

解説



経路探索問題—ロボットの動作計画†—

比留川 博 久††

1. はじめに

1970 年ごろまで、経路探索問題におけるロボットは、位置のみをもって形状をもたない抽象的な点ロボットで、ロボットが経路を探索する空間も 2 次元空間である場合が一般的であった。また、計画生成システムの例題としてよく用いられたロボットの作業も「物体 A が物体 B の上に載っている」といった、トポロジカルな関係の構築のみが目標であった¹⁾。

1980 年代に入って、多自由度マニピュレータや移動ロボットなどの実際のロボットのハードウェアが利用可能になった。このような事情にも刺激されて、ロボットは 2 次元あるいは 3 次元の形状をもち、ロボットが動作する空間も形状をもった物体の集合からなるといったより現実的な前提の下に、ロボットの経路探索問題が考えられるようになった。このような前提で問題を考えても、本質的には経路探索問題であることに変わりはない。しかしながら、この「形状をもつ」という前提を加えたために、ロボットの動作計画固有の問題も多く発生した。まず、形状を表現する幾何モデルが必要になる。さらに、この幾何モデルを用いて、さまざまな幾何計算をしなければならない。このような幾何計算は、一般に非常に複雑度が高いため、いかにして効率の良いアルゴリズムを設計するかが問題になる。手法によっては、この幾何計算が代数演算に帰着されるので、計算代数の技術も必要になる。また、形状をもつことからロボットは位置だけでなく姿勢ももち、探索の対象となる空間の次元も高くなる。

このロボットの動作計画の問題は、必要となる要素技術の多様さと問題の困難さによって、多く

の分野の研究者の興味を引いた。経路探索の研究者、アルゴリズム理論家、計算幾何学や計算代数の研究者、そしてもちろんロボットの研究者がこの分野の研究に携わった。それゆえ、現在まで提案されてきたロボットの動作計画法はきわめて多種多様で、理論的なアプローチから発見的なアプローチまでそのスペクトルは非常に広く、その全体を把握することは不可能と言っても過言ではない。ところが、1991 年に出版された Latombe による教科書²⁾は非常に良くまとまっており、多くの研究者を驚かせた。また、1992 年には Hwang と Ahuja が ACM Computing Surveys に、かなり広範囲を網羅したサーベイ³⁾を寄稿している。本稿では、著者の浅学と紙面の制約から、これらの教科書やサーベイ並みにロボットの動作計画を解説することはとてもできないが、そのエッセンスの、そのまた香りくらいは伝わることを目指したいと思う。

以下、まず、ロボットの動作計画問題の概要を説明する。次に、ロボットの動作計画のさまざまな手法を、Latombe の分類を参考にして大きく三つに分けて簡単に解説する。さらに、困難であることが証明されている問題をいくつか紹介する。最後に、私見を交えて展望を述べる。

2. ロボットの動作計画法

2.1 用語の定義

まず、いくつかの用語を定義する。ロボットとは、ある作業環境の中で動く物体である。たとえば、位置のみをもつ点ロボット、形状をもつ移動ロボット、あるいは多関節マニピュレータなどを総称してロボットと考える。ロボットの動く空間を動作空間 (workspace) と呼ぶ。動作空間は、2 次元または 3 次元のユークリッド空間を考えるのが一般的である。障害物が移動する場合などの特別の場合を除いて、動作空間中の物体は固定され

† Path Planning Problem—Robot Motion Planning by Hirohisa HIRUKAWA (Electrotechnical Laboratory, AIST).

†† 電子技術総合研究所知能システム部

ているとする。

ロボットの位置と姿勢を一意に表現できる空間を**配置空間** (configuration space) または**配位空間**と呼び、配置空間の各点を**配置** (configuration*)と呼ぶ。たとえば、平面内を動く点ロボットの配置空間はその平面そのものであり、同じく平面内を動く多角形の配置空間はその位置と姿勢を表す3次元空間である。多関節マニピュレータの場合は、関節空間が配置空間で、関節数とその次元になる。配置空間中で、ロボットと他の固定物体が干渉しない配置の集合を**自由空間**と呼ぶ。

動作空間の障害物を配置空間で表したものを**C障害物** (Configuration space obstacle, 略して C-Obstacle) と呼ぶ。例として、平面内を動く多角形の3次元の配置空間内で表されたC障害物の例を図-1に示す⁴⁾。ここに、 xy -軸はロボットの並進2自由度、 $theta$ -軸が回転自由度を示す。C障害物の境界面は、ロボットである多角形が障害物である多角形と接触する全ての配置の集合を表している。

2.2 ロボットの動作計画問題の定義

以上の用語の定義に基づいて、本稿では、ロボットの動作計画問題を次のように定義する。

定義 1 ロボットの形状、動作空間中の物体の形状とその位置・姿勢が与えられたとき、ロボットの初期配置から目標配置に至る、連続な配置の経路を生成する問題を**ロボットの動作計画問題**と呼ぶ。このような経路が存在しない場合は、それを判別する問題とする。

要するに、これはどんな経路でも見つければ良いという問題である。これに対して、なんらかの意

味で最適な経路を見つける問題も当然多く存在する。しかしながら、このような最適問題は、計算量の観点から解くのが困難な場合が多い。本稿では、4.でその困難さについて少し触れるだけにしておく。

3. ロボットの動作計画法

以下では、Latombe の分類を参考にして、動作計画法をロードマップ法 (roadmap)、セル分解法 (cell decomposition)、局所探索法 (local searching) の三つに分類し、それぞれの手法の概要を説明する。

3.1 ロードマップ法

ロードマップ法は、「ロボットの自由空間の連結性を1次元の曲線によって捉えることを用いた動作計画法」と定義される。この1次元の曲線を**ロードマップ**と呼ぶ。ここで言う曲線は、線分を連結したものを含む。ロードマップ法は、スケルトン法 (skeleton approach) とも呼ばれている。たとえば、可視グラフ⁵⁾、引き込みを利用した方法⁶⁾がロードマップ法に分類される。ロードマップ法は、次のような二つの段階から構成される。

ロードマップアルゴリズム

1. ロードマップを構築する。
2. ロードマップ上で経路を探索する。

第1ステップでは、可視グラフのようなロードマップを構築する。これにより、動作計画問題はこのロードマップ上で初期位置から目標位置へ至る経路を決定するグラフ探索の問題に帰着する。第2ステップでは、このグラフ上での道の探索により解を求める。大雑把に言って、第1ステップがロボットの動作計画固有の問題に対応し、第2ステップは一般の経路探索問題と共通の問題になると言える。

ロードマップ法の例として、引き込みを用いた方法⁶⁾を説明する。**引き込み** (retraction) は元々はトポロジの用語であるが、簡単に言うと、「ある空間のトポロジカルな情報を保持した1次元のグラフを与える関数」である。説明のため、ロボットは点ロボット、動作空間は平面として、図-2のような例を考えよう。図中で、 S は初期配置、 G は目標配置、白い部分が自由空間、色の付いた部分が障害物である。この例は、各手法の比較を容易にするために、他の手法の説明のためにも共通

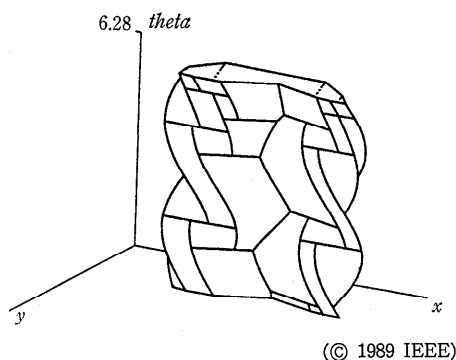


図-1 C障害物の例⁴⁾

* 計算幾何学の分野では placement が使われる。

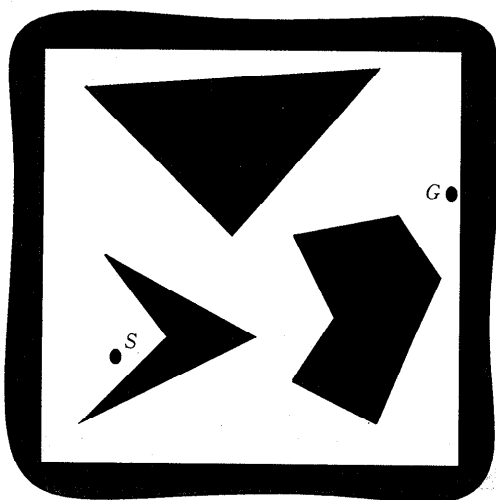


図-2 動作計画問題の例

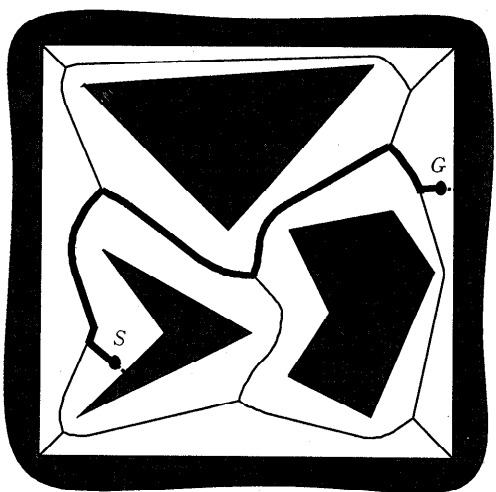


図-3 引き込みを用いた動作計画

に用いる。このとき、図-3 に示すようなボロノイ図 (Voronoi diagram) は、元の空間の連結情報を保持したグラフである⁶⁾。言い換えると、元の空間はこのようなグラフに「引き込まれた」と言う。ここで、初期配置および目標配置とこのグラフを接続する一つの方法は、図のように障害物から垂直に遠ざかる直線との交点を求めることである。この例では、このようなグラフを構成するのが第1ステップ、グラフ上での道の探索が第2ステップに対応する。

次に、ロボットが凸多面体、動作空間が3次元空間の場合を取り扱った、著者らの研究⁷⁾を紹介する。動作計画例を図-4 に示す。この場合、ロボットは並進3自由度と回転3自由度をもつので、

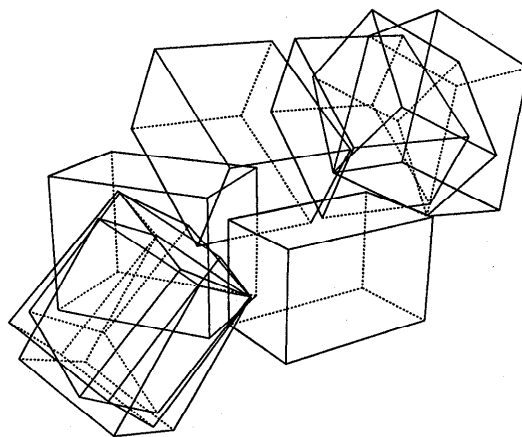


図-4 凸多面体の接触動作計画の例

配置空間の次元は6次元になる。この研究は、機械部品の組立動作の計画を最終的な目的にしているので、接触動作の計画を対象としている。まず、この方法では多面体の姿勢を 2×2 特殊ユニタリ行列で表現する。これは、ロボットの配置空間を代数式でパラメータ化し、C障害物の境界面を代数方程式で表すためである。このC障害物の5次元の境界面は多面体間の点接触に、4次元の境界面は線接触に、3次元の境界面は面接触に対応する。6次元空間であるので図-1のように図示することはできないが、4次元の境界面は二つの連立代数方程式、3次元の境界面は三つの連立代数方程式を解くことによってその陽表現を求められる。最終的には、人工的な動作拘束を表す代数方程式とこれらの式との連立代数方程式を解くことにより、C障害物境界面上でロードマップを定めることができ、接触動作の計画を行える。

さらに、もっと一般的な場合に適用できるCannyの提案した方法⁸⁾を紹介する。Canny自身は、この方法をロードマップ法と名付けたのであるが、Latombeはこの名前をより普遍的なカテゴリ名として使い、Cannyの提案した方法はシルエット法と呼んでいる。

シルエット法は、大雑把に言って、C障害物が代数式で表されるような任意の動作計画問題に適用可能な一般的な方法である。また、解が存在するときには必ずそれを発見することが保証されている。このような動作計画法を完全な動作計画法と呼ぶ。シルエット法の適用可能条件は、ロボットおよび障害物の境界面が代数方程式で表せ、かつ、ロボットの配置空間が代数式でパラメータ化

できれば満たされる。たとえば、ロボットと障害物の形状が多面体や円筒・円錐の組合せで表現できれば、第1の条件は満たされる。また、ロボットが3次元の剛体なら、その姿勢を前述した 2×2 特殊ユニタリ行列や四元数で表せば第2の条件も満たされる。多関節ロボットの場合も第2の条件を満たすことは可能である⁸⁾。

以下、シルエット法の概要を Canny が示した例⁸⁾に従って説明する。ロボットの配置空間は3次元とし、その自由空間が図-5に示すような楕円面に円柱形の穴が開いた曲面 S で表されると仮定する。ここに、 xyz の各軸はロボットの各自自由度に対応する。図-1 の例からも分かるように、実際の自由空間の形状は遥かに複雑であるが、説明のため簡単な曲面を考える。シルエット法の適用条件から、このような曲面は代数方程式で与えられる。

まず、 $x=c$ なる面 P_c を考える。一般には配置空間は n 次元なので、これは超平面である。次に、適当な方向たとえば y 軸方向を指定する。そうすると、曲面 S と面 P_c の交線上に、 y 成分が極小と極大になる点が存在する。交線がいくつかの連結成分の集合になる場合は、各連結成分に同様の点がある。面 P_c を x 軸方向に走査していくと、このような点の軌跡が生成される。この軌跡は、曲面 S を xy -面に射影したときのシルエットと一致する。これが本方法がシルエット法と呼ばれる由縁である。

自由空間を表す元の曲面 S は連結であったが、

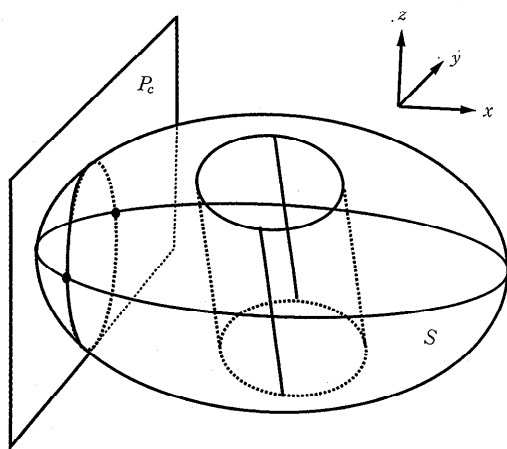


図-5 自由空間の例

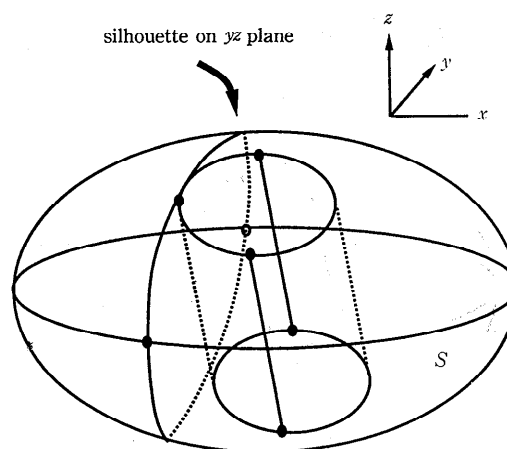


図-6 臨界点とシルエット曲線の連結

こうして得られたシルエット曲線は連結ではない。そこで、このような連結性が変化する臨界点 (critical point) を含む走査面 P_c 上で、 y 方向に走査し、 z 成分の極大・極小を求めて、 yz -面へのシルエットを求める。こうして新たに得られるシルエット曲線を図-6に示す。この例の場合は以上の処理により連結なシルエット曲線が得られる。より高次元の場合は、この処理を再帰的に繰り返せば、いつかは臨界点を含まないシルエットが得られる。これらのシルエットを連結すれば、元の自由空間の連結性の情報をもったロードマップが得られ、この上でグラフ探索を行うことにより動作計画が行える。

仮定から、自由空間を表す曲面 S は代数方程式によって与えられるので、以上のアルゴリズムは連立代数方程式を解くことによって実行される。この代数方程式の変数の数はロボットの自由度と一致し、連立代数方程式は多変数終結式⁸⁾を用いたアルゴリズムによって、変数の数の単指数関数の漸近時間計算量で解ける。これらの事実から、シルエット法の漸近時間計算量は、ロボットの自由度の単指数関数になることが示されている⁸⁾。以上説明したように、シルエット法は非常に広範囲の動作計画問題を解け、しかも完全性が保証されている方法であるが、必要な計算量の莫大さのために、現実的な問題に対してインプリメントされた例は報告されていない。

3.2 セル分解法

セル分解法は、「ロボットの自由空間を、その

中では経路が容易に決定可能な部分集合に分解することを用いた動作計画法」と定義される。この「その中では経路が容易に決定可能な部分集合」をセルと呼ぶ。セル分解法は、次のような3段階から構成される。

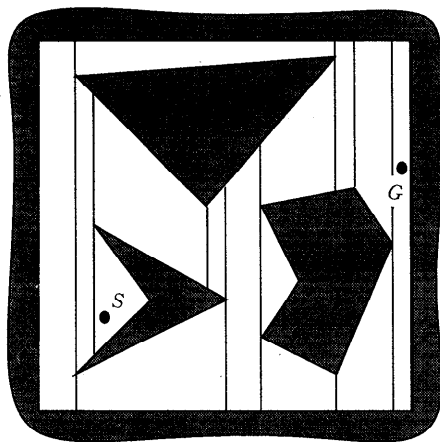
セル分解アルゴリズム

1. 連結グラフを構築する。
2. チャンネルを探索する。
3. 経路を決定する。

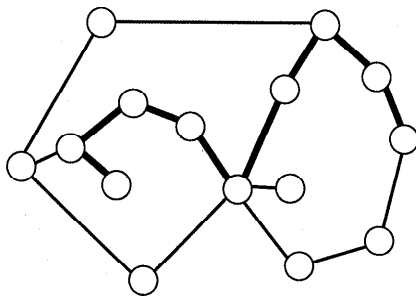
まず、第1ステップで自由空間をセル分解し、セル間の隣接関係を表現するグラフを作成する。このグラフを連結グラフ (connectivity graph) と呼ぶ。次に、第2ステップで初期配置が含まれるセルから目標配置が含まれるセルまでのセルのシーケンスをグラフ探索により求める。このシーケンスをチャンネル (channel) と呼ぶ。これらの第1～2ステップはロードマップ法の第1～2ステップとはほぼ同じ役割をもっているが、一つ異なる点がある。ロードマップ法では、1次元の曲線により自由空間の連結性を抽出していたが、セル分

割の場合は配置空間と同じ次元をもつセルを用いている。したがって、最終的になんらかの動作を得るためには、チャンネルから1次元の経路を決定する必要がある。これが、第3ステップに相当する。セル分解法は、大きく完全セル分解 (exact cell decomposition) と近似セル分解 (approximate cell decomposition) に分類される。以下、同じく図-2の例を用いてこれらの方法の基本的な考え方を説明し、より一般的な場合についてはいくつか簡単に紹介する。

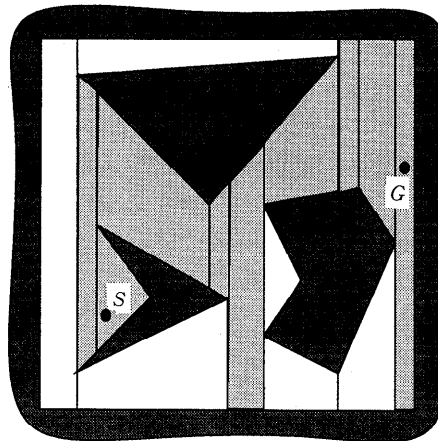
まず、完全セル分解を図-7を用いて説明する。図-2のような動作環境が与えられたとき、まずアルゴリズムはこれを図-7(a)のように分解する。この図で、台形または三角形の小領域がセルである。図を見れば明らかに、各セル内の任意の2点を結ぶ線分は自由空間内に入っているの



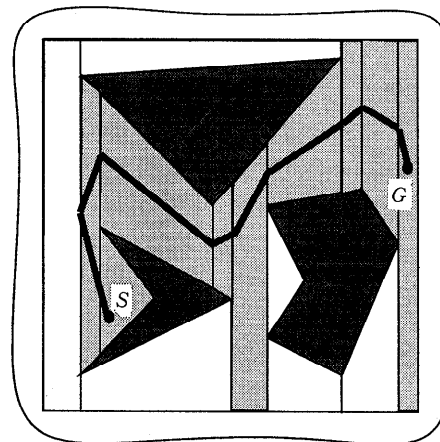
(a)



(b)



(c)



(d)

図-7 完全セル分解を用いた動作計画

で、「その中では経路が容易に決定可能」である。セルの定義は、この例から理解できると思う。この例の場合、このようなセルは障害物の各頂点から縦の線を引くことにより求めることができる。この図を見ると、求められた全てのセルの和集合が、自由空間を正確に表していることが分かる。これが、本手法が「完全セル分解」と呼ばれる理由である。次に、長さが零でない線分を共有するセルが隣接関係にあるとして、連結グラフを作成する。この例を図-7(b)に示す。以上が第1ステップである。チャンネルの例を図-7(c)に示す。これは、連結グラフを障害物からの距離などの発見的情報を用いて探索することにより求められる。これが第2ステップである。最後に、「各セルの境界の中点を通る経路」を選ぶことにすれば、図-7(d)のような経路が得られる。これが第3ステップである。

ここで、完全セル分解のより一般的な場合への適用例を紹介する。Schwartz⁹⁾らは、多角形のロボットが多角形の障害物間を移動する問題に対して、完全なアルゴリズムを与えた。この方法の漸近時間計算量は、障害物の辺の数を n として、 $O(n^5)$ である。また、彼らはシルエット法と同様な前提条件の場合に適用可能な一般的方法も示した¹⁰⁾。彼らの一連の研究は、ピアノを狭いドアを通して移動させる状況にちなんで、Piano Mover's Problem というタイトルで発表された。この方法も、シルエット法と同様代数計算に帰着するが、その漸近時間計算量は代数式の変数の数に対して2重指数関数になるため、ロボットの自由度に対してもやはり2重指数関数になる。ちなみにその複雑度は、ロボットや障害物を表す多角形や多面体の頂点の数を n 、ロボットの自由度を d とすると、 $O(n^{2^{(d+6)}})$ になる。たとえば $d=3$ なら $O(n^{512})$ 、 $d=6$ なら $O(n^{4096})$ と、非現実な値になる。前述したように、シルエット法の計算量は自由度に対して単指数関数になるので、この点からは完全に凌駕されてしまった。この2重指数関数か単指数関数かの差は、ロードマップ法かセル分解法かの差ではなく、代数計算のアルゴリズムの差からきている。Schwartz らの研究は、一般的な動作計画問題に対する解の存在証明の最初のものと考えるべきであろう。

次に、近似セル分解を図-8を用いて説明する。

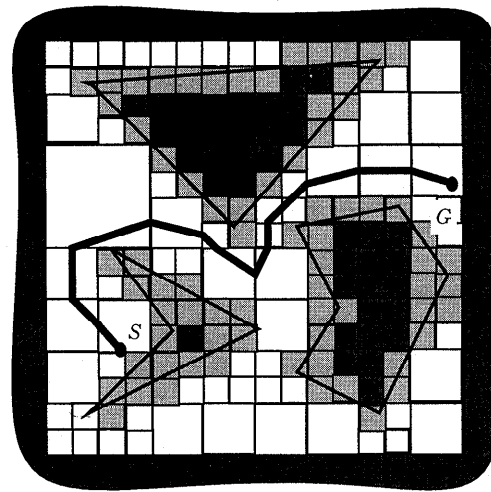


図-8 近似セル分解による動作計画

同様に、図-2のような作業空間が与えられたとき、アルゴリズムはまず作業空間全体を4つの同じ正方形に分解する。各正方形は、自由空間のみを含むか、障害物のみを含むか、両方を含むかのいずれかである。自由空間のみを含む場合は、この正方形内の任意の2点を結ぶ線分は自由空間に含まれるから、これをセルとする。障害物のみを含む場合は、この中に経路は存在し得ないから除外する。完全セル分解の場合と同様に、この時点でセルの連結グラフを作成し、初期配置から目標配置に至るチャンネルが存在するかどうかをチェックする。もし存在する場合は、セル分解アルゴリズムの第3ステップを実行し、アルゴリズムを終了する。この場合も、セル間の境界線の中点を結ぶことにより、第3ステップが実行できる。チャンネルが存在しない場合は、自由空間と障害物の両方を含む正方形をさらに4つに分解して、再帰的に以上の処理を繰り返す。事前に決めた正方形の大きさになるまで正方形を分解しても解が見つからない場合は、解が見つからないとして、アルゴリズムを終了する。例を図-8に示す。白い正方形は自由空間のみを含む正方形で、これがセルになる。黒い正方形は障害物のみを含む正方形、中間色のものが両方を含むものである。

以上説明したアルゴリズムから分かるように、近似セル分解法を用いて解が見つからないのは、「経路が存在しない」か、「セル分解の分解能が不十分」かの二つの場合がある。言い換えると、近似セル分解法はある分解能の範囲内でのみ完全な

アルゴリズムなのである。このようなアルゴリズムを**分解能完全** (resolution complete) な動作計画法と呼ぶ。アルゴリズムの完全性の観点からは、「完全」な動作計画法が「分解能完全」な動作計画法より優れていることは明らかであるが、一般に、完全な動作計画法の複雑度は分解能完全なアルゴリズムより高い場合が多い。

ここで、より一般的な場合に適用された近似セル分解法をいくつかあげる。Lozano-Perez¹¹⁾ は、関節空間で再帰的にC障害物を求めることにより、マニピュレータの動作計画を行う方法を提案した。図-9¹¹⁾に、動作計画例を示す。その漸近時間計算量は $O(r^{d-1}(m)^2)$ で、分解能完全なアルゴリズムである。ここに、 r は各関節角の量子化数、 d はマニピュレータの自由度、 m はマニピュレータと障害物の形状の複雑度を示す。また、登尾ら¹²⁾は、移動ロボットの動作計画を行う発見的な方法を示している。

3.3 局所探索法

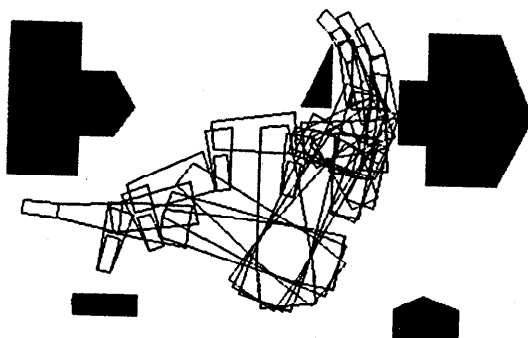
Latombe らは、動作計画法の三つ目のカテゴリをポテンシャル法としているが、本稿ではもう少し定義を広くとって、局所探索法として解説する。このカテゴリが、グラフ探索が支配的な部分であるという意味で、古典的な経路探索に最も香りが似ていると思われる。**局所探索法**は、「局所的な情報に基づいて配置空間を探索することを用いた動作計画法」と定義する。この方法は、ロードマップ法やセル分解法のように、まず最初に配置空間の連結性を大局的に解析するというステップをもたない。たとえば、ロードマップ法ではロードマップの作成、セル分解法では連結グラフの作成が、この「大局的解析」に相当する。局所探索法では、ロボットの現在配置の局所的な情報のみ

に基づいて、経路を探索していくのである。

この分類の代表的なものは、局所的ポテンシャル法 (local potential field) である。**局所的ポテンシャル法**は、「人工的に定義したポテンシャルの最急降下方向を探索していくことによって動作を計画する方法」である。通常は、初期配置から目標配置に向かう力を発生するポテンシャルと、障害物からの反発力を発生するポテンシャルの二つを定義して、これらの加重和によってポテンシャルを定義し、なんらかの極値探索法により目標値までの経路を探索していく。筆者の知る限りでは、文献13)がこの方法の最初の論文であろう。

ポテンシャル法は、ポテンシャル関数を発見的な情報として、後戻りなしの発見的グラフ探索をしていると考えることもできる。後戻りなしであるので、当然のことながら目標値とは異なる極小値 (local minima) に落ち込む可能性がある。したがって、この場合アルゴリズムは「完全」でもなければ「分解能完全」でもない。このことと必要な計算量が少ないことから、局所的ポテンシャル法の適用対象は、実時間の障害物回避¹⁴⁾や、エラーが起こった場合の計画の修正などになる。例を図-10に示す。図中で、波面は等ポテンシャル線を示している。この方法では、ロードマップ法やセル分解法の説明に用いたような初期配置と目標配置が与えられた場合に、その解を見つけることはあまり期待できないので、図のような初期配置で例を示している。

ポテンシャル法を分解能完全にする方法とし



(© 1987 IEEE)

図-9 近似セル分解による動作計画例¹¹⁾

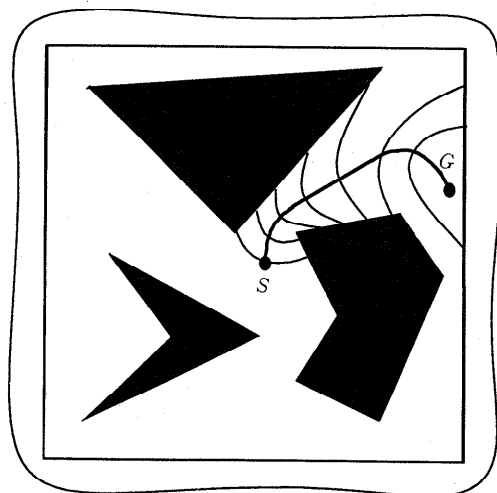


図-10 局所的ポテンシャル法

て、目標値以外に極小値をもたないポテンシャルを定義する方法¹⁵⁾も提案されている。このようなポテンシャルの構成には、「配置空間の連結性を大域的に解析するステップ」が必要であるので、局所探索法に分類するのは適切ではない。「大域的ポテンシャル法」とでも呼ぶべきものであろう。

局所探索法のもう一つの例は、「配置空間を量子化し、これを無向グラフと考えると、なんらかのグラフ探索法を用いて動作を計画する方法」である。本稿ではこの方法を**格子法**と呼ぶことにしよう。量子化したグラフは有限のノードとアークしかもたないから、ちゃんとしたグラフ探索法を用いれば、アルゴリズムは分解能完全になる。図-11を用いて、格子法を説明する。この格子は配置空間を量子化したものである。初期配置に最も近いノードからグラフを展開し、展開したノードが自由空間にあるときのみその子孫を展開していく。これを目標配置に到達するまで続け、解を求める。図-2の例の場合の探索結果例を図-11に示す。量子化グラフのノード数は、ロボットの自由度すなわち配置空間の次元の単指数関数で増加する。したがって、全てのノードを探索の対象とすると、格子法の漸近時間計算量も単指数関数で増える。

ここで、一般的な場合への適用例をいくつか紹介する。Donald¹⁶⁾は、ロボットは多面体、動作空間は3次元、障害物は多面体の集合という条件で、分解能完全なアルゴリズムを提案している。この方法の基本的な考え方は、配置空間でC障害

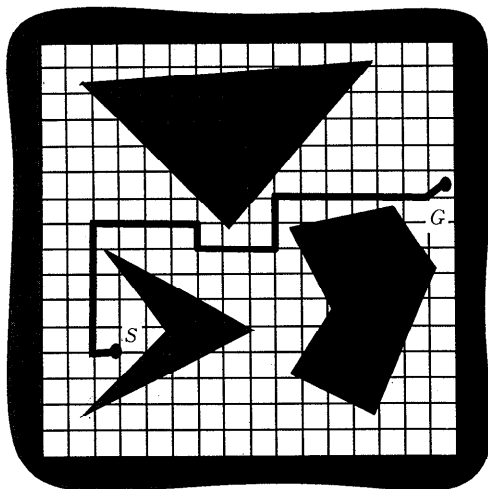


図-11 格子法

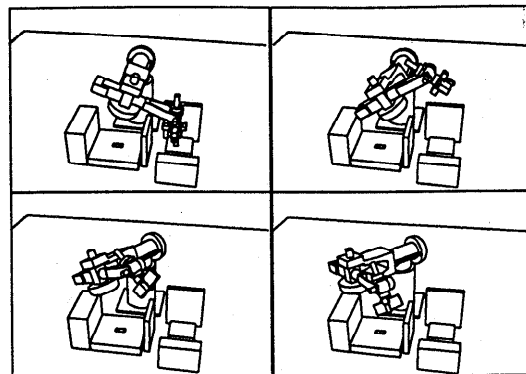


図-12 格子法による動作計画例

物の境界面に沿って進み、次のC障害物に遷移して、また境界面に沿って進む、というものである。ちなみに、Donaldの示している計算例では、Symbolics 3600を用いて数時間程度のCPUタイムを要している。近藤は、発見的な情報に基づいて量子化グラフを両方向探索する方法を提案し¹⁷⁾6自由度マニピュレータの動作計画を行っている。また、長谷川らはさまざまなヒューリスティクスを用いて、探索ノード数を限定する方法により、やはり6自由度マニピュレータの動作計画する方法を提案している¹⁸⁾。この場合、全てのノードを探索しないのであるから、アルゴリズムは分解能完全にはならない。この方法による動作計画例を図-12に示す。

4. 困難な問題

本章では、ロボットの動作計画問題の複雑度の下限の理論的な証明をいくつか紹介する。ロボットの動作計画問題を研究するに際しては、これらの結果を踏まえて、困難な問題であることを認識した上で、問題に取り組むことが肝要であると思う。このような理論的な証明の最初のものは、1979年にReif¹⁹⁾が示した次の結果であると言われている。

定理 1 ロボットは多面体で6自由度、動作空間は3次元、障害物は多面体の集合という条件で、定義1で与えた一般的な動作計画問題は *PSPACE*-完全*である。

この問題はシルエット法により解くことが理論的

* 計算に必要な記憶領域が問題の大きさに対して多項式で与えられる問題のクラスを *PSPACE* と呼ぶ。 *PSPACE* に属し、 *PSPACE* の任意の問題より必要な領域が少なくない問題を *PSPACE*-完全 と呼ぶ。

には可能であるが、その漸近時間計算量はロボットの自由度について単指数関数になるのは前述したとおりで、現在のところシルエット法より複雑度の低い完全なアルゴリズムは知られていない。また、Canny⁸⁾ は次のような結果を示している。定理 2 ロボットは点ロボット、動作空間は3次元、障害物は多面体の集合という条件で、最短パスを求める問題は、いかなる L^p メトリックを用いても、NP-困難*である。

直感とは異なるかもしれないが、このような一見簡単そうに見える問題さえも、最適な経路を求める問題は十分困難なのである。マニピュレータの動作計画については、たとえば次のような結果をHopcroft²⁰⁾ が与えている。

定理 3 ロボットは回転関節で結合された複数の線分リンクで、1 関節が固定されており、動作空間は2次元とする。このとき、初期配置から、ある特定の関節を目標配置に移動させる動作があるかどうかを決定する問題は、PSPACE-困難**である。

これらの結果以外にも、数多くの場合が PSPACE-困難になることや、ときには非決定性機械を用いても指数時間かかることが証明されている⁸⁾。詳しくは、文献2), 3)を参照して欲しい。

5. おわりに

本稿では、ロボットの動作計画問題について、基本的な手法を中心に解説した。この問題は、基本的には経路探索問題であるが、ロボットや作業環境が形状をもつことから、幾何計算や代数計算が重要な役割を果たしている。

前章でも述べたように、この問題は計算量の観点から非常に困難な問題である。これまで研究されてきたアプローチを大別すると、次のようになると考えられる。

1. 完全なアルゴリズムをより高速化する方法を探索する。
2. ロボットの形状の対称性などを利用して、より簡単な問題に帰着させる。
3. アルゴリズムの完全性は求めず、実際のロボットに求められる作業の仕様などを考慮して、

* 計算に必要な時間が、非決定性機械を用いて、問題の大きさに対して多項式で与えられる問題のクラスを NP と呼ぶ。NP の任意の問題より必要な時間が少ない問題を NP-困難と呼ぶ。

** PSPACE の任意の問題より必要な領域が少なくない問題。

実用的なアルゴリズムを構築する。

大雑把に言うと、ロードマップ法や完全セル分解法は1と2、局所探索法は3のアプローチが中心だったのではないかと思う。現在のところ、移動ロボットのような3自由度以下の問題で、付加条件の厳しくない問題は実用段階に入っていると考えられる。これに対して、6自由度程度の問題は、完全なアルゴリズムは計算するのが困難であるし、実用的な時間で計算できる方法はその適用可能範囲が明確ではないように思われる。

そもそも、ロボットというものは、多種多様な作業を行える可能性のある汎用機械である。この点を改めて振り返ってみると、一般的な動作の計画をしようという問題は、困難で当然であろう。今後どのようなアプローチをとるべきかについては、著者も答えることができない。本稿がこの答えを考える際の一助になれば幸いである。

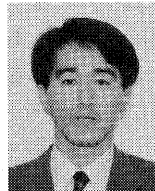
謝辞 日頃ご議論いただく、高瀬國克知能システム部長を始めとする電総研ロボティクス研究グループの諸氏に感謝する。また、草稿を丁寧に読んでいただき、多くのご助言をいただいた喜多泰代氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Nilsson, N.J.: Principles of Artificial Intelligence, Tioga Publishing Co., 1980, (白井良明他訳, 人工知能の原理), 日本コンピュータ協会(1983).
- 2) Latombe, J.C.: Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers (1991).
- 3) Hwang, Y.K. and Ahuja, N.: Gross Motion Planning—A Survey, ACM Computing Surveys, Vol. 24, No. 3, pp. 219-291 (1992).
- 4) Brost, R.C.: Computing Metric and Topological Properties of Configuration-Space Obstacle, Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, 170/176 (1989).
- 5) Nilsson, N.J.: A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques, Proc. of 1st Int. Joint Conf. Arti. Intelli., 509/520 (1969).
- 6) O'Dunlaing, C. and Yap, C.K.: A Retraction Method for Planning the Motion of a Disc, J. Algorithm, Vol. 6, 104/111 (1982).
- 7) Hirukawa, H., Papegay, Y. and Matsui, T.: A Motion Planning Algorithm for Convex Polyhedra in Contact under Translation and Rotation, Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation 3020/3027 (May 1994).
- 8) Canny, J.: The Complexity of Robot Motion

- Planning, ACM doctoral dissertation awards '87, The MIT Press (1988).
- 9) Schwartz, J. T. and Sharir, M.: On the Piano Mover's Problem: I. The Case of a Two-Dimensional Rigid Polygonal Body Moving Amidst Polygonal Barriers, In Schwartz (Eds.) Planning, Geometry, and Complexity of Robot Motion, Ablex Publishing Corporation (1986).
- 10) Schwartz, J. T. and Sharir, M.: On the Piano Mover's Problem: II. The General Techniques for Computing Topological Properties of Real Algebraic Manifolds, ditto.
- 11) Lozano-Perez, T.: A Simple Motion-Planning Algorithm for General Robot Manipulators, IEEE J. Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 3, 224/238 (1987).
- 12) 登尾啓史, 浪花智英, 有本 卓: クワッドツリーを利用した移動ロボットの高速動作生成アルゴリズム, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 5, 414/425 (1989).
- 13) Loeff, L. A. and Soni, A. H.: An Algorithm for Computer Guidance of a Manipulator in between Obstacles, Tran. ASME, J. Engineering for Industry, 836/842 (1975).
- 14) Khatib, O.: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, Int. J. Robotics Research, Vol. 5, No. 1, 90/98 (1986).
- 15) Koditschek, D. E.: Exact Robot Navigation by means of Potential Functions: Some Topological Considerations, Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, 1/6 (1987).
- 16) Donald, B. R.: A Search Algorithm for Motion Planning with 6 d. o. f., Artificial Intelligence, Vol. 37, 295/353 (1987).
- 17) 近藤浩一: ヒューリスティックなグラフ探索に基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, Vol. 6, No. 6, 489/498 (1988).
- 18) 長谷川勉, 音田 弘, 松井俊浩: 作業空間の空間構造解析に基づくマニピュレータの障害物回避動作計画, 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No. 1, 122/128 (1991).
- 19) Reif, J. H.: Complexity of the Mover's Problem and Generalizations, Proc. IEEE Symp. FOCS, 421/427 (1979).
- 20) Hopcroft, J., Joseph, D. and Whiteside, S.: Movement Problems for 2-Dimensional Linkages, SIAM J. Computing, Vol. 13, No. 3, 610/629 (1984).

(平成6年2月2日受付)



比留川博久

1959年生. 1987年神戸大学大学院自然科学研究科システム科学専攻博士課程修了. 学術博士. 同年, 工業技術院電子技術総合研究所入所.

現在, 行動知能研究室主任研究官. 1994年3月よりスタンフォード大学客員研究員. ロボットの知能化の研究に従事. ACM, IEEE 等各会員.