

## 視覚はサッカーロボットを強くするのか？

中村 恭之†

RoboCupの実機ロボットリーグの中で、1997年に開催された第1回大会から現在まで続けられてきているのが、小型・中型ロボットリーグである。本稿では、小型・中型ロボットリーグをまとめて、実機ロボットリーグとして扱い、実機ロボットリーグで使用されているCV技術の現状を紹介するとともに、今後の課題について述べる。

### Do computer vision techniques make soccer robot strong?

TAKAYUKI NAKAMURA†

In 1997, the first RoboCup competition was held. Small and middle-size robot league have been continued since 1997. In this paper, these two leagues are called the "robot leagues". This paper introduces how CV techniques are currently used in the robot leagues and states future problems.

#### 1. はじめに

RoboCupの実機ロボットリーグの中で、1997年に開催された第1回大会から現在まで続けられてきているのが、小型・中型ロボットリーグである。小型ロボットリーグ<sup>1)</sup>は、卓球台とほぼ同じ大きさのフィールドを使い、ボールとしてオレンジ色のゴルフボールを使用する。1チーム、5台以内のロボットで構成され、センサとしては主にフィールド上に設置された1台のカメラ(グローバルビジョンシステム)を用いる。中型ロボットリーグ<sup>2)</sup>は、卓球台9面分とほぼ同じ大きさのフィールドを使い、ボールとしてオレンジ色のサッカーボール(5号球)を使用する。1チーム、4台以内のロボットで構成され、センサとしては主にロボット上に搭載されたカメラ(ローカルビジョンシステム)を用い、グローバルビジョンシステムの使用は禁止されている。本稿では、小型・中型ロボットリーグをまとめて、実機ロボットリーグとして扱い、実機ロボットリーグで使用されているCV技術の現状を紹介するとともに、今後の課題について述べる。

#### 2. 実機ロボットリーグの現状

ロボットがサッカーをするには、常に変化する状況に対応しながら、味方ロボットと協調し、敵ロボットとは競合して、所定の目的を達成するような行動を生

成しなければならない。このような行動を実現するために、ビジョンは必要不可欠であり、サッカーロボットに搭載されているビジョンプログラムには様々な手法が利用されている。また、実機ロボットリーグでは、視覚情報に基づいて即座に行動生成しなければならないため、ビジョン処理を高速化する努力が払われる。特に、中型ロボットリーグでは、ロボットに搭載できる計算機資源に限りがあるため、ビジョン処理としてあまり複雑なことはできない。限られた計算機資源上で、高速なビジョン処理を実現するかが問題になってくる。実機ロボットリーグで 사용되는ロボットビジョンに関する研究課題を大まかに分類すると

- 画像処理技術
- 全方位ビジョン
- カメラキャリブレーション

等がある。以下ではこれらの各要素技術について、代表的な事例を紹介する。

##### 2.1 画像処理技術

ロボットが行動するためには、センサによる環境認識・理解技術が必要になる。実機ロボットリーグにおいても、ロボットビジョンを中心にして対象物の認識技術に関する様々な研究(画像処理技術、幾何モデルに基づく3次元形状認識、複数センサを用いるセンサフュージョン、分散センシングなど)が行われている。

近年は、CPUの高速化に伴い、汎用PCを用いても高速な画像処理が実現できる。その一例として、高速なカラー画像処理アルゴリズム<sup>3)</sup>が開発され、フリーソフト(CMVision)として公開されている<sup>4)</sup>。こ

† 和歌山大学システム工学部  
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

の手法では、色空間として YUV 空間を用いて、識別したい対象を YUV 空間内の直方体領域として表現する。この領域に含まれる画素を画像平面上から検出する際に、ビット演算処理とルックアップテーブルを巧みに利用して検出処理の高速化を実現している。例えば、簡単のため、YUV 空間が 10 段階に量子化されている場合を考える。オレンジ色という領域が YUV 空間内の直方体領域として指定されたときに、この領域を表現するのに、以下のようなクックアップテーブルを利用する。

YClass[] = {0,1,1,1,1,1,1,1,1,1};

UClass[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1};

VClass[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1};

このようなルックアップテーブルを用意しておく、YUV 成分が (1,8,9) の画素がオレンジ色であるかどうかを調査するのに、

YClass[1] AND UClass[8] AND VClass[9]

というビット演算を行うだけでよい。さらに、別の色、例えば、青色が先述したルックアップテーブル表現で以下になる場合に、

YClass[] = {0,1,1,1,1,1,1,1,1,1};

UClass[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1};

VClass[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1};

オレンジ、青色の判定を並列的に実行できるように、これらの色のルックアップテーブルを組み合わせると、

YClass[] = {00,11,11,11,11,11,11,11,11,11};

UClass[] = {01,01,01,00,00,00,00,10,10,10};

VClass[] = {00,00,00,01,01,01,00,10,10,10};

となるようなルックアップテーブルを作成しておく、これにより、先述したような 2 回の AND 演算 (YClass[1] AND UClass[8] AND VClass[9]) だけで、ある画素がオレンジ・青色領域のどちらに含まれるかを検出できる。このようにして、ルックアップテーブルを構成する配列の要素が、例えば 32 ビットあれば、32 色の色領域を同時に検出することが可能になり、検出処理を高速化できる。さらに、CMVision では、先述した処理により多値表現された画像に対して、ランレングス圧縮し、圧縮された画像に対して隣接領域の統合処理を施すことによりラベリング処理も高速化している。最新版の、CMVision(Ver. 2.0) では、ルックアップテーブルを 3 次元に拡張して、等色領域を任意形状で指定できるようになり、複雑な色分布を持つ対象に対しても検出できるようになっている。図 1 に、筆者による CMVision の処理結果例を示す。

ビデオレートで撮像された画像列から高速な移動物体を検出するためのラベリング手法に関する研究も行

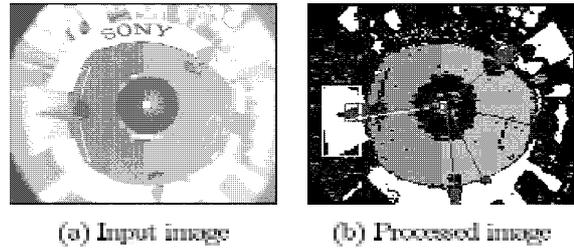
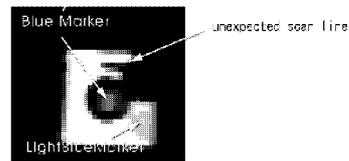
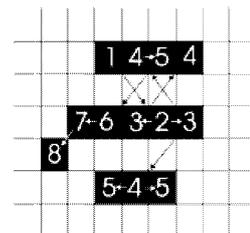


図 1 An example of an input image and the processed one by CMVision

われている。インターレース方式で記録されている画像は、2 枚のフィールド画像から構成されているため、高速に移動する物体をこの方式で記録すると、フィールド画像間で物体がずれて記録されてしまう(図 2(a) 参照)。従って、高速に移動する物体がインターレース方式で記録されている画像列に対して、一般的なラベリングアルゴリズムを適用しても正しい結果を得ることは困難である。そこで、高速に移動する物体により、インターレース方式の画像内で、スキャンラインに抜けが生じて、ラベリング処理の検証領域を広げることにより、スキャンラインに抜けが生じてラベルが伝播するように改良したラベリングアルゴリズム(図 2(b) 参照)が提案されている<sup>9)</sup>。



(a) example image



(b) labelling process

図 2 Diagonal alternate spread labelling

実機ロボットリーグでは、ロボットの作業環境が比較的単純に色分けされているため、物体識別が比較的安定して実行できるが、ロボットがサッカーをするためには、この識別結果を基にした何らかの位置同定処

しかし、実際には照明条件の違いや他者による影による影響でそれほど単純な環境ではない。

理が必要になる。このような問題に対して、実機ロボットリーグでは様々な自己位置同定手法が開発されてきた。ドイツのミュンヘン大チームは、単眼のカメラだけを使用して、3次元の環境モデルに基づいた高速な自己位置同定手法を開発した<sup>9)</sup>。図3は、画像処理によって検出されたフィールド、ライン、壁を表すエッジに、環境の3次元モデルが適切に当てはめられている様子を表している。また、この研究グループでは、複数台のロボットの自己位置同定結果を統合して、より正確に自己位置同定を行う手法も開発されている<sup>10)</sup>。

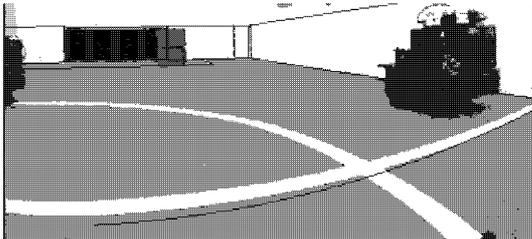


図3 Self-localization by monocular camera

### 2.2 全方位カメラ

実機ロボットリーグではビジョンセンサとして、単眼カメラ、全方位カメラ、これらの併用、能動カメラ、複数カメラなどが使用されている。小型ロボットリーグでは、グローバルビジョンシステムを使用しているため、ビジョンセンサ自体の開発を研究対象としているチームはほとんどなかったが、最近では、小型ロボットリーグにおいてもローカルビジョンシステムを搭載したロボットが開発されてきており、今後はこのリーグにおいてもビジョンセンサの開発が研究対象の1つとなるであろう。一方、中型ロボットリーグでは全チームがローカルビジョンシステムを搭載しており、ビジョンセンサ自体を研究開発しているチームもある。もともとこのリーグでは、ロボット上にビジョンセンサを搭載し、ボールやフィールド、ゴールを認識・識別していた。初めは、前方だけを見る単眼カメラであったが、それが首振り機構を有する能動カメラになり、より広い視界が確保するため、前方を見るカメラに加えてロボット上に全方位カメラを搭載するようになってきた。そのなかで、特に興味を引くものとしては、Hicks<sup>7)</sup>らが開発した全方位ミラーをもとに、改良されたミラーを利用した全方位カメラが開発されている<sup>9)10)</sup>。これらの全方位カメラでは、全方位ミラーの形状を工夫して、全方位画像を計算機上で幾何学的な変換処理すること無しに、床面上への透視投影画像を生成できる。図4(左)にその例を示す。このカメラ

を用いれば、幾何学的な変換処理のための計算負荷を減少でき、また均一な解像度を有する画像が得られるという利点が得られる。図4(右)に、このミラーにより撮影された画像を基に得られた自己位置同定結果を示す。

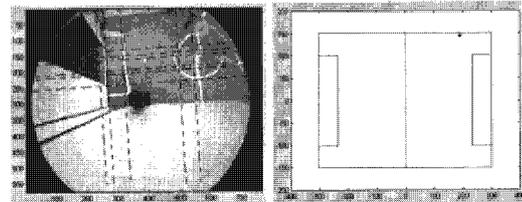
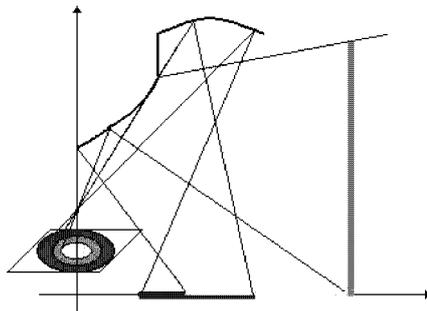


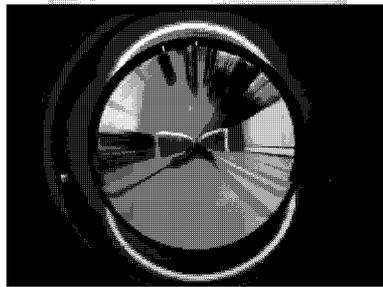
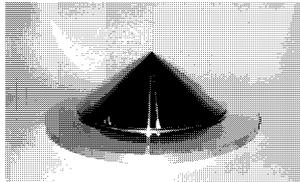
図4 Omnidirectional image sensor

このほかにも、異なる形状のミラーを組み合わせた複合ミラーを開発している研究例<sup>10)</sup>がある。彼らの開発した複合ミラーは、Measurement・Marker・Proximity Mirrorの3種類のミラーから構成されている(図5(a)参照)。Measurement Mirrorは、このミラーから観測される物体までの距離と画像中心からその物体が観測されている位置までの画像上の距離が比例するように、ミラー形状が設計されている。Marker・Proximity Mirrorは、それぞれ、床面上のある高さ以上に存在する物体を、このミラーの設置されている近傍の領域に存在する物体をよく観測できるように、ミラー形状が設計されている(図5(b)参照)。彼らは、ロボットに与えられるタスクに依存して、これら3種類のミラー形状の含有比率を変えてこの複合ミラーを製作しロボットに搭載している。このような複合ミラーにより、ビジョン処理による、ランドマーク観測による位置同定、敵・味方ロボットの識別や反射的行動の生成などを効率よく実現している。

複数の全方位カメラを用いた分散センシングシステムに関する研究も行われている。筆者らは、複数台のロボットに搭載された全方位カメラからの映像を基に、ロボット間の配置や自己位置同定を高速に求める手法を提案した<sup>11)</sup>。Fig.6(a),(b),(c)は、それぞれ、フィールド内でのロボット間の実際の配置、本手法による同定結果、各ロボットにおける全方位画像とその処理画像を表す。Fig.6(b)内では、点線で結ばれた配置がフィールド内のロボットの実際の配置、実線で結ばれた配置が推定されたロボット間の配置を表している。また同図内において、それぞれの配置の各頂点がロボットの位置を、各頂点から引かれた矢印がロボットの姿勢を表す。



(a) The profile of multi-part mirror

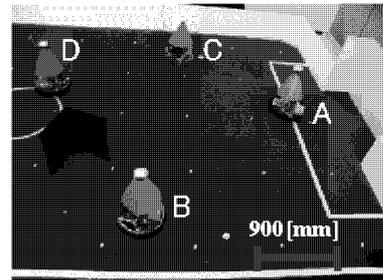


(b) Actual shape and its output image

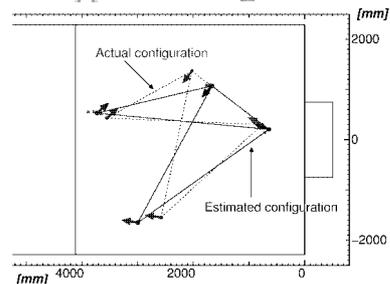
図 5 Multi-part mirror

### 2.3 カメラキャリブレーション

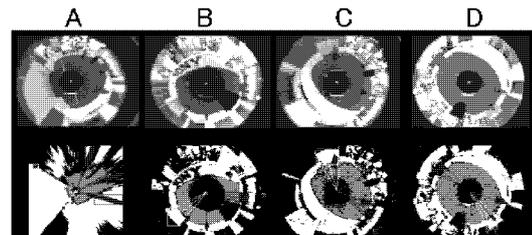
視覚を持つロボットシステムにおいて、追跡・操作対象対象物体に関する 3 次元空間内の運動情報を獲得できれば、ロボットシステム自身の運動計画立案が比較的容易に行えるようになる。そこで、実機ロボットリーグに参加するチームは、2 次元の画像情報から画像中で観測されている物体に関する 3 次元空間中の運動を精度良く求めるために、カメラキャリブレーションを行うことが多い。大抵の場合、ピンホールカメラモデルに基づく幾何学的キャリブレーション手法を利用している。特に、小型ロボットリーグでは、従来からの単一のカメラに関する内部・外部パラメータを推定する手法として Tsai のキャリブレーション手法<sup>[12]</sup>や、カメラパラメータを陽に求めずに、3 次元空間中の点と画像上の点の幾何学的な対応関係をホモグラフィ行列で記述することによってキャリブレーションする手法(例えば、<sup>[13]</sup>)が利用されている。その他、中型ロボットリーグでは、2 次元画像上の情報から 3 次元情報への写像関係をより直接的に求める手法が利用される。例えば、文献<sup>[14]</sup>で紹介されている手法では、画像



(a) Actual configuration



(b) Result of self-localization



(c) Input ODIs and their processed image

図 6 Self-localization by multiple omnidirectional cameras

上の点と 3 次元空間中の点との対応関係を適当な数だけ求めておき、そのような対応関係が求められている点の集合に関してドローネ三角形群を求める(図 7 参照)。このようにしておけば、画像上の任意の点 P に関しては、点 P の近傍に存在するドローネ三角形の 3 頂点における 3 次元情報を基に線形補間することにより、画像上の点 P に関する 3 次元情報を得ることができる。画像上の全ての点に関して 3 次元空間中の点との対応関係を求める必要がなくなり、比較的正確に 2 次元画像上の情報から 3 次元情報を得ることができると報告されている。

### 3. 今後の課題

実機ロボットリーグでは、毎年世界大会終了後、競技環境をより一般化した環境へ移行することに関して、いろいろと議論されている。2002 年の大会から、フィールドを取り囲むようにして設置されていた壁は排除され、より一般的な競技環境になってきた。将来

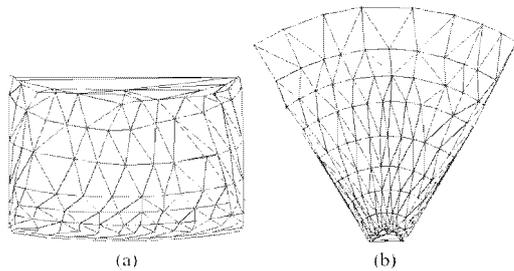


図7 Interpolation by Delaunay triangulation

的には、ゴールやボールも現在のように色分けされていない一般的なものが使用されるようになるであろう。そのような一般的な競技環境に対応するため、色の恒常性を高めて自然環境光下でも色情報に基づく領域分割手法をロバストに行う手法として、Retinex アルゴリズムを応用した手法<sup>15)</sup> や、色情報を用いずに領域分割する手法として、Contracting Curve Density アルゴリズム<sup>16)</sup> が提案されている。しかしながら、これらの処理のための計算量が多く、実際にロボットの視覚として搭載されるまでには至っていない。効率の良いインプリメント手法を探求することにより処理の高速化が望まれる。

また、競技環境の変化に伴い、より一層のセンシング処理のロバスト化に関して様々な研究(新たなセンシングデバイス、センサフュージョン技術の開発)を行う必要もある。さらに、環境変動に強いロボットビジョンシステムを構築するため、分散処理型ロボットビジョンシステムなど、ビジョンシステムの構成法についてもより一層研究する必要があると思われる。

#### 4 ま と め

RoboCup の実機ロボトリグの現状と今後の課題について、筆者の思い付くままに述べてみた。筆者の主観に偏っている部分もあり、本稿で網羅されていない研究もある。実機ロボトリグで行われている研究を概観するためには、文献<sup>17)</sup>を一読願いたい。

本稿で紹介したように、現状では、実機ロボトリグでの研究課題はロボットビジョン研究が抱えている課題をそのまま継承しているに過ぎない。一刻も早く、実機ロボトリグで勝つロボットを作る為に研究開発されたロボットビジョン技術が、逆に一般的な環境で使用されるロボットの要素技術になり、実機リーグで開発された要素技術を応用した製品などが出て来ることを切望する。

最後に、国内外での競技会の告知は <http://www.roboocup.or.jp> に掲載されているので、本

稿を読んで RoboCup 実機ロボトリグに興味を持たれた方は、是非競技会に参加して頂きたい。

謝辞 本原稿を執筆するにあたり、参考資料をご提供頂いた大阪大学の浅田稔教授に深く感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) <http://www.inf.fu-berlin.de/~robocup/2001/>.
- 2) <http://smart.informatik.uni-ulm.de/ROBOCUP/12000/index.html>.
- 3) J. Bruce, T. Balch, and M. Veloso. Fast and Inexpensive Color Image Segmentation for Interactive Robots. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Takamatsu, Japan*, pages 2061-2066, 2000.
- 4) <http://www-2.cs.cmu.edu/~jbruce/cvvision/>.
- 5) S. Hibino, Y. Kodama, Y. Nagasaka, T. Takahashi, K. Murakami, and T. Naruse. "Fast image processing and flexible path generation system for robocup small size league". In *Proceeding of RoboCup 2002 Int. Symposium*, pages 45-57, 2002.
- 6) R. Hanek, T. Schmitt, M. Klugeck, and S. Buck. From multiple images to a consistent view. In *RoboCup2000: Robot Soccer World Cup IV*, pages 169-178. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, 2001.
- 7) R. Hicks and R. Bajcsy. Reflective Surfaces as Computational Sensors. In *In Proc. of the Second Workshop on Perception for Mobile Agents*, pages 82-86, 1999.
- 8) C. F. Marques and P. U. Lima. A localization method for a soccer robot using a vision-based omni-directional sensor. In *RoboCup2000: Robot Soccer World Cup IV*, pages 96-107. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, 2001.
- 9) F. M. Marchese and D. G. Sorrenti. Omni-directional vision with a multi-part mirror. In *RoboCup2000: Robot Soccer World Cup IV*, pages 179-188. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, 2001.
- 10) Emanuele Menegatti, Francesco Nori, Enrico Pagello, Carlo Pellizzari, and Davide Spagnoli. "Designing an omnidirectional vision system for a goalkeeper robot". In *Proceeding of RoboCup 2001 Int. Symposium*, 2001.
- 11) T. Nakamura, A. Ebina, T. Ogasawara, and H. Ishiguro. Real-time Estimating Spatial Configuration between Multiple Robots by Triangle and Enumeration Constraints. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Takamatsu, Japan*, pages 2048-2054,

- 2000.
- 12) R. Y. Tsai. "a versatile camera calibration technique for high- accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses". *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3:4323-344, 1987.
  - 13) Ryad Benosman, Jerome Douret, and Jean Devans. "A simple and Accurate camera calibration for the F180 RoboCup league". In *Proceeding of RoboCup 2001 Int. Symposium*, 2001.
  - 14) T. Weigel, A. Kleiner, F. Diesch, M. Dietl, J.-S. Gutmann and B. Nebel, P. Stiegeler, and B. Szabokowski. "CS Freiburg 2001". In *Proceeding of RoboCup 2001 Int. Symposium*, 2001.
  - 15) Gerd Meyer, Hans Utz, and Gerhard Kraetzschmar. Toward Autonomous Vision Self-Calibration for Soccer Robots. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, pages 214-219, 2002.
  - 16) Robert Hanek. The Contracting Curve Density Algorithm and its Application to Model-based Image Segmentation. In *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Kauai, Hawaii, USA, pages 1:797-804, 2001.
  - 17) RoboCup1997~2000: Robot Soccer World Cup I~IV, Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, 1997~2001.