

B2-2 ファジィ推論を用いた認識信頼度に基づく 全方向移動ロボットの予測行動制御に関する研究

福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻 進化ロボット研究室
市川 毅 (指導教員：前田 陽一郎)

1 緒言

近年、家庭、工場、病院など複雑で狭い作業空間内で人間の代わりに活躍する様々な自律移動ロボットの開発が進んでいる。しかしながら、このような複雑な環境下においては従来の2輪式の移動機構(非ホロノミック車両)では移動範囲が制限され、行動に拘束を受けてしまう。そこで、任意の方向に瞬時に移動できメカニズムによる拘束を受けないホロノミック特性を有する全方向移動機構に関する研究が盛んに行われている[1]。全方向移動機構は、知能移動ロボットのランドマークプロジェクトとして知られるRoboCup 中型ロボットリーグでも、その機動性の高さからほとんどのチームで採用されている[2]。サッカーロボットでは一般にオムニホイールと呼ばれる1方向にだけ駆動力を発生させることのできるフリーローラを有する特殊な車輪を3個または4個用いて構成されるRollerWheel方式の移動機構が多く見られる。

一方、自律移動ロボットが環境に適応したタスクを達成するためには、必要な情報を取得し行動を決定する必要がある。しかし、実環境においては必要とされる情報が常に得られるとは限らない。ロボット用センサとしてよく用いられるカメラなどの画像認識では隠れや誤認識といった問題があり、取得される情報が現実とは異なっている可能性もある。自律移動ロボットにはこのように環境情報が正しく得られなかった場合においても状況に適応した行動をとることが望まれる。

本研究では、ロボットの入力情報に信頼度という指標を与え、この変化に応じて適切な行動選択を行う認識信頼度に基づく階層型ファジィ予測行動制御を提案する。具体的には信頼度が高い場合には計測情報を用いて行動制御を行い、信頼度中程度の場合には過去の履歴から求める予測情報を用いて行動制御を行う。そして信頼度が低い場合には信頼度が低い情報を用いない行動を選択するように行動制御を行う。本手法の検証には全方向移動機構を搭載したRoboCup 中型ロボットリーグ規格のサッカーロボットを使用した。まず、全方向移動ロボットの制御として階層型ファジィ行動制御によるシュート実験を行った。さらに複雑な環境下でのキーパー防御行動実験を行い、認識信頼度に基づく階層型ファジィ行動制御の有効性検証実験を行ったので、これらについて報告する。

2 階層型ファジィ行動制御

本研究ではロボットの行動をいくつかのサブタスクに分け、個々の行動決定ファジィルールを作成し、それらのルールを重み付けする上位の行動選択ファジィルールにより統合する階層型ファジィ行動制御がすでに提案されている[3]。

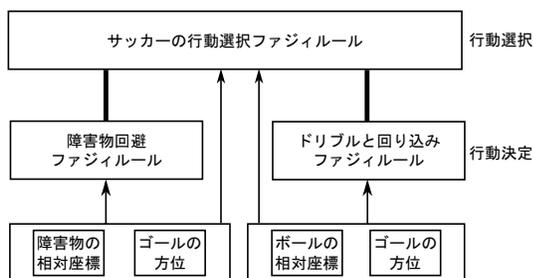


図1. 階層型ファジィ行動制御

階層型ファジィ行動制御を用いることにより、膨大な状態数のファジィ推論を階層化により比較的容易に記述し、ロボットの複雑な行動制御を実現することができる。

本研究では、この階層型ファジィ行動制御を用いて全方向移動ロボットの制御を行う。全方向移動ロボットの目標点に最短距離で向かうことができるといった利点を生かして、ロボットが向かう目標点の相対座標(ロボット座標系から見た位置)を推論するドリブルと回り込み目標点決定ファジィルールと障害物回避目標点決定ファジィルールの作成を行った。以下では、これらのファジィルールの推論結果を統合しロボットが向かう最終的な目標点を求める行動選択ファジィルールについて述べる。

2.1 行動選択ファジィルール

行動選択ファジィルールは、回り込み目標点決定ファジィルールと障害物回避目標点決定ファジィルールから出力されるそれぞれの目標点の合成を行う。状況に応じてどちらの目標点を重視するか重み付けを行い、行動を選択する。

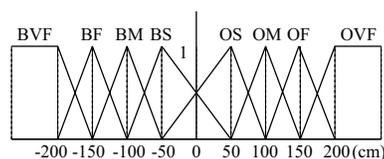
図2(d)が行動選択ファジィルールであり、前件部のメンバーシップ関数は図2(a),(b)である。ロボットから障害物までの距離 d_{obst} とボールまでの距離 d_{ball} の差を式(1)のように算出し、8段階で表している。

$$d_{error} = d_{obst} - d_{ball} \quad (1)$$

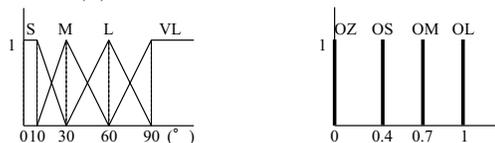
また、障害物の方位 θ_{obst} とボールの方位 θ_{ball} の差を式(2)のように算出し、4段階で表した。

$$\theta_{error} = \theta_{obst} - \theta_{ball} \quad (2)$$

後件部のシングルTONは図2(c)であり、障害物回避目標点の重み g を4段階で表している。求められた重み g を用いて、式(3)のように障害物回避の目標点 (X_{obst}, Y_{obst}) と回り込みの目標点 (X_{ball}, Y_{ball}) の合成を行い、最終的な目標点の相対座標 (\hat{X}, \hat{Y}) を求める。



(a) 障害物とボールの距離差



(b) 障害物とボールの方位差 (c) 回避行動の重み g

(d) ファジィルール

| | BVF | BF | BM | BS | OS | OM | OF | OVF |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|-----|
| S | OM | OM | OM | OM | OM | OS | OS | OZ |
| M | OM | OL | OL | OM | OS | OS | OS | OZ |
| L | OM | OM | OM | OM | OS | OZ | OZ | OZ |
| VL | OM | OS | OZ | OS | OZ | OZ | OZ | OZ |

図2. 行動選択ファジィルール

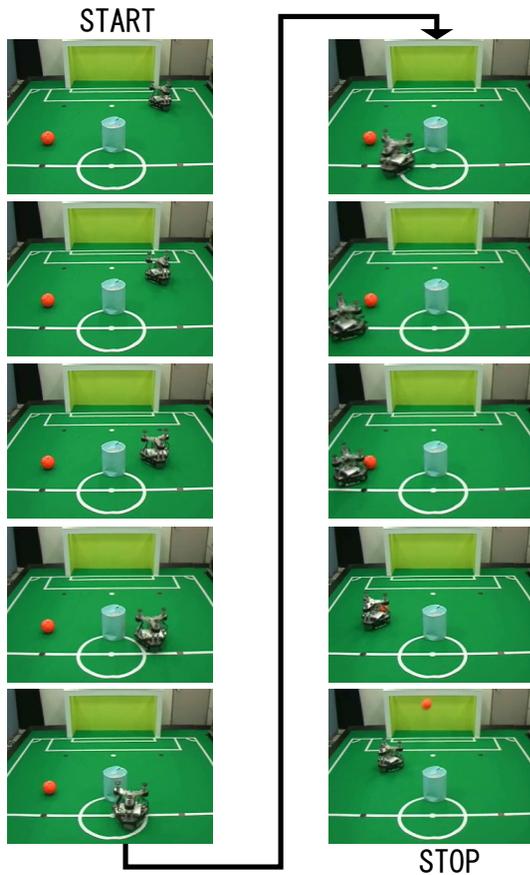


図 3. シュート行動の動作

$$\begin{aligned}\tilde{X} &= gX_{obst} + (1-g)X_{ball} \\ \tilde{Y} &= gY_{obst} + (1-g)Y_{ball}\end{aligned}\quad (3)$$

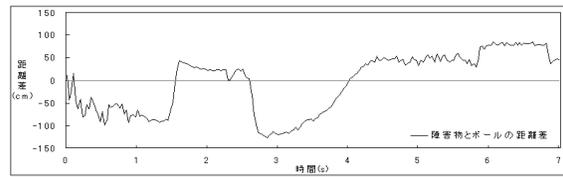
さらに、上で得られた目標点の相対座標より、式 (4) のようにロボットの目標移動速度を決定する。ここで V はロボットの最高速度であり、 \tilde{v}_x, \tilde{v}_y は全方向移動機構の制御入力となる移動速度の x 成分と y 成分である。ただし、ロボットの目標回転速度 $\tilde{\omega}$ に関しては、常に目標ゴールの方向を向くように \tilde{v}_x, \tilde{v}_y とは独立に制御を行っている。

$$\begin{aligned}\tilde{\theta} &= \tan^{-1}\left(\frac{\tilde{Y}}{\tilde{X}}\right) \\ \tilde{v}_x &= V \cos \tilde{\theta} \\ \tilde{v}_y &= V \sin \tilde{\theta}\end{aligned}\quad (4)$$

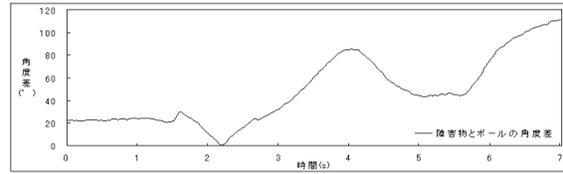
2.2 全方向移動ロボットによる走行実験

フィールド上に障害物を配置し、サッカーロボットが適切に障害物回避を行いながらボールをシュートすることができるか検証を行った。実験の手順として、まずフィールド上に障害物を配置せず、ドリブルと回り込み目標点決定ファジィルールのみを用いてシュート行動を行う。次にロボットが通過した軌道上に障害物を配置し、階層型ファジィ行動制御でのシュート行動を行う。シュート行動の実験結果を図 3 に示す。

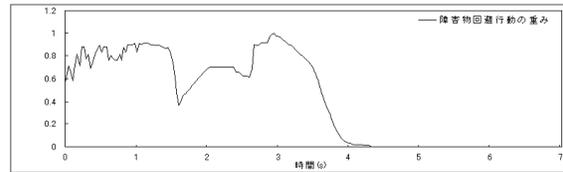
図 4(a)~(c) のグラフにおいて、約 2.2sec の付近が障害物とボールの角度差が 0° になる状態である。しかし、図 4(a) の障害物とボールの距離差が約 1.5 ~ 2.7sec の付近で大きく変化している。本来ならば障害物とボールの距離差 (図 4(a)) と角度差 (図 4(b)) は滑らかに変化するはずであるが、ボールに隠れが生じたため正しい距離情報が得られなかったことを示している。また、図 4(c) において障害物回避行動が選択



(a) 障害物とボールの距離差



(b) 障害物とボールの角度差



(c) 障害物回避行動の重み

図 4. シュート行動のファジィルール入出力

されるべき状況において、重みが著しく低下し適切な回避行動が行われていないことがわかる。

このように、対象物の正しい情報が得られない場合、入力情報が信頼できるものであるかどうかの指標を設け、正しい情報ではないと判断された場合にはその入力情報を用いるのではなく、予測値などを用いて行動制御を行うことが望ましいと考えられる。次章では認識信頼度に基づく階層型ファジィ予測行動制御について述べる。

3 階層型ファジィ予測行動制御

図 5 に本研究で提案する認識信頼度に基づく階層型ファジィ予測行動制御手法の概念図を示す。ここでは比較的動作が単純な例題として、キーパーロボットの防御行動を選んだ。対象物体の計測情報に不確かさが含まれる原因として、センサが他の物体を認識している、対象物体が障害物に隠れ正しい情報が得られないといった 2 つの要因が考えられる。前者の物体の誤認識に関しては、図 5 中の物体の予測値と取得された値との位置誤差をとることにより、誤認識しているのかどうかを判断する。また物体の隠れに関しては、ビジョンシステムから得られる物体の認識フラグ値 (0,1) を用いて認識度を算出し、予測値を用いて行動できる状態であるかどうか

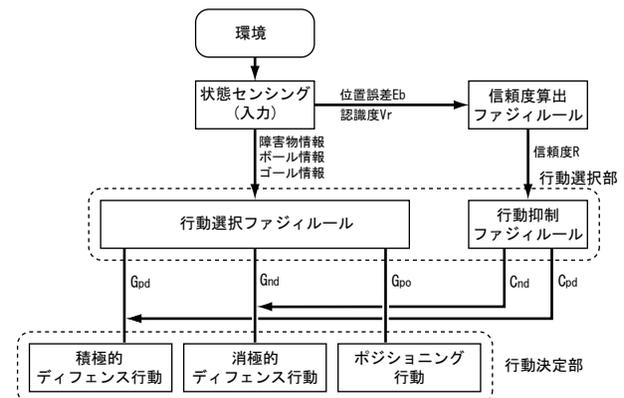


図 5. 階層型ファジィ予測行動制御手法

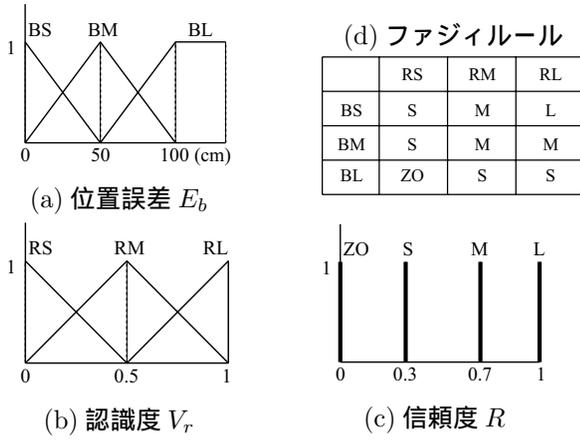


図 6. 信頼度算出ファジィルール

を判断する。総合的な情報の信頼度は予測誤差と認識度を入力とし、信頼度算出ファジィルールを用いて求める。この信頼度の値を基に、対象物の情報をそのまま用いてよいかどうかを判断し、信頼度が高い場合には計測座標をそのまま用いて従来の階層型ファジィ行動制御を行う。また、信頼度が低い場合には予測座標を用いて階層型ファジィ行動制御を行い、さらに信頼度の値に応じて、行動抑制ファジィルールにより積極的ディフェンス行動と消極的ディフェンス行動の抑制を行う。本研究では、信頼度の算出については比較的隠れや誤認識が生じやすいボールの認識を対象とした。

3.1 対象物位置誤差の算出

最小 2 乗法を用いて過去の位置情報 (x 座標と y 座標) の関数近似を行い、式 (5),(6) のように求められた 1 次関数を基に対象物の予測位置 (\hat{x}_i, \hat{y}_i) を算出する。

$$\hat{x}_i = a_1 i + a_0 \quad (5)$$

$$\hat{y}_i = b_1 i + b_0 \quad (6)$$

ここで i はフレーム番号であり、 x_i, y_i は i フレーム目取得された x 座標と y 座標である。また、式 (5),(6) 中の (a_0, a_1) と (b_0, b_1) は以下の式 (7),(8) により求めることができる。

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^m i^2 \sum_{i=1}^m x_i - \sum_{i=1}^m i x_i \sum_{i=1}^m i}{m(\sum_{i=1}^m i^2) - (\sum_{i=1}^m i)^2}$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^m i x_i - \sum_{i=1}^m i \sum_{i=1}^m x_i}{m(\sum_{i=1}^m i^2) - (\sum_{i=1}^m i)^2} \quad (7)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^m i^2 \sum_{i=1}^m y_i - \sum_{i=1}^m i y_i \sum_{i=1}^m i}{m(\sum_{i=1}^m i^2) - (\sum_{i=1}^m i)^2}$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^m i y_i - \sum_{i=1}^m i \sum_{i=1}^m y_i}{m(\sum_{i=1}^m i^2) - (\sum_{i=1}^m i)^2} \quad (8)$$

以上の計算式よりボールの位置予測を行う。この結果より、予測位置と計測位置の位置誤差 E_b を式 (9) を用いて求める。ここで、 (x, y) が計測位置であり、 (\hat{x}, \hat{y}) が予測位置である。

$$E_b = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2} \quad (9)$$

3.2 対象物の認識度の算出

ボールの認識度 V_r の算出は、ロボットに搭載されたビジョンシステムから取得される認識フラグ $r_i (= (0, 1))$ の値の履歴を用いて行う。認識フラグはボールがロボットからある程度近い距離にあり、かつボールが見えている場合に 1 となるように設定されている。ここで i はフレーム番号である。ボールの隠れを想定した場合、認識度について、ボールが隠れた時は予測情報を用いて制御を行うためゆっくり下がり、ボ-

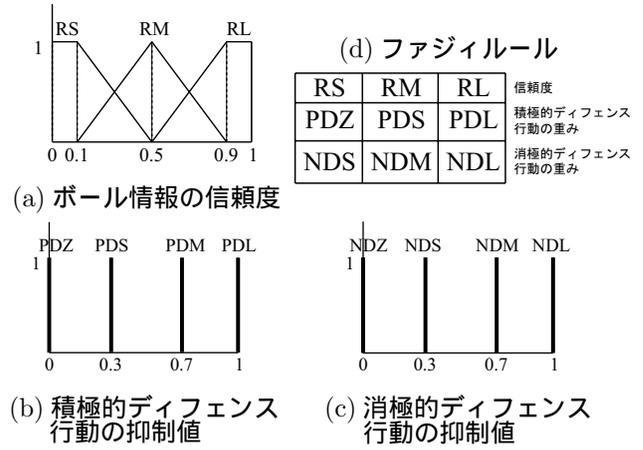


図 7. 行動抑制ファジィルール

ールが認識された時はできるだけ信頼性の高い情報を用いるため、大きく上がるように変化することが望ましいと考えられる。本研究では、認識度を以下の式で定義した。

$$V_r = \frac{\sum_{i=0}^{60} (60-i)^2 r_i}{\sum_{i=0}^{60} (60-i)^2} \quad (\text{ボールが隠れた時}) \quad (10)$$

$$V_r = \frac{\sum_{i=0}^{30} (30-i)^2 r_i}{\sum_{i=0}^{30} (30-i)^2} \quad (\text{ボールが発見された時}) \quad (11)$$

式 (10),(11) の異なる点は、過去のどれだけの情報を用いて重み付けを行うかである。ボールが隠れた時には過去 60 フレーム分の情報を用いているため、ボールが認識できなくなっても認識度は下がりにくくなっている。また、ボールが発見された時には過去 30 フレーム分の情報だけを用いて、認識度が大きく上がるようになっている。

3.3 信頼度算出ファジィルールと行動抑制ファジィルール

信頼度算出ファジィルールとは、予測位置と計測位置の位置誤差 E_b と認識度 V_r を用いて信頼度の算出を行うファジィルールである。行動抑制ファジィルールとは、ボール情報の信頼度によって積極的ディフェンス行動と消極的ディフェンス行動の出力を抑制するファジィルールである。図 6,7 にそれぞれのファジィルールおよびメンバーシップ関数を示す。

3.4 最終的な制御出力の算出

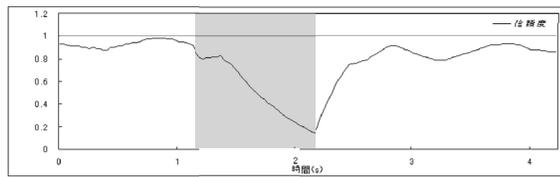
式 (12) が階層型ファジィ予測行動制御の最終的な出力を求める式である。ボール情報の信頼度が高い時には通常の階層型ファジィ行動制御を行い、信頼度が低い時には積極的ディフェンス行動と消極的ディフェンス行動の抑制を行う。

$$P_x = \frac{G_{pd}(1-C_{pd})P_{xpd} + G_{nd}(1-C_{nd})P_{xnd} + G_{po}P_{xpo}}{G_{pd}(1-C_{pd}) + G_{nd}(1-C_{nd}) + G_{po}}$$

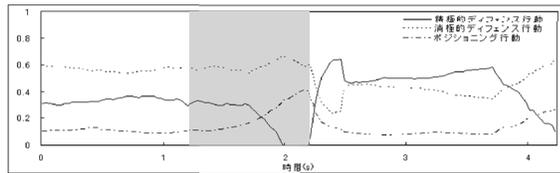
$$P_y = \frac{G_{pd}(1-C_{pd})P_{ypd} + G_{nd}(1-C_{nd})P_{ynd} + G_{po}P_{ypo}}{G_{pd}(1-C_{pd}) + G_{nd}(1-C_{nd}) + G_{po}}$$

$$\omega = \frac{G_{pd}(1-C_{pd})\omega_{pd} + G_{nd}(1-C_{nd})\omega_{nd} + G_{po}\omega_{po}}{G_{pd}(1-C_{pd}) + G_{nd}(1-C_{nd}) + G_{po}} \quad (12)$$

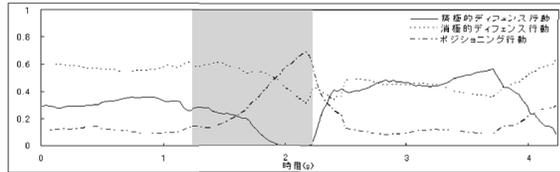
ここで G_{pd}, G_{nd}, G_{po} は、行動選択ファジィルールから算出される積極的ディフェンス行動、消極的ディフェンス行動、ポジショニング行動のそれぞれの重みであり、 $P_{xpd}, P_{ydp}, \omega_{pd}$ は積極的ディフェンス行動の制御出力、 $P_{xnd}, P_{ynd}, \omega_{nd}$ は消極的ディフェンス行動の制御出力、 $P_{xpo}, P_{ypo}, \omega_{po}$ はポジショニング行動の制御出力である。そして C_{pd}, C_{nd} が積極的ディフェンス行動と消極的ディフェンス行動の抑制値であり、前述の行動抑制ファジィルールの正規化された出力値がそのまま用いられる。



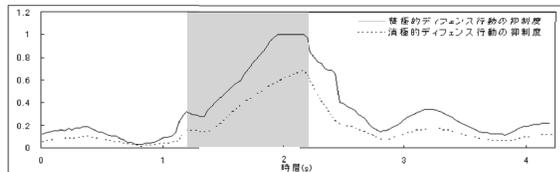
(a) ボール位置情報の信頼度



(b) 行動重み (行動選択ファジィルール)



(c) 行動重み (行動抑制ファジィルール適用後)



(d) 行動抑制値

図 8. 予測行動制御実験結果

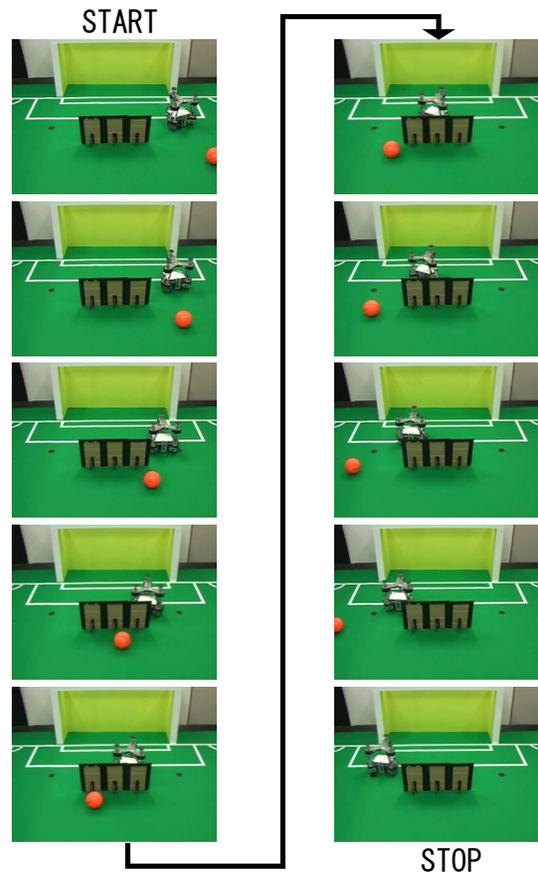


図 9. キーパーロボットのディフェンス行動

4 予測行動制御実験

ボールの予測座標と計測座標の誤差と認識度を入力とし信頼度算出ファジィルールより推論される信頼度、行動選択ファジィルールの重み、行動抑制ファジィルールでの抑制後の重み、積極的ディフェンス行動と消極的ディフェンス行動の抑制値をそれぞれ図 8 に示す。図 8(c) において、最も大きい重みの行動の影響が最終的なロボットの行動出力に現れる。約 1.1sec ~ 2.1sec の間がボールが認識できていない状態であり、図 9 にロボットの行動のコマ撮り画像を示す。

行動抑制ファジィルールを用いた予測行動制御では、ボール位置情報の信頼度が低下した場合には予測座標を用いて行動制御を行っているため、図 9 のようにボールに隠れた状態であっても追従できていることがわかる。図 8(a) のボール位置情報の信頼度の変化において約 1.2sec ~ 2.2sec の間でボールが認識できておらず、信頼度は減少している。この信頼度を用いて行動抑制ファジィルールが推論した積極的ディフェンス行動と消極的ディフェンス行動それぞれの抑制値は図 8(d) のように変化し、約 1.9sec ~ 2.2sec の間では積極的ディフェンス行動の抑制値が 1 となり、最終的な制御出力を求める際の積極的ディフェンス行動の重みは 0 になる。図 8(b) でも約 2.0sec 付近で消極的ディフェンス行動が選択されているが、行動抑制ファジィルールを用いることにより図 8(c) のようにポジショニング行動を選択していることがわかる。このように行動抑制ファジィルールは、信頼度が低下した場合にはボールの詳細な情報を用いる行動を抑制し、タスク達成に向けより効率的な行動をとることができることがわかった。

5 結言

本研究では、複雑な環境下での自律移動ロボットの制御において、ロボットの入力情報に信頼度という指標を与え、信

頼度の変化に応じて適切な行動選択を行う認識信頼度に基づく階層型ファジィ予測行動制御を提案した。また、提案した手法の有効性を検証するために、比較的動作が簡単なキーパーロボットの防御行動を例題に実験を行った。その結果、対象物の隠れやセンサの誤認識などにより安定した情報取得ができていない環境であっても、提案手法を用いて取得できた情報の範囲内でタスク達成に向け、適応的な行動をとることができた。

今後の課題として、全く異なるタイプのセンサを用いた情報比較などによりさらに信頼度の精度を上げることができるのではないかと考えられる。また、ロボットの行動に関してもさらに多くのサブタスクを必要とするフィールドロボットに本手法を搭載し、実際のサッカーの試合などの動的な環境での有効性の検証実験を行いたい。

参考文献

- [1] 浅間一, 嘉悦早人, 尾崎功一, 遠藤勲, 佐藤雅俊, 松本明弘, “3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発,” 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2, pp.249-254 (1996)
- [2] F.Hikari, K.Nobuyuki and Y.Kazuo, “Intelligent Control of Autonomous Soccer Robots Compensating for Missing Information,” *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.9, No.3, pp.268-275 (2005)
- [3] W.Shimizuhira, K.Fujii and Y.Maeda: “Fuzzy Behavior Control for Autonomous Mobile Robot in Dynamic Environment with Multiple Omnidirectional Vision System,” *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004)*, CD-ROM, SA2-M3 (2004)