障害物が密集する未知環境で位置や姿勢の誤差を克服する

センサベースナビゲーション†

吉岡 孝*・登尾 啓史**・富永 昌治**

On the Sensor-Based Navigation for Overcoming Position and Orientation Errors

in a Dense 2D Uncertain Environment

Takashi YOSHIOKA*, Hiroshi NOBORIO** and Shoji TOMINAGA**

In the last decade, many algorithms have been proposed for sensor-based navigation, which keep convergence of a mobile robot to its goal in a 2D uncertain environment. From the convergence viewpoint, all the previous algorithms are categorized into three types of metric, topologic, and geometric algorithms. If position and orientation errors occur, a mobile robot unfortunately gets lost in each type of algorithm. Especially if a mobile robot should trace the boundary of an obstacle faithfully in a dense 2D environment, the metric algorithm is damaged with a small position error, and also the topologic algorithm is destroyed with even the smallest position error. In such a case, we are obliged to rely on the geometric algorithm. This paper proposes a geometric algorithm for sensor-based navigation when a mobile robot is ready for position and orientation errors in a dense 2D uncertain environment. In the proposed algorithm, a robot never joins deadlock (cyclic motion) and consequently arrives near its goal if and only if position and orientation errors are of finite. The wider a free region exists around a goal, the larger bounds of the errors become. Finally it is confirmed theoretically and experimentally that the proposed algorithm makes a robot converge into the neighborhood close to a goal.

Key Words : sensor-based navigation, gross and stable navigation, position and orientation errors, a dense 2D uncertain environment

1. はじめに

移動ロボットにとって、目的地へ到達するために障害物を回避するナビゲーションは重要な機能であり、70年代の後半からモデルベースアルゴリズム^{1)~3)}、80年代の中頃からセンサベースアルゴリズム^{4)~8)}が研究されてきた。このうち、センサベースナビゲーションでは、移動ロボットはゴール方向が空いているかどうか調べ、その方向が障害物で妨げられていなければ“ゴールへ直進する行動”、さもなくば“障害物を回避する行動”を選択する。この選択条件を“物理的条件”と呼ぶ。なぜなら、それは障害物の位置や形状などの物理的性質に依存するからである。一般に、この物理的条件に基づくと、突然目の前に現われる障害物をオンラインで回避できるという柔軟性が得られる。しかし、物理的条件のみでは、移動ロボットはデッドロック(無限ループ)に陥ることがあり、必ずしもゴールへ到達

できない。

このため、従来のセンサベースアルゴリズムは、距離、位相、あるいは幾何的な条件で、移動ロボットを決してデッドロックに陥らせないようにしている⁹⁾。まず、距離条件は、ゴールへ接近するよう障害物から離れることで、移動ロボットの行動空間を単調に絞り込み、そのゴールへの到達を保証する条件である^{5), 6)}。位相条件は、線分SG(スタートS, ゴールG)、ならびに、それが交差する障害物周囲の位相的性質を用いて、アルゴリズムの探索空間(移動ロボットの行動空間)を絞り込む条件である⁷⁾。また、幾何条件は、各々の障害物の幾何的性質を用いて、探索空間(行動空間)を単調に減少させる条件である⁸⁾。従来からよく知られている“デッドロックフリー特性”とは、未知空間にゴールへ至るパスが存在すれば、移動ロボットはデッドロックに陥らずゴールへ到達し、さもなくば必ずデッドロックに陥りパスが存在しないことを認知できる性質のことである。このデッドロックフリー特性は、距離、位相、あるいは幾何的な条件のいずれかを満たせば達成される。

本稿では、移動ロボットが障害物までの距離を十分に確保できない未知環境—密集環境—を想定する。このとき、たとえ移動ロボットが位置や姿勢の誤差を生じて、外界センサが障害物を正確に計測できれば、ゴール付近まで必ず到達できる幾何アルゴリズムを提案する。また、その特性—グロスデッドロッ

† 1995 Int. Conf. on Advanced Robotics で一部発表(1995.9)

* 大阪電気通信大学大学院工学研究科 寝屋川市初町 18-8

* Graduate School of Engineering, Osaka Electro-Communication University, Neyagawa

** 大阪電気通信大学情報工学部

** Faculty of Information Science & Technology, Osaka Electro-Communication University, Neyagawa

(Received March 7, 1997)

(Revised November 19, 1997)

クフリー特性—を理論的かつ実験的に証明する。我々はこれに先立って次のような検討をしてきた。

(1) 外界センサが障害物を正確に計測できれば、従来のアルゴリズムがグロスデッドロックフリー特性を維持できる位置や姿勢の誤差のクラスを“同相誤差”とした¹⁰⁾。これは、従来のアルゴリズムをそのまま用いてもグロスデッドロックフリー特性が維持されるのは、真の位置と計測位置の写像が同相写像になるときのみであることを示したものである。

(2) 障害物が疎らな—移動ロボットは障害物までの距離を十分に確保できる—未知環境において、位置・姿勢・センサ誤差を克服する距離アルゴリズムを提案し、そのグロスデッドロックフリー特性を証明した^{11), 12)}。

さて第2章で、移動ロボットやその行動環境、位置誤差、そして姿勢誤差を説明したのち、グロスデッドロックフリー特性を定義する。これは、ゴールへ至るパスが未知環境に存在すれば、移動ロボットは決してデッドロックに陥らず、位置誤差の分だけゴールから離れたところに到達し、そうでなければ、移動ロボットは必ずデッドロックに陥りパスが存在しないことを認知できる特性である(詳細は次章)。第3章では、位置誤差を仮定すると、位相条件は未知環境で正しく機能せず、移動ロボットは誤行動よりデッドロックに陥る場合のあることを示す。また、障害物の間隔が狭い未知環境(以後、密集環境と記す)では、距離条件の誤動作によるロボットの誤行動より、移動ロボットがデッドロックに陥る例を示す。第4章では、幾何アルゴリズムRobust、および、誤差を安定に処理できるアルゴリズムNC-Robust*を提案する。第5章では、誤差が存在しない未知環境ではRobustが、また、位置や姿勢の誤差が発生する密集環境でもNC-Robust*が安定に機能することを証明する。第6章では、アルゴリズムNC-Robust*を実機ロボットNomad200にインストールし、誤差に対する安定性を実験で確かめる。第7章はまとめである。

2. 移動ロボットと行動環境、および、3種類の誤差

本研究では、移動ロボットは円(半径 R_R)で表現され、2次元の未知環境を全方向に行動できるものとする。障害物の位置や形状は自由でよいが、その周囲は接線が単調に変化する程度に滑らかなものとする。また、障害物の個数や周囲長を有限とし、移動ロボットが永遠に障害物と接近・離脱し続けたり、障害物の周囲を永遠に回避し続ける可能性を除外する。

まず、Dead Reckoning System (DRS), または、Global Positioning System (GPS)より、移動ロボットの中心位置 R^* は R と推測される。本稿では、この推測位置 R と真の位置 R^* の差を位置誤差と定義する。そして、位置 R を“ロボットの頭”, その行動空間をコンピュータ世界(CW)とする。一方、位置 R^* を“ロボットの体”, その行動空間を現実世界(RW)とする。DRSやGPSによると、頭 R が中心の誤差楕円 EE または誤差円 EC の中に体 R^* は一定の確率で存在する。前者は多くの研究より明らかで¹³⁾、後者はガウス分布の位置誤差を一定の確率で閾値処理すれば得られる。このとき、楕円 EE または円 EC を含む最小円を誤差領域 $EP(R)$ (半

径 $RP(R)$)と定義する(Fig.1)。DRSは、走行距離に比例して位置や姿勢の誤差、すなわち、領域 $EP(R)$ を増加させるが、GPSは、誤差を累積させず領域 $EP(R)$ を一定に保つ。

次に、移動ロボットの外界センサは、障害物の法線ベクトル V_N や障害物までのユークリッド距離 d を正しく計測できるものとする。移動ロボットは超音波センサのリングで全方向に障害物を検出する。このとき、障害物と十分接近し(約1m以内)、壁面に相対すれば(約 $\pm 20^\circ$ 以内)、ベクトル V_N や距離 d が精度良く検出できるという報告もある¹⁴⁾。さて、“障害物を回避する行動”では、接線ベクトル V_T が重要な役割を果たす。このベクトル V_T は、法線ベクトル V_N に垂直な2つのベクトルのうち回避方向のものである(Fig.1)。

さらに、“ゴールへ直進する行動”では、移動ロボットはベクトル $V_B(=SG)$ に沿って進む。しかし、DRSまたはGPSによると、移動ロボットは姿勢も誤認識し、頭 R が V_B 方向に進んでも、体 R^* は V_{B^*} 方向にしか進まない。本稿では、この角度差を姿勢誤差と定義する。この誤差の影響より、頭 R がコンピュータ世界(CW)で V_T 方向に進むとき、体 R^* は現実世界(RW)で V_{T^*} 方向に進む。このとき、頭 R の V_B から V_T までの角度 $Angle$ は、体 R^* の V_{B^*} から V_{T^*} までの角度 $Angle^*$ と一致する。これが障害物の幾何的な性質を取り出すもとなる。

定義1 位置や姿勢の誤差を仮定すると、頭 R が真のゴール G に到達しても、体 R^* は“架空のゴール G^* ”にしか到達しない。本研究では、ゴール G のまわりに自由領域 FG を設定し、障害物がゴール G^* を占めたり、 G と G^* を分断するのを防いでいる。ここで、領域 FG の半径 R_G はロボットの半径 R_R と誤差領域の直径 $2RP(R)$ の和より常に大きいものとする。これより、位置誤差は不等式 $R_G - R_R > 2RP(R)$ で直接的に制約され、姿勢誤差は角度 α ($\sin \alpha = (R_G - R_R) / 2 |SG|$)で間接的に制約される(Fig.1)。これは、自由領域 FG が広くなればなるほど、許される位置や姿勢の誤差が大きくなることを示している。○

Fig.1 A mobile robot exactly detects its normal and tangential vectors V_N and V_T of an uncertain obstacle by rings of outer sensors. In addition, the robot misunderstands its orientation vector V_{B^*} as V_B , and misunderstands its position R^* as R by DRS or GPS.

このとき、アルゴリズムのグロスデッドロックフリー特性は次のように定義される。

定義2 未知環境にゴール G までのパスが存在するとき、体 R^* は自由領域 FG に到達し(Fig.2(a)), そうでなければ、頭 R はパスが存在しないと判断する(Fig.2(b)). この性質を“グロスデッドロックフリー特性”と定義する。○

Fig.2 (a) A body R^* arrives near its goal G within a free region FG . (b) A head R sees no deadlock-free path in an uncertain 2D environment by comparing d^* with T .

さて、移動ロボットが障害物を辿るとき、不等式 $d \geq 2Rp(R)-Rr$ の満足されないことがあれば、距離条件はグロスデッドロックフリー特性を維持できず、位相条件に至っては、微小の位置誤差でもグロスデッドロックフリー特性を維持できない。したがって、前述の不等式が満足できない障害物狭間を通らなければゴールへ到達できない未知環境、すなわち、密集環境では、どちらの条件もグロスデッドロックフリー特性を維持できない。一般に、このような状況は、GPSの精度が悪かったり、DRSで長距離走行したときに起こる。しかし、そのような状況でも、障害物壁面の接線が正確に計測できれば、幾何条件は正しく機能し、グロスデッドロックフリー特性は維持できる。

一般に、ロボット・マニピュレータのアセンブリと異なり、移動ロボットのナビゲーションは必ずしも高い位置決め精度を要しないので、定義1や2は有用と考える。

3. 位置誤差が距離条件や位相条件に与える影響

従来の物理的条件は、接触フォロイング移動ロボットが接触しながら障害物を回避する一を前提としていたが、これはロボット(センサを含む)の実情に合わない。そこで、まず、それを非接触フォロイング移動ロボットは非接触で障害物を回避する一を前提とした物理的条件に修正する。次に、位置誤差が距離条件や位相条件に与える影響を理論的に考察する。

従来の物理的条件は、『移動ロボットが時計回り[反時計回り]に障害物を辿るとき、ゴールベクトル V_G が障害物に妨げられなければ(Fig.3(a)の○表示のとき)、ベクトル V_G を V_S とし、そうでなければ(Fig.3(a)の×表示のとき)、時計回り[反時計回り]の接線ベクトル V_T を V_S として進む』であった。しかし、非接触フォロイングでは、ベクトル V_G は決して障害物に妨げられないので、従来の物理的条件は意味をなさない。そこで、それを『移動

ロボットが時計回り[反時計回り]に障害物を辿るとき、外積 $V_G \times V_T$ が負または0[正]なら、ベクトル V_G を V_S 、そうでなければ、時計回り[反時計回り]の接線ベクトル V_T を V_S として進む』—新物理的条件—に変更する(Fig.3(b)).

Fig.3 (a) Previous physical condition. (b) New physical condition.

さて従来、種々の誤差がアルゴリズムにどのような影響を与えるのか全く議論されなかった。ここでは、距離条件や位相条件のグロスデッドロックフリー特性は、位置誤差に対して不安定になる(移動ロボットが誤ってデッドロックに陥ることがある)ことを証明する。まず、距離条件に基づくアルゴリズムClass3を説明する⁶⁾。

Class3: 移動ロボットは基本的にゴール G へ直進するが、その方向が障害物に妨げられたなら、移動ロボットは時計回り[反時計回り]に障害物を辿る。そして、前回の離脱点 L_{i-1} よりもゴール G に近く、かつ、外積 $V_G \times V_T$ が負または0[正]—新物理的条件—のところを離脱点 L_i とし、移動ロボットは障害物を離れ、再びゴール G へ直進する。そして、ゴール G に到着すればアルゴリズムを終了する(Fig.4(a)).

まず、位置誤差の影響より、移動ロボットは R^* を R 、そして、衝突点 H_i^* や離脱点 L_i^* を H_i や L_i と誤認識する。したがって、 L_i^* の G への接近は、円 $EP(L_i)$ を介して考えざるを得ない。このとき、“ L_i^* が G に接近する”ための十分条件は、“円 $EP(L_i)$ がゴール G に接近する”ことである。具体的には、“円 $EP(L_{i-1})$ で最もゴール G に近い点より、円 $EP(R)$ で最もゴール G から遠い点のほうが

Fig.4 (a) A deadlock-free path generated by the algorithm Class3. (b) Another deadlock-free path generated by the algorithm Curv1.

ゴール G に近くなれば、現在地 R を離脱点 Li とみなす”という条件—新距離条件—である。これは、円 $EP(Li)$ をゴール G に接近させることで、その中の体 R^* を間接的にゴール G へ近づけることを意味する。ここで、障害物を辿るとき、不等式 $d < 2Rp(R) - Rr$ が起これば、頭 R は新距離条件を満足できず、体 R^* はデッドロック(無限ループ)に陥ることがある(Fig.5(a))。一方、常に不等式 $d \geq 2Rp(R) - Rr$ が成り立てば、頭 R も常に新距離条件を満足し、体 R^* は必ずゴール付近へ到達する^{11), 12)}。

これより、距離条件は必ずしも正しく機能しないと断じて良いが、念のためもう一端の解釈を考える。それは、“ L^* が G に接近する”ための必要条件、すなわち、“円 $EP(Li-1)$ で最もゴール G から遠い点より、円 $EP(R)$ で最もゴール G に近い点のほうがゴール G に近ければ、現在地 R を離脱点 Li とみなす”という条件である。しかし、ゴールを取り囲む凹形状の障害物のまわりで、頭 R はこの必要条件を簡単に満足し、体 R^* は早々に障害物を離れデッドロックに陥る(Fig.5(b))。また、これら両極端の解釈のあいだにグロスデッドロックフリー特性を満足する解釈もないことから、距離アルゴリズムのそれは密集環境では保証できない。

Fig.5 There is no way for dealing with a random error (an error region $EP(R)$) in order to keep the deadlock-free characteristic in all metric algorithms.

次に、位相条件に基づくアルゴリズム *Curv1* を説明する⁷⁾。

Curv1: 移動ロボットは基本的にゴール G へ直進するが、その方向が障害物に妨げられたなら、移動ロボットは時計回りに障害物を辿る。そして、線分 SG を横切るとき、外積 $V_G \times V_T$ が負または0 [正]—新物理的条件—なら、カウンタ CL をデクリメント [インクリメント] する。そして、カウンタ CL がゼロで線分 SG に達したとき、移動ロボットは障害物から離れ再びゴール G へ直進する。そして、ゴール G に到着すればアルゴリズムを終了する(Fig.4(b))。

まず、位置誤差の影響より、移動ロボットは R^* を R と誤認識する。したがって、体 R^* と線分 SG の交差は円 $EP(R)$ を介して考えざるを得ない。“体 R^* が線分 SG と交差する”ための十分条件

は、“円 $EP(R)$ が完全に線分 SG を通過すること”である。しかし、線分 SG に切断された障害物の少なくとも一方が円 $EP(R)$ よりも小さければ、体 R^* が障害物を一周しても、頭 R はこの十分条件を満足せず、無限ループ(デッドロック)に陥る(Fig.6(a))。

これをもって位相条件は正確に機能しないと断じて良いが、念のためもう一端の解釈を考える。それは、“体 R^* が線分 SG と交差する”ための必要条件、すなわち、“円 $EP(R)$ が線分 SG と接する”という条件である。しかし、ゴールを取り囲む凹形状の障害物のまわりで、頭 R はこの必要条件を簡単に満足し、体 R^* は早々に障害物を離れ無限ループ(デッドロック)に陥る(Fig.6(b))。また、これら両極端の解釈のあいだにグロスデッドロックフリー特性を満足する解釈のないことも明らかである。最後に、スタート S とゴール G は任意に選ばれるので、線分 SG に切断された障害物の少なくとも一方は限りなく小さくなることがある。これより、位相アルゴリズムのグロスデッドロックフリー特性は、いかなる環境でも保証されない。

Fig.6 There is no way for dealing with a random error (an error region $EP(R)$) in order to keep the deadlock-free characteristic in the topologic algorithm.

4. 幾何センサベーストナビゲーションアルゴリズム

本章では、幾何アルゴリズム *Robust*、そして、誤差を安定に処理できる幾何アルゴリズム *NC-Robust** について説明する。

4.1 幾何アルゴリズム *Robust*

これは、任意の方向(たとえば北の方向)にロボットを誘導するアルゴリズム *Pledge*^{7), 15)} を2つの点で修正したアルゴリズムである(Fig.7(a),(b))。

(1) 線分条件: 移動ロボットは、線分 SG 以外から障害物を離れない。

(2) 幾何条件: 移動ロボットは未知の障害物を辿りながら、基本ベクトル $V_B(=SG)$ から接線ベクトル V_T までの角度 $Angle$ 一回避方向を正とする—を算出する。そして、角度 $Angle$ が範囲 $[0^\circ, +180^\circ)$ にあるときのみ、移動ロボットは障害物を離れられる。

Fig.7 (a) A deadlock-free path generated by the geometric algorithm *Pledge*. (b) A deadlock-free path generated by the geometric algorithm *Robust*.

このアルゴリズムは、次の3つのルーチンから構成される (Fig.8).

0. ベクトル SG を基本ベクトル V_B とし, 1. へ進む.

1. 次の事柄が起こるまで, 移動ロボットは V_B を V_S とし, ゴールへ直進する. なお, 移動ロボットは常に V_S 方向へ進む.

(1a) 移動ロボットがゴール G に到達したら, アルゴリズムを終了する.

(1b) 移動ロボットが障害物に出会ったら, 2. へ進む.

2. 移動ロボットは衝突点 H を記憶し, V_T を V_S として障害物を迂る.

(2a) 移動ロボットがゴール G に到達したら, デッドロックフリーパスを発見したのでアルゴリズムを終了する.

(2b) 移動ロボットが線分 SG に到達したら角度 $Angle$ を調べ, それが範囲 $[0^\circ, +180^\circ]$ に入れば 1. へ戻る.

(2c) 移動ロボットが衝突点 H に戻ったら, デッドロックフリーパスは存在しないのでアルゴリズムを終了する.

ここでは, アルゴリズム *Robust* と *Curv1* の違いを考える. どちらのアルゴリズムでも, 移動ロボットが障害物から離脱できるのは線分 SG 上に限られる. 我々はこれを“線分条件”と呼んでいる. まず, 線分条件は幾何条件から完全に独立しており, デッドロックフリー特性とは全く無関係である. したがって, *Robust* では, 線分条件が位置誤差の影響を受けても, 移動ロボットは決し

Fig.8 A mobile robot always arrives at its goal surely in a 2D uncertain environment by the algorithm *Robust*.

てデッドロックに陥らず, SG に垂直で G を通る直線 L を誤差分だけ離れて横切る (Fig.7). これは, *Pledge* の幾何学的性質に由来する. 一方, 線分条件は位相条件の一部なので, それはデッドロックフリー特性と密接に関係する. したがって, *Curv1* では, 線分条件, すなわち位相条件が位置誤差の影響を受け, 移動ロボットはデッドロックに陥ることがある (Fig.6).

4.2 誤差を安定に処理できる距離アルゴリズム

*NC-Robust**

ここでは, 位置と姿勢の誤差を安定に処理できる幾何アルゴリズム *NC-Robust** について説明する (Fig.9).

Fig.9 (a) A body R^* generates a true path in a real world (RW). (b) A head R makes a virtual path in a computer world (CW).

0. ベクトル SG を基本ベクトル V_B とし, 1. へ進む.

1. 次の事柄が起こるまで, 頭 R は V_B を V_S として進み, 体 R^* はそれに同期して動く.

(1a) 領域 $Ep(R)$ がゴール G を含んだら, アルゴリズムを終了する.

(1b) 体 R^* が障害物に接する, すなわち, V_B^* 方向が障害物に妨げられたなら, 2. へ進む.

2. まず, 頭 R は走行距離 d^* をゼロにする. 次に, 頭 R は V_T 方向 (体 R^* は V_T^* 方向) に障害物を迂る.

(2a) 領域 $Ep(R)$ がゴール G を含んだら, アルゴリズムを終了する.

(2b) 領域 $Ep(R)$ が線分 SG と交差し, かつ, 角度 $Angle$ が範囲 $[0^\circ, +180^\circ]$ に属すれば, 1. へ戻る.

(2c) 走行距離 d^* が予め与えられた閾値 T を超えたら, パスは存在しないものとして, アルゴリズムを終了する (Fig.10).

一般に, 位置誤差がなければ, 体 R^* が衝突点 H_i^* から障害物を一周したとき, 頭 R は必ず衝突点 H_i に戻る. 従来のアルゴリズムは, これでデッドロックフリーパスが存在しないことを確認していた (Fig.10(a)). しかし, 位置誤差が存在すれば, 体 R^* が衝突点 H_i^* から障害物を一周しても, 頭 R は必ずしも衝突点 H_i に戻れないことから, 従来の方法は意味をなさない. そこで, 新しいアルゴリズムでは, 体 R^* が障害物を辿り続けるとき, 頭 R が

一定の距離 T を越えて走行したら、デッドロックフリーパスは存在しないものとする (Fig.10(b)).

Fig.10 (a) An old termination is processed by checking if a mobile robot returns the last hit point H_i without leaving an obstacle. (b) A new termination is processed by checking if a driving distance d^* around an obstacle is larger than a threshold T .

5. 幾何アルゴリズムのデッドロックフリー特性

この章では、定理 1 と 2 より、アルゴリズム *Robust* のデッドロックフリー特性、そして、定理 3 と 4 より、アルゴリズム *NC-Robust** のグロスデッドロックフリー特性を証明する。

定義 3 線分 SG が障害物へ入る点を“侵入点 Li ”、一方、障害物から出る点を“脱出点 Oj ”と定義する。障害物の個数は有限なので、それらの個数も有限である (Fig.11)。○

Fig.11 A set of inward intersections Li and a set of outward intersections Oj around a 2D uncertain obstacle.

定理 1 幾何アルゴリズム *Robust* では、未知環境にデッドロックフリーパスが存在すれば、移動ロボットは出会った障害物から必ず離れられる。□

証明 未知環境にデッドロックフリーパスが存在するなら、移動ロボットは点 $H_k(=Li)$ で障害物に出会う限り、少なくとも点 $L_k(=Oj)$ ($j=i$) からそれを離脱できる (Fig.11)。なぜなら、点 Oj ($j=i$) は線分 SG 上にあり、かつ、角度 $Angle$ は範囲 $[0^\circ, +180^\circ)$ に入るからである。これより、題意は満足される。■

ここで、移動ロボットは点 $L_k(=Oj)$ ($j \neq i$) から障害物を離れることもある (Fig.11)。

定理 2 幾何アルゴリズム *Robust* では、未知環境にパスが存在すれば、移動ロボットは必ずゴールへ到達する。□

証明 定理 1 より、未知環境にデッドロックフリーパスが存

在すれば、移動ロボットは出会った障害物から必ず離脱できる。このとき、移動ロボットは、侵入点 Li から脱出点 Oj まで、ルート R_1 または R_2 を辿る (Fig. 12(a),(b))。ここで、点 Oj が線分 LiG 上であればルート R_1 、線分 LiS 上であればルート R_2 と定義する。このとき、どちらのルートでも、点 Li と Oj は障害物に分離される。この分離より、移動ロボットは過去の離脱点 (たとえば脱出点 O_{i-1}) から再び障害物を離脱できないことから、2種類のルートをどのように組み合わせてもデッドロック (無限ループ) は作れない (Fig.12(c),(d))。最後に、デッドロックが誕生しなければ、移動ロボットは確実にゴールへ到達することから、題意は満足される。■

この対偶より、移動ロボットがデッドロックに陥れば、未知環境にデッドロックフリーパスは存在しないことがわかる。

Fig.12 (a), (b) A mobile robot generates two routes R_1 and R_2 while following an uncertain obstacle. (c), (d) A mobile robot cannot enter any deadlock (periodic cycle) in a 2D uncertain environment.

定義 4 スタート S と領域 FG' (FG を RR だけ縮小させた領域) がなす錐体を Cs^* と定義する。この錐体 Cs^* において、障害物に妨げられるベクトル $VB^* \in [VB-\alpha, VB+\alpha)$ が存在する周囲を“侵入周囲 BLi^* ”、障害物に妨げられないベクトル $VB^* \in [VB-\alpha, VB+\alpha)$ が存在する周囲を“脱出周囲 BOj^* ”と定義する。これらは重複することもあるが、個数は有限である (Fig.13)。○

定理 3 幾何アルゴリズム *NC-Robust** では、未知環境にデッドロックフリーパスが存在し、かつ、位置や姿勢の誤差が上限づけられれば、体 R^* は障害物から必ず離脱できる。□

証明 *NC-Robust** では、位置や姿勢の誤差が上限づけられるとき、障害物を一周するまでに、体 R^* は幾何条件、そして、頭 R は線分条件を同時に満足するところが発見できることを示し、題意を証明する。

さて、*NC-Robust** では、頭 R がベクトル VB を Vs として進み、体 R^* は同期的に Vs^* 方向へと進む。このとき、姿勢誤差の影響より、体 R^* の進行ベクトル VB^* はベクトル VB から最大でも角度 α しかずれないので、体 R^* は進入周囲 BLi^* にしか接触しない

Fig. 13 A set of inward boundaries Bli^* and a set of outward boundaries BOi^* around a 2D uncertain obstacle in a real world (RW).

(Fig. 13). このとき、その接点を H_k^* とおくと、ベクトル V_B^* は頂点 H_k^* 、頂角 2α の錐体 C^* 内を揺れ動く (Fig. 14). ここで、範囲 $[0^\circ, +180^\circ)$ の両端、たとえば角度 $Angle^*$ が 180° より小さいがそれに限りなく近い点 B^* において、回避方向と逆方向にベクトル V_B^* を誤解する。たとえば、 $Angle^* = 175^\circ$ を $175^\circ + 2\alpha$ ($\alpha = 3^\circ$) と誤解する。このとき、幾何条件は正しく機能せず、点 B^* は離脱点になれない。しかし、点 B^* まですりぬける点 A^* で不等式 $Angle^* < 180^\circ$ は必ず成立する。これより、体 R^* は点 A^* で幾何条件を満足し、頭 R は点 A を離脱点 L_k の候補とする (Fig. 14(a)).

一方、接点 H_k では、まず、領域 $EP(H_k)$ が線分 SG と交差する。次に、体 R^* が点 H_k^* から点 A^* へと移動する間に、領域 $EP(H_k)$ は姿勢誤差 (2α) より生じた領域 $EP(V)$ 、そして、それ以外の誤差より生じた領域 $EP(P)$ だけ増加する。ここで、点 H_k^* から点 A^* までの走行距離は $|H_k^*A^*|$ より常に長いことから、領域 $EP(V)$ の半径は $|E^*A^*|$ より大きくなる。したがって、半径 $RP(A)$ は、半径 $RP(H_k)$ 、 $RP(V)$ 、そして $RP(P)$ の総和と与えられる (Fig. 14(b)). このとき、点 A は領域 $EP(P)$ のなかに存在する。ここで、線分条件が最も成立しにくい場合として、線分 SG から最も離れたところに点 A を設定する。Fig. 14(b) から明らかなように、位置や姿勢の誤差の影響で膨らんだ領域 $EP(A)$ は必ず線分 SG と交差する。これより、頭 R は線分条件を満足し、点 A を離脱点 L_k とし、体 R^* は点 A^* か

ら障害物を離れる (Fig. 14(b)). 以上のことから、体 R^* は最悪でも周囲 A^*B^* (点 A^*) から離脱できる。このとき、点 H_k^* は周囲 Bli^* に属するので、周囲 A^*B^* (点 A^*) は脱出周囲 BOj^* ($j=i$) に属し、題意は満足される。■

ここで、体 R^* は脱出周囲 BOj^* ($j \neq i$) で点 L_k^* を見つけ、障害物から離れることもある。

定理 4 幾何アルゴリズム *NC-Robust** では、未知環境にデッドロックフリーパスが存在し、かつ、位置や姿勢の誤差が上限づけられれば、体 R^* は必ず領域 Fg へ到達する。□

証明 まず、位置誤差の影響より、頭 R と体 R^* は徐々にずれるが、体 R^* が障害物に接触しなければ、領域 $EP(R)$ は常に線分 SG と交差し、そのまま自由領域 Fg に含まれ、題意は満足される (Fig. 15(a), (d)). 一方、定理 3 より、領域 Bli^* で障害物に接触したとき、体 R^* は必ずそれから離脱できる (Fig. 15(b), (c)). このとき、体 R^* は、点 H_k^* から点 L_k^* までルート R_1^* または R_2^* を辿る。点 L_k^* が領域 Bli^*Fg 一点 S から Bli^* への 2 つの接線、 Bli^* 、そして Fg で囲まれた領域-に含まれればルート R_1^* 、領域 Bli^*S - 2 つの接線と Bli^* で囲まれた領域-に含まれればルート R_2^* と Fig. 12 と同様に定義する。ここで、錐体 Cs^* の内部で、体 R^* が障害物と接近・離脱すること、たとえば、Fig. 13 で Bli^* に接し BO_4^* から離れることは考えなくてよい。なぜなら、体 R^* は領域 Fg へ単調に接近しているからである。このとき、どちらのルートでも、周囲 Bli^* と BOj^* は障害物で分離される。そして、この分離より、体 R^* は過去の離脱周囲 (たとえば周囲 BO_{i-1}^*) から再び障害物を離脱できないことから、2 種類のルートをいかに組み合わせてもデッドロック (無限ループ) は作れない。最後に、デッドロックが誕生しなければ、体 R^* は確実に領域 Fg へ到達することから、題意は満足される。■

この対偶より、体 R^* が障害物を辿り続け、頭 R が閾値 T を越えて走行したら、未知環境にデッドロックフリーパスは存在しないことがわかる。

Fig. 14 A body R^* finds a point L_k^* in RW and simultaneously its head R finds its point L_k in CW as long as R^* follows an obstacle from a point H_k^* in RW.

Fig. 15 (a) A body R^* does not encounter any obstacle even if its head R intends to encounter an obstacle. (b) R^* and R encounter an obstacle. (c) A body R^* encounters an obstacle even if its head R intends not to encounter the obstacle. (d) R^* and R do not encounter any obstacle.

ある.このような厳しい未知環境でも,体 R^* は領域 FG で停止し(Fig.18(a)),同時に頭 R は領域 $Ep(R)$ がゴール G を含み停止する(Fig.18(b)).この結果から,位置や姿勢の誤差,さらには,わずかなセンサ誤差を克服するアルゴリズム $NC-Robust^*$ の実用性が理解できる.

7. おわりに

本稿では,障害物が密集した未知環境,すなわち,移動ロボットが障害物を迎えるとき一定の距離だけ保てない未知環境を対象に,移動ロボットをゴール付近まで確実に誘導するセンサベースナビゲーションアルゴリズムを提案した.まず,そのような状況では,位置誤差が距離条件と位相条件を役に立たなくすることを示した.次に,移動ロボットをゴールへ誘導する幾何アルゴリズム $Robust$ を設計した.また,位置や姿勢の誤差が上限づけられるとき,移動ロボットをゴール付近まで誘導できる幾何アルゴリズム $NC-Robust^*$ を設計した.そして, $Robust$ についてはデッドロックフリー特性, $NC-Robust^*$ についてはグロスデッドロックフリー特性を証明した.一般に,位置や姿勢の誤差に上限がなければ,たとえ障害物が存在しなくても,移動ロボットはデッドロックに陥る.たとえば,Fig.19のデッドロックは,姿勢誤差が反時計回りに一定量ずつ増加する(α に上限がない)ときに生じる.したがって,それらの誤差に上限がなければ,デッドロックフリーのナビゲーションアルゴリズムは存在しない.このことから,提案のアルゴリズム $NC-Robust^*$ は一つの限界を示していることがわかる.

Fig.19 A mobile robot R^* joins a deadlock in an uncertain environment without any obstacle if the robot generates an orientation error whose ratio is completely constant.

最後に,本研究は,平成6,7,9年度文部省科学研究補助金(課題番号06750266,07750299,09650300),平成8年度独国フンボルト財団奨学研究費(課題番号15599),ミュンヘン工科大学シュミット教授の援助を受けた.記して謝意を表する.

参考文献

- 1) T.Lozano-Perez and M.A.Wesley: An Algorithm for Planning Collision-Free Paths among Polyhedral Obstacles, *Commun. of ACM*, 22-10, 560/570 (1979).
- 2) C.O'Dunlaing and C.K.Yap: A Retraction Method for Planning the Motion of a Disc, *Journal of Algorithms*, 6, 104/111 (1982).
- 3) N.Ahuja, R.T.Chien, R.Yen, N.Bridwell: Interference Detection and Collision Avoidance among Three Dimensional Object, *Proc. of the AAAI Conf.*, 44/48 (1980).
- 4) V.J.Lumelsky: Effect of Uncertainty on Continuous Path Planning for an Autonomous Vehicle, *Proc. of the 23th IEEE Conf. on Decision and Control*, (1984).
- 5) H.Noborio: A Path-Planning Algorithm for Generation of an Intuitively Reasonable Path in an Unknown 2D Workspace, *Proc. of the 1990 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, 2, 477/480 (1990).

- 6) 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, 33-8, 1013/1021 (1992).
- 7) A.Sankaranarayanan, et al.: A New Algorithm for Robot Curve-Following amidst Unknown Obstacles, and a Generalization of Maze-Searching, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3, 2487/2494, (1992).
- 8) H.Noborio, et al.: On a Deadlock-Free Characteristic of Sensor-Based Path-Planning Algorithms under a Self-Positioning Error, *Proc. of the 7th Int. Conf. on Advanced Robotics*, 2, 839/846, (1995).
- 9) H.Noborio: On a Sensor-Based Navigation for a Mobile Robot, *Journal of Robotics Mechatronics*, 8-1, 2/14, (1996).
- 10) H.Noborio, T.Yoshioka, and T.Hamaguchi: On-Line Deadlock-Free Path-Planning Algorithms in the Presence of a Dead Reckoning Error, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, 1, 483/488, (1995).
- 11) T.Yoshioka, T.Hamano and H.Noborio: On the Sensor-Based Navigation for a Real Mobile Robot in its Practical Environment, *Proc. of the USA-Japan Symposium on Flexible Automation*, 1, 581/584, (1996).
- 12) H.Noborio and G.Schmidt: Mobile Robot Navigation under Sensor and Localization Uncertainties, *Proc. of the Workshop on Autonomous Mobile System*, 118/127, (1996).
- 13) J.Leonard and H.Durrant-Whyte: Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 7-3, 376/382, (1991).
- 14) 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, 13-5, 700/703 (1995).
- 15) V.J. Lumelsky: A Comparative Study on the Path Length Performance of Maze Searching and Robot Navigation Algorithms, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 7-1, 57/66 (1991).
- 16) J. Borenstein, H. R. Everett and L. Feng, *Navigation Mobile Robot*, A K Peters, Wellesley, Massachusetts, Chapter 5, (1996).

「著者紹介」

吉岡 孝

1993年,大阪電気通信大学工学部精密工学科卒業.95年大阪電気通信大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了.現在,同大学院博士後期課程在学中.移動ロボットのナビゲーションの研究に従事.日本ロボット学会の学生会員.

登尾 啓史 (正会員)

1982年,静岡大学工学部情報工学科卒業.87年,大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了.同年同大学基礎工学部助手.88年大阪電気通信大学講師.現在情報工学部助教授.96年ミュンヘン工科大学客員研究員(フンボルト財団招聘).ロボットの知能化,人間機械系の研究に従事.日本ロボット学会,情報処理学会,システム制御情報学会,電子情報通信学会,IEEE,ACMの会員.(工学博士)

富永 昌治

1970年,大阪大学基礎工学部電気工学科卒業.75年同大学院博士課程修了.電総研大阪支所を経て,76年大阪電気通信大学講師.86年同教授.現在情報工学部教授.87~88年スタンフォード大学客員教授.視覚情報学,色彩情報処理,コンピュータビジョンなどの研究に従事.情報処理学会,電子情報通信学会,日本色彩学会,映像情報メディア学会,IEEE,OSAなどの会員.(工学博士)