免疫ネットワークを用いた自律ロボットの行動制御

當間 愛晃*，前堂 卓也**，遠藤 聡志***，山田 孝治***

A Behavior Control of Autonomous Robots Using The Immune Network

Naruaki TOMA*, Takuya MAEDO**, Satoshi ENDO*** and Koji YAMADA***

Abstract

The immune system is one of the adaptive biological systems whose functions are to identify and to eliminate foreign materials. The immune system is mainly composed of MHC to identify non-self and Immune Network. The Immune Network is a mechanism, the immune response is carried out by self-regulation, and is composed of immune cells and their interaction. In this paper, we propose a system that controls the behaviors of an autonomous mobile robot by teacher robots composed of the Immune Algorithm based on Self-Preservation. The teacher robots have sensor using MHC and learning method for adaptive behaviors using Immune Network whose principle of operations are based on the interaction. To investigate the validity of our system, we simulate on Khepera Simulator and examine its result.

Key Words: Immune Network, Self-Preservation, Behavior Control.

1. はじめに

ニューラルネットワーク，遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithms :GA）等の適応アルゴリズムは，従来の工学的最適化手法にはない，生物の優れた情報処理機能に基づいており，その有効性は様々な研究により示されている[3], [4]．近年，工学的分野において，脳神経系，遺伝系に次いで，新たに免疫系による工学的アプローチが取り上げられている．免疫系は，さまざまなウイルスや細菌にさらされている苛酷な環境の中でいかに自己を存続させていくかという重要な機能（自己保存機能）を担っている[8]．

免疫系の特徴は，多様性のある抗体の産生，免疫ネットワークによる自己調節機構，抗体の特異性や免疫学的記憶に基づいた一次免疫応答及び二次免疫応答等の様々な高次情報処理機構により構成されている点にある．特に，MHC と免疫ネットワークは免疫系独自の機構である．

- 主要組織適合遺伝子複合体（MHC）
  自己と非自己を判断するための一要素であり，抗原の認識に使用される．
- 免疫ネットワーク
  異種の細胞間による相互作用を基本動作とし，1）未知の抗原に対する防御機構，2）また自らを攻撃しないための調節機構として振舞うための重要な機能である．

ロボット工学の見地から，免疫系の自己保存機能や自己調節機構を自律移動ロボットの行動制御として用いることにより，1）未知な環境変化に対応可能な環境適応能力，2）相互作用を基本動作とした高度情報処理能力を得られると考えられる．これにより，自律的な行動が要求される自律移動ロボットの自己存続機能や環境対処の能力に大きな影響を与えることが期待される．本稿では，自律ロボットの行動制御において，免疫ネットワークと MHC を応用した免疫アルゴリズム（Immune Algorithms : IA）を適用し，その有効性を検討する．

2. 免疫系

2.1 概要

免疫系とは，生体内に侵入する未知の抗原に対応するため，細胞遺伝子の再構築を行って抗原に対応する抗体を産生し，抗原を排除する生体監視防衛機構である（図 1）．

免疫システムは，以下に示す複数の高次情報処理機構から構成され，抗原に対応し続けることで生体の恒常性を保つ[1], [6], [7], [9]．

- 抗原の認識機構 :生体内に侵入した抗原をリンパ系が認識
- 細胞遺伝子の再構成機構 :その抗原に対応する抗体産

受理 :1999 年 6 月 7 日

*大学院理工学研究科情報工学専攻
(Masters Course in Information Engineering, Graduate School of Science and Engineering)
**工学部情報工学科卒業
(Graduated, Dept. of Information Engineering, Fac. of Eng.)
***工学部情報工学科
(Dept. of Information Engineering, Fac. of Eng.)

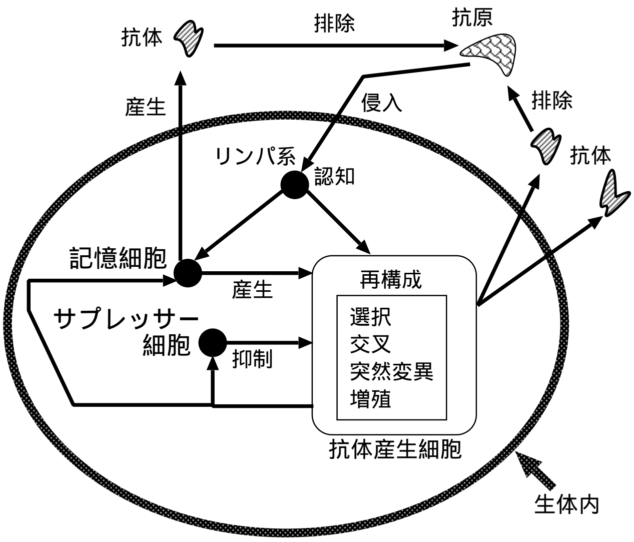


Fig. 1. 免疫系の概念図

生細胞の増殖，再構成

- 抗原の排除機構 :抗原の排除による生体防御
- 抗体の記憶機構 :過去に排除した抗原に，素早く対応するためにその抗体を記憶
- 抗体の調整機構 :自己に対しても免疫性を示し，大量に発生した抗体の産生を抑えることで調節

実際の免疫システムにおける免疫応答には，最初に免疫した場合に見られる一次免疫応答と，二度目の免疫によって見られる二次免疫応答がある．二次免疫応答では，一次免疫応答と比べ比較的早い段階で抗原に対応可能な抗体が大量に血清中に現れる．このような免疫システムの記憶を免疫学的記憶という．この記憶を利用することで，抗原の特異性や抗体の多様性を保つことが可能となる．

二種類の免疫応答を探索アルゴリズムとして応用するため，その処理機構の特徴について考察する．第一に，二次免疫応答時の記憶を用いた抗体産生メカニズムを適切な抗体の探索として捉えると，記憶を活用することにより適切な探索空間への絞り込みが実現していると考えられる．第二に，適切な探索空間の抽出に必要な要素である記憶の獲得は，二次免疫応答の探索結果に依存していない，すなわち独立した異なる探索手法が内在している点が挙げられる．これは，免疫システム全体の探索には両者の相互作用に大きく左右されるが，部分的に独立したサブシステムを用意することで探索動作の自己調節を可能としていることに継る．この二種類の免疫応答を探索アルゴリズムに応用するため，探索の目的を以下に示す 2 段階に分ける．

一次免疫応答 ：探索中の解集団に共通する特徴の探索
二次免疫応答 ：一次記憶により得られた特徴を活用した探索

すなわち，ある抗原に対応可能な抗体の持つ特徴を記憶と捉え，その記憶を活用することで二次免疫応答と同様な反応がみられると考える．

以上の議論をまとめる．免疫系は，

1. 自己と非自己を見分けることから生まれた MHC に基づく抗原の認識機構，
2. 抗体による抗原の排除機構，
3. 免疫ネットワークに基づく自己調節機構，
4. 免疫学的記憶を用いた二次免疫応答，

を特徴に持つ．工学的立場で考えると，免役系を自律移動ロボットの行動制御に適用することで，

1. 動的に変化のある環境を認知，
2. その環境に適応するための手段生成，
3. 自己保存機能，
4. 過去に遭遇した環境への素早い適応，

といった特徴を持つモデルが構築できると思われる．

2.2 MHC

免疫システムでは，自己を MHC という情報で定義している．ある非自己を取り込んだとき，取り込んだ免疫細胞上の MHC が自己と異なる場合に非自己の認識が可能になる（図 2）．

免疫系を前提として動作するロボットを考慮すると，ロボットのセンサ情報に対して発現する行動は，免疫反応としてとらえられる．よって，センサによって検出される外部情報を，MHC の概念を用いて非自己と認識することにより，抗体としての行動を引き起こすことができると思われる．

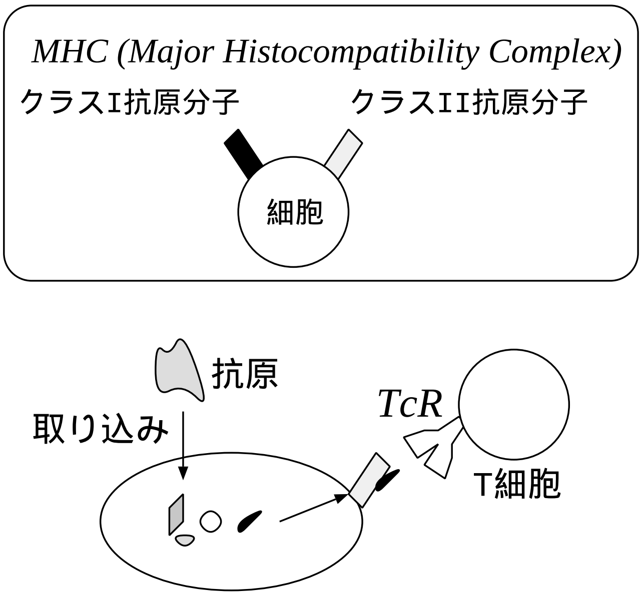


Fig. 2. MHC と非自己の認識

2.3　免疫ネットワーク

免疫系の主な構成要素はリンパ球（lymphocyte）と呼ばれる細胞群であり，B 細胞と T 細胞の 2 種類に分類できる．B 細胞は，抗体の産生，T 細胞への抗原提示を行う．この抗体は，抗原と呼ばれる外界からの侵入物と特異的に反応し，排除するという役割を担っている．T 細胞は，抗原提示細胞上の MHC とそれに結び付いた抗原の一部（MHC+peptide）の認識，また B 細胞の抗体産生の手助けや感染した細胞の破壊を担当する．抗原提示細胞とは，マクロファージなどの食細胞を意味し，自己の MHC 上に抗原の一部を結合することで抗原の侵入を知らせる．

抗原提示細胞によって提示された抗原（MHC+peptide）を，T 細胞は抗原特異的レセプターにより識別して結合する．これにより免疫応答が開始される．このとき細胞接着分子により 2 つの細胞の結合が強くなり，T 細胞の活性化が助けられる．活性化された T 細胞の中で，ある特定の抗原レセプターを持つものは，B 細胞を活性化して抗体生産細胞に分化させる働きをする．B 細胞はこれらの刺激を受けて分裂し，抗体産生細胞へと分化することにより，抗体の分泌に至るのである．このように，抗原排除のメカニズムには一連の協調動作があり，この処理体系を免疫ネットワーク（図 3）と呼ぶ．

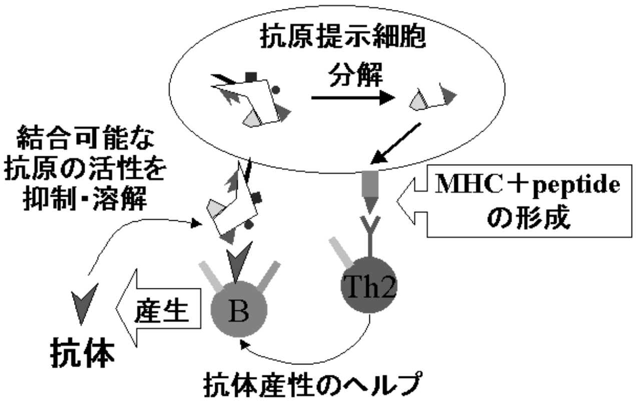


Fig. 3.　免疫ネットワーク

3.　IA の設計と適用

3.1　自律移動ロボットと免疫系

生体の防御機構である免疫システムを，自律移動ロボットの行動制御の観点から見ると，一つの見方として，生体の防御を障害物の回避に置き換えることができる．本研究では，複数のロボットで一台の自律移動ロボットの行動を制御するシステムを提案する．まず，行動制御の対象となるロボットの周りに，複数のロボットを壁状に配置する．そして，壁の構成要素であるロボット（以後，壁ロボット）は，制御対象となるロボット（以後，メインロボット）の行動を監視する．ここで，メインロボットは，壁ロボットの命令によって行動する．つまり，壁ロボットは教師となり，メインロボットに命令を送ることにより，メインロボットの行動を制御するのである（図 4）．

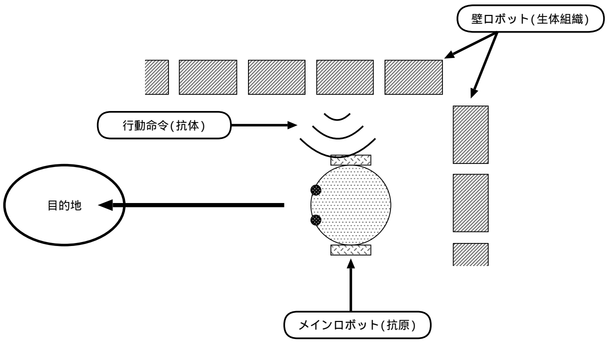


Fig. 4.　提案システムの概念図

提案システムでは，メインロボットを生体に侵入する抗原，壁ロボットがメインロボットに対して出す命令が抗体となる生体モデルと考える．その生体モデルにおいて，壁ロボット（生体組織）はメインロボット（抗原）をうまく目的地へ導く（排除する）ことのできる命令（抗体）の獲得を目的として免疫系を適用する．提案システムにおける自律移動ロボットと免疫系の関係は次のようになる．

- 抗原に対応する抗体の産生
  → 要素行動の発現
- 記憶細胞による有効解の記憶
  → 記憶に基づく学習
- 免疫細胞間の情報の伝達（免疫ネットワーク）
  → ロボット内部の行動調節機構
- MHC による非自己の認識
  → 外部環境（センサ情報）の認識

3.2　抗体の記述

抗体は，前提条件 C と要素行動 A を持つものとする（図 5）．前提条件は，メインロボットまでの距離とメインロボットの向きをそれぞれ 4 段階で表す．要素行動は，メインロボットの動き，すなわちメインロボットのモータの値である．メインロボットは，左右 2 つのモータを持つものとし，-10 ~ 10 の値で表す．

図 5 の抗体の例で，抗体 1 は，メインロボットまでの距離が Nr で，メインロボットの向きが UR の時のメインロボットの行動，抗体 2 では，メインロボットまでの距離が Fr，向きが LL の時のメインロボットの行動をそれぞれ表している．

3.3　MHC の設計

自己を定義する情報で，非自己の認識において重要な役割を担う MHC は、感染度レベルとして設定する．抗原（メインロボット）までの距離に応じて，生体組織（壁ロボット）の抗原提示細胞は自己の MHC を変化させ，抗原

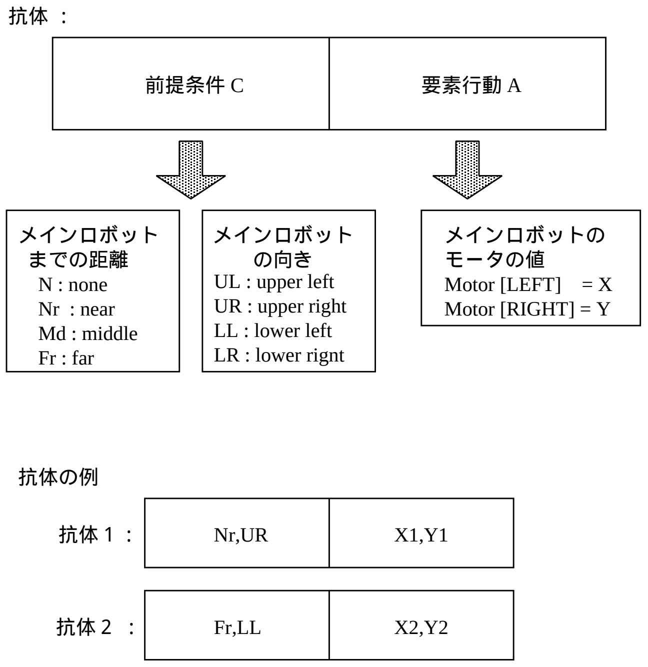


Fig. 5. 抗体の記述

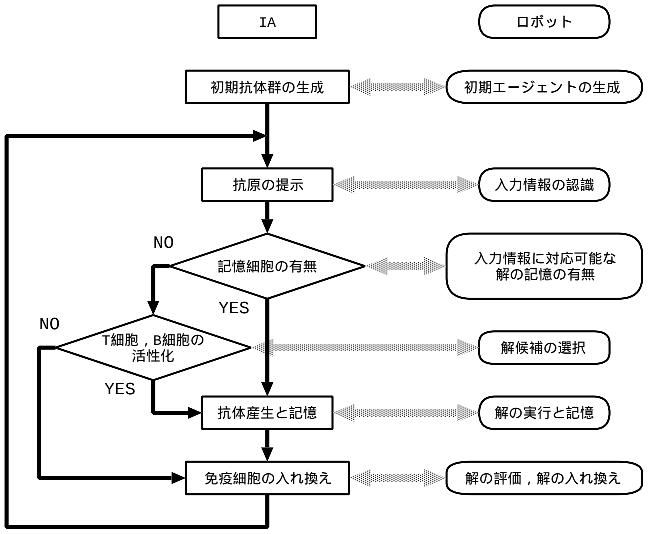


Fig. 6. 免疫アルゴリズムとロボットの対応関係

の侵入を認識，提示する．これにより，対応する抗体としての行動の発現が可能になる．

3.4 IA と自律移動ロボット

図 6 に自律移動ロボットに適用するアルゴリズムを示す．このアルゴリズムに従い，センサ情報（抗原）に対応する要素行動（抗体）の発現を，計算機実験により進める．

step1 ：

［*IA*］初期抗体群の生成
記憶細胞から過去に有効であった抗体群を生成する．

［ロボット］初期エージェントの生成
初期エージェントをランダムに生成する．

step2 ：

［*IA*］抗原の提示
マクロファージにより抗原を提示し，自己の MHC を変化させる．

［ロボット］入力情報の認識
センサにより検出される環境情報を，入力情報として認識する．

step3 ：

［*IA*］記憶細胞の有無
抗原に対応可能な記憶細胞の有無を調べる．

［ロボット］入力情報に対応可能な解の記憶の有無
入力情報に対応可能な解（要素行動＝行動命令）の記憶の有無を調べる．

step4 ：

［*IA*］T 細胞，B 細胞の活性化
抗原に有効に働く T 細胞，B 細胞があれば，活性化させる．

［ロボット］解候補の選択
解候補を親和度（抗原の抗体に対する結合の度合）により選択する．

step5 ：

［*IA*］抗体産生と記憶
抗体を産生，分泌し，記憶する．

［ロボット］解の実行と記憶
解を実行し，記憶する．

step6 ：

［*IA*］免疫細胞の入れ換え
寿命により死滅した細胞を補う．

［ロボット］解の評価，解の入れ換え
解の実行結果を評価関数により評価し，その評価値を親和度とする．また評価の低い解は，ランダムに作成した解と入れ換える．

以下，step2～step6 を目的を達成するまで繰り返す．

4. 実験

4.1 環境・目的

本実験では，自律移動ロボットとして，スイス・ローザンヌ連邦工科大学のマイクロコンピュータ・インターフェース研究所で開発された Khepera（図 7）を扱うことを前提とし，Khepera シミュレータ [2] を使用する．Khepera は，8 つの赤外線センサを有しており，独立 2 輪駆動である．

実験環境としては，複数の Khepera で壁を構成し，これが教師となりメインロボットの行動を監視し，メインロボットに対して行動命令を出すことにより，その行動を制御する（図 8）．壁ロボットは，各々メインロボットを

監視し，メインロボットをセンサ情報により感知すると，メインロボットが目的地へ到達するための行動ルールを，命令として伝達する．この時，メインロボットとの距離が一番近い壁ロボットが，命令を出すことにする．メインロボットが目的地に到達するまでを一回の実験とし，これを何度も繰り返す．

提案するシステムの有効性を検証するため，1）各壁ロボットが，免疫アルゴリズムによりメインロボットをできるだけ目的地に近づけるような命令を獲得し，メインロボットが目的地に到達可能か，さらに，2）学習によりメインロボットが目的地に到達するまでのステップ数に減少が見られるか，について考察を行う．

4.2 実験結果

実験の結果図9に示すように，壁ロボットは，メインロボットを目的地まで導けることが確認できた．また，メインロボットが目的地に到達するまでのステップ数の推移を図10に示す．

図10は，実験を25回ごとに区切ってステップ数の平均を取り，その推移を表したグラフである．このグラフより，壁ロボットは実験を重ねるごとに，メインロボットを効率良く目的地へ向かわせるための命令を学習しているということがいえる．最後に，この実験を通して各壁ロボットによって得られた抗体を，図11に示す．

図11のグラフは，横軸が壁ロボット，縦軸が得られた抗体の要素行動，すなわち左右のモータの値を表している．壁ロボットの番号は，一番左下の壁ロボットが0で，その一つ上が1となり，一番右下のロボットが22となる．それぞれの抗体の値を細かく吟味した結果，各壁ロボットは，メインロボットをより目的地に近づけるような命令を獲得していることが確認できる．すなわち，各壁ロボットはそれぞれの位置における役割を学習したということが言える．

図12は，左右の壁ロボットから一体ずつを例にとり，その壁ロボットが獲得した抗体を前提条件の一つであるメインロボットの向きにより4つに分類し，示している．ロボットの向きが右上（同図右上）の場合について，具体例を図13に示す．

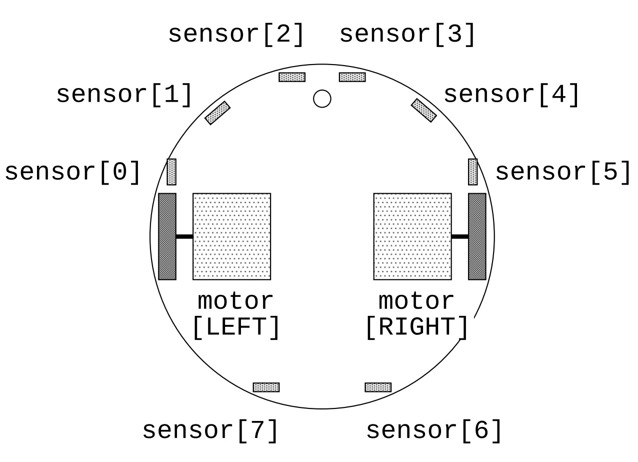


Fig. 7. Khepera

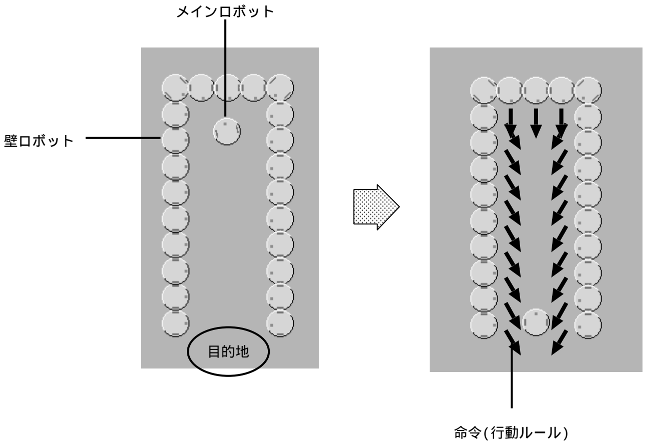


Fig. 8. 実験環境

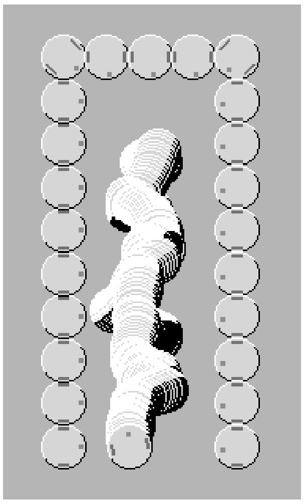


Fig. 9. 実験結果

右側の壁ロボット（図13右）にとって，目的地は左下になるので，メインロボットの左右のモータの値にマイナスの値を命令することでメインロボットはバックすることができ，この命令によって目的地に向かうことが可能となる．また，左側の壁ロボット（同図左）の場面においては，ロボットが右上を向いたままだと目的地に向かわせるのは難しいため，取り合えず壁ロボットから離れさせて少しずつ方向転換を行っていることが確認できる．

他の場合についてもほぼ同様であることが確認できた．このことより，壁ロボットはメインロボットを目的地へ導く命令を獲得しており，それぞれの位置における役割を果たしていることがいえる．

5. まとめ

本論文では，免疫系の自己保存機能や環境適応能力を持つ免疫アルゴリズムを用いて，自律的に移動ロボットを制御するシステムを提案した．このシステムは，制御の対

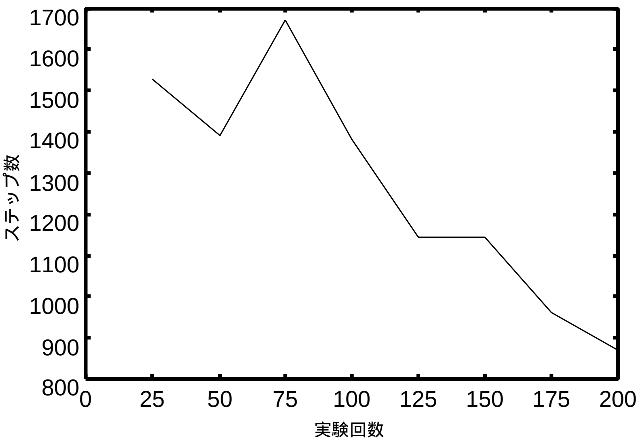
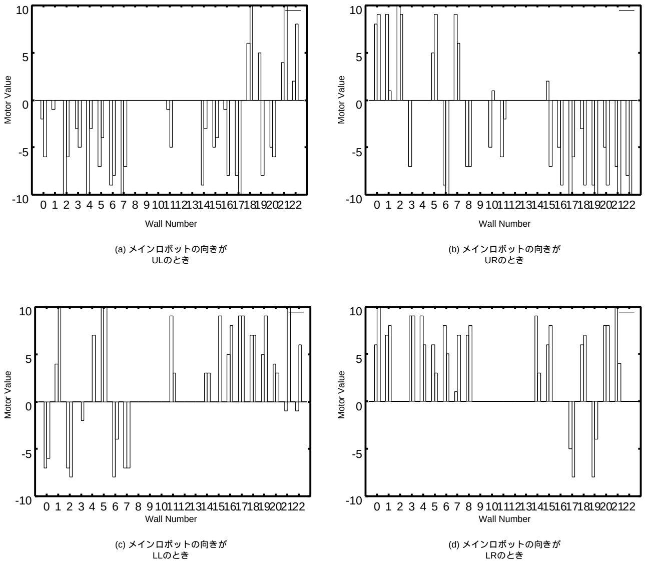


Fig. 10. 到達ステップ数の推移



(a) メインロボットの向きが ULのとき

(b) メインロボットの向きが URのとき

(c) メインロボットの向きが LLのとき

(d) メインロボットの向きが LRのとき

Fig. 11. 実験により得られた抗体

象となる移動ロボットを抗原と見なし，複数のロボットで構成するシステム全体を生体組織と見立てている．また，提案したシステムをシミュレーション上で構築し，メインロボットを目的地に移動させることを目的とした計算機実験を行い，その挙動を観察した．この結果，システムは特定の行動ルール獲得，つまり，提案したシステムは免疫アルゴリズムにより，目的地到達のための移動ロボットの行動制御が実現できた．また，各壁ロボットは，それぞれの位置における役割を学習した．このことは，学習後の壁ロボットを様々な位置に配置することにより，迷路探索などの問題にも応用できることが期待される．

本研究は，文部省科学研究費（課題番号 10780240）の補助を受けて行った．

謝辞

本論文を執筆するにあたり，Lymphocyte Biology Section, Laboratory of Immunology の伊藤靖氏から，適切な御指摘を頂いた．ここに謝意を表する．

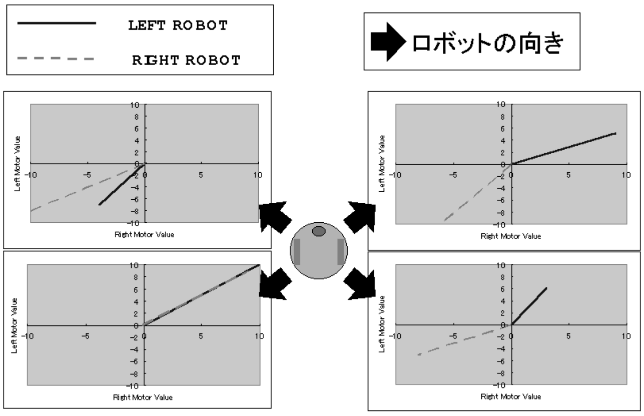


Fig. 12. ロボットの向きとそれに対応する抗体

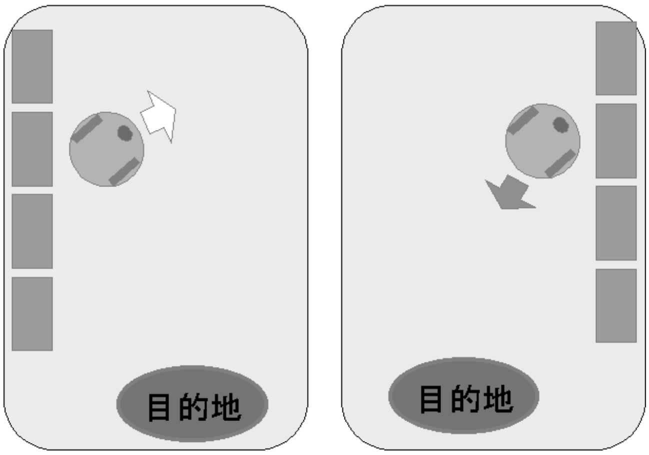


Fig. 13. 右上の向きに対応する抗体の例

文 献

[1] Franco Celada and Philip Seiden : "Modeling Immune Cognition", 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.

[2] Oliver Michel : "Khepera Simulator version 2.0 User Manual"(1996).
http://diwww.epfl.ch/lami/team/michel/khep-sim/

[3] Thomas Back (editor) :"Proceedings of The Seventh International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann"(1997)

[4] 北野宏明：「遺伝的アルゴリズム」，産業図書株式会社（1993）．

[5] 石黒 章夫，近藤 敏之，渡辺 裕司，白井 靖浩，内川 嘉樹：「免疫ネットワークに基づく自律移動ロボットの分散型行動調停機構の創発的構築に関する一手法」，電学論 C，117 巻 7 号，pp.865-873（1997）．

[6] 石田 好輝，平山 博史，藤田 博之，石黒 章夫，森 一之：「免疫システムとその応用 -免疫系に学んだ知能システム-」，コロナ社（1998）．

[7] 當間 愛晃，遠藤 聡志，山田 孝治：「免疫ネットワークを用いた分業巡回セールスマン問題の解法に関する検討」，第 8 回インテリジェント・システム・シンポジウム，pp.353-358（1998）

[8] 前堂 卓也，山田孝治，遠藤聡志：「免疫ネットワークによる自律移動ロボットの行動制御に関する基礎研究」，第 17 回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集，pp.393-394（1998）

[9] 森 一之，築山 誠，福田 豊生：「免疫アルゴリズムによる多峰性関数最適化」，T.IEE Japan, Vol.117-C, No.5, pp593-598（1997）．