

実世界ロボットの基本行為の信頼性向上について

Reliability Improvement of Basic Actions of Real World Robots

高田司郎 *1 新出尚之 *2
Shiro TAKATA NIDE, Naoyuki

*1近畿大学工学部

KINKI UNIVERSITY Faculty of Science and Engineering

*2奈良女子大学研究院生活環境科学系

Faculty, Division of Human Life and Environmental Sciences, Nara Women's University

Environment always changes in the real world, and furthermore sensor errors and actuator errors occur. When basic actions of real world robots are carried out using representation model made by the environmental recognition not to consider these errors, the basic actions fail without being able to adapt these actions to environment changes, e.g., collisions with other objects and the sudden changes of their coefficient of friction. Therefore, we present a design methodology that these robots dynamically recognize environmental changes using situatedness and interact with environment in consideration of frame-of-reference considerations in order to improve the reliability of the basic actions.

1. はじめに

我々は、BDI モデルを用いた実世界における合理的エージェント [Wooldridge 00] の学習と意思決定に関する研究課題に取り組んでいる。その一環として、各種センサ値を入力として LIBSVM [Chang 11] を用いて元のアトラクター（安定）状態 [Pfeifer 06] への引き込み状態と分類した際は、元のアトラクター状態に回復する反射的行為を実行することで基本行為の頑健性向上を提案した [高田 14]。次に、コンパスセンサ誤差や摩擦係数変化に対するモーター回転の調整を行うことで基本行為の成功率向上を提案した [高田 15]。ただし、コンパスセンサ誤差や摩擦係数は局所的に連続変化していることを仮定して基本行為を成功させるためのモーター回転数を予測しているため、この方法は環境依存である。

そこで、本稿では、上記のような局所的な連続変化を仮定しないで、実世界のロボットが立脚性 [Pfeifer 99] を有して環境認知を行い、かつ、参照フレーム問題 [Pfeifer 99] を考慮し環境との相互作用として基本行為を設計する。すなわち、ロボットの基本行為を、エージェントと環境との相互作用として「エージェントが目標距離や目標方向との誤差を小さくするように振る舞う」というルールに基づいて設計することで、より基本行為の信頼性を向上させる方法を提案する。

2. サッカーロボットの概要

2.1 基本行為

基本行為とは、プランのプラン本体に記述されそのまま実行できる行為であり、たとえば、本稿では、「パスする」「レシーブする」「シュートする」などを指す。

2.2 使用機器と環境

本稿では、図 1 のレゴマインドストーム EV3、図 2 の ROBOCUP JUNIOR 公式赤外線発光ボール、図 3 のフィールドを使用する。レゴマインドストームを [高田 15] にて使用し

た NXT から EV3 にバージョンアップしたのは使用できるセンサの種類が増加し、さらに TCP/IP が使用可能となり PC との相互通信ができるためである。



図 1: EV3 図 2: 赤外線ボール 図 3: フィールド

2.3 サッカーロボットの構成

図 4 にシステム構成を示す。PC 上の BDI エージェントは、Web カメラと QPToolkit [QPT] を用いて、EV3 の座標と角度（方向）およびボールの座標を、たとえば、200ms サイクルで取得し、環境情報として更新する。これは、EV3 にはカメラが搭載されておらず、また、搭載したセンサを用いて赤外線ボールを正確に認識できる距離は 30cm から 40cm 以内であるためである。PC 上の BDI エージェントは、この環境情報を適時観測することで意思決定を行い、EV3 に行うべき行為を目標として指示する。これにより EV3 は、装備されたセンサを用いて取得した部分情報に適応して与えられた目標（基本行為）を実現するために、自律的、合理的に振る舞う BDI ロボットである。

2.4 BDI エージェントの概要

サッカーロボット間の共同意図 [Wooldridge 00] を実現するための基本行為レベルの意思決定は、PC 上の BDI エージェントが行う。特に本稿では、2 台の EV3 が共同意図「パスまたはドリブルを行った後シュートする」を実現する。

2.4.1 プランとしての状態遷移図

BDI エージェントが共同意図「パスまたはドリブルを行った後シュートする」を実現するために選択するプランである状態

連絡先: 高田司郎, 近畿大学工学部, 〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1, 06-6721-2332, shiro@info.kindai.ac.jp

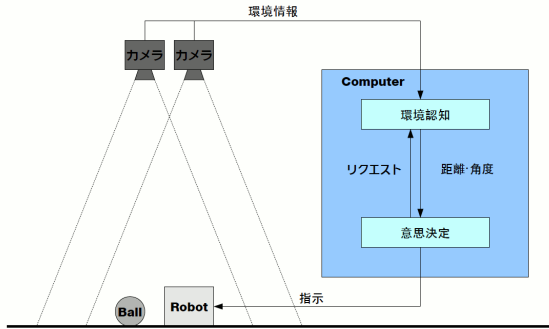


図 4: システム構成図

遷移図を図 5 に示す。ボールに近い EV3 が、味方の EV3 にパスかドリブルを行い、味方の EV3 がボールをレシーブ後、シュートするというプランである。

2.4.2 送信コマンド

表 1 は、EV3 に送信するコマンド一覧表である。たとえば、味方の EV3 に dribble を指示する場合、環境情報から EV3 自身の位置と方向、および味方 EV3 の位置を得て、EV3 間の距離と味方 EV3 への方向として相対的方向（北を 0 度として左回りを正とする角度）を計算し、コマンド dribble, 距離, 相対的方向を EV3 に送信する。

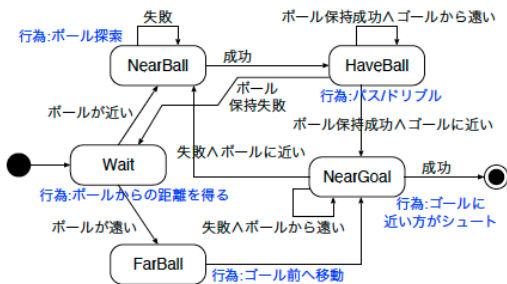


図 5: 状態遷移図

表 1: EV3 に送信するコマンド一覧表

コマンド	指示する目標	付与パラメータ
search	ボールを探索	ボールの方向と距離
dribble	ボールを保持し移動	移動点の方向と距離
pass	味方にパス	味方の方向と距離
receive	パスをレシーブ	味方の方向と距離
shoot	ゴールへシュート	ゴールの方向と距離

2.5 BDI ロボットの概要

BDI エージェントから送られた指示を、BDI ロボット (EV3) の目標として、自律的に達成する EV3 の実装について述べる。特に、EV3 は下記の立脚性を有して環境認知を行い、かつ、参照フレーム問題を考慮し環境との相互作用として、基本行為を設計する。

2.5.1 立脚性

EV3 は立脚性を有している。すなわち、環境と相互作用することで自身のセンサ値の履歴に基づいて現在の状態に関する情報を獲得する。具体的には、自身の表 2 のセンサを用いて、表 3 の基本行為実行中に測定したセンサ値の変化に基づいて EV3 の目標との相対的な方向や距離の状態を獲得する。

2.5.2 参照フレーム問題の考慮

参照フレーム問題とは、エージェントの振る舞いは観測者の視点に基づいて一つの内部メカニズムに還元することはできないという問題提起である。その帰結として、エージェントの設計は、エージェントの視点に立つてエージェントと環境との相互作用に基づいて行うべきだという考え方である。そこで、EV3 の基本行為は、エージェントと環境との相互作用として、「エージェントが目標距離や目標方向との誤差を小さくするように振る舞う」というルールに基づいて設計する。

表 2: センサの種類と取得情報

センサの種類	設置箇所	取得情報
IR(赤外線)	前面	赤外線ボールの距離探知
IRSeeker	前面	赤外線ボールの方向探知
超音波	前面	ボールや障害物との距離測定
コンパス	上部前向	ロボットの向き測定
ジャイロ	上部前向	ロボットの角速度測定

表 3: 取得した環境情報に適応する基本行為

基本行為	使用センサ	適応する環境情報
shoot	コンパス/ジャイロ	回転方向
dribble	コンパス/ジャイロ	回転方向
pass	コンパス/ジャイロ	回転方向
receive	全て	回転方向、ボール位置と把持状態
search	全て	回転方向、ボール位置と向き正面

2.5.3 意図の形成と実行

EV3 の意図の形成と実行サイクルは下記の通りである。

1. 意図の形成 環境や BDI エージェントからの指示に適応して選択される未来指向的意図を表 4 に示す。

表 4: 環境に適応して形成される意図 (, は and 条件)

環境	形成される意図
BDI エージェントからの指示	その指示
「ボール不保持」, 「光が強い」	近くを search
「ボール不保持」, 「光が弱い」	遠くを search
「ボール不保持」, 「光が弱い」, 「物体が近い」	横に移動
「ボール保持」	前に移動

2. 熟考 形成した意図の中から優先順位を決定して、次に実行すべき現在指向的意図を表 5 に基づいて熟考する。たとえば、「ボール不保持」かつ「光が強い」場合は、receive より「近くを search」を優先する。これは、receive をすぐ実行するよりは、近くを search してからの方が receive の成功率を上げることができるという信念である。

表 5: 現在指向的意図の熟考 (、は and 条件、/は or)

受信指示	環境	優先意図
receive	「ボール不保持」, 「光が強い」	近くを search
receive	「ボール不保持」, 「物体が近い」	横に移動
dribble	「ボール不保持」, 「光が強い」	近くを search
shoot/pass	「ボール不保持」	前に移動

- 意図の実行 意図を実行する。また、実行中に新しい指示が送られてきたときに動作途中であっても動作を中断して 1. へ移行する。つまり、直近の指示を最優先の意図として形成する。
- 意図の継続と破棄 single-minded コミットメント戦略 [Wooldridge 00] に従って、意図の継続と破棄処理を行う。
1. ヘループする

3. 基本行為の実装と実験

まず、基本行為に含まれる下記の動作パターンを実装した後、表 3 の EV3 の基本行為を実装する。次に、BDI エージェントから指示を送ってこれら基本行為に関する実験を行う。

3.1 動作パターン

EV3 は、2.5.1 の立脚性を有し、2.5.2 の参照フレーム問題で述べた「エージェントが目標距離や目標方向との誤差を小さくするように振る舞う」というルールに基づいて、動作パターンを実装する。

3.1.1 回転

与えられた回転角度を k として、

- ジャイロセンサの値 l を 0 にリセットする。
- k が正なら左のモーターを正方向、右のモーターを負方向に同じ強さで l が k になるまで回す。
- k が負なら左のモーターを負方向、右のモーターを正方向に同じ強さで l が k になるまで回す。

身体性を持った EV3 は、実世界では慣性の法則に従うので、上記の 2. や 3. においては、センサ値が k と同じ大きさになってからモーターを停止すると少し回転しすぎる。そのため、どのくらい手前で止めるか微調整を行う必要がある。ただし厳密には、摩擦と回転のスピードに依存する。

3.1.2 前進

目標地点に EV3 が向いていることを仮定する。

- ジャイロセンサの値 l を 0 にリセットする。
- 左右のモーターを正方向に回し、
- 正面の赤外線センサの値が 30cm 以下になれば停止。
- l が d 以上なら右のモーターの強さを少し大きくし l が 0 になれば元の強さに戻す。
- l が $-d$ 以下なら左のモーターの強さを少し大きくし l が 0 になれば元の強さに戻す。
1. へ

ただし、 d は正の値である。つまり、 d は前進時の向きブレの値である。同様に、前進を実装後のテストで d の値を微調整して最適値を求める必要がある。

3.1.3 サーチ

EV3 は目標地点まで 30cm 以内にいることを仮定する。赤外線センサは目標物が真正面にある時には正しい距離を計測できる。真正面からずれるとセンサからの実際の距離より大きな値を示す。たとえば、センサから 30cm の距離で 30 度ずれているとセンサ値は平均 32cm となる。

- 正面の赤外線センサの値 l が 5cm 以下になれば停止。
- EV3 を右に回転する。
- l が増加していれば (目標物は左にしていると判断して) l が変化しなくなるまで回転する。
- l が減少していれば (目標物は右にしていると判断して) l が変化しなくなるまで回転する。
- 左右のモーターを正方向にして前進する。
1. へ

サーチに関しても、上記 2. にて赤外線センサが変化するための回転角度の微調整を行う必要がある。また、正面とのずれが、-10 度から 10 度の間はセンサ値はほぼ一定になるため上記 3. と. の回転時間は微調整する必要がある。

3.2 基本行為の実装

これらの動作パターンを用いて、下記の基本行為を実装する。

- shoot ゴールに向かって回転した後、蹴るを実行する。
- dribble ボールを保持して目標地点に向かって回転した後、[高田 15] の方法を用いて前進する^{*1}。
- pass 回転した後、蹴るを実行する。
- receive 味方の方向に回転した後、待機。近くにボールを検知したらサーチして把持する。

3.3 基本行為の実験

表 3 に挙げた基本行為をそれぞれ 20 回ずつ実験するために、BDI エージェントは基本行為の指示をそれぞれ 20 回送信する。成功かどうかの判断は表 6 に示す。たとえば、dribble の成功/失敗は BDI エージェントが EV3 とボールの位置を 1 秒単位に計測して、成功条件の領域に EV3 が入れれば成功、入ることが不可能と判断すれば失敗と見做す。

表 6: 実験の成功判断

基本行為	成功の条件
shoot	ボールをゴールできた場合
dribble	ボールが目標位置から半径 5cm 以内
pass	味方が receive できた場合
receive	ボールを把持できた場合
search	ボールを探索できた場合

3.4 実験結果

基本行為が成功するかどうかの実験結果を表 7 に掲載する。目標地点への回転は、ほぼ成功している。ほとんどの失敗は、EV3 のボールの扱い方、つまり把持や蹴るなどである。

*1 ボールを保持した状態ではボールが赤外線センサを塞いでしまうため、モーターの回転数を予測する方法を用いる。

表 7: 基本行為の成功率

基本行為	成功率
shoot	距離が 50cm 以内であれば 90%、1m 以内は 50%
dribble	80%、ボールの離してしまう失敗が多い
pass	65%、パスがズレて味方が把持できない
search	80%、ボールに当たって移動させてしまう

4. 考察

4.1 立脚性と参照フレーム問題を考慮した設計の有効性

立脚性を有し、参照フレーム問題で述べた「エージェントが目標距離や目標方向との誤差を小さくするように振る舞う」というルールに基づいて実装した動作パターンの信頼性は向上している。結果、これらの動作パターンを組み合わせる基本行為の信頼性は向上している。また、[高田 15] の提案した方法では、表面の材質が異なるコート、およびコートの異なる場所では摩擦係数が異なるため、モーター回転の予測計算を変える必要があったが、本稿の方法では、これらの環境変化の影響は受けない。ただし、摩擦係数が小さくてタイヤが滑ってしまう場合は、環境との相互作用ができないため、本稿の方法も適用外である。

また、ジャイロセンサは高精度であるため、モーターからの磁気や蛍光灯などの影響を受けるコンパスセンサを用いた回転と比較すると、回転に関する信頼性は大きく向上した。モーターからの磁気を受けないように、コンパスセンサをモーターから離して設置するために、ロボット本体を上位に細長くする必要はあるが、当方法ではその必要はない。また、提案した方法では、位置や方向に関する環境モデルを内部に持っていないためフレーム問題 [Pfeifer 99] に対処する必要はない。

4.2 サブサンクションアーキテクチャとの比較

本稿の方法は、サブサンクションアーキテクチャ [Brooks 86] に基づいて実装することもできる。すなわち、表 5 の状態遷移を最上位、回転の目標とのズレに関する状態遷移を中間、そして、前進を目標までの距離変化と見做した状態遷移を最下位の 3 階層に分離し、上位から下記を包摂したセンサ・モーターカップリングとして、ロボットの振る舞いを実装することもできる。

4.3 今後の課題

4.3.1 基本行為の成功・失敗の判断

現在、図 5 をプランとして、そのプランを意図として形成して実行する BDI エージェントを実装中であるため、各基本行為が成功したかどうかは人間が判断している。EV3 は、TCP/IP が使用できるので、EV4 が個々の基本行為の実行が終了したかどうかを、BDI エージェントに知らせることができる。そこで、BDI エージェントは、EV3 からの終了通知を受け取った後、QPToolkit を用いて EV3 およびボールの座標を得ることで、各基本行為が成功したか失敗しているか判断することができるようになる。[高田 15] の BDI エージェントでは、EV3 にコマンドを送信した後、そのコマンドの実行予測時間が経過した後、成功したかどうかを判断している。しかし、動作パターンの実行時間は一定ではないため、常に正確な判断はできていない。

4.3.2 EV3 のみでの自律エージェント

EV3 はメモリが 64M、CPUB が ARM 9 であるため、その範囲で BDI エージェントの役割を EV3 内に実装することも考えられる。その際は、EV3 から直接、QPToolkit と通信することで、自他の EV3 およびボールの座標や方向を能動的に得る

ことで、EV3 のみで自律的なエージェントとすることも可能である。

4.3.3 機械学習に基づくロボット制御

EV3 上の全てのセンサ値とモーターのスピード値を、たとえば、1 秒単位で BDI エージェントに TCP/IP を通じて転送する。BDI エージェントは、まず、それら転送データ、図 5 上の状態、および、その時刻に QPToolkit から獲得した EV3 とボールの位置や方向データを、訓練データとして蓄える。

次に、それら訓練データを用いて、各センサとモーターの値から BDI エージェントの状態の回帰が学習できるかどうか実験する。この状態の回帰ができれば、ある基本行為の実行中に、その基本行動と異なる状態と回帰した場合はその基本行為は失敗したと判断でき、同じ状態と回帰した場合はその基本行為を失敗しないで実行中であると判断できる。

また、それら訓練データを用いて、各センサ値と BDI エージェントの状態から、モーター値の回帰が学習できるかどうか実験する。このモーター値の回帰ができれば、EV3 やボールの位置や方向と全センサ値から、EV3 の状態を考慮することなく、モーターを制御することができるようになることが期待できる。

5. おわりに

本稿では、実世界のロボットが立脚性を有して環境認知を行い、かつ、参照フレーム問題を考慮し、基本行為をエージェントと環境との相互作用として「エージェントが目標距離や目標方向との誤差を小さくするように振る舞う」というルールに基づいて設計することで、より基本行為の信頼性を向上させる方法を提案した。また、今後の課題についても述べた。

参考文献

- [Brooks 86] Brooks, R. A.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 1, pp. 14–23 (1986)
- [Chang 11] Chang, C.-C. and Lin, C.-J.: LIBSVM: A library for support vector machines, *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 2, pp. 27:1–27:27 (2011)
- [Pfeifer 99] Pfeifer, R. and Schemer, C. eds.: *Understanding Intelligence*, The MIT Press (1999), (石黒章夫, 小林宏, 細田耕 (訳), 知の創成—身体性認知科学への招待, 共立出版, 2001)
- [Pfeifer 06] Pfeifer, R. and Bongard, J. C.: *How the Body Shapes the Way We Think*, The MIT Press (2006), (細田耕, 石黒章夫 (訳), 知能の原理: 身体性に基づく構成論的アプローチ, 共立出版, 2010)
- [QPT] QPToolkit Web カメラを使ったかんたん位置測定 <http://kougaku-navi.net/QPToolkit/>
- [Wooldridge 00] Wooldridge, M.: *Reasoning about Rational Agents*, The MIT Press (2000)
- [高田 14] 高田 司郎, 新出 尚之: アトラクター状態を用いた基本行為の頑健性について, in *Proc. of JAWS2014* (2014)
- [高田 15] 高田 司郎, 新出 尚之: 実世界における基本行為のコミットメント戦略について, 第 29 回人工知能学会全国大会論文集 (2015), 115-1