

LEGO MINDSTORMS™ による分散協調システム学習環境の提案と評価 ～ 対戦型スポーツロボット競技環境 ～

Study for LEGO MINDSTORMS™ Application to Engineering Education IV
— Learning environment for Autonomous, Distributed Cooperative System —

今成 一雄

Kazuo IMANARI

1. はじめに

1998 年にデンマークの LEGO 社から LEGO MINDSTORMS™ ROBOTICS INVENTION SYSTEM (以下、MINDSTORMS RIS と称する) が発売されてから、既に 10 余年の歳月が経過した。その間、これを導入した教育の実施¹⁾、イベント・コンテストの開催^{2,3)} や関連雑誌の創刊⁴⁾ など、社会に与えた影響は大きいといえよう。ここ最近では、全面的に機能強化が図られた次世代機、LEGO MINDSTORMS™ NXT が 2006 年に発売され、またこれとは別に関節に DC サーボモータを応用した 2 足歩行ロボットが市販されるなど、ロボティクス教育環境は長足の進歩を遂げてきたといえよう。本研究室でも 2000 年頃から MINDSTORMS RIS の可能性に注目して工学教育への応用について検討・提案・評価を継続してきた⁵⁻⁷⁾。今回は、その一連の最終報告として、MINDSTORMS RIS で分散協調システムの学習を実現するための外部システムの提案とその実用性の評価報告である。

以下、第 2 章は MINDSTORMS RIS の教材としての限界を確認する。第 3 章は分散協調システムを学習する上で最低限必要とされる学習環境条件について述べ、今回取扱うシステムを提案する。第 4 章は前述の 2 つの章を踏まえて、学習環境の設定・情報提供の手段を検討する。第 5, 6 章はシステムの提供を実現するために用意されたハードウェアと、開発されたソフトウェアとを紹介する。最後の第 7, 8 章は、本システムの評価と試用評価の結果を報告する。

MINDSTORMS RIS の長所・短所については、これまでも幾度か記してきたが、ここで改めて確認しておく。

1) 概要

MINDSTORMS RIS は、対象年齢が 12 歳以上に設定されたブロック玩具である。図 1 は、LEGO ピース群を示す。ひととき大きな部品は、Robotics Command eXplorer (RCX) と称されるマイクロコンピュータと電源とを内蔵したユニットで、MINDSTORMS RIS の中心となるパーツである。これにセンサとモータ (各々最大 3 個まで) が接続されて、LEGO Block とともに自律ロボットを構成する。

2) 通信機能

パソコンと RCX との間のプログラムやデータの転送は、RCX 側は内蔵型赤外線ポートを、パソコン側は USB 接続 (旧製品では RS232C 接続) された IR タワーを使用する (図 2)。この内蔵ポートによる RCX 同士の通信も可能である。一方で通信形態は、1 対多のブロードキャスト通信となるため、RCX や IR タワーが複数存在する環境において 1 対 1 通信を実現する



図1 MINDSTORMS RIS ピース群

2. 学習教材としての MINDSTORMS RIS

2.1 特徴



図2 IRタワー(左:RS232C,右:USB接続)

ためには、通信内容・コードにおいて識別情報を織り込む必要がある。

4) プログラム言語

RCX のプログラム言語は、MINDSTORMS RIS に付属の初学者向けの RCX CODE や、文法が C 言語に非常に似通ったフリーウェアの NQC (Not Quite C) などが用意されている。どの言語を使用するにしても、新しい外部付加機能を用意した場合、それを利用するための API 関数を準備することは容易くない。

2.2 工学教育教材としての限界

MINDSTORMS RIS は、入出力ポート数の問題、センサの種類と精度・再現性の問題、プログラム環境と対応言語の問題など、そのまま工学教育に利用するには様々な問題を内包しており、その解決が必要とされた。しかしながら、これまで報告してきたように⁵⁻⁷⁾、対応策の準備は可能であり、問題は解決可能であることを示してきた。しかし、ここにきて従前の方法では解決できない問題が露見した。分散協調システムへの対応である。前節で確認したように、MINDSTORMS RIS は、それ単体で自律して動作するロボットを作成することを主たる目的に設計されている。それゆえ、複数のロボット、つまりは複数の RCX が情報を交換し、自機の位置を確認しながら動作させるような使用法は、積極的に想定されていない。これは MINDSTORMS RIS のもつ可能性を大きく制約しているといえる。LEGO 社でもこの問題点に注目したようで、次世代機の MINDSTORMS NXT はコンピュータブロック (NXT) の高機能

化・インテリジェント化や高性能センサの準備のほか、BLUETOOTH™ による通信機能を実装している。ならば我々ユーザも MINDSTORMS NXT に乗り換えれば、前述したすべての問題が当面は解決できるが、これまでの有形・無形の蓄積してきた資産を放棄することは、誠に惜しい。なによりも、予算措置が必要となる。そこでここでは、あくまでも MINDSTORMS RIS にこだわり、分散協調システムを実現するための手段を検討する。

3. 分散協調システム

3.1 検討対象：対戦型スポーツ競技

分散協調システムとして取扱う代表的なテーマは、数多くある。一例としては、ロボカップサッカー⁸⁾、ロボカップレスキュー⁹⁾や介護ロボット¹⁰⁾などがあげられる。学習・実習システムとしての位置付けからは、以下の各事項を考慮すべきである。

- 1) 実習の興味が持てるよう、内容は勝敗の明確な競技が望ましい。
- 2) 分散協調の実現に必要な不可欠な環境情報と位置情報・固体識別情報の取得手段を提供する。
- 3) 学習者がロボットの協調アルゴリズムの開発に集中できるよう、位置情報の送受信は、できるだけプログラムに負担を掛けない方法とする。
- 4) 特殊な部品を使用せずに済むよう、ロボットは MINDSTORMS RCX の標準部品で製作できるものとする。

これらの事項から、対象は競技フィールドの範囲が有限な対戦型スポーツ競技が、位置情報の提供手段は外部システムによるものが最適であると考えられる。

3.2 基本要件

前節を受け、今回検討するシステムの基本的な要件は、以下の通りとする。

- 1) ロボットの制御が複雑になり過ぎないように、
- 2 チームによる対戦とし、対戦ロボットの数

は 1 チームあたり 2~3 台とする。

2) ロボット制作上の難易度が極端に高くならぬよう、競技はホッケーのようにオブジェクト（ボール）を打ち合う内容とする。テニスや卓球のようなオブジェクトのバウンドは強制しない。同様に、サッカーのハンドのような反則も考慮しない。

3) ハードウェアに特殊な加工を必要としないよう、ロボットの位置情報は後付けのインテリジェントパーツまたは外部システムによって提供する。

4) 前記 3) 同様、ロボットの固体識別装置もロボット製作後に簡便に後付けできるもの、または外部システムとする。

5) ハードウェア同様、ソフトウェアにも特殊な技術が不要なよう、位置・固体識別情報の取得は RCX CODE や NQC の既存の API で実行できるものとする。

5) 競技フィールドは準備時間や設置数の変化（増減）を考え、設置・移動が容易なように、その面積は MINDSTORMS RCX ロボット 6 台程度が競技をするのに十分な大きさとし、大き過ぎないように設定する。

4. 競技環境および情報取得手段の提供

4.1 競技フィールド

競技フィールドは、RCX のサイズ（95×63×40 mm）と 1 チームあたりの台数、そして設営の利便性から、その面積を実験机 1 台（910×1820 mm）とし、フィールド表面の材質は、その上に敷いた無地白色の模造紙（800×1400 mm）とする。設置場所は屋内とする。また設置環境による外乱（音、光、温度、湿度 など）の変化が情報精度に影響しないよう、システム側で補償する。

4.2 環境情報取得

ロボットによる周囲の環境情報の取得は、MINDSTORMS RIS に同梱されている光センサ、接触センサを使用する。同センサは精度や分解能がさほど高くないが、今回想定している環境では、検出対象（敵・味方ロボットやオブジェクト）が大きいので、その影響は少ないと考える。より詳細な情報の取得が求められる場合には、

参考文献 6) で報告したセンサを使用する。

4.3 位置情報取得

位置情報を取得するための手段は、大きく分けて主に 3 種類考えられる。

手段 1) ロボット自体に無線・または赤外線発信機の類を搭載し、外部より三角測量等でその位置を計測する。

手段 2) 競技フィールドに仕掛けを施し、フィールドそれ自体が位置情報を取得する。

手段 3) 俯瞰画像から画像処理によって、位置情報を取得する。

手段 1) の場合、発信機のサイズ・重量・電源の問題を解決する必要がある。往々にして高価な装置になる。さらには競技中の機械的な衝撃に対する耐久性や対混信性能を考慮する必要もある。フィールド外部に設置する測量装置も設置精度が必要になるうえ、装置が高価になる。競技フィールドの増設も簡単にはできない。一方で、設置環境の変化による外乱の影響は受けにくい。手段 2) の場合、格子状に赤外線やレーザを照射しその反射・透過で検出する方法やフィールドに誘導コイルや静電容量センサを埋め込む方法が考えられるが、センサの数が膨大になり、競技フィールドの増設も簡単にはできない。なによりも、固体の識別が困難になる。一方で、外乱の影響は受けにくい。手段 3) の場合は、俯瞰カメラの画素数・色分解能やフレームレートなど直接、認識率に関わる問題さえ十分に検討・解決されれば、残りは外部処理システム（パソコンのハードウェア・ソフトウェア）上の問題だけである。外乱の変化が大きく影響すると見込まれるので、特に認識処理ソフトウェアは、アルゴリズム上の対策が求められる。一方、競技フィールドの増設は簡単である。

以上の検討結果から、『手段 3) 俯瞰画像から画像処理によって、位置情報を取得する方法』を採用する。外部システムで得られた位置情報は、赤外線 IR タワーを通して競技フィールドにブロードキャストされる。個々のロボットは、その情報から個々に必要な部分を抽出し、自己の行動決定に利用する。RCX 内蔵の赤外線ポートで

受信するための API は準備されているので、情報は標準的な方法で取得可能である。同様に協調動作に関連する情報の送受信も、同赤外線ポートと標準 API とで実現する。

4.4 固体識別情報

ロボット個々の形状は様々なものが想定されるので、位置情報を検出する場合、すべてのロボットに共通する印（マーカ）を用意・装備する必要がある。このマーカに個体固有の情報を重畳して、個体は識別される。全体で 2～6 台のロボットを想定しているので、識別情報は 3 bit 分準備する。

5. ハードウェア

5.1 俯瞰カメラ

カメラに関しても、一連の本研究の基本思想「できるだけ LEGO 規格の部品を応用する。自作ブロックに高価な電子パーツは使用しない。」を踏襲する。幸い LEGO MINDSTORMS には VISION COMMAND と呼ばれる拡張セットが用意されており（現在は絶版）、これにカメラ（LEGO CAM）が同梱されている（図 3）。表 1 は、LEGO CAM の規格を示す。LEGO CAM は Logitech 社の Quick Cam と同等品である。解像度は最近のデジタルビデオカメラやデジタルスチールカメラと比較すると著し



図3 VISION COMMAND

表 1 LEGO CAM(一部Quick Cam)の仕様

センサー	30 万画素 CMOS
レンズ	F = 3.0 mm
フォーカス	手動
絞り・明るさ・コントラスト	自動調整
ホワイトバランス	自動調整
フレームレート	640×480 (15fps) ～320×240 (30fps)
インターフェース	USB 1.1 5mケーブル付

く低い。一方、フレームレート 30 fps は十分である。何よりも、高価でない。まずはこのカメラを 1 台使用し、解像度に問題がある場合には 2 台以上の使用を考える。

図 4 は、カメラ 1 台で競技フィールド全体を俯瞰したときの物理的な配置図である。カメラ直下において 1 pixel は、5×5 mm に相当すると計算される。この値は、マーカのサイズを検討する上で、十分に考慮すべき値である。

5.2 マーカ

図 5 は、試作を重ねた上で配置・形状ともに決定されたマーカである。検出部・方向部と称される二つの部分が識別部と呼ばれる第 3 の部分を挟み込むように配置されている。各部の大きさは約 25×25 mm で、撮像された画像上では約 5×5 pixel となり、検出上十分な大きさは確保されている。照明からの反射光ではその照度や色温度などの影響を大きく受けやすいので、

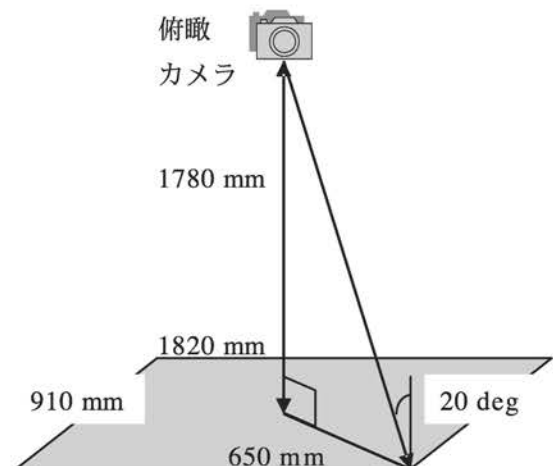


図 4 物理的配置

検出部は赤色 LED を、方向部は青色 LED を配置しその影響を極力排除した。また最近の LED は、配光（指向性）を狭くすることで正面から見たときの輝度が最大になるようパッケージの頂点を凸レンズ状にしているため、光の広がり極めて少ない。今回の使用方法では、図 4 にあるように斜め上方から見た場合にも十分な輝度を得る必要があるため、拡散キャップ（透過率 98 %）が被せられている。LED の数と配置は、カメラを通して見たとき、色の広がりや、輝度の偏りが一様になるように決定されている。

識別部は黒 (= 0) と白 (= 1) の紙製の小片を使用し、反射光のコントラストの違いで 3 bit の固体識別情報を表現する。図からは判り難いが、識別部全体の高さは、標準 LEGO Block 約一段分（約 11 mm）でかさ上げして、検出部や方向部からの光の広がりやの影響を防止している。白色は膨張、黒色は収縮して見えるため、さらに黒色部を約 7 mm 高くして補正している。各高さは、撮影画像から現物調整して得た数値である。

6. ソフトウェア

6.1 マーカ検出

マーカ検出・処理の手順は、以下の通りである。図 6 は、検出例である。

- 1) 撮像された画像を RGB 3成分に分解する。
- 2) R 成分画面を走査して、閾値以上の輝度を持つ pixel を検出する（検出部の検出）。
- 3) 検出された pixel はその周囲ににじみを持っているので、その分布を矩形で近似し中心を求める。

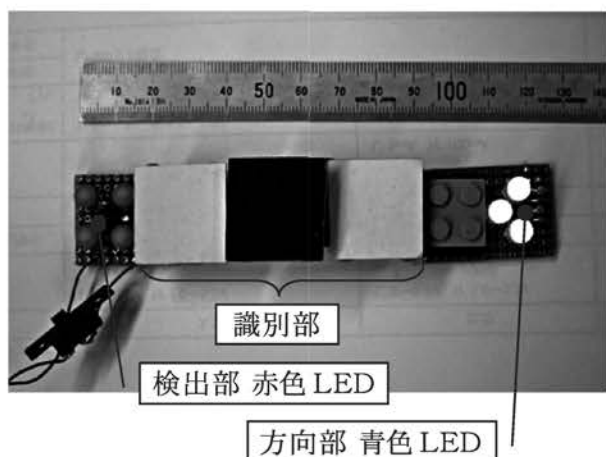


図5 識別マーカ

- 4) B 成分画面において、中心点より半径 105 mm (21 pixel) の円周上を走査し、閾値以上の輝度を持つ pixel を検出する（方向部の検出）。
- 5) 4) で輝点が検出されない場合、2)に戻って残りエリアの走査の続きを行う。
- 6) 4) で輝点が検出された場合、その 2 点間に識別部が等間隔 (5 pixel 間隔) に配置されている筈なので、その輝度差より識別情報を読み取る。読み取れなければ、2)に戻って残りエリアの走査の続きを行う。
- 7) R 成分画面すべての走査が終了したら、新しい画像を取り込む。終了していない場合、2)に戻って残りエリアの走査の続きを行う。

6.2 環境光補償（閾値自動設定）

先に述べたように、競技フィールドは室内に設置されるが、そのほかの条件は限定していない。そのため、設置位置による環境光の変化への補償が重要になる。そこで、撮像・RGB 分解された画像に対して、検出閾値を自動調整させた。処理手順は以下の通りである。

- 1) 撮像された画像から白色の部分を除く。
- 2) 画像全体より R 画素の最大値を求める。
- 3) 2) で得られた最大値の 95 % を閾値に設定する。

7. 認識率評価

サンプル静止画像 112 枚を用意して認識率評価実験を実施した。サンプル画像は、競技フィールドを 200×200 mm/ブロック、全体では

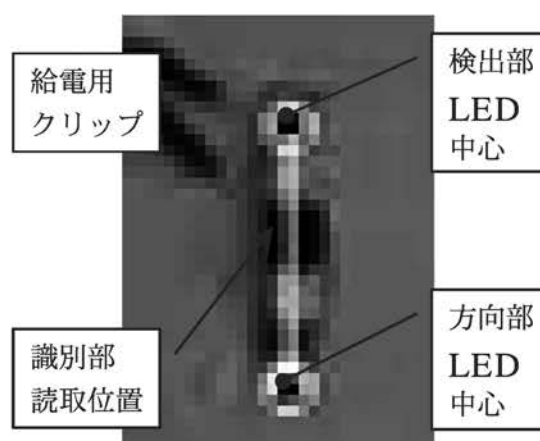


図 6 マーカ検出例

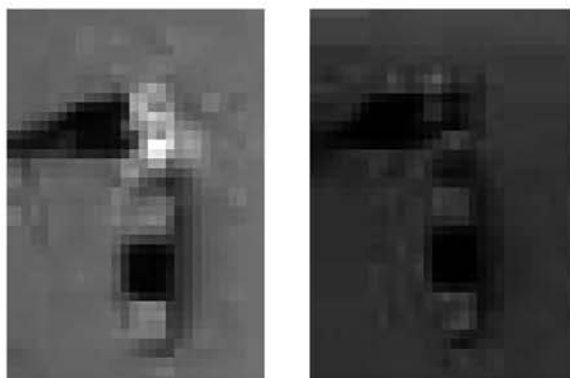


図 7 環境光の影響(左:窓側,右:部屋奥側)

4×7 ブロックに分割し、各ブロックあたり 4 方向の向きにマーカのみを配置して撮影した静止画像である。競技フィールドは、冬の晴れた日、南向きの窓に対して垂直になるように配置した。そのため、窓側と部屋奥側とで環境光は大きく異なる(図 7)。検出部の検出成功率は 100 %、識別部の読取成功率は 96 % であった。識別部の読取を失敗した画像は以下の 3 枚であった。

- 1) 競技フィールドからの反射光を検出光として捕捉している画像。
- 2) 競技フィールド端で全体的に暗くなり、十分に輝度が得られていない画像。
- 3) 検出光が広がり、環境光との境界が不鮮明になった結果、検出中心がずれ、識別部が正しく読み取れなかった画像。

上記 1)、2) に対しては、競技フィールド表面をより反射の少ない材質に変更し、室内照明によるフィールド面上での最低照度を指定することで、十分に解決できると考えられる。3) に関しては新しい対応策を講じる必要があるが、0.9 % 程度のエラーは、現実の競技でも発生し得るものなので、敢えて手を付けず残して、競技上の偶然性を期待したい。

8. 模擬競技による評価

本システムの実用性を確認するため、模擬競技を試行した。緑色 LED を装備したオブジェクトと LED マーカを搭載した 4 輪自動車を用意した。自動車には外部から与えられた自車位置とオブジェクトの位置から、右または左旋回しながらオブジェクトに接近するプログラムを与



図8 模擬競技の 1 コマ
(カメラによる俯瞰画像)

えた。図 8 は、競技画像の 1 コマである。ロボットは期待通りの動作をした。表 2 は、システムに使用したハードウェアのスペックである。特に高性能なものは使用していない。また、画像 1 枚の処理にかかる時間は、およそ 16 ms であった。実用上十分な時間である。

以上、実用に耐えうる、期待したものが完成していると評価する。

表 2 パソコンの仕様

CPU	Intel® Pentium® 4 2.4 GHz
MEMORY	512 MB
OS	Microsoft Windows XP Home Edition 2002 Service Pack 2
software	
LEGO® Robotics Invention System Version 2.0	
Microsoft Visual C++ 6.0	
Microsoft Visual C# 2008 Express Edition	
Microsoft .NET Framework SDK v2.0	
Microsoft .NET Framework SDK v3.5	

謝辞

最後に、本報告をまとめるに当たり、製作・実験に尽力し、議論に参加・協力してくれた卒業研究生諸氏に感謝する。

参考文献・URL

- 1) レゴ マインドストーム公式サイト, 活用事例, <http://www.legoeducation.jp/mindstorms/case/index.html> ほか.
- 2) オーム社, --Online ROBOCON Magazine-- 新着ロボコン情報, <http://www.ohmsha.co.jp/robocon/map/map.htm> ほか.
- 3) オーム社, --Online ROBOCON Magazine-- フェア・イベント情報, <http://www.ohmsha.co.jp/robocon/event/event.htm> ほか.
- 4) オーム社, --Online ROBOCON Magazine--, <http://www.ohmsha.co.jp/robocon/index.htm> など.
- 5) 今成一雄, “LEGO MINDSTORMSTM の工学教育への導入の検討と提案”, 小山工業高等専門学校 研究紀要 第37号 (2005) .
- 6) 今成一雄, “LEGO MINDSTORMSTM の工学教育への導入のための機能拡張の提案と評価”, 小山工業高等専門学校 研究紀要 第38号 (2006) .
- 7) 今成一雄, “LEGO MINDSTORMSTM の工学教育への導入のための機能拡張とその応用”, 小山工業高等専門学校 研究紀要 第39号 (2007) .
- 8) ロボカップ日本委員会, ロボカップサッカーオフィシャルホームページ, <http://www.robocup.or.jp/soccer.html>.
- 9) ロボカップ日本委員会, ロボカップレスキューオフィシャルホームページ, <http://www.robocup.or.jp/rescue.html>.
- 10) イノベーション・ジャパン2008 - 大学見本市, <http://expo.nikkeibp.co.jp/innovation/>.

(小山工業高等専門学校, 電気情報工学科,
imanari@oyama-ct.ac.jp)

「受理年月日 2008年9月11日」

