

団体球技のゲーム分析のための集团的動き特徴量とその応用

松本貴之 瀧剛志 長谷川純一
中京大学大学院情報科学研究科

あらまし 本論文では、映像に基づく集団行動の定量的評価を行うための基礎的な特徴量について検討する。集団行動の視覚的な解析においては、その集団を構成する個人の空間的な位置関係、および、その時間的変化が重要な手掛かりとなる。本文では、集団の動きの中で作られる各個人の勢力範囲に注目し、それを“優勢領域”と呼ぶ特徴量で定式化する。この優勢領域を球技ゲームにおける行動評価に応用し、チームワークの定量化がある程度可能であることを実験的に示す。

Group motion features for analysis of team ball games and its application

TAKAYUKI MATSUMOTO TSUYOSHI TAKI JUN-ICHI HASEGAWA
Graduate School of Computer and Cognitive Sciences, Chukyo University

Abstract In this paper, we investigate some basic features for quantitative evaluation of group motion. In group motion analysis, the positional relation among individuals in the group and its time variation are very important. We formulate a sphere of influence for each individual as a "dominant region" by modifying the definition of the Voronoi region. The dominant regions are applied to teamwork evaluation in ball games.

1 まえがき

“集団行動”は、ある目的を持った人間や動物の集団がその目的を達成するために互いに協調したり競合したりすることにより形成される。このような集団行動の特徴やパターンを視覚的情報から計測・認識することができれば、セキュリティのための行動監視やスポーツにおけるゲーム分析に応用できるだけでなく、人間の行動心理を分析するための1つの道具としても利用できる可能性がある。このため、最近、ビデオ映像から人間の集団行動を計測、認識しようとする試みがいくつか行われるようになった^{[1],[2]}。

本論文では、そのような映像に基づく集団行動の定量的評価を行うための基礎的な特徴量について検討する。ここでは、具体的な対象としてとくに集団の範囲や目的が明確で、個々の行動パターンが比較的理解しやすい団体球技を取り上げる。集団行動を視覚的に解析する上で、集団を構成する個人の空間的な位置関係、および、その時間的変化は重要な要素となる。その一つの特徴量として、集団の動きの中で各個人がつくる勢力範囲というものに注目し、それを優勢領域と呼んだ^[2]。

本文では、この優勢領域をボロノイ領域の一つの拡張として定式化し、これを球技ゲームにおける行動評価に応用することを試みる。最後に実際のサッカー映像を用いて選手のチームワークの定量化がある程度可能であることを示す。

2 団体球技における集団行動

ここでの団体球技は、同数の選手からなる2つの集団（チーム）がある大きさのフィールド内で1つのボールを互いに相手ゴールへ運び、その成功時に得られる得点の大小で勝敗を決める競技であるとする。具体的にはサッカー競技を例にとる。このような競技では、一般に、選手間で行うボールの受け渡し（パス）が攻撃のための非常に有効な手段となる。ある選手がパスを出そうとするとき、それを助けるため、周囲の選手たちはそのパスを受けやすい位置に積極的に移動しようとする。ここに集団としての協調行動、即ち、チームワークが生まれる。一方、ボールを持たない側のチームにも当然守備的なチームワークが要求される。

以上のようなチームワークにおいて、各選手に要求されることは、自分の周りにその場面に応じ

た適度のスペースを確保することであると言われている。このようなスペースはパスの成功率を高め、フィールドを有効に使った多彩な攻めを可能にするため、チームワーク作りの基礎となる。

3 選手の勢力範囲

前節で述べた各選手の作るスペースは、その選手のもつ一種の勢力範囲と見なすことができる。このような勢力範囲を表現する手段としてよく使われるものにボロノイ領域^{[3],[4]}がある。

3.1 ボロノイ領域

いま、指定された n 個の点の集合を $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ とするとき各 $p_i \in P$ のボロノイ領域は、

$$V(p_i) = \{x \in R^2 \mid d(x, p_i) < d(x, p_j), \\ \forall p_j \in P - \{p_i\}\} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $d(x, y)$ は2点 x, y のユークリッド距離である。ここで、チームの選手の数 n とし、時刻 t における選手の集合を $P(t) = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)\}$ とすれば、その時刻での選手 $p_i(t)$ のボロノイ領域は、

$$V(p_i(t)) = \{x \in R^2 \mid d(x, p_i(t)) < d(x, p_j(t)), \\ \forall p_j(t) \in P(t) - \{p_i(t)\}\} \quad (2)$$

となり、これは選手の各時刻での一種の勢力範囲と見なすことができる。

3.2 優勢領域

実際のゲームにおいては、各選手はある速さで移動しており、かつ、その選手の運動能力の範囲内で加速したり方向を変えたりすることができる。そのような動的な環境の中での選手の勢力範囲を考える場合には、到達距離ではなく、到達時間の大小を基準にした方がより合理的であろう。そこで、選手 $p_i(t)$ の勢力範囲を次式で定義し直す。

$$D(p_i(t)) = \{x \in R^2 \mid t_m(x, p_i(t)) < t_m(x, p_j(t)), \\ \forall p_j(t) \in P(t) - \{p_i(t)\}\} \quad (3)$$

ここで $t_m(x, y)$ は、ある時刻の選手 y がその時刻を基点に点 x まで移動するのに必要な最短時間で、最小到達時間と呼ぶ。即ち、 D はその選手が、時刻 t に全力で移動を開始したとき、他のどの選手よりも早く到達できる領域を表す。これをここでは優勢領域 (dominant region) と呼ぶことにする。優勢領域は、一種のポロノイ領域の拡張であるが動きを反映した特徴量であるという面で異なる。また、これとは別に心理的な特徴量を用いて行動空間をモデル化し集団行動をシミュレートする研究もある^[5]。優勢領域は形式的にはポロノイ領域の定義式におけるユークリッド距離 d を最小到達時間 t_m で置き換えたものであるが、実際に、 t_m を計算するには何らかの運動モデルが与えられなければならない。

3.3 最小到達時間

時刻 t_0 における選手 $p(t_0)$ の点 x への最小到達時間を計算するには、その時刻におけるその選手の速度ベクトル $v(t_0)$ 、および、その時刻以降の加速度モデルが必要である。 $v(t_0)$ は実際のデータから与えられる。加速度モデルとしては、ここでは図1に示すような簡単なモデルを考える。これは、どの選手もある時刻を基点に任意の方向へ一定の大きさで加速できることを意味する。ただし、基点

となる時刻に加速度の方向が一つ決められると以後それは変わらないものとする。従って、時刻 t_0 において速度 $v(t_0)$ をもつ選手 $p(t_0)$ が点 x へ最も速く到達できるような加速度を $a(t_0)$ 、そのときの到達時間を t_m とすると、それらの間には次の関係式が成立つ。

$$x = \frac{1}{2} a(t_0) t_m^2 + v(t_0) t_m + p(t_0) \quad (4)$$

なお、実際の人間の加速能力を表すにはより複雑な加速モデルが必要であると思われるが、これは、今後の検討課題である。

3.4 実際の計算方法

実際の計算では指定された x に対して最小到達時間を求めるのではなく、指定された a と t に対して x を求める。具体的には、加速度 a の方向を固定し、 t を適当な間隔で変化させながら、それぞれ x を求め、その位置にそのときの t の値を出力する。実際には、1枚のデジタル画像を用意し、 x に対する画素に t の値を出力する。この処理を a の方向をいくつか変化させて行う。このとき、同じ画素に異なる t の値が割り当てられた場合にはその最小値を残す。値が求まっていない画素は周りの値で



図1 加速度モデルの例

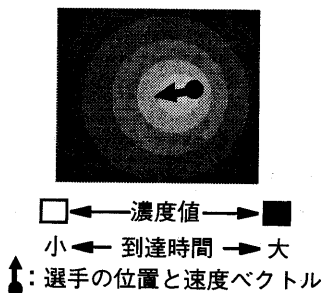
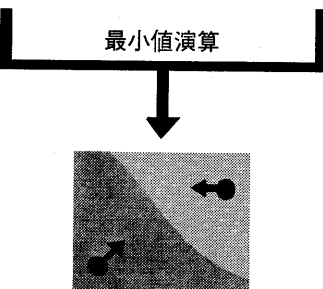


図2 到達時間パターン



選手mの到達時間パターン 選手nの到達時間パターン



選手m,nがつくる優勢領域図

図3 優勢領域の算出方法

適当に補間することによって、最終的に1人の選手の各点における最小到達時間がデジタル画像として得られる。これをその選手の到達時間パターンと呼ぶ(図2)。次に、各選手の到達時間パターンを用いて優勢領域を求める。これには、到達時間パターンの各点において最小値をもつ選手のラベルをその点の出力値とすればよい(図3)。また、選手別優勢領域図において同じチームの選手同士の優勢領域を統合すれば、チーム別優勢領域図が得られる(図4)。

4 パス評価への応用

実際の試合ではボールをいかに相手に取られずに運ぶかが重要である。このために選手が行う最も基本的な動作が、選手がボールを個人で運ぶ行為(サッカーでのドリブル)とボールの受け渡し行為(パス)である。とくにパスについてはほとんどの場合ボールを送る側と受ける側が特定できるため、最も基本的な集団プレーといえる。そこで、パスを定量化できればチームワークのより大局的な評価につながると考えられる。そこで、以下に各選手の到達時間パターンと優勢領域を利用したパスの評価について述べる。

4.1 評価項目

パスの評価項目としては、パスの成否(ボールが自チームの選手に渡るか否か)、パスの安定性(パスを受ける容易さ)、パスの有効性(パスが成

功したときに攻撃へ与える貢献度)、および、パスの危険性(パスが失敗したときに守備へ与えるダメージの程度)などを考える。例えば、パスが自チームの選手に余裕をもって受け取られ、かつ、その位置が攻撃に有利な場所であったならば、そのパスは安定性、有効性の両面で質が高いと評価される。

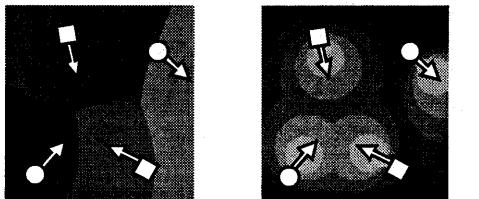
4.2 評価方法

パス評価はそのパスが出された瞬間に行われるものとする。まず、パスされたボールに最初に触れることができるのはどの選手かを算出する必要がある。これには、パスされたボールの軌跡上の各点へ各選手が到達可能な最短時間を求め、ボールの到達時間との大小関係を調べればよい。それには、パスされた時点での各選手の到達時間パターン、および、ボールの到達時間パターンを用いる。ボールの到達時間パターンとはボールの軌跡上の各点にのみ到達時間が定められているパターンとする。図5にボールの到達時間パターンの例を示す。

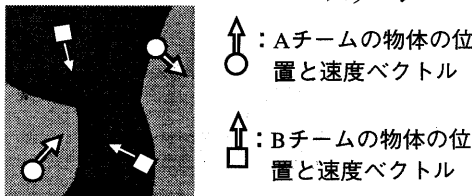
パスされたボールは、地面を転がって移動する場合と、空中を移動する場合の2種類が考えられる。

まず最初に、ボールが地面を転がって移動する場合について考える。ここでは、ボールは等速直線運動するものとする。図6(a)に2人の選手の到達時間パターン(等時間線で表されている)、および、ボールの到達時間パターンの例を示す。この例では、ボールの到達時間パターン上をボールの位置からたどっていくと到達時間2秒のときに自チームの選手の到達時間と同じになるので、その位置でその選手がボールを最初に触れることができることを示している。

次に、得られた結果を用いて、ボールの軌跡上



(a) 選手別優勢領域図 (b) 到達時間パターン



(c) チーム別優勢領域図

図4 優勢領域

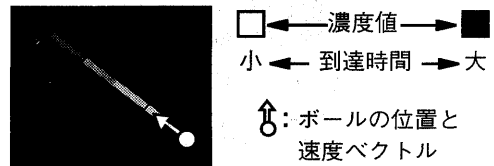


図5 ボールの到達時間パターン

の各点に対応する各選手の到達時間の大小関係を調べることで、パスされたボールを最初に受けることができる選手を決定する。即ち、ボールの軌跡を C 、点 $x \in C$ でのボールの到達時間を $t_B(x)$ 、選手の集合を P 、 k 番目の選手 $p_k \in P$ の点 x への到達時間を $t(x, p_k)$ 、パスを出した選手を p' とすれば、

$$t_B(x^*) = \min_{x \in C} \{t_B(x) \mid t_B(x) \geq t(x, p_k), \exists p_k \in P - \{p'\}\} \quad (5)$$

となるような場所 x^* に対して、

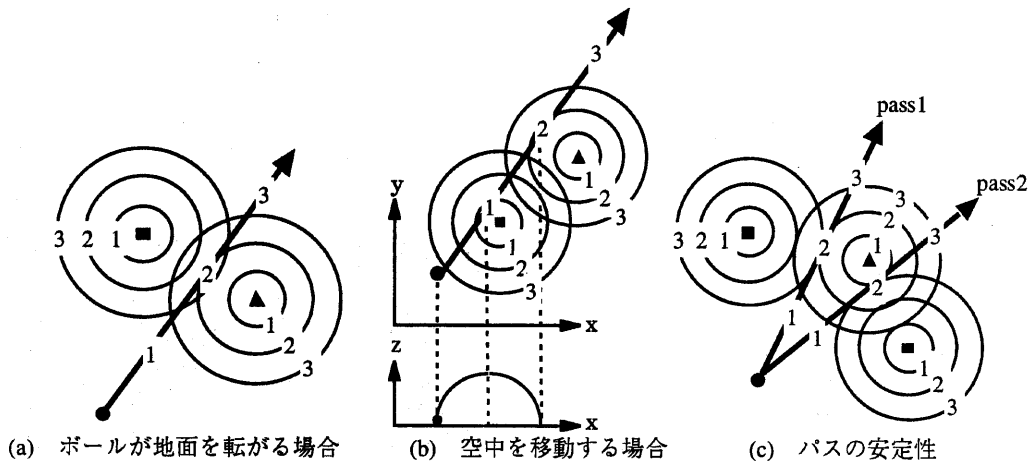
$$t(x^*, p_k^*) = \min_{p_k \in P - \{p'\}} \{t(x^*, p_k)\} \quad (6)$$

であるような選手 p_k^* が存在すれば、それがパスされたボールを最も早く受けることのできる選手である。次に、ボールが空中を移動する場合を考える。ここでは、ボールは高さ方向に等加速度運動するものとする。ある時刻 t におけるボールの高さ h は、高さ方向の初速度成分を v_h 、重力加速度

を g とすると、

$$h = v_h t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (7)$$

となる。ここで、選手の触れることのできる高さを h_p とすると、 $h_p \geq h$ のときは地面を転がる場合と同じように扱い、 $h_p < h$ のときはボールには誰も触れることができないので、その位置では到達時間に関係なくボールはそのまま移動するとして扱う。この様子を図 6 (b) に示す。この例は、ボールに近い敵チームの選手を越えて、自チームの選手へ渡るパスという状況を想定したものであり、ここで、ボールの到達時間パターン上をボールの位置からたどっていくと到達時間 1 秒のとき敵チームの選手の到達時間と同じになるが、このときのボールの高さを調べると、その選手が触れることのできない高さなので、ボールにはまだ誰も触れないと判断して次に進む。そして、到達時間 2 秒のときに自チームの選手の到達時間と同じになり、ボールの高さも選手が触れることのできる高さとなるので、パスが自チームの選手に渡ったと判断する。このように、パスされたボールを最も早く



- ⊙ : 敵チームの選手の位置と到達時間パターン
- ⊙ : 自チームの選手の位置と到達時間パターン
- ↑ : ボールの到達時間パターン (数字は到達時間)

図 6 パスの評価方法

受けることのできる選手が味方が敵かを調べることによってパスの成否を評価する。

次に安定性については、パスを受けた瞬間の周りの状況によって求める。例えば、パスを受けることのできる位置の到達時間と、敵チームの選手の中で最も早いその位置での到達時間との差が大きいほど、安定性は高いといえる。さらに、その位置でのボールの速さや高さによっても安定性は左右されるものと考えられる。図6(c)では、到達時間の差から2つのパスについてどちらの安定性が高いかを求めている。この場合は、pass1よりもpass2の方が安定性は高いといえる。

5 実験

5.1 実験方法

入力データとして、人工的に作った選手の軌跡パターンと実際のゲームシーンから得られた選手の軌跡パターンを使用し、到達時間パターンおよび優勢領域を算出する。次にこの結果に基づいて、パスの成否評価を行う。選手の加速度パターンは方向数72(5度刻み)、到達時間は小数点第3位を有効桁数とし、選手の速度ベクトルはその時点の位置の10Frame前の位置との差とする。画像サイズは510×692 pixelであり、1 pixelは実際のシーンの10 cmに相当する。

5.2 実験結果

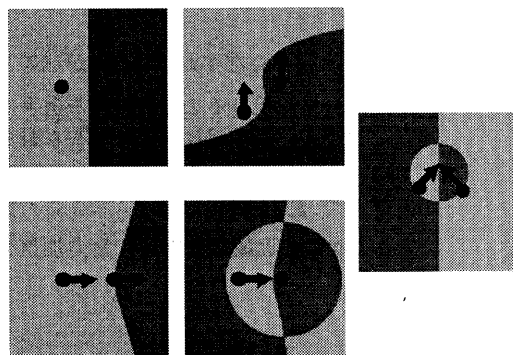
人工軌跡パターンにおける2選手がつくる優勢領域の計算結果を図7(a)に、加速度パターンの大きさを変化させたときの優勢領域の変化を図7(b)に示す。また、実際のサッカーゲームにおける選手の軌跡パターンから得られた最小到達時間パターン、優勢領域、チーム別優勢領域の時間的変化を図8(a), (b), (c)に示す。

図9は○印の選手がパスしたボールを□印の選手のどちらが先に受けとることができるかをシミュレートしたものである。また、図10は実際のサッカーシーンに対する同様の実験結果である。これらの図では、ボールがどちらの選手よりも早く到達する位置を白線で表し、その線が途切れている位置に優勢領域を持つ選手が最初にボールに触れることができることを示している。従って、図9(a)では下側の選手が、図9(b)では左側の選

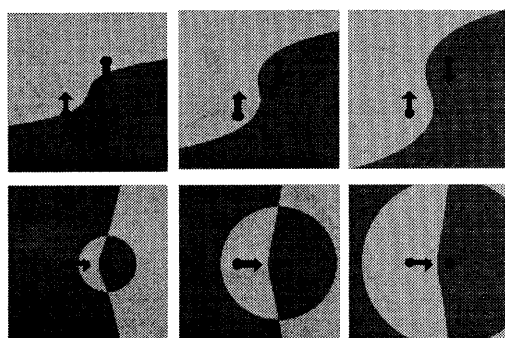
手が最初にそのボールに触れることができる。図10は、最も左側にいる選手が中央にいる味方の選手にパスを行い、その選手がボールに最初に触れることができたという結果を示している。

以上の結果から、優勢領域と到達時間パターンがパスを評価する上である程度利用できることが確認できた。今回の実験ではボールが地面を等速直線運動すると仮定したため、今後実際のボールの動きにより忠実なモデルで検討する必要がある。

なお、以上の実験結果をサッカー指導の専門家に見てもらったところ、従来感覚的に使われてきた選手のスペースという概念が本方法で実際に可視化できることは今後の選手育成指導に有効であるとの評価を得ている。

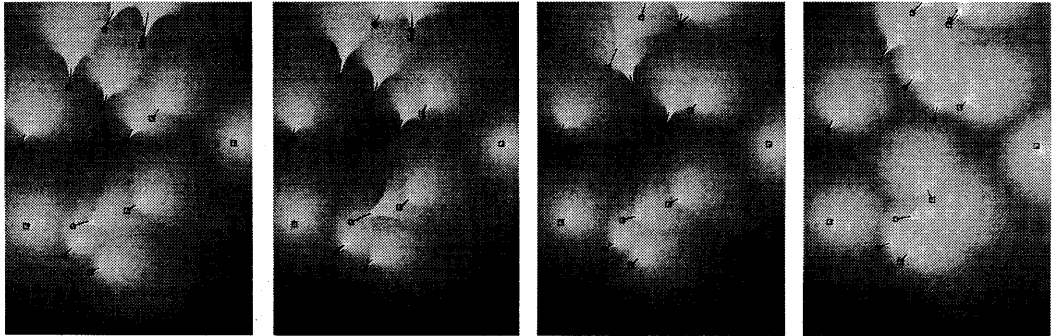


(a) 選手の位置と速度ベクトルを変化させたとき



小 ← 加速度 → 大
(b) 加速度を変化させた場合
↑ : 選手の位置と速度ベクトル

図7 2人の選手がつくる優勢領域の結果



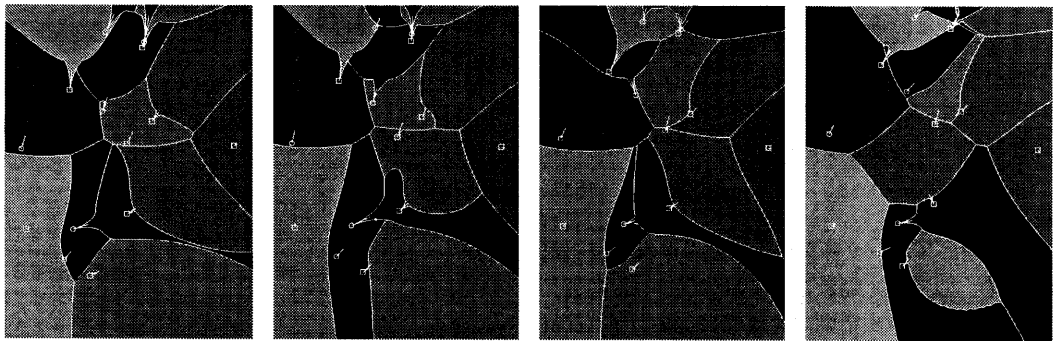
Frame150

Frame160

Frame170

Frame180

(a) 到達時間パターン



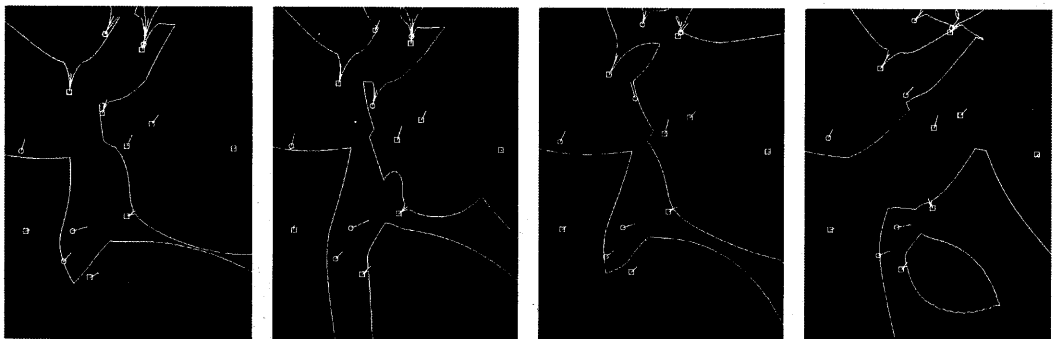
Frame150

Frame160

Frame170

Frame180

(b) 優勢領域図 (各領域は白線で区切られている)



Frame150

Frame160

Frame170

Frame180

(c) チーム別優勢領域図 (各領域は白線で区切られている)


 : 各チームの選手の位置と速度ベクトル

図8 実際のシーンから得られた優勢領域の時間的変化

6 あとがき

本文では、集団行動を映像から分析するための基本的な特徴量である優勢領域について述べた。また、この優勢領域を団体球技の一つであるサッカーのチームワーク分析に適用し、サッカーの基本技術であるパスの評価がある程度可能であることを示した。

本文で述べた考え方は、基本的には、他の球技スポーツにも応用可能であり、さらに、その利用の仕方を工夫すれば、スポーツ以外の集団行動の分析にも有効に使える可能性がある。例えば、集団全体の特徴的な動きに基づいて、逆に、特異な動きをする個人を発見する方法を開発すれば、セキュリティ分野などへの応用が期待できる。

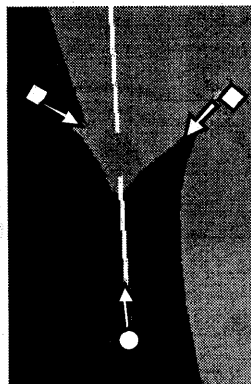
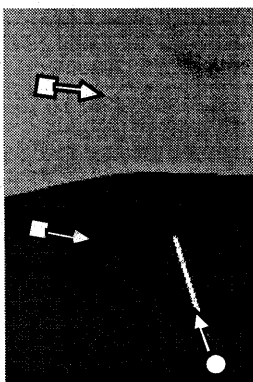
今後は、加速度モデルの改善、優勢領域を用いた特徴量の検討、また、スポーツ科学の見地からの本システムに対する評価も行い、一般的な集団行動解析へと発展させたい。

謝辞

本研究にスポーツ科学の立場から御指導頂く本学体育学部 瀧弘之助教授、宮城修助手、名古屋グランパスエイト 山下則之育成部長、および、日頃から熱心に討論頂く本学長谷川研究室諸氏に感謝する。なお、本研究には、本学CGラボを利用し、また、本研究の一部は人工知能研究振興財団助成金および1996-7 IPA 創造的ソフトウェア開発助成によった。

参考文献

- [1] 川嶋 他: "集団行動の安性的動画解析", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU'94), pp. II 255- II 262 (1994-7)
- [2] 瀧 他: "サッカー映像からのチームワーク評価方法の検討", 信学技報, PRMU96-10 (1996-05)
- [3] 杉原厚吉: "グラフィックスの数理", 共立出版, 1995
- [4] 岡部 他: "最適配置の数理", 朝倉書店, 1992
- [5] 鶴沼 他: "群衆行動のモデリング", 電学論, 115-c, 2, pp.212-221 (1995)



(a) 結果1

(b) 結果2

□: 選手の位置と速度ベクトル
○: ボールの位置と速度ベクトル

図9 パスの評価結果

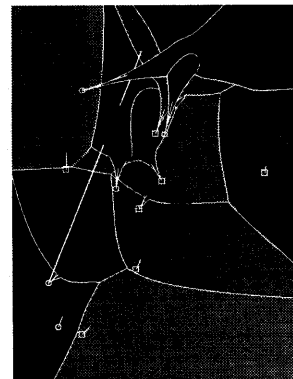


図10 実際のシーンから得られた優勢領域とパスの評価結果