論文

あいまい状況適応能力を有する 自律移動ロボットの行動決定ファジィアルゴリズム†

前田 陽一郎*

知能ロボットにおいて「人間らしい」行動決定機能を表現しようとする場合、あいまい状況認識を含む動作シーケンスの記述が重要となる。本研究では、クリスプ量およびファジィ量が混在するようなシーケンスフローが表現可能なファジィアルゴリズムの概念を用いて、人間が通常行っているのに近いマクロ行動決定アルゴリズムを記述することを試みる。本論文では、まずアルゴリズムチューニング機能を有する修正ファジィアルゴリズムを提案し、次にこれを用いた自律移動ロボットの行動決定アルゴリズムの構築方法について述べる。

本方式の主な特長を以下に示す。

- 1) ファジィアルゴリズムを用いることにより行動決定シーケンスの柔軟でかつマクロな知識表現が可能である。
- 2) ファジィフレームによるあいまい概念および修正ファジィアルゴリズムによるあいまい状況の定義ができる。
- 3) 行動目的に従って制御されるスレシールド値をもつアルゴリズムチューニング機能をもつ。

最後に本方式の検証のため、簡単な屋内環境を想定して行った計算機シミュレーションおよび移動実験の結果についても報告する。

キーワード：ファジィアルゴリズム、アルゴリズムチューニング、自律移動ロボット、行動決定、あいまい状況

1. 緒 言

近年、知能ロボットの自律行動決定機能の高度化を目指した新しい研究アプローチとして、階層的な制御メカニズム^{1),2)}や生物的な行動モデル^{3),4)}を提唱した研究がいくつか発表されている。これらはいずれもロボットの行動(behavior)というマクロなレベルでかつ表現が困難な機能の実現を対象としている点で従来のロボット制御とは異なった新たな研究方向であると考えられる。しかしながら、今までのところロボットの高度知能化においては、人間の複雑な判断機構、理性・常識などの模倣が最も大きな課題として残されているの

が現状である。このようないわゆる「人間らしい」機能をロボットにもたせるためには、人間に似たマクロ判断機構をもち、高度な自律制御が可能な知的機械システムの制御系の構築手法を確立することが必要となる。

このヒューマンフレンドリロボットの実現を考えた場合、知的情報処理手法やモデル構築手法はもとより、複雑な動作シーケンスをマクロにかつ柔軟に記述できる方法論が最も重要になってくる。しかしながら例えばAIプロダクションルールによる表現方法を用いた場合、このようなシーケンスフローの記述が可能である反面、あいまい状態を容易に取り扱うことができない。一方、ファジィルールによる表現方法を用いた場合はあいまい状態は表現し得るが、分岐を伴うシーケンシャルな多段の推論を表現するには不向きである。

そこで本研究では、移動ロボットを対象として

† Behavior-Decision Fuzzy Algorithm with the Ambiguous State Adaptability for Autonomous Mobile Robots

* Yoichiro MAEDA

三菱電機(株)産業システム研究所 FA システム開発部
Mitsubishi Electric Corporation, Industrial Electronics & Systems Laboratory, FA Systems Department

オンラインで移動する際、変化する前方の環境に対して比較的あいまいな状況を常に認識しながら的確な判断を行っているような、人間の柔軟な状況判断・適応能力を模擬した行動決定アルゴリズムを構築することを試みる。本論文では、あいまいな状態を記述でき、かつシーケンスフローが表現可能なファジリアルゴリズムの概念を用いて、人間が通常行っているのに近いマクロ行動決定アルゴリズムを記述する方法について述べる^{5),6),7)}。また人間は行動目的を自律的に判断し状況に応じた行動決定を行っていると考えられるが、このような目的自律判断機能によるスーパーバイザリなファジリアルゴリズムチューニング方法についても述べる。

2. 行動決定ファジリアルゴリズムの構築

ファジリアルゴリズム (Fuzzy Algorithm)^{8),9)} は意思決定システムの近似解析のための一手法として L.A.Zadeh により提唱された概念である。これはクリスプ量およびファジィ量が混在するようなシーケンスフローが表現可能な記述手法で、ファジィ理論の基本的概念となったものである。以下ではこのファジリアルゴリズムを用いることにより自律移動ロボットの行動決定において人間に近いマクロ判断機能を表現することを考える。

図1に本方式の概念図を示す。あらかじめ移動ロボットのあいまい行動決定のシーケンスフローはファジリアルゴリズムにより記述されている。ロボットが動作中は Sensor の外界情報および Planner の目標情報により得られたあいまい行動目的 (Fuzzy Purpose) に従ってファジリアルゴリズムの分岐および処理を上位制御することによりオンラインでアルゴリズムチューニングが行われる。これにより、マクロな行動決定シーケンス、あいまいな状況認識、柔軟な環境適応能力、等を有するフレキシブルなスーパーバイザリ制御システムを構築できる。以下では本方式で用いたファジリアルゴリズムおよびシステム構築に関するルール記述について述べる。

2.1 修正ファジリアルゴリズムの提案

Zadeh 教授によるとファジリアルゴリズムは「ファジィ指示 (Fuzzy Instructions) の順序集合」で、定義・生成・関係・決定の4つの表現能力をもっているとしている。これらのアルゴリズム記述はいずれも我々の日常のあいまい思考のスタイルに極めて近いマクロな表現能力をもっている。

しかしながら、ファジリアルゴリズムをそのままロボットの行動決定アルゴリズムの表現に用いるには実用上の問題がある。ここではこの問題点および提案した修正法について述べる。

2.1.1 ファジリアルゴリズムについて

ファジリアルゴリズムを用いると、一般に知られている IF...THEN...で表現されたファジィルールを用いるファジィ制御と異なり、IF...THEN...ELSE...のファジィ分岐を許しているため、クリスプ量とファジィ量が混在するような極めて自然な表現形式でシーケンスアルゴリズムを記述できる特長がある。ファジィ制御で一般に用いられている MIN-MAX 重心合成に基づくファジィ推論などは、通常のシーケンスプログラム中

図1 行動決定ファジリアルゴリズムの概念図

ではある一つの処理ブロックにしか相当しないのに対して、ファジィアルゴリズムでは分岐処理にまでファジィ数を導入できるため柔軟にアルゴリズムフローを記述することができる。

ところで、本来のファジィアルゴリズムではファジィ分岐後の処理を並列発火し、それぞれ前件部グレードの重み(あいまいさ)を継承する形で後件部を実行することが提案されている。しかしながら、この方法で実際のアルゴリズムを実行すると並列処理が増大し、やがてアルゴリズムフローが爆発するため、収束が保証されている処理量減少規則が必要となる。さらに逐次制御アルゴリズムなどの各推論サイクルごとに一つの出力を求めなければならない場合には、どうしても出力段階では処理を収束させる必要がある。

室伏ら¹⁰⁾はこのファジィアルゴリズムを用いて模型自動車のファジィ制御を実現しており、その言語指示に対する有効性を簡単な実験により実証している。この論文ではファジィ分岐におけるルールの前件部グレード値に対しスレシヨールドを設け、これを越えるかどうかで分岐を決定しており、アルゴリズムの処理を爆発しないようにしている。しかしながら、スレシヨールド固定のため完全にクリスパな分岐処理と同等になってしまっており、ファジィアルゴリズム本来の特長が生かされていない。

2.1.2 修正ファジィアルゴリズム

前述のようなファジィアルゴリズムの問題点を考慮し、本研究ではファジィ分岐のルール前件部にスレシヨールド値を設けこれを自律的に判断した行動目的によりチューニングする方法(以後、修正ファジィアルゴリズムと呼ぶ)を提案する。この手法の概念図を図2に示す。各ファジィ分岐にはそれぞれスレシヨールド値(図では μ_1 , μ_2 など)が定義されており、IF...THEN...ELSE...の形式で分岐表現がなされている。

分岐が通常のクリスパで表現されている場合、前件部が成立(Yes)すれば THEN 部が、不成立(No)ならば ELSE 部が一方だけ実行(単一発火)

される。しかしながらファジィ分岐の場合、前件部にある入力を与えられ、そのマッチ度(成立グレード値)が m であったと仮定すると、マッチ度 m で THEN 部が、マッチ度 $(1-m)$ で ELSE 部がともに実行(並列発火)される。ところが、この方法で実際のアルゴリズムを実行すると前節で述べたように並列処理が増大し、やがてアルゴリズムフローが爆発する。

これに対し、提案した修正ファジィアルゴリズムではファジィ分岐のスレシヨールド値を μ_1 と仮定すると、 m が μ_1 より大きいときは THEN 部が m のマッチ度で、 m が μ_1 より小さいときは ELSE 部が $(1-m)$ のマッチ度でどちらか一方が実行(単一発火)されるものとする。このため、アルゴリズムの分岐処理が爆発することはない。しかも、アルゴリズムチューニングの重要なパラメータであるスレシヨールド値をアルゴリズムの上位レベルで制御(本研究では自律移動ロボットを対象としているため行動目的に従って制御)しているため、オンラインで状況に応じてアルゴリズムのフロー自体を変化させることができる。

図2 修正ファジィアルゴリズム

さらにこれを本来のファジアルゴリズムに近づけるための手法としては、例えば分岐の際、それぞれのグレード値が近いような場合は並列処理を行い、離れた場合はグレード値が大きいほうの処理のみを選択するとか、あるステップ数を限定してそのあいだだけ並列分岐を行うなどの処理方法が考えられる。

2.2 あいまい概念およびあいまい状況の記述

前述の修正ファジアルゴリズムを用いてメインフローを記述する前に、ここでは行動決定のアルゴリズム記述に必要なあいまい概念およびあいまい状況を定義する。

2.2.1 あいまい概念

まず初めに状況記述で用いるあいまい概念の一例として、障害物(Obstacle)・壁(Wall)・前方空間(Freespace)・ロボット(Robot)に関する属性をファジ変数とクリスプ変数が混在したフレーム形式で定義したものを図3に示す。ここでの各属性集合は言語指示の場合の Linguistic Variable に相当し、人間に近い感覚で表現されているものとする。

カッコ内に略称で示したラベルは、斜体がファジラベルでその他はクリスプなラベルである。

Fuzzy concept Obstacle (OB)	
Kind	human (HM)/animal (AN)/not_creature (NC)
Char	very careful (VC)/careful (C)/normal (NO)
Dist	close (CL)/far (FR)/out of range (OR)
Dire	S_forward (SF)/forward (FW)/side (SD)
Speed	very fast (VF)/fast (F)/slow (SL)
S_dire	approach (AP)/not_approach (NA)
Fuzzy concept Wall (WA)	
Dist	close (CL)/far (FR)/out of range (OR)
Dire	S_forward (SF)/forward (FW)/side (SD)
Fuzzy concept Free-space (FS)	
Width	very narrow (VN)/narrow (N)/wide (W) /very wide (VW)/out of scan (OS)
Dist	close (CL)/far (FR)/out of range (OR)
Fuzzy concept Robot (RO)	
Wagon	with (WI)/without (WO)
Speed	very fast (VF)/fast (F)/slow (SL)
Time	long (LO)/little long (LL)/short (SH)
Energy	empty (EM)/little empty (LE)/full (FU)

図3 あいまい概念の記述例

上記の表現は属性スロット値がファジラベルで定義できるフレーム(以後、ファジフレームと呼ぶ)により記述される。

2.2.2 あいまい状況

移動の場合、最も問題になると考えられるのが走行時において前方が通過できる(Passable)のか、障害物が回避できる(Avoidable)のかなどといった行動決定において必要とされる比較的あいまいな状況に対する認識である。このような状況認識を明確に記述するのは容易ではないが、ここでは前述の修正ファジアルゴリズムを適用し、あいまい状況の近似的表現を行うことを考える。

図4に前述のあいまい概念を用いて "PASSABLE"と "AVOIDABLE"を表現した例を示す。ここで、PASSABLE, IMPASSABLE, AVOIDABLE, UNAVOIDABLE はあいまい状況を表現するファジ数を示す。この例では、例えばPASSABLEを定義する場合、IMPASSABLEの定義を行ってから残りの概念をすべてPASSABLEとしている。ある概念を定義しようとする場合、概念自身の集合とその補集合のうち規定しやすい部分のどちらかから定義すればよい。

ルールの前件部にはファジ変数とクリスプ変数の両方が混在しており、比較的人間が行ってい

Fuzzy state PASSABLE → Threshold value ζ ($0 \leq \zeta \leq 1$)	
IF (FS.Width is VN)	THEN (Forward is IMPASSABLE); stop.
IF (FS.Width is N and FS.Dist is CL)	THEN (Forward is IMPASSABLE); stop.
IF ((FS.Width is N and FS.Dist is FR) and RO.Wagon is WI)	THEN (Forward is IMPASSABLE); stop.
IF ((FS.Width is W and FS.Dist is CL) and RO.Wagon is WI)	THEN (Forward is IMPASSABLE); stop.
Forward is PASSABLE; stop.	
Fuzzy state AVOIDABLE → Threshold value μ ($0 \leq \mu \leq 1$)	
IF (OB.Speed is VF and OB.S_dire is AP)	THEN (Obstacle is UNAVOIDABLE); stop.
IF (OB.Dist is CL and OB.Dire is SF and OB.Speed is F and OB.S_dire is AP)	THEN (Obstacle is UNAVOIDABLE); stop.
IF (OB.Dist is CL and (OB.Char is VC or OB.Kind is HM))	THEN (Obstacle is UNAVOIDABLE); stop.
IF (OB.Dist is CL and OB.Dire is SF and OB.Char is C)	THEN (Obstacle is UNAVOIDABLE); stop.
Obstacle is AVOIDABLE; stop.	

図4 あいまい状況の記述例

るあいまい状況判断に近い定義ができると考えられる。この例の場合、後件部は同じであるので例えば *PASSABLE* に関しては、上から順にルール前件部の MIN グレード値を求め、どれかがスレショールド ξ を越えた場合、その時点でその時のあいまい状況 *IMPASSABLE* が成立し、どのルールも越えなかった場合、*PASSABLE* が成立することになる。尚、後件部の *PASSABLE*, *IMPASSABLE* 等はファジィラベルで定義するため、その状況の成立度合も得られる。

また上記のスレショールド値をコントロールすることにより、あいまい状況判断を微妙に変化させることが可能である。さらにあいまい状況定義ルールの中で用いられているあいまい概念自体も変化させれば間接的に状況判断をコントロールすることもできる。例えば、ファジィフレームの属性中のメンバーシップ関数を変化させること (e.g. 危険な場合、Obstacle の very careful, careful をそれぞれ normal 側にスライドさせ、常に careful と感じさせるようにするなど) が考えられる。

2.3 行動目的自律判断機能の記述

ここではロボットがある行動目的を自律的に判断し、その結果をファジィアルゴリズムに反映させる方法について述べる。この部分はアルゴリズム全体をそのときの行動目的に応じて微妙にチューニングするところで、行動決定アルゴリズムの上位に位置づけられるものである。このように階層構造を構成することにより目的評価機能をスーパーバイザとして、よりマクロな判断に基づくアルゴリズムの統括コントロール手法を実現することを考える。本手法ではこの目的判断部の構成として人間の状況適応能力を参考にし「戦略評価」と「戦術決定」の2段階決定方式をとっている。

2.3.1 戦略評価

ロボットが現在得られる情報から判断して自分自身が今どういう移動モードで行動すべきかの評価を行う。この部分では明確な定義が困難なあいまい行動目的(ここでは FUZZY_PURPOSE と

呼ぶ)をファジィアルゴリズムを用いて表現することを考える。たとえば、「安全性重視 (SAFETY)」、「省エネ (ECONOMY)」、「最短時間 (MIN-TIME)」の3つの移動モードを考えた場合、図5(上段)のようになる。

S, E, T はそれぞれ「安全性重視」、「省エネ」、「最短時間」の3つの移動モードと判断される度合いを示すファジィ数を表す。このアルゴリズムでは行動目的の多数決評価をとるため、各ルールのモード成立度をそれぞれ *Ms*, *Me*, *Mt* として、これらの最大値をとるモードをそのときの最大目的として一つ選択する。

図5 戦略評価および戦術決定ルールの記述例

2.3.2 戦術決定

前述の戦略評価に基づきアルゴリズム中でこの戦略を反映させるための戦術を決定する。ここでは評価された戦略ごとにアルゴリズム中で主に以下の3点を修正する機能を提供するものとする。

- 1) アルゴリズムの分岐判断制御
 - ・ファジィ分岐のスレショールド値の修正
 - ・あいまい概念の属性パラメータの修正
- 2) 行動方策の修正
 - ・経路追従/障害物回避の重みの修正
 - ・危険度評価のスレショールド値の修正
- 3) 制御条件の変更

・速度、操舵メンバーシップ台集合の修正

これらの機能を先ほどの戦略ごとに規定するルールを記述する。図5(下段)ではそれらのうち、SAFETY Mode を例にとり戦術決定ルールを示す。

ここで、前件部は一つのファジィ数で表されており、戦略評価の出力グレード値に従って後件部のアルゴリズム修正操作がなされる。上記のルールでは、 $\uparrow \cdot \downarrow$ の矢印がファジィアルゴリズム中の前件部スレッシュホールド値の上下操作を、 $\leftarrow \cdot \rightarrow$ はメンバーシップ関数自体を左右にスライドさせる概念定義の修正操作を示す。

以上のような戦術が推論サイクルごとに一つの戦略に基づいて決定される。これを行動決定アルゴリズムに対して適用することにより、アルゴリズムのオンラインチューニングが可能となる。本方式ではここで述べたような行動目的を自律的に判断し、それに伴ってアルゴリズム自体を変化させるという柔軟性・適応性を付加的にもたせているため、高度な状況判断機能をロボットに与えることが可能になる。

2.4 行動決定ファジィアルゴリズムの記述

本方式では行動モードを STOP, MANUAL, PLAN, OBSTACLE, NORMAL の5つに大別している。これらを含む行動決定ファジィアルゴリズムの全体フローを図6に示す。行動目的として上位で評価された FUZZY_PURPOSE がアルゴリズムの分岐判断処理に対して行うさまざまなチューニングが太い破線矢印で示されている。図において左上がアルゴリズムの開始、右下が終了でこの処理を各サンプリングタイム毎に逐次繰り返す。図の上方にある入力部はセンシング部およびプランニング部¹¹⁾からの入力情報を取り込む部分で、サブゴール情報はオフラインであらかじめ目標値メモリに入力されていると仮定しアルゴリズム実行中にサブゴールに到達するたびに順次与えられる。

アルゴリズムフロー全体を統括制御するメタルールはファジィアルゴリズムを用いて、例えば図7(上段)のように記述される。ここで *IMPASSABLE* は2.2.2節で定義したあいまい状況を示す。後件部の太字は分岐先のファジィサブアルゴリズムを表しており、FUZZY_PURPOSE は前節

図6 目的自律判断機能を有する行動決定ファジィアルゴリズム

の目的判断部の処理ルーチンを示す。

さらにサブアルゴリズム OBSTACLE について、目的判断部において「安全重視」モードがすでに選択されているものと仮定した場合の記述例を図7(下段)に示す。ここで斜体字はファジィ数、太字はファジィサブアルゴリズム、その他はクリस्प情報を表す。また“Obstacle is *UNAVOIDABLE* with *Very Low*”とは障害物に対する回避可能性が *Very Low* のグレードで *UNAVOIDABLE* であることを示している。尚、ステップ5]では回避不能の判断後、障害物の様子を見るためしばらくウェイティングしたあとメインアルゴリズム META のステップ6]へ戻ってリトライしていることを表している。尚、図6における危険度認識、障害物回避方策等についてはここでは割愛する^{12),13)}。

図7 行動決定ファジィアルゴリズムの記述例

3. 有効性検証シミュレーション

提案した手法のあいまい状況の記述性およびファジィアルゴリズムチューニング機能を確認するため、2次元の屋内環境を想定した計算機シミュレーションを実施した。以下ではまず移動ロボッ

トシミュレータについて簡単に述べたあと、シミュレーションにおいて用いられたパラメータ、ルールおよびスレショルド制御の説明、最後にシミュレーション結果について報告する。

3.1 移動ロボットシミュレータ

シミュレーションに先立ち、ロボットの行動決定および動作を確認するため、移動ロボットシミュレータを構築した。本シミュレータで仮定した移動ロボットの状態モデルを図8に示す。ロボットは8個の超音波センサを進行方向に設置しており、各15°ずつ120°のエリアの前方物体までの距離を計測できる。これは実験システムと全く同じハードウェア構成を想定したものである。シミュレータでは以下の入力情報を仮定している。

1) プランニング情報

(P_{sx}, P_{sy}, δ)_k: サブゴールの位置および収束許容範囲 ($k=1, \dots, m$)

2) センシング情報

(P_{rx}, P_{ry}, θ_r): ロボットの現在位置および姿勢

d_i ($i=0, \dots, 7$): ロボットから壁または障害物までの距離

θ_o : ロボット座標系における障害物の方位

ここでプランニング情報に関してはあらかじめシミュレータに与えられるが、センシング情報はオンラインでロボットのセンサ系より取り込まれる。これらの情報よりロボットはサブゴール、障害物、壁、狭路等の状態を認識する。

図8 移動ロボットの状態モデル

3.2 シミュレーション条件

表1はこのシミュレーションで用いた各種パラメータおよびロボット、センサ(ソナー)、障害物の特性を示す。またシミュレーションにおいては、図9に示されたような比較的簡単なルールを用いた。あいまい状況 *PASSABLE* に関する最初のルールはロボットの前空間の幅およびそこまでの距離を示すファジィラベルに基づいて記述されている。このルールの出力は前方空間の通過不能度 ($0 \leq IM \leq 1$) である。通過不能度 *IM* がルールのスレシヨールド *TH_imp* を越えた場合、前方空間は *IMPASSABLE* と判断され、このシミュレーションにおいてはロボットは引き返す行動をとる。

あいまい状況 *AVOIDABLE* に関する次のルールでは、ロボットが出くわした障害物に対する回避不能度 ($0 \leq UN \leq 1$) を定義している。もし *UN* がスレシヨールド *TH_una* を越えたら障害物は *UNAVOIDABLE* と判断され、ロボットは

IMPASSABLE と同様にその場で引き返す。さらに、*UN* が *TH_una*/2 以上 *TH_una* 以下の場合、ロボットはウェイティング動作(しばらくの間静止する動作)をとるようにルール記述がなされている。3つ目のルールは行動目的 *SAFETY* を定義するものでここでは目的評価のため、前方危険度を認識させている。ロボットはこの評価ルールに従って前方危険度 ($0 \leq DA \leq 1$) を認識する。

これらのルールに対して、ファジィ分岐が *IMPASSABLE* や *UNAVOIDABLE* のスレシヨールド値に従って制御される。例えば、*IMPASSABLE* のスレシヨールド *TH_imp* は次式に従い各サンプリング毎に決定される。

$$\begin{aligned} TH_imp &= TH_imp \\ &+ G_imp \cdot ((1 - DA^2) \cdot TH_imp0 \\ &- TH_imp) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、*TH_imp* および *TH_imp0* はそれぞれ *IMPASSABLE* の現在およびデフォルトのスレ

表1 シミュレーション条件

演算サンプリングタイム : 0.1 sec 表示サンプリングタイム : 0.3 sec 移動環境 : 4m * 4m room サブゴールノード数 : 12 nodes スレシヨールド値 : <i>TH_imp0</i> = 0.9 <i>TH_una0</i> = 0.8 <i>G_imp</i> = 0.02 <i>G_una</i> = 0.05	ロボット → 速度/操舵制御が可能な自律移動ロボット ●速度: 10cm/s ●大きさ: 幅約 30 cm ソナー → ロボット中心から前方 8 方向の測距センサ ●レンジ: 前方 120° (15° × 8) ●計測限界: 2 m以内 障害物 → 円柱形移動物体 ●速度: 40 cm/s ●大きさ: 直径 20 cm ●移動時刻: 130 sec ~ 165 sec
---	--

Fuzzy state	スレシヨールド	行動
Fuzzy state <i>PASSABLE</i> (出力値 $0 \leq IM \leq 1$) IF <i>P</i> = [(<i>FS.Width</i> is <i>VN</i>) or (<i>FS.Width</i> is <i>N</i> and <i>FS.Dist</i> is <i>CL</i>)] is high THEN (Forward is <i>IMPASSABLE</i>) ELSE (Forward is <i>PASSABLE</i>).	→ <i>TH_imp</i>	<Back Track> <Passing>
Fuzzy state <i>AVOIDABLE</i> (出力値 $0 \leq UN \leq 1$) IF <i>A</i> = [(<i>OB.Speed</i> is <i>VF</i> and <i>OB.S_dire</i> is <i>AP</i>) or (<i>OB.Dist</i> is <i>CL</i> and <i>OB.Dire</i> is <i>SF</i> and <i>OB.Speed</i> is <i>F</i> and <i>OB.S_dire</i> is <i>AP</i>)] is high THEN (Obstacle is <i>UNAVOIDABLE</i>) ELSE IF <i>A</i> is little high THEN (Obstacle is <i>LITTLE UNAVOIDABLE</i>) ELSE (Obstacle is <i>AVOIDABLE</i>).	→ <i>TH_una</i> → <i>TH_una</i> /2	<Back Track> <Waiting> <Avoiding>
Fuzzy purpose <i>SAFETY</i> (出力値 $0 \leq DA \leq 1$) IF <i>S</i> = [(<i>OB.Dist</i> is <i>CL</i> and <i>OB.Dire</i> is <i>SF</i>) or (<i>WA.Dist</i> is <i>CL</i> and <i>WA.Dire</i> is <i>SF</i>)] is high THEN (Mode is <i>DANGER</i>).		

図9 シミュレーションで用いたファジィアルゴリズム

しヨールド値、 G_imp はスレシヨールドの制御ゲインである。またロボットの移動速度は最初のルールの出力値 IM に従い以下のように制御される。

$$Vr = (1 - IM^2) \cdot Vr0 \quad (2)$$

この式で、 $Vr0$ はロボットの初期速度を示す。このシミュレーションにおいてはロボットの現在速度 Vr は常に $Vr0$ 以下になるように設定している。この制御操作は 2.3.2 節の戦術決定における 1) と 3) のアルゴリズムチューニング方策に相当する。

3.3 シミュレーション結果

図 10 から図 12 にロボットの軌跡を描いたシミュレーション結果を示す。環境中における静止物体(黒い多角形)と移動障害物(大きい円)はロボット(五角形)から発射される仮想超音波センサにより前方 8 方向(15° おき、前方 120°)の測距を行い粗い距離を検知している。ロボットは最初サブゴール(小さい円)情報のみを与えられ、環境形状等の詳細情報はオンラインで移動中にセンシングにより獲得するものとする。

シミュレーションにおいては、ロボットは左下のスタート#0 から右上のゴール#11 へ移動する途中で中間サブゴール#3 をクリアするという問題設定を考えた。シミュレーション時刻はマップ左上に示されている。シミュレーションウィンドウの右側はファジィ状況、スレシヨールドおよびファジィ目的の状態を示している。このうち左側の 2 本の棒グラフは *IMPASSABLE* (IM) と *UN-AVOIDABLE* (UN) の値を示す。このグラフにおいて、黒の矢印はそのときの TH_imp および TH_una のスレシヨールドを、 UN における白い矢印はウェイティングモードを決定するスレシヨールド $TH_una/2$ を示している。右端のグラフはファジィ目的 *SAFETY* における *DANGER* (DA) の評価値で、 IM および UN のスレシヨールドはこの評価値 DA に従って制御される。

図 10 はスレシヨールド TH_imp と TH_una を共に DA に従い制御した場合のロボットの移動軌跡を示している。状態 a) では、ロボットは#3

から#11 への最短コースであるノード#8 への移動を試みるが、引き返す動作をとっている。これは前方が狭かったため危険度が少し上がり、これに伴いやや下がったスレシヨールド値を通過不能度 IM が越えて *IMPASSABLE* と判断されたことによる。次に状態 b) において、ロボットは中央のやや狭い通路に入るが、前方に障害物を発見しサブゴール#4 に引き返す。これは危険度 DA が大きくなったためにスレシヨールド TH_una が一時的に下がり、回避不能度 UN がこれを越えたためである。状態 c) では、ロボットが近づいてくる移動障害物に出くわすためにかなりスレシヨールド値が下がる現象が見られるが、前方空間が比較的広いために回避不能度 UN が黒と白の矢印の間にある程度留まっている。このためロボットは障害物が通過する間、しばらく停止して様子を見た後、回避行動をとる。

次に、スレシヨールド制御を全く行わなかった場合のロボットの動きを図 11 に示す。この場合、各スレシヨールドはデフォルト値のまま変化せずに一定となる。そのため通過不能度 IM はスレシヨールド値 TH_imp を越えにくく、図中 b) において示されているようにサブゴール#3 から#8 への狭い通路を強行で通過しようと試みる。また図 12 はスレシヨールド値 TH_imp のみを制御した場合のシミュレーション結果を示したものである。図において、ロボットはサブゴール#3 と#8 の間では引き返す行動をとるが、回避不能度 UN が制御されないスレシヨールド TH_una を越えないため、サブゴール#7 の近くに存在する障害物のそばをぎりぎり通り過ぎるという行動をとることが確認される。

これらのシミュレーション結果より、ロボットは狭路にアプローチするときの通過不能度や障害物に出くわしたときの回避不能度の認識をかなりの確に行っていることがわかる。特に、グラフ中のスレシヨールド値の変化は *IMPASSABLE* および *UN-AVOIDABLE* の認識が *SAFETY* の目的判断により妥当なチューニングが行われていることを示している。今回のシミュレーションでは

a)

a)

b)

b)

図11 シミュレーション結果(2)

[TH_imp : uncontrolled, TH_una : uncontrolled]

c)

a)

d)

図10 シミュレーション結果(1)

[TH_imp : controlled, TH_una : controlled]

b)

図12 シミュレーション結果(3)

[TH_imp : controlled, TH_una : uncontrolled]

前方空間や障害物の属性値により得られた危険度のみに従いスレシヨールドを制御したが、他の属性値やプランニング部からの上位レベルの行動目的などをも考慮したスレシヨールド制御を行うとより複雑な状況認識やさらに人間的な行動決定が実現できるものと考えられる。

4. 実証評価実験

シミュレーション結果に基づき、提案した行動決定アルゴリズムの実用性を検証するため自律型移動ロボットを実際に製作して、部屋を想定した模擬屋内環境において自律移動実験を行った。

4.1 実証評価システムの構成

本節では、実証評価実験のために開発した自律移動ロボットのシステム構成について述べる。図13に本システムの構成図を示す。本システムは、自律型移動ロボット HERO 2000 の動作部、パーソナルコンピュータ PC 98 RX の制御部、ワークステーション SUN 4 / SPARC の推論部の3つから構成される¹⁴⁾。

動作部は内部センサおよび搭載センサのデータ入力、移動制御のコマンド出力のみを担当する。

制御部はロボットとワイヤレスモデムを通じて RS 232 C 無線通信で BASIC コマンドにより制御指令やセンサデータを送受信する。また推論部とは RS 232 C 有線通信により推論結果の受信、制御結果およびセンシングデータの送信を行う。尚、もう一台のセンサフュージョン用コントローラはイメージトラッカ、放射温度計、超音波センサなどのデータを入力し、前方の障害物の生物度を判断するものである¹⁵⁾。推論部は全体を統括する推論レベルの処理を制御用ファジィシエル FRASH^{16),17)}により行い、制御部に指令を発する。オペレータはオンラインの推論・制御結果の観測をシミュレーションで用いた移動ロボットシミュレータを通して行うことができるようになっている。

4.2 実験結果

上記システムを用いて、前述のシミュレーションとほぼ同じ環境(4 m×4 m)を実験室内に実際に製作し、自律移動による行動決定ファジィアルゴリズムの有効性検証実験を行った。実験では、ロボットの上部中心に発光体を設け、この軌跡をイメージトラッカを用いて斜め上方からの映像

図13 自律移動ロボットのシステム構成図

としてモニタ上に表示させ、これを位置計測データとして用いるとともに移動軌跡として撮影する方法をとった。図14に今回実験に用いた自律移動ロボットの外観を示す。ロボット上部に取り付けられたセンサ類は主にセンサフュージョンに用いられるものである。前方環境認識用の超音波センサはロボット下部に設置している。

図15に屋内移動実験を行った結果のロボット移動軌跡を示す。この例はスレショールド制御を完全に行った場合で、行動決定アルゴリズムのシミュレーション(図10)とほぼ同等の条件で実施されたものである。

実験では、屋内空間の大きさ等の制限のため、斜め方向の画像から換算することによりロボットの中心位置および移動方位を求め、これにより自己位置同定を行った。そのため奥行き方向の分解能が左右方向に比べて低くなり、若干移動時にふらつく現象が見られたが、少々環境レイアウトの変化や繰り返し実験に対してもほぼ安定した移動特性が得られた。移動軌跡より明らかなように、シミュレーション結果とほぼ同じマクロ状況判断能力が確認され、本方式の実システムにおける有効性が示された。

5. 結 言

クリスプ量およびファジィ量が混在するようなシーケンスフローが表現可能なファジィアルゴリズムの概念を用いた自律移動ロボットの知的行動決定に関するアルゴリズム構築方法について研究を行った。本研究ではファジィアルゴリズムにおけるルール前件部に上位で制御されるスレショールドを設け、これによりオンラインでアルゴリズムを適応的に変化させる修正ファジィアルゴリズムを提案し、自律移動ロボットの「人間らしい」行動決定ルールの記述を試みた。本方式は、ファジィフレームによるあいまい概念および修正ファジィアルゴリズムによるあいまい状況の定義ができ、自律的に判断した行動目的に応じた柔軟なアルゴリズムチューニング機能を有する。

本方式の計算機シミュレーションを行った結果、

図14 自律移動ロボットの外観

図15 実験におけるロボットの移動軌跡

マクロ状況判断機能の有効性を検証することができた。さらに実際の自律移動ロボットを用いて同等の屋内移動実験を行ったところ、シミュレーションで得られた結果とほぼ同じ移動特性および状況判断能力が確認され、本方式の基本的な有効性が示された。尚、本研究は技術研究組合国際ファジィ工学研究所にて行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 榎木, 片井他, "視野情報に基づく自走ロボットの opportunistic path-planning とファジィ走行制

- 御”, 第12回知能システムシンポジウム, pp.63-68(1990)
- 2) C.ISIK and A.M.Meystel, "Pilot Level of a Hierarchical Controller for an Unmanned Mobile Robot", IEEE Jour. of Robotics and Automation, Vol.4, No.3, pp.241-255(1988)
 - 3) P.W.Cudhea and R.A.Brooks, "Coordinating Multiple Goals for a Mobile Robot", Intelligent Autonomous Systems (North-Holland), pp.168-174(1986)
 - 4) M.Zimmermann, "Intelligent Control for Insect-Like Locomotion", SICICI'92, pp.346-351(1992)
 - 5) 前田, 田鍋, 高木, "目的判断に基づく知能ロボットの行動決定ファジィアルゴリズム", 第7回ファジィシステムシンポジウム, pp.119-122(1991)
 - 6) Y.Maeda, M.Tanabe, M.Yuta and T.Takagi, "Control Purpose Oriented Behavior-Decision Fuzzy Algorithm with Tuning Function of Fuzzy Branch", IFES'91, pp.694-705(1991)
 - 7) Y.Maeda, M.Tanabe, M.Yuta and T.Takagi, "Hierarchical Control for Autonomous Mobile Robots with Behavior-Decision Fuzzy Algorithms", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.117-122 (1992)
 - 8) E.S.Santos, "Fuzzy Algorithm", INFORMATION AND CONTROL 17, pp.326-339(1970)
 - 9) L.A.Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-3, No.1, pp.28-44(1973)
 - 10) 室伏, 菅野, "模型自動車のファジィ制御", 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.6, pp.536-541 (1988)
 - 11) M.Tanabe, Y.Maeda, M.Yuta and T.Takagi, "Path Planning Method for Mobile Robot Using Fuzzy Inference Under Vague Information of Environment", IFES'91, pp.758-769 (1991)
 - 12) 前田, 山中, "CMAC 学習に基づくオペレータの制御戦略を有するファジィ障害物回避制御", 第6回ファジィシステムシンポジウム, pp.531-534(1990)
 - 13) Y.Maeda, "Fuzzy Obstacle Avoidance Method for a Mobile Robot Based on the Degree of Danger", NAFIPS'90, Vol.1, pp.169-172(1990)
 - 14) 前田, 田鍋, 湯田, 高木, "あいまい状況判断が可能な自律移動ロボットシステムの一構成法", 第8回ファジィシステムシンポジウム, PP.321-324(1992)
 - 15) 湯田, 前田, 田鍋, "フレーム型ファジィ知識表現を用いた階層型センサフュージョンによる生物認識", 第7回ファジィシステムシンポジウム, pp.131-134(1991)
 - 16) Y.Maeda, J.Murakami and T.Takagi, "FRASH - A Fuzzy Real-time Auto-tuning Shell with Expressive Function of Fuzzy Algorithms", SICICI'92, pp.1363-1368(1992)
 - 17) 前田, "ファジィアルゴリズムが記述可能な制御用ファジィシェル FRASH ", 第15回知能システムシンポジウム, pp.163-168(1992)
- (1992年9月4日 受付)
- [問い合わせ先]
〒661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1
三菱電機(株)産業システム研究所
FA システム開発部 第2 G
前田 陽一郎
☎: 06-497-7627 ㊚: 06-497-7726
e-mail : maeda@fas.sdl.melco.co.jp

著 者 紹 介

前田 陽一郎 (まえだ よういちろう)

三菱電機(株)産業システム研究所 FA
システム開発部 第2 G

昭和58年3月大阪大学大学院基礎
工学研究科物理系機械工学分野修士
課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。
中央研究所、応用機器研究所を経て、
平成元年4月から国際ファジィ工学
研究所へ出向、平成4年4月から三
菱電機(株)産業システム研究所へ帰任、
現在に至る。主として自律移動ロボ
ットのファジィ障害物回避制御、行
動決定ファジィアルゴリズム、制御
用ファジィ推論シェルの研究開発に
従事。日本ファジィ学会、計測自動制
御学会、日本ロボット学会の会員。