

ジョイント・マップを用いたマニピュレータの 衝突回避経路の生成

河原崎 徳之*・長田 正**

Generation of Collision-free Path of a
Manipulator by Means of Joint-map

Noriyuki KAWARAZAKI and Tadashi NAGATA

Abstract

This paper presents a new method for making paths of manipulator among known obstacles automatically. At first, we propose the Joint-map (J-map) which is a kind of configuration space map developed to describe collision regions with polygons. Calculating the trajectory that avoids these polygons and reaches a goal in this map is correspond to planning a collision-free path in workspace. Secondary a collision-free path is calculated in this map by using a new method named Concentric circle potential method. The main feature of this method is to be able to avoid the deadlock problem in the traditional potential method, because of using a potential function in global aspect. Finally the effectiveness of the method is clarified by simulation.

マニピュレータの動作計画において、障害物回避を含む経路生成問題の解決は必要不可欠である。環境に関する情報と目標位置が与えられた時、目標に至る経路が自動的に算出されその経路に沿って動作させることが可能になれば、マニピュレータによる作業効率が向上しオペレータの負担も軽減される。

このような障害物回避経路生成問題に対する解法は近年数多く提案されてきている。対象物が障害物と衝突せずに移動できる自由空間を陽に記述できれば、その空間内で目標位置に到達する経路を算出することは比較的容易になる。2リンクマニピュレータの自由空間記述において、障害物を拡大することでマニピュレータを線分と見なすという試み¹⁾がなされたが、リンク数の増加に対応できなかった。さらに、自由空間を一般化円筒で表現する方法²⁾では、障害物を構成する辺の対によって自由空間を構成しているが、これを一般的な多関節型マニピュレータに適用するのは困難である。また、移動対象物の動作空間を一般性を有す

るコンフィグレーション空間として陽に記述し、その後グラフ探索法等により経路を求める方法^{3~6)}は著名である。コンフィグレーション空間は、移動体の位置と姿勢を表すパラメータ空間であり、多関節型マニピュレータの場合には関節角度空間となる。コンフィグレーション空間は、マニピュレータの関節角と位置・姿勢の関係を明確にできるので経路生成に便利であるが、一方、マニピュレータの自由度の増加とともに自由空間の情報量が膨大になるという問題が起こる。そのためコンフィグレーション空間の次元を下げる工夫が必要となり、マニピュレータの機構に着目し、アームとハンドの部分に分けることで自由空間を効率良く算出する方法⁷⁾が提案された。しかし、これはマニピュレータの構造に強く依存しており、どの型のマニピュレータにも適用可能なものではない。

一方、作業座標系において目標位置の引力、障害物からの斥力からなる仮想的なポテンシャルを計算し、この値を用いて局所的に最適な経路を求める手法^{8,9)}も提案されている。しかし、ポテンシャルを用いる場合には、引力と斥力が釣り合いデッドロックを起し解が求まらない可能性があり、この手法の大きな欠点

平成3年9月5日受理

* 機械システム工学科

** 九州大学工学部

となっている。

本論文は、周囲の障害物データを既知とした上で、障害物を回避し目標に至る経路の自動生成を関節座標系上で行うための新しい手法を提案する。関節座標系上で障害物領域を記述すると一般に複雑な形状になるが、これを多角形で近似し、ジョイント・マップ (J・マップ)¹¹⁾ と呼ぶことにする。'コンフィグレーション空間法で問題となる自由空間の情報量の増加に対処するため、多次元となる自由空間を基本的に2次元座標系から構成し、このJ・マップを基に経路を求めていく。従って、動作領域の大きいアーム部分の経路を求め、次にハンド部分が衝突する可能性のある領域を隘路として定義し、そこを通過するハンド姿勢を別途決定する。なお、アーム、ハンド両経路ともJ・マップを用いる同一の方法により経路を算出している。

J・マップ上ではマニピュレータの形状が一点で表現されるため、マニピュレータの経路生成問題は点経路生成問題に帰着する。そこで、J・マップ全体にポテンシャル場を設定し、始点から目標点に至る点経路を同心円ポテンシャル法により算出する。この方法は、ポテンシャルを評価値として大局的に目標点に向かう経路を求めているため、従来のポテンシャル法の欠点とされている停留問題を避けることができるという長所を有している。従来のコンフィグレーション空間を用いる経路生成法では、グラフ探索等により目標に至る自由空間セルの列を求めていた。従って、障害物に近接したものとそうでないものの区別がなく、自由空間セルであれば同一に取り扱われていた。そこで、ここではコンフィグレーション空間での経路生成に際して、自由空間というだけでなく充分安全な経路であるという配慮により、ポテンシャル値を評価する手法をとっている。以下、2章でJ・マップ、3章で同心円ポテンシャル法について述べ、最後に4章でパソコンによるシミュレーション例を示す。

2. 障害物領域の表現

2.1 ジョイント・マップによる記述

マニピュレータが障害物と衝突する障害物領域をマニピュレータの関節座標系上で記述する。この場合、マニピュレータの自由度だけ次元が必要となるため、次元を減らす何らかの工夫をしなければならない。既に知られている手法⁷⁾と同様に、マニピュレータをアームとハンド部分に分けて考える。従って、一般的

な6自由度マニピュレータについても、アーム、ハンド各々3自由度の障害物領域表現が行えれば良い。ここでは、3次元関節座標系で障害物領域を近似的に表現したJ・マップを提案し、このマップを用いて経路を算出する。

Fig. 1(a)に示すようにマニピュレータが2関節リンクの場合、第1関節角度 θ_1 をある値に固定すれば第2関節角度 θ_2 による衝突範囲は幾何学的に求めることができ、2次元関節座標系 $\theta_1-\theta_2$ 上で線分として表現される。そこで、第1関節をあるきざみ幅で量子化し、その各々の値に対する第2関節の衝突角度範囲を求め、これを関節座標系上で表し、この衝突領域を多角形で近似することを考える。近似の方法は、以下に示すように各衝突範囲の端点がある半径 r の円に拡大し、次の処理手順により多角形を構成する。

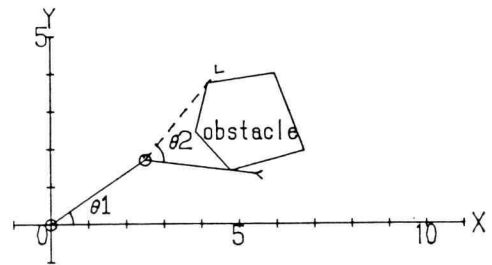


Fig. 1. (a) 2-jointed manipulator

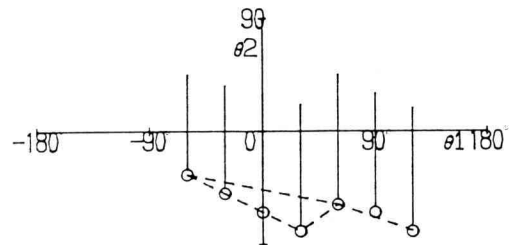


Fig. 1. (b) Approximate polygon

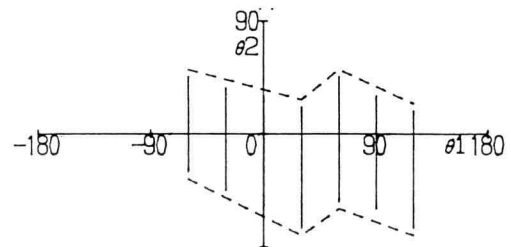


Fig. 1. (c) Joint map

(多角形近似の手順)

- (I) 各線分の端点に接する小円を描く。
- (II) 全ての線分の下端点につき、一番左の線分の小円の中心を始点として以下の処理を行う。
- (III) i 番目の小円の中心から、 k 番目の小円の中心 $i+k$ を終点として直線を引く。(初期値 $i=1, k=2$)
- (IV) その直線が間にある全ての小円と交差すれば、間にある端点は同一直線上にあるとして、一つ右の点 $i+k+1$ につき (III) を繰り返す。(端点で終了)
- (V) 間の小円が1つでも交差しなければ、点 $i+k-1$ を近似多角形の頂点とし、この点を始点に (III) を繰り返す。(端点で終了)
- (VI) 各線分の上端点についても (II) から (V) を行う。

上記の方法による近似の様子を Fig. 1(b) に示す。この近似により作られる多角形が J・マップであり Fig. 1(c) に示される。J・マップは障害物との真の衝突領域を内包するものとなっている。

また、3自由度マニピュレータの場合は、第1関節のある値に対して J・マップが1枚作られる。従って、Fig. 2のように第1関節を量子化した枚数だけマップができる。

2.2 隘路の定義

一般的にマニピュレータのアーム部分は、ハンド部分に比べて掃引領域が大きい。そのためアームが衝突

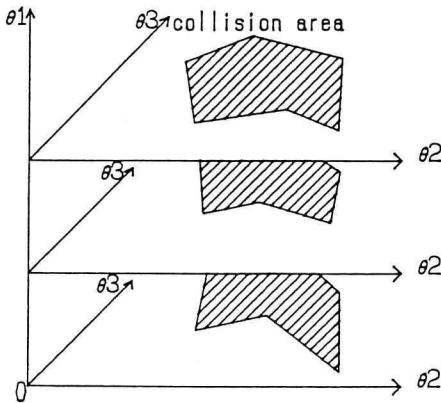


Fig. 2. J-map for 3-jointed manipulator

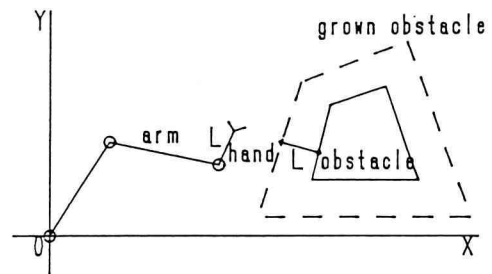


Fig. 3. (a) Grown obstacle

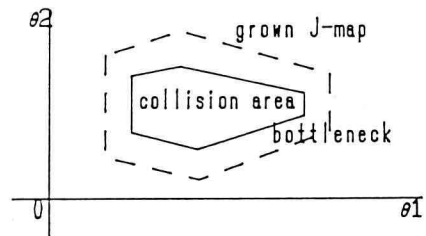


Fig. 3. (b) Bottleneck of J-map

を生じない経路を求め、次にその経路中でハンドが衝突する可能性のある場合にハンド姿勢を考慮することにする。まず、ハンド部分を除いたアーム部分についての J・マップを求める。次に、Fig. 3 に示すようにハンドの最大可動領域で障害物を拡大し、その拡大障害物についてアームによる J・マップ (拡大 J・マップと呼ぶ) を求める。ここで、J・マップと拡大 J・マップの障害物領域の差を隘路と定義する。隘路は、ハンドが障害物と衝突する可能性のある領域である。J・マップより算出したアーム経路に対し、隘路を通過する部分について別途ハンド姿勢を決定し、隘路をすり抜けることにする。ハンド部分による拡大障害物は、2次元の場合はハンド長を半径とする円を、3次元の場合は、ハンド長を半径とする球を障害物に沿って移動させたときの円及び球の中心の軌跡として作成される。

3. J・マップを用いた経路生成

3.1 ポテンシャル場の設定

関節座標系上では、マニピュレータの形状は1点として表現される。従って、J・マップ上で初期形状 S から目標形状 G に至る点経路を求めれば、マニピュレータの各関節の制御量を定めることができる。その際、経路が障害物近似多角形と交差ししないことは当然である

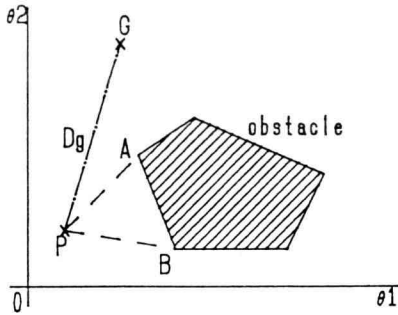


Fig. 4. Oval potential

が、さらに障害物からある程度離れ、かつ目標位置に最短に近づくものであることが望ましい。そこで、J・マップ上にポテンシャル場を設定し、これにより目標に至る点経路を算出する。ポテンシャルは、障害物からの斥力と目標に向かう引力の両方を考慮しているため、これに基づく経路は上記の要求を満足する。ここで用いるポテンシャルは、楕円ポテンシャル¹⁰⁾である。障害物辺 AB、目標点 G に対する 1 点 P の楕円ポテンシャル値は以下の式で計算される (Fig. 4 に示す)。

$$\begin{aligned} \text{目標位置への引力} \quad \Phi_g &= -K_g/D_g & (1) \\ \text{障害物辺からの斥力} \quad \Phi_p &= K_p/D_p^2 & (2) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} K_g, K_p: & \text{重み係数} \\ D_g &= PG \\ D_p &= \overline{PA} + \overline{PB} - \overline{AB} \end{aligned}$$

である。

J・マップでは、障害物領域が多角形で表現されるため、多角形が凹となることも考えられる。そこで、凹部に入り込まないように、1 点 P から両端点が見視である障害物辺各々について (2) 式の斥力を計算し合計する。従って、1 点 P のポテンシャル値は (3) 式となる。

$$\Phi = \Phi_g + \sum_{i=1}^N \Phi_{pi} \quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} N: & \text{見視である辺の数} \\ \Phi_{pi}: & i \text{ 番目辺に対する斥力} \end{aligned}$$

とする。

また、上記の重み係数 K_p が小さすぎると障害物に近くなり、同時に経路が隘路に含まれる可能性が大きくなる。

3.2 同心円ポテンシャル法

ポテンシャル法を用いた経路生成法は、これまで数多く提案されているが、いずれもポテンシャルを局所的に用いているためにポテンシャルの極小点に迷い込む停留の問題が未解決のままである。この停留問題を避けるため、本研究では J・マップ上で同心円ポテンシャル法を用いている。同心円ポテンシャル法に基づく経路生成のアルゴリズムを以下に示し、具体例を Fig. 5 に示す。

- ① J・マップ上で始点 S を中心に目標点 G に至るまで一定の間隔で同心円を描く。
- ② 各同心円を 72 等分 (5° きざみ) し、各点の楕円ポテンシャル値を計算する。
- ③ 1 つの同心円で障害物領域間を 1 区間とし、その中でポテンシャル値が最小となる位置を経路候補点とする。
- ④ 隣接する同心円中の各候補点間の可視性を調べ、可視である点を連結し経路とする。
- ⑤ 経路が得られない場合は、連結されない 2 点を各々始点、目標点として上記の手順を繰り返す。
- ⑥ ある回数くり返しても解が存在しない場合は、打ち切って経路が存在しないものとする。

本手法はポテンシャル法という名称をつけてはいるが、本質は可視性を考慮した点の連結であるため、引力、斥力の釣り合いによる停留状態には陥らない。ポテンシャル値は経路候補点算出のための評価値として

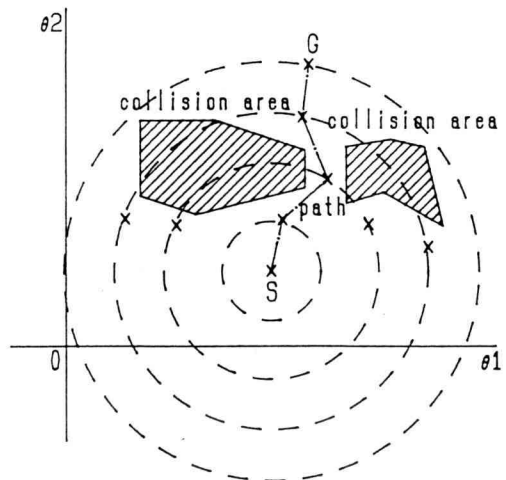


Fig. 5. Concentric circle potential method

用いているに過ぎないからである。また、障害物領域間で経路候補点を1つ求めているので、一般に経路が複数個得られる。例えば、1つの障害物領域については、左廻り、右廻りの2経路が算出される。ただし、経路が1つも得られない場合は、経路中の可視でない2点間を新たな始点、目標点として本手法を再帰的に用いる。本手法は、経路解を求めるための発見的手法といえることができ、同心円の分割数を細かくすれば経路発見の可能性は高くなるが、反面、計算量が多くなる。

3.3 隘路通過のハンド姿勢

アーム経路算出の際ポテンシャル値を評価したことにより障害物に近接しない経路をとっているものの、それでもアーム経路の中で隘路を通過する部分については、ハンドの姿勢を拘束しなければならない。

隘路を通過する際のハンド姿勢は、アーム経路算出と同じようにハンドのJ・マップを作成し、それに同心円ポテンシャル法を適用して求める。ハンドJ・マップは横軸にアーム経路番号、縦軸にハンドの関節角度値をとる。アーム経路番号とは、アーム経路の中で隘路を通過する部分の何点かに番号を付けたものである。従って、1つのアーム経路番号がアームのある形状に対応する。アームの形状が決定していれば、その状態でハンドが障害物と衝突する角度は幾何学的に求められる。つまり、アームの先端即ちハンドの回転中心 R_H が決っていれば、ハンド長 L を半径とする円と障害物の交差 (Fig. 6) より衝突角度範囲を算出できる。

ハンドのJ・マップ作成後は、アーム経路算出と同様に同心円ポテンシャル法をマップ上に適用しハンド姿勢を求める。また、3次元マニピュレータの場合は、1つのアーム経路番号についてハンド関節角度を2軸とするハンドJ・マップが1枚作られる。従って、アーム経路番号の数だけハンドJ・マップが作成される。アーム

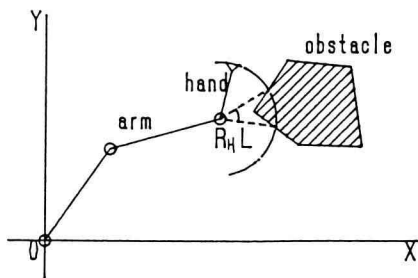


Fig. 6. Hand collision

ム経路、ハンド姿勢ともにJ・マップが異なる以外は、同一の手法を用いている。また、隘路中ではアームの動作に伴いハンドの姿勢変更を行い、隘路をすり抜けることが可能となる。

4. シミュレーション例

これまでに提案した手法の有効性を確認するため、パソコン (NEC PC-9801VM21) 上でシミュレーション実験を行った。設定した例題は、次の2つである。

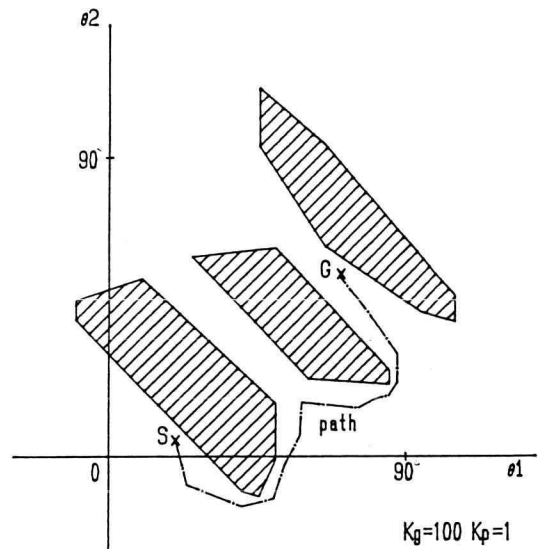


Fig. 7. (a) 2-dimensional J-map

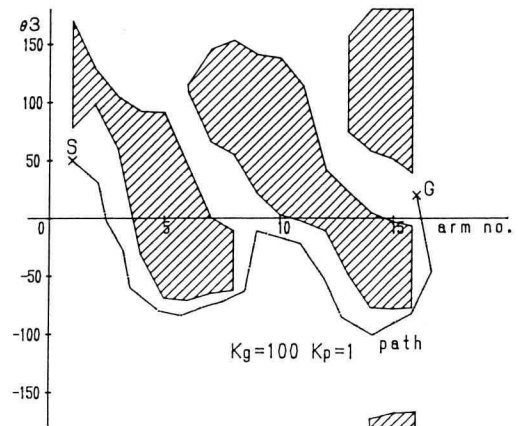


Fig. 7. (b) Simulation of J-map for hand

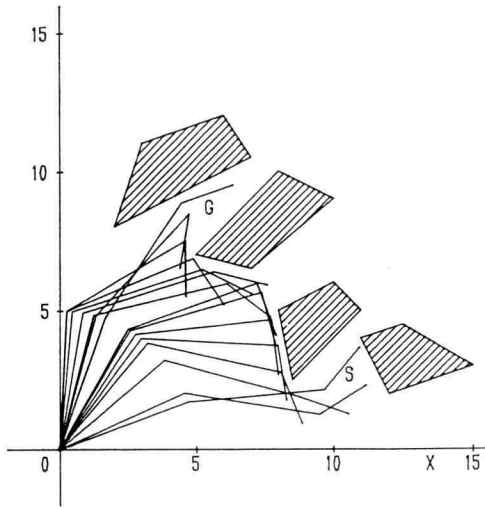


Fig. 8. Simulation of 2-jointed manipulator

D) 2次元3自由度マニピュレータ

アーム2自由度, ハンド1自由度に分割し, アーム経路, 隘路通過のハンド姿勢の順で算出する。アーム, ハンド両方共にJ・マップを作成し, 同心円ポテンシャル法により経路を求めた。Fig. 7(a)がアームのJ・マップ, Fig. 7(b)がハンドJ・マップである。この経路をマニピュレータの軌跡として表示したものがFig. 8である。この場合マニピュレータは, 厚みのないリン

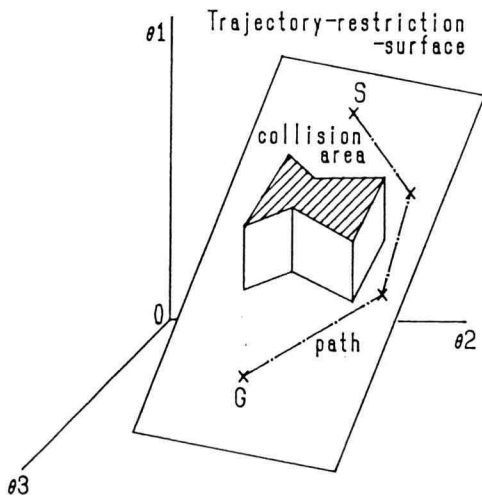


Fig. 9. Conception of trajectory-restriction-surface

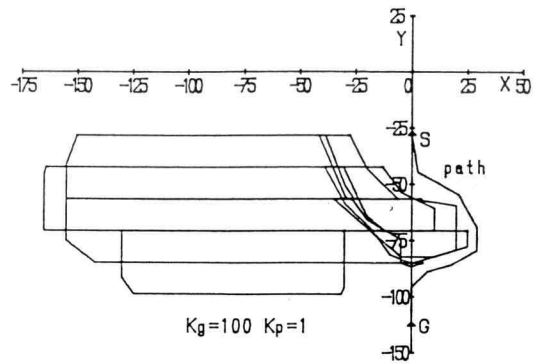


Fig. 10. Simulation of trajectory-restriction-surface

クとしている。

II) 3次元3自由度マニピュレータ

3次元環境における3関節のマニピュレータの場合, 関節座標系上で障害物領域は3次元で表現される。3次元関節座標系上でこの障害物領域物体を回避し, 目標に至る点経路を求めることは簡単ではない。そこで, 先ず経路が必ず乗っていなければならない面を設定し, その後この平面上で経路を生成する。この面を軌道拘束面¹²⁾と呼ぶ(Fig. 9)。具体的には, 各J・マップの障害物領域を設定した軌道拘束面上に射影する。軌道拘束面を設定することによって, 3次元の経路生成問題が2次元平面上での経路生成問題に帰着される。そこで, この平面に同心円ポテンシャル法を適用し, 軌道拘束面座標系で得られた経路を再び関節座標系での値に変換し直して最終的な解とする。

シミュレーションでは, ハンドは固定したものととして, アーム3自由度をもつマニピュレータについて, アーチの中にアームを入れる動作を行わせた。J・マップの合成による軌道拘束面をFig. 10に示す。Fig. 10より軌道拘束面が各J・マップの障害物領域を切り取り合成したものであることがわかる。算出した経路に基づくマニピュレータの動作の様子をFig. 11に示す。

5. おわりに

多関節型マニピュレータの障害物回避を伴う経路生成問題を解くためにジョイント・マップを提案し, これを用いた経路生成を示した。また, パソコン上でのシミュレーションにより, その有効性を確認した。

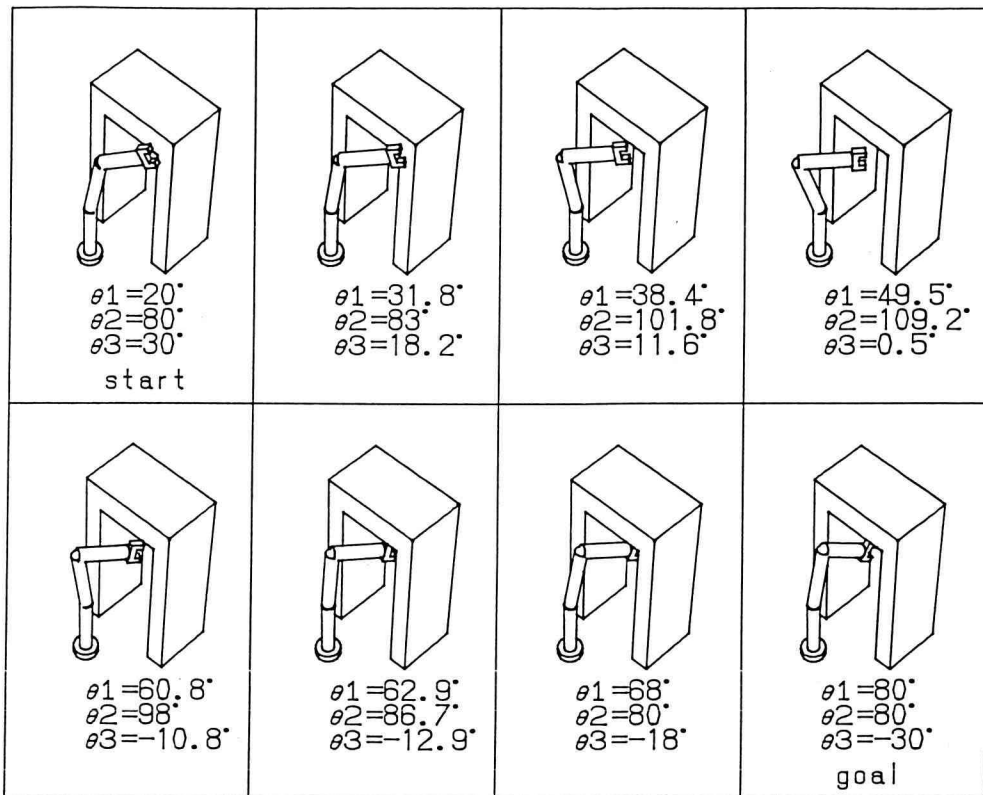


Fig. 11. Simulation of 3-dimensional manipulator

マニピュレータは、アームとハンドの部分に分割しハンドの衝突する可能性のある領域を隘路と定義し、アーム経路算出後、隘路を通るハンド姿勢を決定する階層的な手法をとった。また、一般的な3次元マニピュレータについては、軌道拘束面を設定することで2次元の経路生成問題に帰着させた。本手法では、全ての自由空間を2次元座標系で構成したことにより、経路生成の問題を単純化したことが特徴である。

2次元の点経路生成に関しては、同心円ポテンシャル法を適用した。この同心円ポテンシャル法は、2次元座標系であれば障害物回避のための点経路を算出することができる一般的な手法であり、多関節型マニピュレータについて最適ではないが障害物を回避しつつ目標に至る経路を求めることができる。ここでポテンシャル値を用いたことにより、この経路は障害物と目標に対する両方の距離を考慮した妥当なものとなる。従来のコンフィグレーション法にポテンシャル法を併用したという点から、本手法は評価できると考える。

現在は、軌道拘束面を1つ決定した後にその面上で経路を求めている。より複雑な経路に対応させるためには、軌道拘束面自体を途中で切り替えることも必要となろう。軌道拘束面について、このことが今後の課題として残されている。

参考文献

- 1) S.M. Udupa; "Collision Detection and Avoidance in Computer Controlled Manipulators" 5th Int Joint Conf. on Artificial Intelligence. pp. 737-748 (1977)
- 2) R.A. Brooks "Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space" IEEE Trans. SMC. vol. 13, No. 3, pp. 190-197 (1983)
- 3) T. Lozano-Perez; "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements" IEEE Trans. SMC. vol. 11, No. 10, pp. 681-698 (1981)

- 4) T. Lozano-Perez: "Spatial Planning: A Configuration Space Approach" IEEE Trans. Computer vol. 32, No. 2, pp. 108-120 (1983)
- 5) R.A. Brooks and T. Lozano-Perez: "A Sub-division Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation" IEEE Trans. SMC. vol. 15, No. 2, pp. 224-233 (1985)
- 6) T. Lozano-Perez: "A Simple Motion Planning Algorithm for General Robot Manipulators" Proc. AAAI, pp. 626-631 (1986)
- 7) 長谷川: "自由空間分類表現法によるマニピュレータの衝突回避経路計画" 計測自動制御学会論文集 Vol. 22, No. 6, pp. 616-622 (1986)
- 8) L.A. Loeff and A.H. Soni "An Algorithm for Computer Guidance of a Manipulator in Between Obstacles" Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry vol. 97-3, pp. 836-842 (1975)
- 9) O. Khatib "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots" Int. J. Robotics Reseach, vol. 5, No. 1, pp. 90-98 (1986)
- 10) 奥富, 森: "ポテンシャル場を用いたロボットの動作決定" 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 226-232 (1983)
- 11) 河原崎, 長田: "関節座標表現を用いたマニピュレータの衝突回避経路探索の一手法" 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 497-498 (1987)
- 12) 河原崎, 長田: "軌道拘束面を用いたマニピュレータの経路生成", 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 777-778 (1989)