複数台移動ロボットによる協調捕獲に関する基礎研究* (追跡問題における協調捕獲の提案)

高橋 一成^{*1}, 柿倉 正義^{*2}

Cooperative Capture by Multiple Mobile Robots (A Proposition of Cooperative Capture Strategy in the Pursuit Problem)

Kazunari TAKAHASHI^{*3} and Masayoshi KAKIKURA

^{*3} Graduate School of Engineering, Tokyo Denki University,
2-2 Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8457 Japan

Nowadays the evolution of robots is amazing. However, we cannot make the intelligence and the function of robots higher enough when the work range of robots increases and the contents of work become complicated. Thus, as the strategy to cope with these problems, many researchers are studying the autonomous distributed robot system. The aim of our research is to propose a behaviour planning and a cooperative capture strategy of the autonomous distributed robot system through the examination of preceding studies on "Pursuit Problem" which is taken up as a task of multi-agent systems. In this paper, we demonstrate a deadlock avoidance by making the mobile robot repeat simple behaviors which we propose. We have made some experiments on the simulation system we have built, and the results of cooperative captures are reported in this article.

Key Words: Moving Robot, Robust Control, Artificial Intelligence, Multi-Agent, Pursuit Problems, Deadlock-Free Strategy, Emergence

1. まえがき

本研究は、逃亡する移動ロボットを複数台の移動ロボットにより捕獲する戦略に関するものである。

今日、ロボットの進化には目覚ましいものがある。ロボットの作業範囲が増え、また作業内容も複雑になるにつれ、その知能や機能もさらに高くなるを得なくなる。しかし、ロボットの知能や機能をいくら高めようとしても、ロボット単体では、その能力に限界があることは明らかである。このような問題の解決策の一つとして、人間社会を例に引くまでもなく、一つの問題を複数台のロボットによって解決するような処理が注目^①されている。また、この複数台ロボットシステムを制御するために、自律分散ロボットシステムの研究が多く行われ^②、「協調」というキーワードが注目されている。

このような背景の下、我々は、複数台移動ロボットの協調問題解決、特に外界センサ（ビジョンセンサ

や近接覚センサなど）によって獲得した局所情報しか与えられない移動ロボットによる問題解決に従事している。

複数のシステムによる「協調」という問題は、分散人工知能（Distributed Artificial Intelligence: DAI）の研究対象でもあり、知識の共有や行動の調整により効率的に問題を解決する方法は、マルチエージェントシステムとも呼ばれており、このようなマルチエージェントシステムの対象タスクとして、多くの研究者が取りあげているものの一つに、「追跡問題」がある^{③④⑤⑥⑦}。この問題に対して、ヒューリスティクスを用いた方法^{⑧⑨}や、状態の学習^⑩による捕獲の提案などが行われているが、これらの捕獲戦略は限られた条件の下でしか捕獲を保証できなかった。

本研究では、複数台移動ロボットの協調問題解決の例として、この追跡問題を取りあげ、その解決方法の確立を目的とする。また、従来の学習や進化的手法などの機能を用いることなく、局所情報しか与えられない移動ロボットが、時時刻々と変化する環境下においても失敗しない柔軟性や頑健性を有するシステムの構築に重きを置いた。以下本稿では、その複数台移動

* 原稿受付 2003年9月17日。

^{*1} 正員、東京電機大学大学院工学研究科(〒101-8457 東京都千代田区神田錦町2-2)。

^{*2} 正員、東京電機大学工学部。

E-mail: kazu@isl.dendai.ac.jp

ロボットによる協調行動と捕獲作業の提案を行い、このシステムによるシミュレーション実験とその結果について述べる。

2. 追跡問題

2.1 一般的な問題 4つの **Predator** が一つの **Prey** を囲い込むことを目的とする。各エージェントは2次元のグリッド上で上下左右に動く(図1(a))。全てのエージェントの個々の動きをまとめて1サイクルとし、**Prey** が **Predator** によって四隅を囲まれてしまった時(図1(b))、目的は終了する。

Fig.1 (a) Pursuit Problem (b) Capture Position

この問題は、多くのパラメータ⁹⁾(例えば、捕獲の定義、エージェントの行動規則、エージェント同士による同位置占有の有無、**Predator** の認識可能な範囲や **Predator** 間の通信の有無など)を持つため、これらを変更することにより、さまざまな問題設定を行うことができる。そのため、多くの研究者は、そのパラメータをそれぞれの研究に適した形に設定し評価を行っている。

2.2 問題の再設定 「協調」に関する解説⁹⁾に書かれているように、一般に複数台移動ロボットの協調には以下の2つの意味が考えられる。

- (1) 双方の利害が対立した場合の相互間の問題を解決する「競合解消」
- (2) 相互間の協力により目的を達成する「共同作業」

これらが満たされない場合、(1)ではロボットの衝突⁹⁾などを引き起こし、(2)では協調搬送¹⁰⁾といった作業が不可能となる。本研究では、上述される二つ意味を満足するようにこの問題を再設定(「競合解消(衝突しない)」しながら「共同作業(囲い込む)」を行う)し、シミュレーション⁹⁾により、これらの問題を解決する戦略を提示することを目指す(詳細3章)。以後、このシミュレーションによって表現される移動ロボット **Prey** および **Predator** をまとめてエージェントと呼び、この問題をゲームと呼ぶこととする。このゲームにおける設定は以下のとおりである。

- (1) **実験環境**: エージェントは、2次元格子の枠内(以後、これをセルと呼ぶこととする)を移動する。また、このゲームは、先行研究で利用された **Toroidal World**(図2)と呼ばれるトーラス状平面(付録1)およびエージェントの行動範囲を制限した有限平面でも行われる。

Fig.2 Toroidal World

- (2) エージェントに共通した規則: 1サイクルを単位時間とし、**Prey** と **Predator** は交互に行動を選択することとする。その行動は上下左右のいずれかのセルへ移動するか、その場に留まることを選択できる。また、(同位置占有は衝突を意味するため、)すべてのエージェントは同じセルを占有することはできない。
- (3) **Predator** の行動規則: **Predator** はこの実験環境すべてを認識できるのではなく、視覚センサによる **Prey** の位置の認識・追跡と、周囲の近接センサから得られる8近傍のセル(図3の斜線部は **Predator** 1の近接センサによる認識可能な範囲を示す)の局所情報によって行動する。さらに、エージェント間の交渉手段として、通信機能を持つこととし、各エージェントへの通信の損失はなく、コストも行動に影響しないものとする。

Fig.3 Experiment Environmental Model

- (4) **Prey** の行動規則: **Prey** は静止またはランダムに方向を選択し移動する。ただし、**Prey** の移動制約を任意の確率で設定できる。(例えば、移動制約20%とは、5サイクル中に1回は **Prey** が移動しないことを意味する。)

- (5) ゲームの終了：ゲームは従来どおり四隅を囲い込む場合（図1（b））を捕獲成功として終了する。また、新たに各々のエージェントの位置が（同じことを繰り返すという意味で）2サイクル以上連続して変化しない場合を捕獲失敗とし、同様にゲームを終了する。

3. 提案する戦略

本章では、エージェント間の衝突と言った一般的な問題を解消する「協調行動」と、このゲーム特有のデッドロック問題を積極的に利用した「捕獲作業」の提案を行う。また、捕獲効率の向上を目的としたアルゴリズムの改良についても述べる。

3-1 協調行動 複数のエージェントが同じ目的を持つことで、同じ位置に移動しようとすることによって「衝突」（図4（a））を起こしたり、また、衝突を予測してお互いに遠慮しあうことによって「譲り合い」（図4（b））を起こしてしまうことが考えられる。

Fig4 (a) Collision (b) Compromise

この問題の解決方法としてエージェントに優先度を持たせた。まず、通信可能な範囲に存在するエージェント同士は、個々の優先度を互いに広報し優先順位を決定する。ただし、エージェントの優先度が同じ場合は、通信の成立順に決定することとする。

次にエージェントは、優先順位の順に個々の動作を計画し、その動作計画を他のエージェントに広報する。通信を受けた優先順位の低いエージェントは事前に広報された動作計画と干渉しないよう行動を行うことによって、この「衝突」・「譲り合い」問題を解消（図5）させることとした。

このような通信による移動ロボットの競合回避として、ロボット間の大局的な通信を利用して、衝突回避を行う手法⁽¹¹⁾や、赤外線を用いた局所通信による手法⁽¹²⁾も提案されているが、本研究では、台数の増加に伴う通信の停滞を考慮した局所通信による解決を目指し、エージェントによる局所通信可能な範囲を最低マンハッタン距離2までとした。ただし、通信可能な範囲のエージェント同士は通信ネットワークを構成する機能を有することとする。

Fig.5 Solution upon Priority

3-2 捕獲作業 「基本戦略」（Predator が Prey との距離を狭める方法）として、Haynes らによって有効であると報告されているヒューリスティクスの一つである MD（Manhattan Distance）アルゴリズムの（付録2）を採用した。

この戦略のみによるゲーム（Prey の行動をゲームの終了まで静止させ続けた場合とランダムに上下左右に選択させる場合の2種類）をトラス状態平面にて行った。その結果、Prey の振舞いに関わらず捕獲失敗に陥る時のエージェントのつくりだす組織構造は、図6に示す9種類のパターンに属することが判明し、我々は、この状態を「ゲームの最終局面におけるデッドロック問題」と呼ぶことにする。

Fig.6 Deadlock Patterns

この問題に、今日注目されている学習や進化的手法などを適用する解決法も考えることができる。

例えば、進化的手法の代表である遺伝的アルゴリズムは、その強力な探索能力から、一般に問題の整理の困難な複数エージェントの相互協力による問題解決に有効であると考えられる。この遺伝的アルゴリズムを利用して探索対象となる解空間を定めることにより、最適解または局所解を見つけられる可能性がある。

しかし、遺伝的アルゴリズムを利用する場合、設計者（我々）が局所解に陥らないように（問題の表現を）設計し、パラメータ（個体数、選択方法、交叉の方法、突然変異の割合など）を設定する必要性がある。

一方、機械学習として近年注目を浴びている強化学習は、環境に関する知識を持たないエージェントに対して、環境の状態と、状態に依存して得られる報酬（罰）を入力し、報酬を最大にするような行動を選択させることで、最適解を見つけられる可能性がある。

しかし、強化学習では、設計者が報酬の設定を慎重にしないと最適解が求められない可能性が生じるかもしれない。また、仮に最適解に収束したとしても、収束するのに時間がかかり、さらにその獲得した行動は（学習した環境に特化されたものである）汎用性がないかもしれないといった問題が考えられる。

本研究では、上述された上位レベルの機能を用いて、この追跡問題を学習や進化的手法の標準問題と捕らえ、最適解（または局所解）を見つけることに主眼を置かず、この問題を単純な機能と知能しか持たない下位レベルのエージェントが局所情報のみに基づき行動することにより、自律的に解決するシステムの構築を試みることにする。これらのエージェントの行動は、最善な行動とは言えないかもしれないが、時時刻々と変化する環境下や新たに設定した実験環境（有限環境）においても失敗しない柔軟性や頑健性に重きを置いたシステムの構築には有効である。

このような問題の解決策の一つとして、単純な振舞いをいくつか同時に働かすことによって生じる創発的な振舞い⁽¹³⁾に注目する。そして、この概念を利用して、エージェント自身の持つ局所情報のみにより自律的に振舞うことで捕獲を実現させることを考え、「基本戦略」に加えて新たに「回避戦略」を提案することで、自発的な捕獲行動の発現を期待した。Predator の「回避戦略」は、以下に示す2つの機能よりなる。

〔機能1〕デッドロック検出 前節3・1より、エージェントの通信可能範囲は、マンハッタン距離2と制限されているが、図6におけるすべてのPredator は、通信ネットワークを構成する範囲に存在しており、すべてPredator が互いに通信できる状態になっている。そこで、すべてのPredator が移動を終えた後、個々のPredator にその時点で

得られる局所情報から次の行動を仮決定させた。もし、決定したセルに対して他のエージェントが存在する場合をデッドロックとしてフラグを立て、次のサイクルに、優先度とともに他のPredator に広報することとした。

〔機能2〕デッドロック回避行動 すべてのPredator がデッドロック状態を広報した場合は、本来は選択されるべき行動ではないが、その他の移動可能なセルへ移動することにより一時的にデッドロック状態を解消させる回避アルゴリズムを追加した。この回避行動を実行する条件として、捕獲時において自身の4近傍（自身の上下左右のセル）には他のPredator が存在しないことから、デッドロック状態時において4近傍にPrey と少なくとも一つ以上の他のPredator が存在しているものとした。

3・3 アルゴリズムの改良 Haynes⁽⁶⁾らは、Predator の移動可能なセルが複数存在した場合、Predator の行動をなるべく互いに影響させないようにMD アルゴリズムを改良し、その有効性を報告している。本研究では、このような非干渉的行動は、行動の選択に関わらず有効であると考え、提案する「基本戦略」と「回避戦略」の2つの行動に対して、以下の2つの簡単なルールを追加し、実験で確認することを試みることにした。

〔ルール1〕距離を狭める戦略において、Haynesらのものほど非干渉的行動のルールが複雑ではないが、Predator は、（8近傍のセルしか認識できないので、）移動可能なセルとその両端のセルに他のPredator があるべく存在しない方（空セルの数の大きい方）へ移動することとする。もし、同数の場合はランダムに選択する。（例えば、図7（a）のような状態において、Predator 1の選択肢は、マンハッタン距離を少なくする方向として（b）と（c）の2通りあるが、（a）の点線枠は条件を満たす移動可能なセルとその両端のセルで、左側の空セルの数は1、下側の空セルの数は2なので、（c）を選ぶ。）

Fig.7 Improved MD-Algorithm

〔ルール2〕互いの行動なるべく影響を与えない方法は、回避アルゴリズムに対しても有効であると考え、移動可能なセルとその両端のセルに他の Predator なるべく存在しない方へ回避することとする。もし、同数の場合はランダムに選択するものとする。（例えば、図8（a）のような状態において、Predator1の選択肢は、（b）と（c）の2通りあるが、（a）において条件を満たす左側の空セルの数は2、右側の空セルの数は3なので、（c）を選ぶこととする。）

Fig.8 Improved Evasion Algorithm

4. 実験結果

前章で提案した戦略とアルゴリズムの改良による効果の確認として、以下のシミュレーションを行った。評価方法として、一回のゲームで捕獲成功する確率（捕獲率）および成功時に一回のゲームに要する時間（平均捕獲時間）による評価を行った。

4.1 静止している Prey の捕獲

4.1.1 静止状態の Prey の捕獲実験 1 実験環境

に15×15のトーラス状平面を利用した。ゲームの初期位置として Prey を実験環境の中心に、4つの Predator を同じ位置に重ならないようランダムにそれぞれ配置した。また、Predator の優先順位は1サイクルごとに重ならないようランダムに変化させることとし、以下に示される4つのアルゴリズムによる静止している Prey の捕獲の比較実験を10,000回行った。その結果を表1に示す。

- MD：MDアルゴリズムのみによる戦略
- IMD：改良した基本戦略（MDアルゴリズムに〔ルール1〕を設けた）
- IMD+RE：提案する捕獲戦略1（IMD+回避を行うが、方向の選択をランダムにした捕獲）
- IMD+IE：提案する捕獲戦略2（IMD+回避方法に〔ルール2〕を設けたアルゴリズムによる捕獲）

本研究で提案する捕獲戦略は、回避ルールの有無に関わらず100%の捕獲率を得ており、提案手法の

有効性を確認した。また、ルールに基づく行動は、Prey との距離を狭める戦略において、（Prey が静止しているという性質上、）改良した基本戦略（IMD）とMDアルゴリズムによる戦略（MD）との間に、平均捕獲時間の差異は認められなかったが、捕獲率の向上を確認した。一方、回避行動では平均捕獲時間の短縮が見受けられ、ルールに基づく回避行動（〔ルール2〕）の有効性も確認した。

Table.1 Result of the experiment for stationary Prey

Predator's algorithm	The Rate of Capture (%)	Average Capture Time (cycle)
MD	13.73	9.93
IMD	15.42	9.89
IMD+RE	100	14.76
IMD+IE	100	12.79

4.1.2 静止状態の Prey の捕獲実験 2 補足実験として、初期位置として図6（前章3.2）に示される最終局面でのデッドロック状態とし、本研究で提案する捕獲戦略による静止し続ける Prey の捕獲実験を行った。その結果、回避ルールの有無に関わらず、すべての状態において100%の捕獲率を得ており、提案手法が最終局面におけるデッドロック状態の解消にも有効であることを確認した。また、ルールに基づく回避行動（〔ルール2〕）は、すべての状態において平均捕獲時間の短縮に有効であることを確認した。その結果を表2に示す。

Table.2 Average capture time from the Deadlock Patterns

(Prey's algorithm : Stay)

Patterns of the Fig. 6	IMD+RE	IMD+IE
(a)	5.73	3.00
(b)	7.22	5.44
(c)	9.27	7.49
(d)	7.87	4.36
(e)	6.02	5.01
(f)	6.91	5.20
(g)	10.53	9.52
(h)	7.94	5.24
(i)	13.20	12.31

4.2 ランダムに移動する Prey の捕獲

4.2.1 トーラス状平面における捕獲実験 Prey

の行動をランダム移動とし、それ以外の実験条件は前節4.1.1と同様の捕獲実験を行った。ただし、Prey には20%の移動制約を与えた。その結果を表3に示す。

前節4.1.1の結果と同様に、本研究で提案する捕獲戦略は、100%の捕獲率を得ており、提案手法が動的な Prey においても有効であることを確認した。また、ルールに基づく行動は、Prey との距離を狭める戦略

において、IMD は MD と比べて捕獲率の向上と平均捕獲時間の短縮を実現し、回避行動においても平均捕獲時間の短縮が見られる。これらにより、動的な Prey の捕獲に対してもルールに基づく行動の有効性が確認された。

Table.3 Result of the experiment on the torus plane

(Prey's algorithm : Random)

Predator's algorithm	The Rate of Capture (%)	Average Capture Time (cycle)
MD	8. 93	30. 17
IMD	10. 50	10. 91
IMD+RE	100	65. 34
IMD+IE	100	53. 73

4.2.2 有限平面における捕獲実験 実験環境として、トーラス状平面の境界に壁を設け、エージェントの移動範囲を 15×15 の枠内に制限した。それ以外の実験条件は前項 4.2.1 と同様とし、ランダムに移動する Prey の捕獲実験を行った。その結果を表 4 に示す。

前項 4.2.1 の結果と同様に、本研究で提案する捕獲戦略は、100%の捕獲率を得ており、提案手法は、環境の違いに関わらず捕獲に有効であることを確認した。また、ルールに基づく行動は、Prey との距離を狭める戦略において、IMD は MD と比べて捕獲率の向上と平均捕獲時間の短縮を実現し、回避行動においても平均捕獲時間の短縮が見受けられ、ルールに基づく行動の有効性が確認された。図 12 (本稿最終頁) に、壁際に Prey を追込み捕獲する群行動の一例を示す。

Table.4 Result of the experiment on the restricted plane

(Prey's algorithm : Random)

Predator's algorithm	The Rate of Capture (%)	Average Capture Time (cycle)
MD	6. 18	14. 44
IMD	7. 19	9. 44
IMD+RE	100	42. 92
IMD+IE	100	33. 34

5. 考察

前章の実験結果を踏まえて、本稿で提案した戦略について考察する。

5.1 捕獲行動について このような単純な振舞いをいくつか同時に働かすことによって生じる創発的な振舞いの発現条件等はまだまだ十分に解明されていないが、提案する捕獲戦略による捕獲行動の発現の理由として、本実験におけるエージェントの性質が、創発(捕獲)の発生する共通の性質⁽⁴⁾と以下のような点で類似しているところは注目に値すると考える。

- (1) 自分と同じ能力の要素が多数存在する：エージェントは均質 (homogeneous) である
- (2) すべての要素が共通の方法で(自分の近くの要素とだけ)情報の交換を行う：エージェントは局所通信により行動を選択する
- (3) すべての要素が同時並列的に動く：エージェントは局所通信により構成されたネットワークにより同期され、デッドロック状態の解消を行う
- (4) すべての要素が同じ状況になるように動く：(同じ評価関数をもって)目標 (Prey) を追いかける

実験におけるエージェントの優先順位は、(最悪の条件を考慮して) 1 サイクル毎に無作為に変化させたが、エージェントの優先順位に関わらず柔軟かつ頑健に行動した。これは、エージェントの優先順位を利用せず、通信の成立順のみによって行動させた場合でも柔軟かつ頑健に行動できることを意味し、さらに、優先順位による捕獲効率の向上(時間の短縮)の可能性を示唆できると考える。

また、エージェントの均質性から、エージェントが仮に故障した場合にも交換が可能となり、対故障性に対しても頑健であると考えられる。

5.2 改良したアルゴリズムについて 基本戦略として採用した IMD アルゴリズムは、Haynes らの提案する非干渉的行動の考えが、従来のトーラス状平面だけでなく有限平面にも有効であることを確認した。

また、この非干渉的行動の考えは、新たに提案する回避戦略という逆の振舞いに対しても有効であることを確認し、均質なエージェントに与えるある程度のルールは、捕獲行動の頑健性に影響することなく、効率性(時間の短縮)に寄与する。

5.3 新たな環境への適応能力について トーラス状平面の他に有限平面による捕獲実験を行ったが、トーラス状平面で行われていた捕獲以外に、図 12 に示されるように、少数の Predator が Prey を壁に追込み(動けないように固定し)、デッドロック回避により作られた逃げ道に誘き寄せ囲い込む現象が多く見受けられる。これにより、トーラス状平面よりも捕獲時間の短縮を実現している。

ここで、実験に利用したトーラス状平面は無限に広がる平面、有限平面で利用した壁は障害物とも考えられる。すべての新しい環境は、このトーラス状平面、壁および障害物の組み合わせにより構築できる(図 9)と考えられることから、新たに単純な探索能力(例えば、Prey が発見されるまでは、彷徨するといっ

た機能)を持たせることで、提案する捕獲戦略は、障害物の存在する未知環境においても柔軟で頑健な捕獲動作を行うことができると考えており、現在検証を行っている。尚、図9に示す有限平面のもと、本研究で提案する捕獲戦略は、ランダム移動する Prey に対して 100%の捕獲率を得ている。

Fig.9 Unknown Environment with Obstacles

5.4 台数の変化に対する適応能力について 提案する捕獲戦略は、追跡問題だけに最適な問題とも考えられる。本研究では、この問題に対し現在検討を行っているが、ここでは、n対1の囲い込みについての検証を紹介する。

実験環境を図10に示されるような有限平面とする。ゲームの初期位置として、従来の Prey の代わりに3×3の大きさをもった新しいターゲット(同様に Prey と呼ぶこととする)を実験環境の中心に配置し、Prey を囲い込むために12の Predator を同じ位置に重ならないようランダムにそれぞれ配置した。尚、Prey の捕獲状態を「各々3つの Predator が上下左右から Prey を囲い込む」こととする。

Fig.10 New Game

ただし、エージェント間の通信可能範囲は、Prey の大きさを考慮し、Prey に接する Predator は互いに通信可能で、従来どおりの通信ネットワークを構成できるものとした。それ以外の実験条件は従来どおりとし、前章の実験でもっとも効率の良い戦略 IMD+IE アルゴリズムによる静止している Prey の捕獲を10,000回行った。なお、本稿で提案している基本戦略のために利用するマンハッタン距離のテーブルは図11ののとおりとした。

12	11	10	9	8	7	6	6	7	8	9	10	11	12
11	10	9	8	7	6	5	5	6	7	8	9	10	11
10	9	8	7	6	5	4	4	5	6	7	8	9	10
9	8	7	6	5	4	3	3	4	5	6	7	8	9
8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8
7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7
6	5	4	3	2	1			1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1			1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1			1	2	3	4	5	6
7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7
8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8
9	8	7	6	5	4	3	3	4	5	6	7	8	9
10	9	8	7	6	5	4	4	5	6	7	8	9	10
11	10	9	8	7	6	5	5	6	7	8	9	10	11
12	11	10	9	8	7	6	6	7	8	9	10	11	12

□ Prey

Fig.11 Manhattan Distance Table for the New Game

実験の結果、従来の戦略は捕獲率100%という結果になったが、平均捕獲時間に275.56(cycle)を要した。失敗しない(100%解)にこだわる本稿の主眼から考えると本稿で提案する戦略は、n対1の囲い込みに対しても有効であると考えられるが、効率(捕獲時間)を考慮した場合に台数の限界を感じざるを得ない。ただし、このn対1問題だけに対して考えた場合、デッドロック回避のルールに、Prey の側面に対して垂直方向の回避を禁止させる条項(付録3)を追加すると、同条件において平均捕獲時間は40.98(cycle)まで短縮され、本戦略は台数に対する有効性に対しても肯定できる結果と考える。しかし、この追加された回避戦略は、前章4章で実験した有限平面の実験では失敗することも確認され、本研究の目的の一つである環境に対する頑健性からは外れてしまう。この問題は、5.2節において論じたルールと移動制約の有無という点に違いがあることから、台数の増加に対するエージェントの振舞いの方策としての今後の課題となる。

6. む す び

複数台移動ロボットの協調問題解決の例として、複数台の移動ロボット(エージェント)による捕獲作業問題を取り挙げた。本稿では、優先度を利用し、複数台移動ロボットの協調行動をシミュレーション上で実現した。また、単純な振舞いをいくつか同時に働かすことによって生じる創発的な振舞いに着目し、従来の学習や進化的手法などの機能を用いることなく、局所情報しかしか与えられない移動ロボット(エージェント)による協調行動と捕獲作業の提案を行った。本研究の成果を以下にまとめる。

- (1) 「追跡問題」の最終局面におけるエージェントのデッドロック状態の解消と捕獲の頑健性を実現した。
- (2) 提案した手法は、先行研究で利用されたトラス状平面上だけでなく、本研究で新たに問題設定した有限平面上においても有効となる柔軟性を有する。また、壁際にエージェント

を追込み捕獲する新しい行動の発現を確認した。

- (3) アルゴリズムにルールを設けることにより、捕獲率の向上と平均捕獲時間の短縮を図った。我々は、現在汎用マイコンを搭載した移動ロボットを利用し、実機による検証を進めている。また、本稿では移動ロボット（エージェント）間通信に関して触れなかったが、提案手法は、赤外線等の通信範囲の狭い媒体の有効利用が可能と考えられ、実機による提案手法の検証とあわせて通信方式の確立が今後の課題となる。

文 献

- (1) 伊藤正美, 市川惇信, 須田信英: 自律分散宣言, (1995), オーム社
- (2) 長田正: 自律分散をめざすロボットシステム, (1995), オーム社
- (3) L. Gasser, N. Rouquette, R. W. Hill and J. Lieb: Representing and using organizational knowledge in distributed AI systems; Distributed Artificial Intelligence, Vol. 2(1989), 55-78.
- (4) Thomas Haynes, Kit Lau & Sandip Sen: Learning Cases to Compliment Rules for Conflict Resolution in Multiagent Systems; AAAI Spring Symposium on Adaptation, Coevolution, and Learning in Multiagent Systems (1996).
- (5) Peter Stone and Manuela Veloso: Multiagent Systems: A survey from a machine learning perspective; Autonomous Robots, 8-3 (2000), 345-383.
- (6) 高橋一成, 柿倉正義: 複数台移動ロボットによる協調捕獲に関する基礎研究 (第1報); 平成 12 年電気学会 電子・情報・システム部門大会公演論文集(2000), 603-604.
- (7) R. E. Korf: A simple solution to pursuit games, Working Papers of the 11th International Workshop on Distributed Artificial Intelligence(1992), 183-194 (Cited in Thomas Haynes, Kit Lau & Sandip Sen: Learning Cases to Compliment Rules for Conflict Resolution in Multiagent Systems; AAAI Spring Symposium on Adaptation, Coevolution, and Learning in Multiagent Systems (1996))
- (8) 加藤晋, 武野純一: 複数の移動ロボットの協調; 日本ロボット学会誌, 12-6(1994), 7-12.
- (9) 加藤 晋, 西山栄枝, 武野純一: 交通ルールの適用による複数の移動ロボットの協調行動; 日本ロボット学会誌, 12-2 (1994), 123-130.
- (10) 大隅久, 野尻尚, 栗林麻, 岡崎崇: 3 台の移動ロボットによる物体の協調搬送制御; 日本ロボット学会誌, 19-6 (2001), 68-76.
- (11) 尾崎功一, 浅間一, 石田慶樹, 松元明弘, 遠藤勲: 通信を用いた複数移動ロボットの相互衝突回避; 日本ロボット学会誌, 14-7(1996), 47-53.
- (12) 新井 義和, 藤井輝夫, 浅間 一, 鈴木昭二, 嘉悦早人, 遠藤 勲: 群ロボット環境における局所的通信に基づく衝突回避; 日本ロボット学会誌, 19-1(2001), 45-58.
- (13) 嘉数侑昇: ロボティクスにおける創発と進化; 日本ロボット学会誌, 15-5(1997), 2-6.
- (14) 伊藤宏司 編著: 知の創発, (2000), NTT 出版

付 録

- (1) トーラス状平面: 平面のおおのの両端 (上と下, 右と左) をつなげた閉局面. (図 2 の三角印はエージェントの移動可能方向を示し, Predator 1 は, 右へ進むと左端に出現する.)
- (2) MD アルゴリズム: Predator は, 4 近傍 (自身の上下左右のセル) と Prey とのマンハッタン距離をそれぞれ計算し, その値のもっとも少ない方向へ移動する戦略.
- (3) 図 1 1 において, 回避を行う Predator は, マンハッタン距離 1 のいずれかに存在し, 追加条項は, Prey に接する (Prey の四隅に位置するマンハッタン距離 2 のセルを含む) セル以外への移動を禁止する.

Fig.12 Capture in an edge of wall