

ロボカップシミュレーションにおける
事例ベースによる行動計画に関する研究

平成 18 年 度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 情報工学専攻

近 藤 正 大

修士論文

ロボカップシミュレーションにおける
事例ベースによる行動計画に関する研究

平成 18 年度修了

三重大学大学院 工学研究科

博士前期課程 情報工学専攻

2007 年 2 月

近藤 正大



目次

序章	1
第1章 Robocup サッカーシミュレーションリーグ	2
1.1 サッカーシミュレーションの概要	2
1.2 サーバがクライアントへ送る情報	4
1.3 クライアントの基本行動	4
1.4 Robocup サッカーシミュレーションで使われる語句と用語	5
第2章 事例ベース推論	8
2.1 事例ベース推論	8
2.2 既存の論文との比較	9
第3章 プレイヤプログラム作成	11
3.1 行動計画の着目点	11
3.2 事例ベース推論の利用	11
3.3 既存のプレイヤプログラムの仕様	13
3.4 単発行動計画と連続行動計画	14
3.5 連続行動計画プレイヤプログラムの作成	17
第4章 実験	19
4.1 実験条件	19
4.2 実験方法	20
4.3 実験環境	20
4.4 実験結果	23

第5章 考察とまとめ	33
5.1 考察	33
5.2 今後の課題	35
5.3 まとめ	35
謝辞	36
参考文献	37

序章

Robocup サッカーシミュレーションリーグとは、複数のクライアントとそれらを統率するサーバで構成された環境でサッカーの試合を行わせるものであり、複数のプレイヤー間の強調行動、行動学習等の研究に利用されている。

近年の Robocup ではプレイヤーの行動計画は一般的に作り込みという手法を用いて作成されている。しかし、作り込みという手法はプレイヤーの行動計画を決めるために多大な労力を必要とするため、プログラム作成者にとっては負担の大きい手法である。そこで本研究室では作り込みよりもプログラム作成者に負担の少ない事例ベース推論という手法を用いてプレイヤープログラムを作成することを提案した。

本研究室には事例ベース推論を用いて行動計画を立案するプログラムの雛形がすでに存在した。本研究ではその雛形を改良しより精度の高い行動計画を立案することを目的とする。

第 1 章

Robocup サッカーシミュレーションリーグ

本章では Robocup サッカーシミュレーションリーグにおけるルールや、基本的な情報についての説明を行う。

1.1 サッカーシミュレーションの概要

Robocup の一部門であるサッカーシミュレーション部門の基本ルールでは、フィールドの大きさは縦 68m × 横 105m のフィールド上に 1 チーム 11 名のプレイヤーが参加できる。各プレイヤーとボールは、0.1 秒を 1 ステップとする時刻ごとにフィールド上を移動する。プレイヤーは毎ステップごとにコマンドを実行することができ、コマンドの実行結果はフィールド上に反映される。例えば、前進コマンドを実行すれば、プレイヤーの位置が変化する。試合は 5 分ハーフの計 10 分間で行われるので、各プレイヤーごとに約 6000 回のコマンドを実行することでチームの勝敗を決することになる。1 つのクライアントは 1 つのエージェントを制御しており、サーバ・クライアント間の通信には UDP/IP 通信を用いている。サーバはクライアントからの要求を処理し、モニタに状況を表示する役割を持っている。クライアントは複数のプレイヤーを制御したり、サーバを介さずに情報をやり取りしたりすることは禁止されている。



図1 Robocup サッカーシミュレーションリーグのフィールド

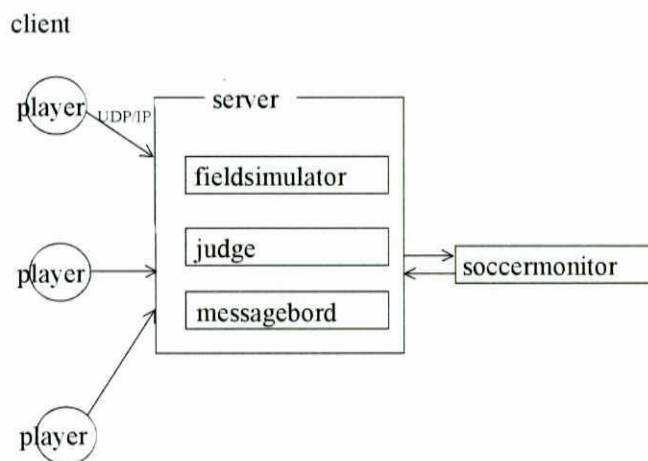


図2 Robocup シミュレーションの構成

1.2 サーバがクライアントへ送る情報

1.2.1 視覚情報

サーバはプレイヤーの向いている方向から一定角度内にある、エージェント、ボール、コートに点在するフラグ、ライン等、物体の情報（視線方向とのなす角度、距離）を定期的送信する。物体との距離が遠いほど角度や距離の誤差が大きくなる。視界の外の物体でも、プレイヤーとの距離が非常に小さい場合のみ物体の種類を知ることができる。但し、視覚情報には物体との距離に関してサーバ側から任意の誤差が含まれる。この誤差の大きさをプレイヤー側から取得したり、誤差を含まない真値を返すようにサーバを設定することはできない。

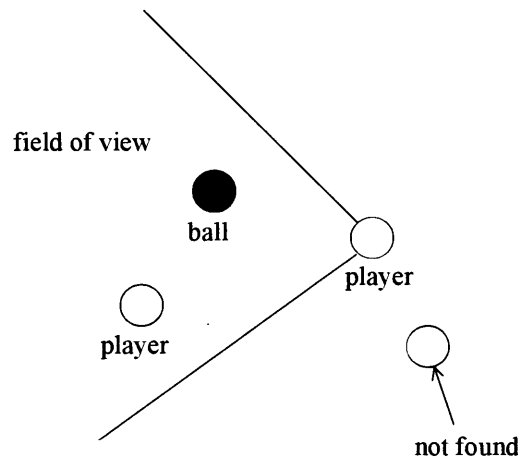


図3 プレイヤの視界

1.2.2 聴覚情報

クライアントから発言要求をした場合、サーバは指定されたメッセージを周囲 50m 内にいるクライアントに向けて送信する。また、審判がメッセージを発した場合は、全てのクライアントに対して情報を送信する。

1.2.3 感覚情報

サーバはプレイヤーの、スタミナ、速度、基本行動コマンドの使用回数等を定期的送信する。

1.3 クライアントの基本行動

クライアントがサーバへ定められたプロトコルにしたがって行動コマンドを送り、サーバの環境が変化し、変化した環境をサーバが返す。これを繰り返すことによって試合が進行する。簡単にクライアントの行動を以

下に示す。

- move … フィールド上の指定座標に移動する。試合中は使用不可。
- turn … 体を回転する。体の向き、視野方向が変わる。
- dash … 前方と後方へダッシュする。但し、後方ダッシュは体力を2倍消費する。
- kick … 指定範囲内にボールがある場合、指定した方向へボールを蹴る。
- catch … ボールをキャッチする。(キーパー専用)
- turn-neck … 首を回す。体の方向は変えずに視野方向だけを変更できる。
- change-view … 視野角度と視野情報の品質を変える。これに伴い視野情報の更新頻度も変わる。
- say … メッセージを周囲のエージェントに送る。
- bye … クライアントとサーバとの接続を切る。

本研究では上記の内、dash 命令と turn 命令を主に使用している。

1.4 Robocup サッカーシミュレーションで使われる語句と用語

1.4.1 コートの大きさ

コートの大きさは、縦 68m、横 105m である。コートの中心座標は (0,0)。敵陣のコート方向が X 軸正方向、敵陣コート右方向が Y 軸正方向となる。

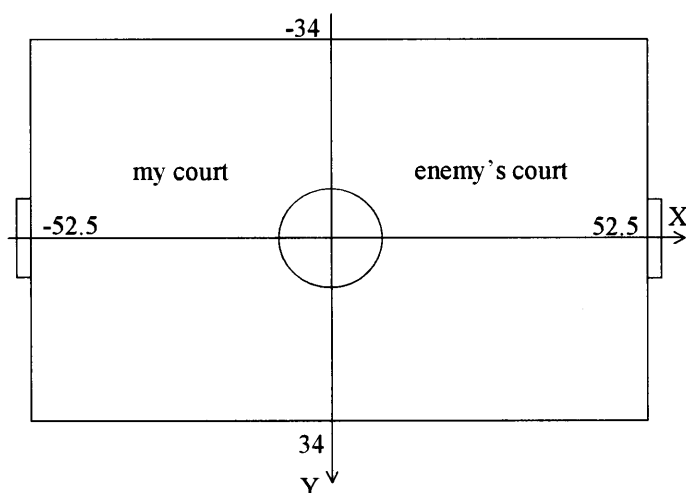


図4 サッカーコート ($-52.5 \leq X \leq 52.5$) ($-34 \leq Y \leq 34$)

1.4.2 審判

試合の審判はサーバが行う。ゲーム状況に応じてプレイヤーモードを全てのクライアントに伝える役目を持つ。審判のメッセージは下記のようなものがある。

- foul-Side-Unum … ファウル時に発言 (Side=ファウルをしたサイド)
- goal-Side-Point … ゴール時に発言 (Side=得点をしたサイド)
- half-time … ハーフタイムになった時に発言。
- time-up … ゲーム終了時に発言。
- time-extended … 延長戦になった時に発言。

(Side は、自チーム、敵チームのどちらかを指し、l (左側) と r (右側) の 2 つがある)

(Unum はプレイヤーの背番号を指し、Point はそのチームの得点を指す)

1.4.3 スタミナ

サッカーシミュレーションのプレイヤーはスタミナという概念を持ち、次の 3 つのパラメータにより構成される。

- stamina … 行動のたびに消費し、サイクル毎に回復。
- effort … 行動の影響力に関係。この値の高低によって行動の効果の高低が決まる。
- recover … サイクル毎の stamina の回復量に影響。stamina が一定量以上減るとこの値も減少。

1.4.4 ステップ

試合は前後半各 3000 ステップで分割されている。Say、change-view を除くほとんどの行動コマンドは 1 ステップに 1 度しか使用できない。現在のサーバ設定では 1 ステップ=0.1 秒である。

1.4.5 プレイモード

プレイモードとはサーバが審判を通じてクライアント全員に伝えるもので、モニター上部にも表示される。プレイモードには下記のようなものがある。

- before-kick-off … キックオフ前。前後半とも kick-off ボタンを押すまで。
- coner-kick-Side … Side のコーナーキックのモード。
- free-kick-Side … Side のフリーキックのモード。ファウルがあった場合にこのモードになる。
- goal-kick-Side … Side のゴールキックのモード。
- kick-in-Side … Side のキックインのモード。ボールがサイドラインからそとに出た場合にこのモードになる。
- kick-off-Side … kick-off ボタンが押された後、Side がボールを蹴るまで。
- play-on … 試合中のモード。move は使用不可。
- time-over … 試合終了のモード。

(Side は、自チーム、敵チームのどちらかを指し、l (左側) と r (右側) の 2 つがある)

1.4.6 フラグ&ライン

コート内には、仮想的なフラグ (旗) が立っている。これらは指定された名前を持ち、指定された場所に配置されている。また、実際のサッカーと同じように、コートにはラインが引かれている。フラグやラインは視野情報に含まれるためプレイヤーはこれらの情報から自分が現在どこにいるのかを知ることができる。

第 2 章

事例ベース推論

本章では事例ベース推論がどのような手法であるかを述べる。また、他の研究との相違点についても述べる。

2.1 事例ベース推論

事例ベース推論では、過去の事例は事例データベースに格納されている。解くべき問題が与えられると最も適合した事例が取り出され（検索）、それが問題に応じて適応修正（適応）され、与えられた問題の解決策として提示される。提示された解決策は実際に与えられた問題に適用して評価され（評価）、その結果成功した場合には「新しい事例とその解決方法」として事例データベースに格納され、失敗した場合には失敗した理由が解析され、「新しい事例と誤った解決方法と過ちを繰り返さないためのインデックス」が事例データベースに格納される（格納）。

この中では、適応が特に難しい。事例ベース推論では、与えられた問題に類似な過去の事例を検索することが重要であり、それは類似度の評価尺度に依存する。類似性は個々の特徴が似ていることよりも特徴間の関係、特徴の有無、等が重要なことが多い。適応は、両者の差を見出すこと、古い解を適応すること、からなるが、これも適用領域・分野に大きく依存する。

事例ベース推論では、新しい問題が与えられると、その解法に成功するにしても失敗するにしても、常にその結果をシステムの事例データベースに加えていく。失敗した時には2度と同じ間違いをしないように失敗事例として事例データベースに格納しておく。ある問題が与えられた時に、失敗事例が検索されたときは、その失敗事例を再利用してはならないことがわかり、別の事例を利用する。

このように、事例ベース推論では知識獲得機能を1つの機能として内在しているので学習に似たような効果が得られる。

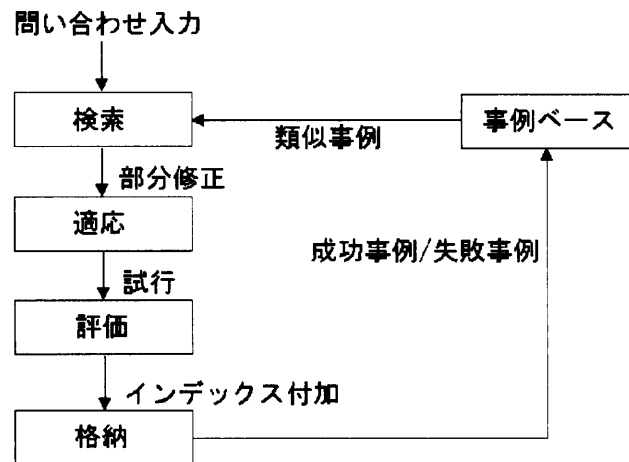


図5 事例ベース推論の流れ

2.2 既存の論文との比較

従来でも事例ベース推論を用いて行動計画を立案しようとする研究は行われていた（山口ほか [3]、道木ほか [4]、頼光ほか [5]）。

山口ほか [3] では、マルチエージェントを事例ベース推論を用いて操作しているが、行動計画全てを事例ベース推論を用いて立案しているわけではなく、ルールベース推論を用いて検索範囲を大幅に縮めてから事例ベース推論を適用している。本研究の目的は事例ベース推論だけをもちいて行動計画を立案することなので、この点において相違がある。しかし検索範囲を大幅に縮めてあるとはいえ、手法が事例ベース推論であることには変わりがないので検索方法や事例の作成方法などは参考になる。

道木ほか [4]、頼光ほか [5] では、ロボカップサッカーシミュレーションリーグを利用して、実機での学習の代わりにさせている。実機で学習を行う場合、ロボットは実時間でしか稼働できないのでデータを採取するのに膨大な時間を必要とする。またバッテリーも交換しなければならないので手間も多く必要とする。シミュレーションリーグを利用すれば実時間の何倍もの時間を再現することができ、バッテリーの交換も必要ないので大きな手間をかけずに充分な量の実験データを採取することができる。このような背景に基づいて道木ほか [4]、頼光ほか [5] ではロボカップシミュレーションリーグにおけるプレイプログラムの作成を行っている。実機に流用することを念頭に置いているため、実世界における多くの制約がプログラムには盛り込まれている。本研究ではプログラムの実験成果を実機に流用することはあまり考えていないため、実世界特有の制約は盛り込まれていない。この点において相違がある。しかし、制約の中には実世界でもシミュレーションの世界でも共

通の部分があるため、そのような制約をうまくプログラムに盛り込む方法として参考とした。

第3章

プレイヤープログラム作成

本章では、事例ベース推論の利用、既存のプログラムと本研究において作成したプレイヤープログラムの仕様、単発行動計画と連続行動計画の違い、など本研究の経過についての説明を行う。

3.1 行動計画の着目点

サッカーの試合を構成する行動計画には様々なものがある（ドリブルをする、パスを出す、ボールを蹴るなど）が、本研究ではその中から試合を構成する上で重要であると考えられる「ボールに近づく」という行動計画に着目した。

3.2 事例ベース推論の利用

3.2.1 事例の内容

本研究では事例の格納要素として、(プレイヤーの X 座標、プレイヤーの Y 座標、ボールとプレイヤーとの相対距離、ボールとプレイヤーの相対角度、行動、評価値) の 6 つの要素を利用している。これら 6 つの要素を 1 組とし 1 個の事例として扱っている。各要素の説明は以下の通りである。

- プレイヤーの X 座標 … プレイヤーのフィールド上の X 座標を表す。フィールド上の X 座標の範囲は、 $-52.5 \leq X \leq 52.5$ であるがプレイヤーがフィールド外に出た場合などは一時的に範囲外の値をとる。
- プレイヤーの Y 座標 … 上記と同様であるが、フィールド上の範囲は $-34 \leq Y \leq 34$ である。
- ボールとプレイヤーとの相対距離 … ボールとプレイヤーの間の相対距離を表す。サーバから送信された値をそのまま利用しているが、送信される情報には誤差が含まれている。
- ボールとプレイヤーとの相対角度 … 上記と同様にサーバから送信される誤差含みの情報を利用している。
- 行動 … プレイヤーの行う行動計画。本研究では単発行動では 1 個、連続行動では 5 個の命令が格納されている。

- 評価値 … その事例を用いて実際に行動計画を実行した場合に、どの程度の成果を出したのかを表す指標となる値。本研究では「ボールに近づく」という行動計画を立案して成功した場合に上昇し、「ボールから離れる」という行動計画をした場合に減少するようになっている。

これらの値の内、事例検索要素として、(ボールとプレイヤーとの相対距離・角度、プレイヤーの X-Y 座標) の 4 個の要素を利用している。

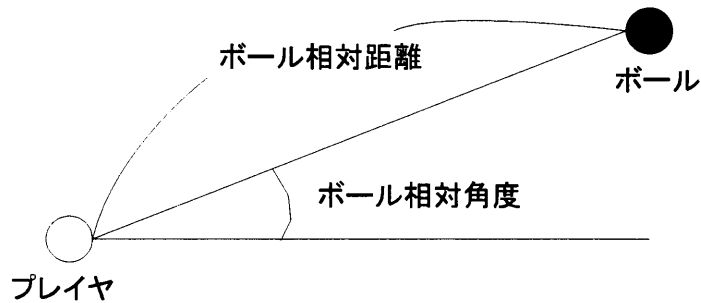


図 6 事例格納要素

3.2.2 事例の分類

事例は下記のように領域ごとに分割されて格納されている。

	-52.5	-20	20	52.5	
	00	10	20		-34
	01	11	21		-10
	02	12	22		10
					34
	my court		enemy's court		

図 7 フィールドの分割 X 軸 ($X < -20, -20 \leq X \leq 20, X > 20$) Y 軸 ($Y < -10, -10 \leq Y \leq 10, Y > 10$)

例えば、領域 00 には X 座標が -20 以下、Y 座標が -10 以下の要素を持つ事例が格納されている。

3.2.3 事例ベース推論の処理の流れ

- 解析 … 現在の自分とボールの状態を「問題」として扱う。Get-base-data で問題を解析する。解析されたデータを事例検索性データと呼ぶ。
- 検索 … Case-search で、事例検索性データと分類が同じ事例データ群を総当りで比較する。事例の比較では完全に一致することがありえないため両データ間の誤差を用いる。
- 適用 … Act で検索された事例の行動計画を実行する。
- 評価 … Value-action で行動の評価を行う。行動前後の環境を比較して評価値に加点・減点を行う。本研究では「ボールに近づく」という行動計画を目的としているため、ボールに近づく行動を行って成功した場合に評価値が加点され、ボールから遠ざかった場合には評価値が減点される。

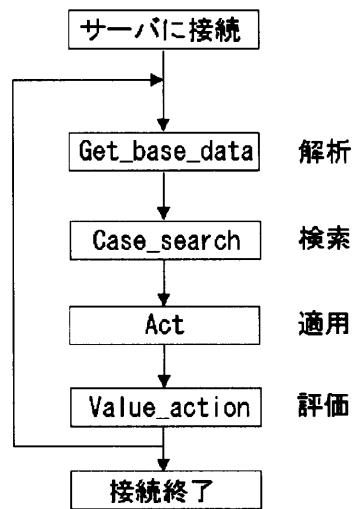


図8 事例ベース推論の処理の流れ

3.3 既存のプレイヤープログラムの仕様

本研究室には、事例ベース推論を用いて単発行動で行動計画を立案するプログラムはすでに存在していた。本研究ではこのプログラムを雛形として、プログラムの作成を行った。この雛形プログラムはC言語で作成されていたが、本研究の開発環境はJava言語であるので、C言語からJava言語への書き換えを行って利用した。

3.4 単発行動計画と連続行動計画

単発行動計画とは現在行っている行動に対して、過去と未来の行動が影響を与えない行動計画である。言い換えるなら、現在の環境だけを参照して立案された行動計画である。よって、単発行動計画では「意味のある行動計画」というものは立案されにくい。例えば、サッカーの試合において「ボールに近づく」という行動は「ボールの方に体をターンしてから、前方にダッシュをする」という一連の流れで構成されている。しかし、単発行動ではターンはターンとして、ダッシュはダッシュとしての行動計画しか立案しないため、「ボールの方に体をターンしてから、前方にダッシュをする」という意味のある行動計画は立案されにくい。そこで本研究では、意味のある行動計画を立案するために単発行動ではなく連続行動を事例に格納することを提案した。連続行動数を仮に5個と仮定すると、単発行動では、事例呼び出し→ターン命令→事例呼び出し→ダッシュ命令→事例呼び出し→ダッシュ命令→事例呼び出し→ダッシュ命令→事例呼び出し→ダッシュ命令と行われていた行動計画が、事例呼び出し→ターン命令→ダッシュ命令→ダッシュ命令→ダッシュ命令→ダッシュ命令という1個の事例の行動計画で立案することができ、事例1個に対する、行動計画が意味のある行動計画になり易くなるのではないかと考えた。

単発行動計画

事例1
(turn 60)

事例2
(dash 30)

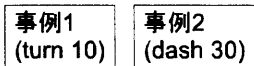
連続行動計画

事例1
(turn 60)
(dash 30)
(dash 30)
(dash 30)
(dash 30)

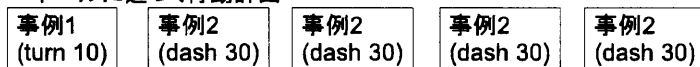
単発行動計画では事例1と事例2と組み合わせなければ、連続行動計画の事例1のような意味のある行動計画を立案できない

図9 単発行動計画と連続行動計画の例

単発行動



ボールに近づく行動計画

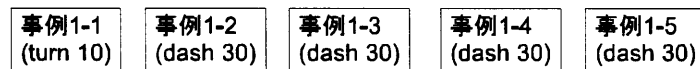


それぞれの行動について前後の行動との関連性が少ないため行動が欠落しやすく、一つでも欠落すると全体としてボールに近づくという一連の意味のある行動計画にならない

連続行動

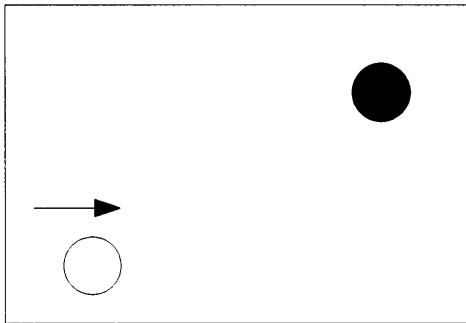


ボールに近づく行動計画

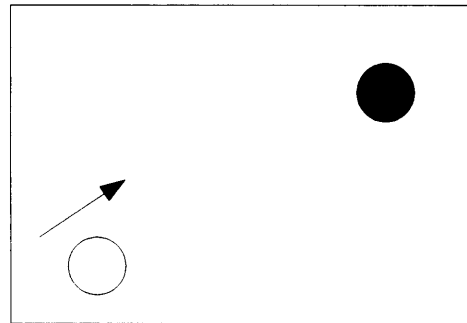


期間内においては前後の関連性があるので全体として意味のある行動になりやすい

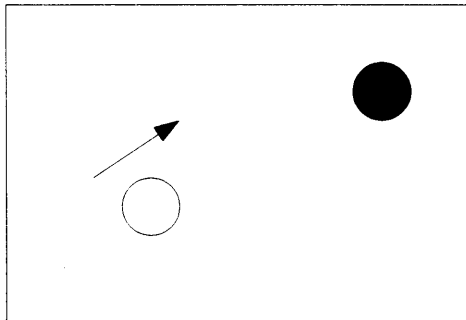
図 10 意味のある行動計画の立案例



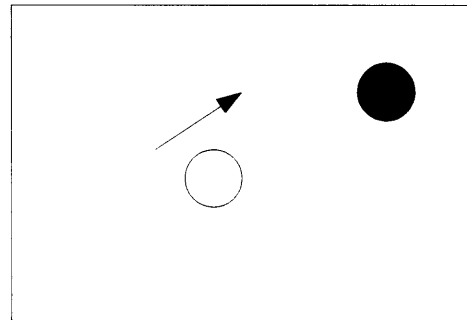
初期位置



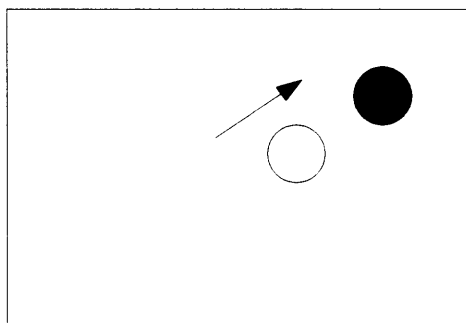
turn命令実行



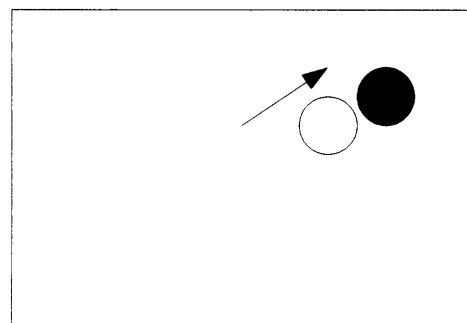
dash命令実行



dash命令実行



dash命令実行



dash命令実行

図 11 プレイヤの実際の動き

3.5 連続行動計画プレイヤープログラムの作成

本研究では「ボールに近づく」という行動に着目している。そこで効率的にボールに近づくにはどのような行動計画を立案すれば良いのかということについて考察した。単純に考えれば、ボールに近づく際に実行される dash 命令の引数を全て最大値 (100) で実行すれば最も早くボールに到達できると容易に推測できる。しかし、実際に dash の引数を全て最大値 (100) にして実験をした結果、ボール到達時にはスタミナが枯渇してしまい、ボール到達後の行動計画に支障をきたしてしまうことが分かった。ボールに到達した後どの程度のスタミナを残せばよいかということはボールに近づくという行動計画を立案する段階では予測できないので、本研究では「スタミナを最大値に維持しつつ効率的にボールに近づく」という行動計画を立案するプレイヤープログラムの作成を行った。

スタミナは通常 1 ステップで 45 回復するため単発行動では実行できる dash 命令の引数の限界は 45 である。一方、連続行動では 5 ステップに渡ってスタミナの管理ができるため一時的にスタミナを多く使うことができる。5 ステップ間で行動計画終了後にスタミナ最大値を維持しつつ最大の移動距離を実現する dash 命令の組み合わせを計算によって算出したところ、5 回連続で dash が続く場合には、

(dash 100) (dash 100) (dash 25) (dash 0) (dash 0)

1 度 turn 命令を実行してから dash 命令を 4 回連続で実行する場合には

(turn X) (dash 100) (dash 80) (dash 0) (dash 0)

が最も移動距離が長いことが分かった。そこでこれらの行動を事例に組み込んで単発行動と連続行動の比較実験を行った。

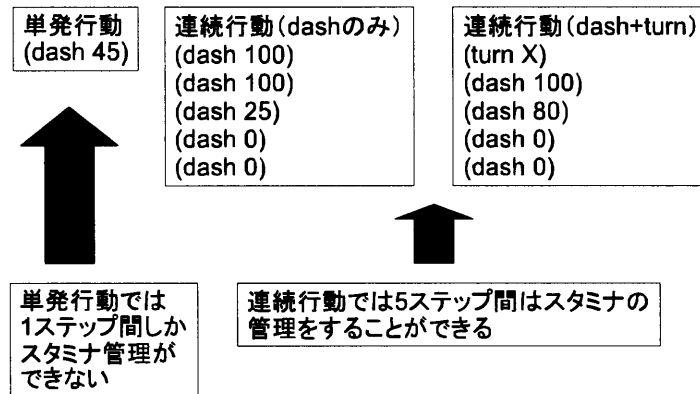


図 12 スタミナ制限の dash 命令

第4章

実験

本章では、事例ベース推論を用いたプレイヤープログラムにおいて、単発行動計画と連続行動計画でどのような違いがあるのかを実験的に検証した。

4.1 実験条件

実験を円滑に行うためにプレイヤープログラムに下記のような条件を設けた。括弧内はなぜその条件が必要であるかの簡単な説明である。

- 事例は全て手作業で作成されており、試合の結果から事例を更新するなどの学習は行わない。(本来ならば事例は試合を重ねるごとに学習させ、データベースの中に蓄積されていくべきだが、時間の関係上そのようなプログラムを作成することができなかったので今回の実験では事例を手作業で作成して更新も行わないこととした。一応更新事例を事例データベースに書き込むプログラムだけは用意したのだが更新事例を事例データベースに書き込んでしまうと全く同じ事例が格納されている事例データベースを使って繰り返し実験を行うことができなくなってしまうので本実験では使用していない。)
- 事例の要素である X-Y 座標は 10 刻みで値が格納されている。(特に 10 刻みでなければならないという指定はないが、あまりにも細かく指定しすぎると現在の状況に対する適合事例が多く検索されてしまい検索効率の低下につながるので本実験では 10 刻みとした。)
- 単発行動計画のプログラムに対しては相対角度が-7~7度の範囲においては、強制的にダッシュ命令が実行されるようになっている。(単発行動ではその性質上 turn 命令を実行したあとにまた turn 命令を実行してしまい、いつまでもその場から動けなくなってしまう場合がある。そのような状況に陥ってしまうのが単発行動の性質なので仕方がないと言ってしまえばそれまでだが、それでは純粋な到達ステップ数比較実験にならないと判断したためボールに対してほぼ正面に位置する-7~7度の範囲においては turn 命令が連続して発生しないように強制的に dash 命令を実行することとした)
- プレイヤーはダッシュ命令を実行する度にスタミナを消費する。ここでは行動計画を終了する際にスタミ

ナが常に最大値である 4000 になるように制限をかけた。(この制限については前章の「連続行動計画プレイヤープログラム」の項ですでに説明済みであるので割愛させていただく)

4.2 実験方法

実験はプレイヤーがボールに到達するまでのステップ数を計測する。ボールに到達したか否かの判定は、ボールを蹴ることが可能なエリア (kickable-area) まで、プレイヤーが到達したか否かで判定する。プレイヤーの初期位置は 18 箇所用意し、各初期位置からボールに到達するまでのステップ数を 40 回ずつ計測した。ボールの初期位置は (0,0) から変化しないものとした。

プレイヤーの 18 箇所の初期位置は、

(-50,-30),(-40,-20),(-30,-25),(-50,5),(-40,-5),(-25,0), (-50,30),(-35,25),(-25,15),(-15,-30),(-10,-20),(-5,-15),
(-15,5),(-15,0),(-10,-5),(-15,15),(-10,30),(-5,20)

である。

4.3 実験環境

プレイヤーは図に示された 18 箇所の内の 1 つを初期位置とする。また、プレイヤー 1 人とボール 1 個以外のオブジェクトは存在しないものとする。

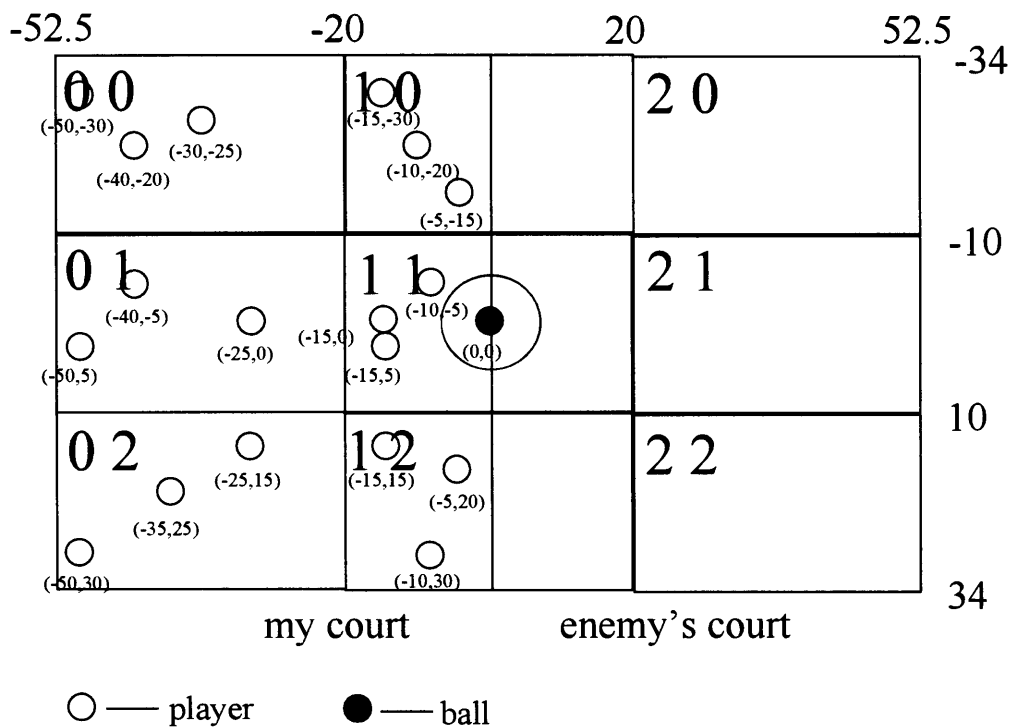


図 13 実験環境の図

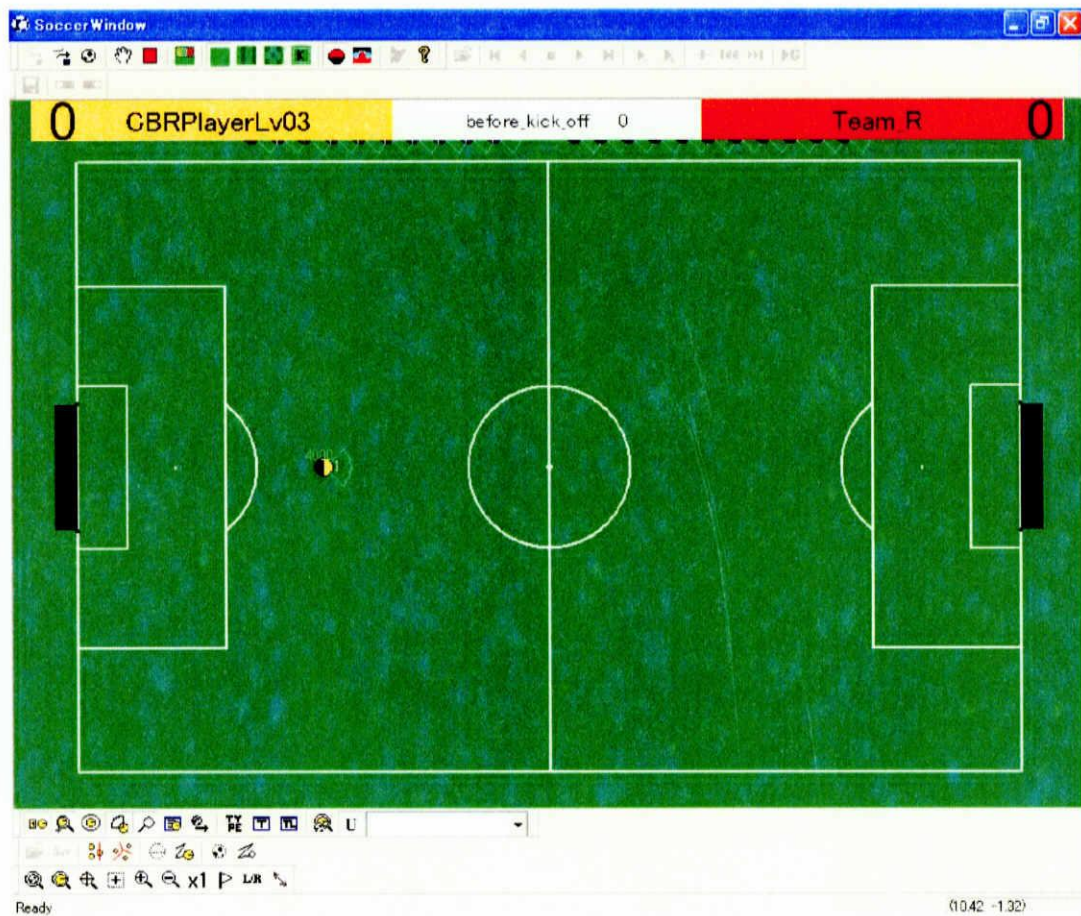


図 14 実際の実験環境

4.4 実験結果

実験結果（まとめ）では 40 回分の実験結果から得られた平均到達ステップ数や標準偏差についてまとめられている。また実験結果（詳細）では 1 回 1 回の実験結果をステップ数で表示し、10 回づつまとめて平均到達ステップ数や標準偏差を表示している。

4.4.1 実験結果 (まとめ)

スタミナ維持のダッシュ命令の単発行動

	エリア00			エリア01		
	(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
最短	132	105	90	117	97	61
最長	149	119	105	137	103	80
平均	141.5	112.15	97.55	124.475	99.9	66.2
標準偏差	4.284737	2.991869	3.67214	4.094947	1.354953	3.50238

	エリア02			エリア10		
	(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
最短	140	98	71	78	50	37
最長	151	117	85	89	63	47
平均	144.825	107.9	76.9	83.6	57.425	42.275
標準偏差	2.706947	4.505268	3.044962	2.667948	3.470665	2.800984

	エリア11			エリア12		
	(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
最短	36	36	26	48	74	46
最長	48	46	36	63	93	64
平均	41.175	41.225	31.45	57.025	83.275	54.875
標準偏差	3.536531	2.292546	2.459414	3.996713	4.512021	4.467475

図 15 単発行動計画の実験結果

スタミナ維持のダッシュ命令の連続行動

	エリア00			エリア01		
	(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
最短	133	99	88	110	89	57
最長	147	109	98	123	101	65
平均	137.85	103.8	91.8	116.1	92.55	58.925
標準偏差	3.332436	2.065591	2.945662	3.044962	1.947385	1.685344

	エリア02			エリア10		
	(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
最短	130	88	64	74	48	33
最長	143	104	73	83	58	40
平均	136.975	98.375	68.4	77.475	52.55	37.575
標準偏差	3.084182	3.874224	1.780233	1.839558	1.934173	1.631226

	エリア11			エリア12		
	(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
最短	33	33	24	47	70	45
最長	41	39	29	54	83	54
平均	36.2	35.475	27.1	49	74.625	49.275
標準偏差	2.102502	1.601081	1.765771	1.694637	2.666867	2.124189

図 16 連続行動計画の実験結果

4.4.2 実験結果 (詳細)

スタミナ維持のダッシュ命令の単発行動

		エリア00				エリア01	
		(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
		149	119	97	119	100	67
		141	110	98	125	100	69
		148	112	97	118	99	66
		138	110	99	121	100	61
		146	112	99	124	99	80
		148	111	102	125	100	64
		140	111	101	127	100	62
		140	114	99	128	101	66
		141	111	102	127	98	65
		140	108	90	137	101	66
	最短	138	108	90	118	98	61
	最長	149	119	102	137	101	80
	平均	143.1	123.6	98.4	125.1	99.8	66.6
	標準偏差	4.148628	2.973961	3.470511	5.40473	0.918937	5.25357
		エリア02				エリア10	
		(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
		143	101	81	79	56	37
		142	106	80	82	61	46
		143	108	73	86	62	43
		145	104	85	87	62	45
		146	108	75	87	57	45
		145	117	77	85	62	38
		148	98	72	81	63	47
		142	109	81	81	62	38
		144	105	78	85	59	46
		143	109	79	80	57	43
	最短	142	98	72	79	56	37
	最長	148	117	85	87	63	47
	平均	144.1	106.5	78.1	83.3	60.1	42.8
	標準偏差	1.911951	5.147815	3.984693	3.020302	2.601282	3.765339
		エリア11				エリア12	
		(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
		37	44	28	51	81	52
		37	41	34	61	93	53
		44	46	31	52	83	52
		37	41	36	61	80	58
		46	36	29	63	87	54
		45	40	30	59	88	61
		39	41	28	61	89	48
		39	43	30	56	84	50
		41	42	31	55	79	50
		40	39	31	60	85	52
	最短	37	36	28	51	79	48
	最長	46	46	36	63	93	61
	平均	40.5	41.3	30.8	57.9	84.9	53
	標準偏差	3.407508	2.750757	2.529822	4.148628	4.408325	3.887301

図 17 単発行動計画の詳細な実験結果 (1~10 回目)

スタミナ維持のダッシュ命令の単発行動

		エリア00				エリア01	
		(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
		141	113	101	121	100	66
		145	109	101	127	100	62
		132	105	97	127	103	65
		135	111	96	121	102	64
		143	112	95	128	98	74
		140	115	101	124	98	67
		148	117	96	118	99	65
		145	112	97	122	99	72
		143	116	105	126	102	65
		137	111	98	127	97	66
	最短	132	105	95	118	97	62
	最長	148	117	105	128	103	74
	平均	140.9	112.1	98.7	124.1	99.8	66.6
	標準偏差	4.976612	3.510302	3.164034	3.414023	1.988858	3.657564
		エリア02				エリア10	
		(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
		144	102	76	82	58	39
		145	107	77	83	55	45
		149	107	72	85	51	41
		143	107	76	85	56	41
		150	105	77	84	60	44
		151	107	81	88	61	40
		140	112	72	83	60	41
		142	107	80	88	59	46
		146	109	73	84	54	37
		140	109	74	86	57	44
	最短	140	102	72	82	51	37
	最長	151	112	81	88	61	46
	平均	145	107.2	75.8	84.8	57.1	41.8
	標準偏差	3.972125	2.616189	3.119829	2.043961	3.142893	2.859681
		エリア11				エリア12	
		(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
		46	42	31	49	85	52
		40	44	35	53	77	59
		37	42	28	60	84	58
		37	44	31	62	82	54
		37	42	30	51	87	62
		38	43	35	57	75	61
		41	43	31	55	87	46
		47	39	31	59	79	51
		42	42	27	61	81	58
		40	44	33	56	80	58
	最短	37	39	27	49	75	46
	最長	47	44	35	62	87	62
	平均	40.5	42.5	31.2	56.3	81.7	55.9
	標準偏差	3.62859	1.509231	2.616189	4.347413	4.083844	5.021067

図 18 単発行動計画の詳細な実験結果 (11~20 回目)

スタミナ維持のダッシュ命令の単発行動

		エリア00			エリア01		
		(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
		135	116	99	120	99	70
		149	118	97	121	100	66
		137	116	94	127	101	65
		138	112	93	121	98	66
		138	110	101	121	99	62
		140	110	102	128	99	65
		143	111	96	117	100	68
		144	115	98	121	100	67
		140	111	99	129	98	68
		146	107	102	125	102	66
	最短	135	107	93	117	98	62
	最長	149	118	102	129	102	70
	平均	141	112.6	98.1	123	99.6	66.3
	標準偏差	4.396969	3.470511	3.142893	3.972125	1.264911	2.162817
		エリア02			エリア10		
		(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
		150	100	77	86	54	44
		145	102	77	80	53	46
		143	113	75	83	50	44
		147	112	80	82	57	43
		145	113	77	84	61	40
		147	106	71	78	60	44
		147	105	78	82	59	41
		145	105	81	83	55	44
		150	111	77	86	61	44
		144	114	76	89	61	41
	最短	143	100	71	78	50	40
	最長	150	114	81	89	61	46
	平均	146.3	108.1	76.9	83.3	57.1	43.1
	標準偏差	2.359378	5.087021	2.726414	3.164034	3.928528	1.852926
		エリア11		エリア12			
		(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
		48	43	26	62	88	52
		40	44	32	58	87	59
		47	41	34	56	87	50
		46	41	32	61	84	53
		40	40	34	56	83	64
		45	39	34	63	74	52
		40	41	30	60	86	53
		44	40	35	61	79	59
		46	41	31	56	80	60
		45	41	34	59	93	56
	最短	40	39	26	56	74	50
	最長	48	44	35	63	93	64
	平均	44.1	41.1	32.2	59.2	84.1	55.8
	標準偏差	3.034981	1.449138	2.699794	2.616189	5.384133	4.516636

図 19 単発行動計画の詳細な実験結果 (21~30 回目)

スタミナ維持のダッシュ命令の単発行動

		エリア00				エリア01	
		(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
		141	112	95	122	100	65
		143	113	100	123	100	66
		136	115	94	124	102	67
		144	114	91	122	101	62
		136	110	90	128	100	64
		141	116	98	123	99	69
		136	110	93	128	100	68
		142	110	98	126	101	67
		146	110	101	131	102	62
		145	111	90	130	99	63
	最短	136	110	90	122	99	62
	最長	146	116	101	131	102	69
	平均	141	112.1	95	125.7	100.4	65.3
	標準偏差	3.800585	2.282786	4.082483	3.368151	1.074968	2.496664
		エリア02				エリア10	
		(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
		143	111	74	82	53	40
		144	112	74	87	56	42
		143	101	75	83	56	42
		148	107	78	82	55	39
		143	113	79	81	52	44
		145	106	77	84	56	42
		142	116	76	81	54	46
		144	111	77	81	54	42
		143	106	80	82	62	39
		144	115	78	87	56	38
	最短	142	101	74	81	52	38
	最長	148	116	80	87	62	46
	平均	143.9	109.8	76.8	83	55.4	41.4
	標準偏差	1.66333	4.685676	2.043961	2.309401	2.716207	2.458545
		エリア11				エリア12	
		(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
		42	43	27	54	80	53
		39	40	32	56	79	55
		39	41	31	55	74	60
		45	39	33	53	83	46
		42	38	32	54	86	53
		38	45	30	48	81	58
		36	40	35	60	86	54
		38	37	31	60	83	62
		39	36	33	51	86	54
		38	41	32	56	86	53
	最短	36	36	27	48	74	46
	最長	45	45	35	60	86	62
	平均	39.6	40	31.6	54.7	82.4	54.8
	標準偏差	2.633122	2.708013	2.1187	3.683296	3.977716	4.442222

図 20 単発行動計画の詳細な実験結果 (31~40 回目)

スタミナ維持のダッシュ命令の連続行動

		エリア00				エリア01	
		(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
		139	104	89	118	92	58
		139	103	88	118	93	60
		139	108	92	117	95	58
		136	103	88	118	93	58
		134	102	90	118	91	58
		139	103	90	110	92	58
		133	104	93	114	94	59
		143	106	92	114	93	57
		143	109	92	115	101	60
		142	101	88	112	93	58
	最短	134	101	88	110	91	57
	最長	143	109	93	118	101	60
	平均	138.7	104.3	90.2	115.4	93.7	58.4
	標準偏差	3.497618	2.58414	1.932184	2.875181	2.790858	0.966092
		エリア02				エリア10	
		(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
		140	98	64	78	53	36
		135	88	69	77	52	33
		136	92	68	75	53	39
		135	94	69	74	53	39
		139	94	67	78	53	35
		134	92	68	78	57	38
		133	93	70	76	53	35
		138	96	70	74	52	39
		136	91	68	78	53	38
		133	94	68	78	54	38
	最短	133	88	64	74	52	33
	最長	140	98	70	78	57	39
	平均	135.9	93.2	68.1	76.6	53.3	37
	標準偏差	2.424413	2.740641	1.72884	1.712698	1.418136	2.108185
		エリア11		エリア12			
		(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
		36	35	29	53	70	48
		35	35	28	54	73	48
		34	34	27	49	72	46
		37	35	24	48	73	50
		38	34	27	49	83	48
		38	34	29	49	79	49
		33	33	28	49	78	48
		34	35	24	48	75	53
		38	37	25	47	73	53
		34	35	28	48	78	48
	最短	33	33	24	47	70	46
	最長	38	37	29	54	83	53
	平均	35.7	34.7	26.9	49.4	75.4	49.1
	標準偏差	1.946507	1.05935	1.911951	2.270585	3.977716	2.282786

図 21 連続行動計画の詳細な実験結果 (1~10 回目)

スタミナ維持のダッシュ命令の連続行動

		エリア00			エリア01		
		(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
		139	102	89	114	93	59
		138	104	93	114	91	57
		144	104	89	122	94	60
		138	103	97	123	92	59
		134	104	94	115	90	60
		135	102	94	120	93	59
		135	103	93	118	93	57
		140	105	90	113	92	58
		134	105	93	117	93	58
		139	103	89	112	92	58
	最短	134	102	89	112	90	57
	最長	144	105	97	123	94	60
	平均	137.6	103.5	92.1	116.8	92.3	58.5
	標準偏差	3.169297	1.080123	2.726414	3.852849	1.159502	1.080123
		エリア02			エリア10		
		(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
		138	100	68	78	53	40
		141	104	68	77	50	37
		134	99	69	78	54	38
		143	102	69	80	53	38
		130	98	70	79	53	39
		130	102	68	78	53	37
		138	95	69	78	53	38
		132	99	71	78	53	38
		139	99	66	78	50	38
		137	98	67	75	52	38
	最短	130	95	66	75	50	37
	最長	143	104	71	80	54	40
	平均	136.2	99.6	68.5	77.9	52.4	38.1
	標準偏差	4.516636	2.54733	1.433721	1.286684	1.349897	0.875595
		エリア11		エリア12			
		(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
		39	36	28	49	73	49
		34	35	28	48	73	49
		38	36	24	47	73	50
		38	39	29	49	77	53
		38	38	27	49	75	49
		33	34	28	49	74	53
		34	37	28	48	75	48
		38	37	28	49	72	51
		35	34	29	50	73	47
		37	35	25	48	74	45
	最短	33	34	24	47	72	45
	最長	39	39	29	50	77	53
	平均	36.4	36.1	27.4	48.6	73.9	49.4
	標準偏差	2.170509	1.66333	1.646545	0.843274	1.449138	2.503331

図 22 連続行動計画の詳細な実験結果 (11~20 回目)

スタミナ維持のダッシュ命令の連続行動

		エリア00			エリア01		
		(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
		137	104	98	120	92	60
		139	103	97	114	93	58
		134	104	93	118	93	58
		147	103	89	115	94	58
		138	107	92	118	92	58
		139	105	93	114	94	59
		138	108	98	114	91	63
		139	104	89	118	93	58
		137	102	93	116	94	59
		134	99	90	114	92	59
	最短	134	99	89	114	91	58
	最長	147	108	98	120	94	63
	平均	138.2	103.9	93.2	116.1	92.8	59
	標準偏差	3.614784	2.514403	3.457681	2.233582	1.032796	1.563472
		エリア02			エリア10		
		(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
		138	98	68	78	54	38
		141	102	68	79	49	37
		138	102	68	74	48	38
		138	104	71	78	52	39
		139	104	69	79	54	39
		139	100	72	76	50	38
		139	102	73	78	53	39
		136	102	68	78	53	39
		138	97	68	79	58	37
		139	98	68	77	50	34
	最短	136	97	68	74	48	34
	最長	141	104	73	79	58	39
	平均	138.5	100.9	69.3	77.6	52.1	37.8
	標準偏差	1.269296	2.514403	1.946507	1.577621	2.960856	1.549193
		エリア11		エリア12			
		(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
		38	39	28	49	74	53
		34	36	28	49	75	46
		41	38	27	48	74	54
		34	35	28	48	73	49
		39	34	29	48	77	49
		38	38	29	48	74	51
		38	35	28	49	78	49
		34	34	29	48	74	50
		35	34	28	48	74	49
		37	35	24	48	71	47
	最短	34	34	24	48	71	46
	最長	41	39	29	49	78	54
	平均	36.8	35.8	27.8	48.3	74.4	49.7
	標準偏差	2.440401	1.873796	1.47573	0.483046	1.95505	2.451757

図 23 連続行動計画の詳細な実験結果 (21~30 回目)

スタミナ維持のダッシュ命令の連続行動

		エリア00			エリア01		
		(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
		138	107	90	114	89	58
		138	105	90	114	91	59
		133	106	92	115	91	59
		133	102	94	119	90	59
		134	101	88	113	94	64
		139	102	88	113	93	59
		143	104	98	119	93	65
		139	103	91	114	91	58
		138	103	94	117	93	58
		134	102	92	123	89	59
	最短	133	101	88	113	89	58
	最長	143	107	98	123	94	65
	平均	136.9	103.5	91.7	116.1	91.4	59.8
	標準偏差	3.28126	1.95789	3.056868	3.314949	1.776388	2.529822
		エリア02			エリア10		
		(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
		140	103	70	79	52	38
		138	97	69	74	50	38
		142	99	68	78	53	35
		134	99	65	74	55	34
		135	98	65	78	51	39
		138	102	69	83	54	39
		137	100	69	78	53	39
		139	98	66	78	50	38
		138	102	69	78	53	36
		132	100	67	78	53	38
	最短	132	97	65	74	50	34
	最長	142	103	70	83	55	39
	平均	137.3	99.8	67.7	77.8	52.4	37.4
	標準偏差	2.945807	1.988858	1.828782	2.529822	1.646545	1.776388
		エリア11		エリア12			
		(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
		37	34	28	47	78	49
		33	34	25	49	70	48
		39	38	24	53	78	49
		38	35	28	48	77	48
		35	38	24	53	78	48
		34	36	26	52	74	49
		35	35	28	48	73	48
		38	34	28	49	73	48
		35	35	28	50	73	50
		35	34	24	48	74	52
	最短	33	34	24	47	70	48
	最長	39	38	28	53	78	52
	平均	35.9	35.3	26.3	49.7	74.8	48.9
	標準偏差	1.969207	1.567021	1.888562	2.213594	2.780887	1.286684

図 24 連続行動計画の詳細な実験結果 (31~40 回目)

第5章

考察とまとめ

5.1 考察

前章の実験結果より、実験を行った全ての初期位置に対して、単発行動計画よりも連続行動計画の方がゴールに到達するまでの所要ステップ数が短かった。

スタミナが行動計画後に最大値より減らないように制限をかけるということは、スタミナという値に対して最大の制限をかけていることと同じである。そして、スタミナに全く制限をかけない場合には最大速度のダッシュ命令を実行し続けることは明らかなので到達時間に差は生じないと推測される。スタミナ制限最大の場合には連続行動計画の方が到達ステップが短く、スタミナ制限をかけない場合には同じになると推測されるので、中途半端に制限がかかっている場合には連続行動計画の方が到達ステップが短くなると推測することができる。

以上より連続行動計画の単発行動計画に対する優位性が実験的に証明された。

また、実験結果を統計的に検証するために、「連続行動計画の平均到達ステップと単発行動計画の平均到達ステップは同じ母集団から選ばれた」という帰無仮説を設定してt検定を行った。

	エリア00			エリア01		
	(-50 -30)	(-40 -20)	(-30 -25)	(-50 5)	(-40 -5)	(-25 0)
サンプル数(n)	40	40	40	40	40	40
連続平均(MI)	137.85	103.8	91.8	116.1	92.55	58.925
単発平均(Mt)	141.5	112.15	97.55	124.475	99.9	66.2
連続標準偏差(SI)	3.332436	2.065591	2.945662	3.044962	1.947385	1.685344
T	-6.84011	-25.2449	-12.1904	-17.1765	-23.5704	-26.9573

	エリア02			エリア10		
	(-50 30)	(-35 25)	(-25 15)	(-15 -30)	(-10 -20)	(-5 -15)
サンプル数(n)	40	40	40	40	40	40
連続平均(MI)	136.975	98.375	68.4	77.475	52.55	37.575
単発平均(Mt)	144.825	107.9	76.9	83.6	57.425	42.275
連続標準偏差(SI)	3.084182	3.874224	1.780233	1.839558	1.934173	1.631226
T	-15.8951	-15.3537	-29.8177	-20.7934	-15.7402	-17.9935

	エリア11			エリア12		
	(-15 5)	(-15 0)	(-10 -5)	(-15 15)	(-10 30)	(-5 20)
サンプル数(n)	40	40	40	40	40	40
連続平均(MI)	36.2	35.475	27.1	49	74.625	49.275
単発平均(Mt)	41.175	41.225	31.45	57.025	83.275	54.875
連続標準偏差(SI)	2.102502	1.601081	1.765771	1.694637	2.666867	2.124189
T	-14.7771	-22.4278	-15.3846	-29.5734	-20.2557	-16.4637

図 25 危険率 5% の t 検定

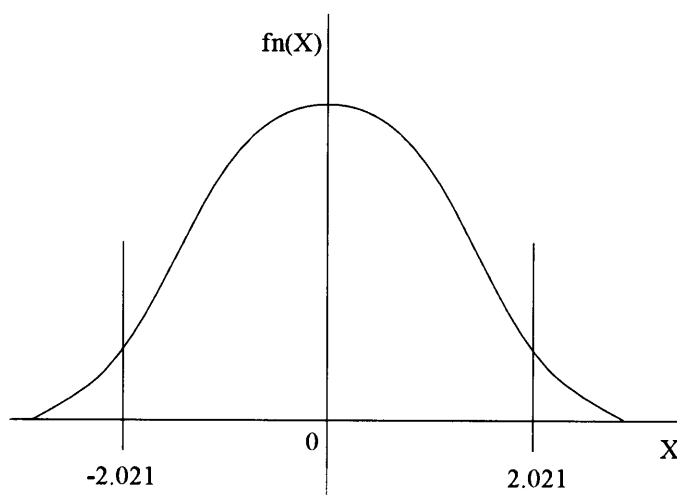


図 26 危険率 5% の t 分布

各初期位置の 'T' の値は全て棄却域にあるので、帰無仮説を棄却する。よってこの実験結果の平均ステップは同じ母集団から選ばれたとは言えないとなり、単発行動計画と連続行動計画の実験結果には相違がないとは

言えないことが分かった。

5.2 今後の課題

本研究では「ボールに近づく」という行動についてのみ連続行動計画と単発行動計画の比較実験を行ったが、サッカーの試合というものは他にも様々な行動計画を組み合わせて構成されるので、「ボールに近づく」以外の行動でも比較実験を行う必要がある。また、本研究では連続行動計画の行動数を5個としたが、立案する行動計画によってはより最適となる行動数が存在するはずなので、行動計画に応じた最適行動数の検証も行う必要がある。

5.3 まとめ

本研究では従来の単発行動計画プログラムに連続行動計画を導入することによって、より意味のある行動計画の実現を目標とし実験的に検証した。

実験を行った結果、「ボールに近づく」という限定された行動目的ではあるが、その行動目的に対して、連続行動計画の方が単発行動計画よりも短い到達ステップでボールに到達することができた。ただボールに近づくだけではなく、より効率的にボールに近づくことができたということはより意味のある行動計画を実現できたと考えることができる。

以上より本手法の有効性を示すことができたと考える。

謝辞

日ごろから多くの御指導を頂きました太田義勝教授、鈴木秀智助教授、に深く感謝いたします。そして、日頃お世話になりました落合美子事務官に感謝いたします。また、本論文作成にあたって特にお世話になりました鈴木秀智助教授に深く感謝いたします。最後に、日頃から熱心に討論して頂いた研究室の諸氏に感謝いたします。

参考文献

参考文献

- [1] 高橋友一、伊藤暢浩著、「Robocup ではじめるエージェントプログラミング」、共立出版
- [2] 大島真樹著、「Java でつくる Robocup サッカー選手プログラム」、森北出版株式会社
- [3] 山口博之、伊藤禎敏、乾伸雄、小谷義行、「マルチエージェントサッカーにおける事例ベースによる行動決定」、情報処理学会第 56 回（平成 10 年前期）全国大会 p2-430
- [4] 道木加絵、早川総一郎、鈴木達也、大熊繁、青木猛、「階層化された行動記憶を用いた実時間探索による自律移動ロボットの行動獲得」、2001 年度電気関係学会東海支部連合大会 573 (p287)
- [5] 頼光正典、松田憲幸、瀧寛和、安部憲広、「ロボット行動学習への事例ベースの適用」、情報処理学会研究報告 Vol.2001,No66,pp.85-90