



「小型ロボットリーグ」

第3回

■ 長坂保典 (中部大学)

小型ロボットリーグとは

小型ロボットリーグ (Small Size Robot League, SSL と略される)^{1), 2)} は 1997 年のロボカップ創設当初から実施されており, ロボカップのさまざまなリーグの中では最古参のリーグの 1 つである. 直径 180mm 以内のロボット 5 台でチームを構成し, 5 対 5 でサッカーを行う. グローバルビジョン (フィールド全体を見渡せるように上方に設置したカメラにより撮影された画像を用いるビジョンシステム) から敵味方個々のロボットとボールの位置を認識し, その位置情報に基づいてチームのホストコンピュータが戦略や次のプレイを立案し, 個々のロボットに無線通信で動きの指示を送る. ロボットは送られた指示に従って動く. 実装の仕方によりチームによっては一部異なる部分はあるが, 以上が典型的な小型ロボットリーグの制御の仕組みである.

本稿では小型ロボットリーグの「現在」として, 現時点における競技ルール, ロボットのハードウェアと代表的な機構, グローバルビジョンと画像処理, ゲーム戦略および連携プレイなどさまざまな面を紹介する. 次に「過去から現在」としてリーグの変遷を振り返り, その時々の特徴となる技術や出来事を紹介する. 最後に「現在から未来」として, 現在進行中の新しい取り組みや研究動向を紹介する.

現在: スリリングな試合展開

図-1 は 2010 年の世界大会 (シンガポール) の試合風景である.

2010 年現在, ロボットが試合中にフィールドを走行するときの最高速度は 3m/sec に達し, ロボットが放つシュートの速度は 10m/sec に達する. このようにロボット, ボールの速度ともに非常に速いので, 結果として試合展開が非常に速くなり攻守がすぐに入れ代わる. 試合のイメージとしてはボールがフィールド上をあちこち飛び交い, ルーズボールには両チームのロボットがすぐに殺到してボールと



図-1 2010年の世界大会(シンガポール)の試合風景

主導権を奪い合う、といった感じである。そのようなスピーディな試合展開が小型ロボットリーグの特徴である。試合展開の速さ、およびロボットやボールの動きの速さから、小型ロボットリーグの試合はアイスホッケーのようだと評する人もいる。ロボットがボールを持ったときに、もしシュートコースが空いていればフィールド上どこからでもシュートを狙うことができ実際に得点に結びつくことも多い。そのためゴール前の守備は一瞬も気を抜くことができず、ボールの位置と敵味方のロボットの位置を考慮してシュートを防ぐゴールキーパーとディフェンダの位置取りを正確にコントロールする必要がある。筆者が試合を見た印象では、世界大会のベスト8レベルで実力が拮抗したチーム同士の対戦は非常にスリリングで見ていて面白く、エンタテインメント性を十分に備えている。

競技ルール

競技ルール¹⁾はFIFAが定めるサッカーのルールを参考にして、ヒトとロボットの違いに関連する項目を修正、および追加して定められている。以下に2010年版のルールの概略を示す。

- 競技用フィールドは6,050mm×4,050mmで、その周囲に審判の移動用の領域が設けられている。
- フィールド表面には緑色のフェルトまたはカーペットを使用する。
- ゴールの幅は700mm、高さは160mmで側面と後

面は板、上面はネットを張り金属製のクロスバーを設置する。

- ゴール前にディフェンスエリアという領域があり、エリア内で攻撃側がキーパーに接触すると反則となる。逆に、守備側がエリア内で反則を犯すと相手にペナルティキックが与えられる。
- グローバルビジョン用のカメラがフィールド上方4,000mmに設置される。カメラの映像はチーム間で共有するビジョンシステムSSL-Visionの画像処理サーバに送られ、ロボットやボールの位置を認識した結果がLANを経由してチームのコンピュータへ送られる。
- ボールはオレンジ色のゴルフボールを用いる。
- 5台以下のロボットでチームを構成する。
- ロボットの大きさは水平投影面積が直径180mmの円に収まり、高さが150mm以下。
- ロボットの色は黒色または白色、上面は黒色にする。
- ロボット上面にチームを識別する青色または黄色のメインマーカ(カラーパッチ)を付ける。さらに個体識別のために黄緑色とマゼンタのサブマーカを付ける。マーカを付ける位置はSSL-Vision用に統一されている。
- ロボットはフィールド外のコンピュータと無線で通信してよい。
- ドリブルおよびキック用の装置をロボットに装着してよい。
- キックされたボールの速度は10m/sを超えてはならない。
- 500mm以上連続してドリブルをしてはならない。
- チップキック(斜め上方にボールを打ち上げるキック)からの直接のゴールは無効。
- 主審1名と副審2名で試合を運営する。副審1名はReferee Box(主審の指示をチームのコンピュータに通知するプログラム、その信号はLANを経由して送られる)を操作する。
- 試合は前半10分、ハーフタイム5分、後半10分で行う。チームはタイムアウト(試合中ロボットの修理や調整を行う時間)を最大4回、合計5



図-2 オムニホイール

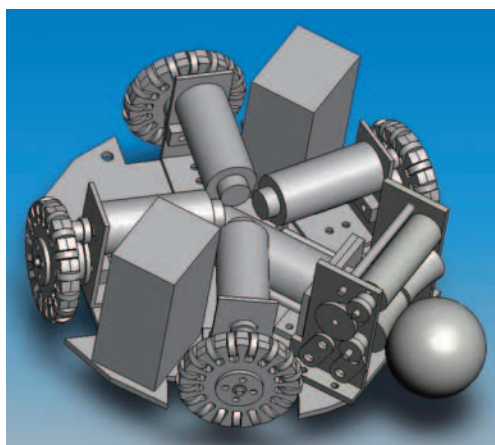


図-3 3次元CADによる駆動部分のモデル

分間まで取ることができる。

- オフサイドのルールは適用しない。
- ファウルを犯すとその種類に応じて、相手チームに直接フリーキック、間接フリーキック、ペナルティキックが与えられる。悪質なファウルについてはイエローカードやレッドカードが与えられる。イエローカードを受けたらロボット1台を2分間退場させる、レッドカードを受けたらロボット1台を退場させる。
- スローインは間接フリーキックで代用する。

ロボットのハードウェア

世界大会に参加するチームは、ロボットのハードウェアを含め特徴的な技術を Team Description Paper (TDP) として公開している。また各年度の上位入賞チームは次年度に、より詳細な Extended Team Description Paper (ETDP) を公開している。いずれも小型ロボットリーグの Web サイト³⁾で参照できる。

現在、ロボットの走行に関して駆動系はほとんどのチームが同じ機構(4輪全方向移動機構)を採用している。4個の車輪を持ち、DC モータを4個用いてそれぞれの車輪を駆動する。モータは30W 程度の DC ブラシレスモータを採用するチームが増えて

いる。車輪はオムニホイールと呼ばれる特殊な構造のものを用いる。これは図-2に示すように車輪の外周

部分に自由に回転する小さなローラを多数埋め込んだもので、車輪が本来回転する方向には床面に駆動力を伝えるが、横方向の力が加わると小ローラが回転して力を逃がすようになっている。4個のオムニホイールを用いて、それぞれを図-3のCAD画像に示すように90度に近い角度で配置する。この配置で各車輪の回転数を適切に制御してやると、ロボットは正面を向いたままで前後左右斜め全方向への走行が可能となる。

図-4に典型的なロボットの形状を示す。現在はほとんどのチームのロボットが円筒形で非常に似た形状になっているため、ロボットの外見を見ただけではどのチームのロボットかすぐには判別できない。以前に比べると個性がなくなったといえる。別の言い方をすると多くの機能を規定のサイズに収めるため、一定の形状に収斂してきたと言えるかもしれない。ロボット内部にはモータ、減速ギア、マイコンボード、モータドライバ基板、無線通信装置、ホールディングデバイス、ボール保持を判断するセンサ(赤外線)、キックデバイス、キックデバイス用の昇圧回路、バッテリーなどが組み込まれる。バッテリーは以前はニッケル水素充電電池が多く用いられたが、現在はリチウムイオン充電電池、リチウムポリマ充電電池が主流になっている。

このようなロボットを製作するのに、材料や部品代がどの程度かかるか、中部大学 Owaribito-CU チームのロボットを例として示す。表-1はロボットの製作を担当する学生が積算したもので、ネジや抵

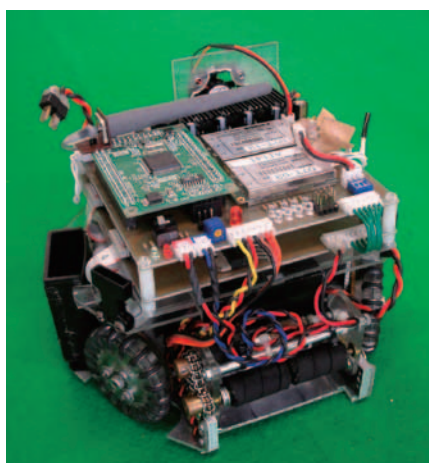
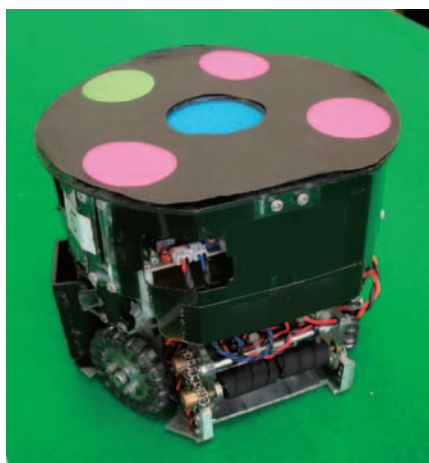


図-4 ロボットの外観(左)と内部構造(右)

抗, ダイオードに至るまで詳しくリストアップした結果に基づいて計算した。

この結果から, 材料や部品代としておよそ210,000 円程度必要であることが分かる。ただし, これはあくまでも素材の金額だけである。これらの材料に対して加工や製作に相当な手間と時間をかけることでロボットになるわけで, その加工の手間を費用として一切含んでいない点に注意する必要がある。

ボールをドリブルする装置, ボールを蹴る装置

ほぼすべてのチームのロボットがドリブル用の機構とキック用の機構を備えている点も同様である。それぞれの機構はホールディングデバイス (ドリブルデバイス), キックデバイスと呼ばれる。

ホールディングデバイスはロボット前面にモータで駆動されるゴムローラを取り付け, ボールがローラに接したときにバックスピンをかけて常に自機の方方向にボールが転がるようにすることで, まるでボールを吸いつけたようにコントロールすることができる装置である。図-4 のロボット前面下部にあるゴムローラがホールディングデバイスである。強力なホールディングデバイスを備えるロボットはボールをキープしたまま敵ゴール前まで進むことができるので, 2004 年以降は 500mm 以上連続してドリブルをすることが禁止された。500mm 進む前にボールを放すかキックする必要がある。

■ロボットボディ		
アルミ, ジュラルミン板	*	2,000
PET 板	*	500
ネジ等	*	600
■駆動部, オムニホイール		
maxon 社製モータ	4	60,000
軸受	8	5,000
ギア, シャフト等	*	6,500
■ホールディングデバイス, キックデバイス		
DC モータ	1	6,000
スプロケット等	*	1,000
鉄心	1	500
エナメル線	1	1,000
プラスチック素材	*	500
■メイン基板, 無線通信		
感光基板	1	1,400
dsPIC4012 マイコン	4	6,800
H8/3052F マイコン	1	3,400
L6203 モータドライバ IC	5	5,500
リチウムポリマ充電電池	2	10,000
ニッケル水素充電電池 (単三型)	6	2,100
無線機	1	70,000
アンテナ	1	6,000
電子部品	*	5,000
■ソレノイド用昇圧回路		
MOS-FET (47N60c3)	2	5,000
コンデンサ (200V1500 μ F)	1	3,000
コンデンサ (200V2200 μ F)	1	3,000
リチウムイオン充電電池	2	1,400
電子部品	*	3,800
合計		210,000

※表中の要素は左から品名, 個数, 合計金額を表す。

表-1 ロボット 1 台分の材料, 部品代(中部大学 Owaribito-CU チームの例)

キックデバイスはパスやシュートをする際にボールを打ち出す(蹴る)ための装置で、多くのチームがソレノイドを用いて装置を駆動している。ソレノイドとは、コイルの中に可動鉄心を置き、コイルに電流を流して磁界を発生させ、鉄心を直線運動させる装置である。キックデバイスでは、瞬間的に大きな力を得るために、電源電圧を数百Vに昇圧しコンデンサに蓄え、それを一気に放電する。鉄心にボールを打つための金属板などを取り付けることでボールを蹴ることができる。図-5は試作した扁平形状のソレノイドである。

キックデバイスが最初に登場したときは、ボールを水平に蹴ることしかできなかった。したがって相手チームのロボットがコースを塞ぐとそれ以上ボールを進めることができなかった。その後ボールを水平方向に蹴るだけでなく、前方にいる敵ロボットの頭上を越えるように空中に蹴り上げる改良型キックデバイスが現れた。このような蹴り方はチップキックと呼ばれる。現在では多くのチームがチップキックの機能を持つキックデバイスを採用している。図-6はストロボスコープを用いて撮影したチップキックのボールの軌跡である。チップキックにより壁となって防いでいるロボットを越えてボールを前方に送ることができるのでプレイの幅が広がった。

グローバルビジョン

小型ロボットリーグと他のリーグとの大きな違いとして、ロボットの外部からフィールドをセンシングすることが認められていること、またフィールド外のコンピュータや装置と通信してよいという2点がある。これらにより試合中にフィールド全体の状況を容易に把握できるので、小型ロボットリーグで

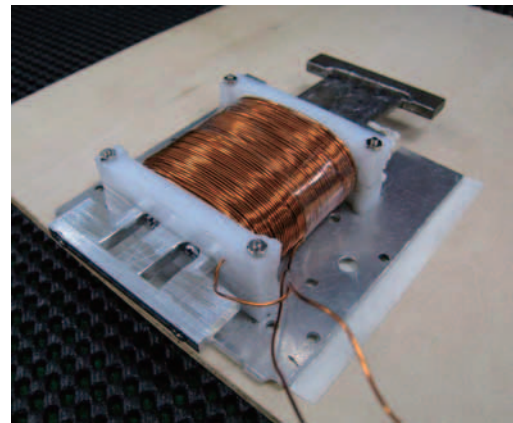


図-5 キックデバイス用に製作したソレノイド

は早い段階(2001～02年頃)から複数ロボットによるパスの交換や連携プレイが実現されていた。ロボット外部からのフィールドのセンシングは現在はIEEE1394カメラを用いてフィールドの画像を撮影しており、グローバルビジョンと呼んでいる。1台のカメラではフィールド全体をカバーできないので2台のカメラでフィールドを半面ずつ撮影してコンピュータ上で合成している。フィールド表面は緑色のカーペット、ボールはオレンジ色、ロボット上面に付けるチーム識別用のメインマークは青色と黄色、ロボットの個体を識別するためのサブマークは黄緑色とマゼンタとなっており、画像中の特定の色を検出することでロボットの位置や向き、ボールの位置を認識する。図-7にカメラで撮影されたフィールドの画像と色認識した結果を示す。

グローバルビジョン用の機材の準備と競技会場での設置・調整は2009年までは参加チームが個別に行ってきた。競技会に参加するときにはロボットのほかにカメラ2台、画像処理用の高性能のコンピュータ、ケーブル類を持参する必要がある。特に世界大会に参加するときには機材の運搬が負担になっていた。また会場でのカメラの取付と調整も大変であ

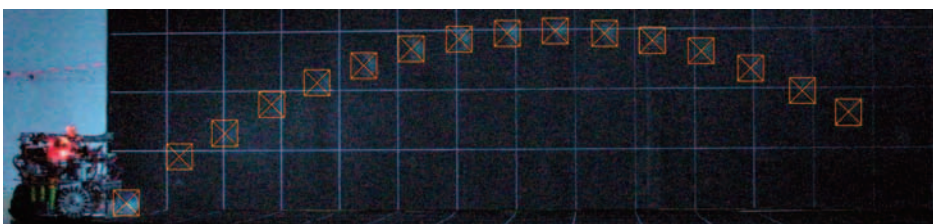


図-6 チップキックのボールの軌跡

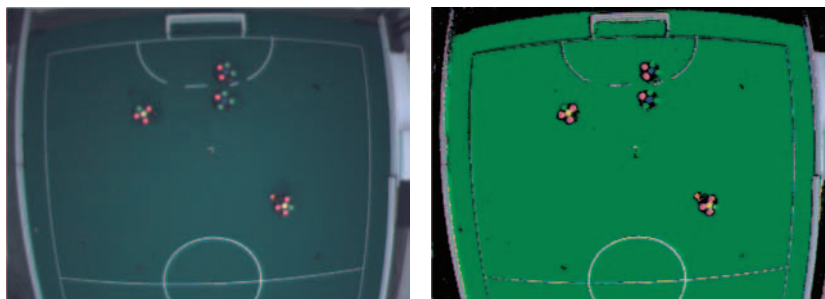


図-7 グローバルビジョンのカメラで撮影されたフィールド画像(左)と色認識した結果(右)

った。

チームが個別でビジョンシステムを用意するのは運営上多くの問題を抱えていたので、ビジョンシステムは2010年から共有方式であるSSL-Vision⁴⁾に変更された。SSL-Visionは有志のチームにより開発されたグローバルビジョンのシステムである。SSL-Visionではカメラや画像処理用のサーバは競技会の実行委員会または主催者が用意するので、参加チームはカメラや画像処理用のコンピュータを持参する必要がない。またカメラの設置と画像処理プログラムの色調整は各フィールドで実行委員会が最初に行う。試合時には画像処理プログラムで色認識を行った後、ロボットの位置や向き、ボールの位置を認識して結果をLANを経由してUDPマルチキャストで各チームに配信する。

配信されるデータは、カメラ1台分のデータとフィールド情報とがまとめられて、Googleが作成したプロトコル(Google Protocol Buffers)に従って圧縮されて送られてくる。配信されるデータに含まれる主要な情報を以下に示す。

カメラ1台分のデータには、

- フレームナンバ
- キャプチャタイム
- データの転送時間
- カメラ番号
- ボールの情報
- 黄チームのロボット情報
- 青チームのロボット情報

の各要素が含まれている。

ボールの情報の詳細には、

- 信頼度
 - 範囲
 - x座標
 - y座標
 - z座標
- などの要素がある。

ロボットの情報の詳細は、

- 信頼度
 - 個体番号
 - x座標
 - y座標
 - 角度
 - ロボットの高さ
- である。

SSL-Visionは低レベルの画像処理を担当する。低レベルとは、画像中の同じ色の領域を抽出し、その色からその領域がボール、ロボットのメインマーカ、サブマーカのどれであるかを推定する。ロボットについてはメインマーカ、サブマーカの位置の組合せから正面の向きまで推定する。推定した結果については、領域の大きさや形などから信頼度という値を付与する。フィールド上に実際にボールは1個しか存在しないが、推定した結果ではボールが複数個存在する場合がある。また同じ個体番号のロボットも実際には1台しか存在しないが、場合によっては複数台となる場合がある。SSL-Visionはそのような場合でも1個を選択するという事はしないで、推定した結果をそのままチームに配信する。どの結果を採用するかはチームに委ねられてお

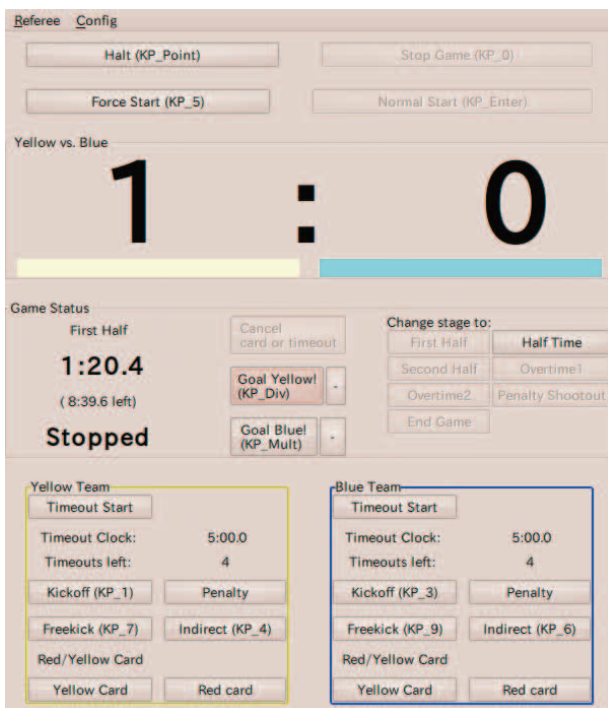


図-8 Referee Box のユーザインタフェース

り、信頼度を参照したり、過去の動きの履歴から推定するなど何らかの方法で決める必要がある。2台以上のカメラ間での情報の重複や統合に関する処理も SSL-Vision は行わず、カメラごとに独立して情報を送ってくるので、必要ならチームで処理する必要がある。配信されたデータからチームで必要とする情報を抜き出して、次のプレイを決めるために利用する。

SSL-Vision の導入により参加チームはビジョンに関して準備することが少なくなったので負担が随分軽減された。フィールド間の移動もロボットとホストコンピュータを移動させるだけでよいので短時間でできるようになった。主催者の負担は増したが、リーグ全体では競技会の運営が効率化された。

Referee Box

小型ロボットリーグでは、プレイや試合の進行に関する審判の判断（反則、スローイン、フリーキックなど）を対戦している両チームに通知するために Referee Box¹⁾ と呼ばれるプログラムを使用する。フィールド脇には Referee Box 用の PC が用意さ

コマンド	黄チーム向	青チーム向
Kick off	k	K
Penalty kick	p	P
Direct Free kick	f	F
Indirect Free kick	i	I
Timeout	t	T
Goal scored	g	G
Yellow Card	y	Y
Red Card	r	R

表-2 Referee Box から送られるコマンド 1

れ、試合中は副審が操作する。Referee Box は PC 上 (OS は Linux または Windows) で動作するプログラムで、図-8 に示すユーザインタフェースを持つ。Kick off, Free kick, Stop game, Halt, Timeout などのボタンがあり、審判の判断に合わせて副審がボタンを押すことで対戦中のチームにコマンドが送られる。フィールドごとに参加チームの PC と SSL-Vision サーバ、Referee Box PC が LAN で接続されるので、Referee Box からの信号は LAN 経由で対戦中のチームに送られる。

Referee Box から送られるコマンドのパケットは以下の情報を含む。C 言語の構造体の形式で表す。

```
struct GameStatePacket {
    char cmd;          // レフェリーコマンド
    unsigned char cmd_counter;
                        // 送られたコマンドの通し番号
    unsigned char goals_blue;
                        // 青チームの現在の得点
    unsigned char goals_yellow;
                        // 黄チームの現在の得点
    unsigned short time_remaining;
                        // ゲームの残り時間 (秒)
};
```

レフェリーコマンドはアルファベット 1 文字で、大文字と小文字が青色と黄色のどちらのチームに向けたものかの違いを表す。代表的なレフェリーコマンドを表-2 に示す。

表-3 のコマンドはプレイではなく試合の進行を表すコマンドで両チームで共通の文字を使用する。

競技会に参加するチームは Referee Box からのコマンドに合わせて、所定の位置にロボットを移動さ



せたり、ボールをキックさせたり、ロボットを停止させるなどの制御ができるように準備しておく必要がある。Referee Box 導入以前は、人の手でロボットを移動させたり、ゲーム中断後再開されるたびにチームの戦略用 PC で人がボタンを押す場面が見られたが、Referee Box 導入以降は、キックオフ、スローイン、ゴールキック、コーナーキック等の通常のプレイではほとんど人がロボットに触れることなく試合が進んでいく。ボールがフィールド外に出るとゲームはいったん中断されるが、主審がボールを再開位置まで移動させていくと両チームのロボットが一定の距離を空けて追いかけていく。ボールが止まるとロボットも止まり、主審が再開の笛を吹くと、ボールを蹴る側のチームのロボットが蹴るまで相手チームのロボットは待っている。Referee Box の導入によって試合の進行に人手を介する場面が少なくなり自動化に一步近付いた。

代表的な戦略、関係プレイ

現在は多くのチームがロボット間でボールをパスするプレイを実現しているので、パスを活用したさまざまな関係プレイが試合中に見られる。以下では代表的な関係プレイを紹介する。パスを受けてシュートというケースが多く現れるが、すべてノートラップのダイレクトボレー、すなわちボールを受けた瞬間にシュートを打っている。ボールをトラップして体勢を変える動きなどをしていないと、すぐに敵ロボットに体を寄せられてシュートコースを塞がれて

コマンド	両チーム向
Halt	H
Stop	S
Start	s
Begin first half	1
Begin half time	h
Begin second half	2

表-3 Referee Box から送られるコマンド 2

しまうのでボールを受けたらすぐにシュートする必要がある。

キックオフでは以前はシュートコースを確実に塞ぐのが基本であったが、パスが可能になると左右に開いている味方ロボットにパスを出して斜めの位置からシュートを狙えるようになった。図-9左では青チームが黄色チームのキックオフに備えてセンターサークル手前に3台のロボットで(1)のコースを塞ぐ壁を作っている。数年後パスが可能になると右にパスを出して(2)のコースでシュートを狙われるようになった。よって現在は敵ロボットが左右に開いてシュートを狙うようなら図-9右のようにそのコースを塞ぐ配置に変わってきた。中央の守備が手薄になるがやむを得ない。

スローインやフリーキックでも、以前はゴール前にボールを進められないようにボールとゴールの間に複数のロボットで壁(図-10左における(3)のコースを塞ぐ3台のロボット)を作って、ボールを自陣ゴール近くに持ち込まれないようにするのが主流であった。現在は(4)、(5)のシュートを打たせないようにパスコースを潰す守備が行われる。図-10右のようにキッカーに付くロボットを減らしてパスを

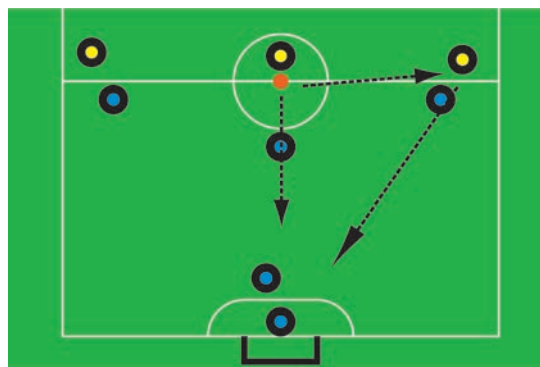
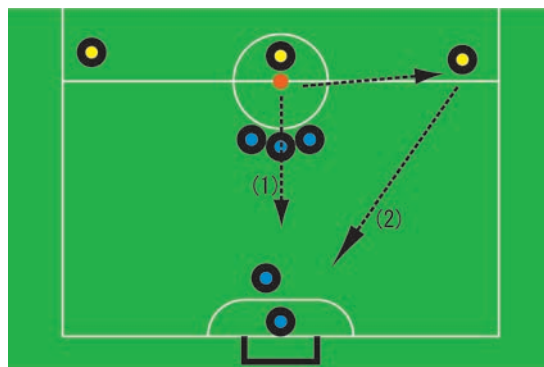


図-9 キックオフ時の以前の守備(左)と現在の守備(右)

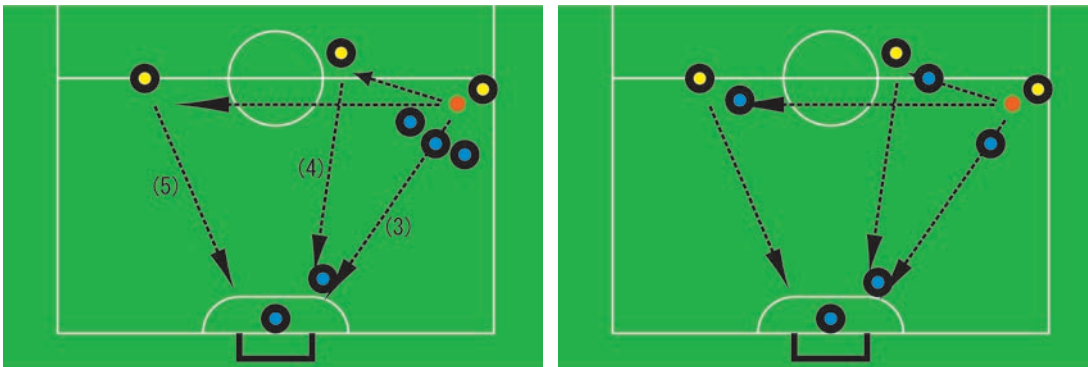


図-10 スローイン、フリーキック時の以前の守備(左)と現在の守備(右)

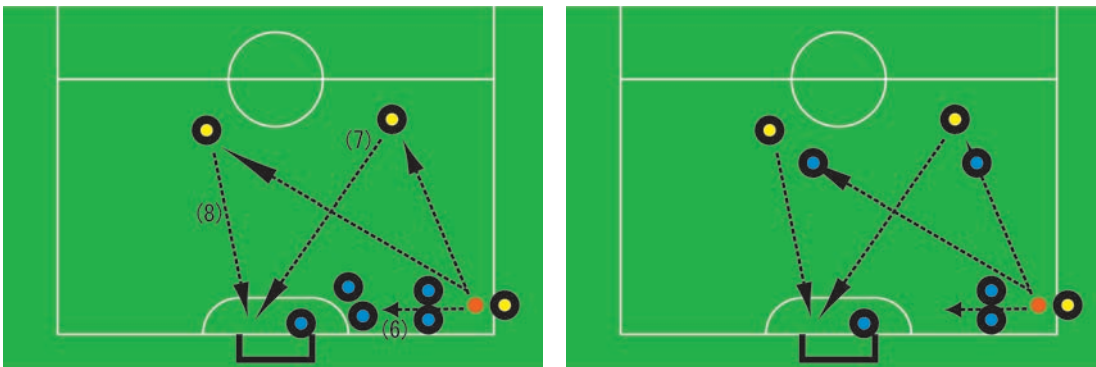


図-11 コーナーキック時の以前の守備(左)と現在の守備(右)

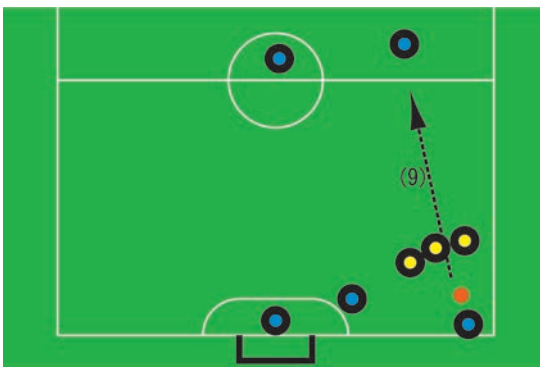


図-12 ゴールキックではチップキックで敵の壁の上を越えることができる

受けるロボットをマークするように変化してきた。

コーナーキックも同じような理由から、直接シュート(図-11左の(6))を防ぐ守備から、パスからのシュート(7)、(8)を防ぐ守備に変わってきた。

図-11右のようにパスの受け手をマークする。

従来はフィールド上の平面的なパスやシュートしかなかったため、パスやシュートのコース途中で敵ロボットが入る(図-9左など)とそれ以上攻撃する手立てがなかった。しかしチップキックが普及してからはコースを塞ぐ敵ロボットを越えてボール

を前方に送ることが可能になったので攻撃の幅が広がった。現在の守備はパスやシュートのコースをただ塞ぐだけでは不十分で、守備の壁を越えられたボールにいかに対処するかという点が重要になってきている。

図-12は青チームがゴールキックを得た場面であるが、従来は黄色チームに図のように壁を作られるとボールを前に送ることがほとんどできなかった。しかしチップキックによって壁の向こうの味方ロボットにパスができるようになって状況が変わった。現在は多くのロボットで壁を作ってもチップキックで上を越えられることが多いので、以前よりも壁に割り当てるロボットの台数を減らして、その分フィールド中央にいる相手ロボットをマークすることが多くなった。

チップキックが効果的な別のケースとしてコーナーキックがある。水平に蹴ったボールでゴール前を狙っても壁に弾かれてしまうのでほとんど成功しないが、チップキックが使えるようになった結果、壁の上を越えてゴール前のディフェンスエリア(図-13の(10)付近)に直接ボールを落すことがで

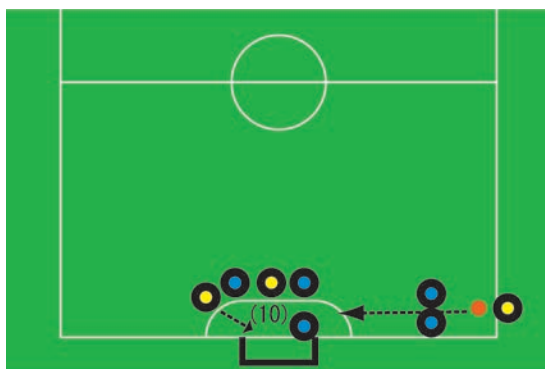


図-13 コーナーキックからセンタリングを上げてゴール前からシュート

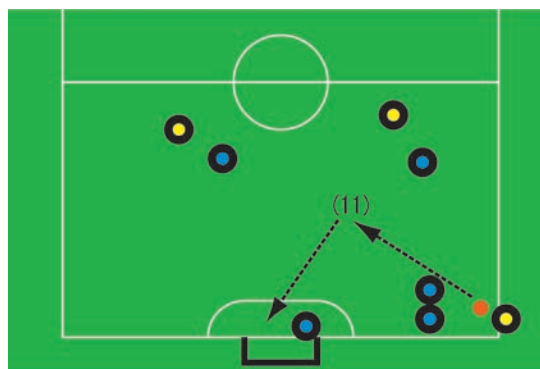


図-14 パスされたボールに走り込んでそのままシュート

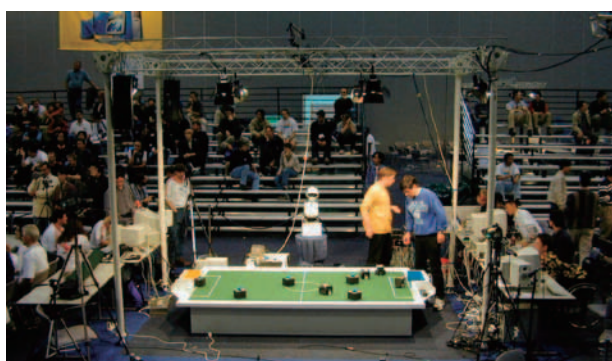


図-15 2000年の世界大会(メルボルン)におけるフィールド

きようになった。ディフェンスエリアの中は守備側のロボットは1台しか入れないので、ディフェンスエリア内にボールを持ち込むことができれば、高い確率でキーパーと1対1の場面を作れ、得点に結び付きやすい。人間のサッカーでコーナーキックからセンタリングを上げてゴール前で競って得点に結び付けるのとまったく同じプレイが可能になってきた。2010年の世界大会ではこの戦略を多用するチームがいくつか現れたが、今後広く使われるようになると思われる。

その他の高度な連携プレイとして、走り込みでのシュートがある。この章の前半でパスからのシュートをいくつか取り上げたが、それらはパスの受け手がほぼ静止していて、そこにきたパスにタイミングを合わせてシュートするものであった。ここで取り上げる走り込みでのシュートは図-14に示すようにパスの受け手の現在位置とは別の位置(図-14の(11))にボールを出して、パスの受け手がそこに走り込んでノットラップでシュートを放つプレイである。少しでもタイミングがずれるとボールに当たら

ないので非常に難しい。そのため、これを試みていたチームでも成功率はまだ高くなかった。このプレイができるようになると敵のマークを外してフリーでシュートを打てるので今後多くのチームが挑戦すると思われる。

過去：リーグの変遷

ここでは創設当初からリーグがどのように変遷してきたか、競技ルールやロボットの機能、戦略や連携プレイの進化などの観点から振り返ってみる。

創設当初はフィールドの大きさが卓球台(2740mm×1525mm)と同じであった。また当時はフィールドの境界を表す白線の外はボールが飛び出さないように壁が設置されていた。したがって壁を越えない限りフィールド外にボールが出ることはなく、スローインやゴールキック、コーナーキックはずっと少なかった。

図-15は2000年の世界大会(メルボルン)における小型ロボットリーグのフィールドとロボットである。会場の照明とは別に補助照明が付けられフィールド上が明るくなっている。フィールドが現在よりもかなり小さいことが分かる。

図-16は2001年の世界大会(シアトル)で、出場するチームメンバとロボットを集めて撮った記念写真の一部である。当時は四角形のロボット、長方形のロボット、丸いロボットなど形状がさまざまであった。車輪は2個で2輪駆動のロボットが多かったが、一部のロボットはオムニホイールを用いた3



図-16 2001年の世界大会(シアトル)に出場したロボット。当時はまだロボットの駆動方式や形状にバラエティがあった。左から2列目と3列目のロボットは全方向移動機構を採用している。

輪で全方向移動を可能にしたものもあった。

当時はまだほとんどのチームがパスができず、キックデバイスも少数のチームだけが搭載するという状況で、ほとんどのチームのロボットはボールを相手ゴールに向けて押していくことしかできなかった。オムニホイールによる全方向移動、キックデバイス、ホールディングデバイスはその後徐々に使用するチームが増えていき、2004年頃にはほとんどのチームが備えるようになった。

フィールドの大きさはたびたび変更されて、そのつど大きくなっていった。フィールド周囲の壁は最初は垂直だったが、2000年から斜めになり、2004年に壁がなくなり白線のみになった。現在はロボットやボールが誤って遠くまで出ないようにフィールド周辺で止める目的で、フィールド境界の白線から後退した位置に壁が設置されている。フィールド境界の壁を撤去してしばらくの間は頻繁にボールがフィールド外に出て試合が止まるが多かったが、それでも決勝トーナメントの終盤の試合になるとパスが効果的に使用されサッカーらしくなっていた。

2004年はルールが大きく改定された年で、フィールド周囲の壁が撤去されたほかにも以下の点が変更された。

- 補助照明が廃止され、会場備え付けの照明のみを使用する。
- フィールドの大きさがそれまでの2倍程度まで一気に広げられた。
- ドリブルの距離に制限が加えられた。

競技会に実際に参加してみて、フィールドの大き

さが急に大きくなったのには戸惑ったが、さらに補助照明が廃止された影響も大きかった。それまでは補助照明のおかげでフィールド上はほぼ均一の明るさで影がなかった。しかし会場の照明だけになったため、カメラやカメラ取り付け用のアルミトラスの影がフィールド上にはっきりと現れるようになり、明るい部分と影の部分で色の見え方が変わるため誤認識が一気に増えた。この年のルール変更はしっかり保護された環境から普通の環境に放り出されたような感じで対応するまで多少時間がかかったが、今では参加チームは皆この環境で当たり前のように試合をしているので厳しい環境への対応能力が向上している。

試合の内容については、2000年前後までは多くのチームが相手よりも先にボールに追いついて相手ゴールに向けてシュートするという単純な動きを中心にしていて、その後、制御のレベルが向上しパスが高い確率で成功するようになると何らかの狙いを持った連係プレイが実現できるようになった。さらにチップキックが加わり、ボールを3次元空間で動かせるようになり新しいプレイが可能となった。ここ2、3年の試合内容を見ると、決勝トーナメントの上位に進出する強豪チームは連係プレイが同程度のレベルに達し、動きの速さが格段に向上した。全体の中位のレベルに位置するチームは相対的にレベルが上がり、一部の連係プレイが行えるようになった。しかし強豪チームとは明確な違いがあり、動きの速さに関してはまったく追いつけないような差である。2010年の世界大会で優勝したタイのチームSkubaは予選から準決勝までの全試合を10-0のコールド勝ち、決勝戦も6-1と圧倒的な強さを見せ2連覇を達成した。

ロボットの動きが速くなったのはモータの変更が大きく影響している。5年前は数Wから10W程度のDCモータが主流だったが、現在は30W程度のDCブラシレスモータが主として使われている。現在の強豪チームは重くて(4kg)頑丈なロボットに強力なモータを取り付け、高速でフィールドを駆け回り相手に当たり負けしないモンスターマシンを製作



して、制御や戦略の面でも完成度の高いソフトウェアを組み合わせてロボットの能力を十二分に引き出している。

ルールの改定、ハードウェアの性能競争からソフトウェア重視へ

ルールについては毎年少しずつ変更されてきたが、変更された部分のなかには強力になりすぎたロボットの機能を制限するものが含まれている。2004年に連続したドリブルが制限されたのに加えて、2005年にはチップキックによるシュートに大きな制限が課せられ、直接シュートを狙うことがほぼできなくなった。2007年にはキックされたボールの速度の上限が10m/secに制限された。これはフィールド上のどこからでもシュートが狙えるというほかに、ボールの速度が高速になりすぎて、人やものに当たったときに相手を傷つける可能性が高くなったためである。このように強力なハードウェアの機能が登場すると、試合の流れや結果が、その機能だけで決まってしまう／支配されてしまうのでゲームバランスを崩さないために制限することがある。またこれらの制限はすべて、参加チームにロボットの機械的な性能向上だけに注目するのではなく、人工知能や戦略、連携プレイなどのソフトウェアや制御の改良に注力してもらおうというリーグの意向であり、開発の方向性を定めていると考える。

未来：新しい取り組み、研究課題

ロボットハードウェアの性能向上や改良、動きながらパスを受けるなどの制御の高精度化、より効果的な攻撃や守備を実現するチーム戦略や連携プレイのための人工知能などは各チームがこれまで継続して取り組んできた研究課題であり、今後も少しずつ進歩していくと予想される。ただしロボットのハードウェアに関しては、現状で技術的に飽和しつつあり、他の要素に比べると今後の劇的な改良の余地は少ないと思われる。

この原稿を作成している最中に、2011年度以降

のルール改定について意見を求めるというアナウンスがリーグのテクニカルコミッティ（技術面を計画する運営委員）から参加チームに向けてなされた。運営委員から提案されているのは、フィールドサイズの拡大と、複数チームのロボットを組み合わせる構成する混成チームの実施の2点である。これらはいずれもリーグのロードマップに記載されている課題である。一定期間の議論を経た後に参加チームの合意が得られれば、今後リーグとして具体的に取り組んでいく研究課題となる。

現在はフィールドの広さに対してロボットの走行速度、キックされたボールの速度のいずれも速くなりすぎて、サッカー競技としてのゲームバランスが崩れている。具体的には、シュートコースさえ空けばフィールド上どこからでもシュートが狙えるという点、多くのチームのロボットがフィールドの端から端までわずか2秒で到達できるという点などが挙げられる。よって試合中のチームの優劣はこれら速度の違いによって決まる部分が大きく、相対的にチームの戦略や連携プレイが優劣に寄与する割合が低くなっている。この問題に対して、フィールドサイズを拡大することにより、速度が優劣に寄与する割合を下げ、チームの戦略や連携プレイが優劣に寄与する割合を上げることで、参加チームが今まで以上にソフトウェアの開発に注力するように仕向けるという狙いがあると思われる。

複数チームのロボットによる混成チームの実現は、少ない台数のロボットしか用意できないチームでも競技会に参加しやすくする、チーム間の協力や共同研究を進めやすくするなどの狙いがある。1チーム5台の現在の構成では、守備に割く台数を除くと攻撃に参加できるロボットの台数が限られるため、実現可能な連携プレイには限りがある。1チームあたりのロボットの台数を増やせば、連携プレイの幅が広がるので、今後ロボットの台数は少しずつ増やされていくと予想できるが、多くのロボットを製作し競技会に持参してメンテナンスを行うのは、参加チームの費用負担や人的負担が増す。また少数のロボットしか用意できないチームは競技会に参加できな

なくなってしまう。この問題の解決策として、混成チームが実現されれば少数のロボットしか持たないチームでも他チームと協力することで参加が可能になる。また混成チームの実施の枠組みが定まれば、今まで以上に異なるチーム間の共同研究が進めやすくなると考えられる。

リーグのロードマップではこれら2点以外に、ローカルビジョンの導入、レフェリーの自動化、チーム戦略やロボットの動作を記述する標準言語の導入などが提示されている。レフェリーの自動化は、現状ではReferee Boxにより試合の進行が半自動化されているが、これに加えてグローバルビジョンを活用して主審の判断も自動化しようという計画である。チーム戦略やロボットの動作を記述する標準言語は、上述した混成チームの実現に必要な技術で参加チームが標準言語に対応した戦略システムを用意すれば、Aチームの戦略でBチームのロボットを動かすといったことが可能となり、混成チームやチーム間の協力、共同研究が進めやすくなる。これらはいずれもまだ計画段階であり、具体的な成果はこれからである。

SSL-Humanoid

日本のチームが合同で発信、提案している新しい取り組みが、グローバルビジョンの環境で小型ヒューマノイドロボットを用いてサッカーを行うリーグSSL-Humanoid^{5)~7)}である。

ロボカップサッカーでヒューマノイドロボットを使用するリーグは、ほかにヒューマノイドリーグとStandard Platform League (SPL)がある。これら2つのリーグでは、ロボット外部のセンサが使用できない、ロボット外部のコンピュータが使用できない、ロボット外部から指示ができないという制限があり、必要な処理はすべてロボット上で「ローカル」に行う必要がある。一方、SSL-Humanoidではグローバルビジョンの環境を用いるため、ロボット外部のセンサやコンピュータを使用することができ、外部との通信も認められている。



図-17 SSL-Humanoid の試合風景

図-17にSSL-Humanoidの試合風景を示す。左側のロボットがキックオフで蹴ったボールがゴール前で壁を作っているロボットに当たって跳ね返っている。

SSL-Humanoidでは、自作のロボット、市販のロボットキットのどちらで出場しても構わないのが特徴の1つになっている。2010年末の時点で市販の小型ヒューマノイドロボットキットは1体10万円から15万円程度でさまざまなメーカーのものが入手できる。機械加工やマイコンのプログラム開発の知識があればロボット本体と制御系を自作することも可能である。関節数(15から20程度)と同じ個数のサーボモータ(1個6,000円から高性能なもので20,000円程度)、制御用のマイコンボード、無線通信装置、充電池などが必要となる。アルミ板を加工することができれば、ボディや脚を構成するフレームを自作して独自設計のロボットで出場することも可能である。

SSL-Humanoidは小型ロボットリーグのルールや競技実施の枠組みをほぼそのまま受け継いで、小型ヒューマノイドロボットと、これまでとはカメラの設置位置や個数が異なるグローバルビジョンの導入を目指している。SSL-Humanoidの特徴や狙いを以下に示す。

- 現在の車輪型ロボット(小型ロボットリーグで使っている、車輪で走行するタイプのロボット)は技術的に成熟して飽和しつつあるので、ヒューマノイドロボットに変更することでプラットフォーム



ームをリセットする。車輪型ロボットの改良では大出力のモータの搭載など、速度やパワーの向上に偏重していたので、プラットフォームの変更によりハードウェア開発の方向性を変える。

- 車輪型ロボットがキックしたボールの速度は10m/secに達する。これはエンタテインメント性の向上に非常に貢献しているが、その反面ロボットが誤って人のいる方向にボールを蹴った場合事故につながる恐れがある。プラットフォームを変更することでこのようなロボットの危険な要素をなくす。
- 車輪型ロボットは市販のキットなどでそのまま使えるものがないので、ロボットの構成部品のほとんどをチームで用意または製作する必要がある。オムニホイール、車体、制御用回路基板、キックデバイスなどは機械や電子回路の分野に精通していないと製作するのが難しい。これらは新規参入チームに対して敷居を高くする要因となっている。SSL-Humanoidでは自作のロボットのほかに市販のロボットキットでも出場できる規格になっていて、新しいチームが比較的容易に参入できる。
- ヒューマノイドロボットは歩行速度が遅く、ボールを蹴る力も弱い。よってスピードに頼った試合運びはできず、今まで以上にチーム戦略、ロボットのポジショニング、連携プレイの構築などに注力せざるを得なくなり、競技におけるソフトウェアの重要性が増す。
- グローバルビジョンのカメラをフィールド直上ではなく、フィールド周囲に立てたポールに設置して斜め上から見下ろすようにフィールドを撮影する方式に変更する。これによりフィールドを設置する場所の確保が容易になる。現在はカメラを高さ4,000mmに設置するので、それだけの天井高があるまとまった広さのスペースを屋内ではなかなか確保できない。フィールド周囲の2,000mm程度の高さにカメラを設置する方式に変更すれば、天井高を考える必要がなくなる。現在よりもオクルージョン（物体の陰になる向うの部分が画像上で見えなくなる現象）の影響が強くなるが、カメ

ラの台数を増やして対応する予定である。

- ビジョンの方式を変更することで、興味深い研究課題が生まれる。複数カメラの画像を組み合わせることで、オクルージョンの影響を軽減する認識手法、従来のロボット上部に付けるマーカ板の代わりにロボットにTシャツ（のようなマーカ）を着せてチームや個体を識別する手法、画像処理の結果からロボットの姿勢を認識する手法などが新しい研究課題として挙げられる。

SSL-Humanoidのルールにおいて、小型ロボットリーグのルールと異なる部分を以下に示す。多くのルールが共通であるが、ロボットの形状や特性に合わせて一部のルールが変更されている。現在はまだ新しいグローバルビジョンの方式が実現されていないので、フィールド直上のカメラ位置となっている。

- 競技用フィールドは4,050mm×3,025mm（小型ロボットリーグのフィールドの半面を使用する）。
- ゴールの幅は1,000mm、高さは600mm、奥行きは300mm。
- ボールはオレンジ色のテニスボールを用いる。
- 3台以下のロボットでチームを構成する。
- ロボットの大きさは高さが400mm以下。
- 試合は前半5分、ハーフタイム5分、後半5分で行う。チームはタイムアウト（試合中ロボットの修理や調整を行う時間）を最大4回、合計10分間まで取ることができる。

フィールド周囲の斜め上から見下ろす方式の新しいグローバルビジョンについては、大阪電気通信大学の研究グループが開発に取り組んでいる⁸⁾。

図-18に示すようにフィールド周囲、4隅の高さ1,600mmの位置に斜め下向きに設置した4台のカメラでフィールドの画像を撮影し、4枚の画像を用いて視体積交差法という手法で、フィールド上のロボットやボールの位置、形状を推定する。結果として、ロボットやボールは3次元空間中に1辺10mmのボクセルの集合として得られる。

図-19左は原画像の例で、同図右は視体積交差法

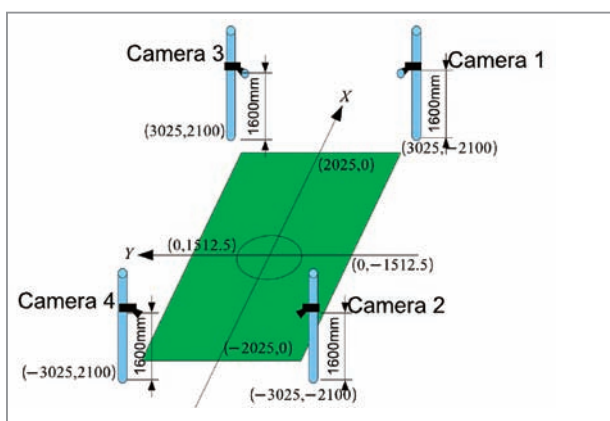


図-18 フィールド周囲、4隅に設置したカメラの座標

により推定したロボットやボールを同じ角度の画像として再構成した結果を表す。この結果から一部誤認識した部分はあるが、ほとんどの物体はその位置と形状が正しく推定されていることが分かる。

図-20は推定されたロボットの1体を拡大表示したもので、脚や腕、肩、頭部などの形状がほぼ正しく再現されていることが分かる。4コアのCPUを用いることで、ロボットが10台に増えても1台のPCでビデオレート(30cycles/sec)で処理できることを確認しており、実時間処理に対応している。

小型ロボットリーグの今後

本稿では小型ロボットリーグの競技の内容や特徴的な技術、研究課題などを、過去、現在、未来のさまざまな観点から紹介した。

競技のレベルは着実に上がってきており、見て面白いエンタテインメント性の高い試合を実現している一方、以前に比べると驚くような進歩や新しい技術を見ることがなくなった。現在のルールや規格の中でできることはかなりやり尽くされた結果、皆こ

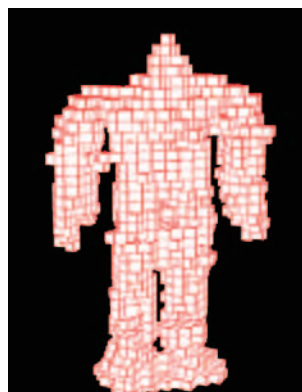


図-20 ボクセルの集合として推定されたロボットの形状

れまでの技術の延長線上でハードウェア、ソフトウェアを改良しているという印象を持つ。新しい研究課題や方向性をどのように提示していくか、テクニカルコミッティの手腕が問われる時期である。プラットフォームを思い切って変更するなど、問題設定を考え直してもよいかもしれない。小型ロボットリーグが今後どのように変わっていくか、興味深く見守っている。

最近数年間で世界大会にエントリーしたチームを見ると、現在世界で小型ロボットリーグのシステム開発に取り組んでいるチームはおおよそ30から40程度と思われる。その中の25から30チーム程度が例年世界大会にエントリーする。出場の可否は提出したTeam Description Paperの内容と、試合中やデモンストレーション時のロボットの動きを撮影したビデオにより決められる。審査ではロボットが正しく動いて試合が成立するかという点が重視される。審査の結果、上位20から24チーム程度が出場を認められ、残りのチームはキャンセル待ちとなる。キャンセル待ちのチームは出場を認められたチームが辞退すると、繰り上がりで出場できる。世



図-19 原画像(左)と推定したロボットやボールを同じ角度の画像として再構成した結果(右)



図-21 2010年の世界大会参加チームのメンバーとロボットが集まって撮った記念写真

界大会では、それまで常連だったチームのリタイアがここ数年で数チームあり、代わりに新規参入チームが毎年現れることで、少しずつチームが入れ代わっている。

一方、国内大会では参加するのが常連の5チームにほぼ固定されていて、新規参入のチームが現れない。しかし国内大会のSSL-Humanoidには2010年から新たに2チームが加わった。市販のキットでも参加できるという敷居の低さが作用していると思われる。本稿を読んで興味を持たれた方が新規の参加を検討していただけるよう願っている。

謝辞 ロボットの写真や図、データを提供していただいた大阪電気通信大学 ODENS チームの升谷保博教授、木村克海さん、中部大学 Owaribito-CU チームの皆様へ感謝します。日頃小型ロボットリーグの運営を助けていただき愛知県立大学成瀬正教授、(株)アールティ中川友紀子さん、ロボカップ日本委員会の皆様、その他小型ロボットリーグに参加されるチームの皆様へ感謝します。

参考文献

- 1) <http://small-size.informatik.uni-bremen.de/>
- 2) <http://kiyosu.cs.chubu.ac.jp/SSLJapan/>
- 3) <http://small-size.informatik.uni-bremen.de/robocup2010:teams>
- 4) Zickler, S., Laue, T., Birbach, O., Wongphati, M. and Veloso, M.: SSL-Vision: The Shared Vision System for the RoboCup Small Size League, RoboCup 2009: Robot Soccer World Cup XIII, Lecture Notes in Computer Science 5949, pp.425-436 (2010).
- 5) Naruse, T., Masutani, Y., Mitsunaga, N., Nagasaka, Y., Fujii, T., Watanabe, M., Nakagawa, Y. and Naito, O.: SSL-Humanoid: RoboCup Soccer using Humanoid Robots under the Global Vision, RoboCup 2010 International Symposium, Singapore (2010).
- 6) 升谷保博, 成瀬 正: 外部カメラを用いたヒト型ロボットによるサッカー競技 RoboCup SSL Humanoid, 人工知能学会誌 Vol.25, No.2, pp.213-219 (2010).
- 7) <http://www.robocup-ssl-humanoid.org/indexJ.html>
- 8) 木村克海, 升谷保博: 複数の外部カメラ画像に基づくヒト型ロボットの3次元形状の実時間取得 RoboCupSoccer SSL Humanoid の3次元情報サーバを目指して, 人工知能学会研究会資料 SIG-Challenge-B001-6, pp.33-38 (2010).

(平成 22 年 10 月 8 日受付)

■長坂保典 any@isc.chubu.ac.jp

名古屋工業大学で博士(工学)の学位を得た後、中部大学に勤務。現在、中部大学工学部准教授。画像処理、パターン認識、自律ロボット、ニューラルネットワークに興味があり研究に取り組んでいる。ロボカップには1999年から参加している。電子情報通信学会、日本神経回路学会各会員。