ロボットの障害物回避への局所的な コンフィギュレーション空間の利用*

平 岡 弘 之**

Collision Avoidance of Manipulators Using Local Configuration Space Representing Contact State

Hiroyuki HIRAOKA

A method is proposed for planning motion path of manipulators avoiding collisions with obstacles. Though configuration space (or c-space) of manipulator is widely used for planning collision-free path of manipulators, it does not respond adequately to the geometric configuration of the collision, which brings non-uniform precision of the path and increase of its calculation time. To resolve this problem, firstly, an approach is adopted to separate global path planning which generates candidate paths in the c-space of manipulator, and local path planning which generates local paths avoiding the collision. Secondly, a method for planning the local path is proposed; It generates a path keeping contact with obstacle surface by utilizing local configuration space, called cc-space, which represents the geometric configuration composed from the link of manipulator and the face of obstacle in contact. Based on this strategy, a computer program is developed and a path is generated successfully for PUMA type manipulator using the program.

Key words: off-line robot programming, collision avoidance, configuration space, contact state

1. 緒 言

作業空間内の障害物を避けて初期姿勢から最終姿勢へ至る多関節マニピュレータの運動経路を生成する機能は、ロボットのオフラインプログラミングを実現する上での重要な要素である。この問題に対して、作業空間に仮想のポテンシャル場を設定し、それに従って経路を作る方法¹⁾、数式の処理によって代数的に問題を解く方法²⁾、空間を均質なセルに分割し障害物を含まない自由空間のセルを探し出し、それをたどって経路を作る方法³⁾、などの手法が提案されている。

これらの手法で問題の表現のためのツールとして多く用いられているのがコンフィギュレーション空間⁴⁾である。コンフィギュレーション空間は、マニピュレータの各関節の変数を軸として張られた空間であり、この空間の中の1点はマニピュレータのひとつの姿勢の状態を表現している。このため、ある姿勢でのマニピュレータと障害物との干渉の情報をこの空間上の対応する点の属性として与えることで、立体形状と機構のからんだ経路計画問題がこの空間の中の探索問題に変換され、障害物回避経路の導出が容易になる。たとえば、自由空間の探索による手法³⁾では、コンフィギュレーション空間で初期位置から最終位置までの直線経路を作り、障害物と干渉する点から波紋を広げるようにしてコンフィギュレーション空間内の非干渉領域(自由空間)を探索していき、最終位置あるいはそこへ至る経路上まで自由空間を拡大していく。この自由空間内であれば干渉は起こらないのでその中に適当な経路を生成する。

コンフィギュレーション空間を利用する際の問題の一つは、計算量である。たとえば、各軸変数の値のとりうる範囲をそれぞれ10分割したとしても6自由度のマニピュレータに対してはコンフィギュレーション空間に 10^6 の格子点が存在することになり、探索の対象となる可能性のある領域はかなり大きい。このため、干渉計算など各点での必要な処理を考慮に入れると

大きな計算量が必要になる。

これに対して、自由空間を広げる時にヒューリスティックスを用いたり、記憶領域を効率的に使ったりするなどの提案がされている⁵⁾。また探索を数値的に実行するのではなく数式的に解く試み²⁾もされている。前者はある程度有効ではあるが本質的な解決策とは見なしにくいし、後者についてはまだ初歩的な研究の段階にとどまっている。

計算量が多くなる原因として、一つの一様なコンフィギュレーション空間によってのみ探索を行っている点があげられる。このことは、上で述べたような単純な手法が利用できるという利点がある半面、不必要な探索による計算量の増加を招きやすく、またコンフィギュレーション空間のきざみによる位置の変化が実空間の探索に必要なきざみと対応しないため、十分な精度が得られにくい。この問題を解決する方法の一つとして、常に一様な空間を用いるのをやめて、場面に応じた問題空間(副空間)を設定し、そこで得た結果をもとのコンフィギュレーション空間(主空間)に戻すという階層的な解法をとることが考えられる。

この考え方に従って、本研究では

(1) コンフィギュレーション空間での大域的な探索と衝突点近傍での局所的な回避動作を分離する。

(2) 衝突点近傍で局所的なコンフィギュレーション空間を構成し、それに基づいて局所的な回避動作を生成する。

という手法を提案する。なお本論文では、大域的な探索については詳しく扱わず、局所的なコンフィギュレーション空間の生成のしかたと利用の方法を中心に述べる。

2節で本手法の概要を紹介し、特に問題となる局所的なコンフィギュレーション空間での処理を3節で述べる。4節では、この手法に従って構成した、多面体形状モデルに基づく実験システムによる実行例を示す。5節で本手法の問題点などを議論する。

* 原稿受付 平成5年4月26日

** 正 会 員 中央大学理工学部(東京都文京区春日1-13-27)

Fig. 1 Procedure of path generation

2. 障害物回避の戦略

本研究では、障害物回避経路生成の基本的な方針として自由空間探索法を用いず、より簡単な「障害物にぶつかるまでは直進し、障害物にぶつかったらそれに沿って進む」という方策を用いた。ただし1節で述べたように、大域的な探索と局所的な探索を分離し階層的に経路生成を行う。すなわち、前者は障害物にぶつかるまでの自由運動、後者は障害物に沿っての拘束運動になる。このためにまず次の2つの空間を用意する。

(A) ロボットのコンフィギュレーション空間

普通に用いられるのと同様の、マニピュレータの各関節変数を軸にとった空間である。本論文ではこれをc空間(configuration space)と呼ぶこととする。大域的な探索のための基本空間であり、ここで経路が生成される。

(B) 接触状態でのコンフィギュレーション空間

障害物に沿って進むには衝突時の障害物との接触を保ったままマニピュレータを動かせばよい。その運動を行うために、マニピュレータの手先のリンクとそれが接触している障害物の面とから構成されるコンフィギュレーション空間を考える。この空間は、手先リンクが接触面と接触を保ったまま運動する場合の手先リンクの運動の自由度を考え、その変数を軸とする。この空間を接触コンフィギュレーション空間(contact configuration space)またはcc空間と呼ぶことにする。cc空間の中の一点は、接触面と接触を保つ手先リンクの一つの状態(位置と姿勢)を表している。以下では、紛れのない場合にはこの点を(リンクの)姿勢と呼ぶこととする。cc空間の構成と利用の詳細については次節で述べる。

上記の空間を用いて図1に示すような手順で経路を生成する。経路生成の全体の流れは、経路の候補を生成しその検証を行い、必要ならば変更あるいは次の候補の生成を行うという方式をとっている。すなわち

- (1) まずc空間内を初期姿勢から最終姿勢へ直進する経路を作成する。これをc空間での候補経路と呼ぶ。
- (2) c空間での候補経路上の各点でのマニピュレータと障

害物との干渉を計算する。干渉がなければ、この候補経路が求める解の経路である。

- (3) 干渉があった場合には、最初に衝突が検出された点でその接触状態を判別し、cc空間を定義する。また、この接触状態からcc空間での初期姿勢を作る。これを初期接触姿勢と呼ぶ。
- (4) cc空間内で適切な終端姿勢を一つ決める。これを候補終端接触姿勢と呼ぶ。
- (5) 初期接触姿勢から候補終端接触姿勢までの経路を作成する。これをcc空間での候補経路と呼ぶ。
- (6) cc空間での候補経路上の各点を、マニピュレータの逆変換を用いてc空間へ変換し、同時にその点でマニピュレータの他の部分が障害物と干渉しないかを調べる。もし干渉があるか逆変換が不可能であればcc空間へ戻り、(4)で次の候補終端接触姿勢を求め、それについて(5)、(6)の手順を試みる。
- (7) 干渉がなくcc空間の候補経路がc空間へ変換されたならば、それを解の経路の一部とする。また、候補終端接触姿勢をc空間へ変換し、その姿勢をc空間での新たな初期姿勢とする。
- (8) c空間での最終姿勢に到達するまで(1)～(7)を繰り返す。

(1)、(2)のc空間での運動および干渉検出については従来の手法と変わらない。(3)～(5)の接触状態の判定、cc空間の作成、cc空間内の候補経路生成の方法が問題となる。これについて次節で述べる。

3. cc空間での経路生成

c空間で障害物との衝突が検出されると以下の手順で経路を生成する。

3.1 接触状態の分類と判定

cc空間は、マニピュレータと障害物の接触の状態をもとに生成される。形状を多面体に限り、かつ複数箇所の同時接触がないものとするれば、2つの立体間の接触状態には、頂点、稜線、

Fig. 2 Contact of link with obstacle in case of planar motion

面の形状要素の組合せから、1) 面一面、2) 面一稜線、3) 面一頂点、4) 稜線一稜線、5) 稜線一頂点、6) 頂点一頂点の6つの場合がある。しかし面同士の接触は片方の面を構成する複数の稜線と相手の面との接触とみなすことができ、さらに稜線と面との接触は稜線の両端頂点と面との接触とみなすことができる。したがって本研究では、このようにして上記の組合せから他の場合に含ませることのできる場合を除いていき、

- ① マニピュレータのリンクの頂点が障害物の面と接触する場合（上記の3)),
- ② マニピュレータのリンクの面が障害物の頂点と接触する場合（上記の3)),
- ③ マニピュレータと障害物の稜線同士が接触する場合（上記の4))

の3種類の接触だけを扱うこととした。

干渉検出では一般に接触した状態ではなく干渉した状態が検出される。そこで次のようにして接触状態を求めることとした。すなわち、干渉した面、稜線、頂点の情報をもとに、現在の衝突が接触状態に近い浅い干渉状態か、深い干渉状態かを調べる。前者であれば主としてリンクおよび障害物の干渉面の数からどの接触状態かを判定できる。たとえば、ある立体の干渉要素がすべて相手の立体の同じひとつの面と干渉しており、かつ干渉頂点が一つであってすべての干渉稜線がその頂点を含んでいる場合には、その頂点と相手の面がはじめに接触したと推測できる。深い干渉状態の場合にはマニピュレータを経路上で少し引き戻して浅い干渉状態にする。

3.2 cc空間の生成

以下では上記の①の場合、すなわちマニピュレータのリンクの頂点が障害物の面と接触している場合で話を進める。

説明のためにまず2次元の場合、すなわちマニピュレータと障害物がともにある平面内に存在する場合を考えてみる。この場合、接触を保ったままのリンクの状態は、接触点のまわりでリンクが障害物の接触稜線となす角度 θ 、及び、リンクの接触頂点の障害物の稜線上の位置 x とで表すことができる（図2）。したがってcc空間としてはこの θ と x を軸とする2次元の空間を作ればよい。さらに、リンクが接触頂点のまわりに障害物にぶつからずに回転できる角度の範囲は限られており（図2の場合は 90° ）、また接触稜線の長さ L も有限であるので、リンクが障害物と接触を保ったまま運動できる空間は、図3に示すような矩形の空間に限定される。ただし、実際にはマニピュレータの他の部分の接触や機構上の限界から可動空間はさらに狭くなる可能性がある。このためここで作成した経路に対しては3.4項で述べるような確認を行う。

Fig. 3 Two dimensional cc-space for case of Fig. 2

Fig. 4 Contact of link with obstacle in case of spatial motion

マニピュレータが空間運動をする場合にはリンクの運動の自由度が平面運動の場合に比べて大きい。図4に示すように、接触頂点まわりの回転が3自由度、接触面に沿った平行移動が2自由度の計5自由度が存在する。すなわちcc空間は5次元の空間になる。このままでは空間が大きすぎ扱いにくいので、次節で述べるようにcc空間での終端接触姿勢の探索を考慮して便宜的に空間の次元を下げることにする。

3.3 cc空間での候補終端接触姿勢の探索

2節で述べたように、リンクと障害物の接触面との接触運動は、リンクの接触頂点が接触面の周上へ至るまで行われる。そこからはマニピュレータは再び接触が検出されるまでc空間内を最終姿勢に向かって直進する。すなわち、cc空間での終端接触姿勢は、接触頂点が接触面の周上のいずれかの点にある状態である。この終端接触姿勢の存在する領域を調べて、大域的な戦略に適した点、たとえばc空間で最終姿勢に最も近い点を選び出して候補終端接触姿勢とすればよい。

マニピュレータが平面運動をする場合では、終端接触姿勢の存在する領域は図3の矩形領域の両側の線分（すなわち、 x が接触稜線の両端の値をとる場合）となり、この中でc空間での最終姿勢に近い点を選び出すのはそれほど難しくない。

しかし、空間運動になると前記したようにcc空間自体が5次元であるため、終端接触姿勢の存在する領域、すなわち接触面の周上でとりうる姿勢は4次元の領域となる。4次元空間の探索は効率的ではないので、ここでは図5に示すように、便宜的に終端接触姿勢でのリンクのとりうる姿勢を、接触面の外周の境界稜線上でその稜線まわりの回転のみに制限した。（3.1項で述べた②の場合にはリンクと障害物を入れ替えて考え、③の場合にはリンクの接触稜線上の位置と障害物の接触稜線回りの回転とする。）これにより候補終端接触姿勢の探索は2次元空間の探索になり、実行上無理のない計算量になる。他

Fig. 5 Heuristic search for goal in cc-space

方,このような制限をつけないで見つかるはずのより適当な候補終端接触姿勢を見落としてしまう可能性がある。

3.4 cc空間での候補経路の確認

このようにして得られた候補終端接触姿勢まで接触点からcc空間内を直進する経路を作成する。この候補経路を移動中にリンクやマニピュレータの他の部分が障害物と接触する可能性もあるので、経路上の適当な間隔の点で干渉検出を行う。

3.5 まとめ

接触状態からcc空間で経路を生成する手続きは、生成一検証 (generate-test) のアルゴリズムによっており、まとめると次のようになる。

[A] 候補終端接触姿勢の生成

- (1) 接触面上の各稜線について以下の処理を行う。
 - (1.1) 稜線上に一定の間隔でとった各点で、その位置に接触点があるようにリンクを位置決めする。
 - (1.2) 接触稜線回りに一定の間隔でとった各回転角度に応じてリンクを回転する。
 - (1.3) そのリンクの姿勢をマニピュレータの姿勢に変換し、c空間上での最終姿勢との距離を求める。
- (2) 各稜線上の各点、各回転角度をとるリンクの接触姿勢のうち、c空間での最終姿勢との距離が最短になるものを求めて、候補終端接触姿勢とする。

[B] cc空間での候補経路の生成

- (1) 接触状態から候補終端接触姿勢までcc空間内を直進する候補経路を作成する。

[C] 候補経路の検証

- (1) cc空間での候補経路上に一定の間隔で点をとる。
 - (1.1) その各姿勢でのマニピュレータと障害物との干渉を調べる。
 - (1.2) 干渉があれば[A]に戻り、c空間での最終姿勢との距離が次に短い候補終端接触姿勢を求め、それについて[B]以降の処理を行う。
- (2) 経路上のすべての姿勢で干渉がなければ終わり。

この手法の特徴は、接触面の周上の各稜線に対する処理に問題を分割できる点にある。さらに、接触状態での運動を制限することでcc空間とそこでの終端接触姿勢の探索領域を狭めている。ただし前記したようにこれにより計算量は削減されるが、経路生成の能力に影響が出る。また終端接触姿勢の選択についてはc空間での最終姿勢との距離を用いて評価したが、大域的な戦略としてどのような手法を使うかで異なった評価方法を選ぶことが可能である。

4. シミュレーションによる実験

以上の手法を用いて、計算機上で障害物回避経路の生成の実験を行った。図6にその結果を示す。ロボットには逆運動学解のわかっているPUMA型を用い、大域的な評価はc空間での距離により行っている。プログラムはC言語により作成し、形状の表現と処理には自作した境界表現の多面体モデラを用いた。図中の(a)が初期姿勢、(b)が最終姿勢である。まずc空間の中を直進し(1)、干渉を検出した点からのcc空間内を進む(2)。最後に再びc空間を直進した(3)。この例でのSPARC Station1での計算時間は約3分であった。

5. 考 察

従来のマニピュレータのc空間を用いる方法では、マニピュレータの動作範囲全体を探索の対象とするため精度が粗くなりがちである。これに対してはc空間を分割して探索を行うという方法で対応も可能である⁵⁾。しかし、より本質的な問題は、経路の探索が形状に依存して行われるにもかかわらず、c空間はマニピュレータの機構に依存した空間であるため、形状の表現される実空間で見るとひずみが生じ、一様で効率的な探索が

(1) Path in c-space (before contact)

(2) Path in cc-space

(3) Path in c-space (after contact)

Fig. 6 An example of generated motion avoiding an obstacle

行にくい点にある。すなわち、障害物との衝突を回避するという問題を解くのに、マニピュレータのc空間のみを利用することは必ずしも適当ではない。

そこで本研究では、局所的な衝突回避問題を扱うための空間として、衝突に関与するマニピュレータのリンクと障害物の面とで構成される接触コンフィギュレーション空間の利用を提案している。従来のc空間に比べ局所的な接触状況を直接的に表現しているため、問題を効率的に解くことができ、探索時間と精度の両方の点で優れている。

問題点としては、(1)従来のc空間では考慮する必要のなかったマニピュレータの逆運動学などの機構的な問題が生じる、(2)手先リンク以外での干渉の場合に対応していない、(3)表現が経路の探索手法に依存している面があり、例えば領域探索の手法には利用しにくい、などの点が指摘できる。(1)については、計算時間の負担になることは避けられないものの、通常のマニピュレータを対象とする場合には解の生成そのものの重大な障害となる問題とは認識していない。(2)については、用途にもよるが手先リンク以外では厳しい干渉は多くないと考えてはいるが、やはり解決すべき問題である。これに対しては、障害物を含めた機構関係を考えることで干渉を解消する方法を検討中である。(3)については、より汎用的で効率的な問題空間の表現が可能であると考えており、今後の課題である。

また、計算時間を抑えるために今回は3.3項で述べたようなアドホックな拘束を導入したが、より適切な終端接触姿勢の探索の指針について検討する必要がある。このような幾何形状に基づく効果的な拘束を容易に導入できる点も、この手法の利点とみなすことができる。

障害物回避経路生成システムの開発のためには、今回議論した問題とは別に、大域的な探索手法や、複数箇所での衝突に対する対応なども考えなければならない。さらに、本手法の特徴から、複数の運動するマニピュレータの衝突回避問題や組立動作の研究などにも応用できる可能性があり、将来の研究課題である。

6. 結 論

- (1) ロボットの障害物回避経路を生成する時に、可能な経路の大域的探索と衝突点近傍での局所的な回避動作の計画を分離することを提案した。
- (2) 局所的な障害物回避の手法として、衝突に関与するマニピュレータのリンクと障害物の面とから構成される接触コンフィギュレーション空間を利用する方法を示した。
- (3) 上記の手法に従った経路生成プログラムを作成し、6自由度のマニピュレータを例に計算機上でシミュレーション実験を行ってその有効性を確認した。

謝 辞

本研究は一部、理化学研究所で行っている科学技術庁の原子力基盤技術クロスオーバー研究「原子力用人工知能」の補助を受けた。プログラムの大部分を作成し議論を行った大学院生(当時)の境君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 比留川博久, 北村新三: 安全第一アルゴリズムとポテンシャル関数に基づくマニピュレータの障害物回避法, 日本ロボット学会誌, 5, 3 (1987) 171.
- 2) J. F. Canny: The Complexity of Robot Motion Planning, The MIT Press, Cambridge, Mass., (1988).
- 3) 近藤浩一, 木村文彦: 迷路法に基づく自由空間算出法を用いた障害物回避動作計画, 日本ロボット学会誌, 5, 4 (1987) 263.
- 4) T. Lozano-Perez: Motion Planning for Simple Robot Manipulators, in *Robotics Research - The 3rd Int. Symp.*, O. D. Faugeras & G. Giralt ed., (1986) 133.
- 5) 近藤浩一: ヒューリスティックなグラフ探索にもとづく自由空間算出法による障害物回避動作計画, 日本ロボット学会誌, 6, 6 (1988) 489.
- 6) K. Sun and V. Lumelsky: Motion Planning with Uncertainty for a 3d Cartesian Robot Arm, in *Robotics Research - The 5th Int. Symp.*, H. Miura & S. Arimoto ed., (1990) 417.
- 7) J. C. Latombe: Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Mass., (1991).
- 8) 境 利明, 平岡弘之: 障害物を運動の拘束とするロボットの経路生成, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991) 993.

文部省、科研費一部凍結返還要請

文部省が大学などの研究者に対して、今年度の科学研究補助金(科研費)の一部を凍結するよう求めていることが明らかとなった。

これは税収の低迷で、大蔵省が各省庁に要請している経費の一律カットを受けたものであるが、一度支払った科研費にまでに余波が及ぶのは前代未聞とされている。

文部省は科研費については特別の配慮を求めているが、すでに大型実験機材を購入済みの研究者もあり、返納になると研究活動にも支障が出そうである。

文部省の科研費は、国内の大学や同省の研究機関などに配分され、大学の場合、研究費の大半が科研費に依存している。しかし、その額は少なく、今年度分は約2万6000件の研究課題に対して総額736億円である。

ここ数年、大蔵省から減額要請が来るのが通例となっているため、一部を支給せず、年度当初に留保しておくのが慣例となっ

ているが、今年度の減額要請は15%と昨年を5%上回っている。

従来、科研費の削減幅は要請の半分という特例が認められてきたため、留保分だけでしのげた。

しかし今回は近く編成予定の第二次補正予算案に減額が盛り込まれると、留保分を充てても数億円が不足する。このため、助成額が1テーマ当たり数億円と金額の多い重点領域研究のうち二十数テーマについては、1テーマ当たり1000万円前後の凍結を求めている。

このうち、国際的な開発競争が繰り広げられている高温超電導物質の研究は約3億6000万円近くの科研費ながら、ほとんどの装置が発注済みで1000万円はとても無理であるといわれている。

また、2億4000万円がついていた材料開発の基礎研究では、返納分1000万円近く確保したものの、電子部品も買うことができなくなると嘆いている研究者もいる。(服部 敏夫)