

遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ制御ロボットの 動的障害物回避について

海 津 宏

A Study on Collision Avoidance among Moving Obstacles for a Fuzzy Control Robot using Genetic Algorithm

Hiroshi KAIZU

It is important to study the good flexible ability for a mobile robot of which mathematical modeling is difficult. The genetic algorithms for fuzzy control robot can be applied to the rule selection problem for constructing a fuzzy-rule-based system by a small number of fuzzy if-then rules. This paper studies to discuss the collision avoidance among moving obstacles on the conventional hierarchical fuzzy robot model using a genetic algorithm. Some results of computer simulation are shown to prove the effectiveness of this fuzzy method.

1. はじめに

実用化に向けた人工知能型移動ロボットおよびその制御法等に関する研究が進んでいる。また、ファジィ制御のひとつの応用としても移動ロボットの知的制御や学習機能を持たせる研究が着実に進行している。ロボットの適用範囲も従来からの工場やオフィスの限定された空間領域だけでなく、一般的でより複雑で動的な環境下での分野へと拡大しつつある。障害物回避、壁伝い行動、目標・迷路探索、集団群行動、ニューラルネットワーク、強化学習、遺伝的アルゴリズム、行動型制御等への実用的な展開が求められている。ロボットに対して実際の人間は、失敗も参考にしつつ環境の変化や多様性、障害物、未知な状況に際してさえも知識や経験などを生かしこれらを有効に活用して、試行錯誤的に理解、学習しつつ適切な対応をしている。このような動的で多様な環境の対応にはかなり複雑な制御法が求められていることが多い。これらのような問題に対してロボットが事前にその行動規則を準備し、かつ言語で記述することはかなり難しい。これまでのロボットの知能化の方法は、人間が獲得した知識や情報などによるアルゴリズムをパターン化して、それらを適宜組み合わせることで大体対処してきている。このことから環境や経験から得られた情報に基づいてほとんど未知で動的な環境下でも自律的に動的障害物回避ができるような柔軟で簡便な知的制御システムの構築が期待されている。実際上の分野では、最適制御やニューロのような厳密な御を求めるのではなく処理の簡便さと人

間への柔軟な制御が可能となるファジィ制御法が多様なシステムに適用されるとの見通しがある。

ファジィ推論法の開発改良とその比較検討、および新しいファジィ制御法なども報告されている。例えば、階層化距離型ファジィ推論法は、ファジィ集合間の距離に着目したもので、前件部と同じファジィが来た場合には、そのルールの後件部と同じファジィが推論出力される。一方、入力が中間的なファジィ集合の場合、後件部の推定出力も中間的になるなどの性質があり、非線形システムへの適用が報告されている。但し、ファジィ制御には学習機能が基本的になく、ルールとして想定した数種類の制御規則を用いることが多く、得られた解が最適であるかの保証はかなり難しいと言える。一般に精度の高い複雑なファジィ制御が要求される場合には階層化を行いある程度の信頼性を得ることができが、その精度を左右するメンバシップ関数と制御ルールを系統的に作成し最適化を計ることはとても煩雑で難しいものになる。このため動的な環境で予期せぬ出来事に適切迅速に対応出来ないことが容易に推測される。この一つの対策として、適切で効果的なメンバシップ関数とルールの作成を目的として進化システムの機能を有した多目的最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムGA導入の有効性を検証、考察する。障害物回避モデルとして先に報告した階層化ファジィ推論の後件部に適宜GAの手法を導入して自律的系統的に生成し、より適切なメンバシップ関数へとチューンアップする方法を採用した改良型階層化ファジィ制御による動的障害物回避モデルを設定してシミュレー

ション実験を行った。その結果、遺伝的アルゴリズムによるルールの効果的な組み合わせにより制御方式の簡便さを損なうことなく、多数のルールやメンバシップ関数の調整などが可能となり、その自律能力によって迅速に対応することが予測された。

2. 回避問題とファジィ、GA

ファジィ制御則では、if部(条件部)には制御量などを変数とするファジィ命題、then部(結論部)には操作量を記述するファジィ命題からなる。一般に制御知識をif~then型のファジィプログラクショナルルールとして単純化表現としたことによるシステム構築上の理由により、高精度を求める場合などに対してはかなり限定的である。簡便性や操作の容易性に反して、精度を左右するメンバシップ関数やルールを系統的に作り出すことやその最適化などへの研究がまだ不十分と考えられている。しかし、このメンバシップ関数や制御ルールの各々の最適化を考えることは容易ではなく、その対応策が障害物回避制御でも研究されている。

動的障害物回避問題では、移動ロボット自身がその行動中において予測不可能な状況に遭遇したり、周りの環境が常に変化することなどから、その定式化が大変困難である。本問題を定式化する場合、柔軟な状況判断・予測を行うことができる表記方法が不可欠であるが、ファジィ推論には精度は低いと比較的容易に様々な状況に対応できる可能性を持っている。現在次のような手法が報告されている。対象をサッカーロボットとした場合等の行動学習手法、経験強化型学習システムによる基本行動獲得手法、複数の行動における斬新的な行動原理選択手法、下位レベルで障害物回避のための操作量を決定し上位レベルの学習オートマトンで適切な合成ルールを学習する手法、行動原理の異なるロボット群に斬新的学習を行うと群全体の作業効率を維持するための適応性が生ずるという研究、カーナビにおける経路選択を交通状況に適応させる進化的手法、赤外線センサーシステムを用いた階層的強化学習による適応的回避行動獲得手法、静電ポテンシャルとSliding Modeを用いた手法、移動障害物の動作を予測し状況によりポテンシャル法の最適パラメータを探索する手法、仮想的なインピーダンスを用いた動作計画手法、ヒューリスティックな評価に基づいて衝突を予測して速度ベクトルを適宜修正しつつ回避する手法、ファジィ目標設定による学習手法、ファジィ評価に基づく相対関係の予測と次の行動をオペレータの操作履歴を基に意志決定し回避経路を得る手法、環境情報からのパターン変換として経路計画を扱い作業環境の占有領域パターンを並列的に処理する手法等数多く研究されている。また、藤田氏らは、2段階評価を行う行動監視機構が行

動探索を打ち切り探索途中の行動を出力することで予測誤差に対応する手法を報告しているが、規則が煩雑になり走行の柔軟性に問題がある。これら行動切り替え手法の多くは、移動ロボットの動特性を考慮していないため障害物を回避しても目標点まで走行する軌道の柔らかさや最適性に関して課題がある

本稿では、先に報告した階層化ファジィ推論による移動ロボットの動的障害物回避制御に関する研究においてもファジィルールの効果的な階層構造化と重み付け合成の改良によりルール調整の適正化から回避性能が向上することを確認報告したが、ファジィ制御に遺伝的アルゴリズムの最適手法をルールに一部取り入れることによる制御性能の改善および前回の課題である同じ衝突パターンの繰り返し発生対策のための学習化機能の必要性が生じていた。即ち、壁沿い回避行動による出会い頭の衝突や、視野角外後方からの併走追突による衝突、の改善すべき2点に着目して従来の回避制御法の改良を行った。

一方、遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)は、淘汰、交叉、突然変異等による生物進化の過程を模擬した近似最適化手法であり、複数の個体を用いて試行錯誤的に変数を変えて最適解を探索する確率的な多点探索の一手法と言える。通常、適用範囲が広く、問題に応じた工夫を特に考えなくてもある程度解けることが多いが課題としては、一定の遺伝的パラメータ(突然変異、交叉率など)で探索を行うため、探索初期、収束期において探索性能が下がることが多い。この改善策としてファジィ適応型アルゴリズムの提案が行われているが、設定パラメータの数が比較的多いことや集団間の移動時に並列処理の効率が低下することが報告されている。また、最適化の評価、オフラインでの試行、多目的最適化問題の解探索の効率化等の問題も指摘されている。一方、ニューラルネットワークを用いるものは規範となる教師信号が必要であり、制御法の簡便性から今回は対象としていない。

遺伝的プログラミングでは、最適なシステムに向上するアルゴリズムであり、これらのプログラムが関数の集合体であることから、それぞれの関数を木構造に変換し、その分木部分同士の入れ替え(交叉)や分木構造の変更(突然変異)を行うことによって、プログラムの一部である関数を修正し、最終的にはプログラム全体を進化させていく。このことからメンバシップ関数もプログラム中に記述される関数の一部として木構造で表すことによって、チューニングや生成が遺伝的アルゴリズムによって可能となりうる。

図1は、一般的な遺伝的アルゴリズムGAのフローチャートを表している。ルーレット選択、一点交叉、一般的突然変異のみを使用したGAを、単純GAと呼ぶ。単純GAのもとで選択だけを考慮すると、次の関係が成立

する。この式は、定義長 (S)が短く、次数O(S)が低く、かつ平均適応度 f mより高い適応度を持つスキーマ Sが次の世代に生き残れる確率が高いことを表している。

$$P(S, t + 1) = P(S, t) * f(S) / f_m * [1 - P_c * (S) / (L - 1) P_m * O(S)]$$

但し、O(S)：次数（オーダー）、スキーマの中の定数、
(S)：定義長、スキーマ中の最初と最後の定数間、
P(S, t)：時刻 tにおいて、スキーマ Sを遺伝子型に含む固体数、
f(S)：スキーマ Sを遺伝子型に含む固体の平均適応度、
f m：集団内の全固体の平均適応度、
P c：交叉確率、L：遺伝子長、P m：突然変異率

なお、障害物が危険であるか否かは、ロボットとの静的な位置関係よりも動的な位置関係による場合が多い。例えば、障害物がかなり近くにいる場合でもロボットに接近してこない限り、両者の衝突は生じない。逆に、障害物が遠くに位置する場合でも比較的速い速度で接近してくれば衝突する可能性（危険）は高くなる。ここでは、この2つの静的危険度と動的危険度をともに危険回避の推論演算等を行う。その他のファジィ推論設定等については前報告を参照とし割愛とする。

3 . 回避モデル

本稿での自律移動ロボットが、動的障害物を回避しながら目標点に向かう状態モデルの概念図を図2に示す。モデルの主な設定条件は次の通りである。

障害物は移動ロボットの前方、右方、左方からランダムに移動し、回避行動なしでは大体衝突が生ずる。

移動ロボットは移動経路上の制約がなく、速度は一定範囲内とし多少の加減速が可能とする。

移動ロボットが動的障害物を認識できる視界範囲（視野）進行方向に対して左右90°の180[deg]とし、視界半径は150 [pixel]とする。

移動ロボット、動的障害物が移動可能な領域は、X軸方向800[pixel]、Y軸方向600[pixel]とする。

動的障害物は3個とする。

移動ロボット、動的障害物の大きさは480×480[tpw]の正方形とする。

移動ロボットと目標点の初期配置先は固定とする。

移動ロボットと目標点までの最短frame数は、987 [frame]とする。

移動ロボットには、衝突危険度の概念から導入した動的回避ベクトルによる回避モデルを設定した。目標点及び各障害物に対する相対的位置及び相対的速度から算出

される危険度等を考慮して制御入力決定やファジィルールの要因に組み込んでいる。また、制御入力ベクトルの決定に際しては、方位制御と速度制御の複合制御方式において階層ファジィルールによる推論を採用し、速度優先、回避優先およびその2つの重み付け調整も可能なモデルとなっている。図3は、制御入力（方位、速度制御）決定のための階層化ファジィ構造を表している。図中の各記号は次の通りである。

V：ロボットの進行方向に対する目標点の方位角

L：ロボットと障害物の距離

W：ロボットと障害物の相対速度

RA：ロボットの進行方向に対する障害物の相対方位角

RU：ロボットから障害物へのベクトルに対する相対速度ベクトルの方位角

各種パラメータとして、現時点における移動ロボット、動的障害物、目標点の位置および、速度ベクトルが入力され、各データに基づきファジィ演算等を実行する。制御入力の重み付け合成等についても考慮し、静的危険度と動的危険度ではより大きい値を最終的な危険度と設定した。また、評価のための関数Jを設定し、回避到達率J₁、到達時間に相当するフレームステップ数を正規化した値J₂、および $J = (J_1 \cdot J_2 \times 100)^{1/2}$ を用いて考察した。

なお、プログラム実行の際にはいくつかの点でのデータを別途取得するように設定し、その後のシミュレーションにおける移動ロボットの回避行動に進化（学習）の機能を付加するように配慮した。これにより先に報告した回避失敗事例である、動的障害物が後方の視野範囲外より高速で衝突する場合（後方衝突型）、壁際において障害物が待ち伏せや急速接近して通過の邪魔をして衝突したりデッドロック状態から衝突する場合（壁際衝突型）の2点を改善することに着目してGA導入効果を検証した。

4 . シミュレーション

シミュレータの作成には、Visual-cを用い、教育用ファジィシステムの将来的な用途としての活用も考慮に入れた。試行回数は、各1000回とし、ファジィ集合の形状、ファジィ推論法、重み付け合成、速度制御の有無、GAの導入有無の各項目からシミュレーション実験を行った。

図4は、作成したシミュレータの初期メニュー画面を表している。選択メニューボタンの概要は次の通りである。

開始：シミュレーションの開始

停止：シミュレーションの一時停止

リセット：リセットを行い、障害物の配置を再設定

軌跡：移動ロボットと障害物の軌跡描画
出力：画像ファイル出力
GA：GAルールの起動
ファジィ集合：三角型、三角関数型、二次関数型、無理関数型、正規分布型 計5
ファジィ推論法：水本法、簡略化法
重み付け：速度重視、回避重視、目標点最優先
連続移動フレーム数：入力した数値の数を元に移動ロボットの入力、制御毎の間隔フレーム数を設定可変
表示：視界、ベクトル、軌跡の表示
自動処理：自動シミュレート開始
ウエイト：画面処理速度設定 50,100,250,500[frame/s]
再起動：シミュレーション再起動
終了：シミュレーション終了

5. 結果と考察

図5は、シミュレーション結果の軌跡画面例で衝突失敗例を、図6は回避成功例を表している。また、図7は、各項目ごとの評価関数Jの一覧を表している。GAの導入効果により全項目のファジィ推論法で評価関数が改善されていることが確認できる。衝突回避率も試行回数を重ねる程に改善されていた。また、2つの着目した繰り返し回避不能となる（いわゆる学習効果のない）衝突パターンにおいても図5(a)(b)の衝突事例が図6(a)(b)のように新たな回避迂回経路を選択することにより改善されたことが確認できた。図5(a)は、後方の視野範囲外からの併走に起因する追突衝突型失敗例であり、図5(b)は、壁際沿いに回避経路を選択しつつ目標点近くで出会い頭に衝突した失敗例である。簡単な学習効果により全てが改善されたのではなく、そのためには階層構造やルールの完全最適化が必要と思われる。

なお、次の3つの観点からの考察も付記する。

5つのファジィ集合による比較：2次関数型のファジィ集合を用いた場合が良好となった。

2推論法（水本法、簡略化法）の適用による比較：本モデルでの水元法の簡略化法に対する優位性が確認でき、各項目でいずれも良好な結果となった。但し、簡略化法でのルール作成の簡便さや条件が整ったときの演算処理時間短縮化等には長所が残る。

重み付け合成による比較：想定通り回避重視、回避軽視（到達時間短縮優先）では明らかな性能差が現れた。回避重視は到達率が高くなり、回避軽視はフレーム数が下がった。但し、移動可能領域が移動速度の割合には狭かったためか、回避最優先（目標点一時無視）での重み合成では回避到達率が期待ほどには高くなかった。これは移動可能領域を拡大した場合に再検討したい。

以上の結果から、簡単な学習によって比較的良好的な障

害物回避が実現できること、一連の複数の関数を状況や必要性によって比較的自由に生成でき、階層ルールとの有効な組み合わせによって、より複雑な回避モデルや動的環境に適応可能なことが期待できるという検証と知見を得ることができた。

なお、本研究の趣旨は、ファジィを用いて簡便にロボットに人間的な判断を持たせることであり、完全なる回避性能やその対策までを考えてはいない。衝突回避率や目標点到達時間などの制御性能向上の見返りに処理速度や操作性、簡便性の劣化が生ずることを必ずしも期待していない。実用上の観点からも、GA一部導入による擬似的な学習機能を持たせることができその適用の有効性の検証にとどまる。これにより、筆者が先に報告した動的障害物回避のモデルで発生していた同じ回避行動パターンでの回避失敗が、効果的に改良されていることに着目したい。さらなる精度の高い効果的な学習機能や人間的な判断は今後の課題である。

6. おわりに

本研究では、動的障害物回避モデルを対象に階層型ファジィ推論のメンバシップ関数を最適化するための制御法として、GAを一部導入した学習手法のシミュレーション実験を行った。その結果、ファジィルール生成の有効性を検証し、重み付けファジィルールに本アルゴリズムを適用すれば効果的なことが確認できた。また、今後の更なる制御性能向上の見通しを得ることができた。

今後は、ファジィ階層化ルールの最適化、GA等により積極的に効果的な学習機能導入、いわゆるファジィ+GA、ファジィ+強化学習などにおけるルール改良の検討とその制御評価等の課題がある。モデル構築における試行錯誤手的な問題点もまだ多く、新たな解決手法の提案が待たれその検証も必要となる。福祉介護用も含め、将来の人間とその環境にとって簡便で操作性も優しく容易である制御法は、その反面として開発は難しいことも多くこれからの進展を期待している。

参考文献

- 1) 青木, 岩田, 鈴木, 大熊: 階層ファジィルールによる移動ロボットの障害物回避動作計画, 電気学会論文誌C分冊, 113巻, 7号, pp. 535 - 542, 1993
- 2) 平川, 岸田, 西守, 石原, 藤村, 濱野, 徳高: 各種ファジィ推論法のチューニングによる比較 - 模型自動車の右折, 左折走行制御シミュレーション -, 電気学会論文誌C分冊, 113巻, 11号, pp. 1005 - 1012, 1993
- 3) 田中一男: モデルに基づくファジィ制御 - これまでの研究成果と将来展望 -, 日本ファジィ学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 338 - 347, 2002

- 4) 松村幸輝、村井保之：遺伝的アルゴリズムに基づくファジーロボットの障害物回避モデル、電子情報通信学会論文誌A分冊，83巻，12号，pp.1539 - 1551，2000
- 5) 黒住亮太、山本 透：強化学習による電動車椅子の障害物回避補助システムの構築、システム制御情報学会誌，19巻，1号，pp.7 - 14，2006
- 6) 久保田直行、森岡利仁、小島史男、福田敏男：動的環境下における移動ロボットのファジー制御，日本ロボット学会誌，12巻，1号，pp.55 - 63，2000
- 7) 海津：ファジー推論法による障害物回避のシミュレーション，東京都立工業高等専門学校研究報告，第40号，pp.73 - 77，2004

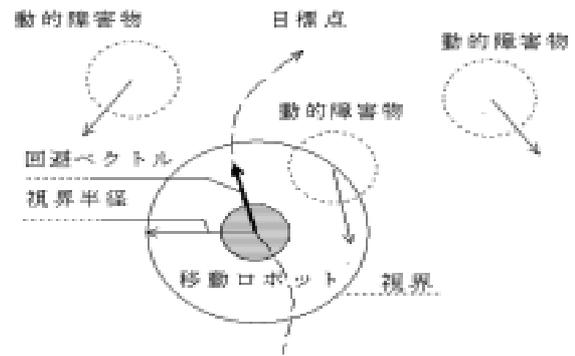


図2 回避モデル概念図

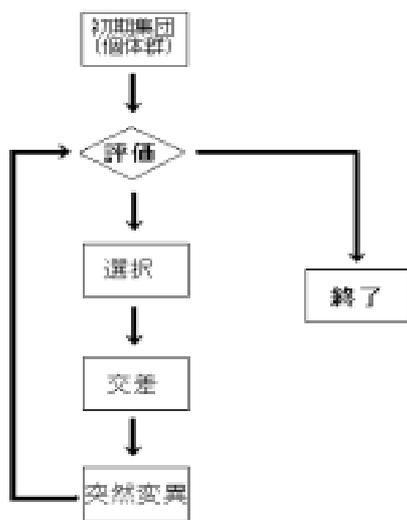


図1 GAフローチャート

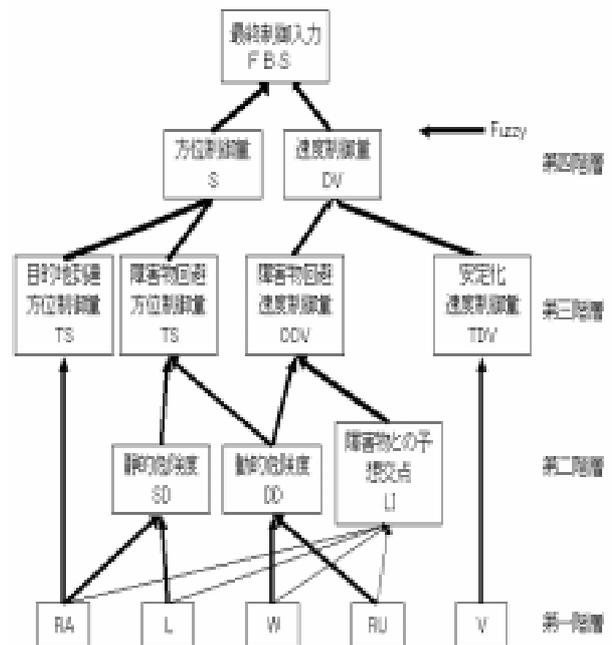
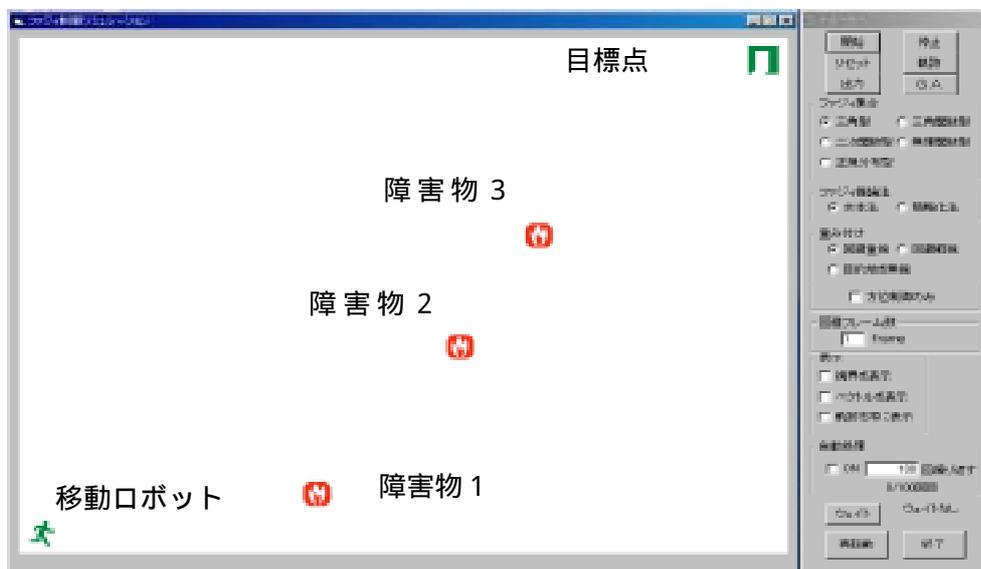


図3 各種パラメータと階層化ファジィ構造



GA

図4 シミュレーション初期画面

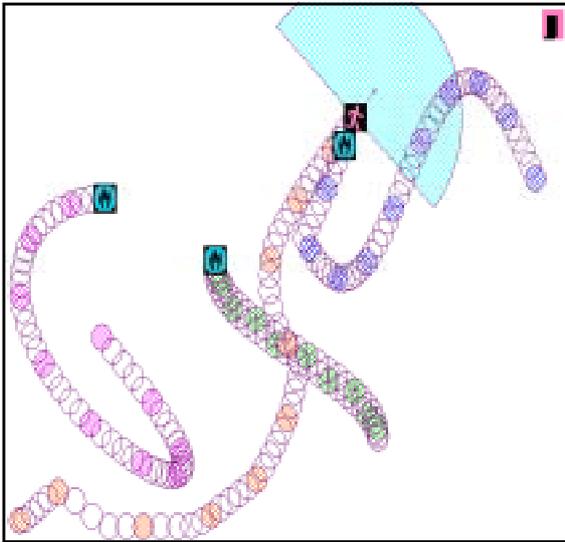


図 5 (a) 後方追突による衝突型回避失敗例

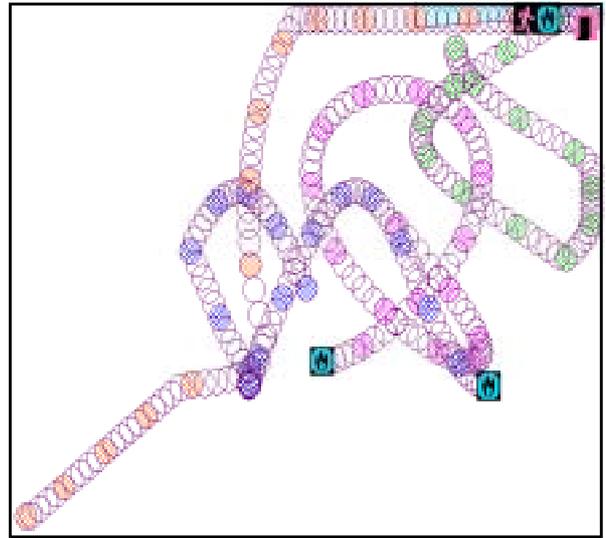


図 5 (b) 壁際回避行動中の出会い頭衝突型回避失敗例

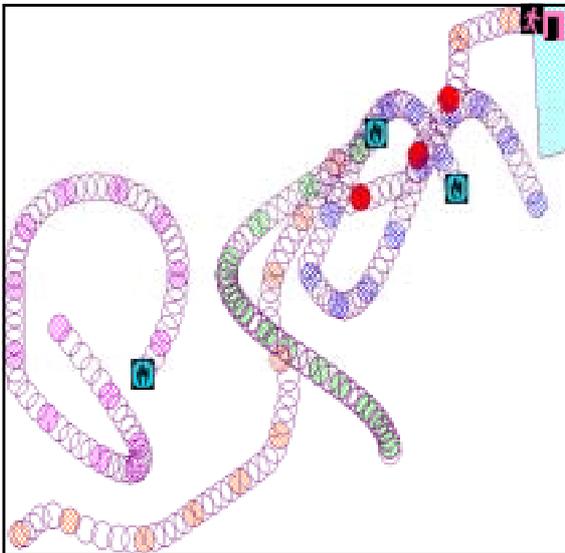


図 6 (a) 後方衝突回避成功例

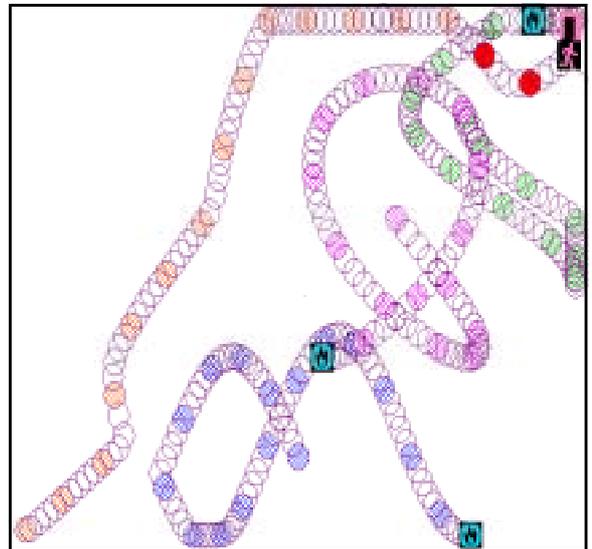


図 6 (b) 壁際衝突回避成功例

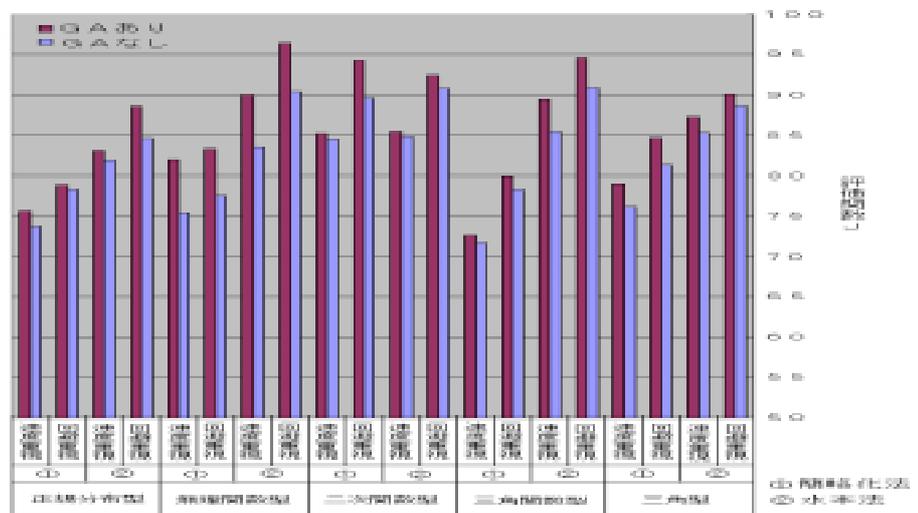


図 7 回避シミュレーション評価結果 (GA、ファジィ集合、推論法、重み合成)