

# ポテンシャル場によるエージェントの協調作業の導入に関する研究

牧野 勤<sup>†</sup> 成瀬 継太郎<sup>†</sup>  
横井 浩史<sup>†</sup> 嘉数 侑昇<sup>†</sup>

本研究は、複数エージェントによる協調作業の実現を目的としている。本論文では、この複数エージェントによる協調作業を実現する方法として、ポテンシャル場を用いた手法を提案する。複数エージェントの協調作業で問題となる点は、エージェントの行動に関する記述量の問題や、学習における計算量の問題、コミュニケーションでの通信量の問題などがあげられる。これらの問題に対処し、協調作業を実現する手法としてポテンシャル場を用いる。このポテンシャル場はデザイナーが設定するのではなく、計算機実験を通して得ることとした。今回対象とした問題は、箱押し問題 (Box-Pushing Problem) である。またポテンシャル場を生成する際に、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を利用した。本論文で提案した手法について、箱押し問題における複数エージェントの協調作業の計算機実験から協調作業導入に対する有効性が確認された。

## A Study on Using Potential Field for Multiple Agent Cooperative Operation

TSUTOMU MAKINO,<sup>†</sup> KEITAROU NARUSE,<sup>†</sup> HIROSHI YOKOI<sup>†</sup>  
and YUKINORI KAKAZU<sup>†</sup>

The purpose of this study is to realize an efficient cooperation work by two or more agents. Then, in this paper, we apply the potential field to introduce the cooperative work by these multiple agents. A point which poses a problem in case the cooperation work of multiple agents is carried out has a problem about the amount of description of an agent's knowledge data, a problem of the amount of calculation in any learning methods, and a problem of the amount of communications at each agent, etc. In this study, the potential field is used, in order to cope with these problems and to introduce cooperation behavior between agents. This potential field is obtained through a computer experiment rather than it sets up by a designer. In this study, the target problem is the Box-Pushing Problem. This is a problem which carries a box while changing direction and the direction of movement from the start point to the goal point. In order to generate the potential field on an agent, the Genetic Algorithms (GA) was used. In this paper, we carried out computer experiments using proposed method, and verified a validity of cooperation behavior introduction for multiple agents with potential field method.

### 1. はじめに

現在、複数エージェント間の協調作業に関する研究がさかんに行われている。たとえば Robo-Cup Soccer や軍事分野といったエージェント間の協調作業の導入が不可欠な分野や、Clean-Up Room 問題のような単独エージェントよりも複数エージェントによる協調作業を導入することで問題解決の効率化を図れるような問題の分野などがあげられる。

実際、我々の日常生活の中でも複雑でダイナミック

な協調行動を観察することができる。たとえばバスケットボールやサッカーなどのチームスポーツや職場での連携作業、あるいは軍事作戦における兵士の行動などがある。以上のような協調行動が行われる場面からも、単独エージェントで解決することが困難な問題や、単独エージェントで解決するよりも複数エージェントによる協調作業により解決する方が効率的に優れているような問題が存在することがいえる。

このような複数エージェントの協調作業を実現するためには、各エージェントの振舞いを設定する行動プランニングをする必要がある。よって行動プランニングに関して、多くのアプローチが提案されている。これらのアプローチを大別すると、

<sup>†</sup> 北海道大学大学院工学研究科  
Faculty of Engineering, Hokkaido University

- (1) 事前に全エージェントの振舞いを計画する．
  - (2) 各エージェントに後天的に獲得させる．
- 以上のようにまとめられる．

全エージェントの振舞いを事前に計画する方法は、トップダウン的なもので、分散人工知能 ( Distributed Artificial Intelligence: DAI ) 分野で多く研究されている<sup>1),2)</sup>．一般的にトップダウン的なアプローチを利用した場合、エージェントの行動を計画するときにフレーム問題が発生したり、新規の行動獲得に関する問題が発生したりする場合がある．

このような問題に対処するアプローチとして、エージェントそれぞれが後天的に行動を獲得する方法が提案されている．これらは主にエージェント自身の振舞いに対する評価を利用し、学習を通して最適な行動を獲得するものである．具体的なアプローチとしては、多くの研究で利用されている強化学習手法<sup>3)</sup>があげられる．適用例としては、Q-Learning<sup>4)</sup>を使用したものや、クラシファイヤシステム ( Classifier System: CS )<sup>5)</sup>を使用したものがある．一般的に複数のエージェントが存在する場合で、強化学習手法を利用した際に問題となることには、状態遷移の不確実性の影響や計算量の増加などがあげられる．

以上から、本研究では複数エージェントの協調作業を導入するために、ポテンシャル場を利用することを提案し、本手法の有効性について計算機実験を通して検証、および議論するものである．

## 2. 複数エージェントによる協調作業の実現

協調作業を前提とした複数エージェントによる問題解決に関する研究を ( 1 ) エージェントの行動プランニングの方法と ( 2 ) エージェント間通信の有無の 2 つの方向からまとめた場合、エージェントの行動プランニングの観点からは、前章でも述べたように事前に全エージェントの行動プランを作成するものと、学習手法などを用いて後天的にエージェントの行動プランを獲得させるものがある．これらの手法では、行動データの記述量や学習に関する計算量の増大といった問題をかかえている．また、行動獲得後の新たなデータの追加に関する問題や、獲得された行動の柔軟性に関する問題があり、これらの問題に対しては、エージェントやプランナ的设计や学習方法に関して様々な工夫を加える必要がある<sup>6),7)</sup>．

また、複数エージェントの協調作業を行う場合には、お互いの行動計画に基づいて作業を行うため、それぞれのエージェントの状態を観測し、その情報を取得することが望ましい．しかし、エージェント間のコミュ

ニケーションを増やすことは、通信量の増大という問題を引き起こす．そこで、このような問題を解決する 1 つの方法としてエージェント間の通信を利用せずに、協調作業を実現する方法がある<sup>8)</sup>．これはリアクティブエージェント<sup>9)</sup>を複数利用して目的の作業を行うものである．しかしこの場合、リアクティブエージェントの設計次第で、協調作業が行われたり行われなかったりする問題がある．すなわち、協調作業が必要とされる状態でも、必ずしもそのような行動をエージェントがとる可能性について保証がない．そこで、エージェントが協調行動を行うための動機付けに関する研究で、認知科学からアナロジーをとった Focal Point Algorithm をエージェントの内部情報処理系に導入したものが<sup>10)</sup>．この手法により、Clean-Up Room 問題をエージェントの協調作業により解決している．しかし、Focal Point Algorithm を利用するためには、被作業対象などに属性値を事前に設定する必要があり、またその属性値によりエージェントの行動が影響を受けてしまう．以上のことから、複数エージェントによる協調作業を導入する際の主な問題についてまとめると、

- (1) エージェントの行動データの記述量、
  - (2) 行動学習における計算量、
  - (3) エージェント間の通信量、
  - (4) 協調作業の動機付け、
- などがあげられる．

そこでこれらの問題に対して、ポテンシャル場を利用することとした．以下では本研究で適用するポテンシャル場を利用した方法について述べる．

## 3. ポテンシャル場

本章ではポテンシャル場を利用した方法 ( 人工ポテンシャル法: Artificial Potential Method ) について、その特徴を述べる．

ロボットのナビゲーション問題に対して、ポテンシャル場を導入したものに、文献 11) の研究がある．このポテンシャル場は、ロボットが移動する空間に、目標とする位置に向かってポテンシャルが低く ( 高く ) なり、逆に障害物の周囲では高く ( 低く ) なるような分布で表現される．この目標位置に関するポテンシャル場と障害物に関するポテンシャル場を合成することで、ロボットのナビゲーションに用いる 1 つのポテンシャル場が形成される．

このようにポテンシャル場は、移動空間内に複数の障害物が存在する場合のナビゲーションに利用される場合が多い．これはポテンシャル場がエージェントの

行動表現として、その一挙一動を記述する必要がないことから、行動記述や行動学習の問題を回避できる利点がある<sup>12)</sup>。また、エージェントが動作決定を行う動機付けをこのポテンシャル場を利用して表現が可能であるためである。

これら以上の利点は、エージェント間に協調作業を導入する際にも有効であると考えられる。実際にポテンシャル場をエージェント間の協調作業導入のために利用した例としては、文献 13)、14) などの Robo-Cup Soccer での適用例がある。これはプレーヤーであるエージェントが、各状況(オフェンスやディフェンスなど)に応じた振舞いをさせるために、それぞれのポテンシャル場を設定するものである。この場合、各状況に応じたポテンシャル場の設定はデザイナーによって決定されるため、設定されたポテンシャル場の妥当性など試行錯誤の結果から発見的に得ることとなる。従来の障害物を回避しながら目的地まで移動するナビゲーション問題に適用される場合に比べ複数エージェントの協調作業の導入に利用される場合は、

- (1) 明確な目標とは別に副目標が複数存在するためポテンシャル場の設定方法が複雑、
- (2) 協調作業を導入するためのポテンシャル場の設定は探索が広域、

といった問題がある。以上の問題点から協調作業導入に関して本手法では、ポテンシャル場を計算機実験により探索し獲得する方法を提案する。提案手法により、デザイナーが設定する場合に比べて、広範囲な探索から有効な協調作業が可能となるポテンシャル場を獲得できる可能性が高い。

本章では、本提案手法の有効性を検証するための問題として適用する箱押し問題について述べることにする。

#### 4. 箱押し問題

本論文では、提案手法の有効性を提案するための問題として、箱押し問題( Box-Pushing Problem )を適用することとする。これはエージェントの協調作業を導入する方法の有効性を検証するためのベンチマークテストとして、多く利用される問題である<sup>8)</sup>。

この箱押し問題は、ピアノ移動問題( Piano Mover's Problem )<sup>5)</sup>の副問題で、作業対象である物体を向きや進行方向を変えながら、初期位置から目標位置まで搬送するものである。

エージェントの協調作業による箱押し問題では、各エージェントに対して、

- (1) 作業空間内での移動、

(2) 箱押し作業に加わる方法、タイミング、などを解決する必要がある。作業空間内での移動は、エージェントが作業空間で箱押し作業を行う際に効果的な振舞い(たとえば先回りや待ち伏せなど)をするために必要な移動のことである。これにより、作業工程数が減るというような効果を期待するものである。また箱押し作業に加わる方法、タイミングとは、各エージェントが作業を行ったりやめたりするタイミングのことである。これにより各エージェントの運用効率(たとえば内部エネルギー消費低下)に関する効果を期待するものである。

以上のような問題点をポテンシャル場による表現を利用して各エージェントに対して振舞いの規定をする。そこで本章では、このポテンシャル場の設定方法について述べる。

#### 5. ポテンシャル場の内容と設定

本手法で用いるポテンシャル場は、各エージェントが内部状態として持つ作業マップ上に設定される。このポテンシャル場は、箱押し作業する際の振舞いに関するポテンシャル分布と考えることができる。すなわち、実際に我々がある物体を協調して運ばなければならない作業のときに、その物体を見て直感的にどのように押したり把持したりすればよいのか、あるいは搬送経路中のどの位置あたりで人手が必要となるのか、どこで作業の受け渡しをするとよいのかという雰囲気を表すようなものである。具体的には、エージェントが箱押し作業に関わる位置、または作業の受け渡しをする位置に向けてポテンシャルの勾配が高くなるものである。この方法により、エージェントの動作決定は単純かつ迅速に行うことが可能となる。また各エージェント間のコミュニケーションを利用して協調作業を実現する方法に対して、本手法では明示的なコミュニケーションを用いない。これはエージェントの状態などをポテンシャルの分布に重ね合わせる<sup>12)</sup>ことで、コミュニケーションを代替できる可能性があるためである。

以下では、エージェントの内部状態として設定されるポテンシャル場の設定方法について述べ、次に作業を行うエージェントの設定について述べる。

##### 5.1 ポテンシャル場の設定方法

各エージェントに設定されるポテンシャル場は、箱押し問題に関する計算機実験を通して獲得される。そこで本手法では、このポテンシャル場を探索するために遺伝的アルゴリズム( Genetic Algorithm: GA )を用いる<sup>16)</sup>。これは各エージェントのポテンシャル場を

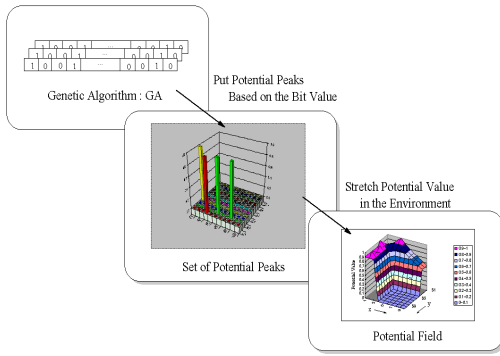


図 1 ポテンシャル場の設定の概要

Fig. 1 Outline of set up the potential field for each agent.

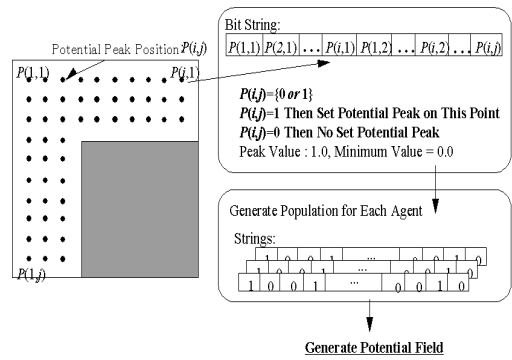
デザイナーが試行錯誤的に探索する場合、対象とする問題の規模（エージェント数や作業空間の広さなど）に比例して、良解を見つけ出すことが困難となる可能性があるためである。GA は一般的に、解の最適性が保証されているわけではないが、広域的探索が可能であり準最適解を見つけることが可能であるという特徴を有することが知られている。そこで本問題においてポテンシャル場の探索に、GA を適用することは有効な手法といえる。

エージェントのポテンシャル場を設定する工程は、図 1 のような手順となる。

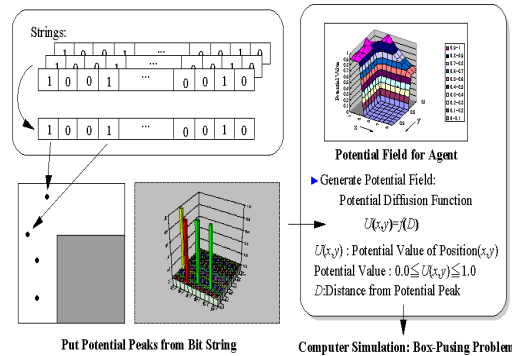
各エージェントの振舞いに関するポテンシャル場を設定するために、作業空間内に適当な間隔でポイントを置き、どこかのポイント位置にポテンシャルのピークを設定するのかについて GA により探索する。ここでポテンシャル場のピークとは、エージェントが対象とする作業空間中に対して、箱押しをする場合に作業にかかりあいを持つ位置、作業の受け渡しを行う位置などについての注視点を表している。

作業空間内にポテンシャルのピークに関するポイントを設定した後の手順は、

- (1) スtring の設定：GA のString の各ビットは、ポテンシャルのピークを設定するポイントと 1 対 1 対応。String 長はポイント数と同一になる。
- (2) String の内容：String の各ビットに対応するポイントへピークを設定する場合は 1、ピークを設定しない場合は 0 を代入。初期ポピュレーションはランダムに設定（図 2 (1)）。
- (3) 各String に対する操作：1 つのString からポテンシャル場を生成。ピークが設定されたポイントを頂点とした連続したポテンシャル場を作業空間内に設定する。



(1) ビットString の設定



(2) ビットString に基づいたポテンシャル場の生成

図 2 ポテンシャル場の生成の詳細

Fig. 2 Details of generation of the potential field.

- (4) ピーク位置から拡散：作業空間内の各位置  $(x, y)$  に対するポテンシャル値  $U(x, y)$  をポテンシャル拡散関数により設定する。ポテンシャル値の重複部分は  $U(x, y)$  の大きい値をとる処理をする。これは設定されたポテンシャル場の特徴を調べるためである（図 2 (2)）。
- (5) (3), (4) の操作をString 中のピーク設定位置（ビットが 1）がなくなるまで繰り返し行う。
- (6) (1) から (5) までの操作を各エージェントに関して行う。

今回利用したポテンシャル場の拡散関数は、式 (1) のように表される。

$$U(x, y) = Ae^{-D} \tag{1}$$

$$D = \sqrt{(x_{peak} - x)^2 + (y_{peak} - y)^2} \tag{2}$$

$U(x, y)$ : Potential Value of Position  $(x, y)$

Potential Value:  $0.0 \leq U(x, y) \leq 1.0$

$D$ : Distance from Potential Peak

$U(x, y)$  は作業空間内の位置  $(x, y)$  におけるポテンシャル値を表し、式 (1) の右辺のパラメータ  $A$  はポテンシャルの広がり方を調整、および正方向の広がり、

負方向の広がりを設定するパラメータである．今回は正方向の広がりのみを設定である． $D$  はポテンシャルのピーク位置  $(x_{peak}, y_{peak})$  から対象としている現在位置  $(x, y)$  までの距離を表している．また今回この関数を適用したのは，ポテンシャルの広がる方向に対して，必ずピーク値と 0 との間の何らかの実数値を各位置  $(x, y)$  に設定することができるためである．

以上により，各エージェントに関するポテンシャル場は設定される．以下では，ポテンシャル場の探索の工程について述べる．

5.2 ポテンシャル場の評価

箱押し作業で，各エージェントの効果的な振舞いを得るために，得られたポテンシャル場の評価を行う必要がある．そこで各エージェントのポテンシャル場の評価手順について以下にまとめる ( 図 3 ) ．

- (1) 計算機実験の実行：生成されたポテンシャル場に基づいて，エージェントによる箱押しについての計算機実験を実行する．
- (2) 計算機実験の評価：実験結果から各エージェントが箱押しに携わった作業ステップ数と，箱押しを通して各エージェントが消費した内部エネルギーにより各ストリングの評価を行う．今回は，以上の条件に関する評価値の高いものが，効率的な振舞いとらせることが可能なエージェントのポテンシャル場であるとする．

今回の評価関数は式 (3) のようなものとした．

$$fitness = \frac{1}{T(i)} + \frac{1}{E(i)} \tag{3}$$

$T(i)$ : Step Engaged in Work of Agent  $i$

$E(i)$ : Energy Consumption in Work of

Agent  $i$

$i$ : Agent Number

ここで評価値は，各エージェントが箱押しに携わった累積作業ステップ数  $T(i)$  と箱押しを通して消費されたエージェントの内部エネルギー量  $E(i)$  から求められる．箱押しに携わったステップ数の評価は，1 エージェントの単独作業を抑えるためであり，またエネルギー消費量の評価は，ステップ数評価と同様に単独作業を抑えるとともに，さらに協働作業の導入を促すために設定される．

各エージェントに関する評価値の総和をとり，この評価値の総和を各エージェントのポテンシャル場の評価値とする．これはエージェント間の協働作業による問題解決を前提とすることから，全体の評価値を向上させるためである．

以下に評価以降の手順について示す．

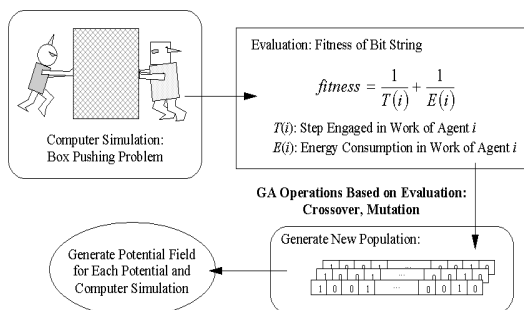


図 3 ストリングの評価および新規ストリングの生成  
Fig.3 Evaluation and generation of new population.

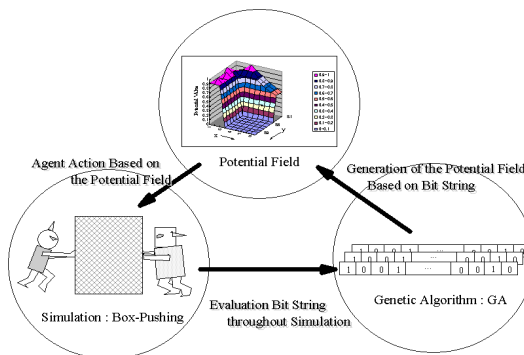


図 4 計算機実験の手順  
Fig.4 Procedure of computer simulation.

- (1) 全ストリングに対して評価を行った後，ストリングに対して GA の操作 ( 交叉，突然変異 ) を実行する．
- (2) 新たに生成されたポピュレーションに対して，ポテンシャル場の設定を行う．

以上の手順を繰り返し，ポテンシャル場を探索する ( 図 4 ) ．以下では作業を行うエージェントの設定について述べる．

5.3 作業エージェントの設定

ここでは，作業空間中に設定されたポテンシャル場に基づいて箱押し作業を行うエージェントの設定について述べる．

エージェントは，作業空間中の自己の周囲 8 近傍のポテンシャル値  $U(x, y)$  を観測するものとする ( 図 5 ) ．今回のエージェントの設定は，8 方向近傍中の最もポテンシャル値の高い方向へ移動するような Greedy な戦略を持つ設定である． $S_{next}(x, y)$  はエージェントの次へ移動する位置， $O(x, y)$  はポテンシャル場の観測位置を表している．エージェントは直径 6 の大きさの円形をしており，一度の移動には距離 10 を移動可能距離とする．ポテンシャル場の測定領域以上に移動

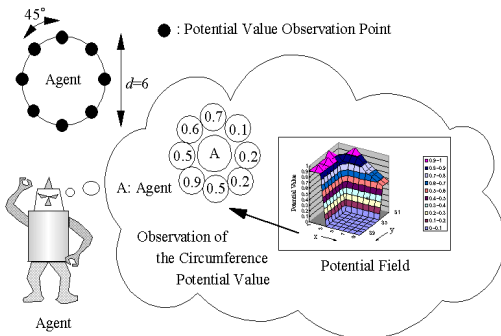


図 5 エージェントの観測可能方向および移動方向

Fig. 5 Agent observes 8 vicinities in the circumference, and moves to the highest potential value point.

可能と設定したのは、ポテンシャルに基づく移動でのデッドロックを避けるためである。

$$S_{next}(x, y) : \max O(x, y) \quad (4)$$

$S_{next}(x, y)$ : Next Agent Position

$O(x, y)$ : Observation Point of Potential Value

またエージェントには、内部状態としてエネルギーを持つ。この内部エネルギーは、エージェントの作業(単独での箱押し/協調による箱押し/移動のみ)によって消費される。

このような設定のエージェントを用いて、協調作業による箱押しの計算機実験を行う。

## 6. 計算機実験の設定

今回の計算機実験では、エージェントの協調作業を導入するために、ポテンシャル場を利用することの有効性を検証することが主題である。そこで計算機実験について、

- (1) 箱押しを行う各エージェントのポテンシャル場を生成した場合、
- (2) 箱の移動に関するポテンシャル場をエージェントのポテンシャル場に情報として付加した場合、
- (3) エージェント数が変化した場合、
- (4) 箱押しの作業負荷が変化した場合、

とする。(1)は本手法の基本特性を検証するための計算機実験であり、(2)は箱押し作業に関して、(1)の設定では箱に関する手がかりがないため、箱押しを完遂するケースが少ないことから、箱の位置に関する情報をポテンシャル場で表し、エージェントのポテンシャル場に付加した場合について検証を行うものである。(3)および(4)は実験条件でエージェントの数が変化した場合、作業負荷の変化が合った場合について、本手法が有効的に機能するかを検証するものである。

本計算機実験で箱押しを行う作業空間は図 6 のよ

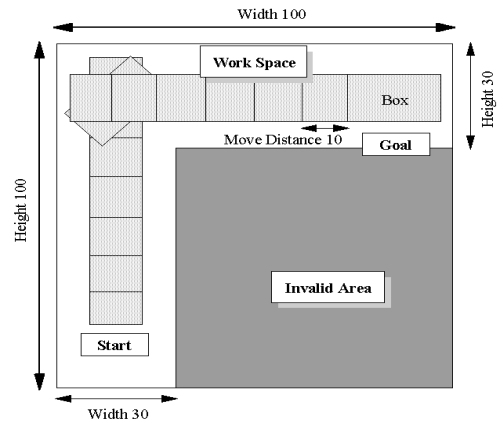


図 6 作業空間

Fig. 6 Simulation work space.

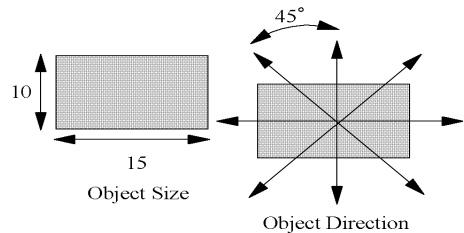


図 7 作業対象のオブジェクト

Fig. 7 Object definition.

うに設定される。

エージェントが作業を行う作業空間は、箱が途中で方向転換が必要となる L 字型のものとした。これにより、少なくともこの L 型の折れ曲がる地点で、協調作業が行われる可能性がある。また同様の理由から、この箱押し問題で作業対象となるオブジェクトのサイズは図 7 の設定である。

本計算機実験に適用される箱押し問題は、エージェントの協調作業を実現する手法の有効性を検証するための基本的な評価試験に用いられる問題である。そこで今回は L 字型の作業空間を用いる<sup>15)</sup>。これは箱押し問題で最もシンプルな問題であり、本手法の基本的な評価を行うためには有効である。またポテンシャル場の探索に利用される GA の設定は、全計算機実験を通じて初期個体数を 100 とし、交叉はルーレット選択に基づいて一点交叉法により行われ、突然変異率は 20 パーセント、子の個体を親の下位個体 10 パーセントと入れ替えるものとした。さらに箱押し作業が完遂しないストリングに対しては、ペナルティの評価値を設定することとした。また計算の繰返しステップ数を 500 ステップとした。

上記各実験における諸条件は次に示す設定とした。



表 1 計算機実験 1 : エージェントのエネルギー消費量

Table 1 Agent energy consumption.

Work Style	Single	Cooperative	Non Pushing
Energy Consumption	4	2	1

Total number of work agent: 2

Initial agent energy: 100

表 2 計算機実験 2 : エージェントのエネルギー消費量

Table 2 Agent energy consumption.

Work Style	Single	Cooperative	Non Pushing
Energy Consumption	4	2	1

Total number of work agent: 2

Initial agent energy: 100

### 6.1 計算機実験 1 の設定

エージェントの箱押しの際に消費するエネルギーは表 1 のような設定となる。またエージェント数は 2 , 各エージェントが持つ内部エネルギーの初期値は 100 とした。

表 1 から箱押し作業へのエージェントの携わり方により、エージェントの内部エネルギーの消費量が異なることが分かる。表 1 中、「Single」は 1 エージェントが単独で箱押しを行う場合、「Cooperative」はエージェントの協調作業、「Non Pushing」は箱押しをともなわない移動を表している。これらの設定は、効率的な協調作業を作業工程数が少ないものと、エージェントの内部エネルギーの消費量が少ないものとを定義したことから、1 エージェント単独での箱押しに対する重みを大きくしている。また、箱押しをともなわないエージェントの移動による内部エネルギーの消費は、無駄に作業空間内の移動を抑えることを目的としている。表 1 の下欄は、それぞれの状態でのエネルギー消費量を表している。

### 6.2 計算機実験 2 の設定

計算機実験 2 の設定は表 2 のようになる。

またこの計算機実験以降では、箱押し作業を行うために、箱押しの手がかりとなる情報をポテンシャル場としてエージェントの持つポテンシャル場に付加する。この箱に関する情報は、箱が移動するごとに更新されるもので、そのつどエージェントの持つポテンシャル場に付加するものである。またこのポテンシャル場は、箱に向かって傾斜が高くなっているものである。これは計算機実験 1 の設定では、目標位置まで箱押しを完遂した結果を得た割合が低いことによる。このポテンシャル場を付加することで、各エージェントの振舞いに関するポテンシャル場の探索が迅速に行われる可能性が高い。

エージェントのポテンシャル場に箱のポテンシャル

表 3 計算機実験 3 : エージェントのエネルギー消費量

Table 3 Agent energy consumption.

Work Style	Single	Cooperative	Non Pushing
Energy Consumption	4	2	1

Total number of work agent: 3

Initial agent energy: 100

Potential composition parameter:

Importance  $\alpha$ : 0.9, Importance  $\beta$ : 0.1

場の付加は式 (5) に基づく。

$$U_{comp.}(x, y) = \alpha U_{agent}(x, y) + \beta U_{box}(x, y, t) \quad (5)$$

$U_{comp.}(x, y)$ : Composition Potential Value at a Point  $(x, y)$

$U_{agent}(x, y)$ : Agent Potential Value at a Point  $(x, y)$

$U_{box}(x, y)$ : Box Potential Value at a Point  $(x, y)$ , Step  $t$

$t$ : Move Step

$$U_{box}(x, y): 0.0 \leq U_{box}(x, y) \leq 1.0$$

式 (5) 中で  $U_{comp.}(x, y)$  は位置  $(x, y)$  での合成ポテンシャル値を表しており、 $U_{agent}(x, y)$  は位置  $(x, y)$  でのエージェントの持つポテンシャル値を表しており、 $U_{box}(x, y)$  は位置  $(x, y)$  における移動ステップ  $t$  のときの箱のポテンシャル値を表している。また  $\alpha$  と  $\beta$  は各ポテンシャル場の重視度を表すパラメータである。

そこで本実験では重視度を表すパラメータ値を  $\alpha = 0.9$  ,  $\beta = 0.1$  と設定する。これはエージェントの持つ箱押しに関する振舞いを規定したポテンシャル場を重視することで箱のポテンシャル場の影響を抑え、様々な振舞いが得られることで、GA による広域探索が効果的に行われることを目的とするためである。

### 6.3 計算機実験 3 の設定

計算機実験 3 の設定は表 3 のようになる。

ここ実験では 3 エージェントで箱押しを行う。ポテンシャル合成の重視度パラメータはそれぞれ  $\alpha = 0.9$  ,  $\beta = 0.1$  とする。3 エージェントで箱押し作業を行うことで、2 エージェントの場合でのエージェントの振舞いや、得られるエージェントのポテンシャル場について比較をする。

### 6.4 計算機実験 4 の設定

計算機実験 4 では箱押しでのエージェントへの作業負荷が変化する場合について、各エージェントの振舞いやポテンシャル場の設定などの変化について検証するものである。

そこで最初の計算機実験の設定は、作業空間中の L 字に屈折する点を境にして、初期位置側を前半、目標位置側を後半と分け、そして前後半それぞれの領域で

表 4 計算機実験 4：エージェントのエネルギー消費量  
Table 4 Agent energy consumption.

Work Style	Single(First)	Cooperative(First)	Single(Latter)	Cooperative(Latter)	Non Pushing
Energy Consumption	4	2	6	3	1

Total number of work agent: 3  
Initial agent energy: 100  
Potential composition parameter:  
Importance  $\alpha$ : 0.9, Importance  $\beta$ : 0.1

表 5 計算機実験 5：エージェントのエネルギー消費量  
Table 5 Agent energy consumption.

Work Style	Single	Cooperative	Non Pushing
Energy Consumption	4	2	1

Total number of work agent: 3  
Initial agent energy: 100  
Potential composition parameter:  
Importance  $\alpha$ : 0.9, Importance  $\beta$ : 0.1

箱押しが行われるときの作業付加が異なるものである。表 4 にこの計算機実験での設定を示す。

表 4 中の上欄の「Single ( First )」は、作業空間中の前半部分での 1 エージェントの単独作業の場合に消費される内部エネルギー量である。「Cooperative ( First )」は、前半部分での協調作業の際に消費される内部エネルギー量。「Cooperative ( Later )」は後半部分での箱押しの協調作業で消費される内部エネルギー量。最後に「Non Pushing」は、箱押しをとまわらないエージェントの移動による内部エネルギーの消費量を表す。

この計算機実験でのエージェントのエネルギー消費量の設定は、作業空間の 3 次元方向への変化がある場合を想定している。ここでの場合、作業空間の後半部分が上り坂になっているようなものを想定している。

次の計算機実験の設定は、エージェントが箱押しに携わる時間に応じて、エージェントの内部エネルギー消費量が非線形に増加するものである。これはエージェントの疲労をエネルギー消費関数で表すものである。実世界の労働を見ると、長時間の労働による疲労が人間には現れる。そこで、この箱押しをするエージェントに疲労を導入することで、これに応じた特徴的な振舞いが現れるか検証をする。以下にこの計算機実験での設定を示す(表 5)。

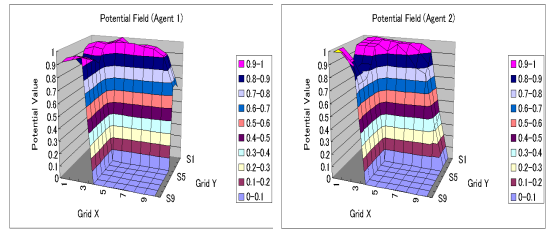
$$E(i) = E(i) + \alpha R(i, t)^2 C(i) \quad (6)$$

$E(i)$ : Energy Consumption of Agent  $i$

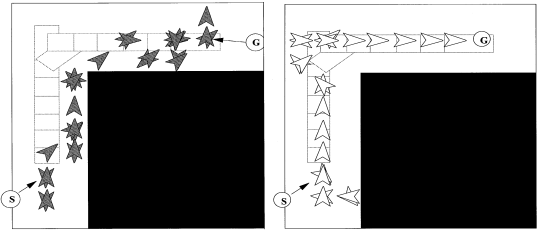
$\alpha$ : Adjustment Parameter

$R(i, t)$ : Amount of Repetition Work of Agent  $i$  at Step  $t$

$C(i)$ : Consumption Energy of Agent  $i$



(1) Potential Field



(2) Agent and Box Trajectories

図 8 結果：計算機実験 1

Fig. 8 Simulation result 1.

ここで、 $E(i)$  はエージェント  $i$  の内部エネルギー消費量で、 $\alpha$  は調整パラメータ、 $R(i, t)$  は作業ステップ  $t$  時での作業継続によるエージェント  $i$  の累積作業ステップ数、 $C(i)$  はエージェント  $i$  の内部エネルギー消費量を表している。

以上のような実験条件の設定に基づいて行った計算機実験の結果を次章で述べる。

### 7. 計算機実験の結果

前章での 4 つの実験条件のもとで計算機実験を行った結果について示す。実験結果は、箱押しを行った際に得られた各エージェントの移動奇跡と、そのときの作業空間中での振舞いを規定した作業空間に設定されたポテンシャル場について示す。それぞれ示される結果は、GA のストリングの評価値が最も高いものである。これにより、エージェントの振舞いや得られたポテンシャル場は、作業空間の特徴や問題の特徴を反映したものであるといえる。

#### 7.1 計算機実験 1 の結果

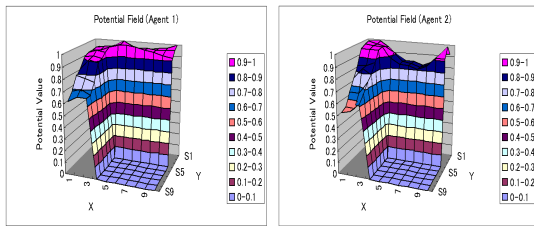
図 8 にこの計算機実験に関する結果を示す。この結果より、作業空間中でのエージェントの振舞いに関するポテンシャル場のみを設定した場合、現在の実験条件下では規定の計算ステップ終了時点で、箱押しの作業を完遂できないポテンシャル場の生成が全体の約 75 パーセント以上になった。

表 6 に得られた結果での最小作業ステップ数、および最大作業ステップ数を示す。ここで最小および最大

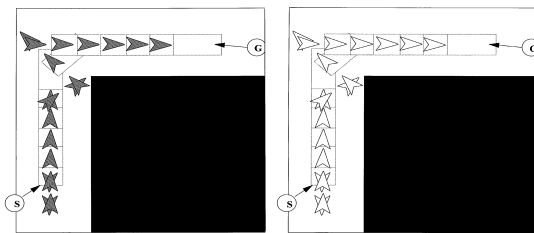


表 6 計算機実験 1 における作業ステップ  
Table 6 Simulation result of work step.

Step	Result (Min)	Result (Max)	Average (Reached Data)	Not Reached
Step	17	22	19	75%



(1) Potential Field



(2) Agent and Box Trajectories

図 9 結果：計算機実験 2  
Fig. 9 Simulation result 2.

作業ステップとは、箱押し作業が完遂するまでにエージェントが作業空間中を移動していた時間を表すものである。

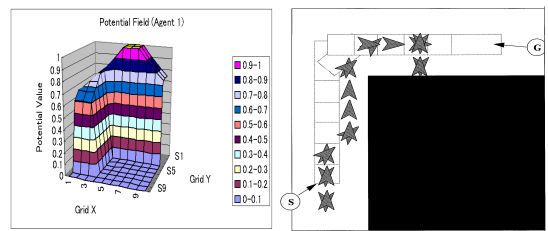
各エージェントと箱の移動軌跡を示したグラフ(図 8(2))より、2 エージェント間で箱の方向転換をしている部分で、それぞれ別々に作業にかかわっていることが分かる。よってエージェントの移動奇跡からは、エージェントの振り舞いに関するポテンシャル場の設定から作業の分担による協調作業が行われていると考えることが可能である。そこでこの結果が得られた場合の各エージェントのポテンシャル場(図 8(1))を見ると、少なくともスタート位置からポテンシャル分布が箱のある位置に沿って高くなり、傾斜方向が目標地点に向かって緩やかながら高くなるような張り方をされたものであった。

7.2 計算機実験 2 の結果

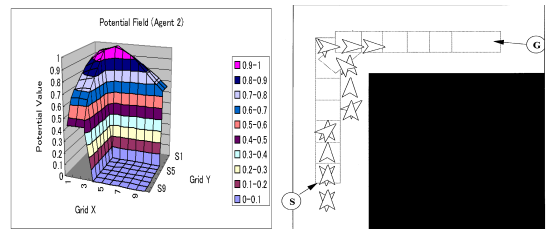
図 9 に計算機実験 2 で得られた結果について示す。

各エージェントの移動奇跡に関するグラフ(図 9(2))から、2 エージェントが同じ振り舞いをとることが評価の高い作業結果となった。この移動奇跡の結果から、初期位置から目標位置まで 2 エージェントによる協調作業が行われたと見なすことができる。

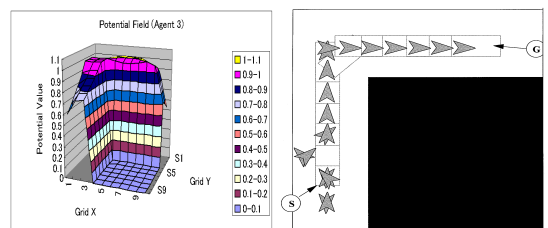
そこで、得られた各エージェントに関するポテンシ



(1) Result—Agent 1



(2) Result—Agent 2



(3) Result—Agent 3

図 10 結果：計算機実験 3  
Fig. 10 Simulation result 3.

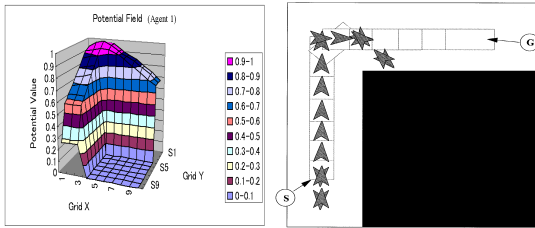
ル場(図 9(1))を見ると、計算機実験 1 と比較して作業空間中の L 字部分の後半に向かってポテンシャル分布が、同様に高くなる傾向にある。Agent1 については作業空間の後半に向かって高いポテンシャル値が存在する分布となり、Agent2 については作業空間の折れ曲がり部分、および箱押しの目標位置付近に高いポテンシャル値のあるポテンシャル場となった。

ここで示されているポテンシャル場は各エージェントのポテンシャル場のみで、箱に関するポテンシャル場を付加していないものである。

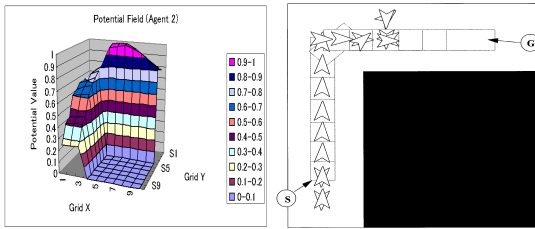
7.3 計算機実験 3 の結果

この計算機実験では 3 エージェントによる箱押しを行った。得られた実験結果を図 10 に示す。

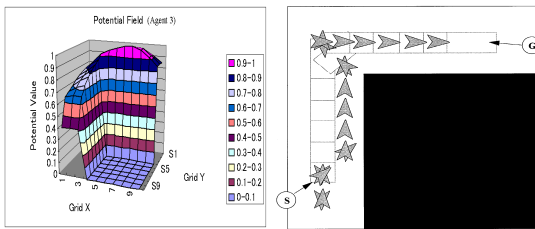
エージェントの振り舞いを示すグラフ(図 10(1),(2),(3)の右側)から、各エージェントで箱押しへのかかり方が異なることを表す移動軌跡が得られた。この得られた移動軌跡から、作業空間中の前半部分で箱押しに携わるエージェントと、作業空間中の後半部分で箱押しに携わるエージェント、ほぼ箱押し作業全般にわ



(1) Result—Agent 1

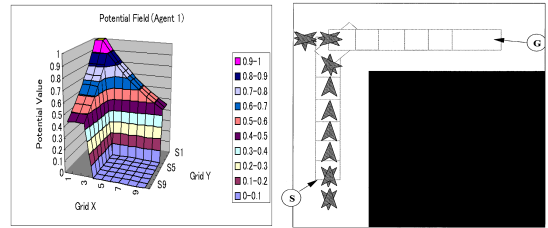


(2) Result—Agent 2

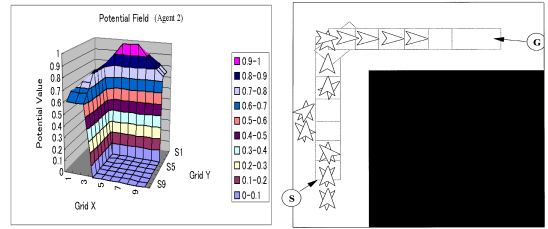


(3) Result—Agent 3

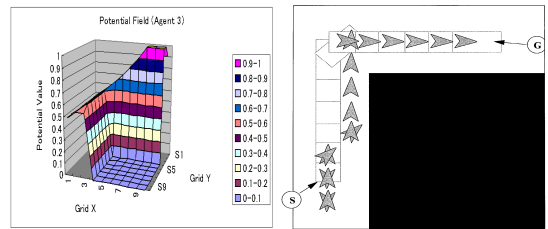
図 11 結果：計算機実験 4-1  
Fig. 11 Simulation result 4-1.



(1) Result—Agent 1



(2) Result—Agent 2



(3) Result—Agent 3

図 12 結果：計算機実験 4-2  
Fig. 12 Simulation result 4-2.

たって携わるエージェントに分かれていることが示された。これから Agent3 を軸として Agent1 と Agent2 が作業空間の前半部分と後半部分とで分かれて協調作業を行っていると見ることができる。

また各エージェントのポテンシャルの分布 ( 図 11 (1), (2), (3) の左側 ) から、各エージェントの振舞いが得られた各ポテンシャル場に基づいて規定されることが分かる。

### 7.4 計算機実験 4 の結果

作業空間の前半と後半で箱押し作業の負荷が変化する場合についての実験結果を図 11 に示す。

作業空間の前半で箱押しを行うエージェントと後半で箱押しを行うエージェントに分かれていることが分かる。前半部分で箱押しを Agent1 と Agent2 は協調して行っていると見ることができる。作業空間後半では Agent3 を箱押し作業と Agent1 と Agent2 に代わって行っている。これは前半から作業を受け継ぐ形の協調作業が行われていると見ることができる。

このときの各エージェントの振舞いに関するポテン

シャル場 ( 図 11 (1), (2), (3) の左側 ) で、前半の箱押しを行った Agent1 と Agent2 は、作業空間中の L 字の折れ曲がり部分付近にポテンシャル分布が高い領域があり、後半部分での箱押しを行った Agent3 のポテンシャル分布は、箱押しの目標地点付近が高くなった。

次に箱押しの作業負荷が、作業に携わるステップ数に応じてエージェントの内部エネルギーの消費量に変化する場合について述べる。図 12 にこの実験条件での結果を示す。

各エージェントの移動軌跡 ( 図 12 (1), (2), (3) の右側 ) から、各エージェントの箱押しに携わる方法が、作業空間の前半部分、L 字部分を含む中盤、そして後半部分とに短く分かれる結果となった。

また各エージェントのポテンシャル場 ( 図 12 (1), (2), (3) の左側 ) から、箱押し作業の前半部分を受け持った Agent1 では、L 字の折れ曲がる近辺でポテンシャル値の分布の高い領域が存在した。中盤で箱押しを行う Agent2 は、作業空間後半の中間付近にポテンシャル値の高い領域が存在した。そして箱押しを作業

空間後半で行う Agent3 では、箱押し作業の目標地点付近でポテンシャル値の高い分布となった。

以上の計算機実験の結果から、本提案手法によるエージェントの振舞いを規定するポテンシャル場を利用して、複数エージェント間に協調作業を導入することは可能であることが分かった。また箱押しに関する作業条件の変化に対して、それぞれに応じたエージェントの振舞いに関するポテンシャル場を GA により探索することで獲得することができることが明らかとなった。

次章では以上の実験結果についての詳細な考察について述べる。

## 8. 考 察

複数エージェントの協調作業を実現させるための本提案手法について、上記の計算機実験により評価を行った。これらの結果から各計算機実験について考察を加える。最初に得られた各エージェントの振舞いを規定するポテンシャル場について考察を加える。

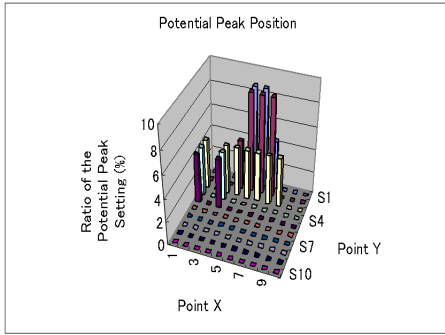
- (1) 計算機実験 1：箱に関するポテンシャル場を設定しない場合では、各エージェントのポテンシャル場は、箱の移動経路に沿ってポテンシャル値が高い分布となり、また目標位置へ向かって緩やかに高くなる傾斜を有している。これは箱押しを完遂するためには、目標位置に向かって箱を運ぶようにエージェントを振る舞わせる必要があることから、図 8 中のポテンシャルの分布となったと考えられる。
- (2) 計算機実験 2：各エージェントのポテンシャル場から、箱押しに関するポテンシャル場を付加した場合でも、計算機実験を通じて作業空間後半部分にポテンシャルの高い領域が存在するポテンシャル場を得た。これは今回の箱押し作業の特徴の影響を受けたものと考えられる。エージェントの移動軌跡は、両エージェントともに同じ物が得られたが、特に Agent2 では得られたポテンシャル場に対して、エージェントの振舞いが箱押しを目標位置まで継続した結果となった。これは付加された箱に関するポテンシャル場によるものと、エージェントの移動能力の設定によるものとの複合的要因が考えられる。
- (3) 計算機実験 3：エージェント数が 2 エージェントから 3 エージェントへ変化した場合に得られたエージェントのポテンシャル場は、Agent3 を軸とした協調作業を導入するものが得られたが、これはエージェント全体での作業ステップ数と

内部エネルギー消費量の評価の影響が現れたものと思われる。これにより、Agent1 や Agent2 の箱押しが前半部分と後半部分に分かれて行われるものとなったと考える。これは、最初から全エージェントでの協調作業で箱押しを行うと作業ステップに関する評価を下げ、また部分的にでもあるエージェントが単独で箱押しを行うと内部エネルギーの評価を下げてしまうということに起因しているものと考えられる。

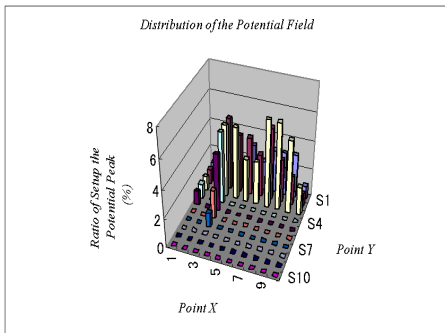
- (4) 計算機実験 4：まず作業空間の前半と後半で箱押しの作業負荷が変化する場合について述べる。作業負荷の低い作業空間前半部分では、Agent1 と Agent2 による協調作業により箱押しが行われ、作業負荷が高い後半部分では、後半途中まで前半部分で箱押しを行ったエージェントが、後半部分から箱押しに加わった Agent3 とともに箱押しを行い、最終的に目標位置までは Agent3 が単独で箱押しを行った。このような振舞いを規定したポテンシャル場が得られた理由として、後半部分での内部エネルギー消費量が高くなる設定が評価に影響を与えたためといえる。次に箱押し作業に携わる時間に応じて内部エネルギーの消費量が非線形的に高くなる場合では、Agent1 が前半部分、Agent2 が折れ曲がりを含む中盤、Agent3 が後半部分に箱押し携わった。このような振舞いをしたエージェントのポテンシャル場が得られたのは、箱押しの継続に比例して増加する内部エネルギー消費量の影響があるためであると考えられる。よって各エージェントの箱押しへのかわり方が前半、中盤、後半と分かれる要因となったといえる。

そこで 3 エージェントを利用した計算機実験 3 および 4 について、それぞれの設定された実験条件がエージェントのポテンシャル場の生成に与えた影響について見ることとする。以下にエージェントの振舞いを規定するポテンシャル場を生成する際に必要となるポテンシャルのピーク値が、それぞれの実験条件に対してどのように設定されたのかを示すピーク値の位置分布から考察を加えることとする。

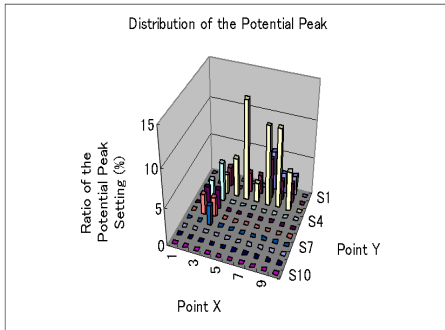
図 13 はそれぞれの実験条件において、繰り返し 50 回の計算機実験を行い、各計算機実験での評価の最も良い GA のストリングに基づいて集計されたものである。またこの分布図は、3 エージェントのポテンシャルのピーク位置を合わせたものを示している。これによりピーク位置の分布が実験条件を反映しているか調べることができる。



(1) Simulation 3



(2) Simulation 4-1



(3) Simulation 4-2

図 13 ポテンシャルピーク位置の分布  
Fig. 13 Potential peak position.

ポテンシャル場のピーク位置の分布から、まず計算機実験 3 では、作業空間中で L 字の折れ曲がりの部分の手前、前半の終わり部分から後半全般にわたってピーク値が分布していることが分かる。これは協調作業をする明らかな動機が設定条件としてもないため、作業空間のどの領域で協調作業を導入しても箱押し作業に関する評価への影響が小さいためと考える。

次に計算機実験 4 では、まず作業負荷が作業空間の後半部分で高くなる実験条件において、後半部分にポテンシャルのピーク値が多く設定されていることが分

かる。そしてエージェントの内部エネルギー消費量が箱押しに携わる時間に比例して変化する場合、作業空間の前半、中盤、後半とピーク値の設定領域が分かれる傾向にある。この計算機実験 4 では、まず作業負荷や内部エネルギーの消費量といった協調作業を導入するための明確な動機があるため、計算機実験 3 でのピーク値分布に対して特徴のあるピーク値の分布となった。

よって以上のことから、設定された実験条件によって、それぞれの条件を反映したポテンシャル場を生成することが可能であるといえる。

これらの考察および計算機実験の結果より、ポテンシャル場をエージェントの振舞いの制御に用いることは可能であるといえる。またデザイナーがエージェントのポテンシャル場を設定するのではなく、計算機実験を通して協調作業を導入するためのエージェントのポテンシャル場を獲得させることも可能である。

しかし本手法の問題点も明らかとなった。それはポテンシャル場でエージェントの振舞いを規定し、エージェントの行動制御に利用する際、緻密な振舞いをさせることができないこと、また計算機実験を通して得られるエージェントのポテンシャル場は、同一の条件のもとで繰り返し実験を行うたびに大よそのポテンシャルの分布傾向は一致するが、完全な再現性がないことである。前者はエージェント間の協調による効率的な作業の次元に関して今回用いた手法の限界を示しており、また後者は得られるポテンシャル場の抽象的な性質からポテンシャル場から実験条件に対する有効性の解析を難しくさせるといえる。

## 9. 結 論

今回本論文では、エージェントの協調作業を導入する際に問題点となることについてまとめ、これらの問題点に対処して複数エージェントの協調作業を実現する方法として、ポテンシャル場を用いた手法を提案した。箱押し問題を通して計算機実験により本手法の基本的な有効性に関して検証を行った。これにより、複数エージェントの協調作業を導入するために、ポテンシャル場を用いたエージェントの振舞いの制御が可能であることが確認できた。また現在の手法での問題点についても明らかにした。

## 参 考 文 献

- 1) Konolige, K. and Nilsson, J.N.: Multiple-Agent Planning Systems, *AAAI-80*, pp.138-142 (1980).

- 2) Georgeff, M.: Communication and Interaction in Multi-Agent Planning, *AAAI-83*, pp.125-129 (1983).
- 3) Kealbling, L.P., Littman, M.L. and Moore, A.W.: Reinforcement Learning: A Survey, *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol.4 (1996).
- 4) Tan, M.: Multi-Agent Reinforcement Learning: Independent vs. Cooperative Agents, *Proc. 10th Int. Conf. on Machine Learning*, pp.330-337 (1993).
- 5) Sen, S. and Durfee, E.H.: Unsupervised Surrogate Agents and Search Bias Change in Flexible Distributed Scheduling, *1st Int. Conf. on Multi-Agents Systems* (1995).
- 6) Sen, S., Sekaran, M. and Hale, J.: Learning Coordinate without Sharing Information, *AAAI-94*, pp.126-131 (1994).
- 7) Moore, A.K. and Atkeson, C.G.: Part-Game Algorithm for Variable Resolution Reinforcement Learning in Multidimensional State-Space, *Machine-Learning*, Vol.21, pp.199-233 (1995).
- 8) Mataric, M.J., Nilson, M. and Simsarian, T.K.: Cooperative Multi-Robot Box-Pushing, *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.556-561 (1995).
- 9) Brooks, R.A.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, *IEEE Journal of Robotics and Automation RA-2*, pp.14-23 (1986).
- 10) Fenster, M., Kraus, S. and Rosenschein, J.S.: Coordination without Communication: Experimental Validation of Focal Point Techniques, *ICMAS-95* (1995).
- 11) Khatib, O.: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *Int. Journal of Robotics Research*, Vol.5, No.1, pp.90-98 (1986).
- 12) 奥富正敏, 森 政弘: ポテンシャル場を用いたロボットの動作決定, *日本ロボット学会学会誌*, Vol.1, No.3, pp.66-72 (1983).
- 13) Reikki, J., Pajala, J., Tikanmaki, A. and Roning, J.: Executing Primitive Tasks in Parallel, *Proc. 2nd RoboCup Workshop* (1998).
- 14) Tews, A. and Wyeth, G.: Using Centralised Control and Potential Field for Multi-Robot Cooperation in Robotic Soccer, *Proc. PRIMA-98*, pp.176-190 (1998).
- 15) Schwartz, J.T. and Sharir, M.: On the Piano Movers Problem, the Case of a Two Dimensional Rigid Polygonal Body Moving Amidst Polygonal Barriers, *Comm. on Pure and Ap-*

*plied Mathematics*, Vol.36, pp.345-398.

- 16) Makino, T., Naruse, K., Yokoi, H. and Kakazu, Y.: Using Potential Field for Modeling of the Work-Environment and Task-Sharing on the Multi-Agent Cooperative Work, *The Pacific Asian Conf. on Intelligent Systems*, pp.37-44 (2001).

(平成 14 年 8 月 23 日受付)

(平成 14 年 10 月 11 日再受付)

(平成 14 年 10 月 25 日採録)



牧野 勤

1974 年 5 月 9 日生 . 1999 年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了 . 現在 , 同専攻博士後期課程在籍 . 農用車輛の自律化 , 除雪ロボットの開発 , 屋外作業ロボットの経路計画に関する研究に従事 .



成瀬継太郎 (正会員)

1968 年 3 月 30 日生 . 1995 年北海道大学大学院工学研究科精密工学専攻博士後期課程修了 . 工学博士 . 1995 年から 1998 年にかけて米国ニュージャージー工業大学においてポストドクター研究員 . 同年より北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻複雑系工学講座助手 .



横井 浩史 (正会員)

1963 年 8 月 1 日生 . 1993 年北海道大学大学院工学研究科精密工学専攻博士後期課程修了 . 工学博士 . 同年 , 生命工学工業技術研究所研究員を経て , 1995 年から北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻複雑系工学講座助教授 . 日本機械学会 , 計測自動制御学会等各会員 .



嘉数 侑昇 (正会員)

1941 年 10 月 3 日生 . 1973 年北海道大学大学院工学研究科精密工学専攻博士課程修了 . 工学博士 . 現在 , 北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻複雑系工学講座教授 . 日本機械学会 , 計測自動制御学会 , 日本ロボット学会 , 精密工学会等各会員 .