

センサベーストパスプランニングをデッドロックフリーにする十分条件の領域的一般化について

登 尾 啓 史†

最近、センサベーストパスプランニングアルゴリズム、すなわち、未知の障害物を回避したのち移動体をゴールへ導くアルゴリズムが多数提案されている。既に著者は、そのようなアルゴリズムをデッドロックフリーにする十分条件「移動体は、障害物から離れるところをゴールへ単調に接近させれば、必ずゴールに到達できる」を見いだした。従来のアルゴリズムのほとんどは、そのデッドロックフリー特性をこの十分条件で保証している。本稿では、その十分条件を一般化し、より広範囲に同種のアルゴリズムが求められるようにする。まず、従来の十分条件を領域的に眺めると、“離脱点とゴールを半径、ゴールを中心とする円領域をゴールへ単調に収束させる”となる。このとき、円領域を任意の領域に置き換えると、従来の十分条件が領域的に一般化される。ここでは、移動体の離脱可能領域を任意の形状で定義したとき、移動体を確実にゴールへ到達させるための十分条件を提案した。また、新しい十分条件が従来のものを完全に包含することも明示した。さらに、一般化十分条件にもとづくと、既に辿った未知障害物の配置や形状を学習しながら柔軟に離脱可能領域を選択できる。この学習アルゴリズムにより、移動体は未知障害物を徐々にスムーズに回避するようになり、より早くゴールへ到達できる。この優越性は、従来の十分条件にもとづくアルゴリズムとの比較で、グラフィックスシミュレーションにより確認された。

On a Territorial Generalization of the Previous Sufficient Condition to Design a Family of Sensor-Based Deadlock-Free Path-Planning Algorithms

HIROSHI NOBORIO†

In this paper, we theoretically show a territorial extension of the previous sufficient condition to design a family of sensor-based path-planning algorithms. Basically in the sensor-based path-planning, an automaton usually goes straight to its goal. Then if and only if the behavior is obstructed by an unknown obstacle, the automaton traces the obstacle by a given clockwise or counter-clockwise order. After a while, the automaton finds an adequate point to leave the obstacle without colliding it. Almost all the algorithms keep their deadlock-free characteristics by monotonous approach of the leave point, which is measured by the Euclidean distance toward the goal. This characteristic is observed from a territorial aspect as follows: As long as an automaton leaves a boundary of its tracing obstacle within a circle centered at the goal, which converges monotonously to the goal, the automaton arrives at the goal. This is the previous sufficient condition for keeping the deadlock-free characteristic in the sensor-based path-planning. This paper shows a generalization of the sufficient condition by replacing the circular region with different types of regions including the goal. By using an arbitrary region freely, which converges monotonously to the goal, we can get a wider set of sensor-based path-planning algorithms. As an example of them, we can design a set of learning sensor-based path-planning algorithms by fitting adaptively the arbitrary region to location and shape of several obstacles traced already from the start. The territorial learning algorithms (TLA) make deadlock-free paths shorter than paths generated by the previous algorithms without any learning. This property is deeply ascertained in several kinds of uncertain worlds by the graphics simulation. In result, we obviously see the superiority of the new sufficient condition against the previous sufficient condition in order to design an elegant sensor-based path-planning algorithm.

† 大阪電気通信大学情報工学部情報工学科

Department of Engineering Informatics, Faculty of Information Science & Technology, Osaka Electro-Communication University

1. はじめに

これまで、種々のセンサベーストパスプランニングアルゴリズム、すなわち、移動体が未知空間で行動す

るためのアルゴリズムが多数提案されてきた。例えば、ルメルスキーはアルゴリズム *Bug1* や *Bug2* を提案し^{1),2)}、我々もセンサベーストパスプランニングをデッドロックフリーにするための十分条件、言い換えれば、移動体を確実にゴールへ誘導するための十分条件を提案したり、それから遡って、より優れた特性をもつアルゴリズム *Class1* ~ *3* 等を設計したりした^{3)~6)}。

これらのアルゴリズムでは、「ゴール方向が障害物に妨げられなければ移動体はそれから離脱し、そうでなければセンサフィードバックで障害物を回避する」という“物理条件”が基本となる。もちろん、これは、移動体が近くの障害物をローカルに回避するための条件であり、ゴールへの到達を保証するグローバルな性質を何ら含んでいない。したがって、この条件だけからなるアルゴリズムは必ずしも移動体をゴールへは誘導しない (図 1)。

このため、従来のアルゴリズムは、移動体をゴールへ確実に誘導するグローバルな条件を別に内蔵している。その一つが、「移動体はゴールへ単調に接近したところからしか障害物を離脱しない」という“距離条件”である (図 2(a))。我々は既に、これが“移動体をゴールへ確実に誘導するための十分条件”になることを証明した^{3)~6)}。この十分条件を関数的に眺めると、“離脱点とゴールのユークリッド距離を単調に減少させるもの”となり、領域的に眺めると、“離脱点とゴールが成す線分を半径、そして、ゴールを中心とする円領域をゴールへ単調に収束させるもの”となる。

最近、著者は、ユークリッド距離を任意の距離に置き換えても、その距離が単調に減少するところから障害物を離脱する限り、移動体は確実にゴールへ到達することを示した。これは、前述の十分条件の関数的な一般化である^{7),8)} (図 2(b))。一方、円領域を任意の領域に置き換えることにより、従来の十分条件は領域的に一般化される。もちろん、そこでは、距離関数では表現不可能な領域も取り扱える。そこで本稿では、どのように領域をゴールへ収束させれば、移動体を確実にゴールへ誘導できるかについて考察し、前述の十分条件をさらに一般化する (図 2(c))。これにより、センサベーストパスプランニングアルゴリズムが広範囲に求められるようになる。その一例が、ここで提案する領域学習型アルゴリズム (TLA) である。

本稿では、まず、第 2 章で、移動体とそれが行動する空間を定義する。次に、第 3 章で、新しい十分条件を提案する。そして、第 4 章で、この十分条件にもとづく領域学習型アルゴリズム (TLA) を提案する。最後に、第 5 章で、新しいアルゴリズムと従来のもの

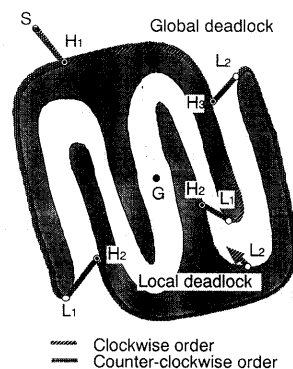


図 1 物理条件のもとで最も簡単なセンサベーストパスプランニングアルゴリズムが生み出す時計回りと反時計回りのデッドロック

Fig. 1 Clockwise and counter-clockwise deadlocks generated by the simplest sensor-based path-planning algorithm based on the physical condition.

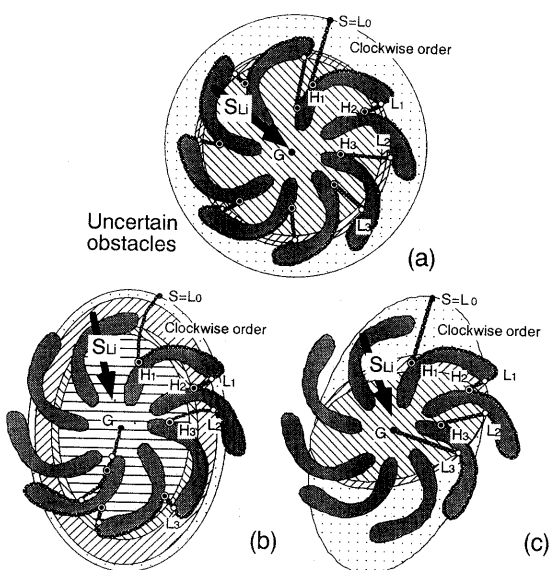


図 2 ユークリッド距離にもとづく従来の十分条件 (a), 十分条件の関数的な一般化 (b), 十分条件の領域的な一般化 (c)

Fig. 2 A previous sufficient condition based on the Euclidean distance (a), its functional extension (b), and its territorial extension (c).

をシミュレーションで比較し、前者が後者よりも短いデッドロックフリーパスを安定に選択することを示す。

2. 移動体とその空間について

本研究では、移動体は点で表現され、どのような方向へも自由に行動できるものとする。また、移動体は、自己とゴールの位置以外の情報、例えば、それが行動する空間については何も知らないものとする。しかし、移動体は、種々の外界センサ (触覚センサ, 光センサ,

そして、超音波センサ等)により、未知の障害物上の点やその接線を連続的に検出できるものと仮定する。そして、この接線をオンラインでステアリングベクトル V_S —移動体の進行方向—とすると、移動体はゆっくりではあっても正確に障害物を辿れる。現在、超音波センサのリングで未知障害物の法線を計測したり、その周囲を追跡したりする研究が進められており、この仮定は近い将来達成できるものと考えられる^{9)~11)}。

一方、移動体が行動する世界は無限でも有限でもよいが2次元の空間とする。一般に、この空間には多数の障害物が点在し、移動体がゴールへ直進するのを妨げている。本研究では、障害物はどのような形状をしていてもよいが、接線が定義できる程度の滑らかさを持つものとする。また、障害物の周囲長や個数を有限とすることで、障害物の周囲を永久に辿ったり、障害物と衝突・離脱を永遠に続けるといった可能性が除外できる。

ここで、センサベクトルプランニングアルゴリズムのデッドロックフリー特性を議論するため、障害物に関していくつかの定義を与える。まず、ある障害物が2次元空間を分割するとき、ゴールを含む自由領域と接する障害物周囲をゴール周囲、そうでない障害物周囲を非ゴール周囲と定義する(図3)。もちろん、空間を分割する障害物が存在しなければ、障害物の周囲はすべてゴール周囲となる。一般に、移動体は、ゴール周囲を辿るならゴールへ到達できる可能性を持つが、そうでなければゴールへは永遠に到達できない。センサベクトルプランニングでは、この違いがオンラインで区別されなければならない。

次に、障害物に妨害されことなくゴールへ直進できる障害物周囲をフロント周囲、そうでない障害物周

囲をバック周囲と定義する(図3)。移動体は、障害物を時計回り[反時計回り]に辿るとき、外積 $V_G \times V_S$ が負[正]ならフロント周囲にあり、正[負]ならバック周囲にいる。ここで、移動体からゴールへ方向をゴールベクトル V_G と定義する。センサベクトルプランニングでは、移動体は障害物をそのバック周囲で辿り、そのフロント周囲から離れることを基本とする。我々は、これを“物理条件”と呼ぶ。したがって、外積 $V_G \times V_S$ が正から負[負から正]に変化したら、移動体は障害物から離脱できる権利を持つ(図3)。一般に、どちらの周囲も十分な長さを持つので、物理条件は外積 $V_G \times V_S$ の変化により安定に機能する。

最後に、ゴール周囲、かつ、フロント周囲をゴールフロント周囲と呼ぶ(図3)。一般に、ゴール周囲は常にフロント周囲を持つ。そして、未知空間にデッドロックフリーパスが存在する限り、移動体はゴール周囲とのみ接するので、障害物を辿るうちに必ずゴールフロント周囲へ到達する。このとき、ゴールフロント周囲からどのように離脱するかにより、移動体のゴールへの到達は左右される。このように、ゴールフロント周囲は、アルゴリズムのデッドロックフリー特性を論じるうえで重要な役割を果たすことがわかる。

3. 十分条件の領域的な一般化について

ここでは、センサベクトルプランニングアルゴリズムをデッドロックフリーにしてきた従来の十分条件を拡張する。まず、従来の十分条件は次のように記述される:「(1) ゴール方向 V_G へ直進でき、かつ、(2) ゴールへ単調に接近したところからしか障害物を離脱しない」^{3)~6)}。そして、そのようなところが障害物のまわりで見つかれば、移動体はそこから離脱したのちゴールへ到達し、アルゴリズムは正常終了する。一方、見つからなければ、デッドロックフリーパスは存在せず、アルゴリズムは異常終了する(図4)。最近、移動体をゴールへ誘導する距離を、ユークリッド距離から任意の距離に変更しても、同様のデッドロックフリー

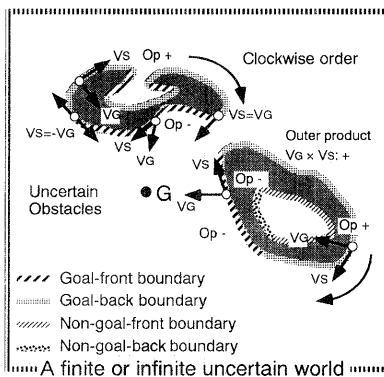


図3 未知空間における障害物のゴールフロント、ゴールバック、非ゴールフロント、そして、非ゴールバック周囲

Fig. 3 A set of goal-front, goal-back, non-goal-front, and non-goal-back boundaries in an uncertain world.

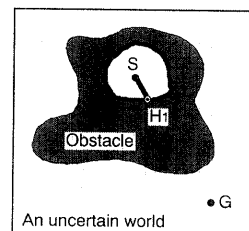


図4 未知障害物によるスタートとゴールの分断

Fig. 4 A division of start and goal points by an uncertain obstacle.

特性が示された (図 2 (b)). これは, 従来の十分条件を関数的に一般化したものとみなされる^{7),8)}.

本稿では, 従来の十分条件を領域的に一般化する (図 2 (c)). まず, 初めの項目「ゴール方向 V_G へ直進できる」はそのままにし, 次の項目「ゴールへ単調に接近する」を一般化する. ここで, 後の項目は次のように領域的に解釈される: 移動体が障害物から離れるところを点 L_{i-1} とすると, 中心を G , 半径を $L_{i-1}G$ とする円領域 S_{Li} は単調にゴールへ減少する. ここでは, 円領域 S_{Li} を自由領域 S_{Li} に置き換えても, 移動体を確実にゴールへ誘導できるよう, それをゴールへ収束させる手法について議論する.

【定理】 離脱可能領域 S_{Li} に属し, かつ, ゴール方向 V_G が障害物に妨げられないときのみ, 移動体は障害物から離脱できるものとする. このとき, スタートとゴールを結ぶパスが未知空間に存在すれば, 移動体は必ずゴールへ到達しアルゴリズムは正常終了する. 一方, そうでなければ, 移動体は必ず障害物から離脱できなくなりアルゴリズムは異常終了する. 移動体はこれらの事実をオンラインで認識できる.

一般に, 移動体が障害物から離脱するとき, 領域 S_{Li} は次のように更新される.

(1) 領域 S_{Li} は, ゴール G を含みながら単調に減少する (図 5).

(2) 領域 S_{Li} は, 現在辿っている障害物のゴールフロント周囲と交差する (図 6). □

【証明】 これは, 次の二つの補助定理から証明される. まず, 補助定理 1 は, スタートとゴールを結ぶパスが未知空間に存在すれば, 移動体は現在辿っている障害物から必ず離脱できることを示している. また, この対偶は, 移動体が障害物から離脱できなければ, そのようなパスは存在しないことを示している. 次に, 補助定理 2 は, 移動体が障害物から離脱する限り, 離

脱可能領域 S_{Li} は単調に減少し, 移動体は最終的にゴールへ到達することを示している. ■

【補助定理 1】 未知空間に, スタートとゴールを結ぶパスが存在するなら, 移動体は現在辿っている障害物から必ず離脱できる. □

(証明) まず, 未知空間に, スタートとゴールを結ぶパスが存在するなら, どの障害物もそれらを分断しない. これにより, 移動体はゴール周囲としか接触しなくなる. 一般に, ゴール周囲は必ずフロント周囲を含み, かつ, 定理より, それは必ず離脱可能領域 S_{Li} と交差する. これらのことから, 現在の障害物を辿る限り, 移動体はそれらが交差するところに必ず到達し, そこから障害物を離脱できる. 以上のことから, 題意は満足される. ■

注意 1: この補助定理 1 の対偶は, “移動体が現在辿っている障害物から離脱できなければ, スタートとゴールを結ぶパスは未知空間に存在しない” となる. これにより, 移動体は未知空間にデッドロックフリーパスが存在しないことをオンラインで認識できる.

注意 2: “スタートとゴールを結ぶパスが未知空間に存在しないなら, 移動体はある障害物から必ず離脱

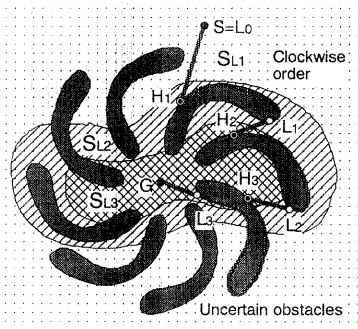


図 5 離脱可能領域 S_{Li} の単調減少性

Fig. 5 A monotonous decrease of a leave space S_{Li} .

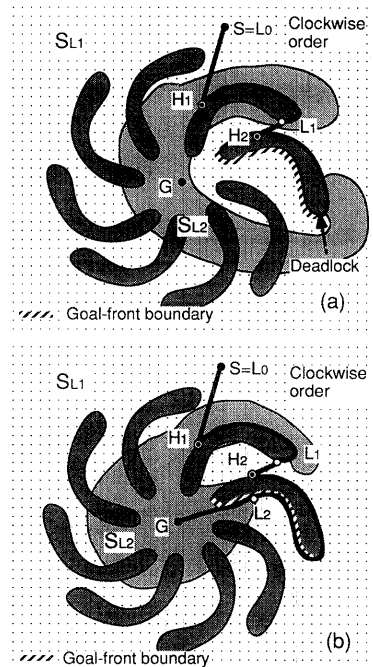


図 6 現在辿っている障害物のゴールフロント周囲と離脱可能領域 S_{Li} が交差しないときのデッドロック (a), そして, 交差するときのデッドロックフリーパス (b)

Fig. 6 A deadlock without any intersection between a space S_{Li} and a goal-front boundary around a tracing obstacle (a), and a deadlock-free path with some intersection between them (b).

できなくなる”という性質も自明である。したがって、補助定理 1 の対偶と併せて、“移動体がある障害物から離脱できないこと”は“スタートとゴールを結ぶパスは未知空間に存在しないこと”を判別する必要十分条件となる。

【補助定理 2】 移動体は、現在辿っている障害物から離脱する限り、最終的にゴールへ到達できる。□

(証明) まず、領域 S_{Li} 内のゴールフロント周囲を、移動体が離脱可能な障害物周囲 B_{Li} と定義する。次に、移動体がそれから離れたのち衝突できる障害物周囲 B_{Hi+1} は、周囲 B_{Li} で上限づけられる。なぜなら、移動体は周囲 B_{Li} から離れたのちゴールへ直進するので、その周囲 B_{Li} の点はすべて周囲 B_{Hi+1} の点、または、ゴール G と一対一に対応するからである。これにより、周囲 B_{Hi+1} の長さは最悪でも周囲 B_{Li} のそれを越えることはない (図 7)。

したがって、移動体が障害物から離れる限り、定理より、領域 S_{Li} はゴールへ単調に収束し、同時に、周囲 B_{Li} も単調に減少する。さらに、周囲 B_{Hi+1} は周囲 B_{Li} で上限づけられることから、周囲 B_{Hi+1} は最悪でも未知空間から消滅する。この結果、移動体は障害物に妨害されることなくゴールへ直進できるようになり、最終的にそれへ到達できる。したがって、題意は完全に満足される。■

注意 3: 障害物周囲 B_{Hi} が消え去らなくても、移動体はゴールへ到達することもある。したがって、補助定理 2 は、移動体がゴールへ到達するための十分条件となる。

さて、一般に、新しい十分条件の項目 (2) をアルゴリズムに取り入れることは決して容易ではない。そこで、新しい十分条件にもとづくアルゴリズムの設計を容易に設計するため、我々は次の系を提案する。

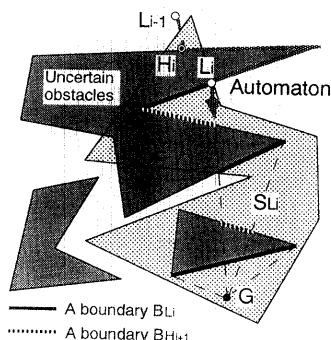


図 7 離脱可能領域 S_{Li} 内の離脱可能周囲 B_{Li} とそれに対応する衝突可能周囲 B_{Hi+1}

Fig. 7 A leave boundary B_{Li} and its corresponding hit boundary B_{Hi+1} within a leave space S_{Li} .

【系】 離脱可能領域 S_{Li} に属し、かつ、ゴール方向 V_G が障害物に妨げられないときのみ、移動体は障害物から離脱できるものとする。このとき、スタートとゴールを結ぶパスが未知空間に存在すれば、移動体は必ずゴールへ到達しアルゴリズムは正常終了する。一方、そうでなければ、移動体は必ず障害物から離脱できなくなりアルゴリズムは異常終了する。移動体はこれらの事実をオンラインで認識できる。

一般に、移動体が障害物から離脱するとき、領域 S_{Li} は次のように更新される。

(1) 領域 S_{Li} は、ゴール G を含みながら単調に減少する。

(2) 領域 S_{Li} は、現在辿っている障害物周囲の点を少なくとも一つは含む凸領域 (図 8)。□

(証明) ここでは、凸領域 S_{Li} が現在辿っている障害物周囲の点 P を含むとき、その領域はその障害物のゴールフロント周囲と必ず交差することを示す。まず、点 P とゴール G が成す線分 PG を考える (図 8)。一般に、この線分 PG は、障害物の周囲と何回も交差するが、そのうち最もゴールに近い点 Q は必ず領域 S_{Li} に含まれる。なぜなら、もしそうでなければ、領域 S_{Li} は凹領域となるからである。さらに、その点 Q は常にゴールフロント周囲に位置するので、領域 S_{Li} は障害物のゴールフロント周囲と必ず交差することがわかる。これにより、系の項目 (2) は、定理の項目 (2) を完全に満足する。■

新しい十分条件は、従来の十分条件を完全に包含したうえ、領域 S_{Li} を自由に設定できるという特徴を持つ。これにより、移動体は未知の障害物を辿りながら

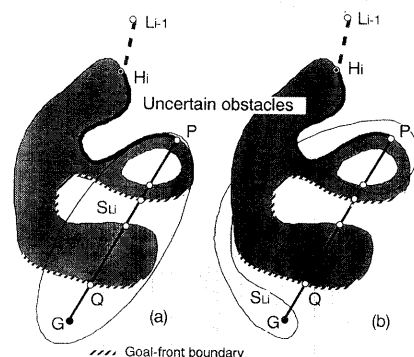


図 8 領域 S_{Li} が障害物周囲の点 P を含むとき、それが凸なら点 Q を離脱候補点として必ず含み (a)、凹なら点 Q を必ずしも含まない (b)

Fig. 8 A space S_{Li} includes a point P around a tracing obstacle. If the space S_{Li} is of convex, it always covers a point Q as a candidate of a leave point around the obstacle (a), otherwise, it does not always cover such a point Q (b).

その配置や形状を学習し、それにフィットした領域 S_{L_i} を動的に生成可能である。これより、未知空間で学習した情報をパスプランニングに活かす領域学習型センサバーストパスプランニングアルゴリズム (TLA) が設計できる。

4. 領域学習型センサバーストパスプランニングアルゴリズム

この章では、新しい十分条件の特性を活かしたセンサバーストパスプランニングアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムでは、移動体は障害物を回避したあと、それらの配置や形状を今後のパスプランニングに活かしていく。この学習機能により、移動体はそれ以後に出会う障害物をスムーズに回避し、より短いパスでゴールへ到達できる。

ここでは、離脱可能領域 S_{L_i} を障害物の配置や形状に動的にフィットさせる 4 種類のアロリズム **TLA (Territorial Learning Algorithm) 1 ~ 4** を説明する。これらはいずれも三つのステップから構成される。

[ステップ 1] まず、移動体はゴールベクトル V_G をステアリングベクトル V_S とし、スタート $S (= L_0)$ からゴール G へと直進する。次に、移動体は制御変数を初期化、すなわち、 $i = 1$ とし、離脱可能領域 S_{L_i} を全体空間とする。そして、このまま障害物に妨げられなければ、移動体はゴールへ到達し、アルゴリズムは正常終了する。

そうでなければ、まず、衝突点を H_i とし、移動体は時計回り [反時計回り] で障害物を辿る。このとき、外界センサの信号により、障害物との接点や接線をオンラインで検出し、その接線を常時ステアリングベクトル V_S とする。これにより、移動体はゆっくりではあるが忠実に障害物を辿れる。そして、ゴール G に到達すれば、アルゴリズムは正常終了し、そうでなければ、外積 $V_G \times V_S$ が正から負 [負から正] へと変化するところを離脱点 L_i とし、移動体は障害物から離れる。ただし、移動体がそのような離脱点 L_i を発見できずに点 H_i へ戻ったら、スタート S とゴール G はその障害物で分断されており、それらを結ぶパスは未知空間に存在しない。したがって、アルゴリズムは異常終了する。

そのあと、移動体はゴールベクトル V_G をステアリングベクトル V_S とし、ゴール G へ直進する。そして、移動体がゴールへ到達すれば、アルゴリズムは正常終了する。そうでなければ、制御変数をインクリメント、すなわち、 $i = i + 1$ とし、衝突点を H_i とした

のち、[ステップ 2] へと進む。

[ステップ 2] まず、領域 $S_{L_{i-1}}$ と楕円 E_{i-1} の交差により領域 S_{L_i} が形成される。このとき、楕円 E_{i-1} は次のように定義される。

(TLA1) ゴール G を中心、点 L_{i-2} と点 L_{i-1} のうちゴールから遠い方の点とゴール G が成す線分を長径、そして、近い方の点を通る楕円 E_{i-1} は一意に決定される (図 9(a))。

(TLA2) ゴール G を中心、点 H_{i-1} と点 H_i のうちゴールから遠い方の点とゴール G が成す線分を長径、そして、近い方の点を通る楕円 E_{i-1} は一意に決定される (図 9(b))。

(TLA3) ゴール G を中心、点 H_{i-1} と点 L_{i-1} のうちゴールから遠い方の点とゴール G が成す線分を長径、そして、近い方の点を通る楕円 E_{i-1} は一意に決定される (図 9(c))。

(TLA4) 衝突点 H_{i-1} から離脱点 L_{i-1} までで、 $\angle H_{i-1}GR_{i-1}$ を時計回り [反時計回り] に最大にする点 R_{i-1} (複数個あれば最もゴールから遠い点) を選択する。そして、ゴール G を中心、点 H_{i-1} と点 R_{i-1} のうちゴールから遠い方の点とゴール G が成す線分を長径、そして、近い方の点を通る楕円 E_{i-1} は一意に決定される (図 9(d))。

次に、移動体は時計回り [反時計回り] に障害物を辿る。このとき、移動体は、外界センサの信号により、障害物との接点や接線をオンラインで検出し、その接線を常時ステアリングベクトル V_S とする。これにより、移動体はゆっくりではあるが忠実に障害物を辿れる。そして、移動体がゴール G に到達すればアルゴリズムは正常終了し、そうでなければ、(1) 移動体が領域 S_{L_i} 内に位置し、かつ、(2) 外積 $V_G \times V_S$ が負 [正] のところを離脱点 L_i とし、[ステップ 3] へ進む。ただし、移動体が点 L_i を発見できずに点 H_i へ戻ってきたら、スタート S とゴール G はその障害物で分断されるので、それらを結ぶパスは存在しない。したがって、アルゴリズムは異常終了する。

[ステップ 3] 移動体はゴールベクトル V_G をステアリングベクトル V_S とし、ゴール G へ直進する。そして、このまま障害物に妨げられなければ、移動体はゴールへ到達し、アルゴリズムは正常終了する。そうでなければ、制御変数をインクリメント、すなわち、 $i = i + 1$ とし、衝突点を H_i としたのち、[ステップ 2] へ戻る。

注意 4: これらのアルゴリズムのデッドロックフリー特性は、衝突点 H_i を現在辿っている障害物周囲の点 P とみなすことで系より保証される。

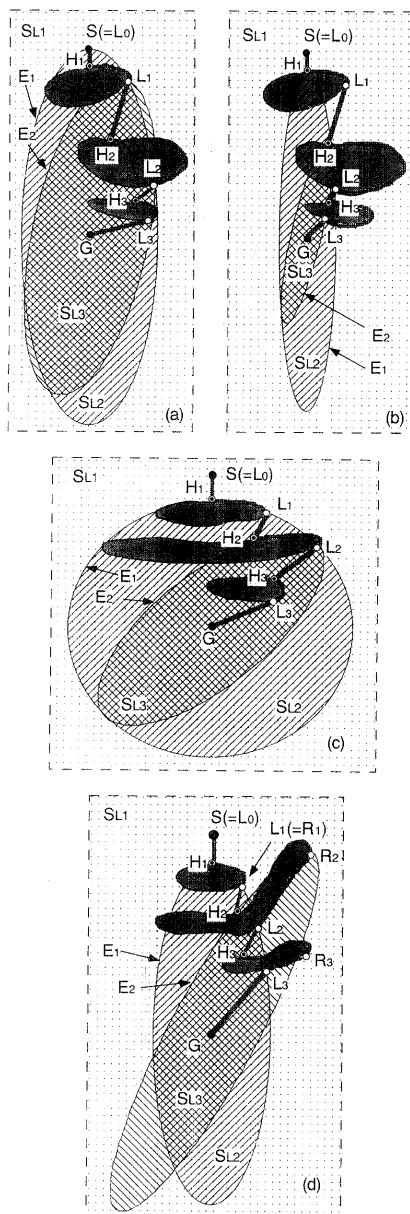


図9 領域学習型アルゴリズム $TLA1$ (a), $TLA2$ (b), $TLA3$ (c),
そして, $TLA4$ (d) が生成する異なるデッドロックフリーパスの形状

Fig. 9 A shape set of deadlock-free paths made in our territorial learning algorithms $TLA1$ (a), $TLA2$ (b), $TLA3$ (c) and $TLA4$ (d) in uncertain worlds.

最後に, アルゴリズム $TLA1$ と $TLA2$ は, 連続で衝突した障害物の配置に依存して領域 SL_i を学習する. また, アルゴリズム $TLA3$ と $TLA4$ は, 個々の障害物の形状に依存して領域 SL_i を学習する. 未知空間では, これまで辿ってきた障害物の配置や形状は貴重な情報であり, それを今後のプランニングに活かす

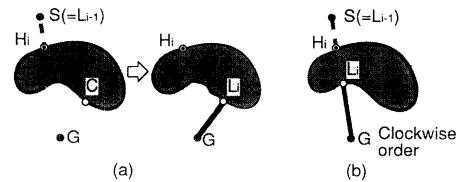


図10 ルメスキーのアルゴリズム $Bug1$ (a) と $Bug2$ (b) が生成する異なるデッドロックフリーパスの形状

Fig. 10 A shape set of different paths made in Lumelsky's algorithms $Bug1$ (a) and $Bug2$ (b) in an uncertain world.

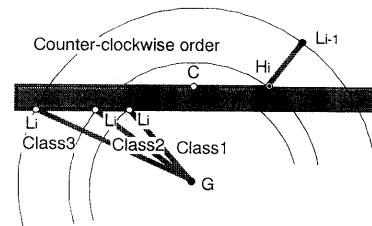


図11 我々のアルゴリズム $Class1 \sim 3$ が生成する異なるデッドロックフリーパスの形状

Fig. 11 A shape set of different paths made in our algorithms $Class1 \sim 3$ in an uncertain world.

ばスムーズなパスが選択できる. この様な学習アルゴリズムが自由に設計できるという観点からも, 一般化十分条件の有用性は容易に理解できる.

5. シミュレーション結果

ここでは, 領域的に一般化された十分条件が従来のものに比べて有用なことを示すため, それらにもとづくアルゴリズムを種々の未知空間に適用し, 生成されたパスの長さや形状を検討する.

まず, 従来の十分条件から, ルメスキーのアルゴリズム $Bug1$ と $Bug2$, そして, 我々のアルゴリズム $Class1 \sim 3$ を選択する. それらは, 現在辿っている障害物から離脱する方法のみがアルゴリズム TLA と異なる. そこで, その違いに焦点を当てて, 従来のアルゴリズムを説明する.

Bug1: 移動体は, 時計回り [反時計回り] に障害物を一周する. そして, 最もゴールに接近した点 C まで戻り, そこを離脱点 L_i として障害物から離れる (図10(a)).

Bug2: 移動体は, 時計回り [反時計回り] に障害物を辿る. そして, 基準線 SG 上に位置し, 衝突点 H_i よりもゴールに近く, かつ, ゴール方向 V_G が障害物によって妨げられないところを離脱点 L_i とし, 移動体は障害物から離れる (図10(b)).

Class1: 移動体は, 時計回り [反時計回り] に障

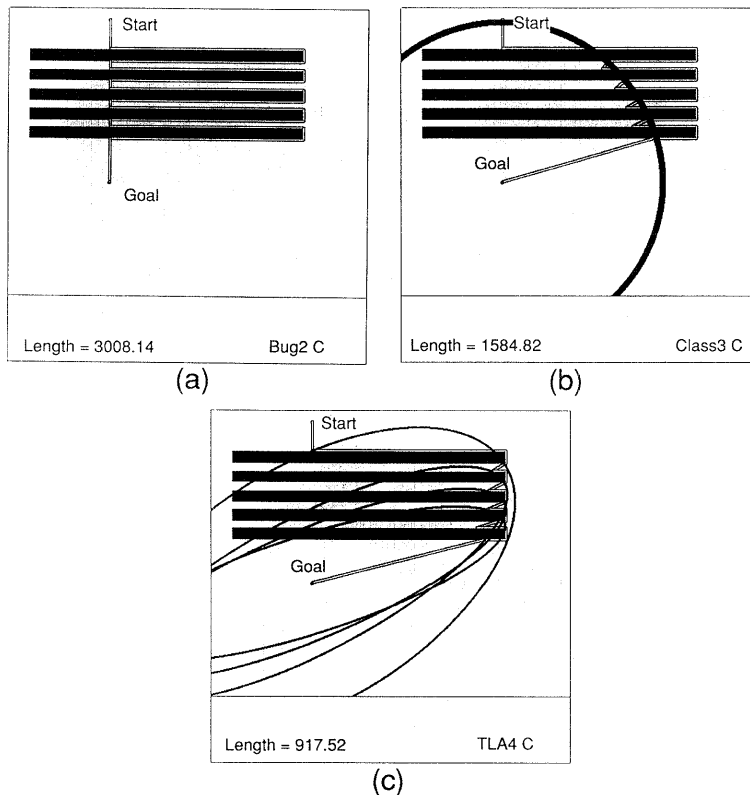


図 12 長方形の障害物が規則正しく並ぶ空間 $W1$ において、従来の十分条件にもとづくメルスキーのアルゴリズム *Bug2* (a) や我々のアルゴリズム *Class3* (b), そして、今回の十分条件にもとづく領域学習型アルゴリズム *TLA4* (c) が時計回りに生成する典型的なデッドロックフリーパスの形状

Fig. 12 A shape set of typical paths with the clockwise tracing by the Lumelsky's algorithm *Bug2* (a) and our algorithm *Class3* (b) based on the old sufficient condition, and by our territorial learning algorithm *TLA4* (c) based on the new sufficient condition in a simple world $W1$ with rectangular obstacles.

表 1 長方形の障害物が規則正しく並ぶ空間 $W1$ で従来と今回の十分条件にもとづくアルゴリズムが生成するデッドロックフリーパスの長さの比較

Table 1 A length comparison of all deadlock-free paths made in typical algorithms based on the old and new sufficient conditions in a simple world $W1$ with rectangular obstacles.

	Bug		Class			TLA			
	1	2	1	2	3	1	2	3	4
Clockwise	5471	3009	2208	2208	1585	1023	1203	918	918
C-clockwise	5471	1379	571	571	472	552	579	494	494

害物を辿る。そして、最もゴールに接近した点 C よりもゴールに近く、かつ、ゴール方向 V_G が障害物によって妨げられないところを離脱点 L_i とし、移動体は障害物から離れる (図 11)。

Class2: 移動体は、時計回り [反時計回り] に障害物を辿る。そして、衝突点 H_i よりもゴールに近く、かつ、ゴール方向 V_G が障害物によって妨げられないところを離脱点 L_i とし、移動体は障害物から離れる

(図 11)。

Class3: 移動体は、時計回り [反時計回り] に障害物を辿る。そして、離脱点 L_{i-1} よりもゴールに近く、かつ、ゴール方向 V_G が障害物によって妨げられないところを離脱点 L_i とし、移動体は障害物から離れる (図 11)。

次に、一般化十分条件からは、前述の領域学習型センサバーストパスプランニングアルゴリズム *TLA1* ~

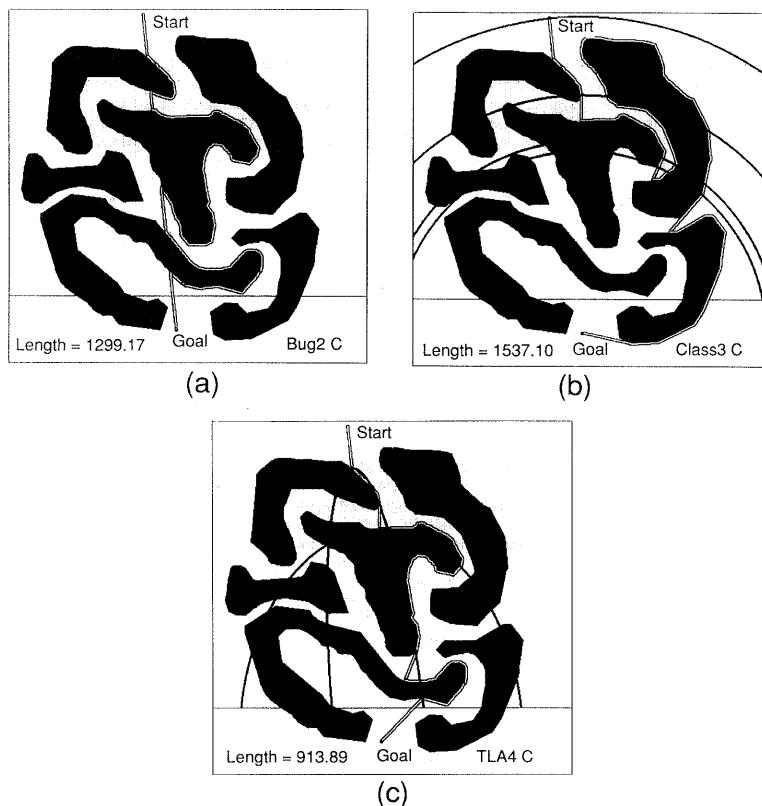


図 13 スタートやゴールを取り囲まない凹形状の障害物が散らかった空間 $W2$ において、従来の十分条件にもとづくルメルスキーのアルゴリズム *Bug2* (a) や我々のアルゴリズム *Class3* (b)、そして、今回の十分条件にもとづく領域学習型アルゴリズム *TLA4* (c) が時計回りに生成する典型的なデッドロックフリーパスの形状

Fig. 13 A shape set of typical paths with the clockwise tracing by the Lumelsky's algorithm *Bug2* (a) and our algorithm *Class3* (b) based on the old sufficient condition, and by our territorial learning algorithm *TLA4* (c) based on the new sufficient condition in a complicated world $W2$ whose obstacles do not enclose the start and goal.

表 2 スタートやゴールを取り囲まない凹形状の障害物が散らかった空間 $W2$ で従来と今回の十分条件にもとづくアルゴリズムが生成するデッドロックフリーパスの長さの比較

Table 2 A length comparison of all deadlock-free paths made in typical algorithms based on the old and new sufficient conditions in a complicated world $W2$ whose obstacles do not enclose the start and goal.

	Bug		Class			TLA			
	1	2	1	2	3	1	2	3	4
Clockwise	3606	1300	1543	1543	1538	939	954	916	914
C-clockwise	3606	2020	878	878	886	970	981	939	928

4を選択する。最後に、種々の未知空間として、まず、長方形の障害物が規則正しく配置されている空間 $W1$ 、凹形状の障害物が簡単に絡み合っている空間 $W2$ 、そして、凹形状の障害物が複雑に絡み合っている空間 $W3$ を選択し、それぞれにアルゴリズムがどのようなパスを生成するかについて検討する。

まず、空間 $W1$ において、従来、そして、今回のアルゴリズムが生成する典型的なパスを図 12 に示し、

すべてのパスの長さを表 1 にまとめた。まず、アルゴリズム *Bug1* では、移動体は衝突した障害物を常に一周するので、どうしてもパスが長くなってしまふ。また、アルゴリズム *Bug2* は、基準線 SG が個々の障害物を回避するのに不適切なとき、長いパスを選択してしまう。一方、アルゴリズム *Class1* ~ *3* は、そのような基準線を持たないので、スタートとゴールの配置によらず平均的なパスを選択する。一方、領域学習型ア

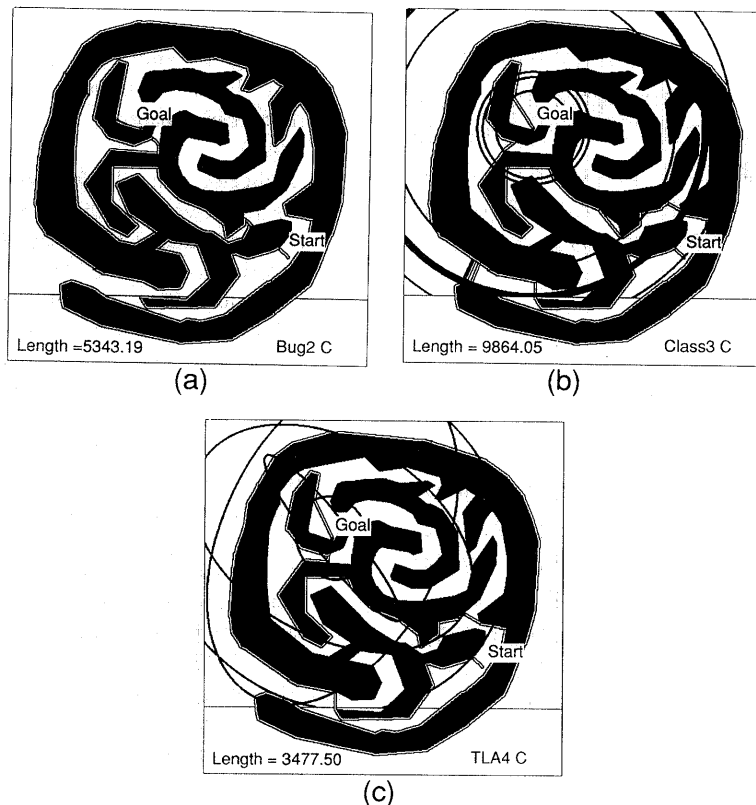


図 14 スタートやゴールを取り囲む凹形状の障害物が絡まり合った空間 $W3$ において、従来の十分条件にもとづくメルスキーのアルゴリズム *Bug2* (a) や我々のアルゴリズム *Class3* (b)、そして、今回の十分条件にもとづく領域学習型アルゴリズム *TLA4* (c) が時計回りに生成する典型的なデッドロックフリーパスの形状

Fig. 14 A shape set of typical paths with the clockwise tracing by the Lumelsky's algorithm *Bug2* (a) and our algorithm *Class3* (b) based on the old sufficient condition, and by our territorial learning algorithm *TLA4* (c) based on the new sufficient condition in a complicated world $W3$ whose obstacles enclose the start and goal.

表 3 スタートやゴールを取り囲む凹形状の障害物が絡まり合った空間 $W3$ で従来と今回の十分条件にもとづくアルゴリズムが生成するデッドロックフリーパスの長さの比較

Table 3 A length comparison of all deadlock-free paths in typical algorithms based on the old and new sufficient conditions in a complicated world $W3$ whose obstacles enclose the start and goal.

	Bug		Class			TLA			
	1	2	1	2	3	1	2	3	4
Clockwise	7145	5344	5173	4296	9865	3479	3522	3473	3478
C-clockwise	7145	988	4712	4512	4592	827	1580	724	724

ルゴリズム $TLA1 \sim 4$ 、特に $TLA3$ や $TLA4$ は、個々の障害物を回避するのに適した離脱可能領域を学習するので、短いパスを柔軟に選択している。

次に、空間 $W2$ において、従来、そして、今回のアルゴリズムが生成する典型的なパスを図 13 に示し、すべてのパスの長さを表 2 にまとめた。このときにも、前述のような特性がみられるが、空間形状が複雑になった分、アルゴリズム $Class1 \sim 3$ のアルゴリズム

Bug2 に対する優位性、さらには、アルゴリズム $TLA1 \sim 4$ のそれ以外のアルゴリズムに対する優位性が後退している。これは、移動体が障害物から安易に離れることで、かえって遠回りのパスを選択するという理由による。

最後に、空間 $W3$ において、従来、そして、今回のアルゴリズムが生成する典型的なパスを図 14 に示し、すべてのパスの長さを表 3 にまとめた。このときには、

アルゴリズム *Bug2* はアルゴリズム *Class1* ~ 3 よりも優位にたつ。これは、ここまで空間形状が複雑になると、移動体は簡単に障害物から離れるとかえって遠回りをするので、適切な基準線、または、適切な離脱可能領域に沿って行動するのが望ましいという理由による。このことから、領域学習型アルゴリズム *TLA1* ~ 4 も比較的短いパスを選択している。

6. おわりに

本稿では、まず、センサベースパスプランニングをデッドロックフリーにしてきた従来の十分条件を領域的な観点から拡張した。次に、この一般化十分条件にもとづき、領域学習型センサベースパスプランニングアルゴリズムを提案し、従来のものよりも短いパスを安定に選択できることを種々の空間で確認した。これにより、アルゴリズムの設計幅が広がり、良質のものが柔軟に設計できるという事実が確認された。

謝辞 本研究の一部は、平成3年度文部省科学研究補助金(課題番号03780039)の援助を受けています。ここにそれを記し謝意に代えさせていただきます。

参 考 文 献

- 1) Lumelsky, V.J.: Algorithmic and Complexity Issues of Robot Motion in an Uncertain Environment, *J. Complexity*, Vol.3, pp.146-182 (1987).
- 2) Lumelsky, V.J. and Stepanov, A.A.: Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape, *Algorithmica*, Vol.2, pp.403-430 (1987).
- 3) Noborio, H.: A Path-Planning Algorithm for Generation of an Intuitively Reasonable Path in an Uncertain 2d Workspace, *Proc. of the 1990 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, Kyoto, Japan, Vol.3, pp.477-480 (July 1990).
- 4) Noborio, H.: Several Path-Planning Algorithms of a Mobile Robot for an Uncertain Workspace and Their Evaluation, *Proc. of the IEEE Int. Work. Intel. Motion Control*, Istanbul, Turkey, Vol.1, pp.289-294 (Aug. 1990).
- 5) 登尾啓史: 未知空間におけるパスプランニングアルゴリズムを設計するための十分条件とそれにもとづくアルゴリズムの評価, 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.8, pp.1013-1021 (1992).
- 6) Noborio, H.: A Sufficient Condition for Designing a Family of Sensor-Based Deadlock-Free Path-Planning Algorithms, *Journal of Advanced Robotics*, Vol.7, No.5, pp.413-433 (1993).
- 7) Noborio, H.: A Functional Extension of the Sufficient Condition to Design a Family of Sensor-Based Deadlock-Free Path-Planning Algorithms, *Proc. of the IECON'94*, Bologna, Italy, pp.1057-1062 (Sep. 1994).
- 8) 登尾啓史: センサベースパスプランニングをデッドロックフリーにする十分条件の関数の一般化について, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.10, pp.1769-1777 (1995).
- 9) 大矢晃久, 永島良昭, 油田信一: 超音波による壁面の法線方向の高速測定, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, pp.700-703 (1995).
- 10) Ando, Y. and Yuta, S.: Following a Wall by an Autonomous Mobile Robot with a Sonar-Ring, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, pp.2599-2606 (May 1995).
- 11) Kleeman, L. and Kuc, R.: Mobile Robot Sonar for Target Localization and Classification, *Int. J. Robotics Research*, Vol.14, No.4, pp.295-318 (1995).

(平成6年11月17日受付)
(平成7年10月5日採録)



登尾 啓史 (正会員)

昭和33年生。昭和57年静岡大学工学部情報工学科卒業。昭和59年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。昭和62年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻機械工学分野博士課程修了。工学博士。同年大阪大学基礎工学部機械工学科助手。昭和63年大阪電気通信大学工学部精密工学科講師, 助教授を経て, 平成7年同大学情報工学部情報工学科助教授。移動ロボットのナビゲーションアルゴリズム, ロボット・マニピュレータのモーションプランニングアルゴリズムやバーチャルリアリティ等の知能情報学・知能機械学・人間機械系に興味を持つ。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 電子情報通信学会, IEEE, ACMの会員。