階層ファジィルールによる移動ロボットの 障害物回避動作計画

非会員 青 木 猛 (名市工研)
 非会員 岩 田 裕 二 (エプソン)
 正 員 鈴 木 達 也 (名古屋大)
 正 員 大 熊 繁 (名古屋大)

Motion Planning for Obstacle Avoidance of the Mobile Robot using Hierarchical Fuzzy Rules

Takeshi Aoki, Non-member (Nagoya Municipal Ind. Res. Inst.), Yuji Iwata, Non-member (Seiko Epson Co., LTD.), Tatsuya Suzuki, Member, Shigeru Okuma, Member (Nagoya University)

Fuzzy control has a good ability for systems of which mathematical modeling is difficult. It also has flexible ability for control. However, when the number of the parameters are large, the number of rules increases in proportion to the square of the number of parameters.

In this paper, we propose a way of decreasing the number of fuzzy rules by classifying and combining them for a mobile robot. Firstly, steering control input and velocity control input are decided separately. Secondly, those control inputs are composed with keeping the performance of control good. Finally, we show the effectiveness of the proposed method by simulations.

キーワード：ファジィ制御，移動ロボット，階層化，障害物回避

1. はじめに

自律移動ロボットのような移動体の障害物回避問題は、移動体自身がその行動中において予測不可能な状況に遭遇したり、周りの環境が常に変化することなどから、その定式化が大変困難である。障害物回避問題を定式化する場合、柔軟な状況判断・予測を行うことができる表記方法が不可欠となってくる。こういった要求に対し、ファジィ推論は比較的容易に様々な状況に対応できる可能性をもっており、近年ファジィ推論を用いた自律移動ロボットの障害物回避方式が盛んに研究されている^{(1)~(3)}。

しかし、これまでの研究においては、制御入力（つまり、計画システムの出力）としてステアリング制御のみを考える場合が多く、速度制御などを併用する複合制御方式を採用している例は少ない⁽⁴⁾。これは、制

御入力が多数ある場合、ルール数が飛躍的に増加すると同時に、制御入力間の干渉を避けるようファジィルールを調整することが困難になるからである。従って、複数の制御入力を同じレベルのファジィ推論で同時に決定することは必ずしも得策とは考えられない。

そこで本論文では、障害物回避を行う自律移動ロボットを対象として、その障害物回避に用いるファジィルールの階層化を図り、下位レベルのファジィ推論で各制御入力を個別に決定し、上位レベルのファジィ推論で各制御入力間の干渉を避けながら所定の目的を達成するよう、重みづけ合成を行うことでロボットの最終的な制御入力を決定する、すなわちルールを階層化することで制御性能を低下させることなくルール数の削減を図るという手法を提案する。

具体的には、まず速度制御入力に関しては、センサ情報からの予測に基づいた新たなファジィ入力パラメ

ータを考案し、障害物回避に必要な制御入力決定する。また、ステアリング制御入力に関しては、前田⁽¹⁾らの考案した静的・動的危険度をファジィ入力パラメータとして、障害物回避に必要な制御入力決定し、センサからの情報に基づいて目標点到達に必要な制御入力決定する。これらのファジィ入力パラメータをセンサ情報と制御入力の間に設定することで、ルールの階層化、削減を図ることができる。次に、得られた各制御入力を上位のファジィ推論にて重みづけ合成するにあたり次の考え方をもとに合成ルールを構築する。

「障害物が正面方向からロボットに接近してくる場合、速度制御のみで回避を行うことは不可能であり、ステアリング制御により障害物回避を行う。逆に、障害物が横方向から接近してくる場合、ステアリング制御のみで回避を行うことは不可能であり速度制御により障害物回避を行う」

本論文では、上記の基本的な考え方に基づき、障害物とロボットの相対的な位置関係に基づいてステアリング制御入力と速度制御入力を重みづけ合成して、最終的な制御入力生成する。

また、提案する手法を文献(1)、(2)で取り扱われている移動ロボットの障害物回避問題に適用し、シミュレーションによってその有効性を示す。

2. 障害物回避動作計画システム

〈2・1〉 問題設定 本研究に用いる移動ロボットは、移動する障害物をステアリング制御および速度制御で避けながら目標点に達する自律移動型とする。

この障害物回避動作計画システムを構築するに際し、本論文では以下の前提条件を仮定する。

- (1) 移動ロボットは一度に複数の障害物に遭遇しない。
- (2) 障害物は連続的で滑らかな動きをする。
- (3) 移動ロボットは、ステアリング制御と速度制御により障害物を回避する。
- (4) ロボットの移動経路に制約は与えない。
- (5) 移動ロボットは計画した制御入力に対し、遅れることなく追従する。
- (6) ファジィ推論は $\min \cdot \max$ 法⁽⁵⁾を用いる。

〈2・2〉 システム構成 本論文で提案する移動ロボットの障害物回避動作計画の流れ図を図1に示す。また、本論文で用いる各ファジィパラメータの定義および入出力関係を図2に示す。

まず現時点におけるロボット、障害物、目標点の位

図1 回避動作決定アルゴリズム
Fig. 1. Decision algorithm.

置および速度ベクトルが入力され、そのデータに基づき各状態パラメータ（ロボットの進行方向に対する目標点の方位角 TA 、ロボットと障害物の距離 L および相対速度 W 、ロボットの進行方向に対する障害物の相対方位角 RA 、ロボットから障害物へのベクトルに対する相対速度ベクトルの方位角 RU ）を計算する。図3(a)、(b)に RA および RU の定義を示す。これらの値は、リアルタイムでセンサから得られる情報に基づいて計算される。これらを用いて、まずロボットが回避動作を行う必要があるかどうかを判断する（第1予測部）。そして回避の必要があれば、それを実現する速度制御入力とステアリング制御入力決定し、必要がなければそのまま加速するものとする。

〈2・3〉 一次予測部 ロボットと障害物の相対的な位置と動きによっては、ロボットが回避運動を行う必要のない場合がある。そのようなときには、むだな演算を省略し、速やかに目標に到達するように制御するだけで、次のデータ入力時まで他の制御は何もしないことが望ましい。

障害物が危険であるか否かは、ロボットとの静的な位置関係よりも動的な位置関係による場合が多い。例

図 2 制御入力決定の階層構造
Fig. 2. Hierarchical structure of rules.

えば、障害物がどんなに近くにしようともロボットに接近してこない限り、両者の衝突は生じない。逆に、障害物が遠くに位置する場合でも接近してくればロボットとの衝突の可能性が生じる。ここでは、この二つの場合について危険回避の判断を行う。

第一に、絶対座標系において障害物がロボットと平行かそれよりも遠ざかる方向に移動する場合、ロボットは回避運動をする必要はない。図 4(a), (b)に示すとおり、以下の式を満たすような場合には、回避のための演算を行わないことにする。

$$\left. \begin{array}{l} RA > 0 \text{ のとき } -RA < RU < \pi - RA \\ RA < 0 \text{ のとき } -\pi - RA < RU < -RA \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

第二に、図 2 の第 5 段において求められる静的・動的危険度がともに零の場合は回避のための演算は行わないことにする。

なお、危険度の考え方については文献(1)に記述し

てあるので、ここでは簡単に説明する。まず、方位角 RA と距離 L からファジィ推論により静的危険度 α ($|\alpha| < 1$) を計算する。次に相対速度方位角 RU と相対速度 W から動的危険度 β ($|\beta| < 1$) を求める。

以上より、第一次予測部で安全であると判断した場合は目標点到達のための制御のみを行い、危険回避の必要があると判断された場合は、図 2 の第 3, 4 段において以下に説明する回避に必要な演算を行う。

〈2・4〉 障害物回避に必要な速度制御入力決定

本論文では、ロボットと障害物の位置および速度ベクトルを図形的に考慮し、その行動予測に基づきファジィ推論を用いて障害物回避に必要な速度の加減速量(加速度)の決定を行う。なお、本章の(5)式までの記号は、ファジィ変数ではなくセンサ情報から直接計算された数値を表している。

図 5(a), (b)において、ロボットの走行ライン上で障害物が横切る点を予測し、ロボットとその交差点までの距離 LA を求める。障害物がロボットの前を

(a) 相対方位角 RA と相対距離 L
(a) Relative angle RA and distance L .

(b) 相対速度方位角 RU と相対速度 W
(b) Relative angle RU and velocity W .

図 3
Fig. 3.

(a)

(b)

図 4 回避不要の場合
Fig. 4. A case of no avoidance.

(a)

(b)

図 5 ロボットと障害物の経路交点
Fig. 5. A crosspoint between paths of robot and obstacle.

通過する場合、 LA は正((a)図)。ロボットの後ろを横切る場合は負とする((b)図)。

ロボットの位置を原点とすると、障害物は相対速度方向へ進むことから、図 5 におけるロボットと障害物の予測交点までの距離 LA は、三角関数の正弦定理から

$$LC = -\text{sign}(RA) \cdot L / \sin(RA + RU)$$

なる LC を用いて次式で与えられる。

$$LA = LC \sin(|RU|) \dots\dots\dots (2)$$

次に、障害物が現在位置から交差点を横切るまでにかかる時間 TRO を予測する。障害物が相対速度 W で近づくとすると、交差点を横切るまでにかかる時間 TRO は、

$$LB = LC \sin(|RA|) \dots\dots\dots (3)$$

なる LB を用いて次式で計算できる。

$$TRO = LB / W \dots\dots\dots (4)$$

上述の計算で得られた LA と TRO からファジィ推論により加速度を求める。 LA については、メンバーシップ関数は図 6(a), (b) のように設定する。 LA が正の場合は LFS , LFM , LFL , 負の場合は LBS , LBM , LBL の各 3 段階のファジィ表現とする。

また、時間 TRO については TS , TL の 2 段階表現とする。これら二つのパラメータをもとに、表 1 に示すような 12 ルールのファジィ推論を用いて加速度

(a) LAのメンバシップ関数
(b) Membership function of LA.

(b) TROのメンバシップ関数
(b) Membership function of TRO.

図 6
Fig. 6.

表 1 ODV のルール
Table 1. Rules of ODV.

TRO \ LA	LBL	LBM	LBS	LFS	LFM	LFL
S(Short)	VFS	VFM	VFL	VSL	VSM	VSS
L(Long)	VFO	VFS	VFM	VSM	VSS	VSO

図 7 ODV のメンバシップ関数
Fig. 7. Membership function of ODV.

表 2 OS のルール
Table 2. Rules of OS.

		Danger Safety Danger															
α	β	Danger		Safety												Danger	
		-1	1	-1	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Danger	-1	+3	+2	+1	0	0	0	0	-1	-1	+3	+4					
	0	+2	+1	0	0	0	0	0	-1	-1	+3	+4					
	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2					
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1					
Safety	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	+2	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1					
	-4	-3	+1	+1	0	0	0	0	0	-1	-2						
Danger	1	-5	-4	+3	+2	0	0	0	-1	-2	-3						

+ : 右へハンドルを切る。 - : 左へハンドルを切る

ODV を求める。これらのメンバシップ関数を図 7 に示す。

ここで述べた方法は幾何学的情報を利用した手法であり、従来困難とされてきた速度制御入力決定を、LA と TRO という二つの新しいファジィパラメータ

を導入することにより、比較的簡易に実現したものである。

〈2・5〉 ステアリング制御入力決定

(1) 障害物回避に必要なステアリング制御入力決定 障害物回避に必要なステアリング制御入力 OS の決定に関しては、前田ら⁽¹⁾の提案した手法を用いる。静的・動的危険度から表 2 に示すデジジョンテーブルを用いてその制御入力決定する。

(2) 目標点到達を考慮に入れたステアリング制御入力決定 ロボットは障害物を回避すると同時に目標に向かわなければならないから、図 2 の第 2 段において、〈2・5〉節で求めた障害物回避に必要なステアリング制御入力に目標方向のベクトルを合成することを考える。ただし、1 対 1 で合成した場合には目標ベクトルに引っ張られ障害物と衝突することがあるので、(5) 式に示すように静的危険度 α と動的危険度 β のうちで大きいほうの値を用いベクトル合成に重みとして用いる。

$$\left. \begin{aligned} x &= \max(|\alpha|, |\beta|) \\ d_{sb} &= 1 - (1 - x)^2 \\ M &= d_{sb}m_0 + (1 - d_{sb})m_t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

m_t : 目標へのステアリング制御入力, m_0 : 障害物回避のステアリング制御入力, M : 合成したステアリング制御入力, d_{sb} : m_0 の重み

〈2・6〉 ステアリング・速度制御入力の重みづけ合成部 本節では、速度制御入力とステアリング制御入力との合成手法について述べる。

(1) 重みづけ合成手法の概略 移動ロボットの位置を原点とし、その進行方向を Y 軸の正にとると、速度変化は Y 軸方向のみに生じ、ステアリングは X 軸方向の動きを示すことになる。その際、障害物が正面方向からロボットに接近してくる場合、速度制御のみで回避を行うことは不可能でありステアリング制御により障害物回避を行わなければならない。逆に、障害物が横方向から接近してくる場合、ステアリング制御のみで回避を行うことは不可能であり、速度制御により障害物回避を行わなければならない。しかしながら、実際には上述の中間の場合が多いと考えられ、その場合、各制御入力の重みづけ合成方法は無数に存在することがあり得る。このような場合、合成部のルール数が増大することになり、本来の目的であるルール数の削減に反してしまうことになる。これを避けるためには、速度制御およびステアリング制御のうち、どちらかをベースにし、その性能の低下を生じぬよう他方の制御を組み合わせたほうが、ルール数削減の観点

表 3 FBS のルール
Table 3. Rules of FBS.

$ \beta $	$ RA $	R S (small)	R L (large)
B S (small)		S W M	S W S
B L (large)		S W L	S W N

図 8 FBS のメンバシップ関数
Fig. 8. FBS Membership function.

から得策であると考えられる。

本論文では速度制御を基本としてルールを設定する。その理由として、以下の事項がある。

- (i) 図形的な解析から、ルールの法則性がはっきりしている。
- (ii) 障害物とロボットの直線軌道の交差点を簡単な一次関数で求め、そのときの両者の距離を図形的に求めることができるので、未来予測ができる。
- (iii) ルール数が少なく簡便である。

(2) ファジィ推論による制御入力の重みづけ合成

図 2 の第 1 段目においてステアリング制御入力と速度制御入力を合成する。その基本ルールは、「障害物が正面から近づいてくる場合はステアリングの回避運動に対する寄与率を大きくし、左右方向から近づいてくる場合はその寄与率を小さくする」というものである。

本論文では、(1)項で述べたように速度制御入力を固定しておいて、ステアリング制御入力を増減(寄与率 FBS に依存)させることにより、出力の合成を行うことにする。

この寄与率 FBS は、前述で求めた動的危険度 β と相対方位角 RA で表 3 に示すようなルールを作り、図 8 に示すステアリング重みのメンバシップ関数を用いて推論する。得られた寄与率 FBS の計算値を(5)式で求めたステアリング制御入力 M に掛けることで最終的な制御入力を決める。

3. シミュレーション

シミュレーション結果を図 9(a)~(g)に示す。(a), (c), (e), (h)図は速度制御+ステアリング制御、合成部なしの場合。(b), (d), (f), (g)図は速度制御+ステアリング制御、合成部ありの場合である。8 図とも黒く塗った部分は、ロボットと障害物

の同時刻の位置を示し、特にすれ違うときを矢印で示してある。また、このシステムは速度制御に重きをおいているので、むだなステアリング制御をせず直線軌道からの偏差を少なくすることを評価の対象としている。

障害物が等速直線運動をする場合は、図 9(a), (c)に示すように両制御をただ単に組み合わせるだけでは不適切な回避運動になることがわかる。(b), (d)図は提案する合成部を用いることで、適切な回避運動に補正することができていることを示している。障害物が(e), (f)図に示すような緩やかな等加速度直線運動をする場合、合成部を用いず単に両制御を組み合わせるだけでは、(e)図に示すとおり左右に大きくステアリング制御を行いながら回避動作を行っている。合成部を用いた場合、(f)図に示すとおり、むだなステアリング制御は行わないよう合成部が補正しているのがわかる。また、障害物が(g), (h)図に示すような緩やかな曲線運動をする場合も同様に、合成部を用いず単に両制御を組み合わせるだけでは、(g)図に示すとおり左右に大きくステアリング制御を行いながら回避動作を行っている。合成部を用いた場合、(h)図に示すとおりむだなステアリング制御は行わないよう合成部が補正しているのがわかる。

これらのシミュレーション結果より、障害物が連続的で滑らかに動作する場合、提案する合成部が有効に機能していることがわかる。これは、〈2・6〉節(2)項の冒頭で述べた合成部の基本ルールが、障害物が直線的に近づいてくる場合を想定して作成したルールであることによるものである。従って、この部分に修正を加えることにより、障害物が直線的に動作しない場合でも適切な回避動作を行わせることが可能であると思われるが、この点は今後の課題としたい。

また、いずれの結果においてもファジィルールを階層化せず全入力パラメータを組み合わせるルールを構成する場合と比べて、大きな制御性能の低下は見られず、階層化によってルール数を削減しても、十分な回避動作が可能であることが理解できる。

4. 考 察

特別な中間パラメータを設定しファジィルールを階層・細分化し、上位レベルでファジィ合成を行う方法の利点は、複数の出力パラメータを個別に扱うことにより、全体のルール数を減らすことができることにある。上述の例では、もし全入力パラメータを組み合わせれば 144 ルール必要であるが、階層化により 44 ルールまで減らすことができた。

図 9 速度制御＋ステアリング制御

Fig.9. Velocity and steering control with fuzzy balancer.

この出力パラメータを個別に考える方法は、入力パラメータを必要に応じて分割することでルールの次数を下げることにほかならない。よって、パラメータの数が増えれば増えるほど、ルール数の減少効果は大きくなる。

また入力-出力の経路を分岐することによって、デシジョンテーブルなどの変更が系統別に行えるため、

システム全体の性質・特徴を容易に変更することができる。

その逆に、個別に出力した複数のデータを適切に組み合わせるための別ルールが不十分であれば、すべてのルールを網羅したシステムに比べ性能的に劣ってしまう可能性が高い。従って、複数の出力をいかに適切に組み合わせるかが大きな問題である。

本論文で取り扱った移動ロボットの速度制御とステアリング制御による障害物回避という問題においては、〈2・6〉節(2)項で述べたように両制御入力 of 合成方法が直観的に得られたため、満足のいく結果が得られた。このように複数の出力データの相関性が明確な場合には、その相関を考慮に入れたファジィルールを構築することにより、全体のルール数を格段に減らすことができると思われる。

5. ま と め

本論文におけるファジィルールの階層化は、より少ないルール数で、高度な制御性能を実現しようとするものであり、シミュレーションによりその有効性を示した。今後の課題としては、ルール数の低減に関する定量的評価、未来予測部やシステム全体の利益を図るスーパーバイザなどの設定、また学習機能を用いたメンバシップ関数の最適化^{(6)~(7)}や、情報・パラメータの差別化などが考えられる。

(平成4年10月30日受付, 同5年2月15日再受付)

文 献

- (1) 前田・竹垣:「ファジィ推論を用いた移動ロボットの動的障害物回避運動」, ロボット学誌, 6, No. 6, 518 (昭63)
- (2) 小山・前田:「ファジィプロダクションシステムによる移動ロボットの動的障害物回避問題の検討」, 同上, 9, No. 1, 75 (平3)
- (3) 竹内:「自律型ファジィ移動ロボット」, 同上, 6, No. 6, 549 (昭63)
- (4) 石川:「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」, 同上, 9, No. 2, 149 (平3)
- (5) 水本:「ファジィ制御向きのファジィ推論法」, 計測自動制御学誌, 28, No. 11, 959 (平元)
- (6) 堀川・古橋・大熊・内川:「ファジィニューラルネットワークによる学習型ファジィ制御器」, 計測自動制御学論, 27, No. 2, 208 (平3)
- (7) 野村・林・若見:「最急降下法によるファジィ推論の自動チューニングと障害物回避への応用」, 第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, p. 423 (平2)

青 木 猛 (非会員)

昭和61年3月名古屋大学工学研究科航空工学専攻修士課程修了。同年4月名古屋市工業研究所入庁。インテリジェントコントロールの研究に従事。

岩 田 裕 二 (非会員)

平成4年3月名古屋大学工学部機械工学科卒業。同年4月セイコーエプソン(株)入社。現在、開発に従事。

鈴 木 達 也 (正員)

昭和63年3月名古屋大学工学研究科博士課程修了。現在、名古屋大学工学部助手。ロボットのモーションコントロールおよびタスクプランニングに関する研究に従事。工学博士。

大 熊 繁 (正員)

昭和47年3月名古屋大学工学研究科修士課程修了。49年ケース・ウェスタン・リザーブ大学大学院修士課程システム工学専攻修了。52年名古屋大学工学研究科博士課程修了。同年名古屋大学工学部助手, 59年同助教授を経て, 平成2年同教授, 現在に至る。この間, ロボティクスとパワーエレクトロニクスの研究に従事。工学博士。