移動障害物を含むような動的変化を伴う走行環境における自律移動ロボットの走行誘導方式

石川 繁 樹* 浅 香 俊 一*

A Method of Piloting an Autonomous Mobile Robot in Dynamically Changing Environment Including Moving Obstacles

Shigeki ISHIKAWA Shun'ichi ASAKA

In this paper, we present a sensor-based navigation method for an autonomous mobile robot in dynamically changing environment with stationary and moving obstacles. A navigation task needs to navigate the robot to a destination along a predefined path, and avoids obstacles if necessary. However, the environments is always changing, and sensory information is quite limited (actually, we have many limitations of sensory processing towards a dynamically changing environment). We have to describe an efficient navigation manner onto the robot using simple sensory information. The first step of our approach was a use of fuzzy control. Based upon results of experiments, we propose a new navigation method for an autonomous mobile robot in a dynamically changing environment. It determines a steering angle and a velocity to send to low-level locomotion system. There are two major parts in it: one is a tracing planned path task, and the other is an avoiding obstacle task. The distribution weight between their outputs is determined with a range data and differential range data between samplings.

Key Words : Autonomous mobile robot, Navigation, Obstacle avoidance, Fuzzy control

1. は じ め に

移動ロボットが自律移動を行なうためには、周囲の環境を認識し、その状況に適する行動をリアルタイムに決定しなければならない。環境によってはまったく障害物のない場合も起こり得るが、工場やオフィスといった屋内の走行環境でも、現実的には、走行通路に予期せぬ障害物が置かれてあったり、人間が歩いていたりする。本論文は、静止、または、移動する障害物が存在するような動的に変化を伴う屋内走行環境において、それら避けながら移動ロボットを目的地に自律移動させるための知的走行誘導方式について論ずる。筆者らはこれまでファジィ制御を用いた誘導方式を提案し、その有効性を

主にシミュレーションによって確認してきた^{11)~13)}。ファジィ制御を用いたのは、主として動的な環境での行動記述の知識ベースを構築するためであった。本論文では、さらに、実際の移動ロボットシステムを構成し、実環境において走行実験を行った結果から、課題点を洗い出す。次に、これらを踏まえて改良した走行誘導方式を提案する。実際に人などの移動障害物を含むような動的に変化する環境において、本手法がどのように有効であるかについて報告する。本研究の立場/位置付けは既報¹¹⁾にて詳細に述べてあるが、要約すると以下のようなものである。

障害物衝突回避を含むいわゆるナビゲーションを課題としてとらえた研究成果はこれまでに数多く報告されているが、それぞれに想定している環境や、入手可能としている環境情報等が異なる。これを整理し、経路計画、

原稿受付 1992 年 8 月 21 日

* 日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所

及び、障害物回避問題として広くとらえると、ポテンシャル法や侵入領域禁止法などに代表されるような想定している環境世界がすべて既知である場合^{1)~8)}と、おおまかな環境は既知であるが、実際には、その場でないと環境がはっきりわからない場合、即ち、環境が部分的に既知である場合^{9)~13)}、さらにまったくの未知環境であり、そこから環境地図を作成するものに分類することができる。すべての環境情報が既知の場合の障害物回避問題は変数多く研究されている。環境情報が完全に把握されているため、解析的に解くことができ、その主たる目的は走行前、あるいは、動作前のオフライン的な動作計画・経路計画に用いられる手法である。一方、全く未知の環境での障害物回避は、もっぱら、未知環境の静的な地図作成に関する課題として研究開発されている。部分的に環境がわかっている場合の、障害物回避問題としては、移動ロボットが実際に走行する際の走行誘導としてとらえられる。本論文で提案する方法はこれに属する。

実際の自律移動ロボットシステムが走行するには、既知の環境情報に基づいて経路計画を行ない、その経路に従って走行するが、経路上には未知の障害物が置かれてあったり、人のような移動障害物が存在する。これらの環境情報をセンサーデータから認識し、動的に行動決定をして、障害物を避けながら目的地に到達する必要がある。この場合の大きな課題には次の2つがあると考えられる。

1. 環境が常に変化している状況にどう対処するか。
即ち、実際の走行では静止物体のみならず、移動物体もあり、様々な状況に遭遇することから、それぞれに対する適切な状況の把握、及び、その対処方法をどうするか、また、これらの手段をシステム上にどのような形で実現するかを解決する必要がある。
2. センサー処理技術から受ける制約にどう対処するか。
現実的に実現できる環境情報取得のためのセンサー処理技術には現状で限界があり、特に、動的に変化する環境においては、リアルタイム性も要求されるため、入手可能な環境情報はかなり限定されたものである。

1番目の課題については、様々な実現方法が考えられる。本研究で取り扱うような知能ロボットの知的行動記述法はこれまでも数多く研究開発されている。例えば、ロボット言語的なアプローチ⁴⁾や、R. Brooksの提唱する Subsumption Architecture⁵⁾などが代表的であろう。自律移動ロボットの知的行動全体から考えると、本研究の課題である障害物回避を含む走行誘導は、リアルタイム性が必要であり、知的行動を階層的にとらえるならば、

比較的低いレベルの行動記述として考えることができる。ロボット言語的なアプローチはむしろトップダウン的なもので、動的に変化する環境に対応するすべての状況を記述するには、労力が大き過ぎるきらいがある。また、Subsumption は知的行動全体をアナログ的な組合せて構成するための枠組を提唱しており、評価は高い。しかしながら、その構成法がネットワークを形成するため、その取り扱いが複雑である。また、本研究で目標とする動的な環境の中での自律移動ロボットの走行誘導方式がどうあるべきかは特定されていない。

次に、従来の障害物回避を含む走行誘導方式は、静的な環境を対象とした研究が多く行なわれていたが、近年では、動的な移動障害物を含む動的な環境での走行誘導方式が検討されはじめている^{6)~10)}。しかしながら、以上にあげた課題の2番目に対する検討があまり成されておらず、各方式によって、環境の情報取得の手段が理想化されている。例えば、移動障害物の運動記述、(相対・絶対)位置、大きさ等の取得は極めて難しいため、実際のロボットシステムとしての実現は、現状で難しい。

こうしたことを踏まえ、効率的な走行誘導方式を探ることが、本研究の目的である。

2. 移動ロボットシステムの構成とファジィ制御を用いた走行誘導

実環境において本手法の有効性を確かめるため、実験移動ロボットシステムを構成した (Fig. 1)。

ハードウェアとして、移動ロボットの基台は、筑波大“山彦”¹⁵⁾をもとに構成された知能移動ロボットベース LR-1 を用いている。また、VME Bus を軸に三つの CPU を持っており、このうち Host CPU (68030, 25 MHz) は、移動ロボット全体の統括、ナビゲータなどを、Slave の二つ (68000, 10 MHz) は、それぞれ超音波ソナーリング・バンパーその他のセンサー処理、及び、左右の駆動輪の制御・デッドレコニング等の処理を行っている。駆動系の処理は電通大で開発された Locomotion System メロス¹⁴⁾によって実現している。Slave CPU は Dual Port RAM によって Host CPU からデータを直接読み書きできる。Host CPU が Slave CPU で処理したセンサー情報を読み込み、そこで処理された走行指令が、駆動系 Slave CPU に与えられる、というのが一連の動作である。走行誘導に必要な情報は、指定した経路からの偏差については、デッドレコニングによって得られたロボットの現在位置を算出し、ロボット周囲の空き空間距離は、ソナーリングにより全方位を八方向に分割して距離データを取得している。

走行誘導方式は、Fig. 1 の内、Navigator が担当する。

Fig. 1 An experimental autonomous mobile robot system and the architecture

従来提案したファジィ制御を用いた走行誘導方式の詳細は参考文献¹¹⁾で述べられているが、要約すると以下のようである。現在位置から目的地までの経路は走行前にあらかじめパスプランナーが求め、これに基づいてナビゲータが走行状況・走行環境を監視しながら駆動系に指示を与え、目的地に誘導する。これには、1) 目的地への誘導と、2) 障害物との衝突回避の誘導があるが、実際の走行誘導は、両者を適宜組み合わせることに行う。これらを Fig. 2 に示すような構造で実現する。図中の三つの箱にファジィ制御が用いられている。それぞれの入出力は次のようなものである。

まず、経路追従には、Fig. 3 (a) に示すように、自車と経路の距離 D 、及び、経路の方向と自車の進行方向の変位角 A とし、それぞれ D, A に対して NB/NM/NS/ZZ/PS/PM/PB (例えば PB は Positive Big) の 7 通り

Fig. 2 Navigation control structure

Fig. 3 Definitions of input parameters

のファジィ値を取り、49 通りのファジィルールによって、進行速度 v 、及び、舵角 s を決定する。障害物衝突回避のための入力 Fig. 3 (b) に示すように、左右前方の 5 方向の空き空間の距離 (W_1-W_5)、及び、左右前方の 5 方向の空き空間の距離の時間変化 (Dw_1-Dw_5)、その他経路の追従状態を示すパラメータ 2 種類を定義する。また、制御出力は経路追従走行と同様の自車の進行速度 v 、及び、舵角 s とする。空き空間距離に対して ZZ/PS/PM/PB の 4 通りのファジィ値、また、その時間変化に対して NB/NM/NS/ZZ/PS/PM/PB の 7 通りのファジィ値を取る。衝突を回避しながら走行するための規則として 155 個のファジィルールを構築した。最後に、

Fig. 4 An experimental result of piloting using fuzzy control in a static environment

状況に応じて経路追従に重点を置くべきか、障害物衝突回避に重点を置くべきかの加重係数の決定を行っているが、これは、障害物衝突回避のファジィルールと同じ条件で記述されている。

3. ファジィ制御による走行誘導方式を用いた走行実験

自律移動ロボットの走行実験を様々な状況で行ったが、ここではまず、実験室内に適当な経路を設定して、経路上に静止障害物を置き、安全に避けて走行するかどうか、基礎的な実験結果について述べる。移動ロボットの走行経路は、ロボット充電ステーションから発進して、ほぼ長方形の経路を一周する。ロボットの目標速度は 40cm/s、走行制御のサンプリング間隔は 0.1 sec で行った。

Fig.4 に走行実験の一例として、概略環境とロボットのデッドレコニングによる走行軌跡を記録したものを示す。

また、障害物を一か所に固定した場合の、走行実験の移動軌跡を Fig. 4 に示す。この表示における移動軌跡は、移動ロボットのデッドレコニングに基づく位置情報を記録したものである。このため軌跡には誤差が含まれるが、走行距離があまり長くないことや、障害物が正しく避けられたかどうかを確認することが目的であるため、厳密な軌跡の測定は行っていない。この例では、シミュレータ上で構築された障害物回避制御のためのファジィルールを若干変更したものを使用した。この場合、経路上にある障害物を回避しながら走行し、その後再び経路に復帰して、安全に充電ステーションに帰還した。しかしながら、実際の自律移動ロボットでは、走行環境が理想的な実験室環境と異なり、複数の障害物が存在したり、移動して環境が動的に変化したりすることが予想される。そこで、実験はこれら以外にも障害物の位置を変化させ

た場合を行ったり、実際のショールームなど動的変化を伴う環境での走行など数多く行なうことによって有効性や課題点を明らかにした。この結果、以下のような状況が調べられた。

1. 当初、シミュレータ上で構築したルールベースを使用した場合に、実環境では障害物を完全に回避できない場合があった。これはシミュレータ上で構築した障害物回避、及び、状況判断のファジィルールが無い状況に遭遇することになるため、回避制御等のルールが発火せず危険状態を認識できなかったためである。
2. 障害物回避のためのファジィルールベースの中に矛盾するルールが混在する可能性があり、あるルールが右に操舵する指示を生成し、また、別のあるルールが左に操舵する指示を生成した場合、制御出力全体として直進を選んでしまうことになる。これは、特に正面のみに障害物が存在するような場合に起こり、あるルールが右への指示、また、別のあるルールが左への指示を出力することになる。この場合、ファジィ推論では、通常、出力計算において重心などをとるためトータルとして直進してしまうことになる。
3. 障害物回避のためのファジィ制御入力値は、ファジィ値に評価される段階で正規化されるが、正規化のレンジを大きく取ると、障害物回避の観点からは安全側に振ることができる。しかしながら、これを大きくとりすぎると障害物をクランク状に配置した狭い通路などをすべて障害物としてしまい、通り抜けることができない状況があった。
4. センサーの誤りデータによる障害物との衝突があった。即ち、障害物があるにもかかわらず、検出できずに誤った距離データも基づいて誘導を行ない衝突する状況があった。これは、超音波ソナーの特性で角などの斜め方向の壁を検出しにくいためである。

4. 動的変化を伴う環境での走行誘導方式

以上で述べた実験結果のように、自律移動ロボットのシステムを構成し、実環境で走行実験を行った結果、比較的単純な環境では障害物を回避しながら、目的地まで到達することができることを確認した。一方で、大きな課題点も残されており、これらについて検討する。第二から第四の課題点について 4.1 節、第一の課題点を 4.2 節で述べ、複数の移動障害物が存在する動的変化を伴う環境での走行誘導方式を提案する。

4.1 各課題点の解決

まず、第二の課題点であるが、これを避けるための基本的な方法としては、そういった状況下においてどちらか一方に統一してステアリング指令を生成する（例えば、右より一方にステアする）ようにルールを構成することが考えられる。しかしながら、状況によっては、目的地に対して遠回りするような挙動を示す場合がある。したがって、単純に一方にステアするのみでは好ましくないが、どちらに進むべきかは、よりグローバルな環境情報がないと本質的には解決できない。特に、その先に障害物があるかないかは、現状のセンサーで得られる局所的な情報のみで判断することは困難である。一方で、目的地に遠ざかるかどうかの判定は、あらかじめルートの情報が与えられているわけであるから、容易に可能である。そこで、ここで開発した自律移動ロボットでは、次のパスの方向を先読みすることで、どちらの方向に優先的に進行すべきかを判定する方式を実現している。これによってルールの矛盾を減らし、より知的な動作を行なわせるようにした。

第三の課題点は、どの程度手前から障害物を避けて走行するかに関する議論である。安全面から考慮すると早期に障害物を避けることが望ましいが、狭路通過しなければならない状況などでは、かえって弊害となる。そこで、この問題を解決するためには、自律移動ロボットの走行している環境に応じて障害物回避のためのパラメータを適宜変更する必要がある。この場合にもあらかじめルートがわかっているの、そのルートがどの程度の狭路であるか、アプリオリの知識としてロボットに与えることが可能である。そこで、構築した自律移動ロボットでは、ルートデータの中に狭路なのか通常の経路かを各ノード間ごとに指定できるようにしている。これによって、狭い通路、例えばドアの通過などの場合、障害物回避のパラメータをあまり遠くから避けられないものに適宜変更するような工夫を行なった。この結果、狭いオフィスのドアも通過することができるようになった。

最後に、第四番目の課題であるが、本質的にセンサー処理において誤って測定されたデータに基づいて走行誘導を行なった結果が障害物に衝突することは避けられないと考えている。したがって、この場合には、複数種類のセンサーを用いてセンサー情報の信頼性を向上させるセンサーフュージョンの方法などを導入する必要があると考えられる。

4.2 走行制御モデルの改良

本節では、前節で述べた走行実験の結果から考えられる課題の第一番目の課題に関してその解決策を提案する。

Fig. 2 に示した走行誘導の構成は、状況判断プロセス

で障害物回避の必要性を判断し、危険な状況になるほど、障害物回避の重みを増加させるものである。ところが、これまでに構築した 155 個のルールでは、危険な状況を示す条件の記述が不足しているため、障害物回避に重みが増加しないこと、障害物回避の制御が出力できないことが重なり、障害物を回避しきれないことが起こることが判明した。そのため、基本的に対応できる状況を増やす必要がある。最も単純な方法は、障害物回避、及び、状況判断のルール数を増やすことである。ルールを構築する手法は既に述べたが、シミュレータやロボットを用いて障害物との衝突が起こるか否かをみることによって、ルールの妥当性を検証し、ルールベースを構築するものである。ところが、このルールの構築法は、オペレータが逐次 Trial and Error を繰り返し行なうため、大変な作業量を伴うものとなり、効率的ではない。そこで、ルールの自動生成機構を開発し、ルールの検証や編集を自動化する方法も考えられる。ところが実際には、自動生成機構においてルールの妥当性の評価が難しいこと、そして、本走行誘導方式で用いているセンサー情報の入力パラメータの数が障害物回避・状況判断それぞれについて 12 種類あり、メンバーシップ関数に 3 個、あるいは、4 個、あるいは 7 個の種類を用いているため、起こり得るルールの条件判断数は、 $4^5 \cdot 7^5 \cdot 3^2$ 個にも上ること等から、これを実現することは容易でない。これに加えて、ルール数の増加は、個々のルールの妥当性の評価が難しくなること、ファジィ推論にかなりの計算時間を取られ、システム全体のパフォーマンス低下を引き起こすことが明らかである。

もう一つの解決策は、ルールを減少させながら、すべての障害物回避、状況判断に対応可能な制御モデルを、これまで構築したルールベースをもとに改良、もしくは、再構成することである。ルール数の増加することは、様々な状況に対応できるのも事実であるが、前述の通りこれに付随していくつかのデメリットも発生する。そこで、簡素化を行なうことであらゆる状況に対応可能な制御モデルが構築することが可能であれば、それはより有効性のある走行制御方式になり得る。ここでは、解決策としてこのアプローチを取ることにする。

制御構造の改良を行なう上での留意点は、次のようなものである。まず、これまでに構成した走行制御方式のうち、障害物回避、及び、状況判断について有効な情報・パラメータは何か、あまり重要でない情報はなにかについて選別を行なう。また、問題となっているルール数の増加に大きく関係しているのは、ファジィ値の数（メンバーシップ関数の数とも言える）であり、これを減少させることが可能であれば、ルール数を激減させる

ことができる。またさらに、ルールの構成や走行誘導方式の構成 (Fig. 2), ファジィ制御の構造をもとに新しい走行誘導制御方式を構成することができれば, より効率の良い走行誘導の制御知識の獲得が達成できると考えられる。

そこで, これまで行なってきた走行実験における各パラメータの記録や, 衝突時の入力パラメータのファジィ値をモニタすることによって有効なルールや不足しているルール, あるいは, 不要なルール, ファジィ値 (メンバーシップ関数) の整理を行なった。この結果, 走行誘導制御の改良ポイントとして次のような項目が重要であることが, 明らかになった。

- 入力パラメータ W_3 に応じて左または右に大きくステアすべき
- $W_{2,4}$ に応じてそれぞれ右/左にステアすべき
- $W_{1,5}$ に応じてそれぞれ右/左の物体に近づきすぎないようにステアすべき
- 走行誘導の構成として, 経路追従と障害物回避制御を重み付けによってアナログ的に合成することは走行誘導の二つの大きな機能を実現する上で有効
- 障害物回避制御への重み付けは W_{1-5} に応じて決定し, 距離 W_{1-5} が小さくなるに連れて障害物回避への重みを増やす。構築されたルールからは空き空間距離の時間変化分 Dw_{1-5} もこれに加えるべきかどうかの有効性は不明
- 速度制御に関しても障害物回避制御の重み付け決定と同様 W_{1-5} に応じて決定するが, 基本的には目標速度から減速を行なうように制御する
- ファジィ推論メカニズムは数値補間技術として有効な手段であり, 複数のパラメータを合成する作用を持つ

以上の改良ポイントを生かした制御構造を Fig. 5 のように構成した。同図において, 経路追従誘導は従来から用いたファジィ制御をそのまま用い, そこで生成されたステアリング指令 STt , 及び, 速度指令 Vt を障害物回避制御から生成される指令と合成するものである。ここで, ステアリング制御に関しては, 重視する誘導方法が経路追従誘導か障害物回避誘導であるかを決定する重み付け係数を算出する。分割された自律移動ロボットの周囲のエリア内での物体との距離 W_{1-5} から, 各々の危険度を判定し, それらの足し込むことによって, 重み付け係数を判定し, 走行誘導制御全体の戦略を決定する構造となっている。算出方法として, 空き空間距離 W_{1-5} を用いて危険度を定めている。この危険度は, 空き空間距離が減少すればするほど危険度が増加するような関数を定義する。自律型移動ロボットの進行方向5方向

Fig. 5 The improved navigation method

(Fig. 3 (b)) それぞれについて危険度 K_n を求め, それらの総和を全体の危険度 K として求める。それぞれの危険度 K_n は, 一方向のみでも接触の危険があるような距離の場合において, 障害物回避誘導に充分比重が掛かる必要がある。 K_n にはポテンシャル法的な関数を用意すればよい。ここでは, それぞれの危険度 K_n を以下のような式で算出する。

$$K_n = \begin{cases} 1.0 & \text{if } \frac{F_n}{W_n} \geq 1.0 \\ \frac{F_n}{W_n} & \text{if } 1.0 > \frac{F_n}{W_n} > K1 (=0.1) \\ 0.0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

但し, $n=1 \sim 5$

ここで, 定数 F_{1-5} は実際のロボットがどの程度の距離から障害物回避行動に重み付けするかを示すパラメータとなる。実際に, どの程度の距離から障害物回避誘導に100% 重み加わるように設定するかは, 自律移動ロボットの走行する環境の広さに依存するわけで, これまでも前節で述べた正規化パラメータの選択問題に帰着することになる。即ち, 走行する環境に応じて定数 F_{1-5} を変化させる。

障害物回避のためのステアリング角は, Fig. 5 からわかる通り, 前述の改良ポイントで述べた各エリア内で担当するステアリングの制御方法から算出されるステアリング角の制御量に, 各エリアの危険度 K_n を乗じたものの総和で求められる。

次に, 障害物とロボットに接近した場合の速度の減速度であるが, 危険度と同様に算出することができる。ま

ず、各エリア内の減速度 Dv_n は、

$$Dv_n = \begin{cases} 1.0 & \text{if } \frac{Fv_n}{W_n} \geq 1.0 \\ \frac{F_n}{W_n} & \text{if } 1.0 > \frac{Fv_n}{W_n} > K1 (\equiv 0.1) \\ 0.0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

但し、 $n=1 \sim 5$

として求める。

減速度 Dv は各領域内の減速度 Dv_n 総和 $Dv = \sum_{n=1}^5 Dv_n$ である。障害物回避のための速度指令としては、目標速度（経路追従の目標速度と同じ値）から減速度 Dv を減じた値とする。基本的には、障害物回避において減速のみを行ない、加速は行なわない。これは、加速することによって移動障害物との衝突回避を行なえる場合も考えられるのであるが、そうした場合には、本質的に移動障害物の詳細な運動記述がわからないと安全であるか否かの判定が困難であるためである。移動障害物の運動記述を現状のセンサー処理技術から詳細に把握することは困難であることから、ここでは、万一の衝突時の安全性を考慮して、減速のみの速度制御とした。

以上のように求められた障害物回避のためのステアリング、及び、速度指令を経路追従制御で算出されるステアリング、及び、速度指令から、危険度 K を比例配分係数として分配し、最終的なステアリング・速度指令を算出する。

従来のファジィ制御を用いた走行誘導方式¹¹⁾では、ルール条件の分岐数が $2^5 \cdot 7^5 \cdot 3^2$ 個にも上っていた。このため、回避のための条件すべてを記述できなかった。ここで提案改良したモデルでは、分岐そのものの数も減らし、条件分岐という考え方ではなく、Fig. 5 のそれぞれ個々に独立した危険度計算ブロックにおいて、例えば、危険か危険でないかといった2種類の分岐を危険度という指標に置き換え、さらに、個々のブロックでの危険度等を足し込んで最終的な制御量を決定する構造になっているため、本質的な条件分岐の数が極端に減っている。このため、従来課題とされていたルールの不足による回避不能な状況が起らないため、移動障害物を含むような複雑な環境下においても、様々な状況に対応可能な走行誘導方式となっている。また、ファジィ制御そのものに依存した計算量より簡素化されるため、制御量算出時間が短縮できることから、制御の時間間隔も短く設定でき（33 msec 毎の制御に変更）、より動的な環境への対応が可能となった。

4.3 動的環境での自律移動ロボットの走行評価

本節では、実際の自律移動ロボットを用いた動的に変化を伴う環境での走行実験を行なっている。実際の走行

状況は、一部¹⁷⁾に収録されているので、参照されたい。

4.3.1 障害物回避機能の評価法の検討

従来、移動障害物との衝突を回避するロボットの回避性能評価は、個々の研究機関で作成したシミュレーションシステム上で、仮想的に移動障害物を設定し、衝突を回避できたかどうかを調べることが行われている。実際の自律移動ロボットシステムを構成し、その上で移動障害物回避方法を実現して実験評価を行っている研究は例を見ないが、ここでの問題は、ベンチマーク的な評価を行ないにくい点である。即ち、比較の土壌が異なるところでのパフォーマンスの比較は意味がなく、同じ条件で比較検討するのが望ましいのであるが、ソフトウェアなどの性能比較のように同一の条件を整備することは、ロボットシステムの場合ハードウェア（電気的なもののみではなく、機械的なものも含まれる）に関しても同一条件を整えることは容易でない。また、ロボットが遭遇する状況が多過ぎて特定できないことも大きな要因と考えて良い。これらの例として、以下のようなものが考えられる。

1. 移動する環境の構造（壁や通路・静止障害物の位置その他）
2. 移動障害物の速度（方向を含む）・加速度/移動障害物の数/形状
3. 移動障害物は単に移動するだけなのか、あるいは、何らかの状況判断によって行動（移動）変化を独自に行うのか
4. ロボットシステムの形状・機構仕様/速度・加減速度等の動特性/センサー性能
5. 静止・移動障害物の回避としてどういった回避の仕方が知的なのか/安全な回避とは何か/回避の性能を表すパラメータとして適切なものはなにか
6. ロボットが静止中に、これに向かってくる移動障害物を避けるのかどうか
7. ロボットが遭遇するすべての状況に、対応できるかどうか検証できない

以上の点を整理すると、以下のような評価のための要素があると考えられる。

- 1) 確定要素：自律移動ロボットの物理仕様限界など。
運動性能限界 最高速度/方向転換性能/加減速度/ロボットの形状・大きさ等
障害物検出限界 センサー性能等
安全な回避 走行誘導方式に依存する障害物回避時の接近距離/回避可能な移動障害物 最大速度（移動障害物の移動方向・位置・大きさなどを規定して周囲遮蔽物がない環境でベンチマーク的に測定）等
- 2) 不確定要素：特定が困難な事象。

Course Layout for an AMR:

A1: AMR Base(0,0) → (100,0) → (100,-150) → (150,-150): Wait → (150,150) → (100,150) → (100,100) → (0,0)

A2: AMR Base(0,0) → (100,0) → (100,-150) → (200,-150): Wait → (200,150) → (100,150) → (100,100) → (0,0)

Course Layout for a Moving Obstacle:

M1: MO Base(245,240) → (200,200): Wait → (200,-150) → (200,200) → (245,240)

M2: MO Base(245,240) → (20,0): Wait → (300,0) → (200,200) → (245,240)

M3: MO Base(245,240) → (50,30): Wait → (300,-180) → (200,200) → (245,240)

Fig. 6 Experimental conditions of AMR navigation with a moving obstacle

静的環境 壁や通路静止障害物の位置/大きさ/形状等に依存する逃げ場空間等

移動障害物 位置/方向/速度/加速度/形状/数. 及び、移動障害物の対応動作性能

3) 機能比較要素: 障害物回避の仕方.

知的な回避 スムーズネス/回避距離/道を譲る/加速回避等

4) その他の要素: 万一衝突した場合の評価.

衝突の過失責任 移動ロボットは先に停止したが、移動障害物が衝突してきた際に移動ロボットには過失があるか. 出会い頭など.

ここでは以上のような評価要素のうち、1)の確定要素で述べた内容について、内部パラメータのチューニングする目的で、想定している実環境での条件を考慮した回避安全性(接触の有無等)をベンチマーク的に評価検討することにする。以下に、実験内容と結果を述べる。

4.3.2 移動障害物回避の性能評価走行実験

本研究で構成した自律移動ロボットと同じ仕様の移動ロボットをもう一台用意し、これを移動障害物として実際に走行させ、回避性能、回避性能、回避軌跡を調査した。移動障害物は一定の速度で、設定されたコースを走行し続けるもので、基本的には、自律移動ロボットの行動にはまったく依存しないが、バンパーセンサーに接触した場合のみ緊急停止、及び、その場での転回を行なう。走行環境としては、Fig.6 に示すような、壁で囲まれた

	Autonomous Mobile Robot	Moving Obstacle
Course No.	A1	M1
Max Speed	45 cm/sec	25 cm/sec
Range Normalization	150 cm	
Range Differential	No use

Fig. 7 Experiment (1) on performance evaluation of moving obstacle avoidance

ほぼ矩形の実験室内で、移動範囲は室内に限定されている。このため、回避領域が場合によっては狭くなり、回避が難しくなることも予想されるが、複数の移動障害物を避ける場合には、十分起こり得る状況である。移動障害物となるロボットと自律移動ロボットは別々の充電ステーションから発進し、それぞれの待機地点まで移動する。次に、その待機地点から同時発進し、その後の自律移動ロボットの障害物回避動作を調べる。移動障害物の速度・移動軌跡/コース、自律移動ロボットの回避行動の危険度計算の正規化パラメータなどを変化させ、実験を行なった。ここでは、移動軌跡として移動障害物用に3通り、自律移動ロボット用に2通り、また、それぞれの最大速度として、移動障害物で2通り (25 cm/sec と 45 cm/sec)、移動ロボットについては 45 cm/sec の1通り、障害物回避の行動を開始するための正規化パラメータとして 150 cm とした場合の走行実験結果を述べる。結果の軌跡上には、同時発進後の同時刻の両者の位置を付記した。

まず、Fig. 7 の評価実験 (1) から Fig. 9 に示す評価実験 (3) では、4.2 節で述べた走行誘導方式の改良のポイントの内、空き空間距離の時間変化分 Dw_{1-5} が、Fig. 5 に示す危険度 K の算出に有効であるかどうかを評価する。

まず、評価実験 (1) (Fig. 7)、及び、評価実験 (2) (Fig. 8) では、空き空間距離の時間変化分 Dw_{1-5} によ

	Autonomous Mobile Robot	Moving Obstacle
Course No.	A2	M2
Max Speed	45 cm/sec	45 cm/sec
Range Normalization	150 cm

Fig. 10 Experiment (4) on performance evaluation of moving obstacle avoidance

	Autonomous Mobile Robot	Moving Obstacle
Course No.	A2	M3
Max Speed	45 cm/sec	45 cm/sec
Range Normalization	150 cm

Fig. 11 Experiment (5) on performance evaluation of moving obstacle avoidance

かい、設定経路を障害物を避けながら走行し (Fig. 12)、安全に充電ステーションに帰還するというものである。この例における自律移動ロボットの走行経路は、次のようなものである。まず、充電ステーションを出発した後、進行方向右の壁から 2m 程度離れたルートで走行する (No.1, 2)。続いて、受け付け脇の入口で正面方向を向き、挨拶をした (No.3) 後に写真左手方向に向かって走行を行なう。その後、受け付けデスクのほぼ左端まで走行し (No.13)、手前に一旦戻ってから (No.14)、再び右の壁方向に戻り (No.15)、その後充電ステーションに向けて右の壁から 2m ほどのルートで走行して (No.16) 充電ステーションに帰還するというものである。

この例において、特に注目すべき点は、Fig. 12 における場面 No.4~No.13 における自律移動ロボットの走行結果である。ここでは、ロボットが受付の前を右から左へ走行することが要求されているのであるが、その間に来客が一度に殺到し、進行経路を妨害してしまっている。しかも、障害物としても移動を伴い、複数の移動障害物が同時に動くというロボットにとって非常に厳しい環境となっている。しかしながら、こうした苛酷な環境下においても、本手法を適用した走行誘導方式では、障害物と接触することなく目的地に到達することが可能となっている。この例以外にも、様々な状況において本手法の有効性を実際の走行環境で確認している。

5. 検 討

5.1 走行誘導制御におけるファジィ制御

本研究では、自律移動ロボットの動的な環境における走行誘導方式として最終的に Fig. 5 に示す方式を構築した。本走行誘導方式は、移動障害物を複数含むような複雑な環境においても衝突を避けながら安全に目的地に誘導することを実現できた。実際の自律移動ロボットに走行誘導制御方式を搭載して得られた実験結果から、当初の研究目的としていた、より効率の良い走行誘導の制御知識の獲得が達成できたと考えられる¹¹⁾。

ファジィ制御は、プロダクションルールで記述することによって制御システムを構築できるという簡便さから、制御知識の構築にメリットがあると考えた。結果的に、これを改良する過程で得られたノウハウ (プロダクションルール) が集約され、Fig. 5 に示した方式を確立するに至ったと考えられる。こうした意味においてファジィ制御がもたらしたメリットは大変大きいと考えている。即ち、ファジィ制御が、一般に言われているような人間の思考に近い制御であるとか、あいまいな制御量を取り扱えるといった議論ではなく、むしろプロダクションシステムとしての利用に重点をおいてノウハウを蓄積し、有効に効いてくる制御量は何かとか、どういったモデルが良いかを考える上でのツールとしてとらえることができると考えている。

5.2 動的に変化する走行環境での本走行誘導制御方式の有効性

本手法の動的環境での有効性を考える。本手法では、常にセンサー情報を取得しそれらに基づいてステアリング及び速度指令を生成することから、環境が常に変化しつつあっても、対応することが可能である。これにはセンサー情報をどの程度の時間間隔で監視し処理を行なってロボットの行動を決定しているかどうかの一つのポイントである。一般的に、視覚センサーを用いるシステムでは、その処理時間が比較的長めとなる。このため、一回のセンサー情報取得でロボットの行動を決定すると次に行動を決定するまでにどうしても行動決定の時間間隔があくことになる。その間に環境が変化する可能性は移動障害物などを含む環境では高くなり、もし、そうした物体等が存在する場合には、衝突の危険も起こり得る。もう一つのポイントとして、本方式のような障害物回避

のための行動を短い時間間隔で取り込まれるセンサー情報の中から効率良く決定している点が、動的環境での自律移動ロボットの誘導方式として有効に動作しているものと考えられる。

一方で、本方式ではセンサーの瞬時データをもとに行動決定しているため、よりグローバルな情報の取り扱いやセンサーから得られる時系列データの解釈によるより広い範囲の環境情報の利用によってより知的な動作を行なわせることが可能となると考えられる。例えば、実質的に回避不能な障害物、例えば、通路全体をふさいでしまうような障害物は、本方式のみの回避では必ずしも効率的ではない。文献8)や9)に示されるように、ローカルな情報でも目的に到達することは可能であるが、屋内走行環境である程度世界モデルがわかっている時は、こうした状況をモニターして経路を再計画の方が効率的である。現在のシステムでは、四方八方障害物に囲まれ

Fig. 12 A navigation example with multiple moving obstacles (human beings)

て、どちらにも進行できなくなった状態を監視して、方向転換等の措置を講じ、デッドロックを回避するといった方法を実現している¹⁶⁾。

移動障害物に対する回避制御は、本質的にいくつかの問題も含む。まず、本方式は、現実的に入手可能な環境情報(センサー情報)を考慮に入れた制御モデルであるため、現実的な自律移動ロボットシステムに適応でき、また、実現が可能となった反面、環境に関する情報量には限界があり、特に、移動障害物の運動記述は全くない。移動障害物の動きに応じたより安全で効率的な回避方法は、本方式以外に存在する。但し、これは障害物に対する情報があくまでも正しく、正確に入手できることが前提である。即ち、より高度な環境知覚システムの開発が必須である。

もう一つの課題としては、移動障害物とそれ避けるロボットシステムの運動性能に関する議論は、まだ、あまりなされていない。自分よりはるかに優れた運動性能を持つ移動障害物が、故意に接近する場合には、絶対にこれを回避することは不可能である。こうしたことも踏まえ、移動障害物の回避に関する性能評価方法の確立も必要と思われる。

6. 結 言

本論文では、移動障害物を含む動的変化を伴う環境においても有効な自律移動ロボットのための走行誘導方式を提案した。本手法は、実際の自律移動ロボットシステムが実環境で自律移動できることを目標に研究開発を行った。本論文では、本手法を実機に搭載して、その有効性を実験的に確認できた。

参 考 文 献

- 1) O. Katib, "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," The International Journal of Robotic Research, Vol.5, No.1, pp.90-98, 1986.
- 2) E. Freund and H. Hoyer, "Real Time Path-Finding in Multi-Robot Systems Including Obstacle Avoidance," The International Journal of Robotic Research, Vol.7, No.1, pp.42-70, 1988.
- 3) K. Fujimura and H. Samit, "Path Planning among Moving Obstacles Using Spatial Indexing," Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp.1662-1667, 1988.
- 4) 鈴木昭二, 油田信一, "科動ロボットのセンサに基づく行動記述とプログラミング," 日本ロボット学会誌学術論文, Vol.10, No.2, pp.254-263, 1992.
- 5) R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-2, No.1, pp.14-23, 1988.
- 6) 前田陽一郎, 竹垣盛一, "ファジィ推論を用いた移動ロボットの動的障害物回避制御," 日本ロボット学会誌研究速報 Vol.6, No.6, pp.518-522, 1988.
- 7) 小山 宏, 前田陽一郎, 深海 悟, 高木友博, "ファジィプロダクションシステムによる科動ロボットの障害物回避問題の検討," 日本ロボット学会誌研究速報 Vol.9, No.1, pp.75-78, 1991.
- 8) V. L. Lumelsky, "Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automation Moving Among Unknown Obstacles of Arbitrary Shape," Algorithmica, Vol.2, pp.403-430.
- 9) 登尾啓史, 橋目 譲, "可視領域をもつ移動ロボットの未知空間における実際のパスプランニングアルゴリズム," 日本ロボット学会誌学術論文 Vol.10, No.3, pp.378-384, 1992.
- 10) 平岡和幸, 坪内孝司, 浪花智英, 有本 卓, "複数移動障害物環境下における移動ロボットのナビゲーション," 日本ロボット学会第6回知能移動ロボットシンポジウム, pp.69-74, May 1992.
- 11) 石川繁樹, "ファジィ制御を用いた自律型移動ロボットの誘導方式の検討," 日本ロボット学会誌原著論文, Vol.9, No.2, pp.149-161, 1991.
- 12) 石川繁樹, 浅香俊一, "ファジィ制御を用いた自律型移動ロボットの誘導方式の検討-No.2一," 第九回日本ロボット学会学術講演会, pp.925-926, Nov 1991.
- 13) 石川繁樹, 浅香俊一, "動的走行環境における自律移動ロボットの走行誘導の検討," 日本ロボット学会第6回知能移動ロボットシンポジウム, pp.135-140, May 1992.
- 14) 飯島純一, 山下雄三, 油田信一, "移動ロボット用移動制御指令体系 MELOS," 日本ロボット学会第8回学術講演会予稿集, pp.963-966, 1990.
- 15) 松本 勉, 油田信一, "経路地図に従った移動ロボットの自律走行システム," 日本ロボット学会誌 Vol.5, No.5, pp.351-360, 1987.
- 16) 浅香俊一, 石川繁樹, "動的変化を伴う環境における自律移動ロボットの行動制御," 日本ロボット学会誌論文投稿中, Vol.?, No.?, pp.??-??, 1993.
- 17) 石川繁樹, 浅香俊一, "複数の移動障害物も避けて自律走行するお客様歓迎ロボット・アイビー," 日本ロボット学会誌ビデオ特集号, Vol.10, 1992.

石川繁樹

(Shigeki ISHIKAWA)

1960年12月6日生。1983年度慶應義塾大学工学部電気工学科卒業, 1985年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了, 同年4月日本アイ・ビー・エム株式会社入社。現在, 同社東京基礎研究所。画像処理・パターン認識・ファジィ制御・自律移動ロボットなどの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

浅香俊一 (Shun'ichi ASAKA)

1964年3月1日生。1987年電気通信大学電気通信学部計算機科学科卒業, 1989年同大学院電気通信学研究科計算機科学専攻修士課程修了。同年4月日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所入社。現在に至る。自律移動ロボットの研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)