解 説

4脚ロボットリーグの技術課題と展望

Four-Legged Robot League

藤 田 雅 博* *ソニー (株)
Masahiro Fujita* *Sony Corporation

1. 背 景

ソニー 4 脚ロボットリーグ (Sony Four-Legged Robot League) は, 1998 年第 2 回 RoboCup Paris において三つの大学研究機関による試験的な模範試合を経て, 1999 年第 3 回 RoboCup Stockholm からシミュレーション, 小型, 中型ロボットリーグに加えて, 第 4 番目の正式なリーグとなった。

企業の研究機関である我々がこの 4 足リーグを構成し運営している主な理由は, 我々の目標である“ロボットエンターテインメント”という自律型ロボットの新しい産業の創出における技術的課題と, RoboCup における技術課題の共通性を見ているからである。自律型ロボットを構成するためのロボティクスあるいは人工知能といった技術分野は広範にわたり, かつ人間のような自律性を実現するためには多くのブレイクスルーを必要とする。RoboCup では, サッカーという明確なタスクの中に, 歩行制御, 認識, 判断, 多数ロボットの協調, といったことを実時間, 実環境で行うという技術課題が存在し, また 2050 年までの目標である人間のワールドカップチャンピオンチームとの試合のためには, 安全性, 信頼性といった問題も解決しなければならない。これらは, 当然人間の住む環境で動作する自律型ロボットを目標とするエンターテインメントロボットの技術課題でもある。さらに, 多くの技術者にロボットプラットフォームを使ってもらうことで, ロボットプラットフォームとしての技術的フィードバックを得ることもできる。

以上の理由により 1998 年に AIBO のプロトタイプ of the ロボットで RoboCup の日本, アメリカ, フランスのナショナルチームをしている教授の研究機関に呼びかけ 3 チームによる模範試合 (3 チーム総当たり戦) を行った [1]。日本は大阪大学 (浅田稔教授), アメリカは Carnegie Mellon University (CMU) (Manuela Veloso 教授), フランスは Laboratory of Robotics of Paris (LRP) (Dominique Duhaut

教授 (当時), 現在は Pierre Blazevec 教授) のチームである。この年に RoboCup Federation から正式リーグとしての認可をうけ, 1999 年から Sony Four-Legged Robot League としてスタートした。RoboCup-99 Stockholm では, 先の 3 チームに新たに 6 チームを加えて 9 チームが参加した。選考は, Statement of Participation を提出してもらい, 委員による技術目標, 技術力, 地域性などを考慮した評価を行い決定する。RoboCup-00 Melbourne では 12 チーム, RoboCup-01 Seattle では 16 チームの参加となりリーグ規模もその他の実機リーグとほぼ同等となっている。

2. ロボットプラットフォーム

Sony Four-Legged Robot League の一つの特徴として, 全チームが同じハードウェアを用なければいけない, ということがあげられる。すなわち, 実機リーグでありながらハードウェアの性能には左右されず, ソフトウェアの性能を競い合う, ということになる。また, 中型リーグと同様にロボットの持つセンサのみを用いて行動を決定しなければならない。後述のように必要なセンサ, バッテリ, 計算資源などはすべてロボットに搭載されている。同じソニー製のハードウェアを使って開発を行う利点として, ソフトウェアの開発に集中できるという利点がある。ハード系のエンジニアがいない研究機関であっても参加が可能である。また, チーム間での技術やソフトウェアの共有が計りやすい。したがって, 技術の蓄積と開発の効率化が期待できる。

1998 年の試作機による模範試合を含めて RoboCup-01 Seattle 大会まで 3 種類のロボットプラットフォームを使ってきた。ここでは, Seattle 大会で使用された ERS-2100 について簡単に説明を加える (図 1 参照)。

ERS-2100 は, 2000 年に商品化された第 2 世代 AIBO ERS-210 の開発者用バージョンであり, ハードウェア特性は ERS-210 と同じ物である。機構系としては, 各足 3 自由度 ($\times 4$ 足), 首 3 自由度, 尻尾 2 自由度, 口 1 自由度, 耳 1 自由度 ($\times 2$ つ) の計 20 自由度を持つ。センサは, 頭部にカラー CMOS カメラ, ステレオマイクロフォン, 赤外線測距センサをもち, 体部に加速度センサ, ジャイロメー

原稿受付 2001 年 10 月 2 日

キーワード: Quadruped Robot, Autonomous Robot, Self Localization

*東京都品川区北品川 6-7-35

*Shinagawa-ku, Tokyo

図 1 ロボットプラットフォーム ERS-2100

タなどを持つ。また、タッチセンサを頭部、背中、あごに持っている。CPUとしてMIPS系64ビットのRISCを用いており、パイプラインクロックを約200[MHz]で動作させている。メインメモリとして16[MBytes]のSDRAMを搭載している。さらに専用のLSIを搭載しており、シリアルバスのホストコントロールと画像、音響信号のインターフェース、処理エンジンを搭載している。画像は、3階層の多重解像度フィルタを介してメインメモリに取り込まれ、さらに8チャンネルの色検出エンジン、内積エンジンを搭載している[2]。

これらの機構系、センサ、CPUと処理エンジンを制御するソフトウェアはAperiosと呼ぶソニー独自のオブジェクト指向OSの上に、OPEN-Rと呼ぶインターフェース定義にしたがって開発される。OPEN-Rは、オブジェクト間の依存性を取り除くように設計がなされるため、ソフトウェアの部品化を推進する。開発されたプログラムは最終的にメモリスティックに書き込まれ、ロボットに挿入し実行される。なお、PCカードスロットに無線LANのカードを挿入して外部のコンピュータと通信が可能であるが、RoboCup-01では使用していない。

3. フィールド、環境

本来は、普通に線を引くだけのフィールドで試合ができるべきであるが、現状ではロボットに搭載されたセンサなどを考慮して、フィールドに色をつけたり、照明条件を限定したりすることで自律行動によるサッカーゲームを実現できるようにしている(図2参照)。

フィールドは、RoboCup-98の模範試合からRoboCup-01まで同じものを使っているが、ルールの変更などに伴い、ペナルティラインの位置などは変更されている。重要な物体、例えばボールやゴールなどは異なる色で塗られている。色は、前述の色画像処理エンジンが用いているビデオカメラ信号でよく用いられる(Y, Cr, Cb)の色空間で距離的に離れているものを用いている[2]。フィールドは45度に傾いた白い壁で囲まれており、さらにコーナーは三角状の傾いた白い壁とすることで、フィールドの淵やコーナーで

図 2 Four-legged robot setup: フィールドの大きさは1.8[m] × 2.8[m] (フィールド内部)

ボールがスタックして取れなくなることを防いでいる。なお、床は緑色のカーペットを用いて平坦性を保証している。ロボット自身は、色のついたステッカーを体にはって敵味方を識別できるようにしている。

また、その白い壁を囲むように6本の2色に塗られたポールを設置している。この複数のポールを観測することでフィールド内の自分の位置を推定することが可能である。これは、ゴールキーパーがボールをクリアした後に自分のゴールの前に戻るときなどにも重要な働きをする。このカラーボールを識別しやすいため、フィールド全体を高さ70[cm]の薄灰色のフェンスで囲んである。このフェンスの中には、黒いパーカーを着たレフリーやチームメンバーしかいないため、色の検出がやりやすくなっている。

こういった色画像処理を前提としたフィールドの設定に関係する問題として照明条件がある。RoboCup-01 Seattleでは依然、フィールド内の照度と色温度を一定に管理をしている。

4. ルール

試合は各チーム3台のロボットを用い、前半10分、10分休憩、後半10分で競い合う。同点となった場合は、ペナルティキックによるサドンデスで勝敗を決める。試合のスタートは頭のタッチセンサを使うことで行う。

5. RoboCup-01の結果

5.1 Championship Competition

4チームごとの4リーグで総当たり戦を行い、各リーグの上位2チームが決勝トーナメントに進む。決勝トーナメントの結果を示す。優勝はUniversity of New South Wales (UNSW, Australia)、2位はCarnegie Mellon University (CMU, USA)、3位がUniversity of Pennsylvania (Upenn, USA)という結果になった。結果の詳細は文献[3]を参照。

5.2 RoboCup Challenge

RoboCupの基本は科学的な検証の場であり、試合の勝

敗よりも本質的な課題を解くことに重点をおくべきである。RoboCup Physical Agent Challengeはその目的のために試合形式ではない規定課題を提案している[4]。4脚ロボットリーグでは1998年よりRoboCup Challengeをリーグ戦、トーナメントとは別の競技としてとりあげてきた。今年のRoboCup Challengeは三つの規定競技でその総得点を争った。一つめの課題は、Goalie Challengeと呼ばれゴールキーパーの能力を評価するものである。これは、フィールドの適当な位置から自陣のペナルティエリア内にもどり、傾斜を持った筒から適当な時間にボールをゴールに向かって転がし、キーパーがそれをブロックし、ペナルティエリア外に出す、といったタスクである。ロボットの初期位置、シュートの方向、ボールが転がされる時間はあらかじめ知らせておらず、すべてのチームのメモリスティックを提出してもらった後に決定する。3チームがこの課題をクリアしたが、かかった時間などの評価により1位はUPenn, 2位がUNSW, 3位がUniveristy of Washington (USA)となった。

二つ目の課題はLocalization Challengeと呼ばれ前述のロボット自身の位置推定がどの程度速く、正確に実行できるかを評価するものである。これは、あらかじめフィールド上の五つのマーカーの場所(x, y)を各チームに教え、メモリスティックを提出してもらった後に、ロボットの初期位置をランダムに決定し開始する。ロボットはそのマーカーの上で止まって合図(尻尾を振る)をする。マーカーはカメラなどでは検出できないような色を選んであるため、マーカーを見つけてそこに向かって歩行することはできない。少なくとも自分の置かれた位置を推定し、あらかじめ教えられた場所に移動することが要求される。この五つのマーカーの上に所定時間以内に移動できたチームは三チームあり、かかった時間などの評価から1位はCMU, 2位はUNSW, 3位はKyushu United (Japan)となった。

三つ目の課題はCollaboration Challengeと呼ばれ、二つのロボットの共同作業の能力を評価するものである。具体的には、フィールドを左右の二つに分け、それぞれのロボットはどちらかの領域でのみ行動することができる条件をつけ、ボールを数回、所定の場所を通すようにパスすることを要求する。この課題をクリアできたチームは一つもいなかった。途中どのステップまでクリアできたかで順位をつけ、1位がUniversity of Tokyo (Japan), 2位がKyushu United, 3位がLRPという結果になった。

三つの課題に対する成績の総合評価は1位UNSW, 2位Upenn, 3位CMUという結果になった。

6. 技術レベルとその進歩

この章では技術レベルの進歩を年ごとに簡単に記述してみる。1998年の模範試合では、すべてのロボットがボー

ルを捜して近づいて敵のゴールの方向に運ぶ、ということを実現することで精一杯だった。会場に大きな窓ガラスがあったため照明条件が一定でないこともあったが、ビジョンが最も安定してボールを検出できていたCMUが優勝した。1999年新しく6チームが加わったが、やはり1998年から参加していた3チームは実力があり、ビジョンが安定していた。この年は、LRPが独自の歩行により高速な移動、回転動作を実現し優勝した。また、カラーボールを用いたLocalizationも実際に実行しているチームが出てきた。特にCMUなどのゴールキーパーが自陣に戻るときに重要な役割をはたし、攻撃にも有利に働いていた。もう一点特筆すべきは東京大学チームによるヘディングの開発である。足を使って蹴るよりもボールの移動距離が稼げ、その後ボール制御の一つの主流となった。

2000年度は、1999年と同じロボットプラットフォームを使った利点もあり、既存の9チームがソフトウェアの改良をおこない全体のレベルがアップした。多くのチームが独自の歩行とヘディングや体を使ったボール制御を開発した。しかし、最も大きな改革はUNSWによる歩行とボール制御の開発である。UNSWの歩行は、前脚を曲げてひじをつき手先を前方に二つ伸ばす形になっていた。この前傾した歩行はそのスピードと安定性(転ばないで、正面から押し合うと相手のロボットを押し除けるぐらい力強い)ではほかのチームを圧倒した。さらに、この状態でボールに近づくとボールが両手の間に入り、ボールを抱え込む形になる。この状態で体の向きを狙った方向に回転し、両手で押し出すようにボールを制御することで、ボールの方向の正確さ、スピード、移動距離といったものが大幅に改善した。UNSWはさらに一方のロボットがボールに向かって近づくときに、他方がじゃまにならないように道をゆずる、ということユニフォームの色で行っていた。この年UNSWは、すべての試合で約10点のスコアを記録し、相手に許したゴールも1点だけであった。

2001年度は、ロボットプラットフォームを新しくしたためソフトウェアの移植に時間が取られたようだった。しかし、各チームのレベルは確実に向上し、2000年度はUNSW 1チームがずば抜けていた感があったが、その他のチームも安定した歩行、ヘディングなどによるボール制御など多彩なものになった。特にビジョンは安定してきており、多くのチームは少なくともボールやゴールを発見することに問題はなくなってきた。2001年度は特に、相手ロボットとの関係を認識することにより利点ができるようにルールを調整した。具体的には、ゴールキーパーに対するチャージングを明確にペナルティとしてとるようにした。オブストラクションやチャージングの反則は、その場で注意することにより改善するものではない。また、反則の取り方は主審により若干異なるものにならざるをえない。事前のチームメ

ンバーとの議論やリハーサルが重要になる。ほかのリーグと異なり中立の立場であり、かつロボットプラットフォームの性能や技術に精通しているソニーの開発者が主審を担当したり、ルールをまとめていることがこのような問題をスムーズに乗り越えるポイントとなっている。

2001年度のRoboCup Challengeは、内容的にはそれ以前のものより充実したものとなった。具体的な課題はすでに述べたが、これらの課題を解決する能力は試合ではあまり明確にあらわれないが確実に技術力を評価することができている。特にLocalization Challengeで良い成績を残せたチームは試合においても高いレベルの試合をしている。このChallengeは、カラーボールを識別するためにはビジョンの高速、安定性が要求され、ロボット自己位置、姿勢識別能力は、ボールとロボットの相対的な位置どりなどに有効に利用されている。

7. 今後の展開

RoboCup-01までを振り返るとこの4年間で4脚ロボットリーグの技術力は格段に進歩した。しかし現状の最も大きな課題は、管理された試合環境でのみ試合が可能である、という点にある。ボールやゴール、ランドマークなどに色をつけ、照度、色温度を管理することで、画像認識の問題を軽減している。また、フィールドの床面もまったくの平坦で、適度な摩擦のあるカーペットを使用しており、各大学が開発の際に使用しているものはまったく実際の試合のものと同じ物である。また、フィールドは傾斜つきの壁で囲まれておりボールはフィールドから出ることはない。このように、環境が整えられていることにより見ごたえのある試合ができ、毎年その技術力がアップしてきたと考えられる。この環境においては画像認識はほぼ完璧に近いレベルでできるようなチームが増えてきた。

この管理された環境をいかに通常的环境に移行するかが今後の技術的展開の中心となる。また、サッカーという領域によらずそれは一般の自律型ロボットにおいても非常に重要な課題と考えることができる。具体的には、カラーボールから照度や色温度の影響を受けない形状やパターンへの転換、さらにそれらのボールの位置情報などを極端に管理しない、といった目標が考えられる。しかしながら、急にこれらの課題を追加することはゲームの面白さを失ってしまう可能性がある。また、新規チームの参入障壁となる可能性も高い。これらを考慮して、ステップを踏んでこれらの課題を解決していく予定である。それらの課題導入としてRoboCup Challengeを利用していくことを考えている。例えば、RoboCup-02では、パターン認識に関する課題を導入し、RoboCup-03でそれを試合に使っていく、というような計画を立てている。ボール、ゴールなどを含めて特別な管理をしない方向を目指す。

床の環境管理も重要な問題である。現在、多くのチームはフィールドに数mmのもの（例えばセンターサークルとしてカーペットの上に円状に切ったカーペット）を置くだけで問題がでてしまう。あるいは、練習と異なるカーペット材質になったとしても問題が出るであろう。このような不整地にロバストな歩行もRoboCup Challengeで導入し、試合に使用する、ということを計画している。その他の環境管理（例えばフィールドの壁）に関する問題も順次解決をして、どこでも特別な材料などを用意しないで簡単に4脚ロボットリーグの試合をできるようになることが重要と考えている。

もう一つはハードウェアの性能に関するものである。無線LANシステムを導入することでリモートのPCなどを使うことでCPUパワーの拡張を図ることが技術的には可能であるが、RoboCup会場においてほかのリーグやロボット展示において同じ帯域の無線系を使用することが多く、無線LANが使えないことで試合に支障がでるという問題が生じる。4脚ロボットリーグでは無線LANをRoboCup-02より使用する予定となっているが、基本的にはこれは各ロボットでの情報の共有に利用し、リモートPCでの計算は禁止する方向で実行される計画となっている。最終的なRoboCupの目標としては無線を使用しないコミュニケーションによる協調動作を目指しているが、他の領域（レスキューなど）においては無線をもちいた人間のモニタと判断との融合なども考えられるため今回の導入となっている。

さらにロボットの歩行速度の向上によりフィールドが狭く感じられるようになってきている。RoboCup-02では、フィールドを縦横約1.5倍の大きさに拡張する計画である。それにしたがって、フィールドプレイヤーの数を現在の3台から4台に増やす予定である。これは、ゴールキーパーが特別の役目を果たすようになってきており、キーパーを除くフィールドプレイヤー2台では協調動作が難しいと考えているからである。

8. ま と め

4脚ロボットリーグの背景と現状、そして今後の技術的展望に関して述べた。技術的展望はまだ計画中のものも含めての紹介であるが、いかに管理された環境から実際に人間が活動している環境で動作できるような技術を開発するか、という課題が我々の前に横たわっている、という事実は確かであり、様々なアプローチが必要になるであろう。ほかのリーグあるいはRoboCup以外の分野での技術を巻き込みながら、またこのリーグからの技術がほかのリーグやほかの分野で利用されるようになれば最高の展開であるといえよう。

謝 辞 このリーグが現在のような規模、技術レベルになった要因はもちろんこのリーグに参加して技術開発をし

ている各チームメンバー、およびそのスタッフをリードしている教授たちの努力にほかならない。この場を借りて、感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- [1] M. Fujita, et.al.: "Vision, Strategy, and Localization Using the Sony Legged Robots at RoboCup-98," AI Magazine, vol.21, no.1, pp.45-56, AAAI, 2000.
- [2] H. Kitano, M. Fujita, S. Zrehen and K. Kageyama: "Sony Legged Robot for RoboCup Challenge," IEEE ICRA, pp.2606-2618, 1998.
- [3] P. Lima, T. Balch, M. Fujita, R. Rojas, M. Veloso and H.A. Yanco: "The RoboCup 2001 Competitions and Conference: Report and Research Issues," IEEE RA Magazine, 2002, to appear.

- [4] M. Asada, et.al.: "The RoboCup Physical Agent Challenge: Phase-I," Applied Artificial Intelligence, vol.12, no.2-3, pp.251-263, 1998.

藤田雅博 (Masahiro Fujita)

1981 年早稲田大学工学部電子通信科卒業。同年ソニー（株）に入社。1988 年 University of California, Irvine の Graduate School に入学, 1989 年同校より M.S.E.E 取得。現在, ソニー（株）デジタルクリーチャーズラボラトリー主幹研究員兼システムアーキテクト。自律型ロボットのエンターテインメント応用に関して, 画像処理, 行動制御アーキテクチャ, 行動獲得などの研究開発に従事。
(日本ロボット学会正会員)