

# 立体四目並べプレイ知能ロボットシステムの構成法

苦米地 宣 裕\*・小野寺 優\*\*

## Design of an Intelligent Robot System Playing Cubic Line-4 Tic-Tac-Toe

Nobuhiro TOMABECHI\* and Masaru ONODERA\*\*

### Abstract

This paper presents design of an intelligent robot system playing cubic 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 depth first algorithm using a personal computer, (3) the functional block to put a stone on any position of the cubic 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 intelligent robot playing thinking games like this will serve to develop artificial intelligence and to make human life pleasant.

**Keywords:** intelligent robot, play, cubic, 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、さかんに研究されるようになってきた[1]–[3]。また、ロボットの研究は、従来は、業務用が主流であったが、近年、愛玩用やエンターテイメント用のロボットも開発されるようになってきた[4]。

本研究は、思考ゲームをプレイする知能ロボットの実現を目的としている。思考ゲームとしては、立体四目並べ[5]を採用する。立体四目並べは、3次元立体の盤を用いるので、通常の2次元ディスプレイ画面では盤面を表現するのが困難であり、実空間で行動するロボットが有効となる。

本ロボットシステムは、1台のカメラ、パソコ

ン、ロボットハンドより構成される。本研究では、まず、1台のカメラで取り込んだ盤面の画像から相手の着手位置を認識するシステムを開発した。次に、ゲームの数理を明らかにし、本ゲームの最善着手を探索するプログラムを開発した。次に、ロボットハンドを用いて、立体盤の所定の位置に石を置くシステムを開発した。最後に、以上の個別機能を有機的に結合して、立体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。本ロボットは、プレイモードとして、モード1: 人間との対戦、モード2: ロボット対ロボットの対戦、を選択できる。

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にする予定である。また、将来、様々な思考ゲームをプレイできる汎用性を備えた思考ゲームプレイロボットに発展させる予定である。このような思考ゲームプレイロボットの研究は、人工知能の解明に寄与するとともに、今後到来する少子高齢化社会において、人間生活を豊かにする上で、大きな意

---

平成17年12月16日

\* システム情報工学科・教授

\*\* 五所川原工業高校・講師

義を有すると考えられる。

## 2. 立体四目並べのルールと ロボットシステムの概要

### 2.1 立体四目並べのルール

[ルール 1]  $4 \times 4 \times 4$  の格子点を有する 3 次元立体の盤を用いる。

[ルール 2] 先手と後手が、交互に石を置いていく。

[ルール 3] 石は、盤の下から上の方に積み上げるように置く。

[ルール 4] 先に、縦、横、斜め、いずれかの方向の 4 連ができた方を勝ちとする。

図 1 に、立体四目並べの盤と石の模擬図を示している。

### 2.2 ロボットシステムの全体構成

ロボットシステムは、次の 3 つの機能部分より成る。① カメラで盤面を撮影し、その画像を解析して相手の着手位置を認識する機能部分。

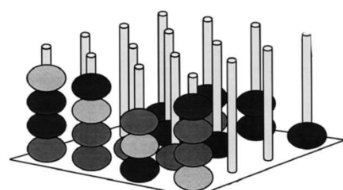


図 1 立体四目並べで用いる盤と石

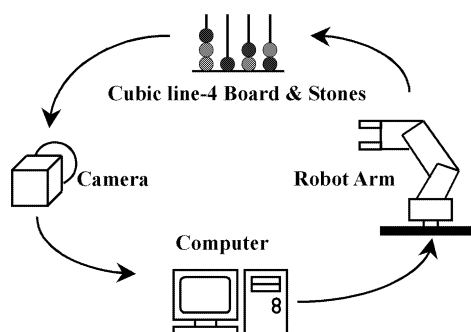


図 2 ロボットシステムの全体構成

② パソコンを用いて最善着手を探索する機能部分。③ 6 軸ロボットアームを用いて立体盤に実際に石を置く機能部分。

図 2 に、本ロボットシステムの構成の概要を示している。

## 3. 立体四目並べの数学的性質

まず、立体四目並べをプレイする上で有用となるゲームの知識を明らかにする必要がある。立体四目並べの数学的性質に以下にまとめる [5]。

### 3.1 用語の定義

とくに定義しないものは、通常の五目並べの用語と同様とする。

[表現 1] 座標，着点：盤の座標を  $(xyz)$  と表す。座標  $(xyz)$  への先手の着点を  $axyz$ ，後手の着点を  $bxyz$  と表す。

[定義 1] 角，辺：通常の立方体における角，辺を、盤の角，辺という。

[定義 2] 面，外面：縦、横、斜の同一平面上にある 16 個の点の集合を面という。面の中で盤の外形を形成する面を外面という。面は、指定された座標軸とその座標軸の値で表す。例えば、 $x=1$  で指定される面を  $x1$  面と表わす。 $z1$  面を底面、 $z4$  面を上面、底面と上面以外の外面を側面という。

[定義 3] 核：外面に含まれない点の集合，すなわち、 $(222)$ ， $(223)$ ， $(232)$ ， $(233)$ ， $(322)$ ， $(323)$ ， $(332)$ ， $(333)$  の 8 個の点を核という。

[定義 4] 決勝点：そこに着手すると 4 連が完成する点をいう。

[定義 5]  $n$  段決勝点： $z=n$  である決勝点をいう。 $n=2$  のときは 2 段決勝点、 $n=3$  のときは、3 段決勝点、 $n=4$  のときは、4 段決勝点という。2 段決勝点と 4 段決勝点をまとめて偶数段決勝点という。

[定義 6] ライン：4 連となりうる 4 個の点をいう。二つの端の点を  $(x1y1z1)$ ， $(x2y2z2)$

とすると、ラインは、 $x_1y_1z_1-x_2y_2z_2$  と表す。

### 3.2 ゲームの性格

はじめに、ゲームの基本的性格について論ずる。以下、明らかになった知識の中で証明可能な厳密なものは、[法則]とよび、それ以外の知識は、単に[知識]とよぶ。

[性格 1] 連の方向が 3 次元となる。

[性格 2] 盤の寸法が 4 に限定されているので、両端が開放された 3 連ができない。すなわち、単独の 3 連は必ず止めることができる。従って、5 目並べのような 3-3 は、見逃さない限り必ず止めることができる。

[性格 3] 下の段から順次上の段に着手するため、将来その段に石を置くと 4 連が完成するという決勝点という概念が生ずる。

[性格 4] 先手に先着の有利さがあるが、後手が正しく対応すれば、ゲームの途中で勝敗が決することはなく、最終局面に到達する。最終局面では、次に示す法則 1 に述べるように、先手の 3 段決勝点があれば先手の勝ちとなる。先手の 3 段決勝点がなければ、後手の勝ちとなる（引き分けはあるが、後手の負けはない）。従って、ゲームは先手が先着の有利さを生かしていかにか 3 段決勝点をつくるか、後手がいかにかそれを防ぐかが焦点となる。このように、見かけによらず著しく非対称なゲームである。

次に、法則 1 を示す。まず、次の用語を定義する。

[定義 7] 局面  $Z$ ：決勝点を含む列を除いたすべての列に石が置かれ、かつ、決勝点を含むすべての列に石が置かれていない局面を局面  $Z$  という。

[法則 1] 先手の 3 段決勝点があると先手の勝ちとなる。また、先手の 3 段決勝点がなければ後手の勝ちとなる。ただし、後述するいくつかの条件が成り立つ場合は除く。

(証明) 先手の 3 段決勝点が 1 個だけ存在すると仮定する。局面  $Z$  を考える。すべての列が 4 段（偶数）なので、局面  $Z$  の次の手番は先手

番である。以下、3 段決勝点の列を、先手が第 1 段、後手が第 2 段、先手が第 3 段と打っていくことになる。従って、最終的に先手が 3 段決勝点を打つことになる。先手の 3 段決勝点がない場合、後手に偶数段決勝点があれば後手の勝ち、なければ引き分けとなる。なお、偶数段決勝点は、先手後手によらず容易につくることができる。

### 3.3 序盤の知識

(1) 生じ得る連の数による着手の評価

座標の位置によって生じ得る連の数に相違がある。

[知識 1] 座標の価値：座標の価値を、その座標を含む生じ得る 4 連の個数で表すことができる。生じ得る 4 連の数が  $n$  個の場合、その座標の価値は  $n$  点であるという。各座標の価値は次のようになる。

角：7 点

核：7 点

その他の点：4 点

□

価値の高い座標から着手していくのが、序盤における着手の指針となる。従って、最初に底面の 4 つの角から着手することとなる。

[知識 2] 着点の価値：着点の価値は、座標が同じでも先に置かれた石の状況によって異なる。着点の価値は、その着点を含む生じ得る 4 連の個数で表すことができる。相手の置いた石があって連としての発展性が失われている場合でも、その着点を加えることによって、相手の連の発展性を妨げる場合は、生じ得る連の個数に加える。ただし、自分の置き石があって相手の連の発展性をすでに妨げている場合は数えない。なお、自分の置き石があって、連の方向が一致する場合でも、生じ得る連の個数に加える。

□

(2) 3 段決勝点の観点から見た着手の評価

生じ得る連の数による価値だけでなく、3 段決勝点の観点から見た価値も考慮する必要がある。

〔知識3〕 核の2段目への着手：核の2段目は急いで着手しない方がよい。核の2段目が価値が高いといっても、相手がすぐにその上の3段目に着手すると得点が相殺される。さらに、3段決勝点をつくる観点からは、2段目の点よりも3段目の点の方が有利である。

〔知識4〕 核の3段目への着手：核の3段目は3段決勝点をつくるのに直接寄与する。従って、相手が核の2段目に着手したら、原則として直ちにその上に着手すべきである。

〔知識5〕 角の上の2段目への着手：角の上の2段目は価値が高い(とくに、2連が生ずるときは価値が高い)ので、できるだけ早く着手するとよい。その理由は、相手がその上の3段目に置くと、次にさらにその上の角を占めることができるので、相手は容易に3段目に置くことができないからである。

〔知識6〕 角の上の3段目への着手：3連となるときは、いつでも先手で着手できるので急いで着手しない方がよい。3連とならないときで、その上の角に相手が着手すると3段決勝点を含むラインが生ずる場合も急いで着手しない。逆に、そのような相手のラインが生じないときは、3段決勝点に寄与することが多いので早く着手した方がよい。

〔知識7〕 角以外の側面の3段目への着手：相手がその上の4段目に着手するとラインが形成されるときは着手しない方がよい。そうでないときは着手しても問題はないし、3段決勝点に寄与するときは、早く着手した方がよい。

〔知識8〕 側面の4段目への着手：3段決勝点を含むラインが形成されるときは、できるだけ早く着手する。そうでないときは最も価値が低いので最後に着手する。

〔知識9〕 側面以外の4段目への着手：側面以外の面の4段目は価値が最も低い。従って、最後に着手することとなる。

### 3.4 中盤の知識

〔知識10〕 決勝パターン：次のパターンが

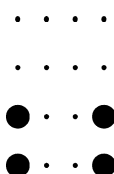


図3 決勝パターン1

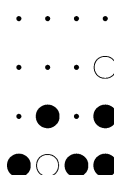


図4 決勝パターン2

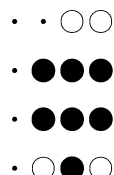


図5 決勝点が2段連続する例1

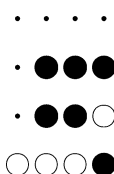


図6 決勝点が2段連続する例2

でき、かつ、次が●の手番ならば、3追い勝ちとなる。例を図3、図4に示す。

このバリエーションの決勝パターンは多数存在する。

〔知識11〕 連続決勝点：決勝点が二つの段に連続すると、手番によらず必勝となる。例を図5、図6に示す。

図5、図6は、3連が同一面に生じた例を示しており容易に認識できるが、3連が異なる面に含まれる場合は認識がしにくくなる。

〔知識12〕 その他の勝ち方：決勝点を予めつくって置き、その直ぐ下に石(自分の石でも

相手の石でもよい)がくるように3追をつくる。

### 3.5 終盤の知識

はじめに示した法則1の補足条件,および,それ以外の終局近くにおいて勝敗に関する諸法則を示す。

〔法則2〕 先手の偶数段決勝点は勝ちに寄与しない。

(証明) 先手の3段決勝点が存在せず,偶数段決勝点がいくつか存在すると仮定する。局面 $Z$ を考える。以下,先手は奇数の段を後手は偶数の段を打っていくことになる。従って,先手は自分の偶数段決勝点を打つことができない。

□

〔法則3〕 後手の3段決勝点は後手の勝ちには寄与しない。

〔法則4〕 先手の3段決勝点がある場合でも,後手に先手と同じ数の3段決勝点がある場合は引き分け,または,後手の勝ちとなる。引き分けは,後手に偶数決勝点がない場合であり,後手の勝ち,後手に偶数決勝点がある場合である。

〔法則5〕 先手の3段決勝点の個数が後手の3段決勝点の個数よりも多い場合は先手の勝ち,後手の個数の方が多い場合は後手の勝ちとなる。

〔法則6〕 3段決勝点の直ぐ下に相手の2段決勝点がある場合は,3段決勝点は無効となる。

〔法則7〕 3段決勝点が,先手と後手の共通の決勝点になった場合は,先手の決勝点と数える。ただし,そのような数が偶数個生じたときは,全部を後手の3段決勝点1個と数える。3以上の奇数個生じたときは,全部を先手の3段決勝点1個と数える。

## 4. ロボットシステムの設計

### 4.1 最善手探索機能

前章で明らかにした立体四目並べの数学的性質に基づいて,最善着手探索プログラムを次の



図7 実行画面の例

ように作成した。

- ① アルゴリズムは深さ優先探索 [5] を用いる。
- ② 指定された深さに達したら局面評価を行う。局面評価は,前章の知識を点数化して行う。
- ③ 4 追い勝ち探索ルーチンを独立させ,4 追い勝ちがある場合は,優先着手する。

本ゲームのシミュレーションプログラムをC++言語を用いて作成した。プログラムは,約500ステップとなった。ゲームの進行は,通常の2次元平面パネルを用いて表示した。

図7に,実行画面の例を示す。図において,各段の石の配置は,別々の4×4平面に表示している。3次元立体盤を2次元平面に表示することが困難なことが分かる。

### 4.2 相手着手の認識機能

3次元立体盤上の石の位置を認識するためには,一般には2台以上のカメラを必要とする。1台でもよいが,カメラ位置を移動できるような機構が必要となる。本研究では,システムを簡単化するため,1台のカメラを固定された位置に置いて用いることとした。カメラの角度を適切に選択すると,新規に着手された石が先着した石の影に入って識別不能ということはない。

本システムは,次のように構成される。

- ① カメラは、I/O データ製、モデルUSB-CAM30MS を用いる。
- ② カメラは斜め上方から盤を見る位置に置く。
- ③ 石は、識別が容易となるよう、先手側は赤色、後手側は青色に着色する。
- ④ 盤の基準点を黄色のマークで表示する。
- ⑤ 照明は、室内天井からの蛍光灯の光とする。

着手位置認識は、次の手順で行う。

事前に、盤のそれぞれの座標上に石を置いてカメラで撮影し、座標とカメラ画像上の石の位置と石の画像の対応表を作成する。これを表1とする。

〔手順1〕 相手の着手可能位置をリストアップし、表1から対応する画像リストを作成する。これを、表2とする。

〔手順2〕 相手が着手前の画像を撮影する。これを画像1とする。

〔手順3〕 相手が着手後の画像を撮影する。これを画像2とする。

〔手順4〕 画像1と画像2の差分を求める。これを画像3とする。

〔手順5〕 画像3と表2を比較し、相手の着手位置を特定する。

以上の手順の実行に当たっては、次のようなことが問題となる。

- ① 相手の着手が、先着した石の影に入るとき、画像2が小さくなる。
- ② 石を置いた反動で、下の石の位置が多少ずれる。

#### 4.3 着手動作機能

本研究では、リバスト社製の6軸小型ロボットアームを用いた。本ロボットアームの外形を、図8に示している。本ロボットアームは、2本の指で石をつまむ動作を行うことができ、かつ、石を立体盤の任意の位置に運搬できるような可動

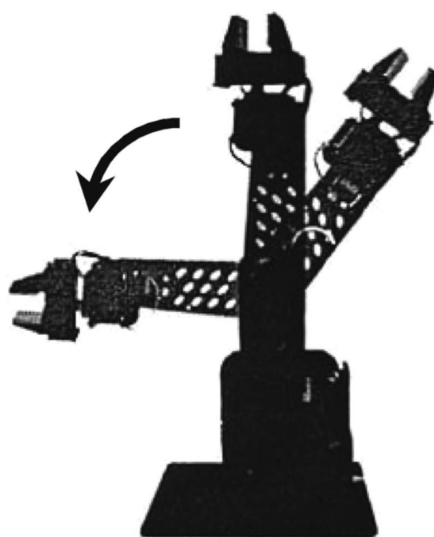


図8 ロボットアーム

範囲を有している。

本ゲームでは、石は、盤の最上位から、下に落とすように着手する。従って、着手の位置は、16箇所だけとなる。

ロボットアームの制御プログラムは、次の2つから成る。

- ① 所定の位置に置かれた石をつまみ、基準位置に戻る。
- ② つまんだ石を指定された着手位置に運ぶ。

本研究では、オープン制御方式を採用し、それぞれの動作を正確に実行するよう制御プログラムを作成した。プログラムはC++言語を用いて記述し、完成したプログラムは約600ステップとなった。

#### 4.4 ロボットシステムの製作

各機能ブロックを有機的に結合し、立体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製作した。完成したロボットシステムの概観を、図9に示している。本ロボットシステムが立体四目並べを正常にプレイすることを確認した。

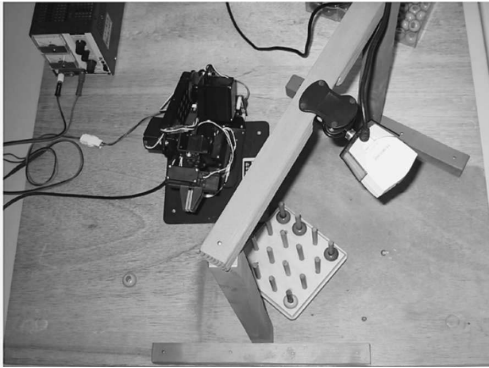


図9 製作したロボットシステム

## 5. ま と め

本論文では，立体四目並べをプレイするロボットシステムの製作を行い，以下のような機能を有するプロトタイプを完成した。

- ① 相手の着手位置を認識する機能
- ② 最善着手を探索する機能
- ③ 指定された位置に石を置く機能

## ④ 以上の機能を有機的に連動するシステム

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にする予定である。また，将来，様々な思考ゲームをプレイできる汎用思考ゲームプレイロボットに発展させる予定である。

## 参 考 文 献

- [1] M. Newborn, Kasparov versus Deep Blue, Springer, New York, 1997.
- [2] 飯田広之, 松原 仁, “ゲーム情報学の動向”, 情報処理, Vol. 44, No. 9, pp. 895-899, 2003-9.
- [3] D. Levy, M. Newborn, How Computer Play Chess, W.H. Freeman and Company, New York, 1990.
- [4] 金出武雄, 天野真家, “知能ロボットー人工知能研究からの歴史的視点ー”, 情報処理, Vol. 44, No. 11, pp. 1115-1117, 2003-11.
- [5] 苫米地宣裕, “立体4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, No. 11, pp. 1-4, March 1999.