

修士論文

距離型ファジィ推論法に基づく

案内ロボットの軌道計画法

Trajectory planning method of a guidance robot
based on distance-type fuzzy reasoning

高知工科大学大学院基盤工学専攻
溝渕 宣誠

2002年2月8日

目次

第 1 章	序章	
1.1	ロボット研究における背景	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	システム制御における経路計画法, 軌道計画法	2
1.4	本論文の構成	3
第 2 章	距離型ファジィ推論法	
2.1	ファジィについて	4
2.2	ファジィ集合	7
2.3	ファジィ推論法	14
2.4	距離型ファジィ推論法	24
第 3 章	実験に使用するロボット	
3.1	駆動機構	40
3.2	センサ	41
3.3	システムブロック線図	42
第 4 章	距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法	
4.1	ファジィ軌道計画法の導入	43
4.2	軌道計画法の設計手順	44
4.3	言語ルールによる知識の抽出	44
4.4	知識の定式化	46
4.5	言語変数の定量化	48
4.7	距離型ファジィ軌道計画法のアルゴリズム	51
4.8	推論結果	52
第 5 章	距離型ファジィ推論法に基づく 軌道計画法を用いた案内ロボットの案内実験	
5.1	実験	56
5.2	実験結果	57
5.3	考察	87

第 6 章 結章

6.1	本研究の成果	88
6.2	今後の課題	88

参考文献

謝辞

第1章 序章

本論文では、まず案内ロボットと産業用ロボットとの違い、ロボットの運動制御に必要な軌道計画の概念を紹介する。次に距離型ファジィ推論法による軌道計画の必要性について述べる。更に距離型ファジィ推論に基づいた案内ロボットの軌道計画法を提案し、実験結果を説明する。最後に成果の意義と今後の改善点を述べる。

本章では、ロボット研究の背景から案内ロボットと産業用ロボットとの違いについて述べ、距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画の必要性について述べる。1.1 ではロボット研究の背景について述べる。1.2 では本研究の目的を述べる。1.3 ではシステム制御における作業計画、経路計画法、軌道計画法の概念について1つの例をあげて述べる。最後に1.4では本論文の構成について述べる。

1.1 ロボット研究における背景

従来からロボットの経路計画や軌道追従制御は盛んに行なわれている。例えば、室内蛍光灯情報など環境設備を利用する移動ロボット、障害物回避を目的とするステレオビジョンセンサの利用法などが提案されている。これらの研究はロボットの対象となる分野が生産工場などの産業分野であり、如何に正確に作業を行なうかといった高精度と、如何に早く作業を行なうかといった高速度が望まれてきた。一方、最近ロボットはロボットの活躍の場を産業分野から病院、老人ホームなどの医療福祉分野、人間生活の場に拡大している。両者の大きな違いは、前者がシステムの中で人間を除外しているのに対して、後者はシステムの中で人間を対象にする点である。したがって、人間と同じ物理空間で作業するロボットにとっては、高精度・高速度よりも寧ろ、安全性、人間の感情と行動に対しての理解、ロボットの動きによる感情表現など、いわゆるロボットと人間との間に生まれる相互関係が重要になってくる。

1.2 本研究の目的

本研究では、建物内で人間を誘導できる案内ロボットを開発することを目的として、その構成要素技術として案内ロボットの軌道計画法について研究した。案内ロボットが人間と同じ物理空間で活躍するので、精度よく素早く物を運ぶ産業用ロボットと違って、如何に案内ロボットと人間の相互関係を定量化するか、そして如何に案内役の知識を表現するかが中心課題となっている。本論文では人間と案内役との間に見られる案内知識を if-then ルールによって表現して、案内知識における曖昧な概念をファジィ集合によって定量化する。その理由としては、ファジィ集合と if-then ルールの設定により、多様な非線形特性

をもつ入出力関係が得られるので、非線形の強い実システムを適切に近似することができる。この考え方は、一つの方程式でシステムの特徴のすべてを表現しようとする数理モデル論と根本的に異なり、案内役と人間との複雑な相互関係が適切に定量表現できる。また、実際に案内ロボットのサーボ系に与える速度指令値を設計する、つまり軌道計画を行なうことが必要である。本論文では、if-then によって表される曖昧な案内知識を利用して、ファジィ推論法に基づいて軌道計画を行なう。ただし、ファジィ推論法としては本研究室で開発した距離型ファジィ推論法を用いる。距離型ファジィ推論法では、前件部と事実との距離を推論の根拠としているので、前件部ファジィ集合が互いに覆われていないようなファジィルールの場合でも、適切な推論結果を得ることができる。また、後件部が凸なファジィ集合であれば、推論結果も凸なファジィ集合になるので、ファジィ数としての特徴は保持されている。さらに、分離規則が厳密に満たされているので、学習アルゴリズムにより容易に最適なルールを探ることができる。最後に実際の自律移動ロボットを利用して、案内実験によって提案した軌道計画法の有効性が確認された。

1.3 システム制御における経路計画法，軌道計画法

一般的なシステム制御において主な問題はサーボ問題である。例えば、ロボットマニピュレータに対して目標軌道が与えられたら、それに如何に忠実に従って動かすかという問題である。こうしたロボットマニピュレータに限らず、メカトロニクスにおける制御問題の多くはこのようなサーボ問題である。しかし、ここでシステム制御の立場からいうとサーボ系に指令を発する機能がどこかにあるはずである。ロボットマニピュレータや移動ロボットでは特にこの問題は重要である。図 1.1 にトータルシステムの構成を示す。

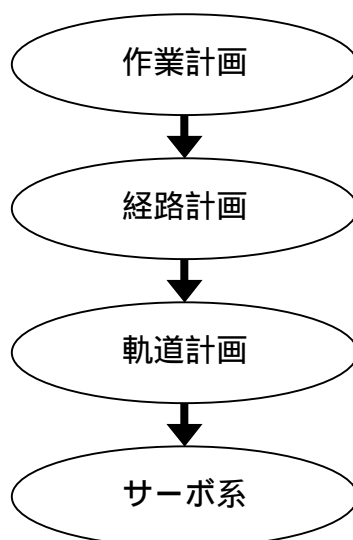


図 1.1 トータルシステムの構成

図 1.1 に示すように軌道計画，経路計画，作業計画の問題があげられる．経路とはロボットの構造に関連した指定点が移動することによって描く空間的軌跡であり，軌道とはロボットの構造に関連した指定点が移動することによって描く時間的空間的軌跡と定義されている．経路計画，軌道計画とは様々な観点から与えられた情報をもとにこの経路，軌道を決定することである．ここでこれらの計画を説明するために1つの例をあげる．ある人が月に行く計画を立てた場合を考える．まず，何かの目的のために月に飛び，月のどこかで着陸することを決定する．これは作業計画である．次に，地球のどこの場所からいつロケットで出発すれば良いか，そしてどのような経路を経て月に接近するのが良いか，また月のどこ場所に着陸すれば良いかなどの種々の観点から検討する．これが経路計画である．経路が決まったがロケットをいかなるスピードで飛ばす必要があるであろうか，地球の引力に逆らってロケットが地球の重力圏を離脱するためには決められたスピードで飛ばすことが必要である．その後，燃料を節約するためにロケットを最適なスピードで飛ばすことが要求される．そして，月に着陸するために当然スピードを徐々に下げなければならない．このようなロケットのスピードを状況に応じて変化させるような計画が必要である．これを軌道計画という．そして，最後にロケットは指定された経路を指定された速度で飛ぶという操縦の問題が出てくる．これをサーボ系の問題という．

この例でわかるように，システム制御ではサーボ系に指令を与えるもっと上位レベルのいくつかの計画法が極めて重要であることがわかる．つまり，サーボ系，軌道計画，経路計画，作業計画のすべてがトータルとして構成されて初めてシステムの制御がなされるものである．よく知られているようにシステムを構成する要素が複数ある場合，どれか1つの性能が悪いと他のすべてのものが優れた性能をもっているとしても，トータルシステムとしての性能は悪い要素に引きずられてしまう．サーボ系がいかにすばらしく設計できたとしても，その上位にある計画問題を適切に解決しなければ望ましい性能のトータルシステムは得られないことに注意すべきである．

1.4 本論文の構成

ここでは，本論文の構成を示す．

第2章では，ファジィ制御の観点からファジィの基本的な概念，一般的なファジィ推論法についてふれ，最後に距離型ファジィ推論法について述べる．第3章では，今回の実験に使用するロボットについての述べる．第4章では，距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法について具体的な設計手順を述べる．また，距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法の推論結果について述べる．第5章では，第4章の述べた軌道計画法に基づいて実験を行なった．ここではその実験結果と考察について述べる．最後に第6章では本研究の成果と今後の課題について述べる．

第2章 距離型ファジィ推論法

本章では、距離型ファジィ推論法について述べる。まず、2.1 では特にファジィ制御の観点からファジィの概念、および特徴と従来制御との比較について述べる。2.2 ではファジィ集合の定義について述べる。次に、2.3 ではファジィ推論について述べる。最後に、2.4 では軌道計画法に用いる距離型ファジィ推論法について述べる。

2.1 ファジィについて

2.1.1 ファジィの概念

人間の大局的な知的情報処理の近似的なモデルを作ることを目指して、ファジィ理論が、1965年にカリフォルニア大学のザディにより提案された。このファジィ制御とは言葉を用いてあいまいさを表現された制御である。例えば、車を駐車させる場合をあげて説明する。もし、自動車の運転教習所で、車の運動方程式を生徒に教える方法をとったとしたら、生徒はまず車を狭いスペースに駐車させることはできないだろう。普通は、運動方程式の代わりに日常使う言葉を使って、前進、後退に伴うハンドル操作の仕方を教えれば、生徒はうまく駐車させることができる。このように、人間は数値や数式によるよりも、言葉を使って定性的に説明された方が、対象の特徴を理解し易くまた容易に実行に移せる。ところがコンピュータは数値・数式しか受けつけないため、その理解と実行は融通のきかないものになる。ファジィ制御の考えとは、言葉による定性的指示をコンピュータに理解させ、このことによって、人間が行うような巧妙な動作をコンピュータで実現しようとするものである。

ある人が二十歳であるかないか、男性か女性であるかという性質ははっきりと判別ができる。こうした性質はその性質の有無が明確に判断できる。このように性質の有無の境界線が明確な状態をクリスプという。一方、ある人が若者であるかどうか、背が高いかどうかという性質ははっきりと判別することはできない。こうした性質は先ほどのクリスプとは逆に性質の有無がはっきりしていない。こうした性質は性質の有無の境界線がはっきりせずぼんやりしたあいまいな状態である。こうしたあいまいな状態をファジィという。人間は言葉を用いて、互いの情報交換をしているが、その言葉の意味を考えると、ファジィな場合が極めて多い。例えば、暑い、寒い、高い、低い、速い、遅いなど、いずれもそれらの物理量である温度、高度、速度などのスケールに基づいて表現しているものの、これらの言葉だけでは、その意味する境界がはっきりしない。つまり、ファジィである。それにもかかわらず、人間はこうしたファジィな情報を用いて、日常生活をしている。ファジィ技術が目指しているものは人間の有するあいまいさ、主観評価、個性、感性などを積極

的に取り入れた高度な人間指向型情報処理システム，つまりヒューマンフレンドリーシステムの実現である．特に，人間の思考に関する分野である，人工知能，パターン認識，情報処理，自然言語，意思決定，抽象化などで重要な役割を果たしている．

2.1.2 ファジィの特徴

ファジィ制御の最大の特徴は if-then 型のファジィ制御規則に基づいて制御を行っている点である．また，エキスパート的な制御を実現するという点もある．ここでエキスパート的とは制御対象のオペレータの操作を模範するという意味を含んでいる．つまり，制御対象のモデルを必要としない制御といえる．もちろん制御対象のモデルに基づく制御もできる．これらの点を踏まえた上でファジィ制御の特徴を以下にあげる．

-) あいまいさを含んだ言葉で制御方を記述されること．
従来の制御ではもちろん制御方は線形，非線形を問わず，関数によって記述されている．そのためその中に現れるパラメータは誤差などの不確定要素を含む．しかし，これは言語に見られるようなあいまいさを含んでいない．
-) 制御方が従来の制御のように単一な関数型ではなく，if-then 型の論理型である複数の制御規則で記述されていること．
従来の制御において，制御方は制御装置のモデルに基づいて一つの式で統一的に表現されるが，ファジィ制御では複数の制御規則で分散的に表現されている．そのためファジィ制御系の実現を容易にする反面，解析を著しく困難にしている．
-) 制御に使われる制御装置から入力情報が，PID 制御のように，一つの関数にまとめて代入することによって制御装置の操作量を求めるのではなく，複数個の規則に分散的に当てはめ，並列的なファジィ推論によって操作量を求めていること．
同時に複数の制御規則を適用することは計算を複雑にし，さらに規則の適用結果を統合するときに規則間の矛盾，競合といった問題を引き起こす可能性がある．しかし，計算の複雑化の問題はファジィ推論によって解消される．また，ハードウェアの発達によってもこの問題は解消される．規則間の矛盾，競合の問題はファジィ推論の効用によって複数の制御規則の協調という効果を生み出している．
-) 制御方は，画一的な評価関数を定めて，制御対象のモデルに基づいて導かれているのではなく，多目的なものであること．
従来の典型的な最適制御においては制御の目的は一つの評価関数にまとめる必要がある．この時，目的が複雑である場合は，それぞれの目的に応じて重みをつけて，これを線形に結合する．このことはユーザーの意図に沿った多目的な制御の実現を困難にしている．また，制御目的は制御対象のモデル内の変数を用いて明示的に記述しなければならない．一方，ファジィ制御で

は複数の目的を意識した上でそれぞれに応じた複数の制御規則を記述することによって多目的な制御が実現できる。例えば、乗り物の乗り心地を良くするために速度の変化の回数を小さくしたいという要求があった場合、従来の制御では乗り物の速度変化の回数を評価関数にした上で、理論的に最小化アルゴリズムを求めて実現しようとする。しかし、乗り物の速度変化の回数というものはモデルの変数を用いて定式化できないのでこのような制御はもともと不可能である。一方、ファジィ制御では、乗り物の速度変化の回数を小さくできると考えられる現実的な理論を組み立てた上で、これに必要な入力情報を集めて、制御規則として用いることで実現しようとする。

-) 制御に使われる情報は、物理的に計測可能な制御装置の状態量、制御偏差などの画一的なものではなく、評価可能な多様な情報であること。

従来の制御ではPID制御に見られるような関数型であるため、制御に用いられる入力情報はオフライン計測できる物理量で、さらに数値として表現できるものに限られている。この入力情報のほとんどはフィードバックできる制御対象の出力情報や状態量である。これに対してファジィ制御ではエキスパートの視覚による観察結果などの数値化が困難であるようなものも利用することができる。つまり、制御器がif-then型であるので、前件部のifの条件部には何を記述しても良い。このことより言語による制御状態の判断、制御対象の出力情報の質的評価、画像情報など、多様な情報を効果的に利用することができる。

2.1.3 ファジィと従来制御との比較

従来の制御では一般的に制御目的が制御対象の物理的挙動に直接関連した小数の単純なものであり、制御方式はフィードバックである。これに対してファジィ制御では、制御目的が制御の質に関わるものなど複雑で多目的であり、フィードフォワード制御が多い。また、ファジィ制御においては自然言語表現を容易に取り入れられるので、制御のインテリジェント化が図れる利点がある。これは人間の知能が言語環境の下に実現されているからである。よって、制御の目的が高度になればなるほど、制御のインテリジェント化は自然言語によってしか記述できなくなる。インテリジェント制御を階層的に実現しようとするときでも、最下層が言葉とは無縁の微分方程式で記述されているのと、すでにあいまいな言葉を含むif-then形式で記述されているのとではその制御方針に大きな違いがある。

ところで実際に制御を実現する場合、制御装置の設計と実現された制御の信頼性が重要な観点である。ファジィ技術一般の信頼性に関していえば、ファジィ技術は従来のエンジニアリング技術の延長上にあるといえる。したがって、信頼性についての考え方も従来の技術に対するものとかえる必要はない。実用で用いられるファジィ技術のほとんどはエキスパート的なものである。すなわちエンジニアやオペレータのノウハウを表現し、コンピュータにインプリメントするツールとしてみた場合は、ファジィ技術を用いる方が従来の数

式表現法を用いるよりも、エキスパートのノウハウを巧妙に表現できる。したがって、熟練オペレータの動作を模倣するファジィモデルという点においては、安定性ではなくモデルとしての良さとその精度が問題になる。ただし、オペレータの動作を超えるエンジニアのノウハウを実現する自動制御システムを構築する場合は、この限りではない。ところで、制御技術において信頼性はより狭い意味の安定性の観点で論じられる。安定化を図るという問題は制御の大目的であり、フィードバック制御もこのために生まれた。そして、人間を含まない単純な力学系においては理論的な安定性解析が有効であり、その結果は実証されてきた。モデルのあいまいさを許容すると考えられているファジィ制御では、安定性は中心的課題とされず実際にほとんどこの問題は扱われていない。一方、従来の制御では、モデルの不確実性に対処するロバスト制御などその中心課題は安定性である。したがって、安定性もファジィ制御におけるその位置に関わらず、信頼性の一部分として比較の対象になっている。

ファジィ制御の最大の功績は、誰でも制御装置の設計ができるようにしたことである。従来の制御技術の場合、古典的なPID制御では設計はパラメータの設定の問題であり、設計は現代制御技術においてはじめて問題にされる。ここでいう設計は制御装置の数式モデルに基づき、安定性解析を含む高度な理論的知識、難解な式の展開を必要とするため、容易には設計できない。これに対して、ファジィ制御では、制御装置に対する定性的知識に基づき、何をしたいかという定性的目的と、どうすれば良いかという定性的制御の論理さえあれば、誰にでも制御装置の設計ができる。

2.2 ファジィ集合

ファジィ集合とはある要素がその集合に属している度合いが0と1の間の値をとる集合のことで、言葉のあいまいさを定量的に表現するときに用いられる。一方、従来の集合のようにある要素がその集合に属している度合いが0か1のどちらかである、つまり、属しているか、いないかがはっきりした集合のことをクリस्प集合という。図2.1にクリस्प集合、図2.2にファジィ集合を示す。

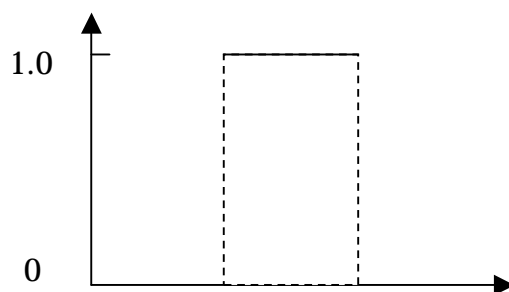


図 2.1 クリस्प集合

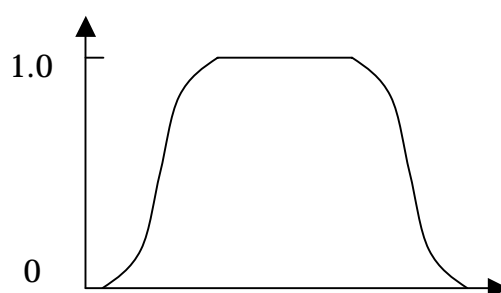


図 2.3 ファジィ集合

例えば、「1より非常に大きい数字の集合」や「美人の集合」、「背の高い人の集まり」などは集合の定義に当てはまらない。これはある対象をもってきたときに、それが果たしてその集合に属しているかいないかが明確に定まらないからである。つまり、これらの「集まり」は、いいかえると境界がはっきりしない集合のようなものであり、現実では集合のように扱われているが集合ではない。今、集合と集合のようなものとの違いを「年齢 15 歳以上 30 歳以下の人の集まり」と「若者の集合」を例にあげて述べる。全体集合 X として、ある人々の集団を例えば $X = \{A \text{ さん}, B \text{ さん}, C \text{ さん}, D \text{ さん}, E \text{ さん}, \dots\}$ とする。そして、この集団に属する人の年齢は表 2.1 とする。

表 2.1

名前	A さん	B さん	C さん	D さん	E さん	...
年齢	25	28	12	17	32	...

今、年齢 15 歳以上 30 歳以下の条件を満たしているかどうかは表 2.1 から判断すれば条件を満たしているかは容易に判断できる。つまり、どの個人が「年齢 15 歳以上 30 歳以下の人の集まり」に属しているかがすぐに判断できる。この集団では A は、 $A = \{A \text{ さん}, B \text{ さん}, D \text{ さん}, \dots\}$ というふうに、境界がはっきりした集団として表せる。 A は具体的な人間の集まりが実在している。一方、「若者の集まり」といった「集まり」の場合には、判断の容易ではない。これはある人々の集団 X において、その中の誰が「若者の集まり」に属しているかいないかが明確ではないである。あいまいなイメージとして「若者の集まり」という「集まり」は存在しているが、具体的な形で実在するものとして記述できない。こうした「集まり」は、非存在のままでは数学的に取り扱うことができない。数学的に取り扱えるようにするためには「集まり」を実在化する必要がある。この役割を果たすのがメンバーシップ関数である。ここでメンバーシップ関数を説明するために一般的な集合の話をする。全体集合 X の一般的な意味での部分集合を、クリスプ集合と呼ばれている。クリスプ集合では、 x がその集合に属しているかいないかが一義的に決定される。つまり、クリスプ集合 A については、点 x がに属しているかいないかが x の関数として決まっている。ここで x の関数

$$\varphi_A(x): X \longrightarrow \{0,1\} \quad (2.1)$$

を

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (2.2)$$

によって定義すると,

$$x \in A \Leftrightarrow \varphi_A(x) = 1 \quad (2.3)$$

$$x \notin A \Leftrightarrow \varphi_A(x) = 0 \quad (2.4)$$

という関係を満たす. つまり, $\varphi_A(x)$ は集合を表現する関数になっている. ここで, $\varphi_A(x)$ は A の特性関数もしくは定義関数と呼ばれている. X の任意の与えられたクリスプ集合に対しては一義的に特性関数が定まる. 逆に, X 上の 1 と 0 の 2 値だけをとる関数が与えられると, それに対して X の集合

$$\{x \in X \mid \varphi_A(x) = 1\} \quad (2.5)$$

が一意に定まり, 関数 $\varphi_A(x)$ はこの集合の特性関数になる. つまり, 集合と特性関数は 1 対 1 に対応している. このように集合と特性関数が 1 対 1 に対応している場合には, それらをたがいに同一視したり, 集合とすべきところを特性関数で代用したり, 逆に特性関数とすべきところを集合で代用しても問題はない. つまり, 集合は集合であると同時に特性関数であるといえ, 逆に特性関数は集合であるともいえる. 例えば, 2 つの集合 A と B の和集合を, 集合によって

$$A \cup B = \{x \mid x \in A \text{ または } x \in B\} \quad (2.6)$$

と定義しても, 特性関数を使って

$$\begin{aligned} \varphi_{A \cup B}(x) &= \varphi_A(x) \vee \varphi_B(x) \\ &= \max\{\varphi_A(x), \varphi_B(x)\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

と定義しても, 定義の中身は変わらない. 記述方法が違っててもこれは同じことを定義している. このように集合とその特性関数とは, 同じものを別の角度からみて, 別の言葉で呼んでいるだけであるから特性関数 $\varphi_A(x)$ をそのまま集合と呼んでも差し支えない. この考えに基づいて, ファジィ集合の定義をする. ただし, ファジィ集合の場合は特性関数の役割を果たすものを特性関数ではなく, 先ほど述べたメンバーシップ関数という. 集合の延長上にあるファジィ集合と特性関数の延長上にあるメンバーシップ関数との間にファジィ

ィ集合と特性関数との関係を考慮してメンバーシップ関数をそのままファジィ集合と呼んでも差し支えないとする．このことより次の定義を得る．

定義1: 空間 X から $[0,1]$ への関数を, X 上のメンバーシップ関数という．メンバーシップ関数を同一視してファジィ集合という．メンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ と同一視されるファジィ集合を A で表す．このとき, メンバーシップ関数によって特性づけられるという．

$\mu_A(x)=1$ を満たす x が存在するとき, つまり,

$$\max_{x \in X} \mu_A(x) = 1 \quad (2.8)$$

であるとき, メンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ あるいはファジィ集合 A は正規であるという．また, そうでないときは非正規であるという．

定義2: X のファジィ部分集合の全体をファジィ集合族といい, $F(X)$ と記述する．

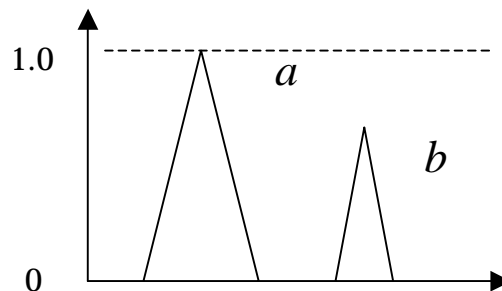


図 2.3 正規なファジィ集合 a と非正規なファジィ集合 b

通常の集合の場合では x が A に属するかしなないかは一義的に定まり, その特性関数 $\varphi_A(x)$ は, x が A に属する場合には 1 が, x が A に属さない場合は 0 をとる．それに対して, ファジィ集合では, x が A に属するかしなないかは一義的に定まらない．このことは, におけるメンバーシップ関数値 $\mu_A(x)$ が 1 と 0 以外の値をとるということを意味している．

これを真理値を使っていいかえれば, x が A に属するという命題は, A が通常の集合の場合には真と偽という 2 つの真理値だけをとるが, ファジィ集合の場合には真偽とは異なった真理値をとる．今, この真理値に不明が当てられたとする．真理値を数値で表す場合には, 真には 1, 偽には 0 があてられ, そして不明には 0.5 が当てられるとする．もし, x の A への属し方が不明以外に何種類か考えられる場合にはもっと別の真理値をあてればよいと考

えられる。ファジィ集合については、 x が A に属するという命題の真理値として真と偽以外に1つあるいはいくつかの真理値があって、それらの真理値は真と偽の間のどこかに位置する。ただし、それらの真理値が真と偽との間の実数値で表せるとは必ずしもいえない。全ての真理値が常に比較可能で、大小の順に並べられるとは限らないからである。例えば、真と偽を含む5つの真理値を、真を最大値、偽を最小値として配置するやり方には全部で5種類があることはよく知られている。もともと、真を1で、偽を0で表すことにも、数で表すこと自体にも必然性がない。とにかく異なった記号を真と偽に割り当てて、両者を区別できればよい。よって、1と0としても、真と偽を英語の頭文字からととしてもよい。真理値で1と0をとるのはわれわれの感覚にあるからであろう。こうした自由性は、広い意味でのファジィ集合を考える際に面白い役割を果たす。値域としては、いくつかの基本的な要件を満たしてさえいれば、その最小値を0で、最大値を1で表すどのような集合をもってきても、それなりのファジィ集合は構成できるのである。これにより、いろいろな集合を値域として選んでくることによって、いろいろなファジィ集合が得られる。

ところで、ファジィ集合 A はメンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ で特性づけられると定義したが、このように、ファジィ集合 A は、一方では、関数型で形式的に定められるだけで、別に何らかの意味が付与されているわけではないが、一方で、「若者の集まり」とか「背の高い人の集まり」などを集合的に表したものであるという一面もある。つまり、ファジィ集合には形式と内容の二面性がある。例えば、年齢に関するファジィ集合を取り上げる。ファジィ集合が定められる空間としては X と T の2つがあげられる。 X は全体集合であり、メンバーシップ関数はこの空間で定義される。つまり、ファジィ集合の形式を定める。年齢の場合には $[0, +\infty)$ としてもよいだろう。一方で、 T は語の空間であり、ファジィ集合の意味を規定する。例えば、 $T = \{\text{非常に若い, 若い, 中年である, 熟年である, 老年である, ...}\}$ とする。ある語 $t \in T$ を表すファジィ集合を A とすると、 A は T から $F(X)$ への写像 M によって

$$M : t \rightarrow A = M(t) \quad (2.9)$$

と表される。このとき

-) t をファジィ集合 A のラベルと呼ぶ。
-) ファジィ集合 A を t の意味と呼ぶ。

この写像 M によって、言葉とファジィ集合が結び付けられるのだが、 M をどう決定するか、いいかえると、どのファジィ集合をどの語に結びつけるかが大きな問題になってくる。逆に、われわれがそれぞれの語に対して漠然と持っている集合的なイメージをどのようにメンバーシップ関数として定着するかといってもよい。例えば、 $t = \text{若者}$ に対するファジィ集合 $A = M(\text{若者})$ はどういうものになるだろうか。どのようなメンバーシップ関数をとってくればファジィ集合「若者の集まり」をもっともよく表現できるかについてはいろいろと議論されてきた。このファジィ集合とメンバーシップ関数との関係はファジィ理論の創始期からの問題であり、現在でもファジィ集合を一義的に表すメンバーシップ関

数は存在しない。メンバーシップ関数はそれぞれが主観によって自由に決定してよいというように考えられている。今日までのファジィ理論の進展で見ると限りにおいてはメンバーシップ関数を主観によって自由に決定してもそれほど問題ではなかった。このことは、ファジィ理論が応用、それもファジィ制御主導で理論が展開してきたという事実が関係している。ファジィ制御においては、1回1回の制御出力が、不適当なメンバーシップ関数が原因で少々最適出力からはずれていても、こまめなフィードバックと計算の速さで十分カバーでき、短時間に最適な制御に到達する。こう点では、メンバーシップ関数の形状はそれほど重要ではなかった。一方、今後応用の範囲が広がって、あるいはもっと高速の制御が要求されるようになれば、メンバーシップ関数の形が問われる可能性もある。また、メンバーシップ関数をそれぞれの主観で決めてもよいといっても、その主観があまりにも普遍的なものから遠ければ、その結果作られたシステムに普遍性が欠け、使い物にならないおそれもある。つまり、メンバーシップ関数を決定する主観にもある程度の普遍性、客観性が要求される。ここで多くの人に共有する普遍性を持ったメンバーシップ関数を取り出す決定方法は有益な手段であるといえる。

ここでいくつかのファジィ集合の基本形を紹介する。

) 三角型ファジィ集合

図 2.4 で示されるようなファジィ集合を三角型ファジィ集合という。

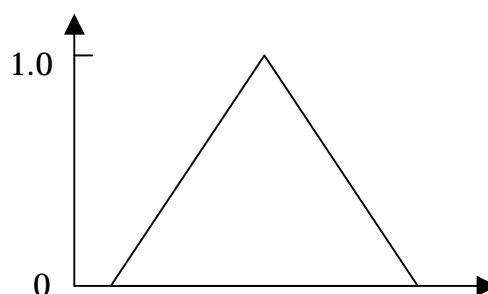


図 2.4 三角型ファジィ集合

三角型メンバーシップ関数の基本形は次の式(2.10)で表される。

$$T(t) = \begin{cases} 0, & t \leq -1 \\ t+1, & -1 \leq t \leq 0 \\ 1-t, & 0 \leq t \leq 1 \\ 0, & 1 \leq t \end{cases} \quad (2.10)$$

) 台形型ファジィ集合

図 2.5 で示されるようなファジィ集合を台形型ファジィ集合という。

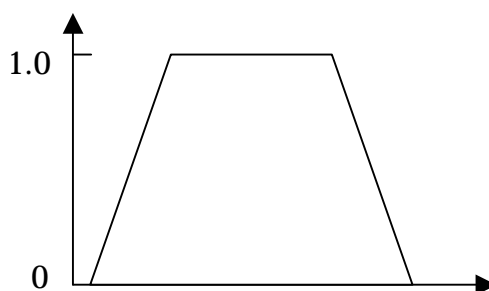


図 2.5 台形型ファジィ集合

台形型メンバーシップ関数の基本形は次の式(2.11)で表される。

$$T(t) = \begin{cases} 0, & t \leq -2 \\ t+1, & -2 \leq t \leq -1 \\ 1, & -1 \leq t \leq 1 \\ 1-t, & 1 \leq t \leq 2 \\ 0, & 2 \leq t \end{cases} \quad (2.11)$$

) 型ファジィ集合

図 2.6 で示されるようなファジィ集合を 型ファジィ集合という。

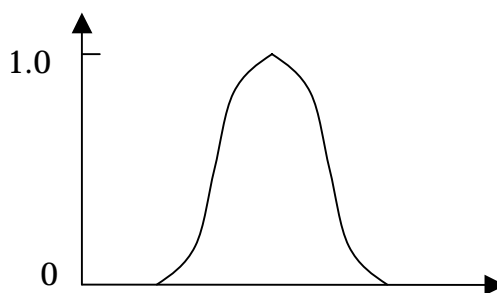


図 2.6 型ファジィ集合

型メンバーシップ関数の基本形は次の式(2.12), (2.13), (2.14)で表される。

$$\Pi(t) = \begin{cases} S(t+1), & t \leq 0 \\ Z(t), & 0 \leq t \end{cases} \quad (2.12)$$

$$S(t) = \begin{cases} 2t^2, & 0 \leq t \leq 0.5 \\ 1 - 2(1-t)^2, & 0.5 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

$$Z(t) = S(1-t), 0 \leq t \leq 1 \quad (2.14)$$

2.3 ファジィ推論法

2.3.1 ファジィ推論

ファジィ推論とは、入力情報とファジィ集合をつきあわせて必要な制御操作量を決定することである。一般的にファジィ制御で用いられるファジィ推論は、ファジィ論理に基づくファジィ推論法よりも簡略化された推論法を用いる。これは以下の理由が挙げられる。

-) ファジィ推論のための入力情報が一般にファジィ集合ではなく、実数値である。
-) ファジィ制御ではファジィ推論の計算速度を速める必要性がある。

このためファジィ制御のためのファジィ推論法としては様々な方法が提案されている。

ファジィ推論法の方法には、一般的に直接法と間接法がある。直接法はファジィ命題の真理値として、メンバーシップ関数の値を直接用いて推論する方法である。この推論法は非常に理解しやすく、従来のファジィ制御において最も扱われてきた。

直接法の代表的なファジィ推論法には以下の推論法が挙げられる。

-) min-max 重心法
-) product-sum 重心法
-) 簡略推論法
-) 関数型推論法

これらの推論法についてはそれぞれ 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5 で述べる。

一方、間接法はファジィ命題の真理値として、ファジィ真理値を用いて推論する方法である。一般的に間接法は推論手順が複雑であるため、ファジィ制御ではあまり使われない。間接法では、制御規則そのものの真らしさを区別して取り扱っているため、ファジィ制御での応用の可能性を持っている。間接法については 2.3.6 で述べる。

2.3.2 min-max 重心法

この推論法はロンドン大学のマムダニ教授が最初にファジィ制御で用いた推論法である。この推論法は推論手順が理解しやすく、今日までのファジィ制御で最も広く使われている。この推論法は、事実が与えられて推論結果を求めるまでに、min 演算, max 演算, 重心法を用いているために min-max 重心法と呼ばれている。

次に min-max 重心法の方法について述べる。

まず最初に表 2.2 のような推論規則を与えたとする .

表 2.2 推論規則

R^1 : IF x_1 is A_1^1 and x_2 is A_2^1 then y is B^1

R^2 : IF x_1 is A_1^2 and x_2 is A_2^2 then y is B^2

事実 : x_1 is A_1 and x_2 is A_2

推論結果 : y is y_0

ここで, x_1, x_2 は前件部変数といわれるもので制御対象の状態変数であり, ファジィ制御装置の入力変数である. y は後件部変数といわれるもので制御対象の操作量であり, ファジィ制御装置の出力変数である. また, $A_1^1, A_2^1, A_1^2, A_2^2$ は前件部の言語変数であり, それぞれ前件部変数の全体集合 X_1, X_2 におけるファジィ集合であらわされる. 一方, B^1, B^2 は後件部の言語変数であり, それぞれ後件部変数の全体集合 Y におけるファジィ集合であらわされる. 事実とはファジィ制御装置の入力情報である. ここでは前件部変数 x_1, x_2 に対して事実 A_1, A_2 が与えられたことになる. また, この事実 A_1, A_2 は前件部変数の全体集合 X_1, X_2 におけるファジィ集合であらわされる. 推論結果はある事実が与えられたときにその事実と推論規則を照らしあわせて求められる出力情報である. ここでは後件部変数 y に対して推論結果 y_0 が与えられている. また, この推論結果 y_0 は後件部変数の全体集合 Y におけるファジィ集合であらわされる.

次に図 2.7, 2.8 のような前件部, 後件部のメンバーシップ関数を与えたとする.

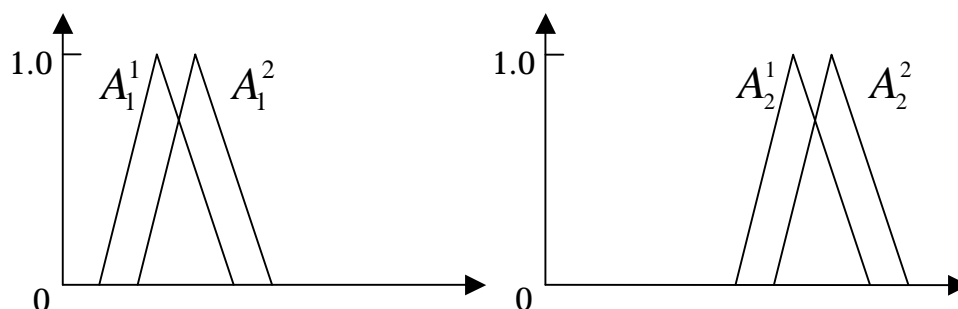


図 2.7 前件部のメンバーシップ関数

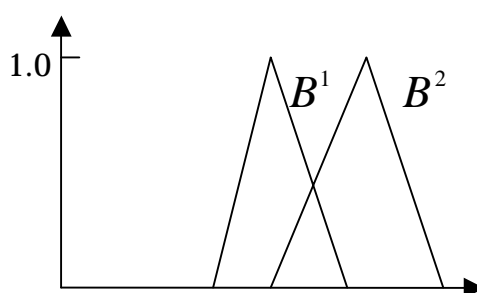


図 2.8 後件部のメンバーシップ関数

min-max 重心法は以下に手順により行われる.

Step 1: 各規則の適合度 ω_i を計算する.

$$\omega_i = \mu_{A_i^1}(A_1) \wedge \mu_{A_i^2}(A_2) \quad (2.15)$$

ただし, $i = 1, 2$

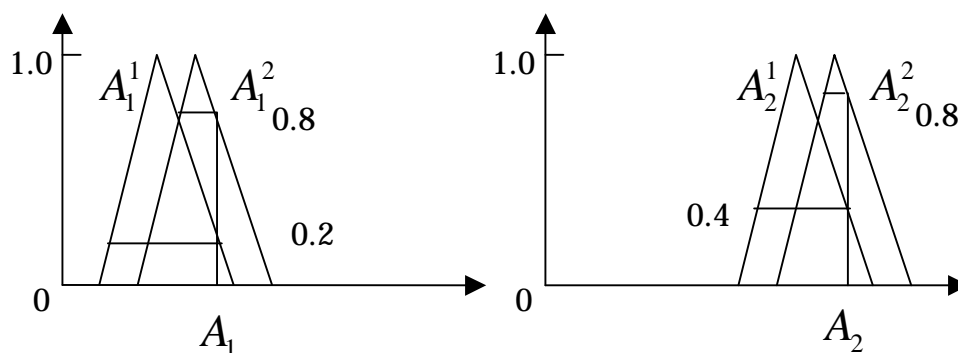


図 2.9 適合度

Step 2 : 各規則の後件部の推論結果 $B^{i'}$ を計算する .

$$\mu_{B^{i'}}(y) = \omega_i \wedge \mu_{B^i}(y) \quad (2.16)$$

ただし , $i = 1, 2$

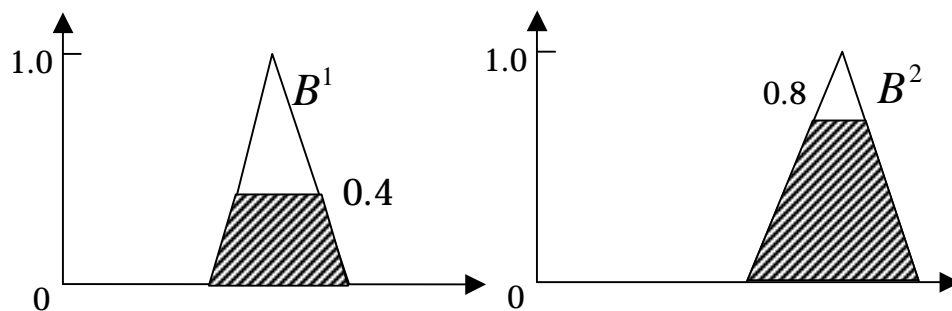


図 2.10 各規則の推論結果 $B^{i'}$

Step 3 : 各規則の推論結果 $B^{i'}$ を統合して , 規則全体の推論結果 B' を計算する .

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_{i=1}^n \mu_{B^{i'}}(y) \quad (2.17)$$

ただし , $i = 1, 2$

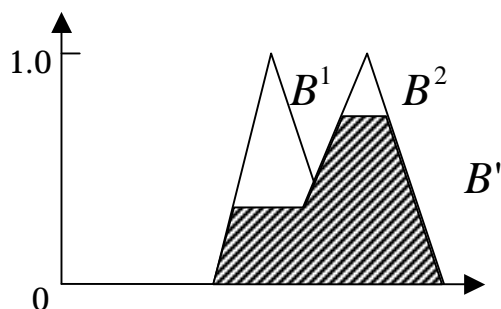
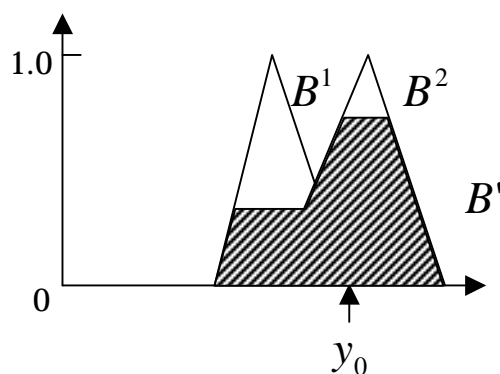


図 2.11 推論結果 B'

Step 4 : 推論結果 B' の重心を計算する .

$$y_0 = \frac{\int y \mu_{B'}(y) dy}{\int \mu_{B'}(y) dy} \quad (2.18)$$

図 2.12 推論結果 B' の重心

ここで $\mu_A(x)$ は x がファジィ集合 A に属する度合またはグレードを表している。また、 \wedge は min 演算， \vee は max 演算を表している。つまり，適合度 ω_i とはファジィ制御装置の入力情報 A_1 ， A_2 が番目の規則にどの程度マッチングしているかを表している。推論結果はファジィ集合の形で求められる。このためこの推論結果は一般的に実際の制御対象の操作量として入力することは困難である。そのためファジィ制御では制御対象の制御量として確定した値，つまり非ファジィ値を求める必要がある。この時，一般的に推論結果の代表値を求める手段として重心法が用いられている。この重心法によって求められた値を推論結果としてファジィ制御装置の出力として扱っている。また，この非ファジィ値を求める一連の操作を非ファジィ化といい，今回用いた重心法の他に面積法，最大値法などがある。ところで，この推論法は後件部のファジィ集合が前件部の適合度によって頭切りされることから頭切り法とも呼ばれている。

2.3.3 product-sum 重心法

min-max 重心法は適合度や推論結果を求める式に，非線形の強い min 演算と max 演算が使われているため，適合度の値や重心の値が適切に変化しない場合がある。また，min-max 重心法は必ずしも人間の直感にあった推論法であるとは限らない。水本は，min を product(代数積，掛け算)に，max を sum(加算)に置き換えた product-sum 重心法を提案した。

次に product-sum 重心法の方法について述べる。

まず 2.3.2 で用いた表 2.2, 図 2.7, 2.8 のような推論規則, メンバシップ関数を与えたとする.

product-sum 重心法は以下に手順によって行われる.

Step 1: 各規則の適合度 ω_i を計算する.

$$\omega_i = \mu_{A_1^i}(A_1) \times \mu_{A_2^i}(A_2) \quad (2.19)$$

ただし, $i = 1, 2$

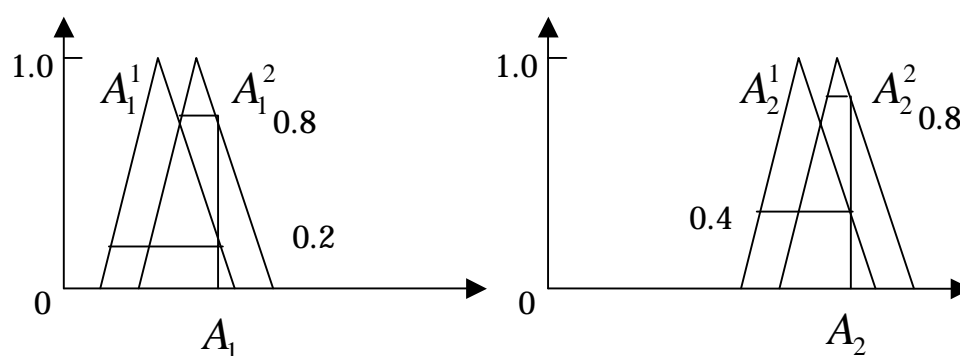


図 2.13 適合度

Step 2: 各規則の後件部の推論結果 B^i を計算する.

$$\mu_{B^i}(y) = \omega_i \times \mu_{B^i}(y) \quad (2.20)$$

ただし, $i = 1, 2$

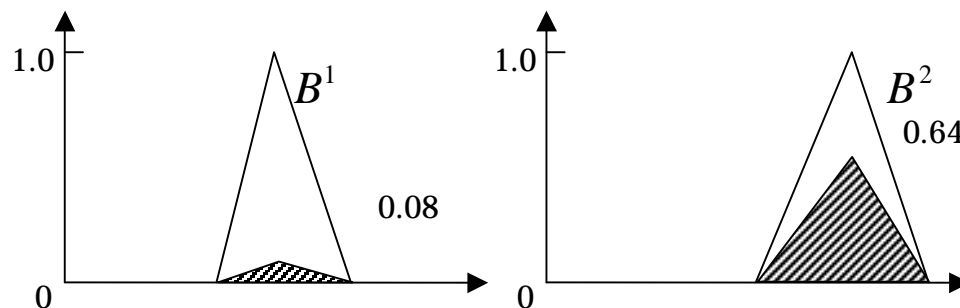


図 2.14 各規則の推論結果 B^i

Step 3: 各規則の推論結果 B^i を統合して, 規則全体の推論結果 B' を計算する.

$$\mu_{B'}(y) = \sum_{i=1}^n \mu_{B^i}(y) \quad (2.21)$$

ただし, $i = 1, 2$

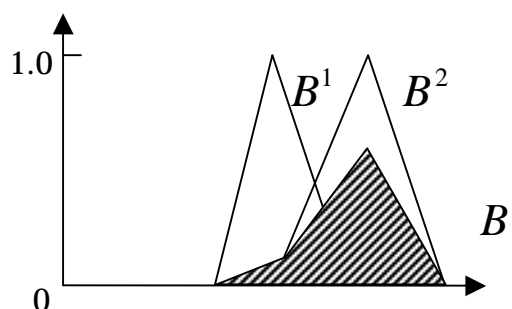


図 2.15 推論結果 B'

Step 4: 推論結果 B' の重心を計算する.

$$y_0 = \frac{\int y \mu_{B'}(y) dy}{\int \mu_{B'}(y) dy} \quad (2.22)$$

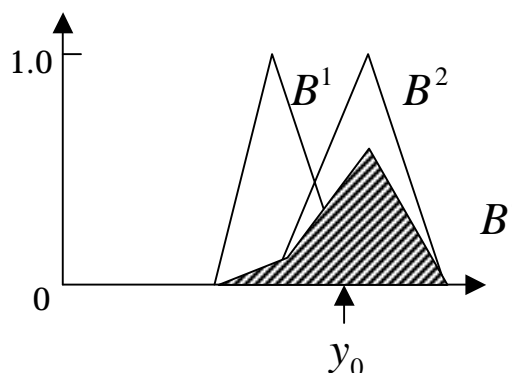


図 2.16 推論結果 B' の重心

product-sum 重心法の特徴は各規則の推論結果をすべて足しているため、全体の推論結果にすべての規則が寄与している点である。一方で、min-max 重心法では、max 演算を用いているため、言語変数のメンバーシップ関数によっては各規則の推論結果の一部またはすべてが無視される場合が起こる。しかし、どちらの特徴がファジィ制御の推論法において望ましいかは一概には言えない。つまり、適合するすべてのルールの中で最も適合度が高いルールを優先したい場合は max-min 重心法を、適合するすべてのルールを考慮したい場合は product-sum 重心法が適切である。このように推論法において推論規則の構成

や制御対象によってどちらが望ましいか検討する必要がある。また，product-sum 重心法は max-min 重心法と同様にその推論法が適合度に依存しているため必ずしも適切な推論結果が得られるとは限らない。

2.3.4 簡略推論法

この推論法は，前田，村上や菅野のよって提案されたもので，ファジィ推論の高速化と簡略化を主眼とした推論法である。この推論法は，制御規則の後件部がファジィ集合ではなく，定数で与えられる場合を考えている。

次に，簡略推論法の方法について述べる。

まず，表 2.3 のような推論規則を与える。

表 2.3 推論規則

R^1 : IF x_1 is A_1^1 and x_2 is A_2^1 then y is B^1

R^2 : IF x_1 is A_1^2 and x_2 is A_2^2 then y is B^2

事実 : x_1 is A_1 and x_2 is A_2

推論結果 : y is y_0

x_1 , x_2 は前件部変数であり， y は後件部変数である。前件部 A_1^1 , A_2^1 , A_1^2 , A_2^2 はファジィ集合で与えられる。一方，後件部 B^1 , B^2 はファジィ集合ではなく実数値で与えられる。事実 x_1 , x_2 も非ファジィ値 A_1 , A_2 で与えられる。

簡略推論法は以下の手順によって行われる。

Step 1: 各規則の適合度 ω_i を計算する。

$$\omega_i = \mu_{A_1^i}(A_1) \times \mu_{A_2^i}(A_2) \quad (2.23)$$

$$(\text{もしくは } \omega_i = \mu_{A_1^i}(A_1) \wedge \mu_{A_2^i}(A_2))$$

ただし, $i = 1, 2$

Step 2: 推論結果 y_0 を次式で計算する。

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot B_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2.24)$$

ただし, $i = 1, 2$

この簡略型推論法は、先ほどの min-max 重心法や product-sum 重心法と比べて、非ファジィ化の演算操作が必要ないため、演算速度が格段に早くなる。このことは制御において制御周期を短縮することができるという利点につながる。実際、多くのファジィ制御において後件部を実数値で与えている場合が多い。また、この推論法は単純な四則演算をつかった式となっているため、解析が容易になるといった特徴をもっている。

2.3.5 関数型推論法

この推論法は、高木、菅野によって提案された。この推論法は簡略型推論法をさらに一般化した推論法で、後件部が定数ではなく関数形になっている。

次に、関数型推論法の方法について述べる。

まず，表 2.4 のような推論規則を与える．

表 2.4 推論規則

R^1 : IF x_1 is A_1^1 and x_2 is A_2^1 then y is $f^1(x_1, x_2)$

R^2 : IF x_1 is A_1^2 and x_2 is A_2^2 then y is $f^2(x_1, x_2)$

事実 : x_1 is A_1 and x_2 is A_2

推論結果 : y is y_0

x_1, x_2 は前件部変数であり， y は後件部変数である．前件部 $A_1^1, A_2^1, A_1^2, A_2^2$ はファジィ集合で与えられる．一方，後件部 $f^1(x_1, x_2), f^2(x_1, x_2)$ は関数で与えられる．事実 x_1, x_2 も非ファジィ値 A_1, A_2 で与えられる．

関数型推論法は以下の手順によって行われる．

Step 1 : 各規則の適合度 ω_i を計算する．

$$\omega_i = \mu_{A_1^i}(A_1) \times \mu_{A_2^i}(A_2) \quad (2.25)$$

$$(\text{もしくは } \omega_i = \mu_{A_1^i}(A_1) \wedge \mu_{A_2^i}(A_2))$$

ただし， $i = 1, 2$

Step 2 : 推論結果 y_0 を次式で計算する．

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot f^i(A_1, A_2)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2.26)$$

ただし， $i = 1, 2$

式(2.26)は後件部の関数値 $f^i(A_1, A_2)$ をそのときの適合度で荷重平均したものでこれを

推論結果としている。

関数型推論法の特徴は後件部の関数形がいったん決定すれば、前件部の適合度に応じて、後件部の関数をソフトに使い分けることができる点である。これはファジィスイッチングの考え方に通じるものである。

2.3.6 間接法を用いたファジィ推論法

直接法によるファジィ推論は、ファジィ関係の論理に、メンバーシップ関数の値を数値的真理値と解釈して推論するのに対して、間接法によるファジィ推論法はファジィ関係の論理にファジィ真理値を用いて推論する方法である。また、このファジィ真理値をタイプ2ファジィ集合という。

これはあるファジィ集合のメンバーシップ関数値を0.7としたとき、この値の設定はぴったり0.7真であるという根拠をもとに設定できる。ここで例えば、あの人はとびきりではないが、かなり美人であるという場合にメンバーシップ関数を0.7に設定したとする。しかし、この設定の仕方は厳密に言えば不十分に思われる。つまり、このメンバーシップ関数がぴったり0.7である根拠がないからである。ここでこのメンバーシップ関数を0.7ではなくおよそ0.7というふうにファジィ的な評価をする。これによってさきほどのあの人はとびきりではないが、かなり美人であるという場合にメンバーシップ関数をおよそ0.7で設定できる。つまり、間接法はこうしたファジィ真理値さらにファジィ集合で表し、これを推論の根拠とした推論法である。この推論法は先ほど述べたように一般的に推論手順が複雑であるため、ファジィ制御ではあまり使われない。しかし、間接法では、制御規則そのものの真らしさを区別して取り扱っているため、ファジィ集合の拡張性点でファジィ制御の応用の可能性を持っている。

2.4 距離型ファジィ推論法

ところで、今までに紹介した直接推論法は、前件部と与えられた事実との共通集合の高さを前件部と事実がどの程度一致しているかを示す適合度をファジィ推論の根拠として用いている。そのためいくつかの欠点がある。例えば、複数個の推論規則における前件部が疎である場合、つまり、前件部集合が互いに空の共通部分を持つ場合、事実がこの空集合に入力されると直接推論法では推論の結論を求めることができない。図2.17に簡単な例を示す。

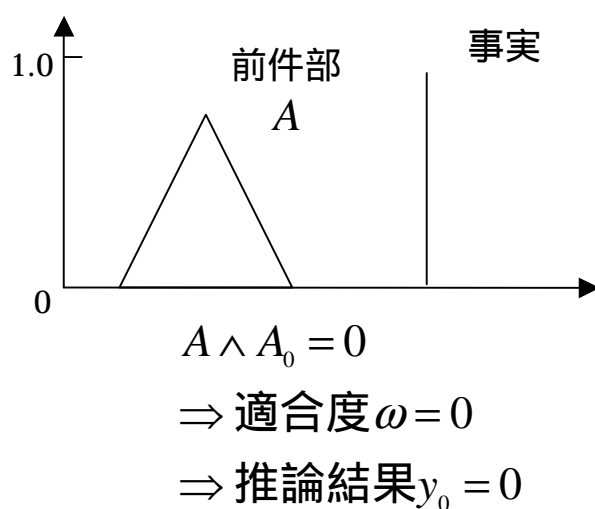


図 2.17 直接ファジィ推論法の欠点 1

また、推論規則の前件部、後件部と事実が凸なファジィ集合である場合には推論結果も凸なることが望まれる。しかし、従来の直接推論法では必ずしも推論結果が望まれる結果になるとは限らない。図 2.18 に簡単な例を示す。

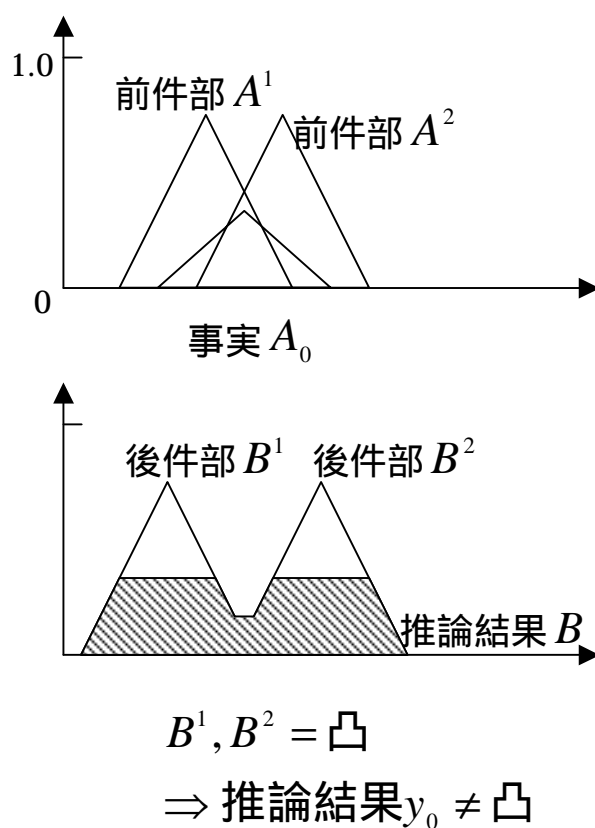


図 2.18 直接ファジィ推論法の欠点 2

前件部と事実が一致した場合，推論規則において前件部に対応した後件部が推論結果として望まれるが，この場合においても必ずしも望まれる推論結果になるとは限らない．これは分離規則が満たされていないことになる．図 2.19 に簡単な例を示す．

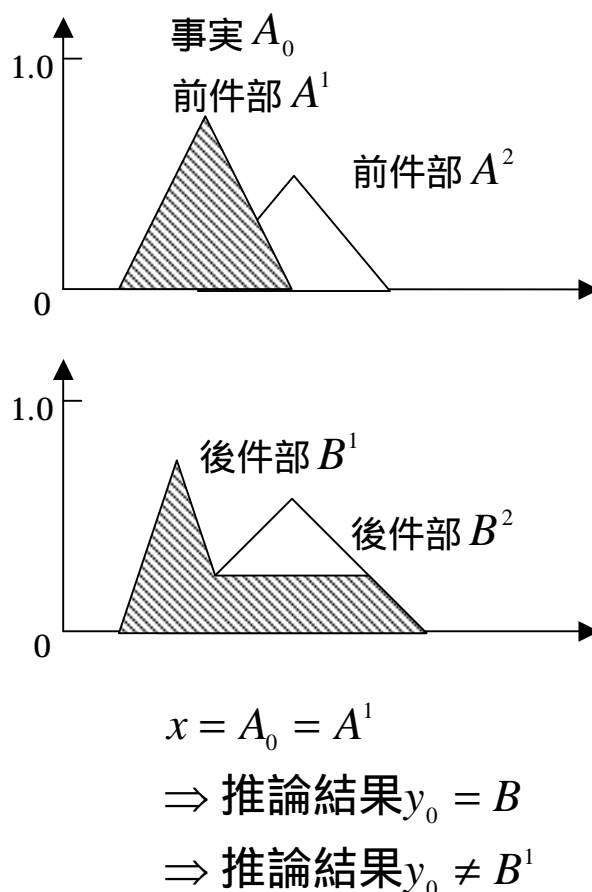


図 2.19 直接ファジィ推論法の欠点 3

こうした直接推論法の欠点を克服するためには，従来のファジィ推論の仕組みとは異なる出発点から議論することが必要である．王，土谷，水本らは推論の根拠としてファジィ集合間の距離に基づく距離型ファジィ推論法を提案した．この推論法は先ほど述べたように推論の根拠がファジィ集合間の距離に基づいており，先ほどの直接法の欠点を克服している．つまり，

-) 前件部と事実の集合が相容れない場合でも推論が可能である．
-) 後件部の凸なファジィ集合であれば，推論結果も凸なファジィ集合になる．
-) 分離規則を厳密に満たしている．

といった特徴をもっている．

次にファジィ集合間の距離の公理について述べる．

実数の全体 R を全体集合として, $F(R)$ で R におけるファジィ集合の全体を表す. また異なる概念を区別して表すときには, R の右下に添え字を付けて区別する.

定義1: ファジィ集合 $A \in F(R)$ が有界であるとは, $\forall \alpha \in (0,1]$ に対して, A の α -レベル集合

$$A_\alpha = \{x \in R \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (2.26)$$

が有界であるときである.

定義2: ファジィ集合 $A \in F(R)$ の高さ M_A は次のように定義される.

$$M_A = \sup \mu_A(x) \quad (2.26)$$

定義3: 高さ M_A が1であるファジィ集合 A は正規なファジィ集合と呼ばれる.

定義4: $\forall_{x_1, x_2} \in R$ に対して, ファジィ集合 $A \in F(R)$ のメンバーシップ関数

$\mu_A(x)$ が次式を満たしていれば, ファジィ集合 A は凸なファジィ集合であるという. ただし, $\forall_{x_0} \in [\min(x_1, x_2), \max(x_1, x_2)]$.

$$\mu_A(x_0) \geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)] \quad (2.27)$$

以下では有界凸なファジィ集合の全体を $\overline{F}(R)$ で表す. また, $\overline{F}_n(R)$ で $\overline{F}(R)$ における正規なファジィ集合の全体を表す. つまり, $\overline{F}_n(R)$ は有界かつ正規な凸ファジィ集合の全体を表す.

定義5: 任意の有界なファジィ集合 A のメンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ をとして, A の α -レベル集合を A_α と表して, A_α の上限 $\sup A_\alpha$ と A_α の下限 $\inf A_\alpha$ を次のように定義する.

$\alpha \neq 0$ のとき

$$\sup A_\alpha = \sup \{x \in R \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (2.28)$$

$$\inf A_\alpha = \inf \{x \in R \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (2.29)$$

$\alpha = 0$ のとき

$$\sup A_0 = \sup\{x \in R \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (2.30)$$

$$\inf A_0 = \inf\{x \in R \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (2.31)$$

以下では混乱を起こさない限り $\sup A_\alpha$ を $\overline{A_\alpha}$, $\inf A_\alpha$ を $\underline{A_\alpha}$ と書くことがある .

A が有界凸なファジィ集合である場合 , A の α -レベル集合 A_α は閉区間になり次のように表せる .

$$A_\alpha = [\inf A_\alpha, \sup A_\alpha] = [\underline{A_\alpha}, \overline{A_\alpha}] \quad (2.32)$$

定義 6: 高さ M_A のファジィ集合 A を正規化したファジィ集合 A_M のメンバーシップ関数 $\mu_{A_M}(x)$ は次のように定義する .

$$\mu_{A_M}(x) = \frac{1}{M_A} \mu_A(x), \forall x \in R \quad (2.33)$$

もし , A が $\overline{F}(R)$ におけるファジィ集合であれば , で正規化したファジィ集合 A_M は $\overline{F}_n(R)$ 中の要素となり , 定義 5 により A_M の上限と下限は次の式で表される .

$$\sup A_{M_\alpha} = \sup\{x \in R \mid \mu_{M_\alpha}(x) \geq \alpha \cdot M_A\} \quad (2.34)$$

$$\inf A_{M_\alpha} = \inf\{x \in R \mid \mu_{M_\alpha}(x) \geq \alpha \cdot M_A\} \quad (2.35)$$

ただし , $\alpha \in (0, 1]$

定義 7: ある台集合上で定義された任意の 2 つのファジィ集合 A , B に実数 $d(A, B)$ が対応し , 次の 3 つの条件を満足するとき , $d(A, B)$ をこの台集合上の距離関数という . ただし , C は台集合上における任意のファジィ集合である .

$$d(A, B) \geq 0; d(A, B) = 0 \Leftrightarrow A = B \quad (2.36)$$

$$d(A, B) = d(A, B) \quad (2.37)$$

$$d(A, B) \leq d(A, C) + d(C, B) \quad (2.38)$$

定義8: 連続メンバーシップ関数をもつファジィ集合 $A, B \in \overline{F}(R)$ に対して, 次式

で定義される実数関数 $d(A, B)$ を $\overline{F}(R)$ 上の距離関数という. ただし,

$1 \leq p < \infty$, $|\cdot|$ は絶対値で表す.

$$\begin{aligned}
 d(A, B) = & \left[\int_b^1 |\inf A_{M\alpha} - \inf B_{M\alpha}|^p d\alpha \right]^{\frac{1}{p}} \\
 & + \left[\int_b^1 |\sup A_{M\alpha} - \sup B_{M\alpha}|^p d\alpha \right]^{\frac{1}{p}} \quad (2.39) \\
 & + \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left| \left(\frac{1}{M_A} - 1 \right) \mu_A(x) - \left(\frac{1}{M_B} - 1 \right) \mu_B(x) \right|^p dx \right]^{\frac{1}{p}}
 \end{aligned}$$

この式は定義7で述べた3つの条件を満たしている.

以上で距離型ファジィ推論法におけるファジィ集合間の距離の公理について述べた. ここで, 距離関数の式において, p の値を2として, 最もよく使われる典型的なファジィ集合間の簡略化距離計算式を与える. 実際の問題ではこれらの公式を利用すれば, 非常に便利である.

次にいくつかのファジィ集合の基本形の距離の計算式を示す.

) 三角型ファジィ集合の場合

$\overline{F}(R)$ における三角型ファジィ集合は, 高さ, 高さのとり座標, 0-レベル集合の上限と下限により完全に表される. 図 2.20 に示すような三角型ファジィ集合 $A, B \in \overline{F}(R)$ をパラメータの形で書くと $T_A(a_1, a_2, a_3, a)$, $T_B(b_1, b_2, b_3, b)$ となる.

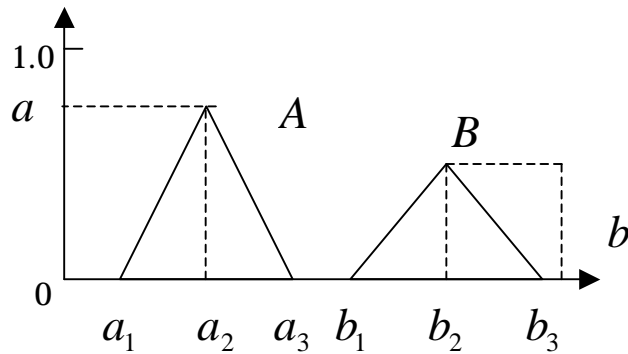


図 2.20 三角型ファジィ集合

距離関数に基づいて 図 2.20 のような三角型ファジィ集合 A と B の距離計算式は次式になる .

$$d(A, B) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^2 \left[\sum_{j=i}^{i+1} (a_j - b_j)^2 + \prod_{j=i}^{i+1} |a_j - b_j| \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{3}} \left[(1-a)(a_3 - a_1)^{\frac{1}{2}} + (1-b)(b_3 - b_1)^{\frac{1}{2}} \right]$$

式(2.40)は , もし A, B が共に正規なファジィ集合であれば , 式(2.40)の右辺の第 2 項が 0 になる .

) 台形型ファジィ集合の場合

台形型ファジィ集合 $A, B \in \overline{F}(R)$ は , 図 2.21 に示すような 5 つのパラメータが必要である . 図 2.21 に示すような台形型ファジィ集合はそれぞれ $T_A(a_1, a_2, a_3, a_4, a), T_B(b_1, b_2, b_3, b_4, b)$ ととなる .

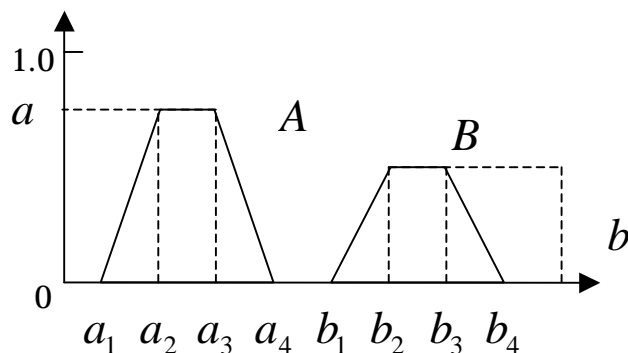


図 2.21 台形型ファジィ集合

距離関数に基づいて 図 2.21 のような台形型ファジィ集合 A と B の距離計算式は式(2.41)になる .

$$\begin{aligned}
d(A,B) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1,3} \left[\sum_{j=i}^{i+1} (a_j - b_j)^2 + \prod_{j=i}^{i+1} |a_j - b_j| \right]^{\frac{1}{2}} \\
&\quad + \frac{1}{\sqrt{3}} (1-a) [a_4 + 2(a_3 - a_2) - a_1]^{\frac{1}{2}} \quad (2.41) \\
&\quad + \frac{1}{\sqrt{3}} (1-b) [b_4 + 2(b_3 - b_2) - b_1]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

A と B が正規なファジィ集合であれば, 式(2.41)の右辺の第2項, 第3項が0になる. また, $a_2 = a_3$, $b_2 = b_3$ とすれば, 台形型ファジィ集合は三角型ファジィ集合となるので, 式(2.41)は式(2.40)そのものになる.

) 型ファジィ集合の場合

対称な 型ファジィ集合を表す場合, 3つのパラメータが必要であるが, ここでは一般的な非対称の 型ファジィ集合を対象とする場合もあることを考えて, 図 2.22 に示すような非対称な 型ファジィ集合間の距離計算式を与える. このとき4つのパラメータが必要となり, $\pi_A(a_1, a_2, a_3, K_a)$, $\pi_B(b_1, b_2, b_3, K_b)$ と書く. A と B のメンバーシップ関数を詳しく書けば次式のようになる.

$$\mu_{\pi_A}(x) = \begin{cases} \frac{2K_a}{(a_2 - a_1)^2} (x - a_1)^2, a_1 \leq x \leq \frac{a_2 + a_1}{2} \\ K_a - \frac{2K_a}{(a_2 - a_1)^2} (x - a_2)^2, \frac{a_2 + a_1}{2} \leq x \leq a_2 \\ K_a - \frac{2K_a}{(a_3 - a_2)^2} (x - a_2)^2, a_2 \leq x \leq \frac{a_2 + a_3}{2} \\ \frac{2K_a}{(a_3 - a_2)^2} (x - a_3)^2, \frac{a_2 + a_3}{2} \leq x \leq a_3 \end{cases} \quad (2.42)$$

$$\mu_{\pi_B}(x) = \begin{cases} \frac{2K_b}{(b_2 - b_1)^2} (x - b_1)^2, b_1 \leq x \leq \frac{b_2 + b_1}{2} \\ K_b - \frac{2K_b}{(b_2 - b_1)^2} (x - b_2)^2, \frac{b_2 + b_1}{2} \leq x \leq b_2 \\ K_b - \frac{2K_b}{(b_3 - b_2)^2} (x - b_2)^2, b_2 \leq x \leq \frac{b_2 + b_3}{2} \\ \frac{2K_b}{(b_3 - b_2)^2} (x - b_3)^2, \frac{b_2 + b_3}{2} \leq x \leq b_3 \end{cases} \quad (2.43)$$

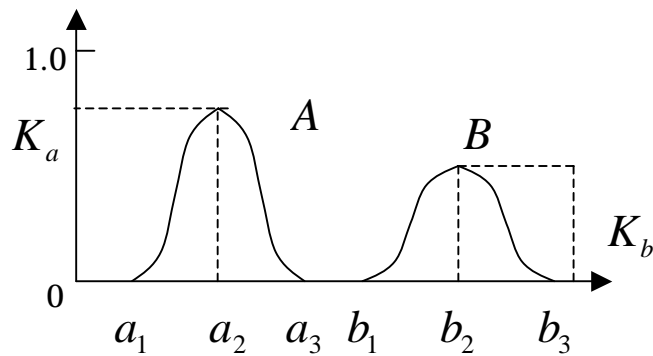


図 2.22 型ファジィ集合

距離関数に基づいて，式(2.42)と式(2.43)を用いて求められる距離計算式は次式のようになる．

$$\begin{aligned}
 d(A,B) = & \sum_{i=1}^2 \left[\frac{7}{24} \sum_{j=i}^{i+1} (a_j - b_j)^2 + \frac{5}{12} \prod_{j=i}^{i+1} |a_j - b_j| \right]^{\frac{1}{2}} \\
 & + (1 - K_a) \left[\sum_{i=1}^2 \frac{23}{60} (a_{i+1} - a_i) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 & + (1 - K_b) \left[\sum_{i=1}^2 \frac{23}{60} (b_{i+1} - b_i) \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \tag{2.44}$$

もし， $K_a = K_b = 1$ ，つまり A と B が共に正規なファジィ集合であれば，式

(2.45)の右辺にある第2項，第3項が0になる．

) 三角型ファジィ集合とシングルトンの場合

ファジィ制御などにおいて，推論規則における前件部と後件部を表すファジィ集合としては三角型ファジィ集合がよく使われる．また，事実はファジィ集合ではなく，通常は電圧，位置，速度などのようなセンサからの実数値となる．このとき，図 2.23 のような三角型ファジィ集合 A とシングルトン B との距離計算式は式(2.45)で与えられる．尚，ここでシングルトンは三角型ファジィ集合の幅を零に収束させた時の極限状態として考えファジィ集合として扱っている．

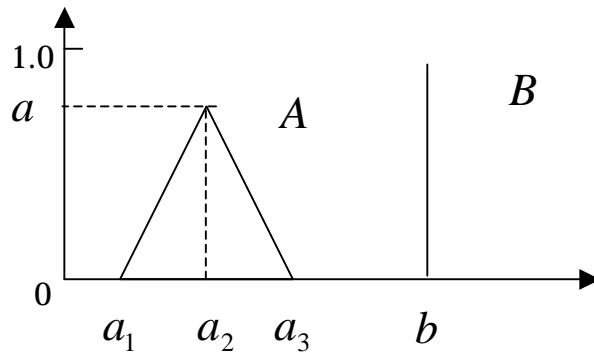


図 2.23 三角型ファジィ集合とシングルトン

$$d(A, B) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^2 \left[\sum_{j=i}^{i+1} (a_j - b)^2 + \prod_{j=i}^{i+1} |a_j - b| \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[(1-a)(a_3 - a_1)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.45)$$

) シングルトンの場合

図 2.24 のようなシングルトン A とシングルトン B を与える .

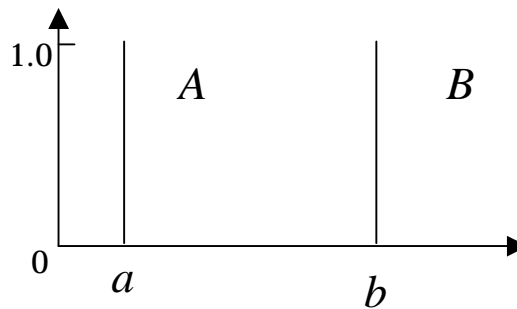


図 2.24 シングルトン

シングルトンの場合，メンバーシップ関数の最大値が 1 で， α -レベル集合の上限と下限が等しいので，距離計算式は式(2.46)となる .

$$d(A, B) = |a - b| \quad (2.46)$$

実際にこれらの距離計算式をファジィ推論に用いるときは，なるべく計算量を減らすことを考えて，それらの計算式の前に掛けている定数 $1/\sqrt{3}$ を 1 としても差し支えない . これは距離の公理を満たすすべての距離関数に 0 以外の任意の定数を掛けても，やはり距離の公理は満たされるからである .

次にこのファジィ集合間の距離を利用した距離型ファジィ推論法について述べる．まず表 2.5 のような推論規則を与える．

表 2.5 推論規則

$$R^1 : x_1 = A^{11}, \dots, x_m = A^{1m} \Rightarrow y = B^1$$

$$R^2 : x_1 = A^{21}, \dots, x_m = A^{2m} \Rightarrow y = B^2$$

$$\begin{array}{cccccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \end{array}$$

$$R^i : x_1 = A^{i1}, \dots, x_m = A^{im} \Rightarrow y = B^i$$

$$\begin{array}{cccccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \end{array}$$

$$R^n : x_1 = A^{n1}, \dots, x_m = A^{nm} \Rightarrow y = B^n$$

$$\text{事実} : x_1 = A^1, \dots, x_m = A^m$$

$$\text{推論結果} : y = B$$

ただし, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$. A^{ij} , B^i , A^j , B はそれぞれ前件部, 後件部, 与えられた事実および推論結果を表し, $A^{ij}, A^j \in F(R_{A^j})$, $B^i \in \overline{F}(R_{B^i})$ とする. また, 次の 2 つの仮定のもとで推論を行う.

-) 前件部ファジィ集合 A^{ij} と事実ファジィ集合 A^j の種類について特に制限がないが, 推論規則 $R^1 \sim R^n$ において, 前件部がまったく同一である推論規則は存在しないとする. すなわち, $\forall_{q_1, q_2} \in \{1, 2, \dots, n\}$, $q_1 \neq q_2$ に対して,

$\sum_{i=1}^m d(A^{q1}, A^{q2}) \neq 0$ とする．この仮定は互いに矛盾する推論規則を排除するためである．

) 後件部について, $k \in \{1, \dots, n\}$ が 1 つ以上存在して, $B^k \in \overline{F}_n(R_B)$ を満たす．

この仮定は推論結果に正規性を持たせるためである．つまり, $B \in \overline{F}_n(R_B)$ を満たすためである．もし推論結果がこの性質を必要としない場合, この仮定を外しても問題ない．

距離型ファジィ推論法は以下に手順によって行われる．

Step 1: まず, 定義 7 の公理を満たす計算法を用いて, A^{ij} と A^j との距離

$d_{ij}(A^{ij}, A^j)$ を計算する．次式により $d_1 \sim d_n$ を計算する．

$$d_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}(A^{ij}, A^j) \quad (2.47)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

このように計算された $d_1 \sim d_n$ も距離の公理を満足する．また, 仮定)

より $d_1 \sim d_n$ の中には 2 つ以上 0 になるものは存在しないことがわかる．

Step 2: 次のように, 推論結果 B の α -レベル集合を求める．

$$B_\alpha = [\inf(B_\alpha), \sup(B_\alpha)] \quad (2.48)$$

$$\inf(B_\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\inf(B_\alpha^i) \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad (2.49)$$

$$\sup(B_\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\sup(B_\alpha^i) \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad (2.50)$$

または，区間数の演算により式(2.48)は式(2.51)のように表せる．

$$\begin{aligned}
 B_\alpha &= \frac{\sum_{i=1}^n \left[B_\alpha^i \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \\
 &= \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left[B_\alpha^i \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j}, \frac{\sum_{i=1}^n \left[\overline{B_\alpha^i} \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \right] \quad (2.51)
 \end{aligned}$$

もし，後件部の中に $B^k \notin \overline{F_n}(R_B)$ ， $k=1,2,\dots,n$ が存在する場合， $\forall \alpha \in (\sup \mu_{B^k}(y), 1]$ に対する B_α^k は空の集合となる．この場合においても推論を可能にするためには，次の約束により推論を行う．つまり $\forall \alpha \in (\sup \mu_{B^k}(y), 1]$ に対して，

$$B_\alpha^k = [\inf(B_\alpha^k), \sup(B_\alpha^k)] = [\inf(B_{M_{B^k}}^k), \sup(B_{M_{B^k}}^k)] \quad (2.52)$$

とする．

Step 3： 合成定理により式(2.53)で推論結果 B を求める．

$$B = \bigcup_{\alpha} \alpha \cdot B_\alpha \quad (2.53)$$

以上で距離型ファジィ推論法のアルゴリズムについて述べた．通常ファジィ推論法では，前件部はファジィ集合でなければ推論できない．これに対して距離型ファジィ推論法は推論の根拠が距離に基づいているので，前件部がシングルトンである場合においても適切な推論結果を得ることができる．

次に直接型ファジィ推論法である関数型推論法と簡略推論法と同様にして，距離型ファジィ推論法の推論規則の後件部を関数もしくは実数にした場合についての推論方法について述べる．まず，ファジィ集合間距離に基づく関数型推論法について述べる．表 2.25 のような推論規則を与える．

表 2.25 推論規則

$$R^1 : x_1 = A^{11}, \dots, x_m = A^{1m} \Rightarrow y = f_1(x_1, \dots, x_m)$$

$$R^2 : x_1 = A^{21}, \dots, x_m = A^{2m} \Rightarrow y = f_2(x_1, \dots, x_m)$$

• • • • •
 • • • • •
 • • • • •

$$R^i : x_1 = A^{i1}, \dots, x_m = A^{im} \Rightarrow y = f_i(x_1, \dots, x_m)$$

• • • • •
 • • • • •
 • • • • •

$$R^n : x_1 = A^{n1}, \dots, x_m = A^{nm} \Rightarrow y = f_n(x_1, \dots, x_m)$$

$$\text{事実} : x_1 = A^1, \dots, x_m = A^m$$

$$\text{推論結果} : y = y_0$$

ただし, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$. A^{ij} , f_i , A^j , y_0 はそれぞれ前件部, 後件部, 与えられた事実および推論結果を表し, $A^{ij}, A^j \in F(R_{A^j})$, $y_0, f_i(x_1, \dots, x_m) \in R$ とする. また, 次の先ほど述べた 2 つの仮定のうち,) だけを推論条件とする.

ファジィ集合間距離に基づく関数型推論法は以下の手順によって行われる.

Step 1: まず, 定義 7 の公理を満たす計算法を用いて A^{ij} と A^j との距離を計算する. 次の式(2.54)により $d_1 \sim d_n$ を計算する.

$$d_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}(A^{ij}, A^j) \tag{2.54}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Step 2: 事実の重心 $A^1 \sim A^m$ をそれぞれ $x_1^0 \sim x_m^0$ として, 推論結果 y_0 は式(2.55)で求める.

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[f_i(x_1^0, \dots, x_m^0) \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad (2.55)$$

次に, ファジィ集合間距離に基づく簡略推論法について述べる. 表 2.26 のような推論規則を与える.

表 2.26 推論規則

$$R^1 : x_1 = A^{11}, \dots, x_m = A^{1m} \Rightarrow y = C_1$$

$$R^2 : x_1 = A^{21}, \dots, x_m = A^{2m} \Rightarrow y = C_2$$

.

$$R^i : x_1 = A^{i1}, \dots, x_m = A^{im} \Rightarrow y = C_i$$

.

$$R^n : x_1 = A^{n1}, \dots, x_m = A^{nm} \Rightarrow y = C_n$$

$$\text{事実} : x_1 = A^1, \dots, x_m = A^m$$

$$\text{推論結果} : y = y_0$$

ただし, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$. A^{ij} , C_i , A^j , y_0 はそれぞれ前件部, 後件部, 与えられた事実および推論結果を表し, $A^{ij}, A^j, y_0, C_i \in R$ とする. また, 次の先ほど述

べた2つの仮定のうち，)だけを推論条件とする．

ファジィ集合間距離に基づく簡略推論法は以下の手順によって行われる．

Step 1: まず，定義7の公理を満たす計算法を用いて A^{ij} と A^j との距離を計算する．次式により $d_1 \sim d_n$ を計算する．

$$d_i = \sum_{j=1}^m d_{ij}(A^{ij}, A^j) \quad (2.57)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

また，事実が実数である場合は距離関数において p の値を1として

$$d_i = \sum_{j=1}^m |x^{ij} - x^j| \quad (2.58)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

となる．

Step 2: 推論結果は式(2.59)で求める．

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[C_i \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad (2.59)$$

もちろん，これら2つの推論法は距離型ファジィ推論法の特徴を有している．先に述べたように制御では入出力情報は，通常，実数値である．このため，これらの推論法は制御には非常に有利である．

第3章 実験に使用するロボットについて

この章では今回の実験で使用する案内ロボットについて述べる．実験では蛍光灯センサを搭載した自律型全方向移動ロボットを用いた．このロボットは CCD カメラを用いて天井に設置された蛍光灯を認識し，蛍光灯の配置に沿って移動することができる．3.1 ではロボットの駆動機構について述べる．3.2 ではロボットに搭載されているセンサについて述べる．3.3 ではロボットのシステムの構成を述べる．

3.1 駆動機構

図 3.1 にロボットの写真を示す．ロボットは直径 350mm，高さ 800mm の円柱の形をしている．図 3.2 に機構部の図を示す．底面には 3 つのタイヤが三角形の頂点に配置されており，プーリーとギヤを用いて 1 つのモータによって駆動している．タイヤは全て同じ方向を常に向いており，同じ回転数で回転する．方向転換はタイヤの回転中心と床平面に対して垂直な軸にプーリーを用いて回転する．

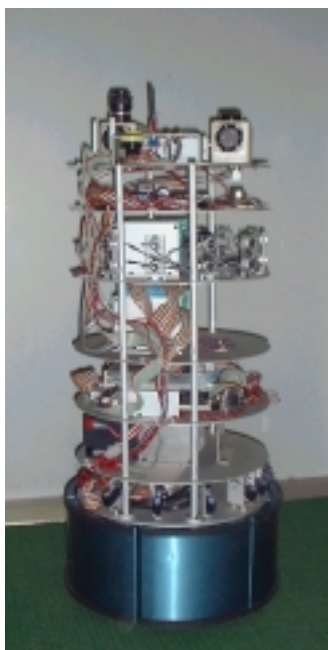


図 3.1 ロボットの写真

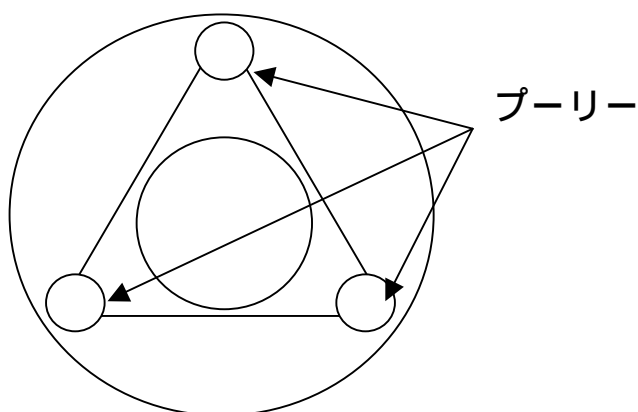


図 3.2 機構部

3.2 センサ

ロボットには下部側面にタッチセンサが 6 個，中央側面には赤外線センサ 12 個，超音波センサ 9 個が配置されている．また，ロボット上部には CCD カメラが付属している．ロボットの上部から見たセンサの配置図を図 3.3 に示す．

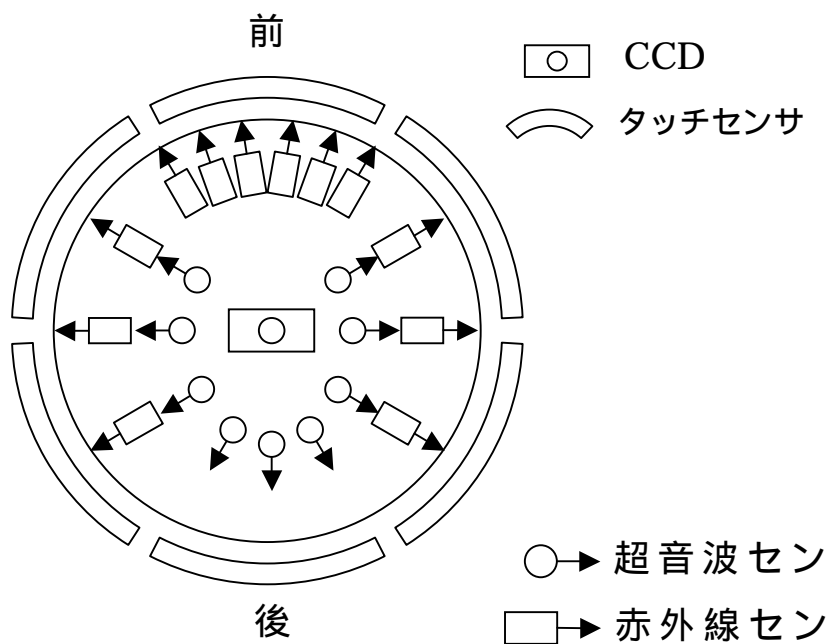


図 3.3 センサ配置図

3.3 システムブロック線図

今回のシステムブロック線図を図 3.4 に示す．まず，ロボットは入力情報からファジィ推論を行う．具体的には超音波センサの値より推論を行う．次に，この推論結果をもとにして軌道計画を行う．ここでは推論結果がそのまま軌道値となる．この軌道値とロボットの入力情報より目標の決定，動作を行う．

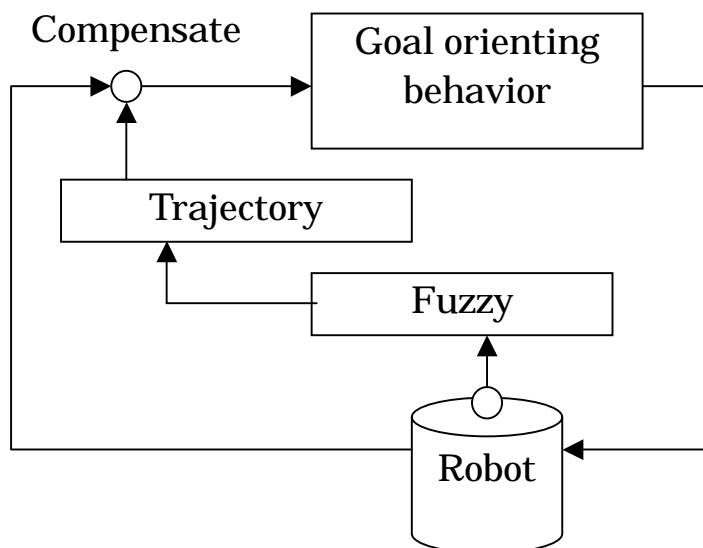


図 3.4 システムブロック線図

第4章 距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法

本章では距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法について述べる。4.1 では距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法を導入するにあたっての特徴をあげる。4.2 では軌道計画法の設計の手順について述べる。4.3 では軌道計画法の設計における言語ルールによる知識の抽出について述べる。4.4 では4.3 で抽出された知識の定式化について述べる。4.5 では4.4 で定式化された知識のファジィ集合による言語変数の定量化について述べる。4.6 では距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画のアルゴリズムについて述べる。最後に、4.7 では設定された距離型ファジィ推論法の推論結果について述べる。

4.1 ファジィ軌道計画の導入

案内ロボットの軌道計画設計における問題はロボットと人間との相互関係を如何に取り入れるかである。この問題を解決する為にはファジィ推論の導入が適切である。人間とロボットとの間に見られる相互関係を案内知識としてとりだして表現する。ファジィ推論の導入にあたって以下の特徴があげられる。

-) 案内知識をファジィ推論における言語ルールを用いて表現する事によってファジィ推論を軌道計画に導入する事ができる。そのため厳密な数学的規則を設けることなく自由な計画を設計できる。また、案内知識を第三者が主観的に決定する事ができる為、軌道計画への導入が容易である。
-) ファジィ推論は従来のような画一的な関数型で表現されるのではなく、複数の制御規則によって表現されている。そのため単純な制御規則を追加していく事によって、従来に関数型では表現が難しい複雑な計画も容易に実現する事ができる。
-) 人間の言語と言うあいまいさを含んだ表現そのものを表現するのにファジィ推論が適している。実際に、近い、遠いといった自然言語を画一的な評価関数で求めるよりもファジィ推論で自然言語を表現する方が現実的な手段といえる。
-) 制御規則が言語ルールを用いて表現されている為、人間に制御の様子が理解しやすい。同時に人間になじみやすい制御とも言える。

以上の特徴からわかるように、ファジィ集合とファジィルールの設定には十分な自由度があり、入出力関係においては多様な非線形特性が得られる。よって、ファジィ集合とファジィルールを適切に活用することにより、非線形の強い実システムをより精度よく近似することができる。これは、一つの方程式でシステムの特性のすべてを近似しようとする従来の数理モデル論と根本的に異なる案内役と人間との間に見られる相互関係を言語ルー

ルで簡単に表現できる。

4.2 軌道計画法の設計手順

図 4.1 に距離型ファジィ推論法に基づいた軌道計画法の設計手順を示す。まず、軌道計画を行なうにあたり、その目的を決定する。今回の軌道計画の目的はロボットと人間の相互関係に基づいた案内軌道計画の実施である。今回の実験の場合、具体的には、近い、遠いといった人間の評価からロボットが速度を上げる、下げるといった一連の動作を決定するといった基本的な案内動作を行なうことである。次に、軌道計画法の目的をもとに推論規則の設定を行ないます。まず 軌道計画法の目的をもとにして言語ルールを作成します。さらに、この作成された言語ルールを定式化します。次の手順は、言語変数の定量化です。定式化した言語ルールをファジィ集合を用いて定量化する。最後に、ファジィ推論法を行いこの推論結果を軌道値として用いる。

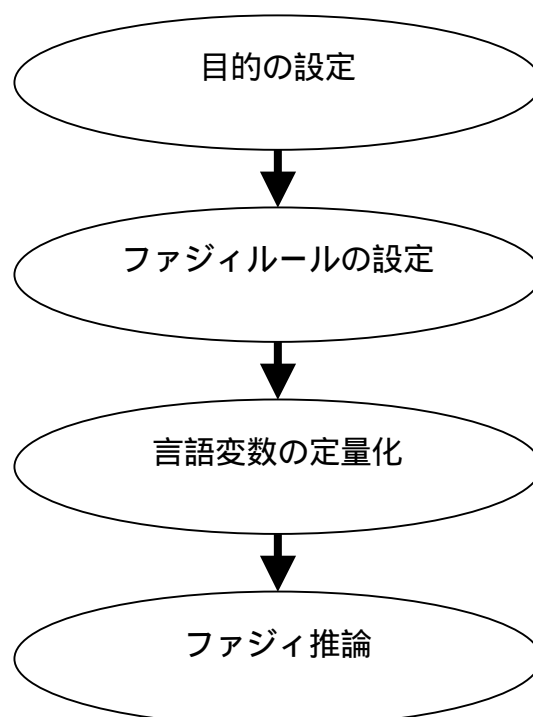


図 4.1 軌道計画法の設計手順

4.3 言語ルールによる知識の抽出

ファジィ軌道計画における目的をもとに言語ルールの設定を行なう。実験では評価基準として案内ロボットに装備された超音波センサにより検出した対象(人間)との距離を用いた。理由としては次のようである。

-) 案内知識が人間の視覚情報と通して評価できる。
-) 評価基準が明文化しやすい。

) 導入が容易である。

また、案内ロボットの軌道計画は速度指示によって行なう。案内役の知識は表 4.1, 4.2 および 4.3, 4.4 に示す 4 つ言語ルールに表現する。

表 4.1 言語ルール

- R^1 : もし、対象との距離が非常に近ければ、
速度を非常に速い速度にせよ。
- R^2 : もし、対象との距離が近ければ、
速度を速い速度にせよ。
- R^3 : もし、対象との距離が少し近ければ、
速度を少し速い速度にせよ。
- R^4 : もし、対象との距離が適切であれば、
速度を適切な速度にせよ。
- R^5 : もし、対象との距離が少し遠ければ、
速度を少し遅い速度にせよ。
- R^6 : もし、対象との距離が遠ければ、
速度を遅い速度にせよ。
- R^7 : もし、対象との距離が非常に遠ければ、
速度を非常に遅い速度にせよ。

表 4.2 言語ルール

- R^1 : もし、対象との距離が非常に近ければ、
速度を非常に上げよ。
- R^2 : もし、対象との距離が近ければ、
速度を上げよ。
- R^3 : もし、対象との距離が少し近ければ、
速度を少し上げよ。
- R^4 : もし、対象との距離が適切であれば、
速度を保て。
- R^5 : もし、対象との距離が少し遠ければ、
速度を少し下げよ。
- R^6 : もし、対象との距離が遠ければ、
速度を下げよ。
- R^7 : もし、対象との距離が非常に遠ければ、
速度を非常に下げよ。

表 4.3 言語ルール

- R^1 : もし, 対象との距離が近ければ,
速度を上げよ .
- R^2 : もし, 対象との距離が適切であれば,
速度を保て .
- R^3 : もし, 対象との距離が遠ければ,
速度を下げよ .

表 4.4 言語ルール

- R^1 : もし, 対象との距離が近ければ,
速度を上げよ .
- R^2 : もし, 対象との距離が適切であれば,
速度を保て .
- R^3 : もし, 対象との距離が遠ければ,
速度を下げよ .

4.4 知識の定式化

表 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 の言語ルールにおける前件部と後件部を定式化する . 前件部変数は超音波センサから検出された対象との距離である . また, 後件部変数は軌道計画としての表 4.1, 4.3 は案内ロボットの速度, 表 4.2, 4.4 では案内ロボットの速度の変化量を用いる . ここで表 4.1, 4.2 の前件部変数は $x \in \{A^1, A^2, A^3, A^4, A^5, A^6, A^7\}$ である . 表 4.3, 4.4 の前件部変数は $x \in \{A^1, A^2, A^3\}$ である . 表 4.1 の後件部変数は $y_B \in \{B^1, B^2, B^3, B^4, B^5, B^6, B^7\}$ であり 表 4.3 の後件部変数は $y_B \in \{B^1, B^2, B^3\}$ である . 表 4.2 の後件部変数は $y_C \in \{C^1, C^2, C^3, C^4, C^5, C^6, C^7\}$ であり, 表 4.4 の後件部変数は $y_C \in \{C^1, C^2, C^3\}$ である . 尚, $A^1, A^2, A^3, A^4, A^5, A^6, A^7$ 及び $B^1, B^2, B^3, B^4, B^5, B^6, B^7, C^1, C^2, C^3, C^4, C^5, C^6, C^7$ はそれぞれのルールの前件部と後件部に対応した言語変数であり, 前件部 x は超音波センサから検出した人間との距離, 後件部 y_B は案内ロボットの速度, 後件部 y_C は案内ロボットの速度の変化量を示している . 定式化表現すると以下の表 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 のようになる .

表 4.5 推論規則

$$R^1 : \text{IF } x \text{ is } A^1 \text{ then } y_B \text{ is } B^1$$
$$R^2 : \text{IF } x \text{ is } A^2 \text{ then } y_B \text{ is } B^2$$
$$R^3 : \text{IF } x \text{ is } A^3 \text{ then } y_B \text{ is } B^3$$
$$R^4 : \text{IF } x \text{ is } A^4 \text{ then } y_B \text{ is } B^4$$
$$R^5 : \text{IF } x \text{ is } A^5 \text{ then } y_B \text{ is } B^5$$
$$R^6 : \text{IF } x \text{ is } A^6 \text{ then } y_B \text{ is } B^6$$
$$R^7 : \text{IF } x \text{ is } A^7 \text{ then } y_B \text{ is } B^7$$

表 4.6 推論規則

$$R^1 : \text{IF } x \text{ is } A^1 \text{ then } y_C \text{ is } C^1$$
$$R^2 : \text{IF } x \text{ is } A^2 \text{ then } y_C \text{ is } C^2$$
$$R^3 : \text{IF } x \text{ is } A^3 \text{ then } y_C \text{ is } C^3$$
$$R^4 : \text{IF } x \text{ is } A^4 \text{ then } y_C \text{ is } C^4$$
$$R^5 : \text{IF } x \text{ is } A^5 \text{ then } y_C \text{ is } C^5$$
$$R^6 : \text{IF } x \text{ is } A^6 \text{ then } y_C \text{ is } C^6$$
$$R^7 : \text{IF } x \text{ is } A^7 \text{ then } y_C \text{ is } C^7$$

表 4.7 推論規則

$$R^1 : \text{IF } x \text{ is } A^1 \text{ then } y_B \text{ is } B^1$$

$$R^2 : \text{IF } x \text{ is } A^2 \text{ then } y_B \text{ is } B^2$$

$$R^3 : \text{IF } x \text{ is } A^3 \text{ then } y_B \text{ is } B^3$$

表 4.8 推論規則

$$R^1 : \text{IF } x \text{ is } A^1 \text{ then } y_C \text{ is } C^1$$

$$R^2 : \text{IF } x \text{ is } A^2 \text{ then } y_C \text{ is } C^2$$

$$R^3 : \text{IF } x \text{ is } A^3 \text{ then } y_C \text{ is } C^3$$

4.5 言語変数の定量化

定式化された知識のファジィ集合によって言語変数の定量化を行なう。前件部のメンバーシップ関数としては三角型ファジィ集合とシングルトン、及び台形型ファジィ集合を用いた。尚、シングルトンはメンバーシップ関数の幅を零に収束させた時の極限状態とする。前件部において三角型ファジィ集合を用いたメンバーシップ関数を図 4.2, 4.3 に、シングルトンを用いたメンバーシップ関数を図 4.4, 4.5 に示す。後件部のメンバーシップ関数はファジィ集合ではなく実数値で与えた。また、後件部 y_B の実数値を図 4.6, 4.7 に、後件部 y_C の実数値を図 4.8, 4.9 に示す。

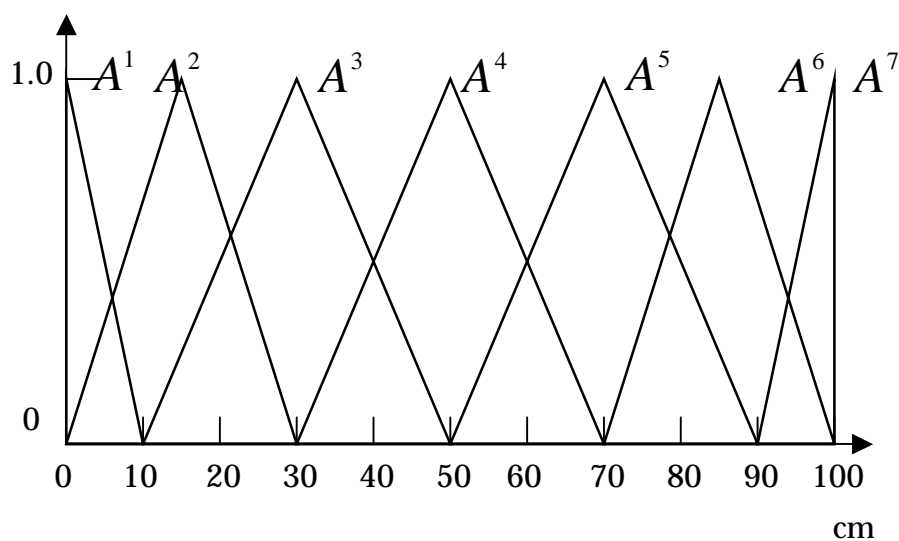


図 4.2 前件部のメンバーシップ関数

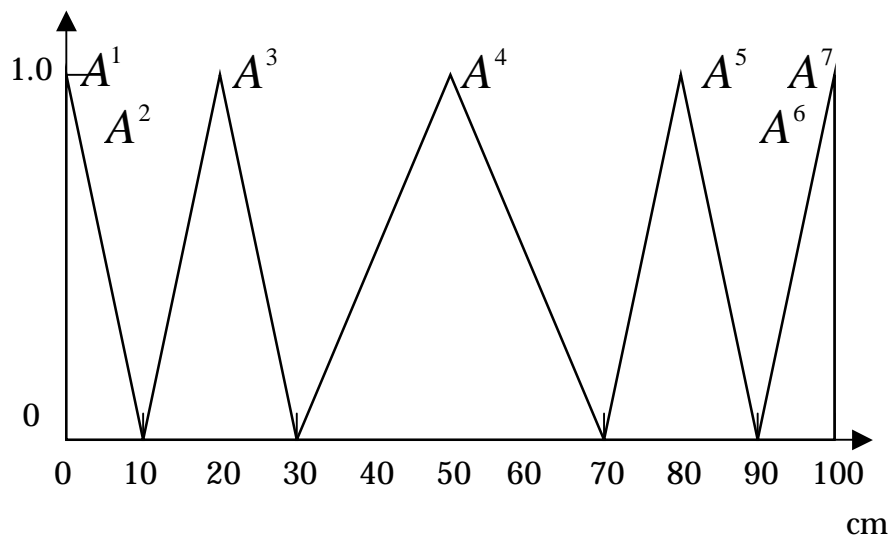


図 4.3 前件部のメンバーシップ関数

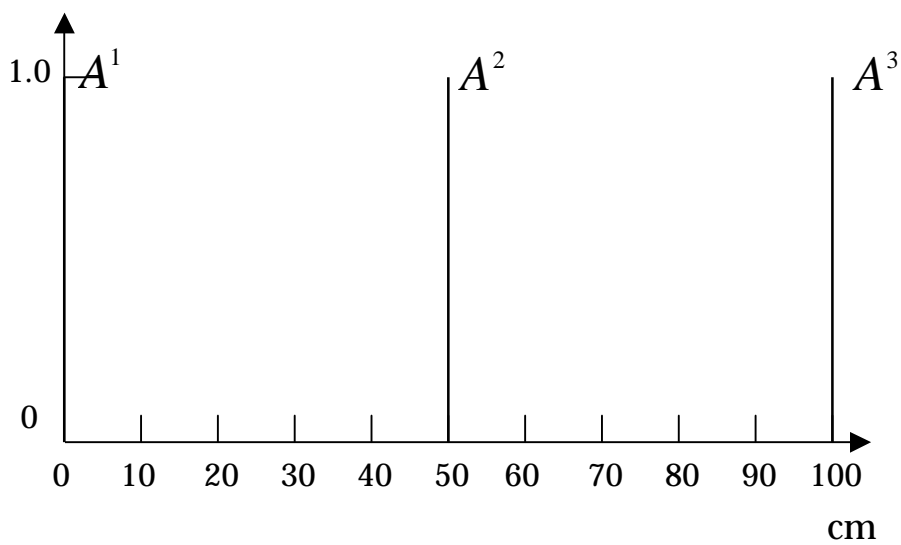


図 4.4 前件部のメンバーシップ関数(シングルトン)

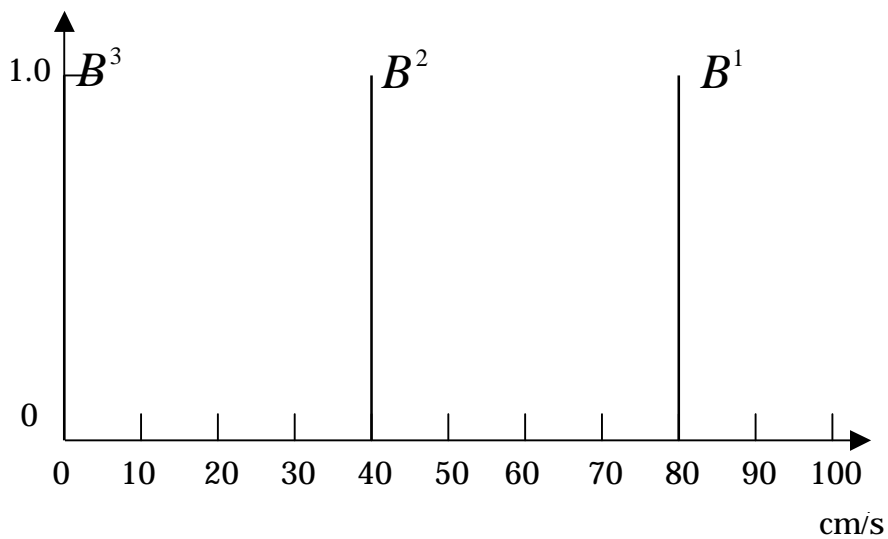


図 4.5 後件部 y_B の実数値

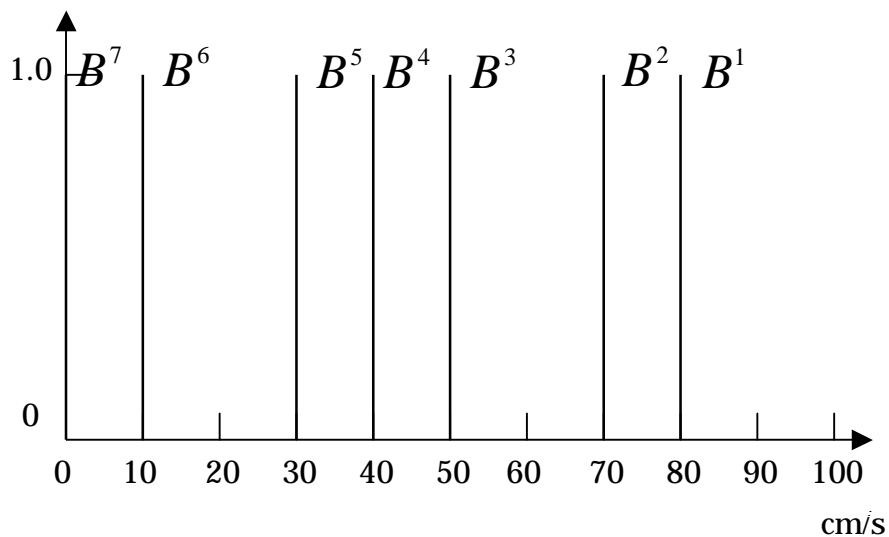


図 4.6 後件部 y_B の実数値

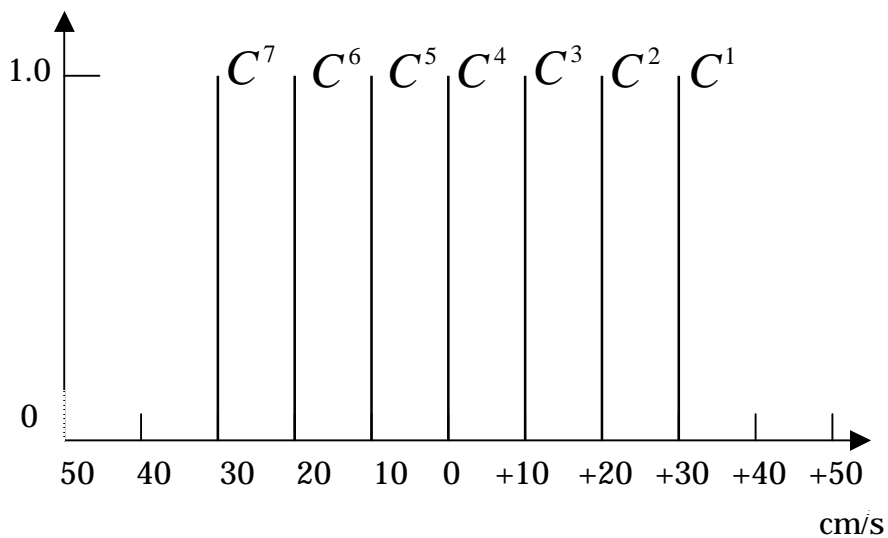


図 4.7 後件部 y_C の実数値

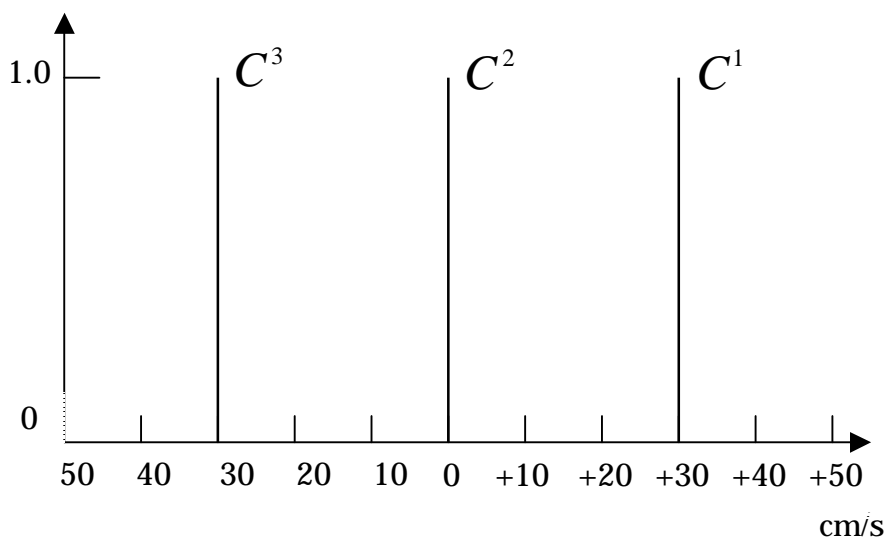


図 4.8 後件部 y_C の実数値

図 4.2, 4.3 のメンバーシップ関数は表 4.5, 4.6 の推論規則の前件部に相当する。図 4.4 のメンバーシップ関数は表 4.7, 4.8 の推論規則の前件部 x に相当する。また, 図 4.5 のメンバーシップ関数は表 4.5 の推論規則の後件部 y_B に相当する。図 4.6 のメンバーシップ関数は表 4.7 の推論規則の後件部 y_C に相当する。図 4.7 のメンバーシップ関数は表 4.6 の推論規則の後件部 y_B に相当する。図 4.8 のメンバーシップ関数は表 4.8 の推論規則の後件部 y_C に相当する。

4.7 軌道計画のアルゴリズム

距離型ファジィ推論法に基づいて軌道計画を行う。距離型ファジィ推論法では, 前件部と事実との距離を推論の根拠としているので, 前件部ファジィ集合が互いに覆われていないようなファジィルールの場合でも, 適切な推論結果を得ることができる。また, 後件部が凸なファジィ集合であれば, 推論結果も凸なファジィ集合になるので, ファジィ数としての特徴は保持されている。さらに, 分離規則は厳密に満たされているので, 学習アルゴリズムにより容易に最適なルールを探すことができる。

軌道計画のアルゴリズムは次のステップからなる。

Step1: 事実と前件部との距離を求める。距離の計算は式 (4.1) で与えられる。

尚, A^i , A は前件部, 事実を表し, $i =$ 推論規則の数, $1 \leq p < \infty$ である。

$$\begin{aligned}
 d_i = d(A^i, A) = & \left[\int \left| \inf A^i_{M\alpha} - \inf A_{M\alpha} \right|^p d\alpha \right]^{\frac{1}{p}} \\
 & + \left[\int \left| \sup A^i_{M\alpha} - \sup A_{M\alpha} \right|^p d\alpha \right]^{\frac{1}{p}} \\
 & + \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left| \left(\frac{1}{M_{A^i}} - 1 \right) \mu_{A^i}(x) - \left(\frac{1}{M_A} - 1 \right) \mu_A(x) \right|^p dx \right]^{\frac{1}{p}}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

式(4.1)において, p の値を 2 として一般的なファジィ集合間の簡略化距離計算式を与える。

Step2: 次に軌道の結果を推論する．推論結果 y_0 は式(4.1)より求められた前件部

と事実との距離 d_i より式(4.2)で与えられる．尚, B^i は後件部の実数値である．

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^i \left[B^i \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^i \prod_{j=1, j \neq i}^i d_j} \quad (4.2)$$

ここで求められた推論結果 y_0 を軌道値として与える．

4.8 推論結果

既存の完成されたシステムへのファジィ計画を導入した場合の推論結果を示す．横軸は事実, 縦軸は軌道値を表わしている．図 4.9 は表 4.5 の推論規則で前件部に図 4.2, 後件部に図 4.5 を用いた場合の推論結果である．図 4.10 は表 4.5 の推論規則で前件部に図 4.2, 後件部に図 4.6 を用いた場合の推論結果である．これら二つは min-max 重心法を用いて推論を行なった．これ以降はすべて距離型ファジィ推論法を用いて推論を行なった．図 4.11 は図 4.9 と同じ推論規則で推論を行なった．図 4.12 は図 4.10 と同じ推論規則で推論を行なった．図 4.13 は表 4.5 の推論規則で前件部に図 4.3, 後件部に図 4.5 を用いた場合の推論結果である．図 4.14 は表 4.5 の推論規則で前件部に図 4.3, 後件部に図 4.6 を用いた場合の推論結果である．図 4.15 は表 4.4 の推論規則で前件部に図 4.3, 後件部に図 4.7 を用いた場合の推論結果である．図 4.16 は表 4.5 の推論規則で前件部に図 4.8, 後件部に図 4.7 を用いた場合の推論結果である．

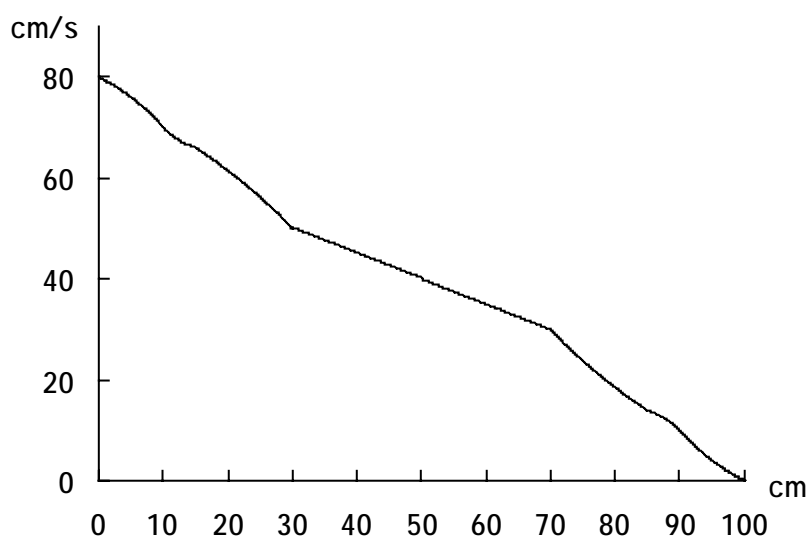


図 4.9 推論結果

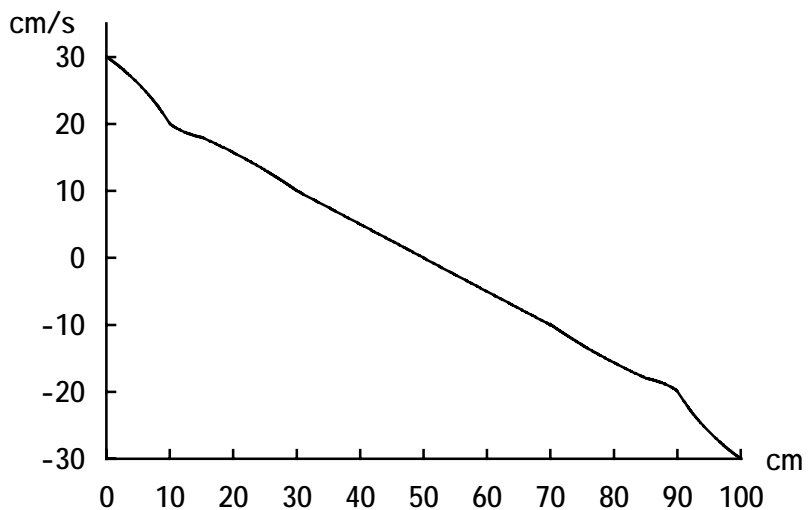


図 4.10 推論結果

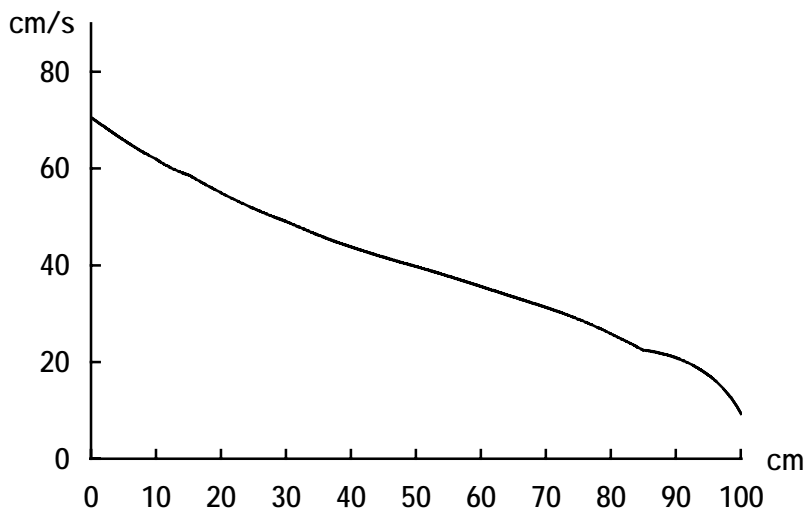


図 4.11 推論結果

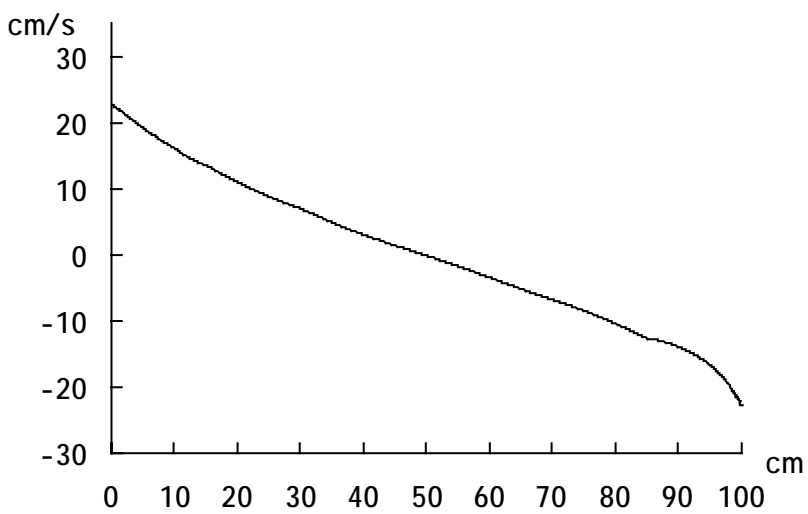


図 4.12 推論結果

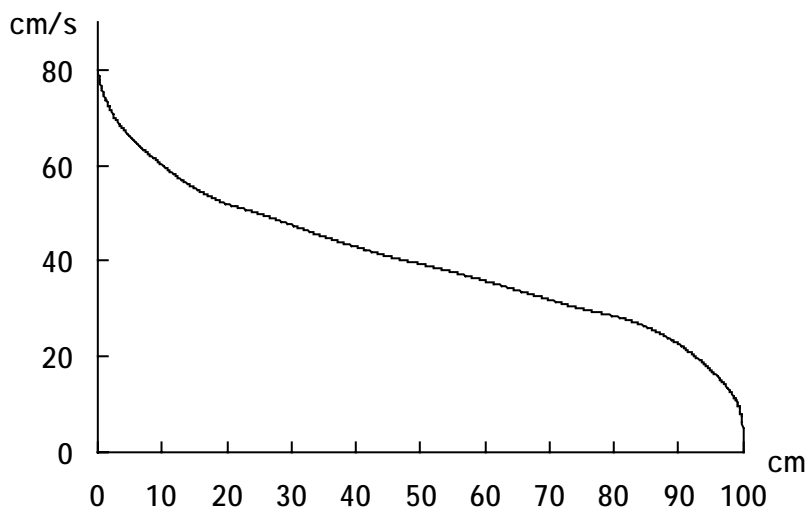


図 4.13 推論結果

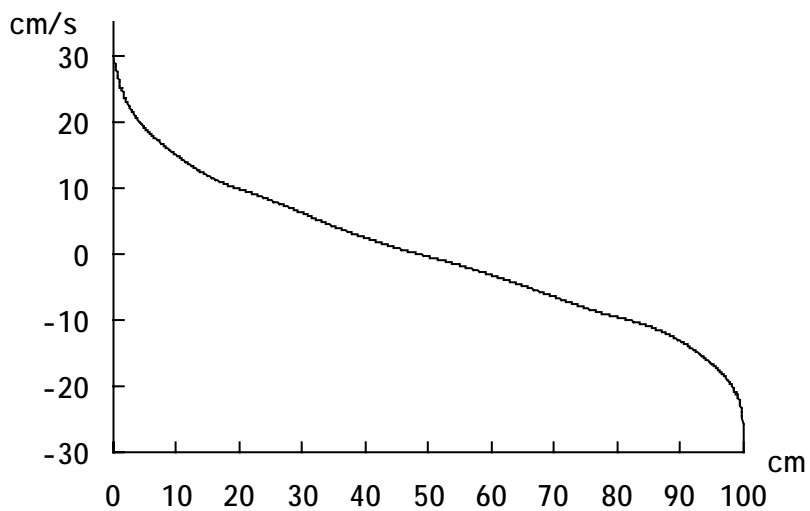


図 4.14 推論結果

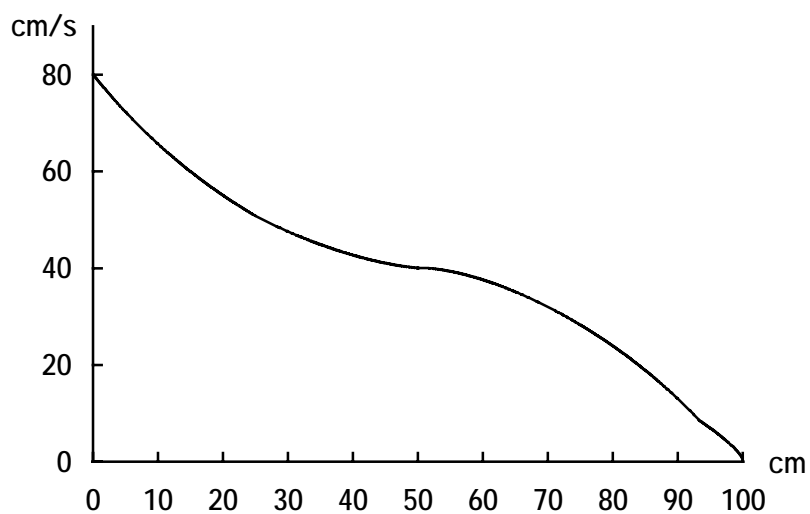


図 4.15 推論結果

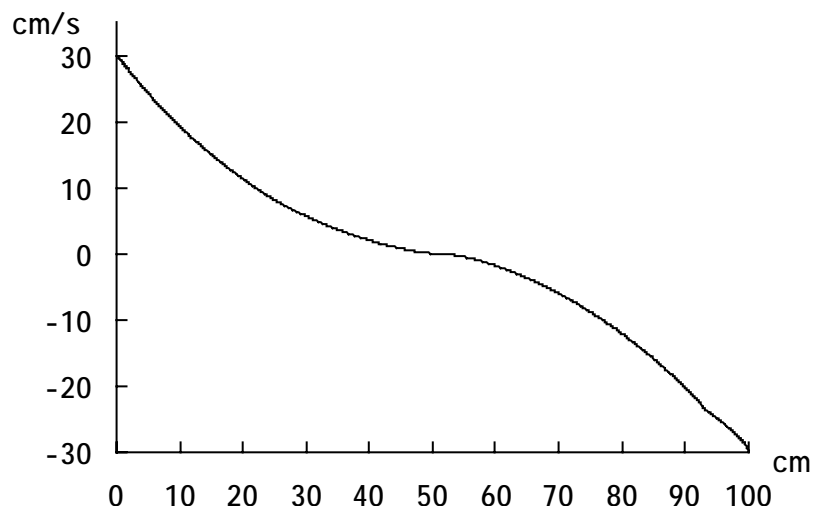


図 4.16 推論結果

推論結果より以下の結果が見られる。

-) すべての推論結果において事実に対して推論ルールから期待される結果が導かれている。また、単純に事実按比例して結果が導かれる訳ではない複雑な系である人間との相互関係を表現できる。
-) 同じ推論規則で同じ前件部と後件部を用いた図 4.9, 4.10 の min-max 重心法を用いた場合の推論結果と図 4.11, 4.12 の距離型ファジィ推論法を用いた場合の推論結果を比較すると、軌道値のとり値の幅に違いがある。これは距離型ファジィ推論法が前件部と事実のファジィ集合間の距離をとっているため、図 4.2 のような前件部の場合には事実との距離は 0 にはならない。このためにこのような推論結果が得られる。
-) 距離型ファジィ推論法において前件部がシングルトンである場合でも適切な結果が推論される特徴を活かして前件部のメンバーシップ関数にシングルトンを用いた。これによりある事実に対する操作量を任意で決める事ができる。これは非常に有益な特徴である。図 4.9, 4.10 のような軌道値のとり値の幅をとるには図 4.13, 4.14 のようにシングルトンを用いることで同様な軌道値のとり値の幅を取ることができる。
-) 距離型ファジィ推論法の場合には、全ての前件部が事実に影響している。これは通常の適合度型推論法では得られない効果である。このため、適合度型推論法よりも複雑な系が簡単に表現できる。
-) 図 4.15, 4.16 のような最も単純な推論規則構成された場合でも複雑な系が表現できている。先ほど述べたようにこれに推論規則を追加していくことにより、より複雑な系を表現できる。

第5章 距離型ファジィ推論法に基づく

軌道計画法を用いた案内ロボットの案内実験

第4章でのべた距離型ファジィ推論法に基づく軌道計画法を用いて案内ロボットの案内実験を行った。この章ではその実験と実験結果について述べる。5.1 では案内実験の目的と方法について述べる。5.2 では今回行った実験結果を示す。5.3 では5.2の実験結果の考察を述べる。

5.1 実験

今回の案内実験はロボットが案内を行うにあたって求められる基本的な動作を対象として行うこととした。ロボットが案内を行う時に、人間がロボットの後方を追従することを前提として、考えられる人間の動作は以下の通りである。

-) 人間がゆっくり歩く。
-) 人間が普通に歩く。
-) 人間が早く歩く。
-) 人間が止まる。

これらの動作に対してロボットが適切な動作を行うことができれば、基本的な案内動作を行うことができると考える。また、今回の実験で使用するロボットでは、そのロボットの機構の特徴よりロボットが前進する方向に対して、人間が常にロボットの後方に回ることによって、すべての方向に対して案内することができる。これらが実現できれば案内ロボットの基本的な案内ができると考える。

実験は第4章に述べた距離型ファジィ推論法に基づいた軌道計画法と比較検討のため直接法である簡略型推論法を用いて行う。実験は、ロボットを4m直進させ、その後方を追従する人間が)~)の動作を行った場合のロボットと人間との関係を調べた。ここで)の人間がゆっくり歩く速度はおよそ10~30cm/s、普通に歩く速度をおよそ30~50cm/s、速く歩く速度をおよそ50~80cm/sとした。今回使用した案内ロボットが移動するにあたって、緊急時にすぐに停止できる移動速度の限界がおよそ80cm/sとした。この速度をもとにしてこれらの速度を定義した。また、ロボットが3m直進し、その後その前進方向を左90度方向に回転させ、さらに3m直進した。この時のロボットと人間関係を調べた。このときの人間の速度は人間が普通に歩く速度とし30~50m/sとした。但し、すべての実験では人間が常にロボットの後方を追従することを前提と、途中で案内の障害となるものがなかったとする。

5.2 実験結果

実験結果を以下に示す。

5.2.1 後件部を速度とし簡略型推論法を用いた場合

ここでは直接法である簡略型推論法に基づいた軌道計画を用いて実験を行った。前件部は人間との距離とし、後件部には速度の操作量とする。前件部変数のメンバーシップ関数は図 5.1、後件部変数の実数値は図 5.2 とする。ロボットを 4m 直進する場合に人間がゆっくり歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.3 に、ロボットの移動速度を図 5.4 に示す。人間が普通に歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.5 に、ロボットの移動速度を図 5.6 に示す。人間が速く歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.7 に、ロボットの移動速度を図 5.8 に示す。人間が止まった場合のロボットと人間の軌道を図 5.9 に、ロボットの移動速度を図 5.10 に示す。また、ロボットが 3m 直進し、その後、前進方向を左 90 度方向に回転し、さらに 3m 直進した場合の回転前のロボットと人間の軌道を図 5.11、回転後のロボットと人間の軌道を図 5.12、ロボットの移動速度を図 5.13 に示す。

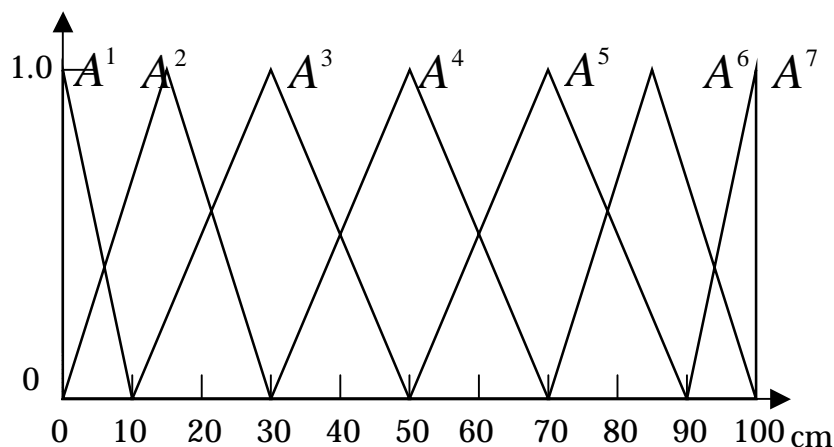


図 5.1 前件部のメンバーシップ関数

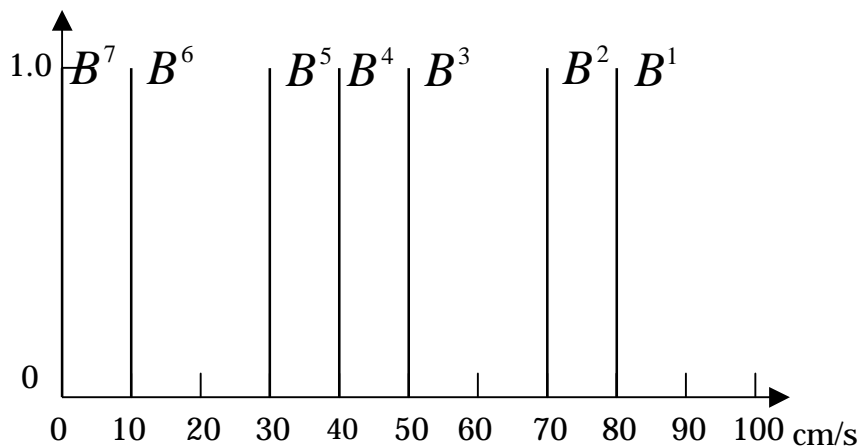


図 5.2 後件部の実数値

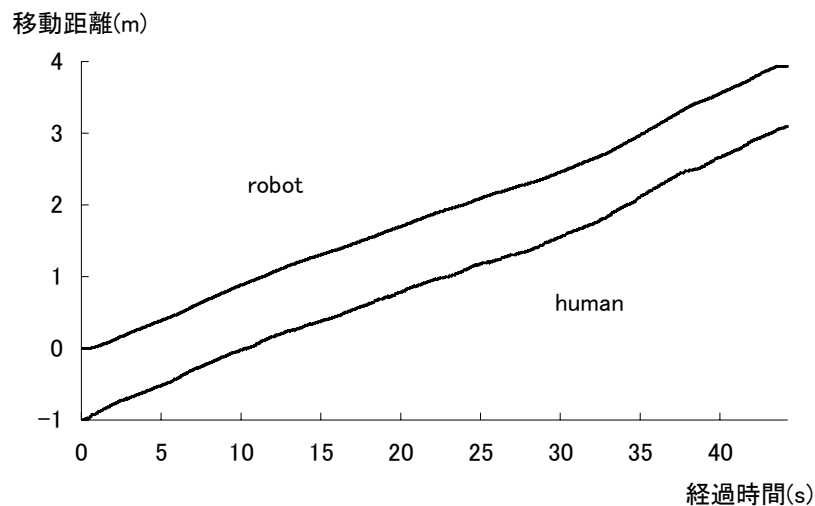


図 5.3 ロボットと人間の軌道

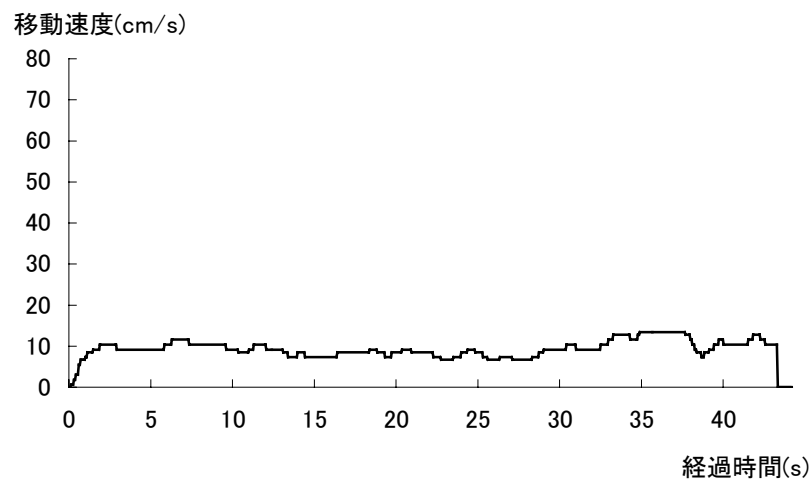


図 5.4 ロボットの移動速度

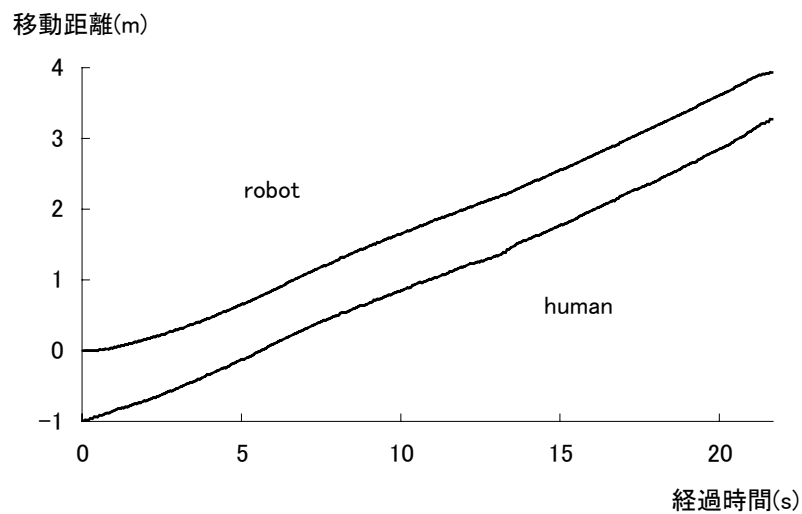


図 5.5 ロボットと人間の軌道

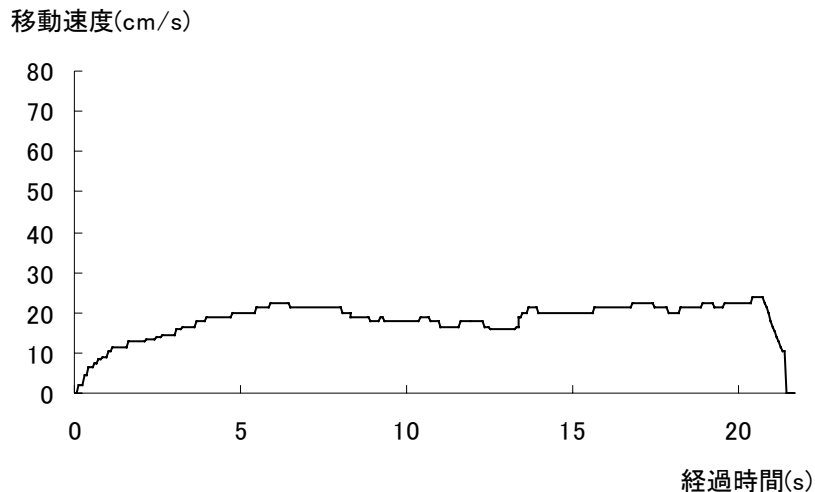


図 5.6 ロボットの移動速度

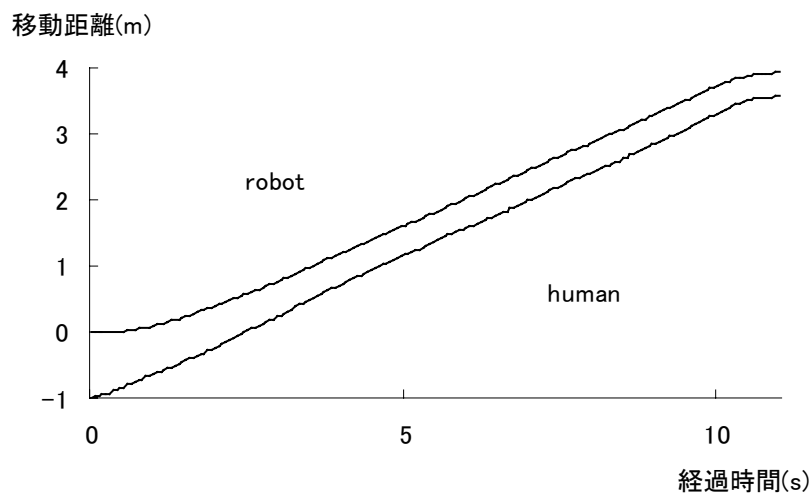


図 5.7 ロボットと人間の軌跡

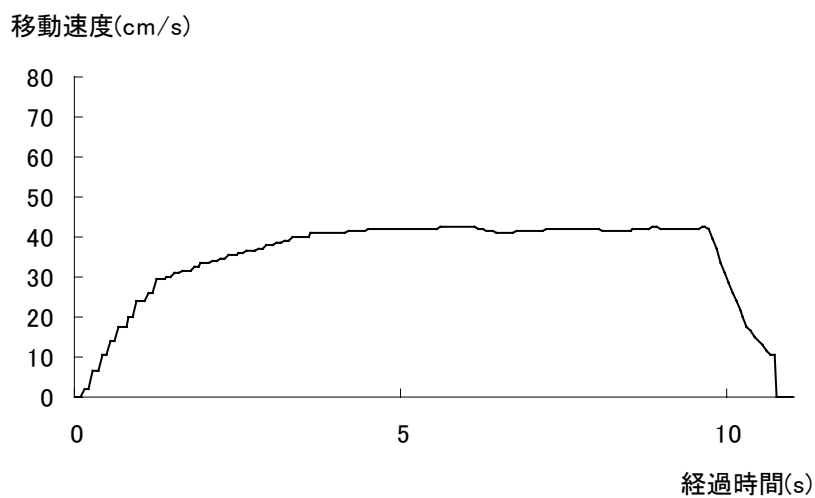


図 5.8 ロボットの移動速度

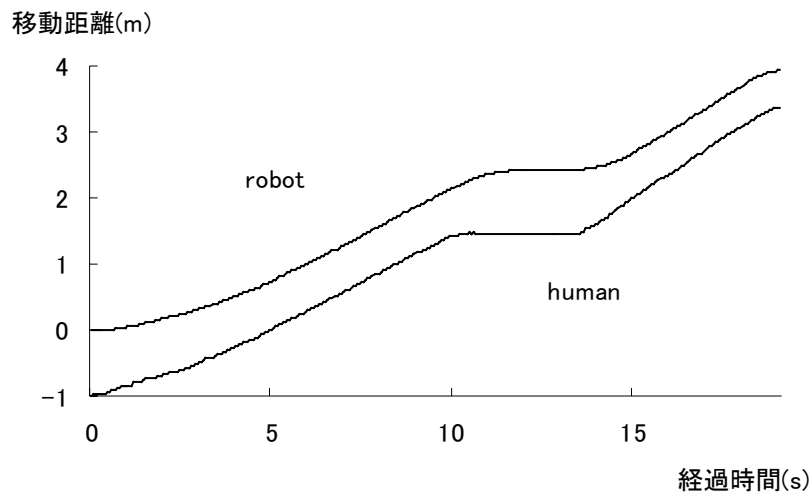


図 5.9 ロボットと人間の軌跡

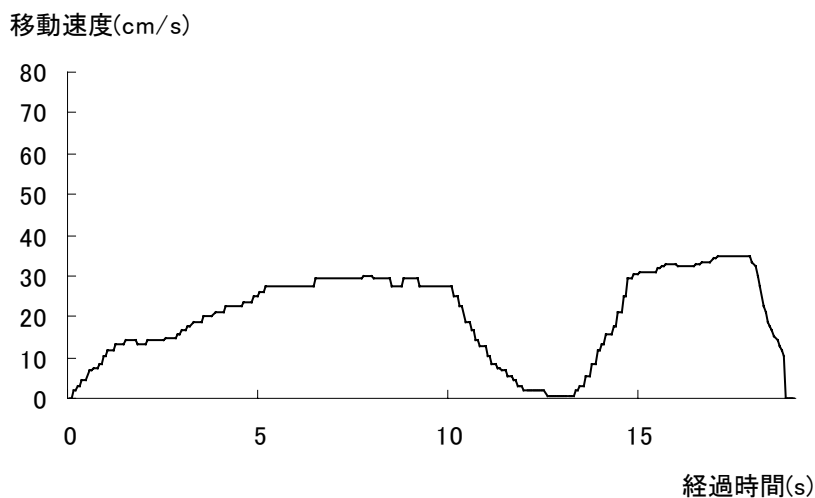


図 5.10 ロボットの移動速度

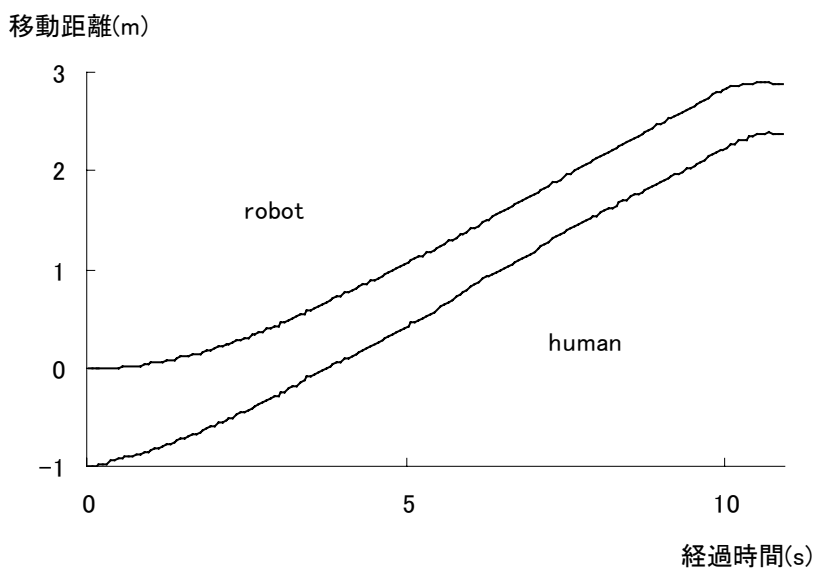


図 5.11 ロボットと人間の軌跡(回転前)

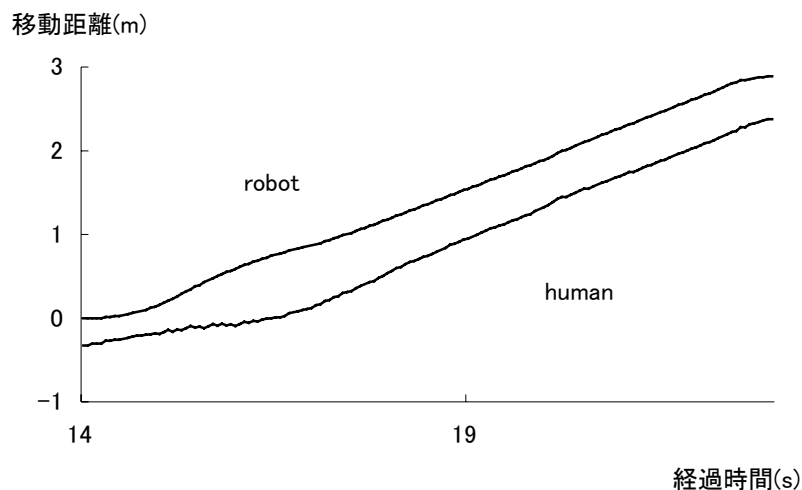


図 5.12 ロボットと人間の軌跡(回転後)

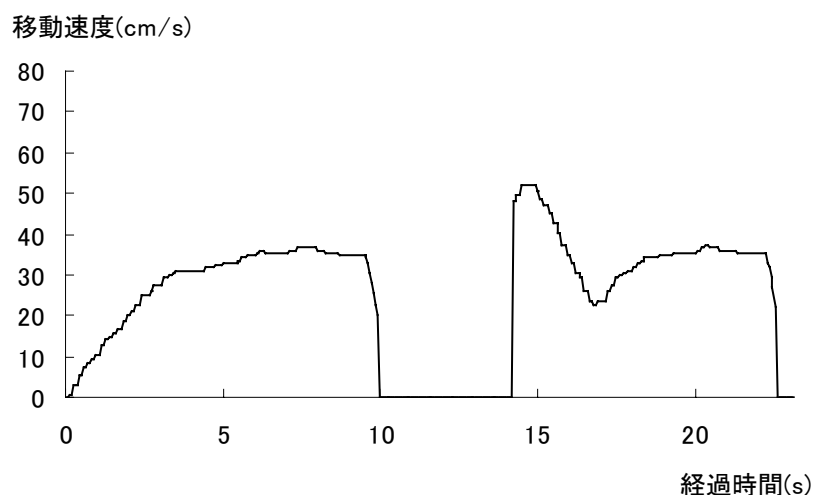


図 5.13 ロボットの移動速度

実験結果から以下のようなことがいえる。

-) 実験結果から従来の推論法でも言語変数の定量化次第で基本的な案内動作ができることがわかる。
-) 人間との距離によって速度を決定しているので、ロボットは人間の速度に応じた速度と距離で移動している。人間がゆっくり歩いた場合は、ロボットもゆっくりと移動し、人間との間の距離は長くなる。また、速く歩いた場合には、ロボットは早く移動し、人間との間の距離は短くなる。人間が止まった場合は、ロボットも止まる。この時人間との距離は必ず 1m 以上ある。これらはもとの推論規則からもわかる。
-) ロボットが回転した場合に回転直後に人間がロボットの後方に追従するが、この時に人間がロボットのすぐ後方につけることが多い。このため、図 5.13 に示すように回転後のロボット移動速度が局所的に大きくなる。

5.2.2 後件部を速度の変化量とし簡略型推論法を用いた場合

ここでは直接法である簡略型推論法に基づいた軌道計画を用いて実験を行った。前件部は人間との距離とし、後件部には速度の変化量とする。前件部変数のメンバーシップ関数は図 5.14、後件部変数の実数値は図 5.15 とする。ロボットを 4m 直進する場合に人間がゆっくり歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.16 に、ロボットの移動速度を図 5.17 に示す。人間が普通に歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.18 に、ロボットの移動速度を図 5.19 に示す。人間が速く歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.20 に、ロボットの移動速度を図 5.21 に示す。人間が止まった場合のロボットと人間の軌道を図 5.22 に、ロボットの移動速度を図 5.23 に示す。また、ロボットが 3m 直進し、その後、前進方向を左 90 度方向に回転し、さらに 3m 直進した場合の回転前のロボットと人間の軌道を図 5.24、回転後のロボットと人間の軌道を図 5.25、ロボットの移動速度を図 5.26 に示す。

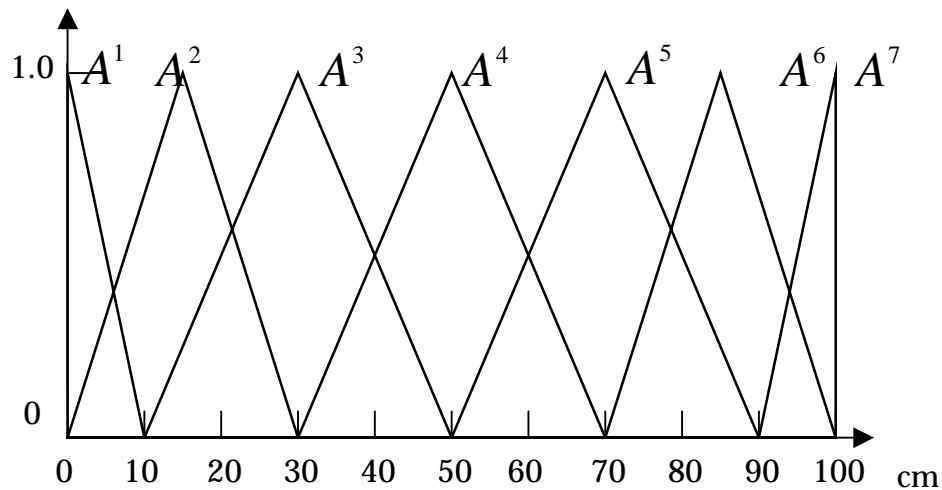


図 5.16 前件部のメンバーシップ関数

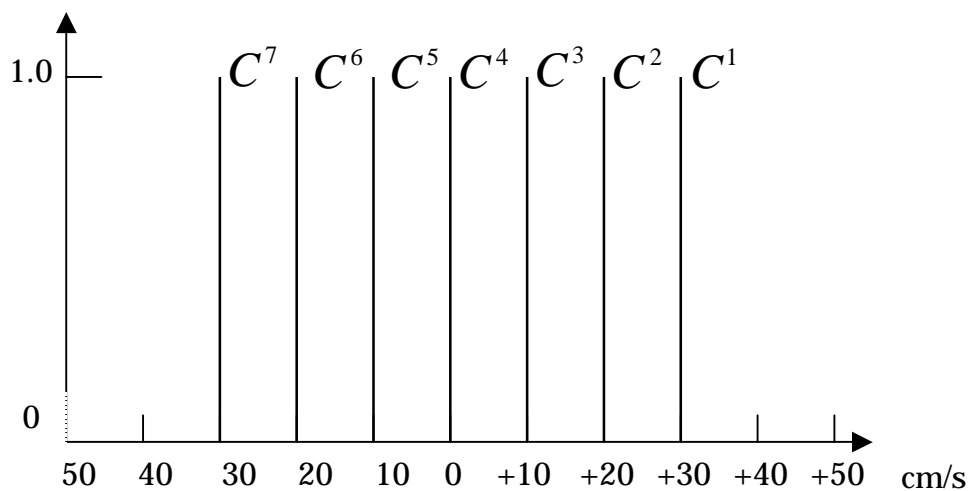


図 5.15 後件部の実数値

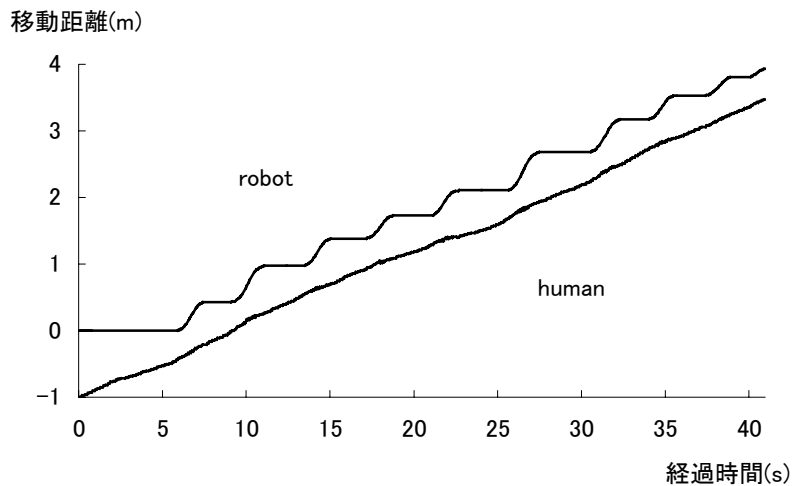


図 5.16 ロボットと人間の軌跡

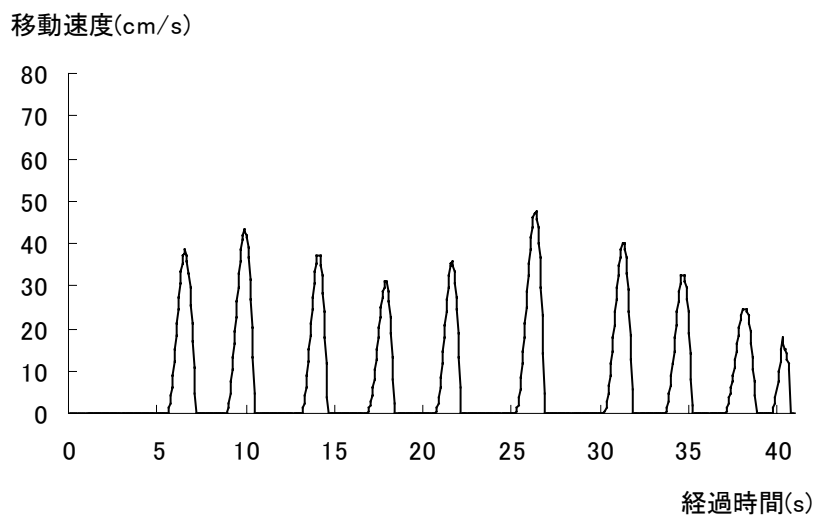


図 5.17 ロボットの移動速度

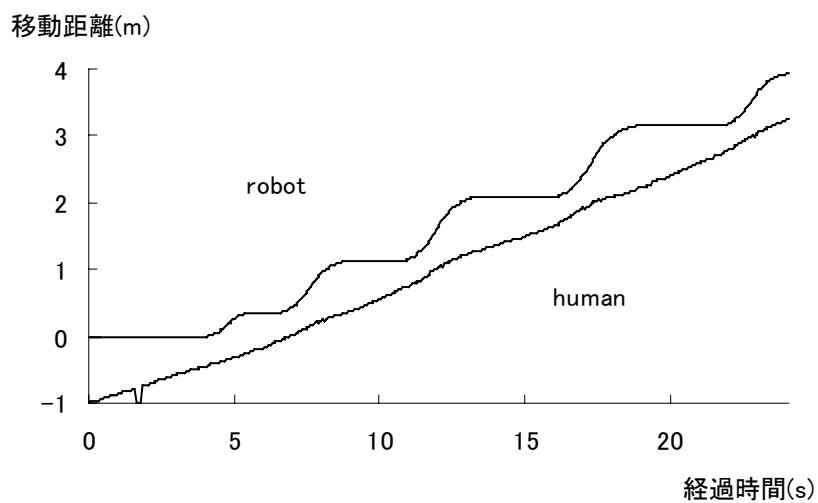


図 5.18 ロボットと人間の軌跡

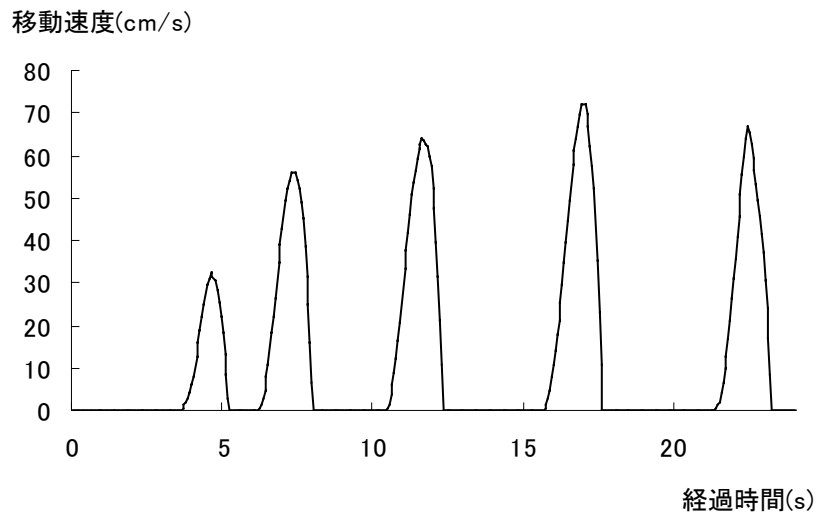


図 5.19 ロボットの移動速度

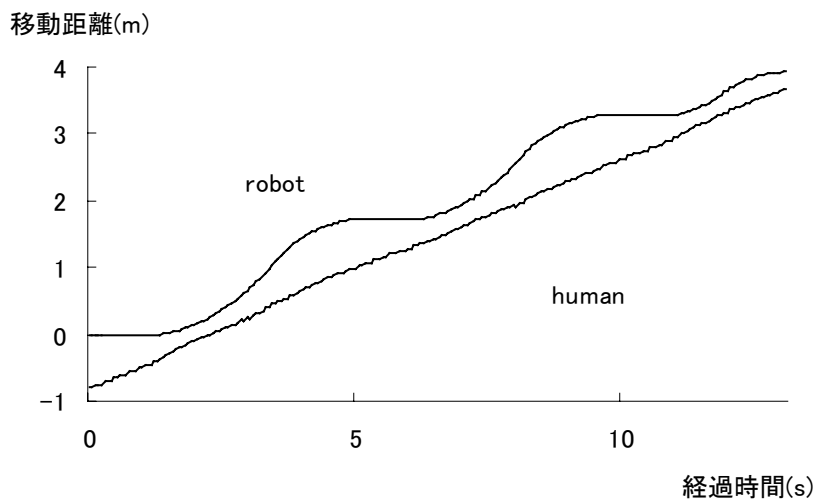


図 5.20 ロボットと人間の軌跡

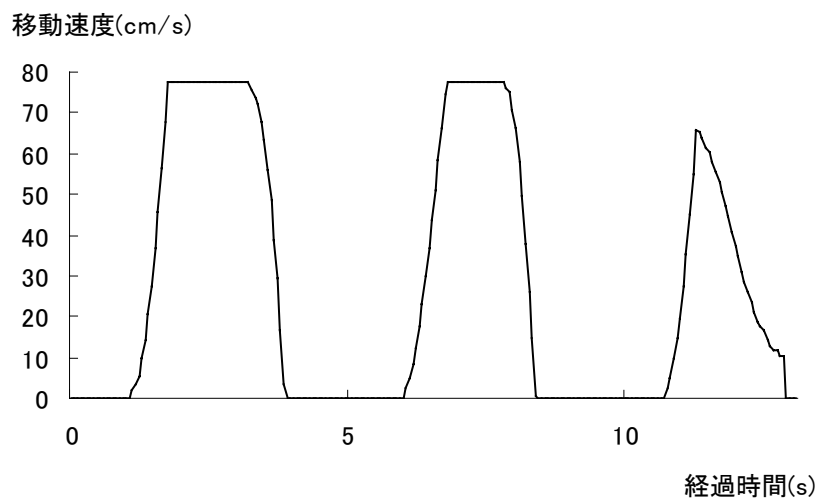


図 5.21 ロボットの速度

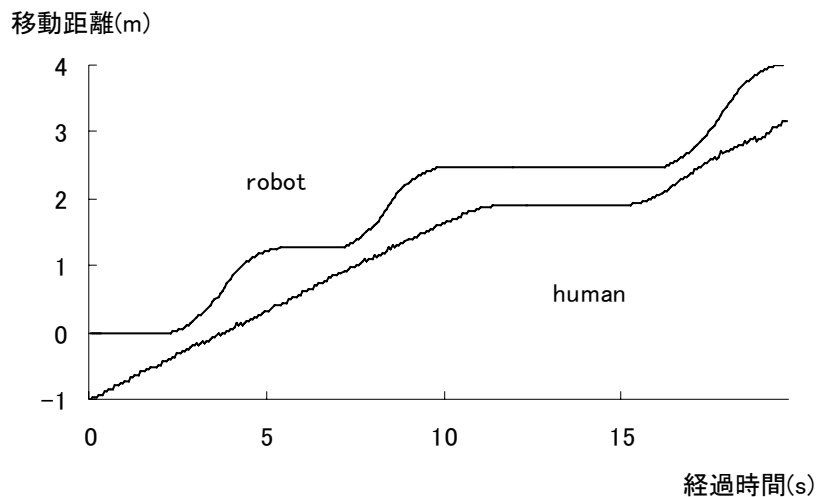


図 5.22 ロボットと人間の軌跡

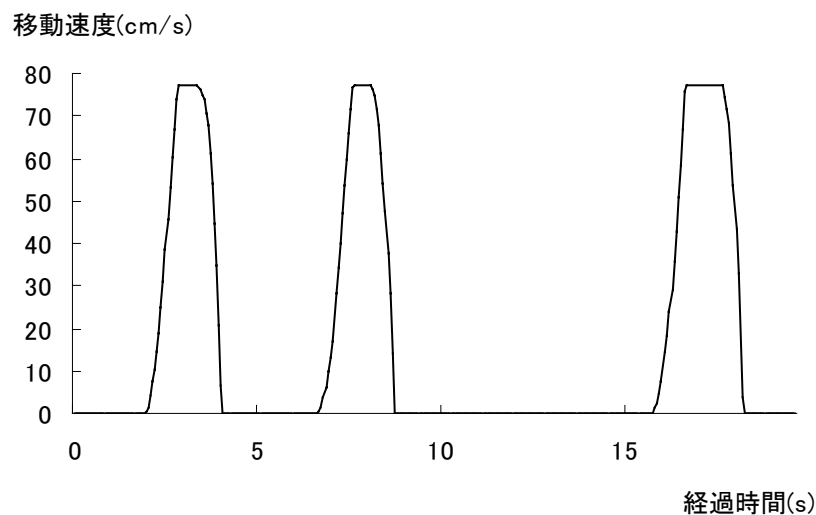


図 5.23 ロボットの移動速度

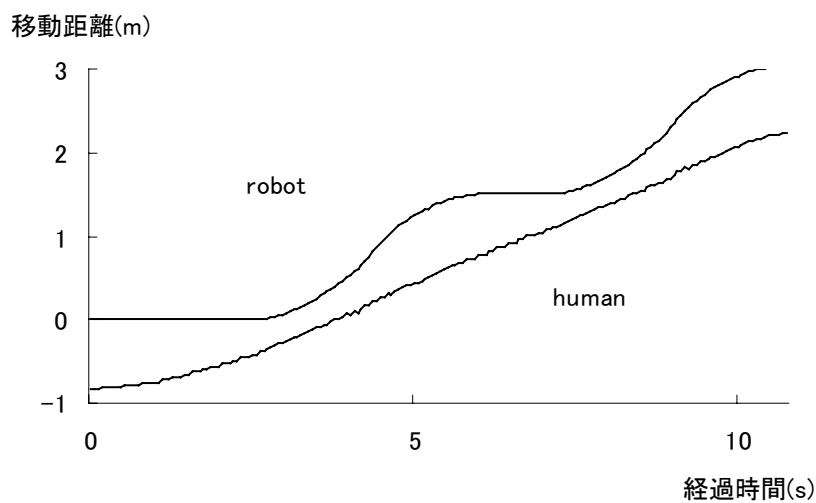


図 5.24 ロボットと人間の軌跡(回転前)

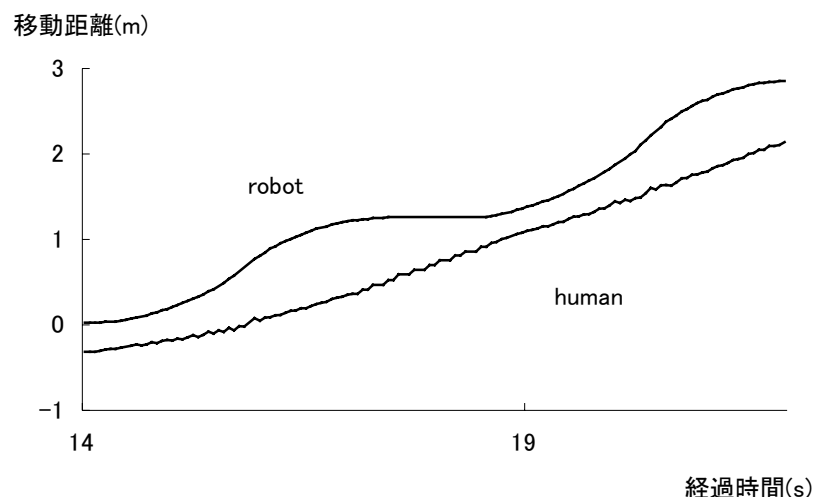


図 5.25 ロボットと人間の軌跡(回転後)

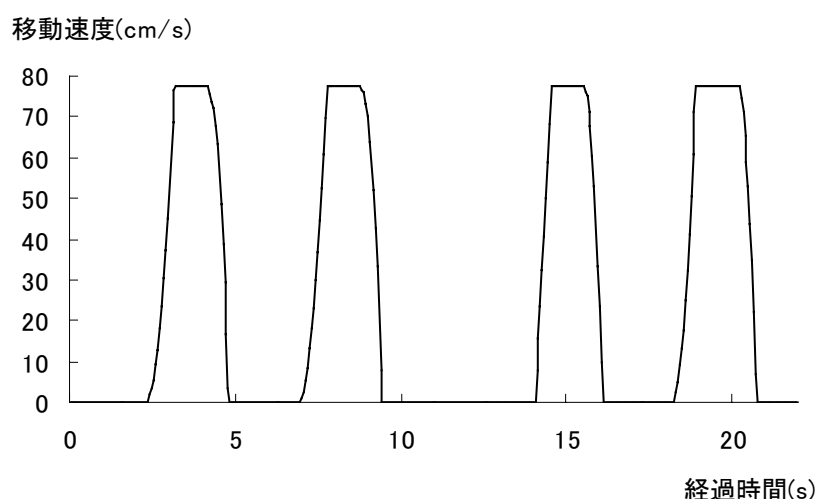


図 5.26 ロボットの移動速度

実験結果から以下のようなことがいえる。

-) 実験結果から後件部が速度の変化量の場合でも従来の推論法で基本的な案内動作ができることがわかる。
-) 5.2.1 の実験と違って人間との距離によって速度の変化量を決定しているので、ロボットは人間の速度に応じた速度と一定の距離で移動しようとする。ロボットは人間との距離がある一定の距離を越えて遠ざかると減速し、また、近づくと加速する。実験結果のようにロボットの動きが動作しては停止するといった動作現れたのは後件部の言語変数の定量化が不十分であるからだと考えられる。
-) 先ほど述べたようにロボットが回転した場合に回転直後に人間がロボットの後方に追従するが、この時に人間がロボットのすぐ後方につけることが多い。このため、5.2.1 の実験では図 5.13 で示すように回転後のロボット移動速度が局所的に大きくなった。しかし、図 5.26 に示すように後件部が速度の変化量であるのでこうした現象は抑えられている。

5.2.3 後件部を速度とし距離型ファジィ推論法を用いた場合

ここでは距離型ファジィ推論法に基づいた軌道計画を用いて実験を行った。前件部は人間との距離とし、後件部には速度の操作量とする。前件部変数のメンバーシップ関数は図 5.27、後件部変数の実数値は図 5.28 とする。ロボットを 4m 直進する場合に人間がゆっくり歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.29 に、ロボットの移動速度を図 5.30 に示す。人間が普通に歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.31 に、ロボットの移動速度を図 5.32 に示す。人間が速く歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.33 に、ロボットの移動速度を図 5.34 に示す。人間が止まった場合のロボットと人間の軌道を図 5.35 に、ロボットの移動速度を図 5.36 に示す。また、ロボットが 3m 直進し、その後、前進方向を左 90 度方向に回転し、さらに 3m 直進した場合の回転前のロボットと人間の軌道を図 5.37、回転後のロボットと人間の軌道を図 5.38、ロボットの移動速度を図 5.39 に示す。

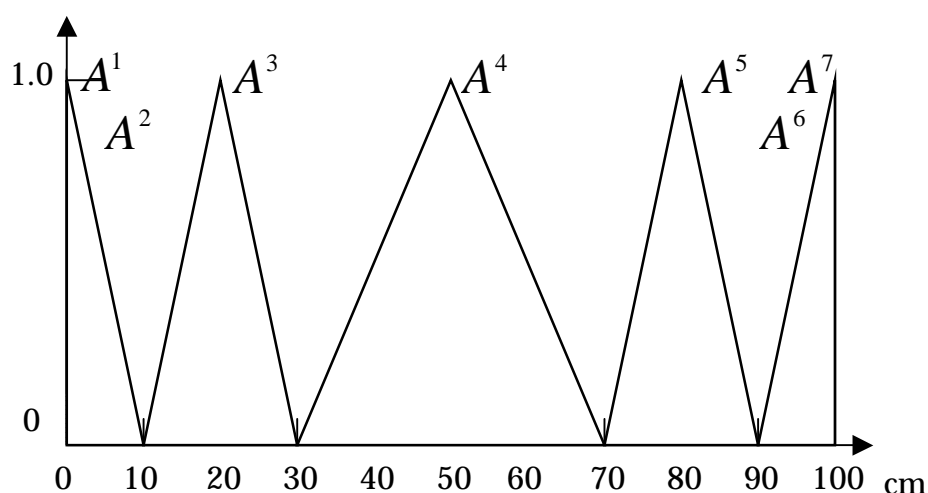


図 5.27 前件部のメンバーシップ関数

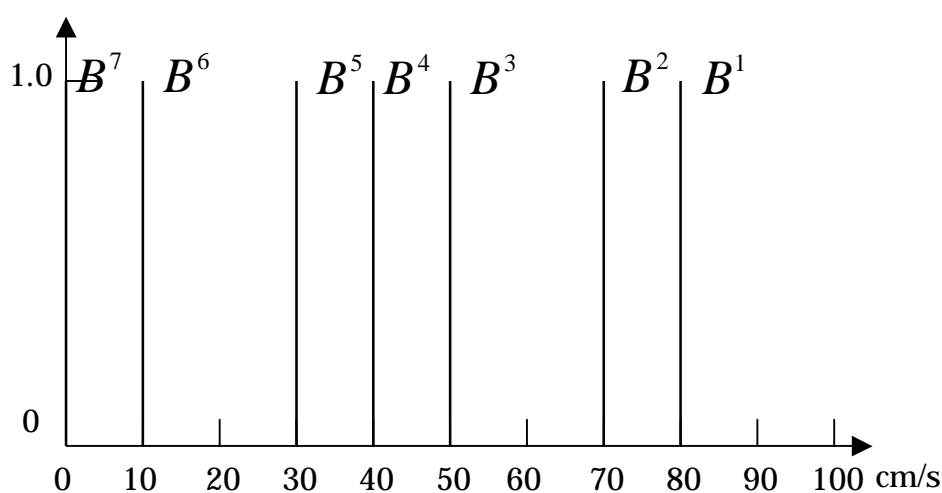


図 5.28 後件部の実数値

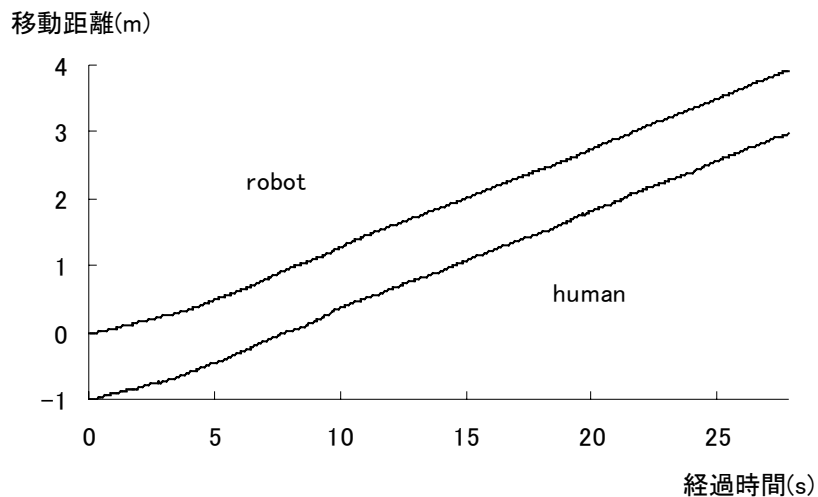


図 5.29 ロボットと人間の軌道

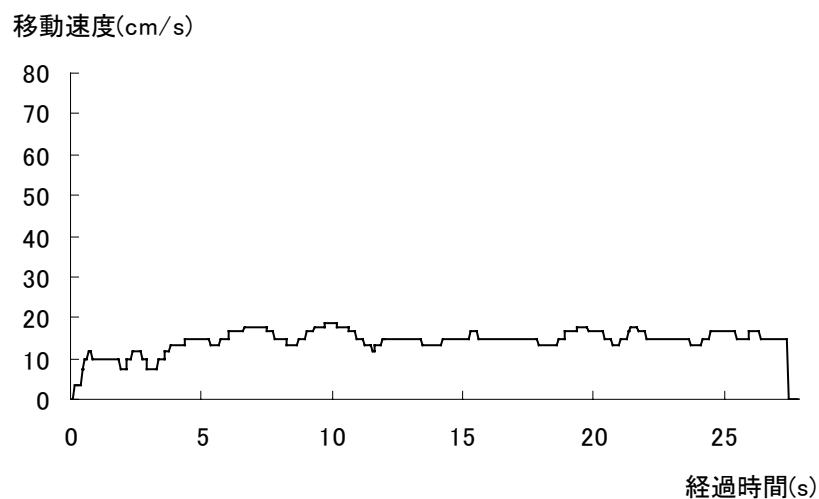


図 5.30 ロボットの移動速度

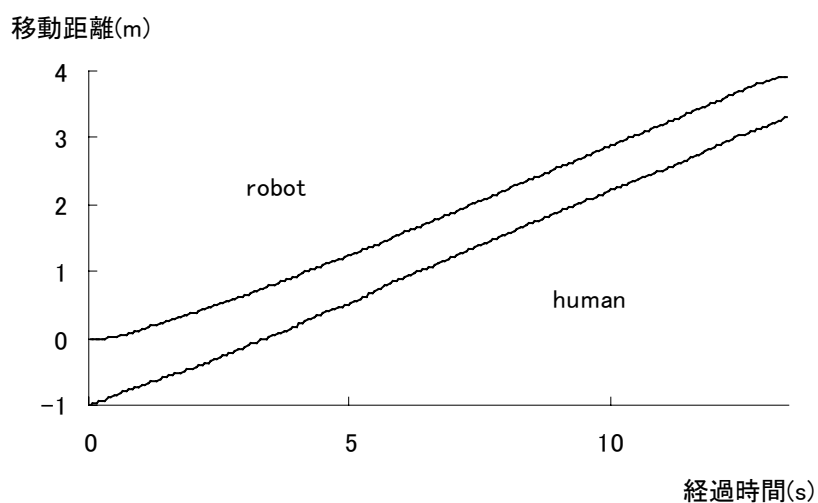


図 5.31 ロボットと人間の軌道

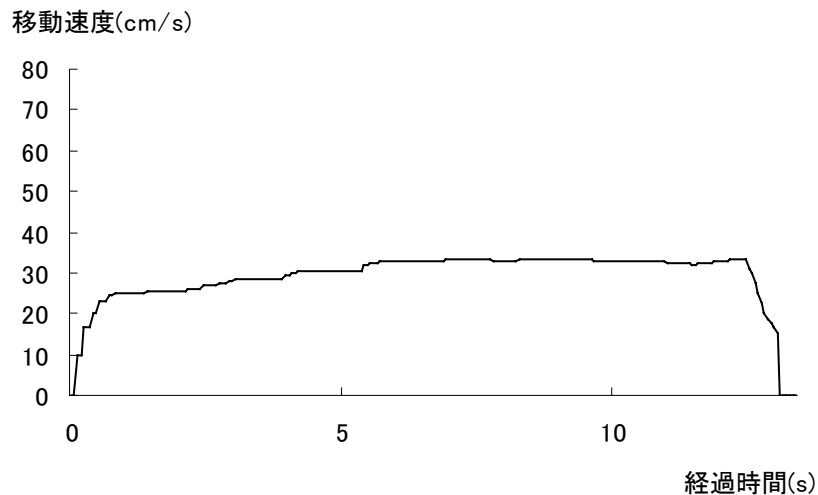


図 5.32 ロボットの移動速度

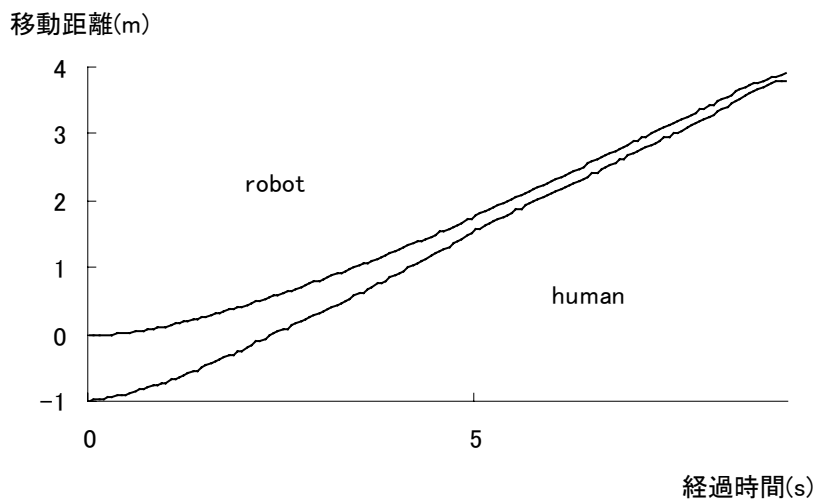


図 5.33 ロボットと人間の軌道

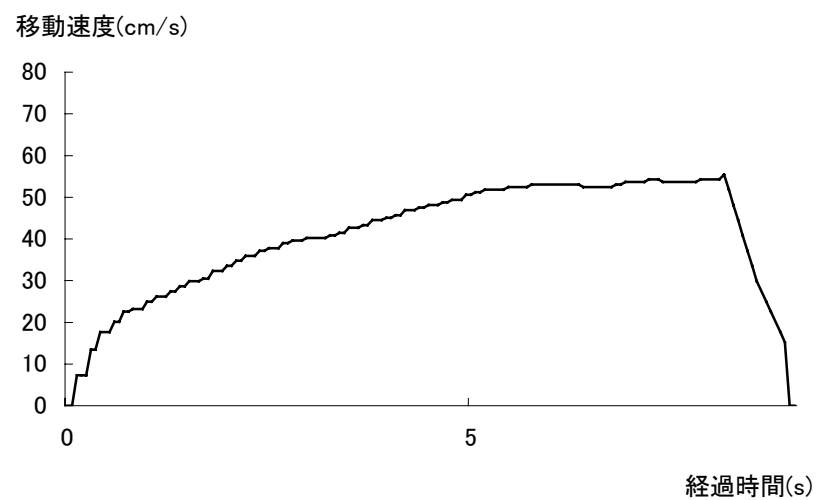


図 5.34 ロボットの移動速度

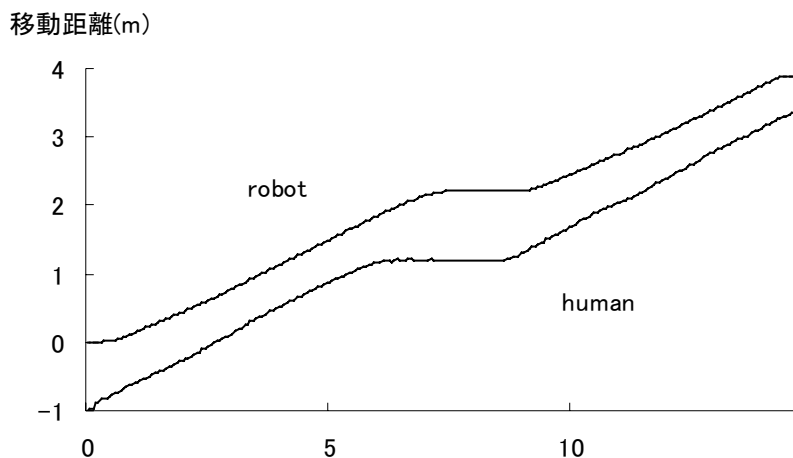


図 5.35 ロボットと人間の軌道

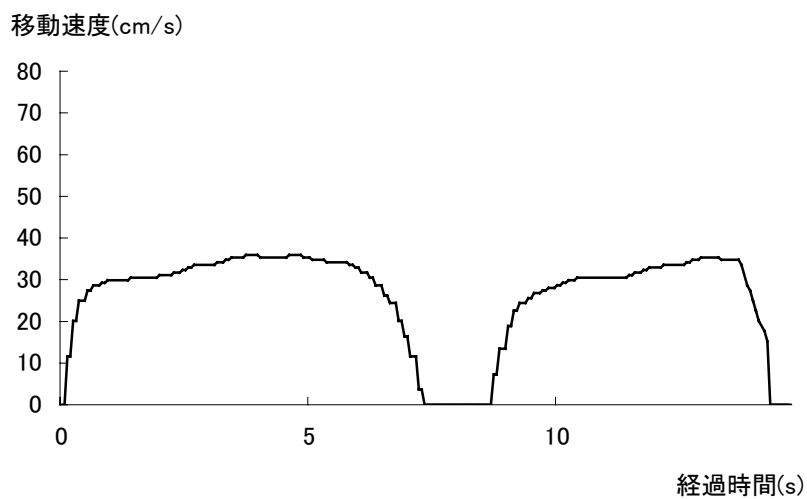


図 5.36 ロボットの移動速度

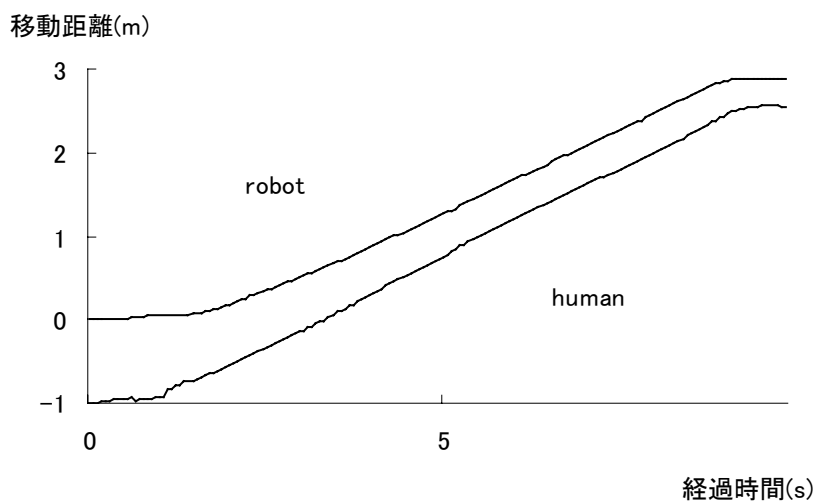


図 5.37 ロボットと人間の軌道(回転前)

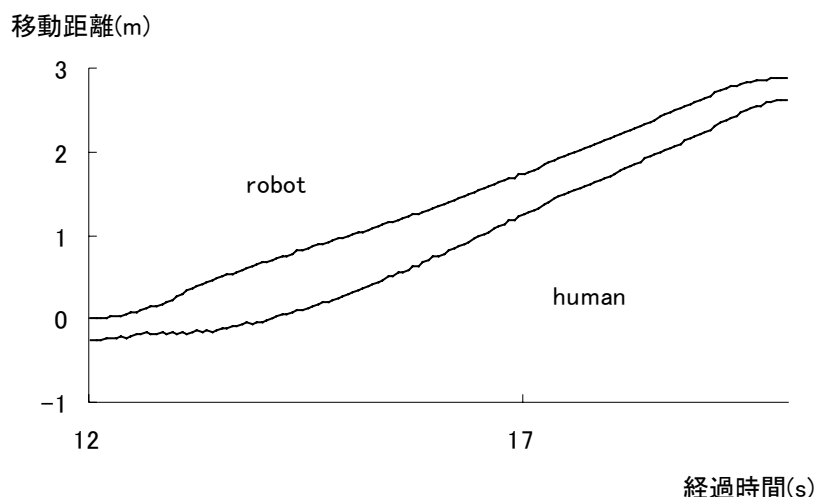


図 5.38 ロボットと人間の軌道(回転後)

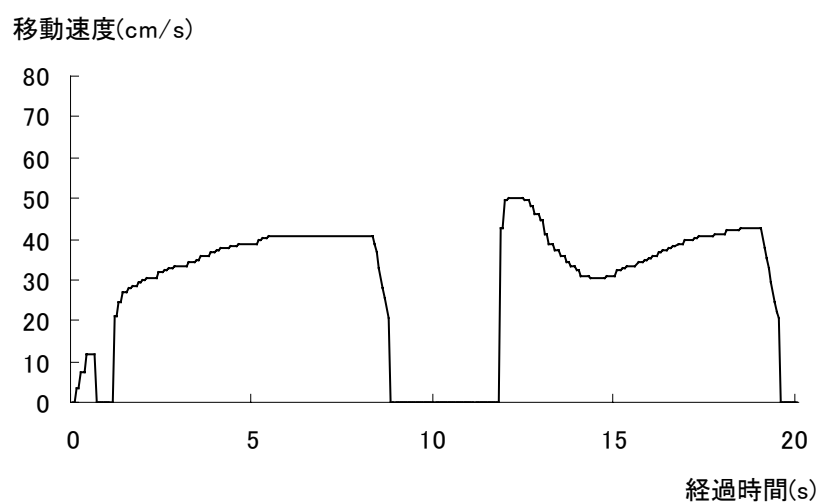


図 5.39 ロボットの移動速度

実験結果から以下のようなことがいえる。

-) 実験結果から距離型ファジィ推論法で基本的な案内動作ができることがわかる。推論規則が 5.2.1 の実験と同じであるので、実験結果は 5.2.1 とほぼ同じような結果になっている。
-) 前件部の言語変数にシングルトンを用いることである事実に対する軌道値を任意に決めることができる。
-) この実験で決めた前件部では適合度型の推論法では適切な推論結果は得られない。

5.2.4 後件部を速度の変化量とし距離型ファジィ推論法を用いた場合

ここでは距離型ファジィ推論法に基づいた軌道計画を用いて実験を行った。前件部は人間との距離とし、後件部には速度の変化量とする。前件部変数のメンバーシップ関数は図 5.40、後件部変数の実数値は図 5.41 とする。ロボットを 4m 直進する場合に人間がゆっくり歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.42 に、ロボットの移動速度を図 5.43 に示す。人間が普通に歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.44 に、ロボットの移動速度を図 5.45 に示す。人間が速く歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.46 に、ロボットの移動速度を図 5.47 に示す。人間が止まった場合のロボットと人間の軌道を図 5.48 に、ロボットの移動速度を図 5.49 に示す。また、ロボットが 3m 直進し、その後、前進方向を左 90 度方向に回転し、さらに 3m 直進した場合の回転前のロボットと人間の軌道を図 5.50、回転後のロボットと人間の軌道を図 5.51、ロボットの移動速度を図 5.52 に示す。

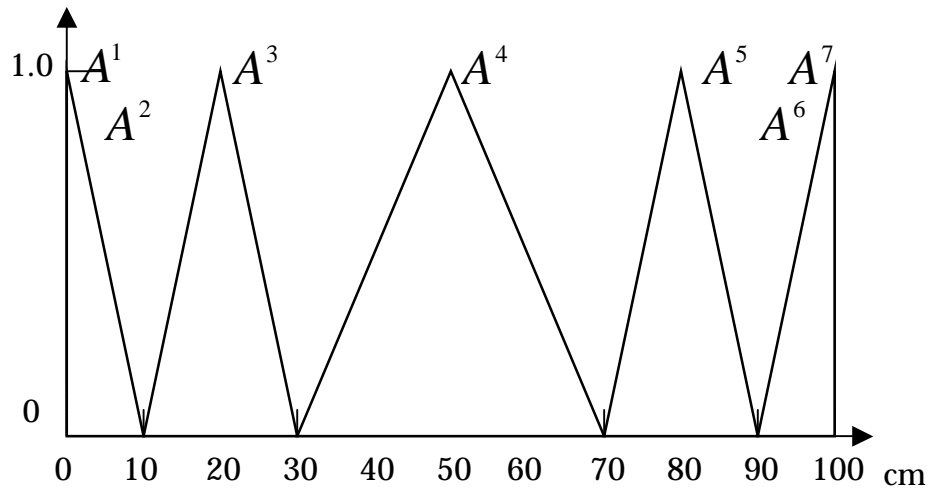


図 5.40 前件部のメンバーシップ関数

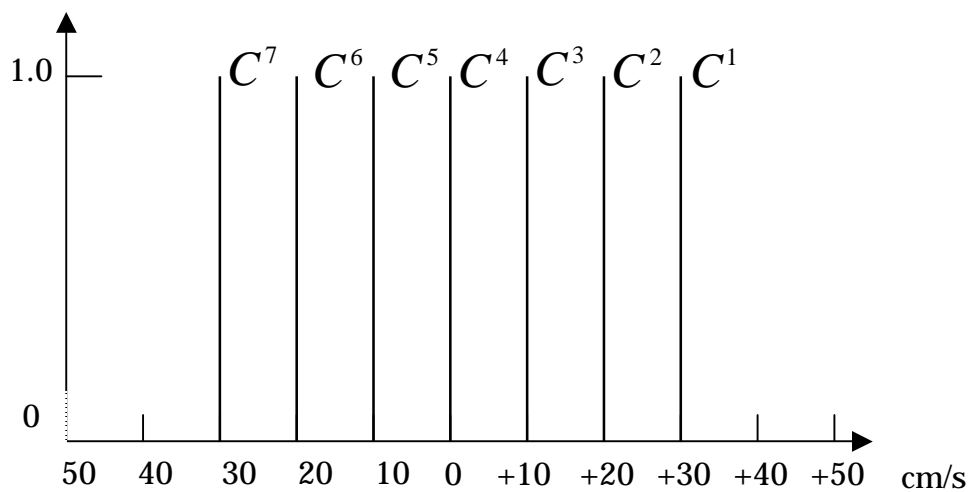


図 5.41 後件部の実数値

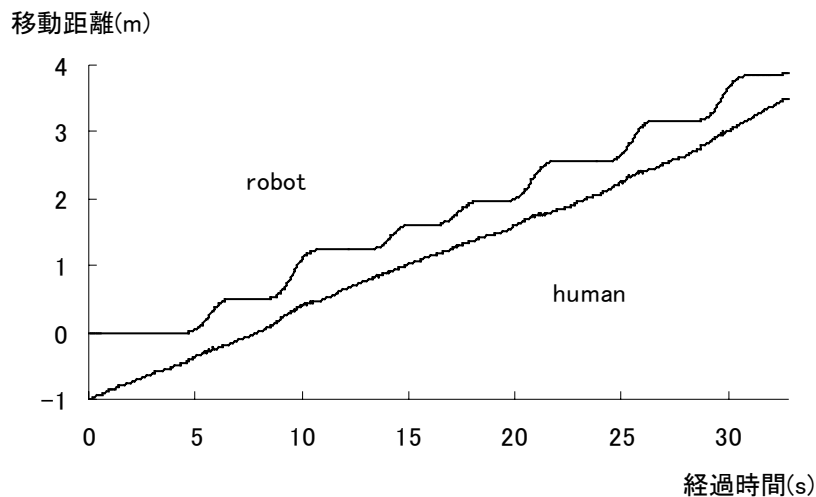


図 5.42 ロボットと人間の軌道

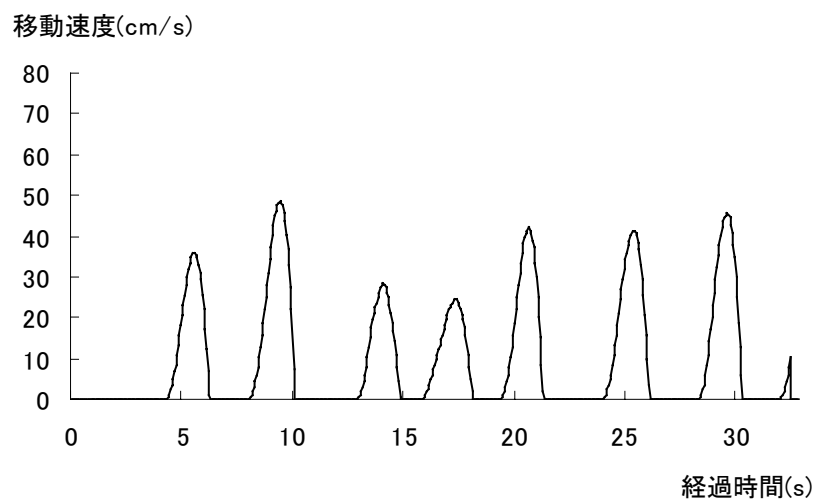


図 5.43 ロボットの移動速度

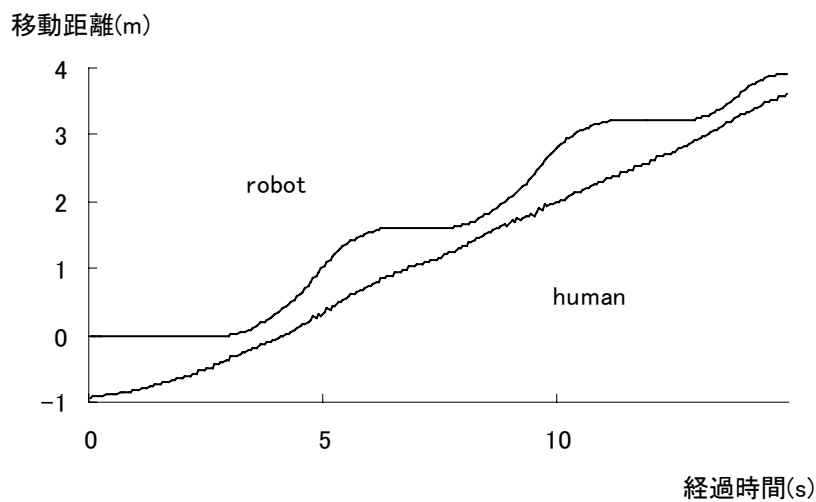


図 5.44 ロボットと人間の軌道

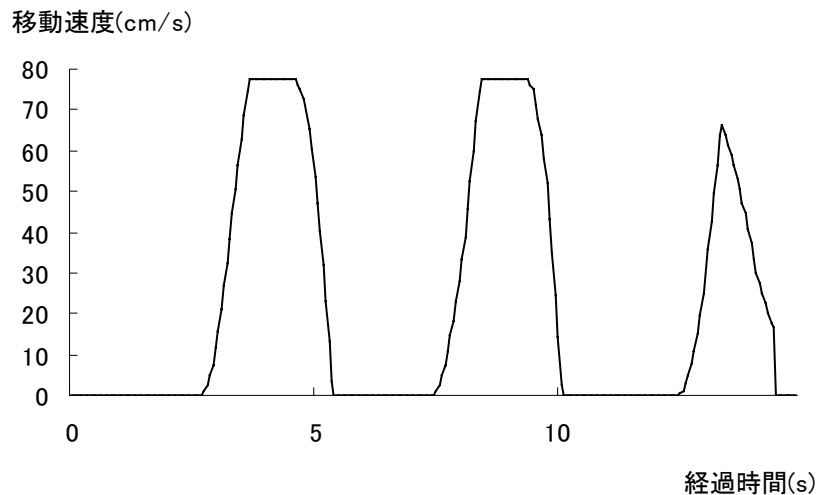


図 5.45 ロボットの移動速度

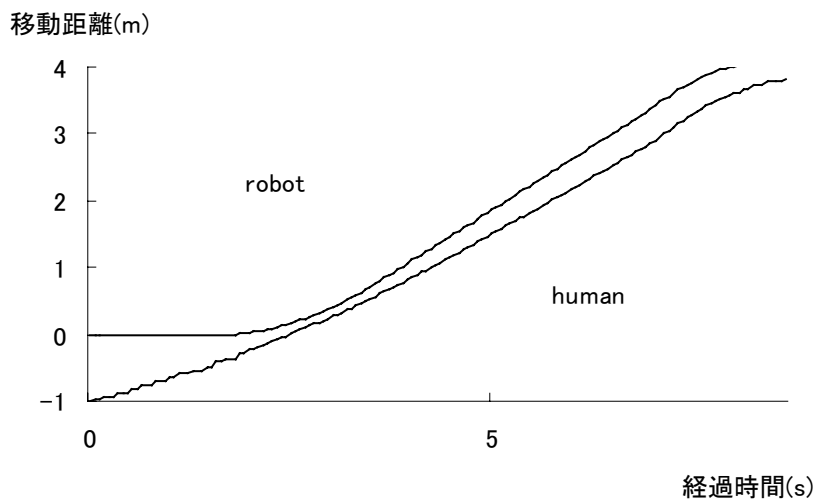


図 5.46 ロボットと人間の軌道

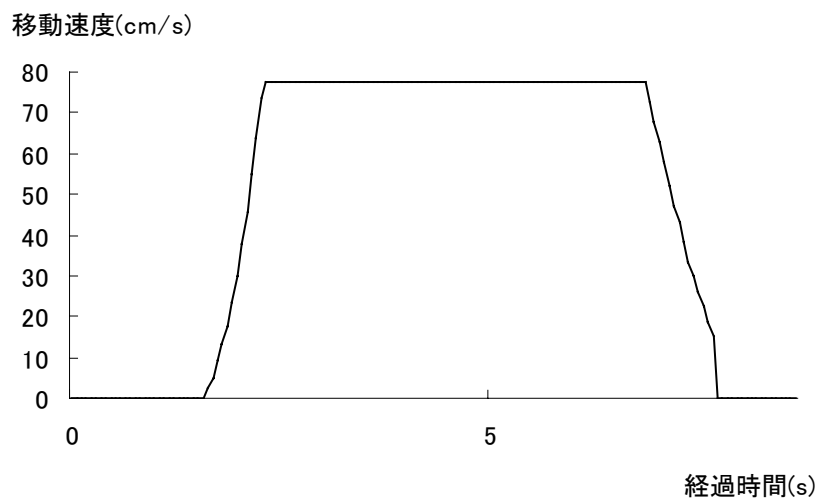


図 5.47 ロボットの移動速度

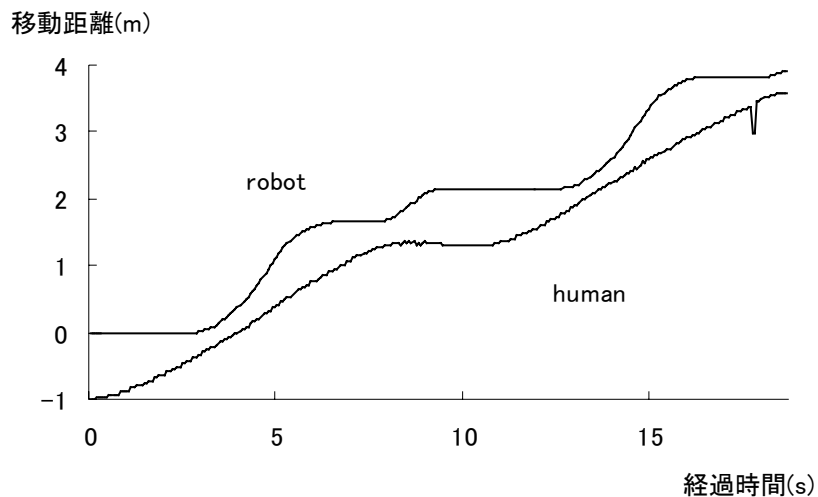


図 5.48 ロボットと人間の軌道

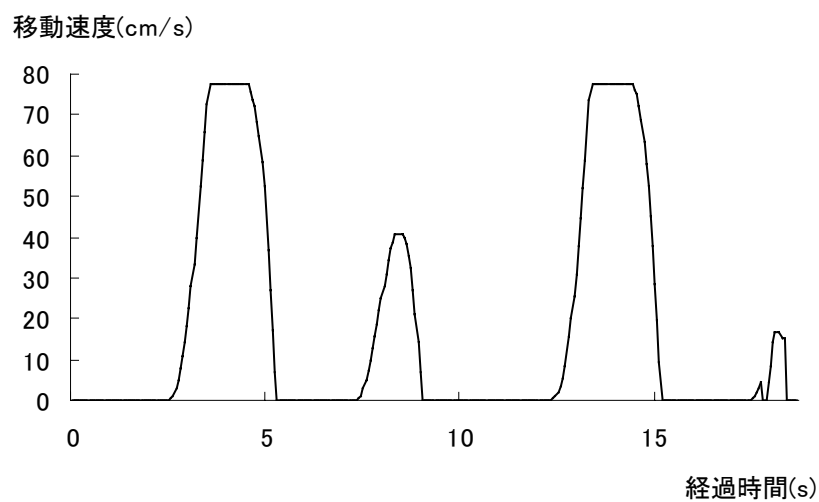


図 5.49 ロボットの移動速度

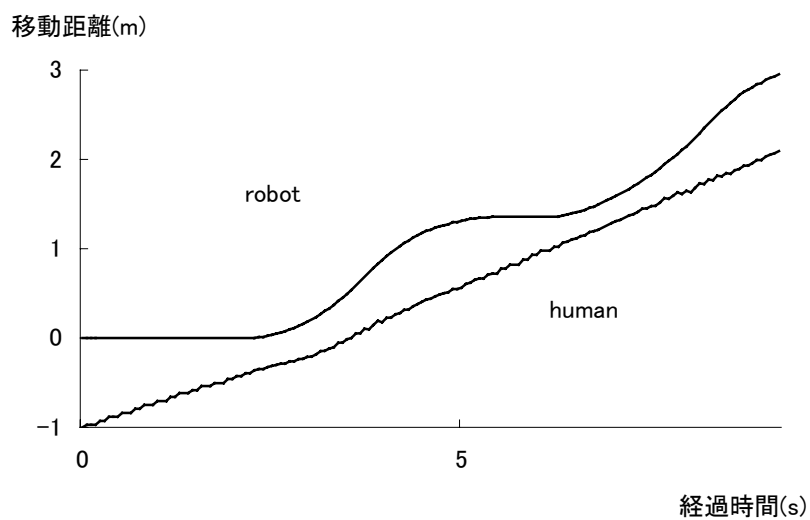


図 5.50 ロボットと人間の軌道(回転前)

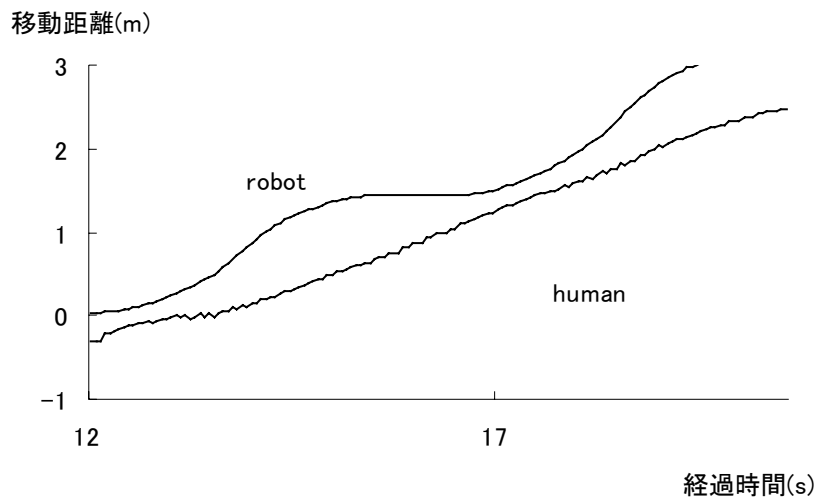


図 5.51 ロボットと人間の軌道(回転後)

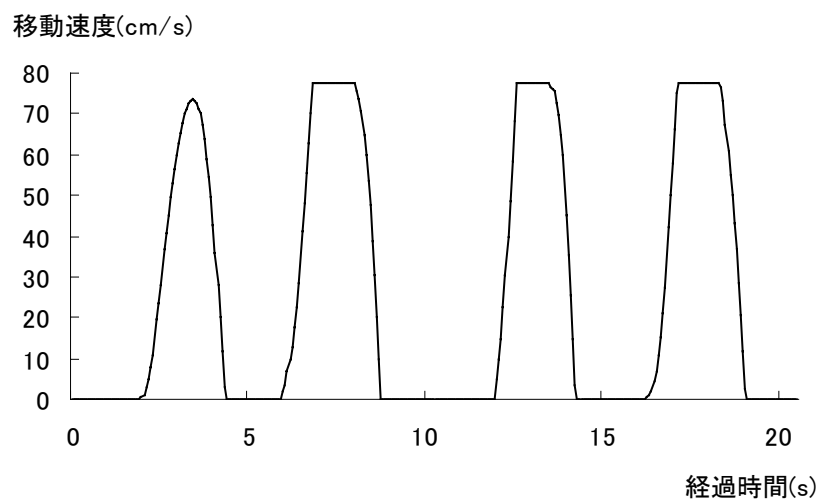


図 5.52 ロボットの移動速度

実験結果から以下のようなことがいえる。

-) 実験結果から後件部が速度の変化量でも距離型ファジィ推論法で基本的な案内動作ができることがわかる。推論規則が 5.2.2 の実験と同じであるので、実験結果は 5.2.2 とほぼ同じような結果になっている。
-) 5.2.3 の場合と同じように、この実験で決めた前件部では適合度型の推論法では適切な推論結果は得られない。

5.2.5 少ない推論規則で後件部を速度とし距離型ファジィ推論法を用いた場合

ここでは推論規則を少なくした距離型ファジィ推論法に基づいた軌道計画を用いて実験を行った。前件部は人間との距離とし、後件部には速度の操作量とする。前件部変数のメンバーシップ関数は図 5.53、後件部変数の実数値は図 5.54 とする。ロボットを 4m 直進する場合に人間がゆっくり歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.55 に、ロボットの移動速度を図 5.56 に示す。人間が普通に歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.57 に、ロボットの移動速度を図 5.58 に示す。人間が速く歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.59 に、ロボットの移動速度を図 5.60 に示す。人間が止まった場合のロボットと人間の軌道を図 5.61 に、ロボットの移動速度を図 5.62 に示す。また、ロボットが 3m 直進し、その後、前進方向を左 90 度方向に回転し、さらに 3m 直進した場合の回転前のロボットと人間の軌道を図 5.63、回転後のロボットと人間の軌道を図 5.64、ロボットの移動速度を図 5.65 に示す。

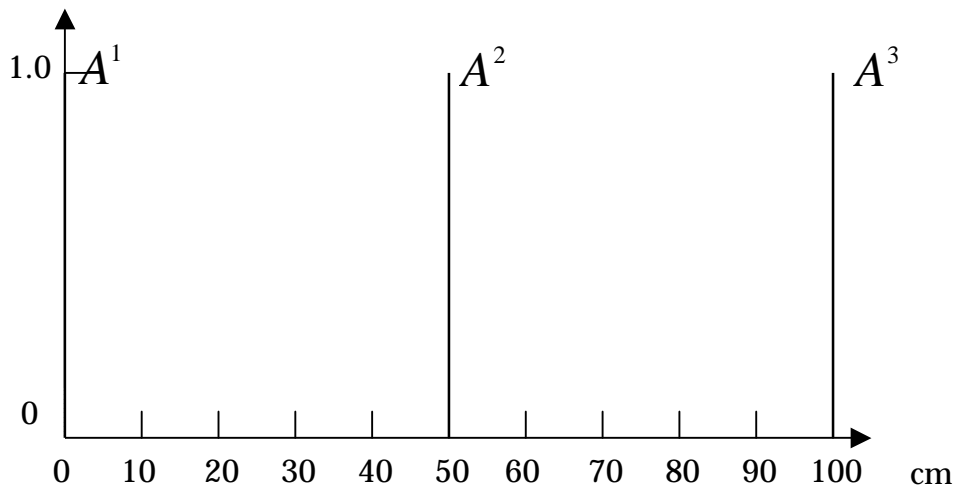


図 5.53 前件部のメンバーシップ関数

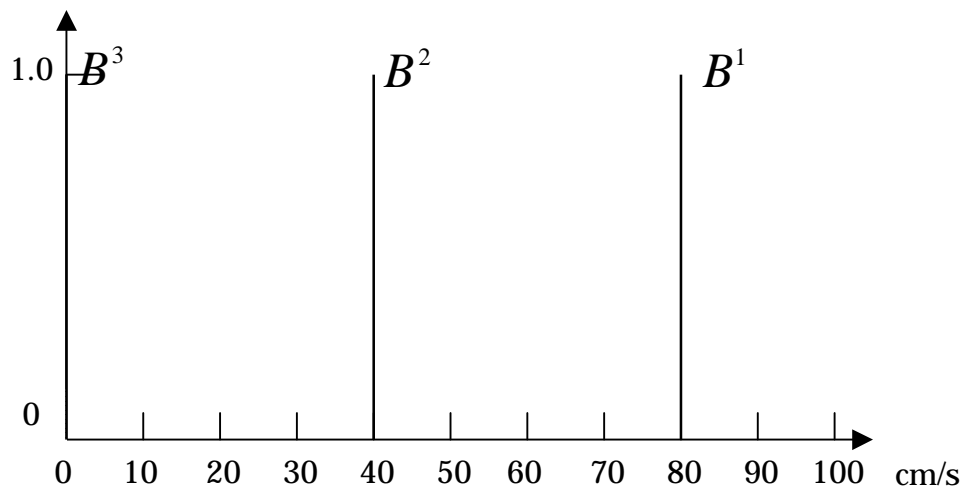


図 5.54 後件部の実数値

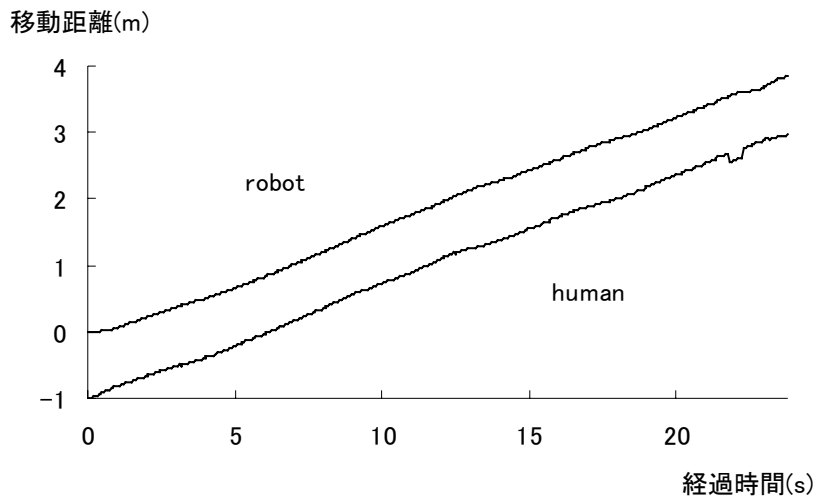


図 5.55 ロボットと人間の軌道

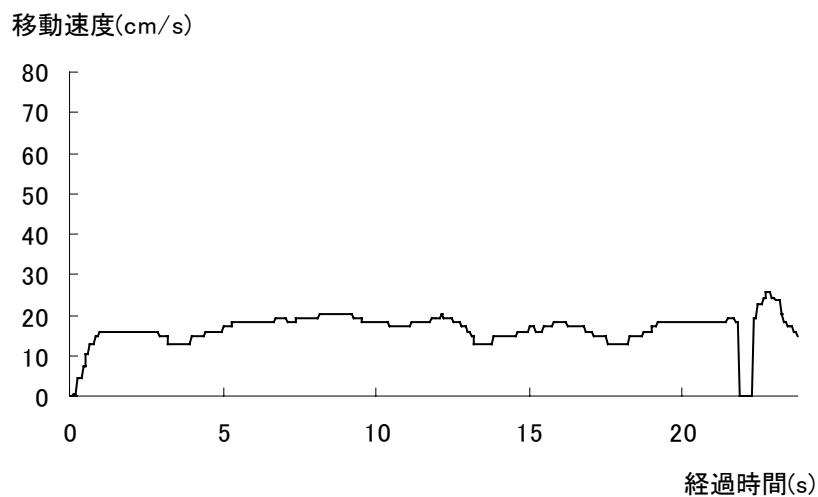


図 5.56 ロボットの移動速度

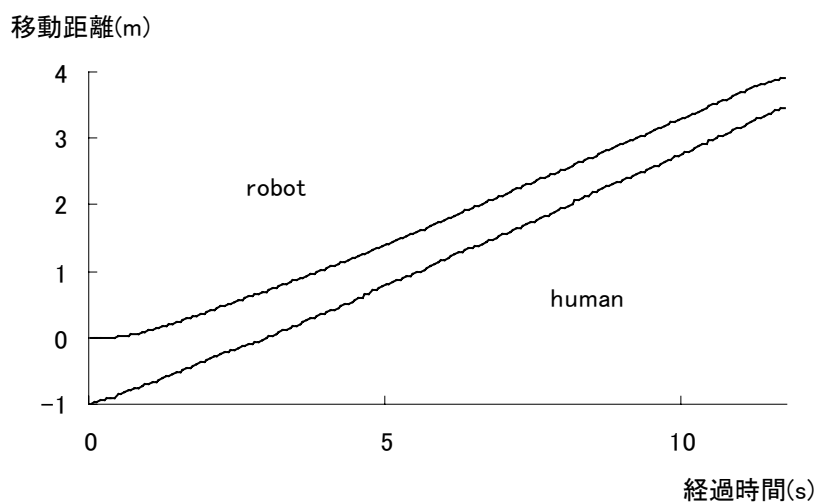


図 5.57 ロボットと人間の軌道

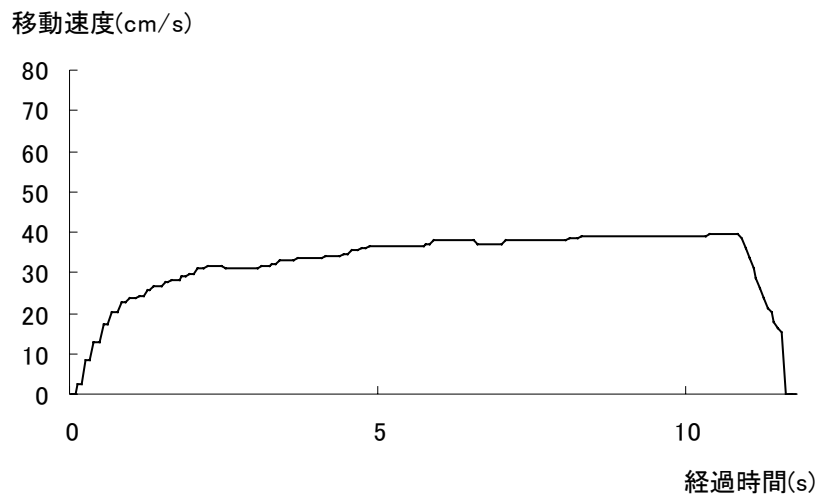


図 5.58 ロボットの移動速度

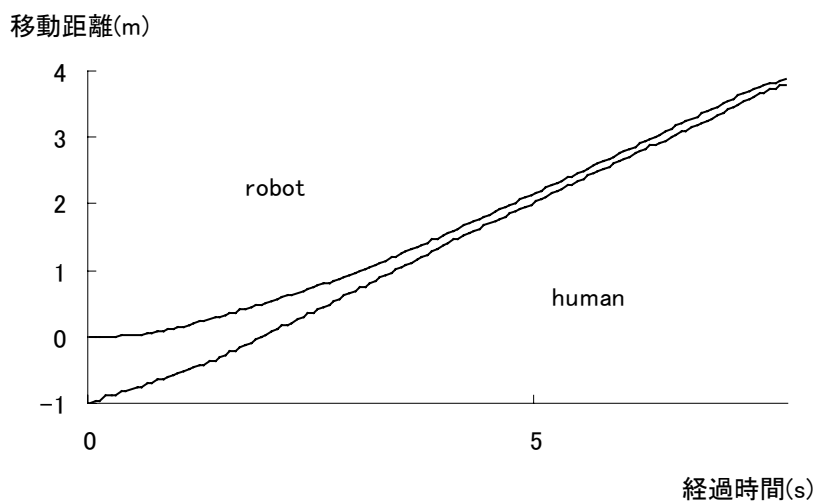


図 5.59 ロボットと人間の軌道

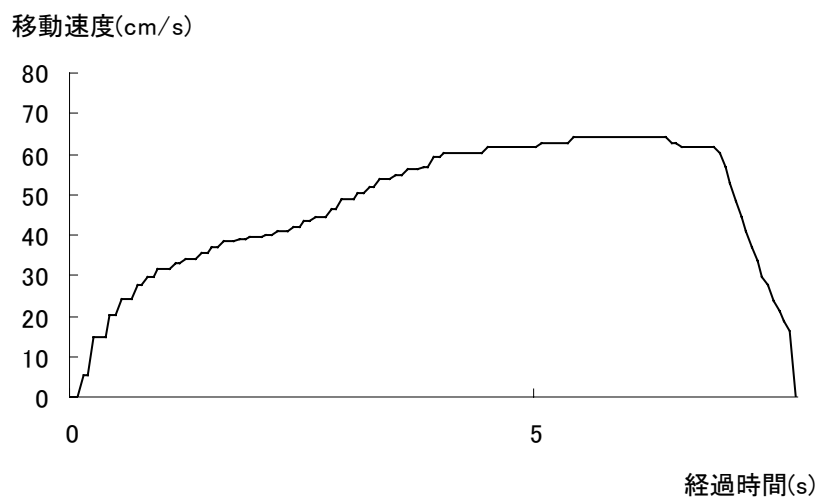


図 5.60 ロボットの移動速度

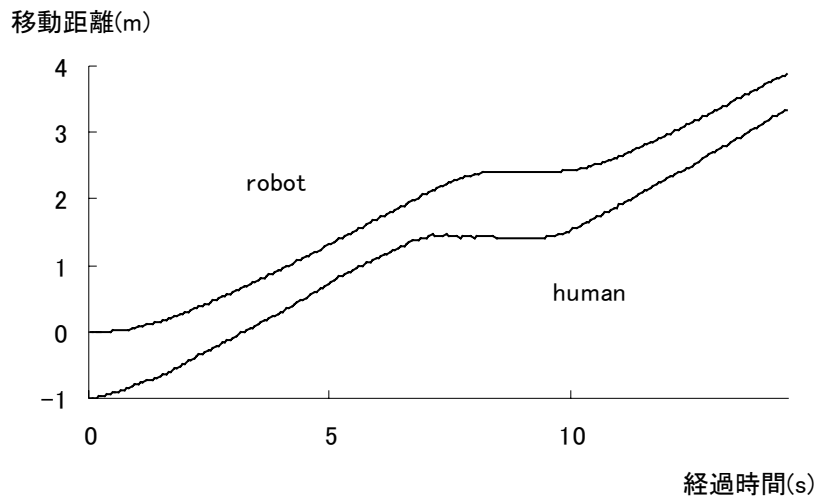


図 5.61 ロボットと人間の軌道

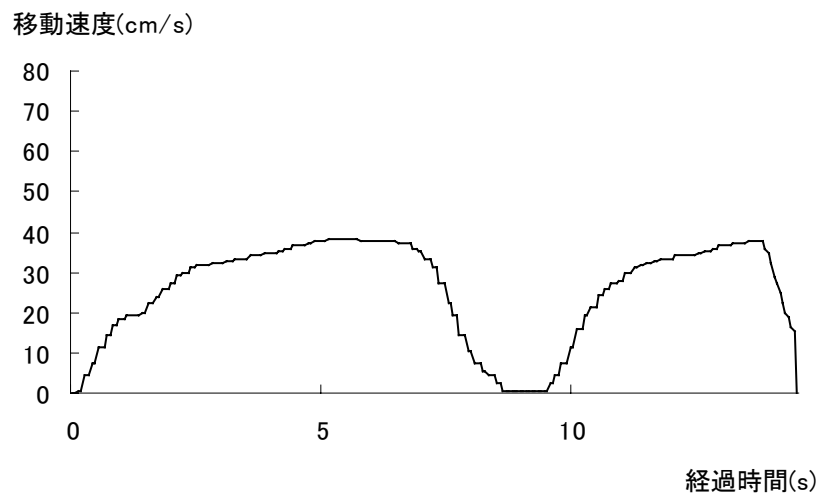


図 5.62 ロボットの移動速度

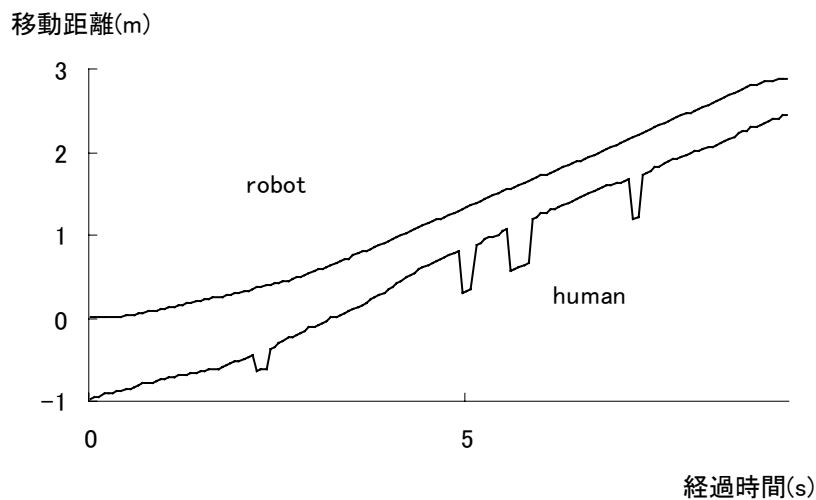


図 5.63 ロボットと人間の軌道(回転前)

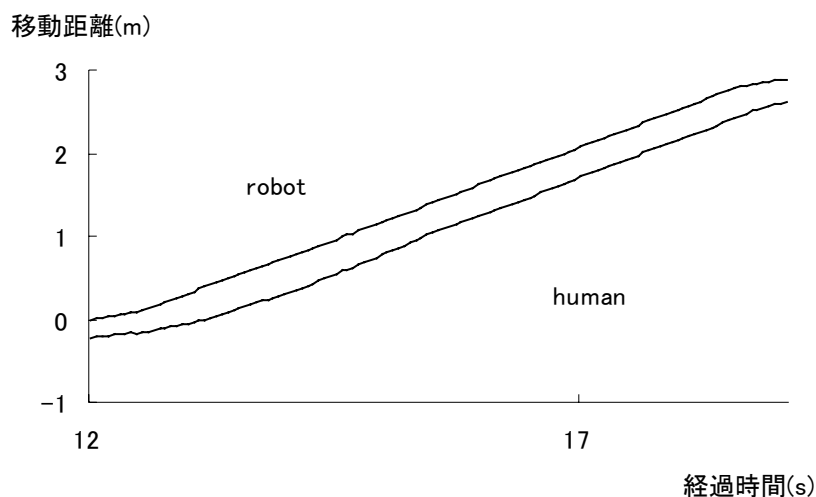


図 5.64 ロボットと人間の軌道(回転後)

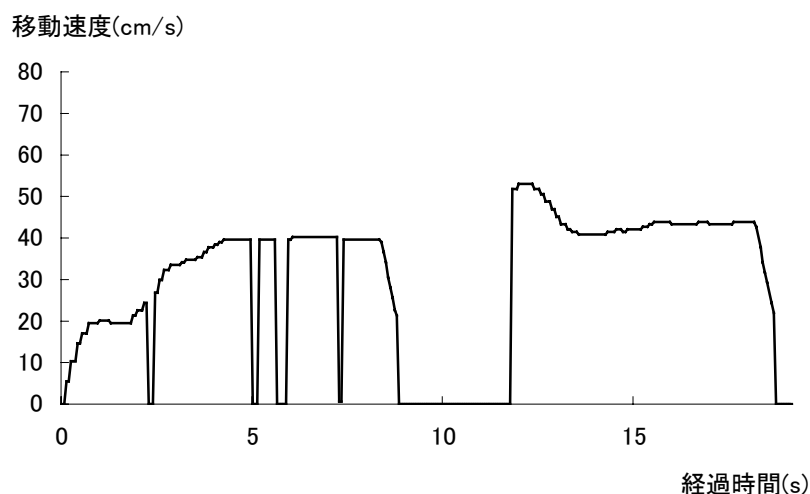


図 5.65 ロボットの移動速度

実験結果から以下のようなことがいえる。

-) 実験結果からより少ない推論規則でも言語変数の定量化次第で基本的な案内動作ができることがわかる。推論規則の構成が5.2.1の実験と同じであるので、実験結果は5.2.1とほぼ同じような結果になっている。この実験結果よりルールを追加することでより複雑な系が実現できる。
-) シングルトンのみで軌道計画を立てることができている。
-) この実験で決めた前件部では適合度型の推論法では適切な推論結果は得られない。

5.2.6 少ない推論規則で後件部を速度の変化量とし距離型ファジィ推論法を用いた場合

ここでは推論規則を少なくした距離型ファジィ推論法に基づいた軌道計画を用いて実験を行った。前件部は人間との距離とし、後件部には速度の変化量とする。前件部変数のメンバーシップ関数は図 5.66、後件部変数の実数値は図 5.67 とする。ロボットを 4m 直進する場合に人間がゆっくり歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.68 に、ロボットの移動速度を図 5.69 に示す。人間が普通に歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.70 に、ロボットの移動速度を図 5.71 に示す。人間が速く歩いた場合のロボットと人間の軌道を図 5.72 に、ロボットの移動速度を図 5.73 に示す。人間が止まった場合のロボットと人間の軌道を図 5.74 に、ロボットの移動速度を図 5.75 に示す。また、ロボットが 3m 直進し、その後、前進方向を左 90 度方向に回転し、さらに 3m 直進した場合の回転前のロボットと人間の軌道を図 5.76、回転後のロボットと人間の軌道を図 5.77、ロボットの移動速度を図 5.78 に示す。

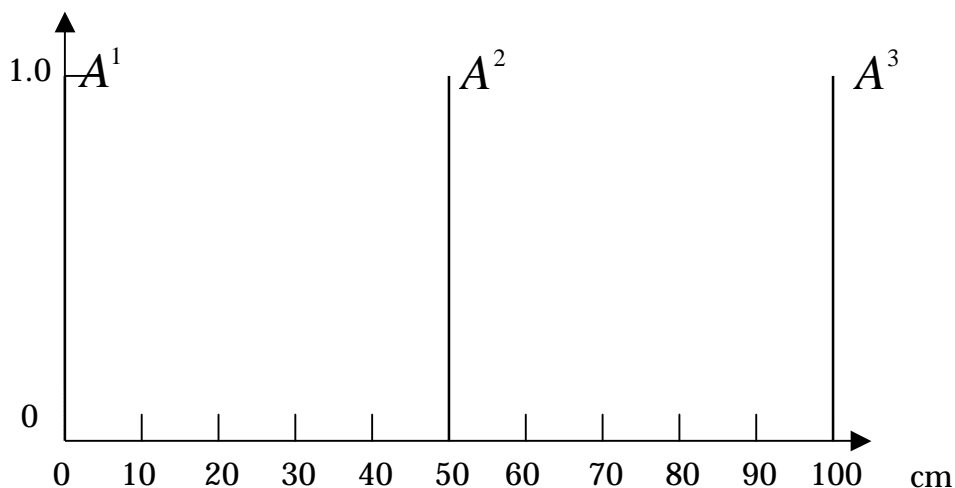


図 5.66 前件部のメンバーシップ関数

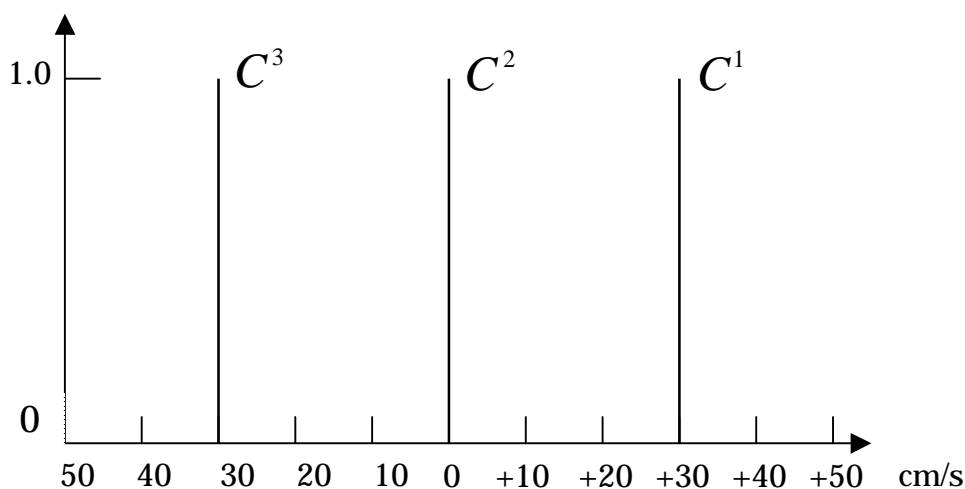


図 5.67 後件部の実数値

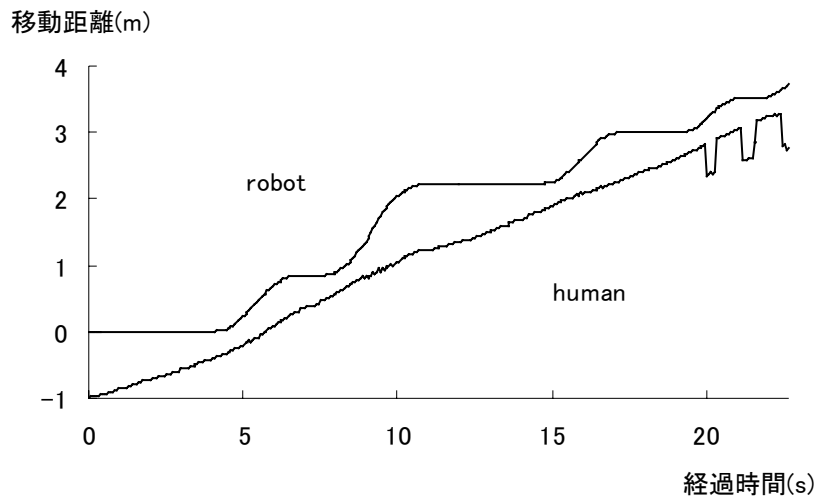


図 5.68 ロボットと人間の軌道

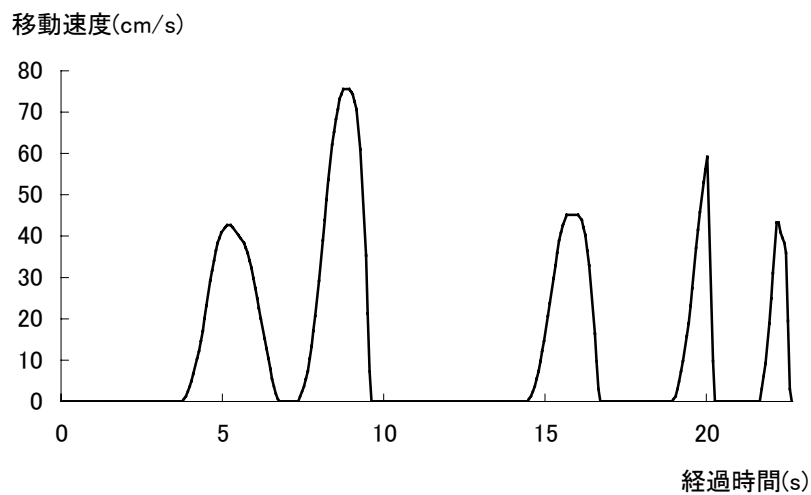


図 5.69 ロボットの移動速度

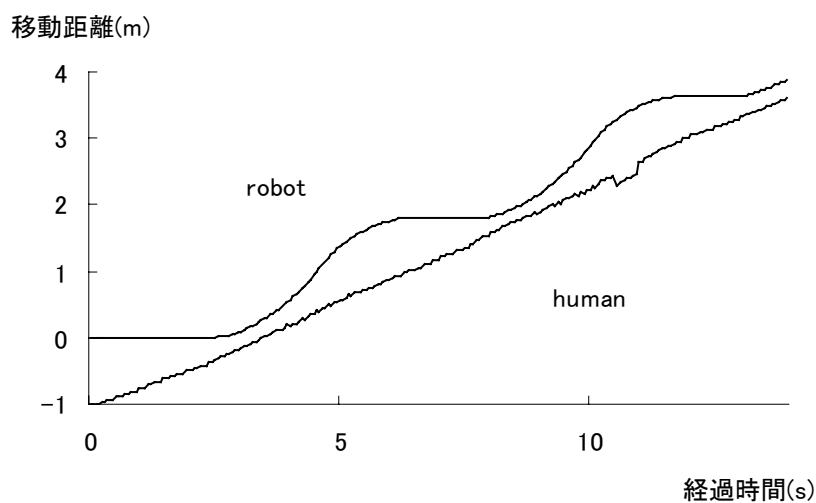


図 5.70 ロボットと人間の軌道

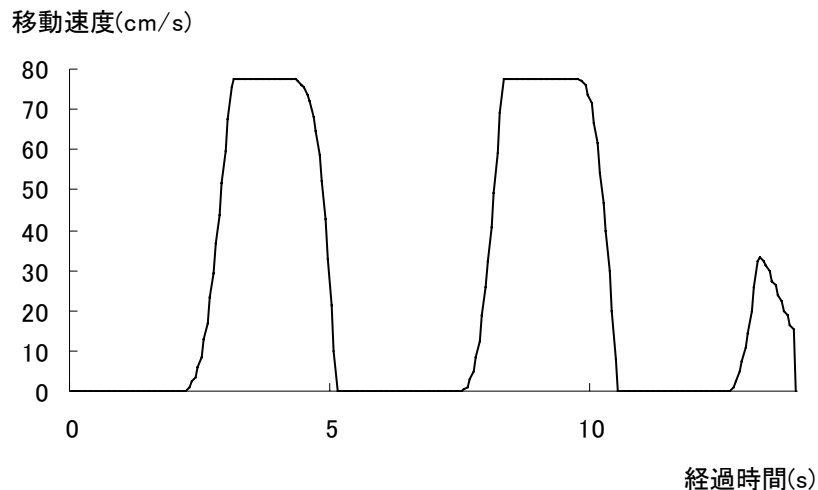


図 5.71 ロボットの移動速度

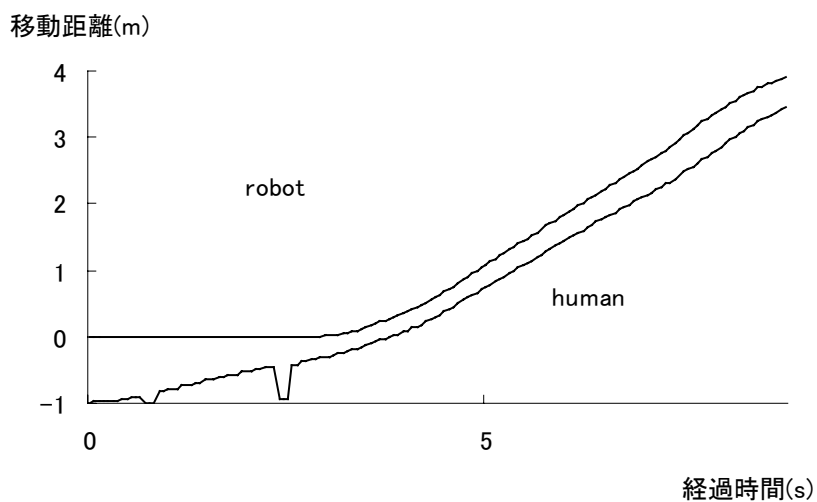


図 5.72 ロボットと人間の軌道

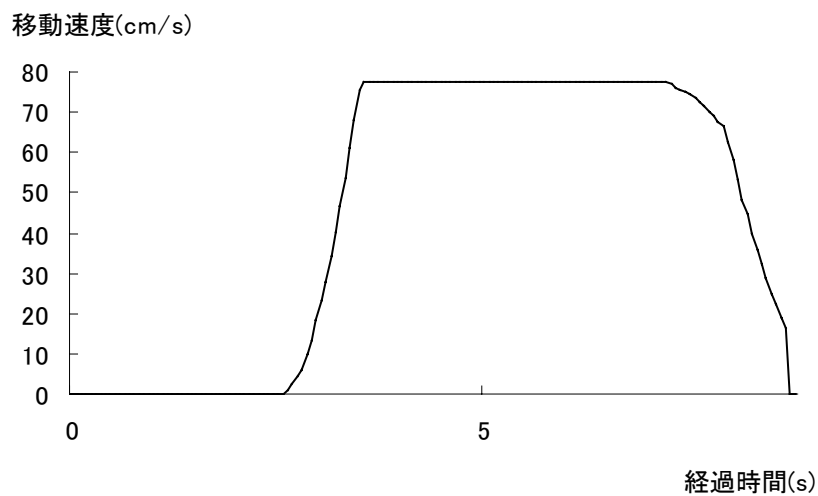


図 5.73 ロボットの移動速度

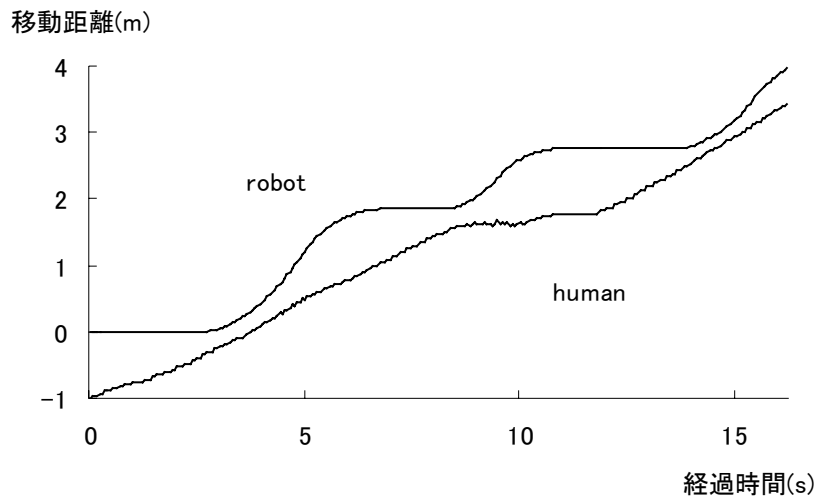


図 5.74 ロボットと人間の軌道

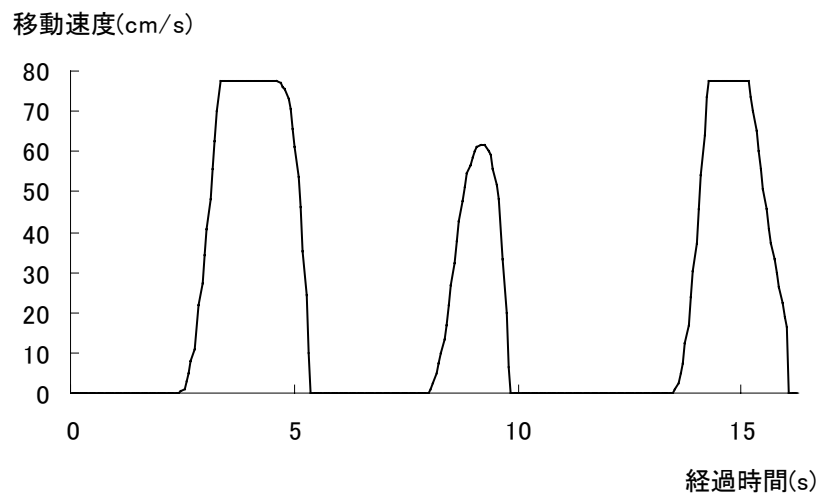


図 5.75 ロボットの移動速度

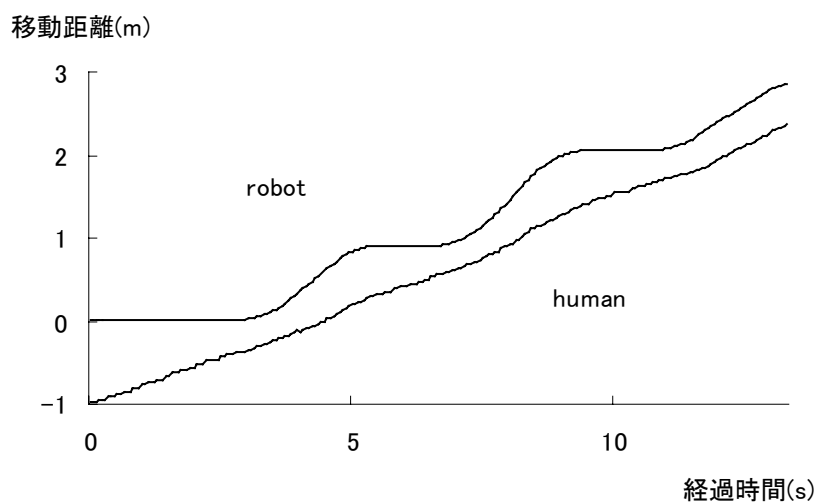


図 5.76 ロボットと人間の軌道(回転前)

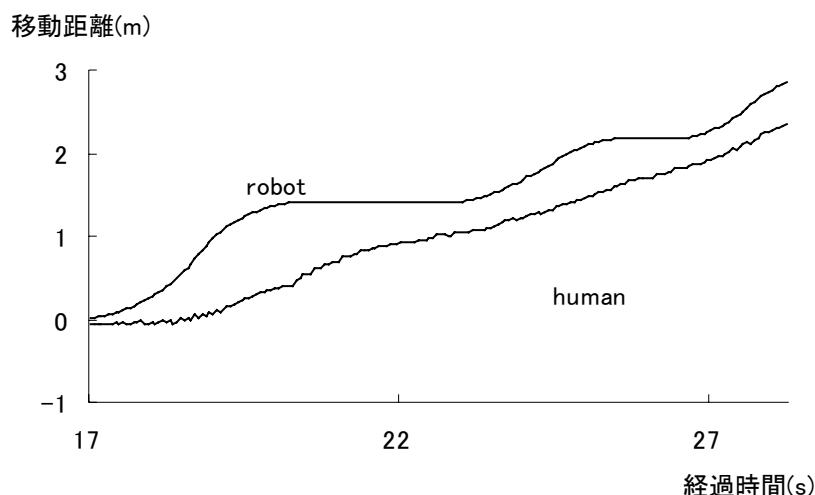


図 5.77 ロボットと人間の軌道(回転後)

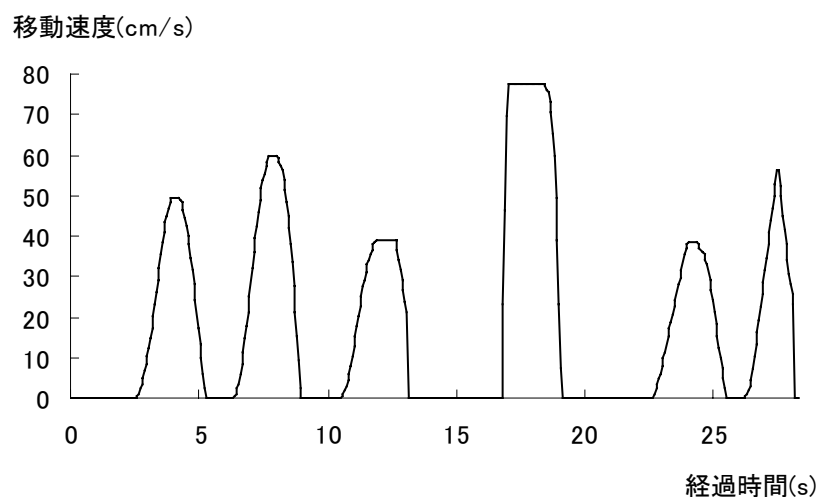


図 5.78 ロボットの移動速度

実験結果から以下のようなことがいえる。

-) 実験結果から後件部が速度の変化量でより少ない推論規則でも基本的な案内動作ができることがわかる。推論規則の構成が5.2.2の実験と同じであるので、実験結果は5.2.2とほぼ同じような結果になっている。この実験結果よりルールを追加することでより複雑な系が実現できる。
-) 先ほどの5.2.5と同じようにシングルトンのみで軌道計画を立てることができている。
-) この実験で決めた前件部では適合度型の推論法では適切な推論結果は得られない。

5.3 考察

すべての実験結果より以下の考察が得られる。

-) 案内ロボットは人間の動作に対して適切な動作を行っている。例えば、人間がゆっくり歩いた場合にはロボットも移動をゆっくり行う。人間がはやく歩いた場合にはロボットもそれに応じて移動速度を上げる。これはファジィ軌道計画を用いることによって基本的な案内動作を達成できたといえる。
-) 簡略型推論法を用いた場合と距離型ファジィ推論法を用いた場合を比較すると、基本的な案内動作は両者とも行えており、大きな違いはない。しかし、第4章で述べたように距離型ファジィ推論法の場合、前件部が疎な場合でも推論できるためより少ない推論規則で軌道計画を行うことができる。また、シングルトンを用いて任意に推論結果を求めることができることもたいへん有利である。また、今後の拡張性を考えてルールを追加した場合に従来の推論法はすべてのルールの見直しを求められるのに対して、距離型は簡単にルールを追加することができる。つまり、距離型ファジィ推論法は従来の推論法よりも導入が容易で扱いやすい推論法であるといえる。
-) 同じ前件部で一方の後件部は速度の操作量を、もう一方は速度の変化量を用いた。後件部が速度の場合は対象との距離に応じてその速度が算出されている。そのため対象の速度によってロボットとの距離が決まっている。これは設定した言語ルールから考えると当然の結果である。また、対象との距離によって速度が決まってしまうためロボットが曲がった時にロボットの後方へ人間が移動した時に局所的に速度が上がってしまう欠点がある。一方、後件部が速度の変化量であった場合には、局所に速度が上がってしまうことはない。しかし、速度の変化量を操作しているため後件部の設定が難しく今回の実験のように動作をしてすぐに停止する傾向にある。また、ロボットは常に対象との距離を50cmに保って移動しようとする。これも設定した言語ルールから考えると当然である。このように言語ルールの設定によって複雑な動作を実現できる。

第6章 結章

この章では、本論文の研究成果についてまとめ、この後の課題などを述べる。

6.1 本研究の成果

本論文では、まず案内ロボットと産業用ロボットとの違い、ロボットの運動制御に必要なとなる軌道計画の概念を述べた。また、距離型ファジィ推論法による軌道計画の必要性についても述べた。その上で距離型ファジィ推論に基づいた案内ロボットの軌道計画法を提案し、実験結果を説明した。実験では案内ロボットの基本的な案内動作を実現することができた。また、従来の適合度を推論の根拠とする推論法とは違い、前件部と事実との距離を推論の根拠とする距離型ファジィ推論法を用いた軌道計画に導入することにより、従来の推論法よりも導入が容易であり、ルールの追加が容易であるといった扱いやすいことがわかった。具体的には、前件部の推論規則が疎な場合でも適切な推論ができるのでより少ない推論規則で軌道計画を構成することができる。逆に推論規則を追加することで複雑な系を表現できる。また、シングルトンを用いて推論規則が行え、分離規則を満たしていることより、ある事実に対して任意に軌道値を与えることができる。

6.2 今後の課題

今後の課題としては経路計画を導入することによってより現実的な案内の実現が望まれる。例えば、病院内で人間ドックをうける人を案内する場合に、検査を待つ人の混雑具合や検査機材のある場所までの距離など様々な情報をもとにして経路を決定しなければならない。この時、経路を決定するのに重要となるのは個人が検査に要する時間、体力などや、病院に検査にくる人々の動きなど様々な事柄が考えられる。また、美術館で人を案内する場合は、施設内の人の混雑具合や最適な鑑賞ルートなどから経路を決定しなければならない。この時、経路を決定するのに重要となるのは美術館の人の出入りなどがあがられる。このように、経路計画もその導入される環境によって様々である。ここで、この経路計画の手段として、例えば人の混雑具合や次の目的地候補までの距離などの情報より施設内の人々の動きや個人の移動距離のなどを割り出して、これらの重要度にあわせて重みをつけることで最適なルートを得ることができるのではと考えている。今後はこの課題に取り組んでいきたい。ところで、今回の実験では最も単純な推論規則で前件部、後件部のメンバーシップ関数を主観的に定めた。今後はトラッキングビジョンなどの装置を用いて、これに推論規則を設けて、さらにメンバーシップ関数の同定を行う。これにより高度な案内動作の実現ができると考えられる。また、実験において被験者の中にロボットが逃げていく

ようであったという意見があった。これは案内ロボットと人間との間に生まれる心理的評価のあらわれだと考えられる。今後の研究の1つの方向性としてこうした心理的評価を考慮した案内ロボットの研究があげられる。

参考文献

- [1] M.Yamamoto : Development of Indoor Mobile Guiding Robot With Fluorescent Light Detecting Vision Sensor,Int.J.Japan Soc,Pre.Eng. ,Vol.31 ,No.1 ,pp.68-70(1997)
- [2] 熊野 仁子,大矢 晃久,油田 信一:ステレオビジョンセンサを用いた自律移動ロボットの実時間障害物回避, No.00-2 ロボティクス・メカトロニクス講演会'00,,2P1-46-073 (2000)
- [3] 桂田,前田:インタラクティブ EC を用いた感情自動獲得支援システム, 16Th Fuzzy System Symposium , Proc.pp297-300(2000)
- [4] S. Y. Wang and T. Tsuchiya : Fuzzy Trajectory Planning and its Application to Robot Manipulator Path Control , Advanced Robotics , Vol.8, No.1 , pp.73-93 (1994)
- [5] 王,土谷,水本:距離型ファジィ推論法, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol.1 , No.1 , pp.61 78(1999)
- [6] 日本ファジィ学会:講座ファジィ第 2 巻ファジィ集合, 日刊工業新聞社
- [7] 日本ファジィ学会:講座ファジィ第 4 巻ファジィ論理, 日刊工業新聞社
- [8] 日本ファジィ学会:講座ファジィ第 5 巻ファジィ制御, 日刊工業新聞社
- [9] 日本ファジィ学会:ソフトコンピューティングシリーズ 8 ファジィロボット, 朝倉書店
- [10] 菅野:ファジィ制御, 日刊工業新聞社
- [11] 廣田:ポピュラーサイエンスだからファジィが面白い, 裳華房
- [12] 土谷,深谷:メカトロニクス入門, 森北出版株式会社
- [13] 水本:ファジィ理論とその応用, サイエンス社
- [14] 日本ロボット学会:ロボット工学ハンドブック, コロナ社

謝辞

本論文は、筆者が高知工科大学基盤工学専攻修士課程において行った研究をまとめたものであります。

本研究を行うにあたって終始ご指導ご鞭撻をくださった、高知工科大学知能機械システム工学科王碩玉教授に対して深く感謝いたします。

また、ロボット制御に関して様々なご助言、ご指導下さった高知工科大学知能機械システムコース博士課程の陳貴林氏、四之宮葉一氏、修士課程の種植健二氏、浜口和洋氏、野村和寿氏、菅野正人氏、隅田由紀氏、伊藤淳氏に深く感謝いたします。

そして、実験補助手伝いなどをして下さった、高知工科大学知能機械システム工学科、松浦純氏、細川圭介氏、田中秀明氏、長瀬啓志氏、吉本孝司氏に深く御礼申し上げます。

最後に、筆者のために大学、大学院での5年間の学生生活を支えて下さった両親、姉に心より深く感謝いたします。

2002年2月8日