

〈一般研究課題〉 妨害行動エージェントを考慮した協調行動  
システムの研究

助成研究者 愛知県立大学 成瀬 正



## 妨害行動エージェントを考慮した協調行動システムの研究

成瀬 正  
(愛知県立大学)

### 1. はじめに

少子高齢化が進む近未来のわが国社会においては、人と協調して動作を行い、省力化に貢献するロボットの実現が期待されている。たとえば、リハビリテーションにおける機能回復訓練は、決まった動作の繰り返し実行をする場合が多く、このような、訓練を人間に代わって支援するロボットシステムの実現が期待される。また、車椅子サッカーが盛んに行われているが、練習相手が少ないことが悩みであるという話を聞いている。この練習相手をロボットが勤めることが出来たなら、ロボットの社会進出も一段と進むことであろう。そのためには、ロボットの協調に関する基礎的な技術を開発する必要がある。

RoboCupは人工知能および知能ロボットの分野の研究促進と教育を目的として始まった国際的な計画（イニシアティブ）である<sup>[1,2]</sup>。ロボットによるサッカーという標準的な問題をとりあげ、技術開発や研究開発を競う。1997年に第1回大会が名古屋で開催され、以降毎年1回世界大会が開催されている。競技リーグも年を追って多彩になり、また参加チームも年々増えてきている。2000年からは災害救助を目的としたRoboCup Rescueリーグが併設され、災害現場での人命救助に資するロボットの開発も進められている。RoboCupで開発された技術は、人とロボットの協調を目指すものであり、上記の機能回復訓練や車椅子サッカーに貢献するロボットと密接に結びつくものである。

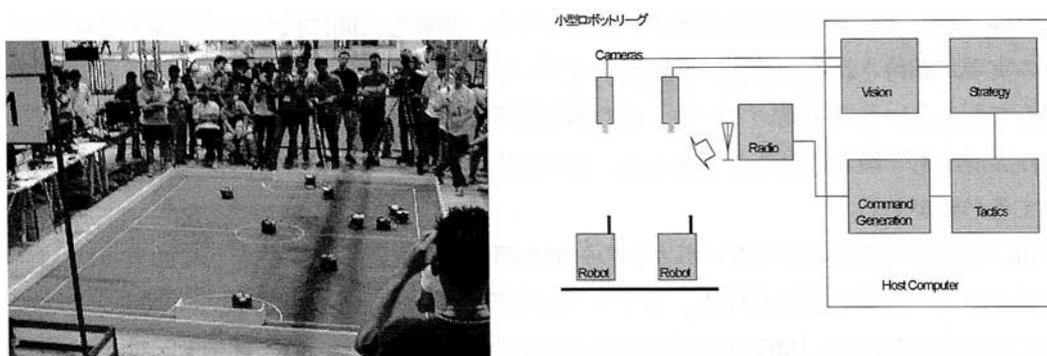
我々は、RoboCup小型リーグに参加している。もとよりロボットは多数の要素技術を総合した総合システムであるから、小型リーグに用いられる技術も多彩である。高度な要素技術がバランスよく総合されたシステムを開発することが目標であるが、実際は、それぞれのチームの得意とする技術がそのチームの特徴を現している。例年、参加チーム間で技術情報の交換が行われ、翌年には、それらの技術をさらに発展させたシステムが登場する。小型リーグでは、ビジョンシステム、キックおよびドリブル装置、戦略アルゴリズム等が主要な要素技術であり、各チームは工夫を凝らした技術を実現している。我々は、これまでに、ロボットシステムを構築し、ドリブル、シュート、パスなどの基本的な動作を実装してきた。また、複数台のロボットでゴールを守る協調動作技法なども開発してきた。これらの技術をベースとして、さらに高度な協調動作、具体的には、3台のロボ

ットがパス回しを行ってゴールを決める協調動作、の検討を進めている<sup>[5]</sup>。また、相手行動の学習という観点から、相手ロボットの正面方向を検出する検討も進めている<sup>[6]</sup>。本稿では、これらの検討結果について述べる。

## 2. RoboCup小型リーグの概要

小型リーグは、直径18cm高さ15cmの円筒に入る大きさのロボット5台以内でチームを構成し、4.9m×3.4mの大きさのフィールドでサッカーを行う（図1）。ボールはオレンジ色のゴルフボールを使用する。フィールド上空4mには複数のカメラが設置され、この画像をホストコンピュータに取り込んで画像処理を行い、ロボットやボールの位置を検出する。その結果を基に戦略に基づき行動計画を立て、行動指示を各ロボットに無線で送信する。このビジュアルフィールドバックループが毎秒30回～60回繰り返される。

試合は、レフェリーの持つコンピュータから、キックオフ、中断、再開などの信号が送られるので、チームのコンピュータはそれを受けて、適切な制御を行う。試合中（インプレー中）は、人間がチームのコンピュータ操作することはできない。



(a) 試合風景

(b) システム構成

図1 小型ロボットサッカーシステムの構成

## 3. 複数ロボットの協調

### 3.1 協調動作の必要性

人間は容易に生活環境に適応できるが、ロボットはその静的な戦略に基づいて動くため環境の変化にはもろい。ロボットが人の環境適応能力を身につけたら、人とロボットの協調の場は飛躍的に増すであろう。我々は、相手ロボットに対応して協調動作する複数の味方ロボットがこの方向の研究では有用であると考えている。そこで、以下では、RoboCup小型リーグで使われるロボットの協調を考える。小型ロボットの特長は、

- ・ 全方位移動可能な車輪を駆動するシステムである。
- ・ ドリブル装置とキック装置を有する。
- ・ ボールがキッカーの前にあるか否かを検出する近接センサを有する。

である。上記の条件下で、3台のロボットの協調動作を実現する方法について述べる。

このような状況は、ボールを持っているロボットが、相手ロボットにシュートラインを防がれて、直接ゴールを決めることが困難な場合に発生する。このような場合次にとる手段は、ドリブルしながら場所を移動するか、味方ロボットにパスをするかである。RoboCup小型リーグのルールでは、ボールをドリブルしながら長い距離を移動することは禁止されている。それゆえに、パスプレーを積極的に使ってゴールを決めるコンビネーションプレーが有利となってくる。

### 3.2 実現すべき協調動作

協調動作の第一の形態は、ダイレクトプレーである。これは、ロボットがボールを保持あるいはドリブルすることなく、ボールがロボットにきた瞬間に新しい方向へ蹴ることで、その速度ベクトルの方向を変えるものである。ダイレクトプレーは、味方ロボット間でボールの動きを止めることなく連続的にパスを行うことを可能にする。この結果、相手ロボットは、ボールをインターセプトすることが困難になり、また、ゴールを安定して守ることが困難になる。さらに、実際のゲームでは、相手ロボットは、ボールを持っている味方ロボットがゴールに向かってシュートすることを防ぐ方向に動きがちなので、ボールを受ける第二の味方ロボットは比較的容易にゴールを達成することが可能となる。

もう一つの協調は、1-2-3シュートである。これは、3台のロボット(A,B,C)が協調し、ボールを持っているロボット(A)が、ロボット(B)に向かってボールをキックし、ロボット(B)は、ダイレクトプレーによりロボット(C)に向かってボールをキックし、最後にロボット(C)はゴールに向かってシュートをするプレーである。このプレーが成功裏に実行できれば、ゴールの成功確立はさらに高くなる。なぜなら、ボールを俊敏にハンドリングして、その進行方向を速やかに変えるため、相手ロボットがボールに追隨してゴールを守ることが極めて難しくなるからである。

## 4. ダイレクトプレーの実現

1-2-3シュートプレーの基本はダイレクトプレーである。そこで、まず、ダイレクトプレーのアルゴリズムを述べる。ダイレクトプレーは2台のロボット(A,B)間で行われる。その動作は、1) ロボットAがボールを保持し、ロボットBに向かってキックする、2) ロボットBは、飛んできたボールを保持することなく別の方向に向かってキックする、の2段階で実現される。

### [ダイレクトプレーアルゴリズム]

Aをボールを持っているロボット、Bをボールを受けるロボットとする。

Step1 ロボットBは、シュートラインが確保できるオープンスペース（あるいは、他のロボットへのパスラインが確保できる位置）に移動する。すなわち、シュートラインの場合、ロボットBは、自分とゴールを結ぶ線上に相手ロボットがいない適当な位置に移動する（図2）。もし、そのような位置が見つからない場合は、次の機会を探す。

Step2 ロボットAはロボットBに向かってボールをキックする。ここでは、キックラインをブロックする相手ロボットはいないものとする。そのようなキックラインが確保できない場合は、次の機会を探す。

Step3 ビジョンシステムを使って、ボールの速度を計測する。そして、ボールがロボットBに出会う位置と時間を計算する。

Step4 ロボットBは時刻 $t_2$ に図2の $B_{t_2}$ の位置にいるように移動する。

Step5 ロボットBの近接センサーは、ボールがロボットBに接触した瞬間を検出し、その瞬間にボールをキックする。

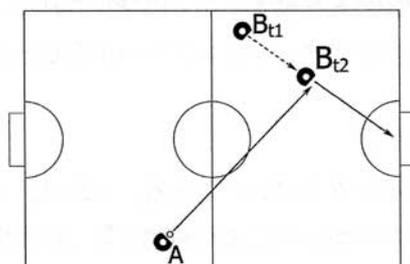


図2 ダイレクトプレー

### 5. 1-2-3シュートの実現

1-2-3シュートを実現するためには、味方ロボットは、相手ロボットに邪魔されることなくパスができる位置を確保できなければならない。それが可能かどうかを判断するために、優勢領域法<sup>[3]</sup>を利用する。

#### 5.1 優勢領域法

優勢領域法は、Voronoi図法<sup>[3]</sup>の一種である。これは、味方と相手方のエージェント間で計算される。優勢領域法により、サッカーフィールドは2つの領域に分けられる。一方は、味方ロボットが相手ロボットより先に到着できる領域、他方は、相手ロボットが先に到着できる領域である。

優勢領域の計算結果を図3に示す。網掛け領域は相手ロボットの優勢領域、他は味方ロボットの優勢領域である。この計算は次のようにしてできる。

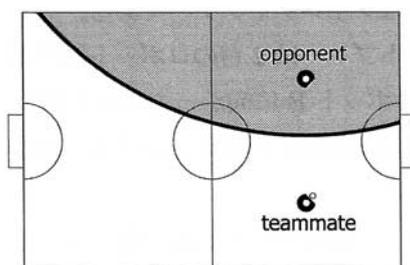


図3 優勢領域の例

まず、 $v_1$ と $a_1$ を味方ロボットの初期速度と加速度とし、 $v_2$ と $a_2$ を相手ロボットの初期速度と加速度とする。また、 $(x_1, y_1)$ と $(x_2, y_2)$ をそれぞれ味方と相手ロボットの現在位置とする。そのとき、与えられた位置 $(x, y)$ に対して、各ロボットと与えられた位置との距離と到着時間は、次式で与えられる。

$$L_1 = v_1 t_1 + \frac{1}{2} a_1 t_1^2 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (1)$$

$$L_2 = v_2 t_2 + \frac{1}{2} a_2 t_2^2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \quad (2)$$

これらの式を $t_1$ と $t_2$ について解いて、次の式を得る。

$$t_1 = \frac{-v_1 + \sqrt{v_1^2 + 2a_1 \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}}}{a_1} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{-v_2 + \sqrt{v_2^2 + 2a_2 \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}}}{a_2} \quad (4)$$

初期速度が0の場合には、式(3)と(4)から、次の式を得る。

$$(a_2^2 - a_1^2)x^2 + (a_2^2 - a_1^2)y^2 + 2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y + x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 = 0 \quad (5)$$

式(5)は優勢領域の境界を表す。

複数の味方ロボットおよび相手ロボットがある場合の優勢領域は、味方ロボットと相手ロボットのすべての組み合わせに対して優勢領域の境界を計算し、その境界によってフィールドを部分領域に分割し、各部分領域毎に一番早く到着するロボットの優勢領域とする。

## 5.2 パスプレーと優勢領域

まず、優勢領域法に基づくパスプレーについて検討する。図4は、その典型的な配置を示す。

味方Bと味方Aとの間にはパスラインがあり、また味方Bからゴールへのシュートラインがある。それゆえ、AはBにパスをすることができる。図4の優勢領域を図5に示す。網掛け部分が味方の優勢領域である。もし味方Aが味方Bに向かって遅いボールをキックすると、相手ロボットがボールを容易にインターセプトできることは図5から容易にわかる。

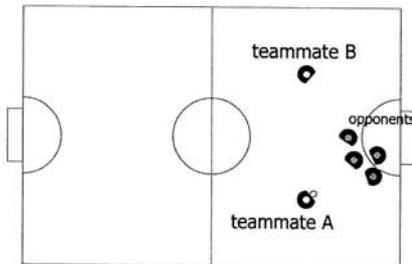


図4 典型的な攻撃配置

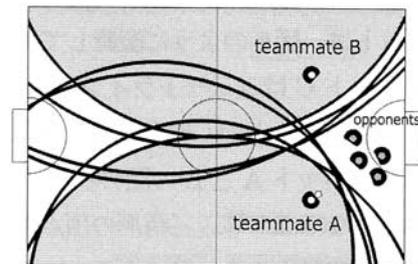


図5 図4の優勢領域

一方、図6に示すように、3台の味方ロボットが作る優勢領域では、相手ロボットの回りにパスラインを確保できる。したがって、優勢領域法は、パスができるかどうかを判定する有用な方法である。実際の試合では、この基準を緩めることはありうる。しかしながら、ダイレクトプレーを行うか否かの判断基準として、優勢領域法は有益である。

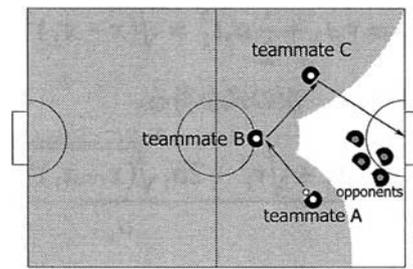


図6 3台のロボットの協調動作例

### 5.3 1-2-3シュートのアルゴリズム

1-2-3シュートをいつ行うか？次のアルゴリズムは、その選択を行うアルゴリズムである。

#### [行動選択手順]

ロボットAをボールを保持しているロボットとし、ロボットB,Cを協調するロボットとする。

if (Robot A がシュートラインを確保できる) {Robot Aはシュートを行う}

else {

シュートラインを確保できるオープンスペースを探し、そこへRobot Cを移動させる。

優勢領域を計算する。

if (AとCの間で優勢領域内にパスラインを確保できる)

{AとCの間でダイレクトプレーを行う} else

{ Robot Bを適切な位置に移動させ、ロボットA,B,C間で1-2-3シュートを実行する}}

1-2-3シュートが選択された場合の、実行アルゴリズムは次のようになる。

#### [1-2-3シュートアルゴリズム]

ロボットAをボールを保持しているロボットとし、ロボットB,Cを協調するロボットとする。また、ロボットは、図6のように配置してあるものとする。

Step1 ロボットCはシュートラインが確保できるオープンスペースに移動する。(これは、ダイレクトプレーのStep1と同じ動きである。)

Step2 もしロボットAとBの間のパスラインが相手の優勢領域を通過するなら、ロボットBは図7に示すようなほぼ二等辺三角形の頂点となる位置に移動する。この結果、パスラインが、味方の優勢領域内で確保することができる。(これができない場合は、スケジュールをしない)。そして、ロボットBはロボットCの方向を向く。

Step3 ロボットAはBにボールをキックし、ついでロボットBはCにキックする。この動作は、ダイレクトプレーのアルゴリズムに基づく。

Step4 ロボットCはゴールに向かってボールをキックする。

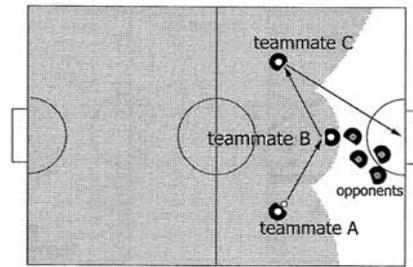


図7 1-2-3シュートの配置

## 6. 協調動作実験と考察

1-2-3シュートアルゴリズムをシステムに実装し、成功率を計測した。ただし、第一ステップとして、相手ロボットのいない環境で実験を行った。

### 6.1 実験環境

図8に実験で使用したロボットを示す。図の左は、カバーをかぶせたロボットであり、右はそれをはずしたものである。(試合では、カバーをかぶせて使用する。) ロボットには、直径60mmの全方位移動可能な車輪が4つついている。4つのモータがそれぞれの車輪を駆動する。さらに、ドリブル装置、キック装置、赤外線近接センサ、通信装置がある。日立製SH2プロセッサを制御プロセッサとして使用し、SH2の内蔵周辺回路を利用してモータなどの装置を制御している。ロボットは、最大150cm/secで移動できるが、本実験では、100cm/secの移動速度に制限した。

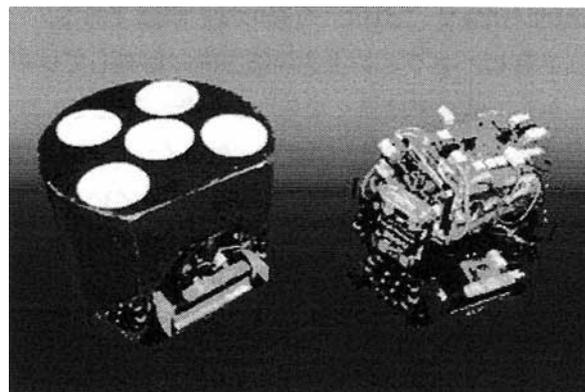


図8 ロボットの概観

ホスト計算機は、Athlon64 3500+ CPUを使用している。2.2GHzで動作し、512MBのメモリを実装している。OSはDebian Linuxである。ホスト計算機は、無線通信装置を利用して、ロボットコマンドを送信し、ロボットを制御する。

### 6.2 実験結果

ロボットがボールの移動方向に垂直な方向からボールをキックするのは難しく、ボールの移動方向に平行な方向にボールをキックすることは比較的易しい。そこで、図9、10に示す2通りの配置を設定して実験を行った。それぞれの設定に対して20回の実験を行った。表1に実験結果を示す。

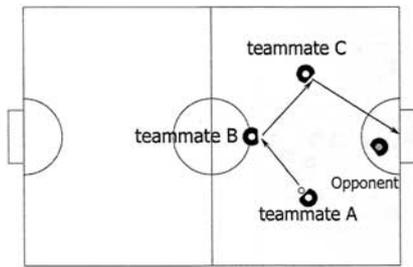


図9 実験1の配置

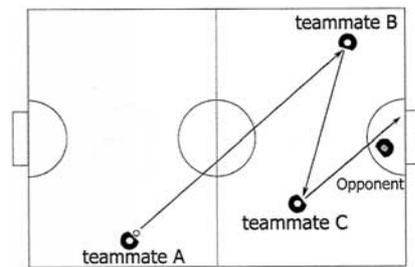


図10 実験2の配置

	成功	失敗	成功率(%)
実験1 (図9)	4	16	20
実験2 (図10)	12	8	60

表1 1-2-3シュートプレイの成功率

### 6.3 考察

パスラインとキックラインの方向に加えて、パスを行う2台のロボット間の距離が、成功率を上げる上で重要である。なぜなら、距離が長くなると時間に余裕ができて、ロボットがボールが来る予定地点に移動をする制御が容易になるからである。しかしながら、一方で、距離が長くなると相手ロボットにインターセプトの機会を多く与えることになる。それゆえ、図7に示した配置を実現する手法を模索しなければならない。これは、今後の検討課題である。

以前の実装では、ロボットBはパスライン上を前後方向に移動してロボットCにキックをしていた(図9,10参照)。しかし、成功率は良くならなかった。そこで、ロボットBの制御を改良して、図11に示すように、ロボットBからCへのキックラインに直交する方向に移動するようにした。この結果、成功率は改良前の2倍に上昇した。これがうまくいく理由は、AとBの間お距離が一定にとれ、なおかつA,B,CのV字型のキックラインが保持できることによると考えられる。

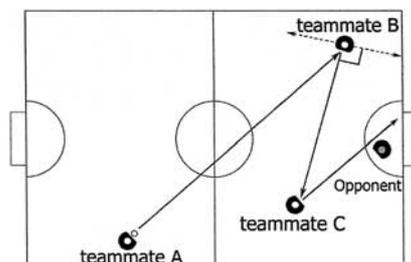


図11 ロボットBの制御方法の改良

## 7. 相手ロボットの方向検出

次に、相手行動を学習する上で必要となる、相手ロボットの正面方向の検出の問題について述べる。

ロボットの配置、向きに関する情報は、戦略・戦術を考える上で極めて重要である。位置情報はフォーメーションの解析に、また、各ロボットの個体情報や方向は、ボールの保持判定や、パスコースの予測などのために必要となる。

このような情報は、もちろん味方のロボットを制御するために必要であるが、相手ロボットについても言えることで、特に試合中に相手の行動を分析して自チームのロボットの行動を決定することは戦略上きわめて重要となる。

RoboCup小型リーグでは、ロボット上部に取り付けられたマーカーを、位置、方向の検出のための情報として用いる。フィールド上空に設置されたカメラ画像を取り込み、画像処理によってこれらを求める。マーカーにはメインマーカーとサブマーカーがあり、メインマーカーによってロボットの位置を検出し、サブマーカーによって各々のロボットの個体識別や方向検出を行っている。しかし、ルールによって取り付けが定められている円形のメインマーカーとは異なり、サブマーカーには色以外の規定がない。そのため、図12に示すようにサブマーカーの外観はチームによって様々である。サブマーカーからロボットの向き情報を取得する方法は様々であり、予め相手チームが用いるサブマーカーの形状、配置、サイズなどの情報を得てアルゴリズムの形で準備しておくことは困難である。



図12 チームによって異なるマーカーの例

そこで次のような方法により、相手ロボットの正面方向を検出する検討を行った。まず、マーカーの画像から面積や重心座標といったパラメータ群を抽出し、これらの中から最も特徴的なマーカーを統計的に求める。そして、円形のチームマーカーと最も特徴的なサブマーカーのなす角からロボットの正面方向を求める。以下、その詳細について述べる。

### 7.1 相手ロボットの正面方向検出方法

#### 1) マーカーの種類

各チームのロボットの上部には、マーカーが付けられている。マーカーにはメインマーカー(チームマーカー)とサブマーカーがあり、それぞれ次のようにルール[4]で規定されている。

##### ・メインマーカー

直径5cmの円形状の青または黄色のマーカー。色を利用して敵味方の判別に用いられる。ロボットの視覚的な中心に取り付けることが義務付けられている。

## ・サブマーカー

各チームが任意で付けるマーカー。ロボットの個体番号(ID)や方向検出に使用される。使用可能な色は黒・白・ライトグリーン・ライトピンク・シアンの5色のみであるが、形や大きさ、配置に制約はない。

各ロボットの位置検出には、メインマーカーを利用する。フィールド上空に設置されたCCDカメラから得られる画像から、黄色または青色の色領域を検出し、その重心を計算することによってロボットの中心座標を得る。メインマーカーは必ず取り付けるように義務付けられているため、相手の位置検出は容易である。しかし、メインマーカーは円形状であるが故に方向性がなく、ロボットのIDや方向を検出することは不可能である。この問題を解決するために付けられているのがサブマーカーであるが、先に述べたように、ロボットの外観や、それに伴う個体識別や方向検出アルゴリズムは各チーム様々であるため、予め相手ロボットの正面方向を検出するプログラムを用意しておくことは困難である。

したがって、サブマーカー群を用いた汎用的な相手ロボットの個体識別ならびに方向検出方法が必要となる。ここでは、試合直前の準備の段階で取得した相手ロボットのマーカー群から、各ロボットについて、最も特徴的な値を持つマーカーを選択し、これを用いることによって相手ロボットの正面方向を検出する方法について述べる。

## 2) 特徴的なサブマーカーの探索

試合前に、相手ロボットのN個のサブマーカーから最も特徴的な値を持つサブマーカー（以下、特徴マーカー）を求める。サブマーカーは、メインマーカーの中心から半径9cm以内の領域に含まれるマーカー候補を探索することによって取得する。この特徴マーカーを利用して、個体識別並びに方向検出を行う。

メインマーカーMの重心を $(x_M, y_M)$ 、特徴マーカーGの重心を $(x_G, y_G)$ とし、画像水平軸(x軸)とのなす角度 $\theta$ を便宜的にロボットの方向とする。試合前に正面方向 $\phi_0$ が判明している場合には、その角度の差だけ補正する。なお、なす角は次の式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_M - y_G}{x_M - x_G} \quad (6)$$

まず、サブマーカー群のもつ長さ、幅、色などm個のパラメータリスト $L^{(i)} = \{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_m^{(i)}\}$ （ここで、iはサブマーカーに付けたマーカー番号( $1 \leq i \leq N$ )である。）の中から、最も特徴的な値を持つパラメータを求め、このパラメータを有するマーカーを特徴マーカーとして選ぶ。この様なm個のパラメータから特徴的な値を持つようなパラメータを1つだけ選択する方法は様々なものが考案されているが、次元数mが大きくなるとその選択は難しくなり、計算コストもかかる。そこで本研究では、簡単に特徴マーカーを検出するために判別分析法を用いた。以下に、特徴マーカーの選択方法を示す。

### Step1 分離度の計算

j番目のパラメータ値を集めた集合 $F_j = \{x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_m^{(j)}\}$  ( $j = 1 \dots m$ )を2つのクラスに分け、判別分析法を用いて分離度を計算する。

### Step2 要素数の確認

分離度が最大となる場合について、クラスに属するパラメータ値が唯一つの場合は、その分離度を  $S_j^{(0)}$  とする。属するパラメータが2つ以上の場合は、 $i=0$ 、 $S_j^{(0)}=0$  とする。

### Step3 特徴マーカーGの決定

上記の Step1、Step2 の処理を全てのパラメータ  $j$  について行い、 $S_j^{(0)}$  の最大値  $\text{Max}(S_j^{(0)})$  を計算する。そして  $S_j^{(0)}$  の最大値をとるマーカー  $i$  を特徴マーカー G とする。 $\text{Max}(S_j^{(0)})=0$  の場合は、Step1 で求めた分離度を最大にするクラスに属するパラメータ値を持つマーカーを調べ、より多くのパラメータ値をもつマーカーを特徴マーカー G とする。

### 3) 個体識別と方向検出

試合中、入力画像から作成されたパラメータリストを  $m$  次元空間内にマッピングしたベクトルと、特徴マーカーのそれとのなす角  $\psi$  を基に照合する（実験的に、 $\cos \psi > 0.95$  のとき一致するとみなしている）。前項で決定した特徴マーカーのパラメータリスト  $L_G^{(0)}$  の、特徴値としたパラメータ値  $j$  の値と比較することで、入力画像から得た相手ロボットの画像にどのロボットの特征マーカーが含まれているかを判別し、個体識別を行う。

そして、求めた画像水平軸とロボット正面方向のなす角、および特徴マーカー G とのなす角を各々  $\theta_0$ 、 $\phi_0$  とし、試合中の入力画像から求めた画像水平軸と特徴マーカー G のなす角を  $\theta$  とすると、ロボットの正面方向  $\phi$  は、

$$\phi = (\theta - \theta_0) + \phi_0 \quad (7)$$

によって求められる。

## 8. 方向検出実験と考察

### 8.1 方向検出実験

本手法の有効性を示すため、過去の RoboCup 世界大会に出場した代表的な各チームのマーカーセット A~E を用い実験を行った。各マーカーにつき角度を 10 度ずつ変化させながら、ID の検出と実際の角度との誤差を計 900 回計測した。

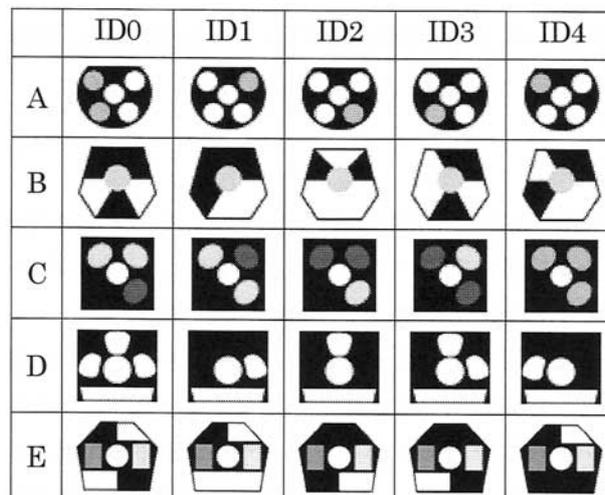


図13 実験に用いたマーカーセット

マーカセット	A	B	C	D	E
個体識別率[%]	100.0	99.4	100.0	100.0	100.0
方向誤差最大値[度]	9.81	98.4	7.27	178.0	7.96
方向誤差最低値[度]	0.09	0.10	0.04	0.19	0.00
方向誤差平均値[度]	2.95	7.15	2.18	9.72	3.19
方向誤差標準偏差	1.89	7.32	1.07	14.4	1.65

表2 個体検出率と方向検出精度

マーカセットの外観を図13に、結果を表2に示す。なお、図13におけるIDは個体番号を表し、表2における方向誤差は、実際の方向と入力画像から検出した方向の誤差を示す。

本システムの目的は戦術のための相手の行動予測であるため、方向に関しては1度単位の精度は不要と考え、期待値を個体認識率100%、方向誤差を5度以下と設定した。

実験の結果、個体識別率99.8%、方向検出誤差4.95度という結果となり、設定した期待値を満たす結果が得られた。

## 8.2 考察

実験結果をみると、図13のBやDのマーカセットでは、ロボットの方向検出に大きな誤差が含まれていることが分かる。また、マーカセットBでは、個体認識のミスが発生している。

図13のBに示したマーカセットは、サブマーカに大小のマーカを使用している。また、Dのマーカセットでは、長方形のマーカと円形のマーカを使用している。これらのサブマーカは、面積はほぼ同じであるが、形状は異なっている。しかし、本手法で使用したパラメタの中には形状を表す特徴量を用いなかったため、これらのマーカを区別することができなかつたものと考えられる。そのため、各ロボットの特徴マーカを入力画像から探索する際に、実際とは異なる特徴マーカを検出してしまったと考えられる。

一方、表2の実験結果に示した個体識別のミスや方向検出の誤差は、特徴マーカを他のロボットの特徴マーカ、または同一ロボット内の別のマーカと誤認識し、個体識別のミスや方向誤差が発生したと考えられる。

## 9. おわりに

高度な協調行動を目指して、ロボットサッカーを例題にとり、そのスキルの検討を進めている。本稿では、3台のロボットが協調してゴールを決める1-2-3シュートプレーの実現法と、戦略の高度化に貢献する相手ロボットの正面方向推定法について述べた。

前者は、2台のロボットによるダイレクトプレーをベースとして3台の連携動作に発展させたものである。このような高度な連携プレーは、相手ロボットによるゴールの守備が堅固になった小型ロボトリグでは、必須の技術となっていくであろう。実験結果では、成功率がロボットの配置によって20%から60%の範囲でばらつく。この成功率は、決して高いものではないが、現段階では3台の連携プレーを実際に実現したところに意味があると考えている。今後の課題は、この成功率を

高めることである。たとえば、成功率の低い配置から成功率の高い配置に体制を変更していく方法などが検討課題としてあげられる。

後者は、相手行動を予測するための重要な情報を与える。(多くの場合、ロボットは正面の方向に移動するからである。) 課題は、正確な正面方向の同定である。ここでは、色番号、面積、距離、角度のみを特徴量として用いたが、今後、検出精度を上げるために、複雑度などのマーカーの形状特徴量を追加したり、それに伴いカメラ精度を向上させる必要がある。また、現在は試合前に正面方向を定義していたが、試合中のドリブルの様子などから正面方向を学習させるシステムの導入も今後の課題である。

## 参考文献

- [1] <http://www.robocup.org/02.html>
- [2] <http://www.robocup.org/overview/23.html>、また、情報処理 Vol. 41、No. 3 (2000.3)のインタラクティブ・エッセイには北野氏によるロボカップの誕生に関する興味深い記述がある。
- [3] 瀧剛志、長谷川純一 “チームスポーツにおける集団行動解析のための特徴量とその応用”、信学論D-II, Vol. J81-D-II, No. 8, pp. 1802 - 1811, (1998.8)
- [4] RoboCup F180 Rules Repository  
<http://www.itee.uq.edu.au/%7Ewyeth/F180%20Rules/index.htm>
- [5] Ryota Nakanishi, James Bruce, Kazuhito Murakami, Tadashi Naruse and Manuela Veloso, "Cooperative 3-robot passing and shooting in the RoboCup Small Size League", RoboCup 2006 International Symposium, CD-ROM.
- [6] Saori Umemura, Kazuhito Murakami, Tadashi Naruse, "Orientation Extraction and Identification of the Opponent Robots in RoboCup Small Size League", RoboCup 2006 International Symposium, CD-ROM