

## ロボカップのための高速な小型ロボット検出法について

加藤 恭佑† 日比野 晋也† 児玉 幸治‡ 村上 和人† 成瀬 正†

†愛知県立大学情報科学部 ‡愛知県立大学大学院情報科学研究科

〒480-1198 愛知県愛知郡長久手町熊張

e-mail: is991017@cis.aichi-pu.ac.jp

ロボットの実機を用いてサッカーゲームを行うロボカップ小型リーグでは、ロボットの視覚としての画像処理ソフトウェアの機能と、ロボットの足としての移動機構・キック機構などのハードウェア機能の両面を、バランスよく設計してシステムを構築することが重要となる。本論文では、毎秒60回のビジュアルフィードバックを行うための画像処理手法を中心に述べる。また、複数カメラによるボールの隠蔽回避の試みについても簡単に触れる。最後に2002年ロボカップ世界大会における実践的評価について述べ、構築したシステムの有効性について考察する。

## High-speed Image Processing Method to Extract Small Size Robot for the RoboCup

Kyosuke KATOH †, Shinya HIBINO †, Yukiharu KODAMA ‡,

Kazuhito MURAKAMI † and Tadashi NARUSE †

†:Faculty of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

‡:Graduate School of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

Kumabari, Nagakute-cho, Aichi, 480-1198 Japan

e-mail: is991017@cis.aichi-pu.ac.jp

One of the key features in a RoboCup small-size league is a well-balanced design of a software function as the robot vision and a hardware function of as the moving mechanism of a robot. This paper presents a new system design of RoboDragons team for RoboCup small size league, image processing method which realizes 60 times visual feedback in a second, and an attempt to avoid occlusion of a ball by multi-camera system. Finally, this paper discusses effectivity of our robot system through real games, RoboCup-2002 international competition at Fukuoka Dome.

### 1. まえがき

ロボカップはロボットによるサッカーゲームの実現を目的とする[1]。小型リーグでは、ロボットの実機を用いる。シミュレーションリーグと違っ

て、ロボットの大きさ・形状は規定範囲内で任意であり、チームごとに異なる。照明条件やフィールド床面の状態なども会場(コートあるいはフィールド)ごとに異なる。ロボットの視覚としての画像処理ソフトウェアは、これら実環境に対する

ロバスト性を考慮した上で構築する必要がある。また、現場で行うパラメータ調整を容易にする GUI を具備しておくことも実戦で勝利するための鍵となる。

ロボットの位置、方向検出に関しては、ロボカップシボジウムで幾つかの手法が報告されている[2-5]。しかし、ロボット自身のハードウェアもロボットを制御するためのソフトウェアも、プラットフォーム化されている訳ではないため、各々の手法の有効性の確認は、最終的には実機ロボットを用いた動的環境における有効性、すなわち実戦における総合的な評価にならざるを得ない。

筆者らは、ロボットの視覚としての画像処理ソフトウェアの機能と、ロボットの足としての移動機構・キック機構[6]などのハードウェア機能の両面を、バランスよく設計してシステムを構築することが重要と考え、毎秒 60 回のビジュアルフィードバックを行う方式として設計した。この速度を実現するために、本システムではプログレッシブ・スキャンのカメラを用いた。ソフトウェア面では、移動物体検出のためにマーカの色や形状を工夫するとともに、マーカを検出するための探索領域の大きさを、前フレーム画像からの検出結果の信頼度に応じて可変的に設定する方法とすることにより高速化を図った[7,8]。

本論文では、まず、2. でシステム概要について紹介した後、3. でロボット検出のための高速な画像処理手法について述べる。また、多視点画像によるボールの隠蔽回避の試みについても簡単に触れる。最後に 4. で 2002 年ロボカップ世界大会における実践的評価について述べ、構築したシステムの有効性について考察する。

## 2. ロボットシステムの概要

### 2.1 ロボカップ小型リーグの概要

ロボカップ小型リーグでは、ロボットが図 1 に示すような 2.9m×2.4m の大きさのフィールドでサッカーを行う。1 チームのロボットは 5 台以内である。各々のロボットは、直径 18 cm、高さ 15cm の円筒に入るサイズと規定されている。ボールはオレンジ色に塗られたゴルフボールである。

ロボットは自律移動ロボットに限られている。最もポピュラーな制御方法は、図 2 に模式的に示したように、天井の中央に設置されたカメラ、ホ

スト計算機、無線システムを用いる方法である。ホスト計算機はカメラから得られる画像を処理してロボットやボールの位置、速度などを検出し、戦略を立ててロボットに行動を指示する。通常は無線を用いてホスト計算機から情報が送られる。ゲームの開始、中断、再開、終了等の指示も、レフリーの指示に基づいて、計算機を通して両チームのシステムに対して同時的かつ自動的に行われる。したがって、ゲームの最初から最後まで、人間が介在することはない。筆者らのロボットシステムも同様な構成を採用している。筆者らのシステム構成を図 3 に示す。



図 1 フィールド概観図

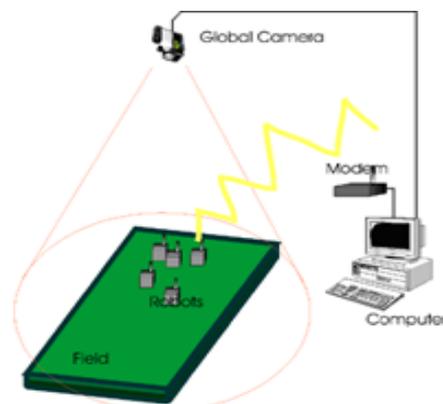


図 2 ロボットシステム

### 2.2 ロボットメカニズム

戦略システムが生成する移動命令や行動命令を実現するためには、ロボットもそれらに対応したメカニズムにしておく必要がある。経路の自由度とボール操作の機能を高めるために、本システムではロボットに幾つかの工夫を施している。以下に特徴的な点を示す[6]。

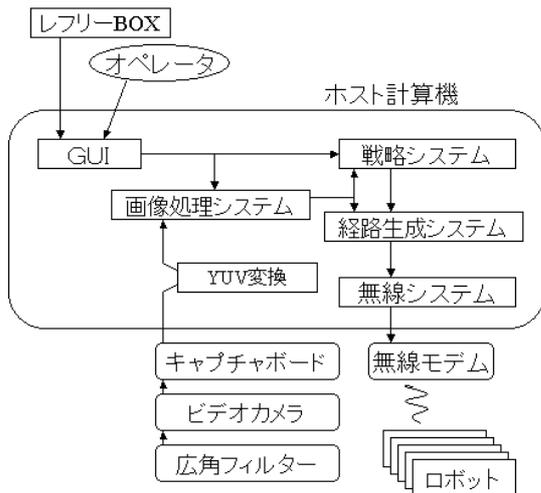


図3 システム構成図

### 2.3 ロボットメカニズム

戦略システムが生成する移動命令や行動命令を実現するためには、ロボットもそれらに対応したメカニズムにしておく必要がある。経路の自由度とボール操作の機能を高めるために、本システムではロボットに幾つかの工夫を施している。以下に特徴的な点を示す[6]。

移動の自由度を高めるために、ロボットは3つの車輪を持ち、3つの車輪に与える速度を変えることにより、全方位に移動することができるよう



図4 オムニドライブ

にしている。ロボットを底から見た様子を図4に示す。モーターはエンコーダー付きのDCモーター（FAULHABER社製）であり、ギア比は9.7:1である。また、ソレノイド（SINDENGEN社製）を利用したキック機構（シュート速度は3m/sec程度）と、回転ローラーによってボールに逆スピンをかけて引き寄せるドリブル機構を搭載している。ロ

ボットの概観を図5に示す。左はロボットのカバーを外した状態である。

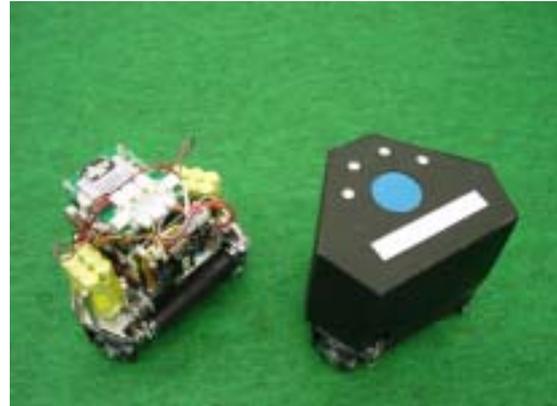


図5 ロボットの概観

ボットカップ小型リーグでは、各チームの高度化にともなって、単独のロボットによるプレーから複数のロボットによるパスなどの協調プレーへと技術的課題が移りつつある。筆者らのシステムでは、三つに階層化されたエージェントによって攻撃/守備の戦略システムを構成している。複数台のロボットが連携してゴールを守るため、敵の単独のロボットがゴールを決めることは極めて困難であると考えられる。逆に、敵チームがこのような堅固な防御行動ができる場合、ゴールを決めるには連携プレーを行う必要がある。

パスプレーの実現には、二つの重要なポイントがある。一つは、パスプレーを行う2台のロボットの位置と方向の正確な制御である。もう一つは、ボールのキャッチ機構である。特に、衝撃吸収機能を備えた機構とする必要がある。前者は次の3.画像処理の項で述べる方法で解決している。後者は米国コーネル大学のシステムのようにバネを用いた手法が自然であるが、本システムでは次のような機構にしている。

ドリブル機構は、ゴムでできたローラーをロボット前面に水平方向に取り付けて（図5左ロボットの前面）、これを回転させてボールに逆スピンを与えることによってボールを保持する。ボールを噛み込まないようにローラー自身の剛性は高くしてある。ここに剛性の高いボールが当たると弾性衝突を起こし、ボールは弾かれてしまう。本システムでは、ローラーをロボット台車に固定する継ぎ手部分に遊びを持たせて、ローラーが上下に少し動くようにしている。このような簡単な機構

でボール衝突時の衝撃が吸収でき、安定してキャッチできるようになっている。ただし、遊びの大きさはフィールドのカーペットの材質に応じて変えられるようにしておく必要がある。

連携プレーでは、パスを受けたロボットがボールを保持しながらゴール方向に向きを変え、シュートする。その際、ロボットの回転時にボールがローラーから外れる場合がある。コーネル大学はサイドローラーを取付けてこの問題を解決しているが、本システムでは今後の課題として残っている。

### 3. 画像処理システム

#### 3.1 識別対象物

ロボットの上部には、チームを区別するための黄色または青色のチームマーカーが付けられている。チームマーカーは必須であり、その色、形状はレギュレーションで規定されている（直径4cmの円）。これとは別に、ロボット個々の区別や向



図6 ロボット外観図

きを識別するためのサブマーカーを取り付けることが許されている。サブマーカーの形状、位置、方向などは任意であり、チーム毎にいろいろな工夫を施している。サブマーカーの色については、チームマーカーの認識に影響を与えない範囲で自由である。筆者らのロボットが使用しているサブマーカーを図6に示す。角度計測用の長方形のサブマーカー（105mm×16.5mm）と、ロボットの個々の番号（ID）を識別するための小さな円形マーカーを使用している（1個～4個、直径約8.5mm）。画像処理システムでは、これらのマーカー類の検

出を実時間でを行うことを目的とする。

#### 3.2 画像処理システム

ホストコンピュータのCPUはPentium Xeon 2GHzであり、OSはWindows2000を使用している。カメラは、対象物が高速で移動するロボットであるため、odd frameとeven frameでズレが生じないようにプログレッシブスキャン方式のカメラを使用している（SONY社製、DXC-9000）。

カメラはフィールド上3mの高さに取り付けられる。ゴール領域まで含めると長手方向に約3.2mとなり、カメラの画角は最低56°必要となる。したがって、一般的には広角レンズが使用される。本システムでは、ズームレンズ（SONY社製、VCL-0716BXA）に広角アタッチメント（Fujinon社製、WCV-65、×0.75倍）を装着して使用している。

画像は画像入力ボード（Matrox社製、GEN/X/00/STD）を通して入力される。画像入力ボードの仕様を表1に示す。640(W)×480(H)画素の画像では、1pixelの実長は約5mmとなる。

表1 画像入力ボードの仕様

	specification
Image size	640(W) × 480(H)
Frame rate	60Hz
Format	3CCD, RGB

#### 3.3 ロボット検出

##### 3.3.1 ロボット検出手順

入力された天井カメラ画像から、色情報を利用してボール、ロボットの位置を検出し、さらにロボットのサブマーカーからIDと角度を判別、検出するための処理の流れを示す。大まか流れを図7に示す。以下に、画像処理の概要を示す。

Step-1（画像入力）：

プログレッシブカメラからRGB画像を取り込む。入力画像の一例を図8(a)に示す。ロボット周辺を拡大表示した画像を図8(b)に示す。

Step-2（探索領域の計算）：

信頼度から各々のオブジェクトの探索範囲を決定する。ここでいう信頼度は、画像処理システムの結果を特徴付ける重要な考えであるため3.3.2で

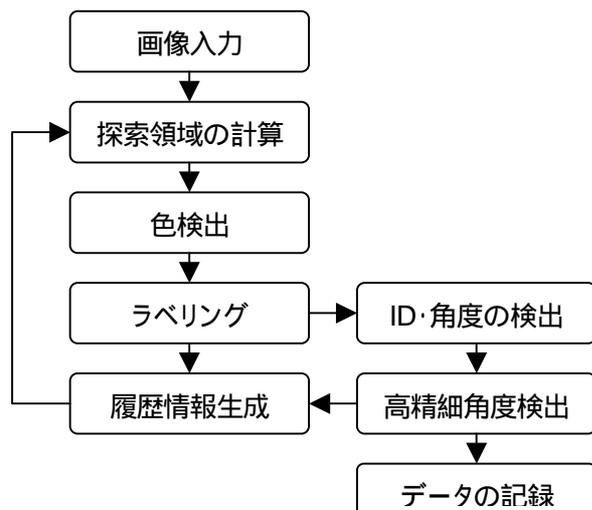


図7 画像処理の概略

詳しく説明する。限定された探索領域を図9に示す。白枠で囲った部分が探索領域である。そして、この限定された領域内においてのみ、RGB形式の画像をYUV形式に変換する。

Step-3 (色検出) :

Step-2と同様に、限定された領域内において、CMUで開発されたSegmentationアルゴリズム[9]を使用してYUV表色系における9種類(最大32)の色情報の同時照合をカラーテーブルを用いて行う。

実際の試合は、複数の異なる照明が組み合わせられたフィールドで行われることが多いため、フィールド上では輝度やカラースペクトルが異なる。そこで、まず複数の色候補(ボール1色×2、チームマーカー2色×2、他に、除外色がある場合は、それら最大3色)の抽出処理を行い、次いで、多数決論理により類似色の判別を行う。この手法により、フィールド上の輝度変化に対処した色領域抽出を実現している

Step-4 (ラベリング) :

ラベリングの最初の伝播処理を対角4近傍で行う。次からは4近傍で伝播を行う。この処理により、図10に示すような色収差によって擬似的に現れる幅1pixelの直線パターンを別々のオブジェクトとして認識させることにより誤検出を防ぎ、ラベリングのロバスト性を高めている。また、この処理にもYUV形式の画像のY成分を用いる。この場合、検出したい色が青、黄色、オレンジ色など比較的明るいことを利用し、黒

と他の色を単に分ければより簡単になる。

Step-5-1 (オブジェクトの抽出) :

チームカラーマーカーにため処理を施した領域内でIDマーカーと角度検出用マーカーを検出する。角度検出用マーカーとIDマーカーは面積で区別する。検出結果を図11に示す。

Step-5-2 (ID・角度の検出) :

IDマーカー群の角度と個数からロボットの方向とIDを認識する。この時点での角度精度は8°程度である。

Step-6 (高精細角度検出) :

図12に示すように、角度検出用マーカーの長辺のエッジ点(なるべく多数のエッジ点が得られるように、45°で処理を切り替える)に対して最小2乗法を適用し、再度ロボットの角度(方向)を求め、Step-5で求めた値を補正する。この処理によって、角度精度は1°以下となる。

Step-7 (履歴情報生成) :

ロボットごとの位置、方向などの情報を時系列の履歴情報として保存する。

Step-8 (データの記録) :

画像位置データの正規化、記録・予測を行う。(図13)。

### 3.3.2 信頼度に基づく探索領域設定

Step-2およびStep-3における探索範囲を決定する際に、本システムでは画像処理結果の信頼度という概念を用いている。信頼度は画像処理の結果がどの程度信頼できるかを表しており、信頼度の値によって次フレーム画像内の探索範囲を決定している。

信頼度は、画像処理システムと情報管理システムの両方の結果を基に更新される。信頼度は0(まったく信頼できない場合)~3(完全に信頼できる場合)の値をとるように設計されている。画像処理システムにおいては、ボール、味方、敵オブジェクトの認識失敗が一つもない場合は信頼度を1上げ、逆に、どれか一つでも失敗があった場合は信頼度を1下げる、という方法で更新している。信頼度が下がると探索範囲が限定されなくなり、システム全体のタイムラグが増大する。情報管理システムではオクルージョンが生じた際に、信頼度が小さくなり過ぎないように信頼度下限値を設定している。具体的には、オクルージョンが発

生した際、画像処理ではボールは認識できず信頼度は下がるが、情報管理システムにおいてそれをオクルージョンと判断した際は、信頼度は2に保つようになっている。

信頼度が1~3の時に限定探索が行われる。信頼度3のときの探索範囲は20×20pixel、信頼度2のときは30×30pixel、信頼度1のときは60×60pixelである。20×20pixelは、これは実際のフィールド

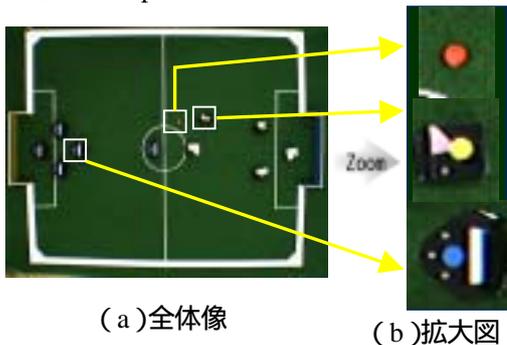


図8 天井カメラからの入力画像の一例

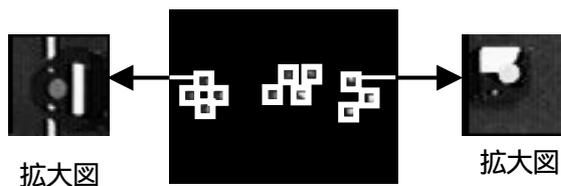
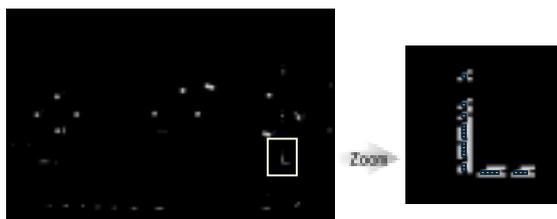


図9 履歴情報を基に限定された探索範囲(白枠)とその拡大画像



幅1pixelの直線状のノイズが別々のオブジェクトとして認識されるので、面積閾値処理で容易に除去される。

図10 ラベリングにおける伝播処理の改善によるラインノイズ排除効果の一例



(a) マーカー類の検出結果 (b)一部の拡大図  
図11 マーカー類の検出結果検出結果

では約10×10cmの領域となる。これは、移動速度3m/secのオブジェクトの追従を可能にするものである。逆に、3m/secを超えるスピードで移動する物体はいったん見失うことになる。

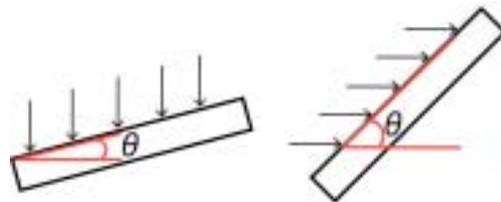


図12 最小自乗法による高精度角度計算の様子(45°を境にエッジ検出のスキャン方向を切り替える)

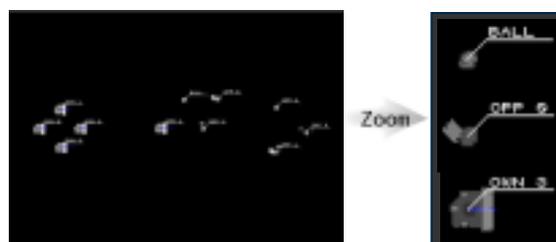


図13 画像処理により認識されたオブジェクト

### 3.4 複数カメラによるボールの隠蔽への対処

天井カメラはフィールド中央の上部に設置されているため、ロボットによるボールの隠蔽が生じる。カメラが設置されている高さは3.0mであり、ロボットの最大の高さは15cmであるため、フィールドの中心付近ではほとんど問題とならないが、周辺にいくほど隠蔽は大きく生じる。フィールドの周辺は、ゴール前やコーナーであり、試合の優劣を決める重要なポイントとなる領域である。この領域でボールを見失うことは、ゲームを進める上で致命的である。

そこで、筆者らのチームでは、天井中心に置かれたカメラ(center camera)に加えて、フィールドの横からゴール前の画像が得られるようにサブカメラ(sub-camera)を設置して対処している。その様子を模式的に図14に示す。また、サブカメラから入力された画像の一例を図15に示す。この例では、ゴール前の画像が得られるように、サブカメラ(SONY社製、EVI-G20)を高さ230cm、俯角45度に設置している。

天井カメラ(center camera)とサブカメラ(sub-camera)の画像間の対応は、フィールド角の点、フィールドのセンターラインの両端、ゴール前の

ペナルティキックマーカなど、複数の対応点を基にキャリブレーションを行って決めている。隠蔽されたボールの位置を天井カメラ画像に重畳させて表示した画像を図 16 に示す。

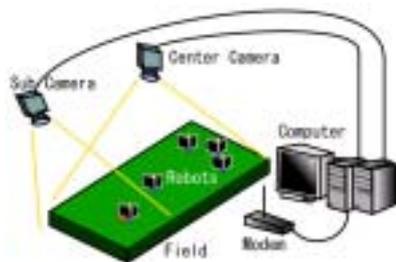


図 14 2 台のカメラによる隠蔽回避の様子



図 15 サブカメラから入力された画像の一例

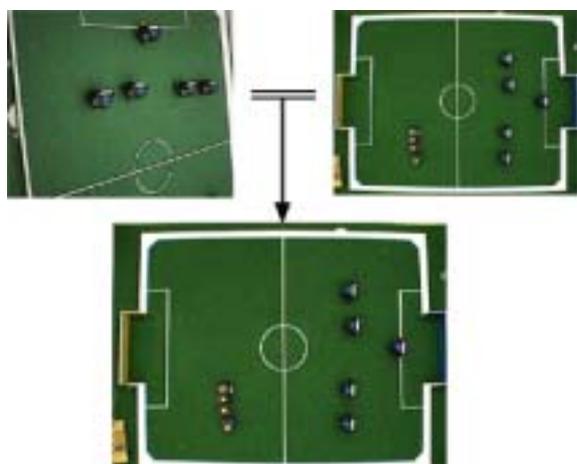


図 16 統合された画像情報(天井カメラ(右上)では隠蔽されているゴール前のボールを、サブカメラ(左上)が検出し、重畳して位置を表示)

## 4. 考察

### 4.1 画像処理の基本評価

開発したロボットシステムはサッカーゲームを行うことを前提としているため、ロボットの単体の特性測定よりも実際のゲームの状況、および、連携プレーの実現性や有効性を中心に評価するの

が妥当であると考えられる。

画像処理システムに関しては、ゲーム中のオブジェクト(ボール、チームマーカー、サブマーカー)の見落としの有無を実環境で評価した。ロボカップ小型リーグのレギュレーションではフィールドの明るさは 700~1000 ルクスと規定されているが、会場によって照明環境はまちまちである。いくつかの会場で本システムを実践的に作動させ試してみたところ、照明条件が 200 ルクス程度に下がっても、安定してオブジェクト検出ができていたことが確認できた。

また、現在の画像処理システムでは、(1)試合開始時、(2)ボールが完全に隠れた状況が続いた場合、(3)シュート速度が 5m/sec 以上の場合、に全画面探索を行っている。全画面探索には探索範囲を限定する場合に比べればかなり画像処理に時間を要するが、それでも 20msec / frame で動作することが確認できている。したがって、距離がある程度離れていれば、隠れた位置からの速いシュートにも反応することができると考えられる。

また、ボールの隠蔽に対しては、現在は 2 台のカメラで対処しているが、2 台のカメラでも隠蔽される領域があることが確認できている。カメラの増設は有効な手段であるが、試合会場での調整にも時間を要することになるので、カメラキャリブレーションを効率的に行うための GUI 環境の整備も必要である。

### 4.2 ロボカップにおける実践的評価

我々の愛知県立大学のチームは、2002 年 6 月に開催されたロボカップ 2002 世界大会(福岡/釜山)にチーム名「RoboDragons」として出場した[5]。大会には、ビデオ審査をクリアした世界の上位 20 チームが参加し、A~D の 4 グループ(各グループ 5 チーム)に分かれて予選リーグを行った。

RoboDragons は予選リーグを 3 勝 1 敗の成績(グループ 2 位)で終え、出場した日本の 5 チームの中で唯一ベスト 8 となり、決勝トーナメント進出を果たした(表 2)。決勝トーナメントでは、ドイツのベルリン自由大学のチームである「FU-Fighters」(準優勝)と初戦で当たり、前半は 0-0 と善戦したものの、後半で失点を許し、残念ながら 0-3 で敗れた。優勝はコーネル大学(米国)のチーム、BigRed であった。また、試合に先立って行われ

た、ロボットの技術的性能を競う種目別競技 (Challenge Event) において、RoboDragons はキック部門 (シュートの正確性を競う部門) で 2 分間に 23 ゴールを決め、この部門で優勝を飾った。

以上により、本論文で述べた画像処理技術が有効に機能し、ロボカップ世界大会において RoboDragons のロボットシステムの有効性が実証されたものと考えられる。

## 5. あとがき

本稿では、ロボカップ小型リーグにおける高速かつロバストなロボットの検出について述べた。ロボットに対する画像フィードバックシステムの動作を 1/60 秒ごとに行うことにより、3m/sec のボールに反応できる高速な画像処理を実現した。

自然光のように幅広い光スペクトルが含まれている場合、境界部分に色にじみが発生する問題があるため、光学的な色収差によるオブジェクトの誤検出への対処が必要となる。また、スポットライトのように、明るさのダイナミックレンジが広すぎると画像処理が破綻するため、今後は明るさの変化や種々の光源に対してよりロバストな画像入力システムにする必要がある。

現在、筆者らのロボットの最高速度は 1.2m/sec であり、ベルリン自由大学の最も速いロボットの移動速度はおよそ 2m/sec である。ロボットの速度を速くするなどのハードウェア的な改良、障害物を回避しながらより早く目的地に到達できるような経路生成法や行動生成法などのソフトウェア的な改良、および、ハードウェアとソフトウェアのバランスの検証も今後の課題である。

## 謝辞

本研究の一部は、(財)人工知能財団研究助成金、(財)立松財団研究助成金、愛知県立大学学長特別研究費の支援による。記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] <http://www.robocup2002.org/>
- [2] M.Veloso, E.Pagello, and H.Kitano (Eds.): "RoboCup-99: Robot Soccer WorldCup", Springer (June 2000).
- [3] P.Stone, T.Balch and G.Kraetzschmar (Eds.): "RoboCup 2000: Robot Soccer WorldCup", Springer (March 2000).
- [4] A.Brik, S.Coradeschi, and S.Tadokoro (Eds.): "RoboCup 2001: Robot Soccer WorldCup", Springer (March 2002).
- [5] G.A.Kaminka, P.U.Lima and R.Rojas (Eds.): "RoboCup 2002: Robot Soccer WorldCup", The 2002 International RoboCup Symposium Pre-Proceedings, Fukuoka, (June 2002).
- [6] 日比野晋也, 児玉幸治, 飯田友幸, 加藤恭佑, 近藤早苗, 村上和人, 成瀬 正: "ロボカップ小型リーグにおける RoboDragons チームのシステム構成", Proc. of SI2002, Kobe, (Dec.2002).
- [7] 児玉幸治, 日比野晋也, 村上和人, 成瀬正: "画像処理を用いた小型ロボット検出と行動計画・行動分析への応用", Proc. of MIRU2002, Vol.1, pp.223-228, Nagoya, (July 2002).
- [8] 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", The 2002 International RoboCup Symposium Pre-Proceedings, pp.45-57, Fukuoka, (June 2002).
- [9] Bruce, J., Balch, T. and Veloso, M.: "Fast and Inexpensive Color Image Segmentation for Interactive Robots", Proc. of IROS '00, pp. 2061-2066 (2000).

表 2 RoboCup 世界大会における RoboDragons チームの成績

	Our Team	score		Oppo. Team	Affiliation
Round Robin	RoboDragons	1	8	BigRed	コーネル大学、米国
	RoboDragons	10	0	OMNI	大阪大学、日本
	RoboDragons	不戦勝		IUB Team2002	ブレーメン国際大学、独
	RoboDragons	10	1	RoboRoos	クイーンズランド大学、豪
Quater Final	RoboDragons	0	3	FU-Fighters	ベルリン自由大学、独