(t)$ とすると, 衝突回避の条件として

$$x^a(t) \cap x^b(t) = \emptyset. \quad (4)$$

を与える. 評価として2台のマニピュレータがともに動作を終了する時刻

$$J = \max_r \left[\int_0^{t_e^r} dt \right]. \quad (5)$$

を与える.

従って, ここで扱う衝突回避軌道計画問題は, 関節経路 θ^r が指定されるとし, 式 (1) のマニピュレータダイナミクスに対して式 (2) の境界条件, 式 (3), 式

Manipulator a Manipulator b
Fig. 1 Two manipulators in common work space

Fig. 2 VCS and CFCC

(4) の制約条件のもとで式 (5) の評価 J が小さくなる軌道 $\theta^r(t)$ を求める問題となる.

3. VCS

Fig. 1 のように2台のマニピュレータを始端 I から終端 F まで動作させるとき, 作業空間が互いに干渉し衝突の危険が生じるような場合を考える.

I から F までの関節経路 $\theta^a(t)$, $\theta^b(t)$ をそれぞれ経路パラメータ $s^a(0 \leq s^a \leq 1)$, $s^b(0 \leq s^b \leq 1)$ で表現する. マニピュレータ a が $s^a = \alpha$ の状態にあるとき, マニピュレータ b がマニピュレータ a と衝突する s^b の範囲は, 干渉チェックを行うことにより $\beta \leq s^b \leq \gamma$ となる (Fig. 1 参照). この計算を s^a について 0 から 1 までの範囲で行うことにより, s^a-s^b 空間に衝突領域を描くことができる (Fig. 2 参照). Shin らはこの s^a-s^b 空間を VCS と呼んでおり, 2台のマニピュレータの位置関係が VCS 上のある 1 点で示されることになる. また, VCS 上で $s^a=s^b=0$ から $s^a=s^b=1$ までの衝突領域と干渉しない曲線は CFCC と呼ばれ, この曲線に沿って動作させることにより衝突回避が可能となる.

4. 衝突回避軌道計画

VCS の概念にもとづいて、駆動力の制限のもとで動作時間が短くなるように CFCC を最適化し、衝突回避軌道を生成する方法を説明する。

4.1 探索空間

マニピュレータは指定された関節経路に沿って逆戻りしないものとする。この仮定により CFCC は s^a, s^b の単調増加曲線でなければならない。また、激しい駆動力の変動を避けるために滑らかな曲線である必要がある。以上を考慮して、VCS 上に Fig. 3 の構造をしたメッシュを作成する。ここで、このようなメッシュを作成するのは、ある程度の大きさのメッシュで、滑らかな近似曲線（ここでは B-スプライン曲線）を生成するものになる点列を選択する際に、その選択の幅が広がると考えられるからである。そして、Fig. 4 のようにこのメッシュの各格子点を、 $s^a=s^b=0$ から $s^a=s^b=1$ に向かう対角線方向のパラメータ $s, s=s_j=j/N$ ($j=0, \dots, N$) と s_j に対して垂直な方向のパラメータ $w, w=w_k=k/M$ ($k=0, \dots, M$) で表わす。さらに、VCS 上の曲線を時間 t と関連づけるために時間換算係数 λ を

Fig. 3 Mesh of VCS

Fig. 4 $s-w-\lambda$ space

$$dt = \frac{1}{\lambda} ds. \quad (6)$$

と定義し⁵⁾, $s=s_j, w=w_k$ における λ の範囲を λ_h ($h=0, \dots, L$) に離散化する。この $s-w-\lambda$ の 3次元空間は式 (6) の λ によって時間と関連づけられているので、 $s-w-\lambda$ 空間の曲線は同時に動作する 2 台のマニピュレータの軌道を表わすことになる。したがって、衝突領域を回避しつつ、許容駆動力の範囲内で動作時間が短くなるような曲線を $s-w-\lambda$ 空間で探索することにより、ダイナミクスを考慮した衝突回避軌道を求めることができる。

4.2 動的計画法による最適化

$s-w-\lambda$ 空間において、駆動力と衝突回避の条件のもとで動作時間が短くなるように、 s 方向に沿って w, λ の 2 変数を動的計画法を用いて最適化する。

$s=s_{j-1}$ 上の格子点 $(s_{j-1}, w_k, \lambda_h)$ と $s=s_j$ 上の格子点 (s_j, w_k, λ_h) の 2 点間を考える (Fig. 5 参照)。この格子点間の移動時間を式 (6) より

$$T(\lambda_h, \lambda_h) = \frac{2}{\lambda_h + \lambda_{h'}} \Delta s. \quad (7)$$

と近似する。ただし、 $\Delta s = s_j - s_{j-1}$ である。 $s=s_j$ 上の格子点 (s_j, w_k, λ_h) における 2 台のマニピュレータの関節角、関節角速度、関節角加速度は式 (6) より

$$\theta^r = \theta^r(s_j, w_k). \quad (8)$$

$$\dot{\theta}^r = \lambda_h \frac{d\theta^r(s_j, w_k)}{ds}. \quad (9)$$

$$\ddot{\theta}^r = \lambda_h^2 \frac{d^2\theta^r(s_j, w_k)}{ds^2} + \lambda_h \frac{d\lambda_h}{ds} \frac{d\theta^r(s_j, w_k)}{ds}. \quad (10)$$

とおける。これら式 (8), (9), (10) を式 (1) のマニピュレータダイナミクスに代入すると、格子点 (s_j, w_k, λ_h) における駆動力は

$$u^r = \lambda_h^2 \left[H^r(\theta^r(s_j, w_k)) \frac{d^2\theta^r(s_j, w_k)}{ds^2} + h^r \left(\theta^r(s_j, w_k), \frac{d\theta^r(s_j, w_k)}{ds} \right) \right]$$

Fig. 5 Mesh points $(s_{j-1}, w_k, \lambda_h)$ and (s_j, w_k, λ_h)

$$+ \lambda_h \left[\frac{d\lambda_h}{ds} \mathbf{H}^r(\theta^r(s_j, w_k)) \frac{d\theta^r(s_j, w_k)}{ds} + \mathbf{D}^r \frac{d\theta^r(s_j, w_k)}{ds} \right] + \mathbf{g}^r(\theta^r(s_j, w_k)). \quad (11)$$

となる。ここで、この駆動力 $\mathbf{u}^r$ が式 (3) の駆動力の制限を満たさない場合や、格子点 (s_j, w_k, λ_h) が衝突領域に含まれる場合、さらに s^a, s^b の単調増加の条件から、 $s^a(s_j, w_k) - s^a(s_{j-1}, w_{k'}) < 0$ または $s^b(s_j, w_k) - s^b(s_{j-1}, w_{k'}) < 0$ の場合は実行不可能であるので、式 (7) の T を無限大とする。したがって、Bellman の最適性の原理より次式が成り立つ。

$$f_1(\lambda(s_0), \lambda_h(s_1, w_k)) = T(\lambda(s_0), \lambda_h(s_1, w_k)). \quad (12)$$

$$f_j(\lambda(s_0), \lambda_h(s_j, w_k)) = \min_{h', k'} [f_{j-1}(\lambda(s_0), \lambda_h(s_{j-1}, w_{k'})) + T(\lambda_h(s_{j-1}, w_{k'}), \lambda_h(s_j, w_k))]. \quad (13)$$

ここで、 $f_j(\lambda(s_0), \lambda_h(s_j, w_k))$ は始端から格子点 (s_j, w_k, λ_h) までの最短動作時間となる。ただし、境界条件式 (2) より始端と終端の速度はゼロであるので式 (9) から、 $\lambda(s_0) = \lambda(s_N) = 0$ とする。以上より、式 (12)、(13) を繰り返し解くことによって動作時間の短い衝突回避軌道が得られる。

4.3 計算時間の短縮

この $s-w-\lambda$ 空間を動的計画法を用いて探索する場合、Fig. 6 からわかるように $(M \cdot L)^2 \cdot N$ のオーダーの計算が必要であり、計算時間の制約上、 N, M, L の値を大きくし十分な精度の衝突回避軌道を得るのは難しい。ゆえに、以下のような近似的方法をとる。4.2 で説明した方法において、 N, M, L を計算時間がかかりすぎない程度の値とし、 $s-w-\lambda$ の全空間にメッシュを作成し探索する。そして、得られた格子点列の近傍に $s-w-\lambda$ の探索空間を制限し、その空間に同じ N, M, L の値を持つメッシュを作成して同様に探索を行う。これを何度か繰り返し探索空間を縮小していくことによって、最適

Fig. 6 Estimation of the amount of calculation

な格子点列を求める。この方法により得られる $s-w-\lambda$ 空間の最適格子点列はまだかなり離散的であるので、さらにその格子点列を $s-w$ 空間 (VCS) に投影し、B-スプライン曲線で滑らかに近似することにより CFCC を生成する。CFCC が求まれば、同時に動く 2 台のマニピュレータの位置関係がパラメータ s のみにより決まるので、 s に対する λ の値を動的計画法を用いて最適化し、動作時間の短い衝突回避軌道を生成する。

5. 例 題

提案したアルゴリズムを Fig. 7 に示す鉛直平面内を運動する 2 リンク 2 自由度マニピュレータに適用する。2 台のマニピュレータは同一のものとし、その運動方程式は

$$\begin{bmatrix} J_1 + J_2 + 2\beta \cos \theta_2 & J_2 + \beta \cos \theta_2 \\ J_2 + \beta \cos \theta_2 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\beta(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ \beta\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (m_1 + 2m_2)l_1g \sin \theta_1 + m_2l_2g \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2l_2g \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

で与える。ただし、 $J_1 = I_1 + (m_1 + 4m_2)l_1^2$ 、 $J_2 = I_2 + m_2l_2^2$ 、 $\beta = 2m_2l_1l_2$ である。また、 I_1, I_2 はリンク 1、リンク 2 の重心回りの慣性モーメント ($I_1 = 1.25 \times 10^{-2}$ [kg·m²], $I_2 = 4.167 \times 10^{-3}$ [kg·m²]), m_1, m_2 はリンク 1、リンク 2 の質量 ($m_1 = 1.5$ [kg], $m_2 = 1.0$ [kg]), l_1, l_2 はリンク 1、リンク 2 の長さの 1/2 ($l_1 = 0.15$ [m], $l_2 = 0.1$ [m]) である。粘性摩擦の項は簡単のためゼロとする。駆動力の制限と関節角の境界条件を Table 1 に示す。マニピュレータ同士のベース間距離は 0.73 [m] である。関節角 θ^r は

$$\theta^r(s^r) = \theta^r(0) + (\theta^r(t_e^r) - \theta^r(0))s^r \quad (0 \leq s^r \leq 1). \quad (15)$$

Fig. 7 Two manipulators

とする。干渉チェックについては各リンクを円筒形で近似し、円筒の中心線同士の最短距離を計算することにより行う。 $s-w-\lambda$ 空間のメッシュの分割数は $N=20$, $M=40$, $L=40$ とする。Fig. 8に衝突領域と最終的に求めたCFCCを示す。Fig. 9はFig. 8のCFCCに沿って動作時間が短くなるように最適化した λ である。Fig. 10にエンドエフェクタ経路と一連の衝突回避動作を示す。左側がマニピュレータaで右側がマニピュレータbである。Fig. 11に得られた衝突回避軌道の駆動力を示す。なお、この例題の場合の4.3節の探索空間の縮小回数は6回(計7回の探索)であり、計算時間はエンジニアリングワークステーションS-4/1で約7.8時間であった。また、基本的に必要な記憶領域は、 $s-w$ 平面の格子点が衝突領域に含まれているか否かの情報を記憶する大略 $M \times N$ の領域と、動的計画法における $s-w-\lambda$ 空間の格子点の評価値の情報を記憶する大略 $M \times N \times L$ の領域である。

6. おわりに

関節経路が指定される2台のマニピュレータに対して衝突回避軌道を求める方法を提案した。本方法の特徴と

Table 1 Torque constraints and boundary conditions

	Joint 1	Joint 2
$u_{i\max}$ [N·m]	15.0	5.0
$u_{i\min}$ [N·m]	-15.0	-5.0
$\theta_i^*(0)$ [deg]	-30.0	0.0
$\theta_i^*(t_e)$ [deg]	-45.0	-105.0
$\theta_i^b(0)$ [deg]	45.0	105.0
$\theta_i^b(t_e)$ [deg]	30.0	0.0

して、マニピュレータダイナミクスを考慮して衝突回避軌道を計画しているということが挙げられる。また、2台のマニピュレータの相対位置関係を表わすVCS上で軌道計画前にあらかじめ衝突領域を描いているので、大域的軌道計画が可能となっている。さらに、軌道の最適化を動的計画法を用いて行っているため、計算時間の増

Fig. 8 Collision region and CFCC

Fig. 9 Optimized λ

Fig. 10 Collision-free motions of two manipulators

Fig. 11 Driving torques

大の問題はあるが、アルゴリズムが非常に簡単となっている。そして例題において、この方法を2台の2リンクマニピュレータに適用しその有効性を確認することができた。

最後に、3台以上の場合への拡張性に関し、3台のマニピュレータ a, b, c の場合を例にとり若干議論しておく。この場合、最適解を得ようとすれば $s^a-s^b-s^c$ 空間で探索を行わなければならない。しかしこれは動的計画法のいわゆる“次元の呪い”の問題もあり、実行はかなり厄介である。そこで一つの試行法として次のような方法が考えられる。まず、ここで述べた方法により2台 a, b の動きを決定し、この動きをパラメータ s^{ab} で表わす。マニピュレータ c の動きを表わすパラメータを s^c とするとき、 $s^{ab}-s^c$ 平面上で同様な探索を行う方法である。ただし、この方法は a, b の相対的な動きを先に決め、その後 c の動きを決めるもので解の探索領域を

狭くしていることになり、より良い解を見逃す可能性があるし、あるいは実行可能解が存在するにもかかわらずそれを見逃す可能性もある。したがってどの2台を先に選ぶかについての考察なども必要になるであろうし、あるいは可能な選び方全てについて同様な方法を繰り返す、その中で評価の一番良いものを解とするというようなことも必要であろう。

参考文献

- 1) B. H. Lee and C. S. G. Lee, "Collision-Free Motion Planning of Two Robots", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., SMC-17-1, pp. 21-32, 1987.
- 2) P. A. O'Donnell and T. Lozano-Pérez, "Deadlock-Free and Collision-Free Coordination of Two Robot Manipulators", Proc. IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., pp. 484-489, 1989.
- 3) 毛利彰, 圓島信也, 山本元司, "2 台のマニピュレータの衝突回避軌道計画 (関節経路が指定される場合)", 日本機械学会論文集, C 編, 57 巻 538 号, pp. 1985-1990, 1991.
- 4) Y. Shin and Z. Bien, "Collision-Free Trajectory Planning for Two Robot Arms", Robotica, 7-3, pp. 205-212, 1989.
- 5) 山本元司, 圓島信也, 毛利彰, "マニピュレータの近似最適軌道の一生成法", 日本機械学会論文集, C 編, 56 巻 527 号, pp. 1881-1886, 1991.

毛利 彰 (Akira MOHRI)

1941 年 6 月 23 日生。1964 年九州大学工学部生産機械工学科卒業。1969 年同大学院工学研究科博士課程単位取得退学 (生産機械工学専攻)。同年、九州大学工学部講師。助教を経て、1982 年同教授、現在に至る。ロボット工学、制御工学の研究に (日本ロボット学会正会員)

従事。工学博士。

圓島信也

(Shinya MARUSHIMA)

1965 年 10 月 17 日生。1988 年九州大学工学部生産機械工学科卒業。同年、九州大学工学部助手。1992 年 (株) 日立製作所入社。機械研究所勤務、現在に至る。

(日本ロボット学会正会員)

山本元司

(Motoji YAMAMOTO)

1962 年 7 月 10 日生。1985 年九州大学工学部動力機械工学科卒業。1990 年同大学院工学研究科博士課程修了 (生産機械工学専攻)。同年、九州大学工学部講師。1992 年同助教授、現在に至る。ロボット工学の研究に従事。工学博士。

(日本ロボット学会正会員)