マニピュレータの移動障害物自動回避軌道計画法の研究*

新 矢 和 行^{*1}, 齊 藤 春 雄^{*2}Study on Automatic Planning Method of Collision-Free Manipulator
Path among Moving Obstacles

Kazuyuki SHINYA and Haruo SAITO

In recent years, the automatic planning method of the collision-free manipulator path among obstacles is reported in many papers to increase manipulator capability. However, path planning among moving obstacles has been studied in only a few papers, in which some difficulties such as the necessity for assumption of the ideal path or necessity for transformation of real-space coordinates of the obstacles to the joint angle space have made it almost impossible to apply the methods to a multi-DOF manipulator. We propose an algorithm in order to solve these difficulties, while adopting the potential method of fuzzy reasoning. As the result of simulations, this work proved this method effective and that if the information not only the deviation from the target and proximity to the obstacles but also the rate of change of these quantities is known, the planning time of the collision-free path among moving obstacles is shortened.

Key Words: Simulation, Collision-Free Path, Moving Obstacle, Potential Method, Manipulator, Path Planing

1. ま え が き

マニピュレータが障害物に衝突せず、回避しながら始点から終点にいく経路の自動計画研究では、静止障害物を対象としたものがほとんどであり、移動障害物を取扱ったものはまだ少ない。そして、今までの移動障害物の場合の研究ではあらかじめ理想軌道を決定する⁽¹⁾ 必要性や障害物を関節角座標空間に変換する⁽²⁾ 必要性があるなど厳しい難点がある。本研究ではこの難点を解決するために著者が先に静止障害物の場合に用いたファジィ推論に基づくポテンシャル法⁽³⁾ を適用し、マニピュレータとその周囲の環境の状態から得られる情報を基にして、静止、移動障害物を避けながら、初期状態から目標状態に向かう軌道を自動的に見つけたアルゴリズムを提案した。提案したアルゴリズムを二次元空間での2自由度2リンクマニピュレータ、三次元空間での3自由度3リンクマニピュレータに適用したシミュレーション結果より、マニピュレータが移動障害物を困難なく自動回避できることが立証

でき、かつ、評価値に目標との偏差、障害物との近接度およびそれらの増加率を用いると比較的短時間に移動障害物回避経路が得られることがわかった。

2. 障害物回避経路探索方法

マニピュレータと障害物のモデル設定方法、現在点と目標点との偏差、マニピュレータと障害物の近接度計算法、ポテンシャル極小点での探索停止防止のためA*アルゴリズムを用いるなど基本的には先の研究⁽³⁾ と同じである。

本研究では作業空間上での移動障害物の位置、形状、速度がわかっており、またマニピュレータの先端はある単位時間(ここでは1秒間)に関節角座標空間上で何種類かの(ここでは1または2種類)与えられた距離だけ進むことができ、速度はその動きで決まるとする。

一般的には関節角座標空間上で一度に動くことができる距離 pm_i の数 i を N 個だけ与える。図1に二次元で $N=2$, $pm_1=30^\circ$, $pm_2=5^\circ$ の場合の初期状態 M と次の段階の全候補点を示す。候補点は目標方向の点 $(i, 1)$, 回転目標方向の点 $(i, 2)$, $(i, 2')$, 回転方向の点 $(i, 3)$, $(i, 3')$, 回転逆目標方向の点 $(i, 4)$, $(i, 4')$, 逆目標方向の点 $(i, 5)$ ($i=1, 2, \dots, N$) の5種類に分ける。点 $(i, 3)$, $(i, 3')$ は目標点 G を中心とし偏差を

* 原稿受付 平成6年3月24日。

^{*1} 学生員, 信州大学大学院(現: NEC ホームエレクトロニクス(株))。^{*2} 正員, 信州大学工学部(現: 足利工業大学) (〒380 長野市若里500)。

図 1 初期状態における全候補点

半径とする円 Eh と点 M を中心とし、与えられた距離 pm_i を半径とする円 Em との交点とする。 $(i, 2)$ は M , $(i, 1)$, $(i, 3)$ がなす角の半角の位置, $(i, 4)$ は M , $(i, 5)$, $(i, 3)$ がなす角の半角の位置にある点とし, $(i, 2')$, $(i, 4')$ は $(i, 2)$, $(i, 4)$ と対称とする。

探索開始後の候補点の求め方は進んだ経路を戻らないよう、かつ、探索を効率よく短時間で行うために約半分の範囲に限定することとし、目標方向に進んできた後の次の全候補点は $(i, 1)$, $(i, 2)$, $(i, 2')$, $(i, 3)$, $(i, 3')$, 円 Eh 回りに反時計回りで回転目標方向、回転方向、回転逆目標方向に進んできた後の次の全候補点はすべて $(i, 1)$, $(i, 2)$, $(i, 3)$, $(i, 4)$, $(i, 5)$, 時計回りで回転目標方向、回転方向、回転逆目標方向に進んできた後の次の全候補点はすべて $(i, 1)$, $(i, 2')$, $(i, 3')$, $(i, 4')$, $(i, 5)$, 逆目標方向に進んできた後の次の全候補点は $(i, 3)$, $(i, 3')$, $(i, 4)$, $(i, 4')$, $(i, 5)$ とする。

また目標方向に向かう経路を早く見つけるために候補点を作成する順番は目標方向に近い方向を優先し、候補点を作成すると同時にその点の評価値を求める。そして、現在点 M より評価値の低い次の候補点 T を (1) 候補点をすべて求める前に発見したら候補点作成を一時中止し、 MT に沿って干渉チェックを行い、干渉がなければ点 T を次の候補点とする。干渉を発見したら候補点作成を再開し、 M より低い評価値をもつ候補点を再度発見できたらその点を T とし、上記の操作を繰返す。候補点 T を発見できないときは求めた全候補点の中で評価値が最も低い候補点を U とし、(2) MU に沿って干渉チェックを行い、干渉がなけれ

(a) 平面 P

(b) 平面 P での初期状態における全候補点

図 2

ば点 U を候補点とする。干渉を発見したら次に低い評価値をもつ候補点を U とし、この操作を繰返す。点 M と以上のようにして求めた点 T または U を結ぶ線が求める経路となり、その経路に従ってマニピュレータの状態を変化させる。

三次元関節角座標空間の場合には図 2 (a) のように三次元の関節角座標空間に平面 P を張り、その平面で候補点を作成する⁽⁴⁾。平面 P は以下のように決める。

図 2 (a) のように現在の状態を表す点 M から目標状態を表す点 G を通る直線を θ_1' 軸とし、 θ_3 軸から θ_1' 軸への垂線 B と θ_1' 軸を含む平面を平面 P とし、 P 上で点 M を通り、直線 B 方向に θ_2 軸をとり、 θ_1' , θ_2 と右手系をなすように θ_3 軸をとる。そして平面 P 上で θ_3 軸の正方向からみて、図 2 (b) のように探索する。

3. 評価値および干渉チェックの求め方

経路を発見するための評価値を求めるには偏差と近接度から求める方法 A と、偏差、近接度、偏差の増加率、近接度の増加率から求める方法 B の二つの方法を使う。偏差とその増加率は関節角座標空間上、近接度とその増加率は作業空間上で求めるためその大きさはメンバーシップ関数(所属度)で表し、評価値は各ルー

ルで与えられたそれら所属度の線形式から求める。これらのメンバーシップ関数と評価値は先の研究⁽³⁾と類似した形を採用し、その後、シミュレーションを通して修正し、下記のように設定した。なお移動障害物の場合、求める近接度は障害物が静止しているものとして求めた近接度と障害物がある単位時間後(ここでは1秒間後とした)の位置にあるとして求めた近接度

の最小値を用いることにした。

方法 A ではルール 1 からルール 16 を表 1 のように与えた。 w_1, w_2 は図 3 (a), (b) で求められた偏差と近接度の所属度を表す。 $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, \dots, 16)$ は表 2 にこれを示す。

表 2 ルール 1~16 の線形式の係数 a_i, b_i, c_i
(方法 A)

Rule No.	a_i	b_i	c_i	pt_i
Rule 1	-70	-30	100	0~100
Rule 2	-35	15	110	75~125
Rule 3	-105	-45	250	100~250
Rule 4	-245	105	370	125~475
Rule 5	120	-80	230	150~350
Rule 6	120	80	300	300~500
Rule 7	100	-100	550	450~650
Rule 8	100	100	600	600~800
Rule 9	-120	-180	1000	700~1000
Rule 10	-120	180	1020	900~1200
Rule 11	-105	-195	1400	1100~1400
Rule 12	-105	195	1405	1300~1600
Rule 13	90	-210	1710	1500~1800
Rule 14	90	210	1700	1700~2000
Rule 15	90	-210	2110	1900~2200
Rule 16	90	210	2200	2200~2500

表 1 評価値を求めるためのルール 1~16(方法 A)

- Rule 1: $D\theta$ is $D\theta_s$ and D_s is D_{sb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_1 = a_1 w_1 + b_1 w_2 + c_1$
 Rule 2: $D\theta$ is $D\theta_s$ and D_s is D_{ms}
 $\rightarrow pt$ is $pt_2 = a_2 w_1 + b_2 w_2 + c_2$
 Rule 3: $D\theta$ is $D\theta_s$ and D_s is D_{mb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_3 = a_3 w_1 + b_3 w_2 + c_3$
 Rule 4: $D\theta$ is $D\theta_s$ and D_s is D_b
 $\rightarrow pt$ is $pt_4 = a_4 w_1 + b_4 w_2 + c_4$
 Rule 5: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and D_s is D_{sb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_5 = a_5 w_1 + b_5 w_2 + c_5$
 Rule 6: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and D_s is D_{ms}
 $\rightarrow pt$ is $pt_6 = a_6 w_1 + b_6 w_2 + c_6$
 Rule 7: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and D_s is D_{mb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_7 = a_7 w_1 + b_7 w_2 + c_7$
 Rule 8: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and D_s is D_b
 $\rightarrow pt$ is $pt_8 = a_8 w_1 + b_8 w_2 + c_8$
 Rule 9: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and D_s is D_{sb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_9 = a_9 w_1 + b_9 w_2 + c_9$
 Rule 10: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and D_s is D_{ms}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{10} = a_{10} w_1 + b_{10} w_2 + c_{10}$
 Rule 11: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and D_s is D_{mb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{11} = a_{11} w_1 + b_{11} w_2 + c_{11}$
 Rule 12: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and D_s is D_b
 $\rightarrow pt$ is $pt_{12} = a_{12} w_1 + b_{12} w_2 + c_{12}$
 Rule 13: $D\theta$ is $D\theta_b$ and D_s is D_{sb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{13} = a_{13} w_1 + b_{13} w_2 + c_{13}$
 Rule 14: $D\theta$ is $D\theta_b$ and D_s is D_{ms}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{14} = a_{14} w_1 + b_{14} w_2 + c_{14}$
 Rule 15: $D\theta$ is $D\theta_b$ and D_s is D_{mb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{15} = a_{15} w_1 + b_{15} w_2 + c_{15}$
 Rule 16: $D\theta$ is $D\theta_b$ and D_s is D_b
 $\rightarrow pt$ is $pt_{16} = a_{16} w_1 + b_{16} w_2 + c_{16}$

(a) 偏差のメンバーシップ関数(方法 A)

(b) 近接度のメンバーシップ関数(方法 A)

図 3

表 3 評価値を求めるためのルール 1~21(方法 B)

- Rule 1: $D\theta$ is $D\theta_s$ and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_1 = d_1 w_1 + e_1 w_2 + f_1$
 Rule 2: $D\theta$ is $D\theta_s$ and D_s' is D_{sb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_2 = d_2 w_1 + e_2 w_2 + f_2$
 Rule 3: $D\theta$ is $D\theta_s$ and D_s' is D_{ms}
 $\rightarrow pt$ is $pt_3 = d_3 w_1 + e_3 w_2 + f_3$
 Rule 4: $D\theta$ is $D\theta_s$
 $\rightarrow pt$ is $pt_4 = d_4 w_1 + f_4$
 Rule 5: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_5 = d_5 w_1 + e_5 w_2 + f_5$
 Rule 6: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_6 = d_6 w_1 + e_6 w_2 + f_6$
 Rule 7: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_7 = d_7 w_1 + e_7 w_2 + f_7$
 Rule 8: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and D_s' is D_{sb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_8 = d_8 w_1 + e_8 w_2 + f_8$
 Rule 9: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$ and D_s' is D_{ms}
 $\rightarrow pt$ is $pt_9 = d_9 w_1 + e_9 w_2 + f_9$
 Rule 10: $D\theta$ is $D\theta_{ms}$
 $\rightarrow pt$ is $pt_{10} = d_{10} w_1 + f_{10}$
 Rule 11: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_{11} = d_{11} w_1 + e_{11} w_2 + f_{11}$
 Rule 12: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_{12} = d_{12} w_1 + e_{12} w_2 + f_{12}$
 Rule 13: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_{13} = d_{13} w_1 + e_{13} w_2 + f_{13}$
 Rule 14: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and D_s' is D_{sb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{14} = d_{14} w_1 + e_{14} w_2 + f_{14}$
 Rule 15: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$ and D_s' is D_{ms}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{15} = d_{15} w_1 + e_{15} w_2 + f_{15}$
 Rule 16: $D\theta$ is $D\theta_{mb}$
 $\rightarrow pt$ is $pt_{16} = d_{16} w_1 + f_{16}$
 Rule 17: $D\theta$ is $D\theta_b$ and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_{17} = d_{17} w_1 + e_{17} w_2 + f_{17}$
 Rule 18: $D\theta$ is $D\theta_b$ and D_s' is D_{sb}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{18} = d_{18} w_1 + e_{18} w_2 + f_{18}$
 Rule 19: $D\theta$ is $D\theta_b$ and D_s' is D_{ms}
 $\rightarrow pt$ is $pt_{19} = d_{19} w_1 + e_{19} w_2 + f_{19}$
 Rule 20: $D\theta$ is $D\theta_b$
 $\rightarrow pt$ is $pt_{20} = d_{20} w_1 + f_{20}$
 Rule 21: D_s is D_{sb} and $D\theta'$ is $D\theta'$
 $\rightarrow pt$ is $pt_{21} = d_{21} w_2 + e_{21} w_4 + f_{21}$

複数のルールから評価値 pt_i は複数個得られるため式(1)~(3)を用いて一つにまとめ最終的な評価値 PT を求める。

$$PT = \left(\sum_{i=1}^{16} y_i \times pt_i \right) / \left(\sum_{i=1}^{16} y_i \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$pt_i = a_i w_1 + b_i w_2 + c_i \dots\dots\dots (2)$$

$$y_i = w_1 \times w_2 \dots\dots\dots (3)$$

方法 B は偏差と近接度とそれらの増加率から求めるが、偏差の増加率とは(次の候補である状態の偏差) - (現在の偏差)、近接度の増加率とは(次の候補である状態の近接度) - (現在の近接度)となる。よって偏差の増加率が負になれば目標状態に近づくので評価値

(a) 偏差のメンバーシップ関数(方法 B)

(b) 近接度のメンバーシップ関数(方法 B)

(c) 偏差の増加率のメンバーシップ関数(方法 B)

(d) 近接度の増加率のメンバーシップ関数(方法 B)

図 4

は小さく、正になれば遠くなるので評価値は大きくする。また、近接度の増加率が負で小さいほど障害物に近づくので評価値は大きくする。方法 B ではルール数は近接度の増加率は負のときのみ注目するなどにして

表 4 ルール 1~21 の線形式の係数 d_i, e_i, f_i (方法 B)

Rule No.	d_i	e_i	f_i	pt_i
Rule 1	-70	-30	100	0 ~ 100
Rule 2	-70	-30	200	100 ~ 200
Rule 3	-70	30	270	200 ~ 300
Rule 4	-100	0	400	300 ~ 400
Rule 5	50	-50	450	400 ~ 500
Rule 6	50	50	500	500 ~ 600
Rule 7	50	-50	650	600 ~ 700
Rule 8	50	-50	750	700 ~ 800
Rule 9	50	50	800	800 ~ 900
Rule 10	100	0	900	900 ~ 1000
Rule 11	-50	-50	1100	1000 ~ 1100
Rule 12	-50	50	1150	1100 ~ 1200
Rule 13	-50	-50	1300	1200 ~ 1300
Rule 14	-50	-50	1400	1300 ~ 1400
Rule 15	-50	50	1450	1400 ~ 1500
Rule 16	-100	0	1600	1500 ~ 1600
Rule 17	50	-50	1650	1600 ~ 1700
Rule 18	50	-50	1750	1700 ~ 1800
Rule 19	50	50	1800	1800 ~ 1900
Rule 20	100	0	1900	1900 ~ 2000
Rule 21	250	250	2500	2500 ~ 3000

表 5 シミュレーションの条件

	pm_i	Method
Fig. 6 (a)	30°, 5°	B
Fig. 6 (b)	5°	B
Fig. 6 (c)	30°, 5°	A
Fig. 6 (d)	5°	A

Start: S (0°, 90°, 90°)

Goal: G (90°, 90°, 0°)

Initial position of obstacle

(0, 1000, 1000)

Velocity of obstacle (50, 0, 0)

Radius of obstacle 500

図 5 シミュレーションに使ったモデル

表3のようにルール数を21個にした。このときの所属度 $w_1 \sim w_4$ 、線形式の係数 d_i , e_i , f_i を図4(a)~(d), 表4に示す。最終的評価値 PT は式(1)~(3)に準じて算出する。なお干渉チェック法は文献

(3)とまったく同様の方法で行う。

4. 適用例

二次元空間の2自由度2リンクマニピュレータには静止障害物のみ、移動障害物のみおのの三つのモデルに対し、また、三次元空間の3自由度3リンクマニピュレータには静止障害物のみ、移動障害物のみの場合

図 6

合四つのモデルに対してシミュレーションを行った。

また評価値の求め方は方法 A と方法 B, 関節角空間上で一度に動くことができる距離は 5° と 30° のいずれかをとれる場合と 5° のみの場合の計 4 方法のもとでシミュレーションを行った。

ここでは図 5 に示す各アーム長 1000 [mm] の 3 自由度 3 リンクマニピュレータの表 5 を条件とするシミュレーション結果のみを図 6 (a)～(d) に示す。図 6 中の数字は経過時間を示す。

5. む す び

障害物の状態を関節角座標空間に変換する必要性がない移動障害物自動回避軌道計画アルゴリズムを提案し、シミュレーション結果よりその有効性を確認した。マニピュレータの関節の数が多いときは障害物の状態を関節角座標空間に変換するのが難しいか不可能になるが、本研究のアルゴリズムではそのような変換は必要なく、また、あらかじめ理想軌道を決めてやるような必要もない。

図 6 (a) と (c) との比較, 図 6 (b) と (d) との比較から pm_i が共通なとき方法 B を使うほうが移動障害物回避時間が短いことがわかる。

2 自由度 2 リンクマニピュレータのシミュレーション結果は 3 自由度 3 リンクマニピュレータのものとは比べて評価値の求め方が違う場合の回避時間の差は小さかった。これは三次元空間のマニピュレータでは移動

障害物の避け方は移動障害物の進行方向およびその上下左右に空間的に広く選べるが、二次元空間のマニピュレータでは移動障害物の避け方は移動障害物の進行方向および左右の平面内に限定されるからと思われる。よって移動障害物回避の場合にはあらかじめ三次元空間と限定するのがよいと考えられる。図 6 と他のモデルのシミュレーション結果から方法 B を使用するものは方法 A を使用するものと比べて回避に要する時間が少なく回避動作が小さいことがわかった。これは評価値を求めるのに増加率を使うことは動的危険度も考慮することとなるので、移動障害物が接近するならば回避中心、遠ざかるなら目標状態に向かうことが中心となるからと思われる。

今後は本研究を 3 自由度以上のマニピュレータの障害物自動回避軌道計画に適用する具体的方法と関節角座標空間上に一度に動くことができる距離と障害物の速度の二つの情報から適切な評価値を求めるメンバーシップ関数のより最適な設定を行える方法の研究が課題となる。

文 献

- (1) 馬場・神前, 計測自動制御学会第 28 回学術講演会予稿集, (1989), 811-813.
- (2) 原・長田, 日本ロボット学会誌, **11**-2(1993), 255-262.
- (3) 齊藤・竹前・土本・神谷, 機論, **58**-546, C(1992), 506-511.
- (4) 渡辺・田野・登尾, 第 9 回日本ロボット学会学術講演会論文集, (1991), 521-524.