

大いなる挑戦：ロボカップとその技術課題

A Grand Challenge : RoboCup and Its Technological Issues

浅田 稔

Minoru Asada

北野宏明

Hiroaki Kitano

大阪大学 大学院工学研究科 教授

ソニーCSL シニアリサーチャー

1 はじめに

ロボカップの最終目標は、FIFA*ルールに従い、2050 年までに自律型のヒューマノイドロボット 11 台で人間のワールドカップチャンピオンを打破することである。ロボカップは、複数の自律ロボットがサッカーの試合を実現することを目的とするロボティクスと人工知能の研究分野の新たな標準問題を設定することで、それらの分野の研究を促進させる試みである。1993 年に著者らが中心とする日本人研究者のグループによって提案された。

1997 年に第一回ロボットサッカーワールドカップ(通称「ロボカップ」)が名古屋で第 15 回人工知能国際会議とともに開催され、世界 12 カ国から約 35 チームが参加した。さらに、昨年 1998 年の 8 月には、人間のワールドカップとともに、パリで第 2 回の世界大会を開催し、世界 20 カ国から約 60 チームが参加。1999 年は、7 月末から 8 月上旬にかけて、スウェーデンの首都ストックホルムで第 3 回の世界大会が第 16 回人工知能国際会議とともに開催され、世界 30 カ国から約 100 チームが参加した。2000 年は、8 月下旬から 9 月上旬までメルボルンで開催され、全世界から約 500 人の参加者が集まり盛況であった。

本稿では、研究プロジェクトとしての成り立ちを鑑み、現在のロボカップ戦略構想、ランドマークプロジェクトとしての意義、ロボットサッカーの意味、現在のリーグ構成、そして技術課題について概説する。

2 現在のロボカップ戦略構想

当初、ロボカップの活動は、ロボットサッカー競技会、学術会議、教育プログラム、技術情報公開の一連の活動か

らスタートしたが、現在では、ロボカップの技術を災害救助に応用するロボカップ・レスキューや次世代の研究者を養成するロボカップ・ジュニアの活動が始まっている。参加者の数や地域も広がっており、現在、世界 35 カ国で、3000 人以上の研究者と学生が参画する一大国際共同研究プロジェクトに進展している。

ロボカップの基本的な考え方は、「明確で」かつ「挑戦的な目標を掲げて」、「システムティックに研究開発を行うということ」にある。世界中で分散的に研究開発を実施していることも特徴である。図 1 に現在の構成を示す。

●ロボカップ(本体)：ロボカップ戦略の発端となった分野であり、2050 年までにワールドカップチャンピオンチームを打破するヒューマノイド型ロボットの開発を目指す。夢のある目標達成と、その過程で開発された技術の波及を目標にしたランドマークプロジェクト。

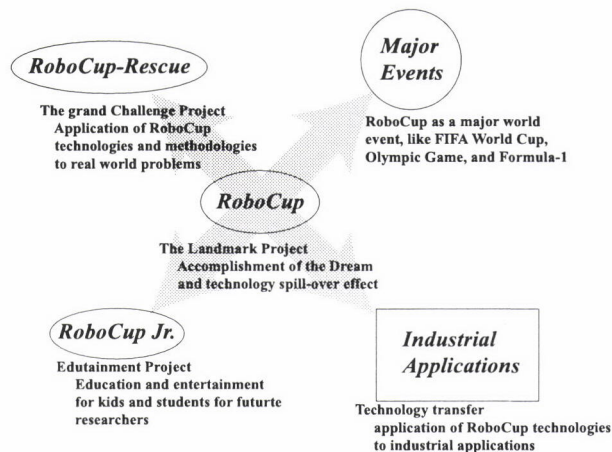


図1 RoboCupにおけるプロジェクト展開

* Federation Internationale de Football Association

- **ロボカップ・レスキュー**：ロボカップの技術と方法論を災害救助に応用しようとするプロジェクト。社会的に重要な課題の解決を目指すグランド・チャレンジ・プロジェクト。サッカーロボットで開発された技術の応用と、この分野特有の課題の克服を同時に研究する必要がある。
- **ロボカップ・ジュニア**：ロボカップを教育に応用した活動。その目的は、ロボカップを通じたものづくり教育の側面と、最終目標に向けた次世代研究者の育成の側面を併せ持つ。前者の意味では、単に若年層に限らず、性別・年齢層を問わない人々にアピールする側面として娯楽性に関しても考慮する。その意味で、Edutainmentプロジェクトでもある。

3 ランドマークプロジェクトとしての意義

研究推進の方法として、研究者の創造性・問題意識に委ねる方法で、通常、我々が最もよく使う純粋基礎研究で一般的形態である。これ以外には、大きな社会的問題を決めてその解決に向けて研究を集中させる「グランド・チャレンジ」型の研究、そして、直接的な社会的・経済的価値は少ないが、記念碑的であり、誰にでも分かりやすい夢のある目標を定め、その夢の実現を目指す「ランドマーク・プロジェクト」がある。ランドマークプロジェクトで最も有名なのは、アポロ計画である。宇宙飛行士を月に送り込むことに、どれだけの直接的な経済価値があるかは疑問であるが、目標達成自体が問題ではなく、その過程で生み出された技術がそれ以降の米国の産業の基盤となり、我々の日常生活に利用されている点が重要である。つまり歴史的記念碑となるような課題の達成は、様々な技術の開発と波及効果を伴う。

コンピュータチェスは、人工知能の分野でランドマーク的プロジェクトの役割を果たしてきた。すなわち、人間のグランドマスターをうち負かすコンピュータプログラムの開発が最終目標であった。90年代に同等に勝負できそうなプログラムが出始め、そして1997年、ついにグランドマスターを破り、その役目を終えた。この過程で開発された探索アルゴリズムやアーキテクチャは、幅広い分野で現在利用されている。ロボカップもこの意味で同様である。つまり最終目標に向けた過程のなかで、様々な技術革新がもたらされ、いろいろな分野に利用されて行くであろう。

コンピュータ・チェスはランドマーク・プロジェクトとしての意義よりも、人工知能の標準問題として認知されてきた。この意味で、ロボカップも人工知能とロボティクスの標準問題としての意義も大きい。両者の差異を表1に示

表1 チェスとロボカップの比較

項目	チェス	ロボカップ
環境	静的	動的
状態変化	順番交代	実時間
情報	完全	不完全・不確実
センサーデータ	記号的	非記号的
制御	中央集権	分散的

す。問題の複雑さがかなり異なる。攻守が瞬時にして変わる動的環境下で、敵をかわしながら味方同士での連携プレーを実現するためには、複雑・不確実な実世界での機敏で臨機応変な行動、複数ロボットの柔軟かつ多様な協調行動、最適なコミュニケーション戦略、など多様な課題がロボカップに含まれており、新たな「標準問題」となっている¹⁾。

4 なぜサッカーか？

ランドマークプロジェクトの要件として、「夢」、「実現可能性」そして「次世代專業基盤」が挙げられる。これらを満たしているのがロボットによるサッカー競技、ロボカップである。

1. **夢**：ロボットによるサッカー競技は、誰にでも親しみが有り、理解しやすい。しかも人間に勝つという夢はSF的でもあり、夢を十分感じさせる。
2. **実現可能性**：複数のロボットが協調して、人に勝つのは、並大抵では無いが、かといって全然手が着かないわけでも無い。自律移動ロボットの応用と考えると、手始めとしては、十分であろう。さらに新たなリーグ展開では、4脚がすでに始まっており、2脚も2002年から開催される予定である。これまでの大きなチャレンジも、その最初のステップから約50年で実現されている。1903年にライト兄弟が初飛行してから1969年のアポロ月面着陸やジャンボ747の就航までに66年間、1946年のデジタルコンピュータの発明から、1997年のチェスチャンピオンの打破まで51年間、1953年のDNAの構造解明から、予想ではあるが2003年のヒト遺伝子の全配列決定まで50年間、そして1997年のロボカップ発足から2050年のワールドカップチャンピオン打破まで53年間なのである。
3. **次世代産業基盤**：複数のロボットが協調して動的に変化する状況に対応することが可能になれば、様々

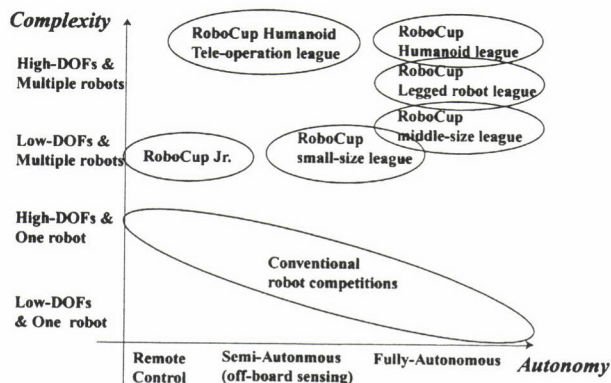


図2 RoboCupの各リーグの自律度と機構複雑度

な応用に利用可能である。最も厳しい状況は、災害現場での救助活動である(詳細は、文献2)参照)。時々刻々と変化する状況下で、しかも不完全不確実な情報のもとで、ロボットと人が協調して作業遂行することを考えると、協調行動、情報収集、制御指令の伝達において、レベルやスケールの違いを克服しなければならない。共通する課題は、「複数ロボット/エージェントの協調によって目的は達成され、環境が動的に変化し、多目的/多重制約問題を包含し、実時間計画/推論を必要とすること」である。これら課題をすべて含んでいるのが、ロボカップである。また、実際、人とサッカーの試合ができるなら、人とのインターフェースが重要である介護や病院での応用が十分に期待できる。

5 リーグ構成

第一回大会で、シミュレーション、小型、中型の3リーグで始まったロボカップ競技会も第二回では、エキスポシジョンながらもソニーの4脚ロボットリーグが始まり、2000年から若年層向けロボカップジュニアも始まった。また、2002年からは、2脚によるヒューマノイド型ロボット

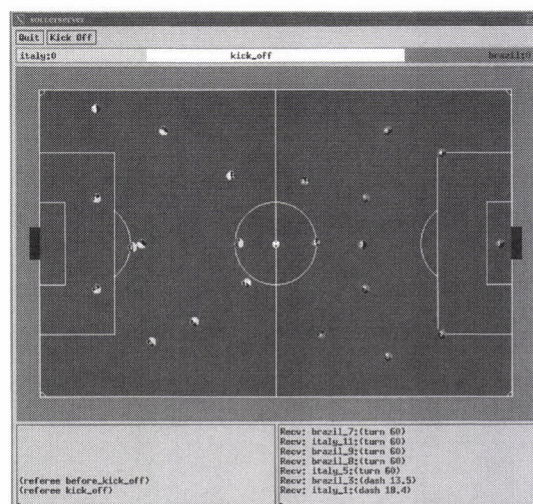


図3 サッカーサーバーの画面

リーグも計画されている。図2にロボカップの各リーグのもつ自律度(Autonomy)と機構複雑度(Complexity)の分布を既存のロボットコンテストと比較した。従来のロボットコンテストは、教育的配慮から遠隔操作型で単一ロボットが多いが、ロボカップは複数のロボットを使い、より自律度を高めている競技会といえる。ロボカップの各リーグの仕様の一部を表2に示す。それらについて簡単に説明する。

1. シミュレーションリーグ：実ロボットを用いた競技会は、資金、時間、労力のコストから、限られた研究グループしか参加できない可能性がある。シミュレーション部門は、そういったコストを削減し、より多くの研究者、グループに門戸を広げること目的としている。計算機上に仮想的なフィールドを用意し、フィールドとプレイヤー制御プログラムをネットワークを介したクライアントサーバシステムで接続することで、参加者の作成したプログラムによりプレイヤーを制御する。このリーグでは、実機のロボットリーグでは扱いにくいチームワーク、実時間推論、学習などの課題を扱っている。

2. 小型ロボットリーグ：卓球台の大きさの競技場で直

表2 ロボカップのリーグ構成

項目	シミュレーション	実機小型	実機中型	4脚	2脚	ジュニア
サイズ	なし	直径 18cm 以内	直径 50cm 以内	AIBO	3 サイズ	直径 12cm 程度
On-board sensing	YES	YES	YES	YES	YES	YES
Off-board sensing	NO	YES(天井カメラ)	NO	NO	YES/NO	YES
台数	~11	~5	~5	3	3~5	1~3

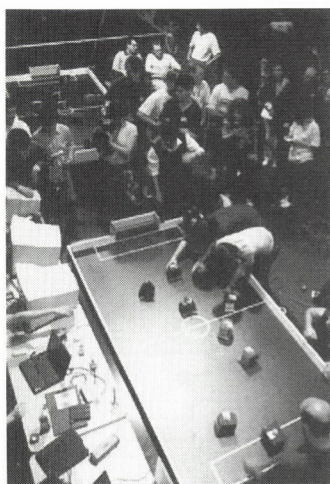


図4 小型のフィールドと対戦準備の様子

径 18 cm 以内の大きさのロボット 5 台までで戦う。このサイズでは、センサー、アクチュエータ、CPU すべてをオンボードにするのは困難なので、天井カメラの使用を許し、リモートブレイン方式を採用している。この方式は、知的交通システム (ITS) など、複数のカメラを用いて乗り物を制御する課題に対応する。

3. **中型ロボットリーグ**：完全自立分散型のロボットチームで各ロボットはすべてがオンボードで構成されている。卓球台 9 台 (3 × 3) の大きさの競技場で戦う。1 チーム最大 5 台まで。実時間画像処理、行動学習、協調行動の獲得などが課題となっている。
4. **4 脚ロボットリーグ**：1998 年のパリ大会でエキシビジョンマッチを披露し、1999 年のストックホルム大会から公式リーグに昇格された。ソニー AIBO を共通のプラットフォームとし、純粋にソフトウェアのパフォーマンスを競う¹¹⁾。
5. **ヒューマノイドリーグ**：2002 年から導入予定。中型のフィールドを用いて 3 つの身長サイズ (～60 cm, ～120 cm, ～180 cm) で、それに対応して 5 台から 3 台までで戦う。当初は遠隔操作も許可する。これは、マン・マシン・インターフェースの問題も含むことになるであろう。
6. **ロボカップジュニア**：サッカーという題材が、子供達に強い関心と興味を抱かせることからの教育的配慮と、最終目標に向けた次世代の研究者育成の目的で、遠隔操作を許した教育リーグ。現在、レゴマインドストームなどを使った試競技会が各地で開催されており、2000 年のメルボルン大会では地元の 55 の小・中学校から多数が参加した。



図5 中型のフィールドと対戦の様子

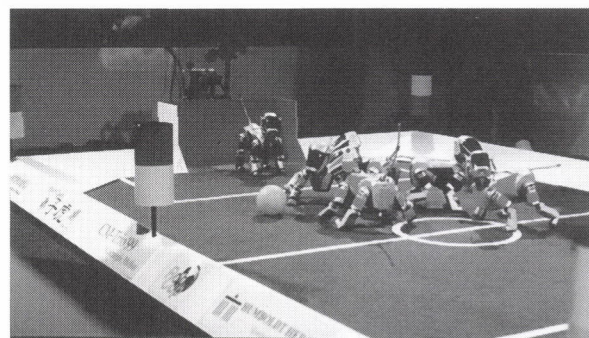


図6 4脚ロボットリーグの試合の様子

6 ロボカップにおける基本研究課題

ここでは、主に実ロボットのロボカップの研究テーマについて議論する。世界中の多くの研究者がロボカップに参加する理由のもっとも大きな理由は、非常に広範囲の技術を独立した完全なエージェントに統合しなければならないことで、これは、タスクが限定された機能モジュールの構築とは好対照である。以下は、ロボカップがカバーする研究分野の一部である。

- **視覚**：最も基本的で豊富な知覚情報ゆえに、処理手法の多様性が内在する。現在、実時間処理のために物体識別を色情報で行っているが、形状情報、運動情報も今後加味されるであろう。視野の問題は切実で、通常の固定カメラでは、簡単にボールやプレーヤーを見失う。このため、全方位カメラを搭載したチームも多いが、無駄な視野が多いこと、画像分解能の劣化などの問題を引き起こす。能動カメラを用いることは、視覚的注意の問題を扱うことになり、認知心理や人工知能研究のホットな話題と繋がる。
- **触覚**：他の物体との接触情報は、現段階では、赤外線や

ソナーなどを使って事前に察知するようにしているが、密度が十分では無い。人間型ロボットで他のプレーヤとの衝突を検知する上でも、密度が十分高い触覚センサ、すなわち人工皮膚が重要となる。

- 移動機構**：現在は、自動車とおなじ操舵と前進の2自由度をもつ非ホロノミック型が多い。これは、回り込みなどの余計な動作を必要とし俊敏な動きの実現が困難である。これに対し、全方位移動機構のロボットが最初の大会から2チーム出ている。さらに、脚移動では4脚から2脚、歩行から走行へと制御問題が複雑になる。
- 学習**：すべての行動を設計者が事前に用意することは困難なので、ロボット自身がなんらかの形で自律的に行動を獲得する手法として強化学習などが用いられている。理論の単純な応用では、実ロボットに適用困難なので、ある種の教示や易しいタスクからの学習が行われている³⁾。
- 進化**：さらに、進化的手法によって、チームそのものを進化させたり⁴⁾、協調行動を引き出したりすることができる⁵⁾。
- チームワーク**：複数のエージェントによる意志決定問題。状況に応じた様々な攻撃/守備のフォーメーションの実現などの課題がある。
- 多様な状況と行動**：問題設定自体は単純であるが、ボール、ゴール、プレーヤの位置関係や相対運動とゲームの文脈に応じて非常に多様な状況が生じ、各々の状況に応じて、適切な行動決定が必要。
- 実時間制約**：反射行動と熟考プランニングのバランス。
 - 認知ロボティクス**：環境や他者、自己の表現など高度認知の課題^{6,7)}。

7 阪大チームの行動戦略とシステム概要

阪大チームは、主に認知ロボティクスのテストベッドとしてロボカップを利用している^{6,7)}。強化学習や進化的手法による行動学習がメインテーマである。当初、単一ロボットの単純スキルの獲得^{3,8,9)}に強化学習を主に利用していたが、マルチロボットへの応用から、状態空間再構成による強化学習の複数ロボットへの適用¹⁰⁾や共進化による協調行動の獲得⁵⁾などへ進展している。詳細は、各文献に当たっていただくとして、複数ロボットへの強化学習問題に対するアプローチを簡単に示す。

自分以外に能動的に活動するロボットが環境内に存在するとき、自分の行動とは関係なく他のロボットが動作する場合、通常の強化学習の適用は困難となる。そこで、複数

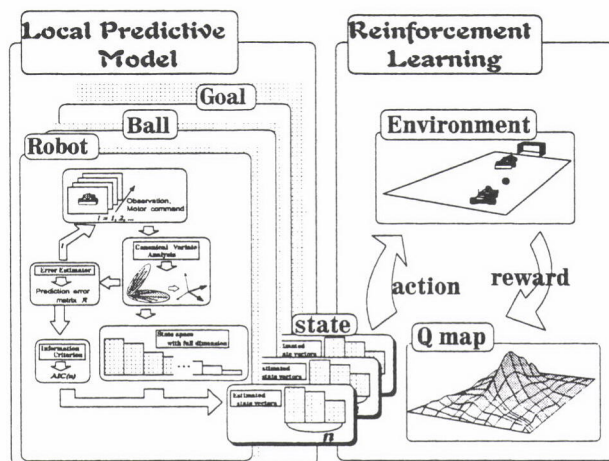


図7 複数ロボットへの強化学習適用アーキテクチャ

のロボットが存在する場合は、それらの関係(敵や味方など)から、自分の行動に何らかの因果関係が存在するものとして、まず最初にマルコフ仮定をなるべく満足する状態ベクトルを統計的に推定する。次にAIC(赤池の情報量基準)を用いて状態推定ベクトルの次元のトレードオフ(大きい方がより正確だが、あとの学習時間が膨大となる)をとり、最後に強化学習を適用する。本手法をパスアンドシュートの協調プレイに適用させた。図7に、アーキテクチャを示す。

8 おわりに

次世代ロボット研究の標準問題として、ロボットによるサッカーゲームロボカップを基に、その意義、目的を概説した。この問題設定は、将来、ロボットが日常世界で広く使われるようになるための重要な技術要素を含むと同時に、ハードから高次ソフト、通信まで含む幅広いアプローチを共通の土俵の上で比較できる。また、様々な達成レベルが有り得て、息の長い研究テーマになり得ると同時に、ロボット研究者だけでなく、広く一般の人々の関心もひきつけて、ロボット分野に活気が吹き込むことも期待したい。この意味で2001年の開催を目指しているロボフェスタにおいて、参加型競技としてロボカップジュニアを提唱している。

以上、今後の予定や各種活動に関して、以下のホームページで最新の情報を提供しているので参照頂ければ幸いである。

www.robocup.org/ または、www.robocup.or.jp/

本稿で述べたロボカップの活動は、主にロボカップ国際

委員会、並びにロボカップ日本委員会のメンバーの献身的な努力のもとに行われている。野田五十樹氏(シミュレーションディレクター、電総研)、松原仁氏(組織委員会ディレクター、電総研)をはじめとする多くの委員の方々に感謝します。

参考文献

- 1) 北野宏明, 浅田稔: 「ワールドカップ」ロボットの挑戦, 日経サイエンス, 28, (1998) 74.
- 2) 田所諭, 北野宏明監修: RoboCup-Rescue技術委員会, The RoboCup Federation, ロボカップ日本委員会(編), ロボカップレスキュー: 緊急大規模災害救助への挑戦, 共立出版, (2000)
- 3) M.Asada, S.Noda, S.Tawaratumida and K. Hosoda: Purposive behavior acquisition for a real robot by vision-based reinforcement learning, Machine Learning, 23, (1996) ,279.
- 4) Sean Luke, Charles Hohn, Jonathan Farris, Gary jackson and James Hendler: Co-evolution soccer sofbot team coordination with genetic programming. In Hiroaki Kitano, editor, RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I, 398. Springer, Lecture Note in Artificial Intelligence 1395, (1998)
- 5) Eiji Uchibe, Masateru Nakamura and Minoru Asada: Co-evolution for cooperative behavior acquisition in a multiple mobile robot environment, In Proc.of IROS'98, (1998) ,425.
- 6) 浅田, 石黒, 国吉: 認知ロボティクスの目指すもの, 日本ロボット学会誌, 17, (1996) 1, 2.
- 7) 浅田稔: ロボカップによる認知ロボティクス, 日本ロボット学会誌, 17, (1999) 1, 34.
- 8) Y.Takahashi, M.Asada and K.Hosoda: Reasonable performance in less learning time by real robot based on incremental state space segmentation, In Proc.of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 1996 (IROS 96) , (1996) ,1518.
- 9) Minoru Asada, Shoichi Noda and Koh Hosoda: Action based sensor space segmentation for soccer robot learning, Applied Artificial Intelligence, 12, (1998) 2, 149.
- 10) E.Uchibe, M.Asada and K.Hosoda: state space construction for behavior acquisition in multi agent environments with vision and action, In Proc.of ICCV 98, (1998) 870.
- 11) Masahiro Fujita, Stephane Zrehen and Hiroaki Kitano: A quadruped robot for robocup legged robot challenge, In RoboCup-98: Proceedings of the second RoboCup Workshop, (1998) 73.

(2000年7月7日受付)