

# 回転四目並べプレイロボットシステムの開発

小野寺 優\*・苫米地 宣 裕\*\*

## Development of a Robot System Playing Rotational Line-4 Tic-Tac-Toe

Masaru ONODERA\* and Nobuhiro TOMABECHI\*\*

### Abstract

This paper reports the development of a robot system playing rotational line-4 tic-tac-toe. The system is composed of 3 functional blocks as follows; (1) the functional block to recognize the point of the opponent's stone using a single camera, (2) the functional block to search the best point for the next stone based on the search algorithm specifically developed for the game using a personal computer, (3) the functional block to put a stone on any position of the 3-dimensional board using a robot arm with 6 axis. A prototype of the robot system unifying 3 functional blocks is fabricated and is tested to play the game successfully. The study on the robot playing thinking games like this will serve to develop artificial intelligence and to make human life pleasant.

**Keywords:** development, robot, play, rotation, 3-dimensional, line-4, tic-tac-toe

### 1. ま え が き

思考ゲームをプレイするプログラムの研究は、人工知能研究上の多くの課題を含んでおり、近年、情報科学の重要な一分野として認められるようになった [1] -[4]。一方、ロボットについては、これまで、工場での産業用ロボットなど、実用的な用途に限られていたが、近年、AIBO や ASIMO 等のような日常生活に関係するペットロボットやエンターテインメントロボットが現れている [5]。

本研究では、思考ゲームをプレイするロボットの実現を目指している。思考ゲームとしては、回転四目並べを取り上げる。回転四目並べは、3次元の回転する盤を用いるので、通常の2次元ディスプレイ画面では、ゲームの進行を表現す

るのは困難であり、実空間で動作するロボットが有効となる。本ロボットは、次の3つの機能を有する。① 相手着手の認識機能、② 最善手探索機能、③ 着手動作機能。

本研究では、以下のように、ロボットシステムの開発を行った。

- ① カメラは1台だけ使用することとし、取り込んだ盤面画像の明度・彩度の解析により、相手着手位置を認識する方法を開発した。
- ② ゲームの数理を明らかにし、本ゲームに適した独自の最善手探索方法を開発した。
- ③ 着手動作には、リバース社の6軸小型アームを使用した。盤を回転させて、所定の位置に正確に着手させる動作を行う制御プログラムを開発した。
- ④ 個々の機能を有機的に連結したロボットシステムを開発した。

---

平成17年12月16日受理

\* 五所川原工業高校・講師

\*\* システム情報工学科・教授

以上の結果、回転四目並べをプレイするロボットシステムのプロトタイプを完成した。

次の段階では、機構設計、意匠設計を行い、人型の外形を有するロボットの製作を行う予定である。このような思考ゲームをプレイするロボットは、人工知能研究の観点から興味深いものであると同時に、人間生活を豊かにする上で、今後、大きな社会的意義を有すると考えられる。

## 2. 回転四目並べのルールとシステムの概要

### 2.1 回転四目並べのルール

本研究では、立体型の思考ゲームとして回転四目並べを用いる。本ゲームのルールを以下に示す。

〔ルール1〕 高さ4段まで着手可能な12本の柱が円形に並んでいるゲーム盤を用いる。図1にこれを示す。

〔ルール2〕 先手の駒は青に、後手の駒は赤に着色する。図2にこれを示す。

〔ルール3〕 先手と後手が交互に着手する。

〔ルール4〕 下段から順に着手する。すなわち、中空に浮く位置には着手できない。図3にこれを示す。

〔ルール5〕 縦・横・斜めのいずれかの方向

に、一直線上に、自分の駒が4つ並んだ方を勝とする。図4に例を示す。

〔ルール6〕 4連の直線ができずに盤を埋め尽くした場合、引き分けとする。

### 2.2 システムの概要

本システムは、以下の3つの主機能で構成される。

〔機能1〕 相手着手の認識：カメラで盤面の画像を取り込み、相手の着手位置を認識する。

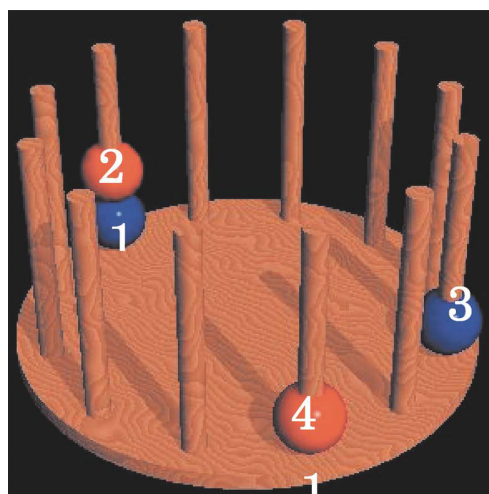


図2 ルール3

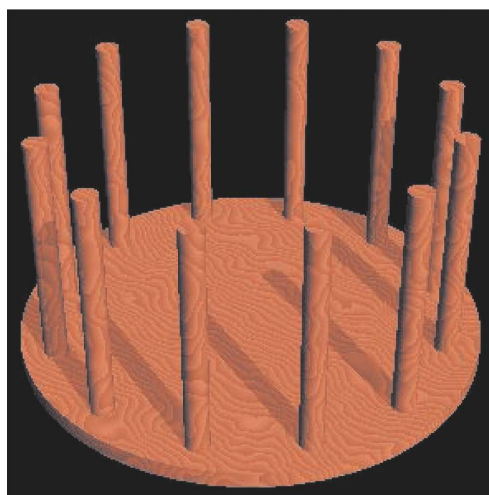


図1 ルール1

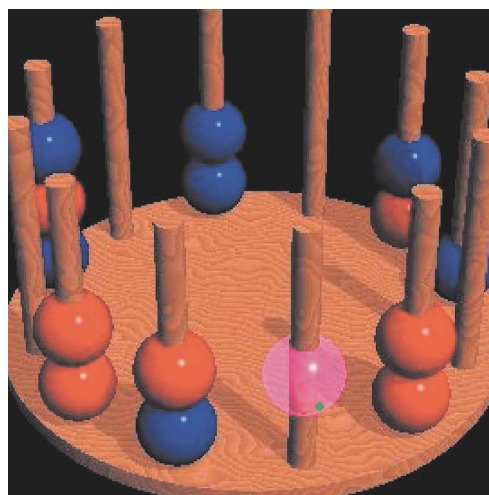


図3 ルール4

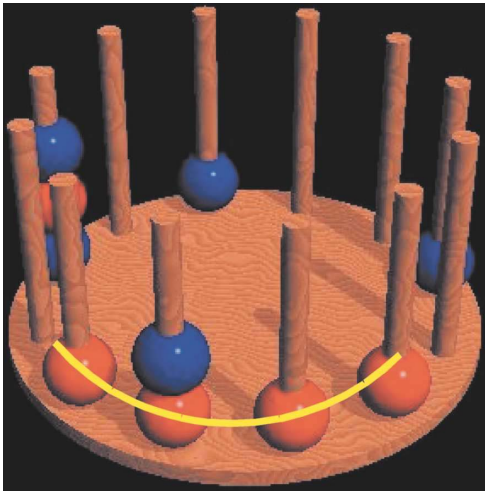


図4 ルール5

〔機能2〕 最善手探索：パソコンを用いて現在の盤面状況から、最善の着手を導き出す。

〔機能3〕 着手動作：ロボットアームを用いて、所定の位置へ駒を置く。

図5に、システムの概要を示している。

ソフトウェア開発には、Microsoft Visual C++を使用した。また、Microsoft DirectX のライブラリを利用する為、Microsoft DirectX SDK を追加した環境で開発を行った。

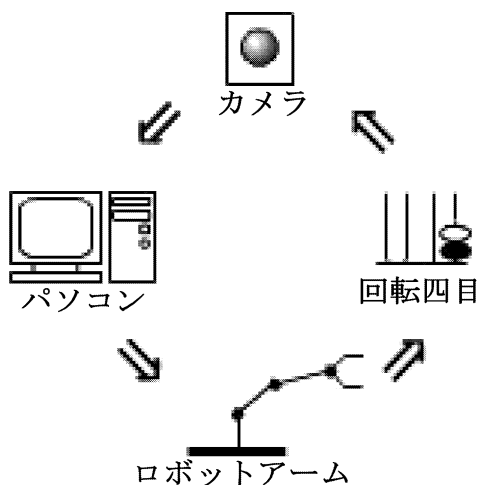


図5 システムの概要

### 3. 相手着手の認識

3次元空間上の物体の認識には、一般には、2台のカメラを必要とするが、本研究では、1台のカメラで相手着手の認識を行う。

#### 3.1 認識手順

相手の着手によって、盤面の画像に変化が現れ易いように、相手の駒、自分の駒、盤を、それぞれ、赤、青、緑に塗り分ける。その上で、盤面の着手前と着手後の画像を比較し、輝度・彩度の差が大きい箇所を抽出し、着手位置とする。

認識手順を以下に示す。

〔手順1〕 相手が着手前の画像をカメラで取得する。

〔手順2〕 相手が着手後、ロボットアームを用いて撮影前と同じ位置に盤を回転させる。

〔手順3〕 手順1と同様の方法で着手後の画像を取得する。

〔手順4〕 着手前と着手後の画像で、輝度・彩度の差が大きい場所を抽出する。

〔手順5〕 抽出した画像からノイズを除去する。

〔手順6〕 抽出画素数の比率が多い角度を着手位置とする。

#### 3.2 プログラム作成

前記の認識手順に基づいてプログラム作成を行った。完成したプログラムは全部で約280行となった。認識プログラムの実行画面を、図6～図11に示す。

〔ケース1〕 下の段とは異なる色を着手した場合

手順1で取得した画像を図6に、手順3で取得した画像を図7に、手順5で比較した画像を図8に示す。比較の対象となるRGB値、Lab値のグラフを表1に示す。

〔ケース2〕 下の段と同じ色を着手した場合

手順1で取得した画像を図9に、手順3で取得した画像を図10に、手順5で比較した画像を

図11に示す。比較の対象となるRGB値，Lab値のグラフを表2，表3に示す。

なお，Lab値とは明るさと色彩を表す値であ

り，RGB値-Lab値の変換式は次のようになる。

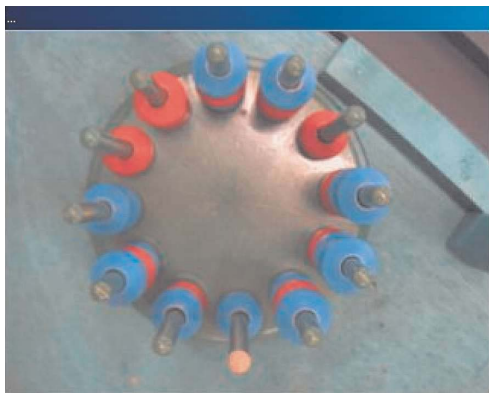


図6 着手前の画像



図9 着手前の画像



図7 異色駒着手後の画像



図10 同色駒着手後の画像

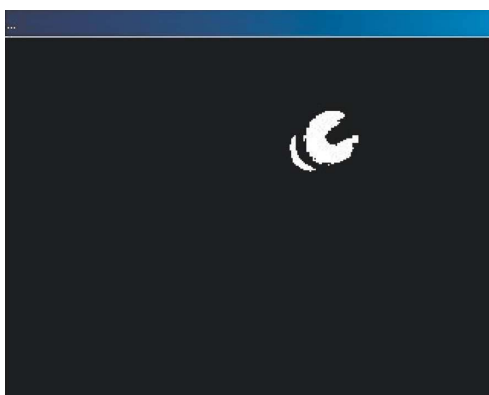


図8 異色駒着手の抽出（ノイズ除去後）

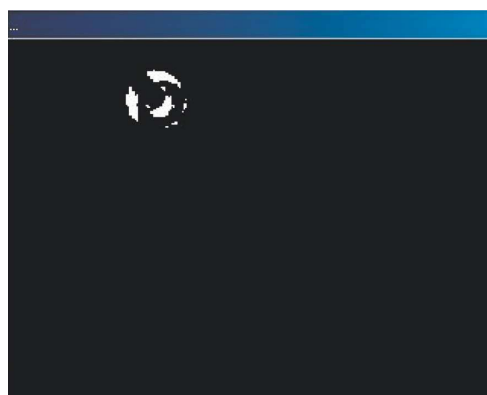


図11 同色駒着手の抽出（ノイズ除去後）

表1 RGB 値の比較

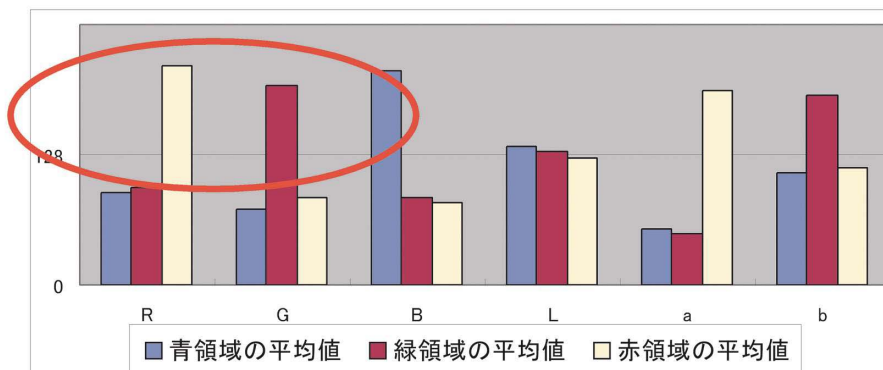


表2 Lab 値の比較 (1)

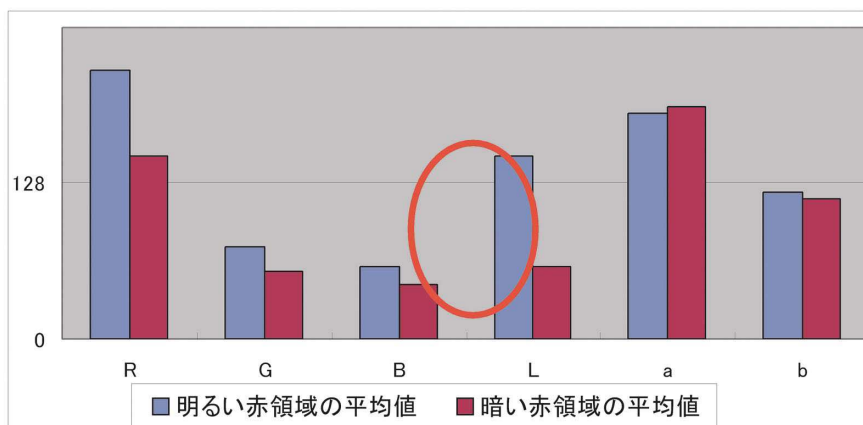
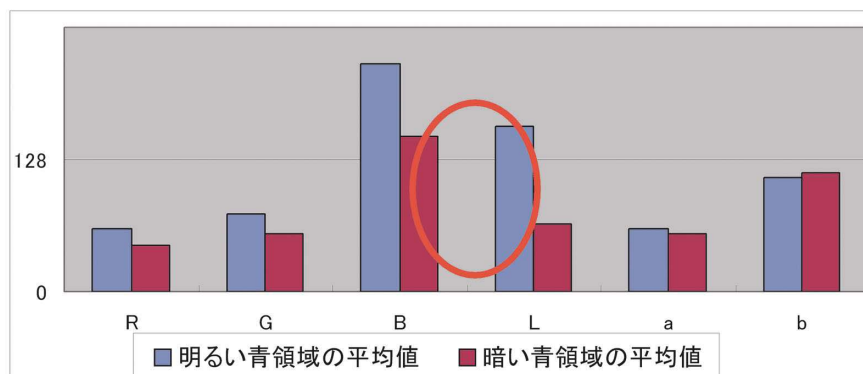


表3 Lab 値の比較 (2)



$$\begin{aligned} L &= 0.3R + 0.59G + 0.11B \\ a &= 0.7R - 0.59G - 0.11B \\ b &= -0.3R - 0.59G + 0.89B \end{aligned}$$

#### 4. 最善手探索

##### 4.1 回転四目並べの数学的性質

はじめに、ゲームの数学的性質について論ずる。まず、用語を以下のように定義する。

〔表現1〕 盤の座標を(横,縦)と表す。

〔表現2〕 ラインの表現を(横,縦)-(横,縦)と表わす。

ゲームは、以下のような性格を有する。

〔性格1〕 連の方向が2次元となる。

〔性格2〕 盤の横方向が円を描いているので、両端が開された3連ができる。

〔性格3〕 先手が先着の有利さを生かして如何に攻撃するか、後手が如何にそれを防ぐか、が焦点となる非対称なゲームである。

〔性格4〕 着手可能な高さや位置が制限される為、より必勝手を多く作るような局面を作ることが難しい。その為、防御と攻撃を効率良く行う必要がある。

##### 4.2 回転四目並べの知識

###### (1) 基本となる知識

〔知識1〕 自分の着手によって生じ得る連の数による着手の評価

自分の着手する位置を $(x, y)$ とすると、自分の着手によって生じ得る4連は、以下の7種類となる。

横方向:

$$(x-3, y) - (x, y), (x-2, y) - (x+1, y), \\ (x-1, y) - (x+2, y), (x, y) - (x+3, y)$$

斜め方向:

$$(x+y, 0) - (x+y-4, 4), \\ (x-y, 0) - (x-y+4, 4)$$

縦方向:  $(x, 0) - (x, 4)$

図12に、これを示す。

この7方向のラインに関して、相手の連を止

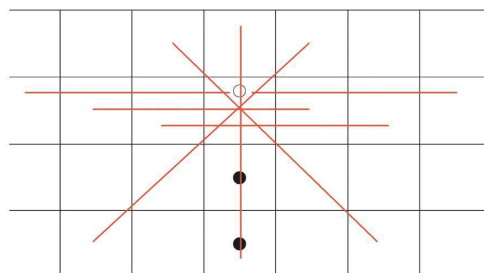


図12 着手可能な位置に架かる4連の直線

めたり自分の連を加えたりすることを考慮して、着手点を決定する。

〈条件1〉 自分の決勝点がある場合着手して勝利する。

〈条件2〉 相手の決勝点を阻止する。

〈条件3〉 自分の2連を拡張して3連にする。

〈条件4〉 相手の2連を阻止する。既に阻止されていれば、条件8となる。

〈条件5〉 自分の1連を拡張する。

〈条件6〉 相手の1連を阻止する。既に阻止されていれば、条件8となる。

〈条件7〉 自分も相手も置いていないので着手する。

〈条件8〉 相手の連が止められており、自分が置いても既に片側が止められていることになるので、できるだけ避ける。

###### (2) 自分の置いた着手の上に相手が着手することに関する知識

〔知識2〕 相手の着手によって生じ得る連の数による着手の評価

自分が着手したその上に相手が着手することで、負けてしまう等、不利であることが分かっているならば、着手を避けなければならない。 $(x, y+1)$ を基準点として〔知識1〕と同様の評価を行い、その得点を $(x, y)$ で求めた得点から減らす。

###### (3) 序盤の知識

〔知識3〕 序盤の知識

相手の駒に隣接するように着手することで、斜めの連による連続的な攻めが可能となり、4



連となる確率が高くなる。しかし、先手の方が先に攻撃出来る為、先手・後手共に同じ攻守を行うと、先手が阻止しつつ攻撃を行う為、先手が勝利する。後手は、相手の色とは隣接せずに着手することで、相手の斜めによる攻めを免れることができる。但し、偶数空けた位置に着手すると、結果的に斜めの連を助長してしまう為、奇数空けた位置に着手するのが望ましい。

#### 〔知識 4〕 序盤の探索

序盤では、連鎖的な 3 連は発生しない為、あまり深く探索する必要はない。

#### (4) 終盤の知識

#### 〔知識 5〕 終盤の知識・探索

ある程度慣れた人間同士が対戦する場合、経験上、平均 30 手前後で勝負がつく。その数手前の盤面を見ると、ある軸において連続した高さに着手すると、連鎖的に 3 連ができるような局面になる。連鎖する回数は様々あり、できるだけ深く探索する必要がある。

### 4.3 探索手順

前項で述べた知識を基に探索する。本研究では、次に述べるような独自の探索方法を提案する。以下、本方法を、「勝敗数探索法」と呼ぶ。

#### 〔勝敗数探索法〕

〔手順 1〕 着手可能な位置の中から、必勝手になっている位置を確認する。必勝手を発見した場合、その位置に着手する。但し、相手の必勝手よりも自分の必勝手を優先する。

〔手順 2〕 着手可能な位置の評価点を求め、

点数の高い順に並べる。

〔手順 3〕 評価点の高い順に一定の深さまで探索を行い、勝敗数を求める。一定の深さまでに勝敗が見つからない場合、引き分けとして加算する。但し、必勝手による探索の場合は更に一段深く探索を行う。

〔手順 4〕 各々の着手可能な位置の勝敗数による判別を行い、〔手順 2〕で求めた順番を変更する。

① 敗数と引分の数 が 0 の場合：3 連の連鎖による必勝手であると判断し、その位置へ優先的に着手を行うように変更する。

② 敗数が 0 の場合：勝てる見込みがあると判断し、①に次いで優先的に着手を行うように変更する。

③ 勝数が 0 の場合：勝てる見込みが無いと判断し、次に評価点が高い位置へ着手位置を譲るように変更する。

〔手順 5〕 優先順が高い所へ着手を行う。

### 4.4 プログラム作成

「勝敗数探索法」に基づいて最善手探索プログラムの作成を行った。完成したプログラムは全部で約 750 行となった。

図 13 に、本プログラムの実行画面を示す。図において、上半分は認識している盤面の状態を、下半分は着手位置の評価点と探索の結果を表している。

```

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 0 1 2
↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓
○ ×                ○ ×
プレイヤー1のターンです。
10 =      146 ... DRAW =      173505 , WIN1P =      400 , WIN2P =      202
9 =        56 ... DRAW =      174639 , WIN1P =        61 , WIN2P =      189
4 =         48 ... DRAW =      174627 , WIN1P =       231 , WIN2P =       75
    
```

図 13 最善手探索プログラム実行画面

#### 4.5 テスト

完成したプログラムについて、通常の  $\alpha\beta$  探索法 [6], [7] と、探索深さを最低限に抑えた場合の 2 つと比較した結果を、表 4 に示す。ただし、 $\alpha\beta$  探索法において必要とされた深さと幅での探索結果を基準とし、最短で同じ着手を導き出すように調整した場合の探索にかかる平均時間を、10 手毎に序盤・中盤・終盤と分けて計測した。

表 4 平均探索時間 (秒)

	序盤	中盤	終盤
探索深さ固定 $\alpha\beta$ 探索法	15	15	12
探索深さ変動 $\alpha\beta$ 探索法	10	15	12
勝敗数探索法	8	14	12

表 4 より、次の結果が得られる。

〔結果 1〕「勝敗数探索法」によれば、 $\alpha\beta$  探索よりも、序盤の処理速度が約 2 倍早くなる。

結果 1 が得られる理由は、「勝敗数探索法」の方が、 $\alpha\beta$  探索よりも、メモリの使用量が少なくて済むためと考えられる。

### 5. 着手動作と総合動作

#### 5.1 着手動作

ロボットアームを用いて、3 次元のゲーム盤に着手を行う。アームは、リバスト社製の 6 軸小型アームを使用した。着手動作は、以下のように行う。

- ① 相手の着手によって不定角になった盤を、回転させる為に一定角へ修正する動作：

アームを回転させる為には、まず  $360^\circ/12=30^\circ$  刻みの角度に調節しなければならない。その為、横から滑り込ませるように入り込み、盤の角度を調整する。

- ② カメラ撮影及び着手を行う為に盤を回転させる動作：

一定の角度になった盤を、決められた角度に回転させる為、先端をつまんで回転させる。この動作は 1 角度の回転を基本として、目的とする角度に達するまで繰り返す。

- ③ 着手動作：駒を掴み取り、盤へ着手する。

ロボットアームが所定の動作を逐次行うことができるよう、通信仕様を一つずつ実行・確認しながら、制御プログラムの作成を行った。完成したプログラムは全部で約 500 行となった。注意点として、ロボットアームを動かす時、単純な流れ作業的ではなく、人間が着手する場合の動き方を参考にすることで、スムーズな着手動作を実現した。

#### 5.2 総合動作

図 14 に、試作したロボットシステムを示す。相手着手の認識、最善手探索、着手という一連の動作を実行することを確認した。

### 6. ま と め

本研究では、回転四目並べをプレイするロボットシステムの設計・製作を行い、以下のような機能を有するプロトタイプシステムを完成した。

- ① 1 台のカメラで盤面を撮影し、相手着手位置を認識する機能。
- ② 「勝敗数探索法」によって最善手探索を行

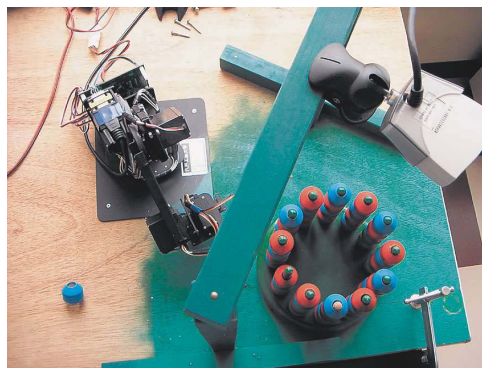


図 14 試作したロボットシステム



う機能。

③ 6軸小型アームを用いて所定の位置に着手する機能。

次の段階では、本ゲームの数学的性質を一層明らかにし、これを最善手探索に生かすことにより、より強いロボットを目指す予定である。本ゲームは探索空間が広く、悉皆探索はできないので、ある深さまで先読み探索した段階で着手を決めることとなる。評価に当たっては、生じ得る4連の個数に基いた評価だけでなく、連鎖的な決勝手を作る観点からの評価等の拡張が必要となる。この拡張評価をどのように数値化・数式化するかが大きな課題となる。また本研究では、実空間のゲーム盤を初期化する機能や着手駒の自動供給機能等、完全に自動化されたロボットシステムを完成するには至らなかった。次の段階ではその点を含め、一体化したエンターテイメントロボットを製作する予定である。

参考文献

- [1] 飯田弘之, “ゲームプログラミングの発展と AI”, 情報処理, Vol. 37, No. 6, pp. 536-542, 1996-6.
- [2] 苔米地宣裕, “立体四目並べの数理”, 八戸工業大学情報システム工学研究所紀要, Vol. 11, pp. 1-4, 1999-3.
- [3] ブルース・パンドルフィーニ著, 鈴木知道 訳, ディープブルーVS. カスパロフ, 河出書房新社.
- [4] 松原 仁, 竹内郁雄, ゲームプログラミング, 共立出版.
- [5] 神田崇行, “社会的ロボットの開発と評価”, 京都大学大学院情報学研究科.
- [6] 小野寺優, 苔米地宣裕, “立体型四目並べプレイロボットシステムの設計”, 計測自動制御学会東北支部第216回研究集会資料集, NO. 216-1, 2004-6.
- [7] 小野寺優, 苔米地宣裕, “立体型四目並べプレイロボットシステムの設計”, 平成16年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, pp. 310, 2004-8.
- [8] 小野寺優, “立体型四目並べプレイロボットシステムの構成に関する研究”, 八戸工業大学大学院修士論文, 2005-3.