

遺伝的プログラミングを用いた ロボカップレスキューエージェントの自動設計

上田 知幸^{†1} 小野 智司^{†1} 中山 茂^{†1}

本研究では、遺伝的プログラミングのベンチマーク問題としてロボカップレスキューシミュレーション (RCRS) に着目し、救助エージェントの自動設計を試みる。本研究では本問題を、種類の異なるノードの組み合わせによりエージェントの意思決定手順を生成する組み合わせ問題として定式化し、進化計算アルゴリズムによって解を求める。これまでに提案されている方式では、エージェント間の協調的な行動が生成できないという問題があった。提案する方式では、エージェント同士が通信を行うことで情報を共有でき、協調的な行動の生成が期待できる。また、進化過程でヒューリスティックをウイルスとして含んだ個体を集団に取り入れることで、進化計算の探索効率の向上を図る。

RoboCup Rescue Simulation Agent Design Using Genetic Programming

TOMOYUKI UEDA,^{†1} SATOSHI ONO^{†1}
and SHIGERU NAKAYAMA^{†1}

This paper attempts to apply Genetic Programming (GP) to agent design for RoboCup Rescue. This paper formulates the rescue Agent's decision-making procedure as a combinatorial search problem, and solves it by GP. Although Previous work has shown that GP could design the fundamental behavior of agents, and that it is difficult to generate coordinated action, the proposed developed system can generate coordinated action using communication between agents. The proposed method also attempts to improve search efficiency of GP by adopting virus infection in which is occasionally incorporated into individuals containing the heuristic.

1. 研究の背景と目的

1995年1月17日の阪神・淡路大震災では6,500人以上が死亡し、2011年3月11日の東日本大震災では15,000人以上が死亡し、インフラ、住宅などにも大きな被害をもたらした。このような背景を受け、AIとロボティクスに対して、災害救助への貢献が強く求められている。本研究で扱うRoboCup Rescue Simulation(RCRS)は、阪神淡路大震災が契機となって企画された。災害現場におけるあらゆる事象を研究対象とするシミュレーションプロジェクトであり、大規模災害に対して、ロバストな社会を創ることを目標としている。プラットフォームとして、マルチエージェントシミュレーションを採用しており、仮想災害空間において、複数のエージェントが協調して災害救助に取り組むように設計されている。数々の研究チームがプロジェクトに参加し、救助エージェントの開発を行なっている¹⁾²⁾。

エージェントの行動アルゴリズムを自動設計する方式として、粒子群最適化手法³⁾、蟻コロニー最適化手法⁴⁾、遺伝的プログラミング手法⁵⁾などが広く研究されている。Andrew⁵⁾は、遺伝的プログラミング (Genetic Programming : GP) を用いてRCRSの救助エージェントを自動設計する方式を提案している。この手法では、単体の救助エージェントとして論理的な行動を生成することができた。しかし、協調的な救助活動を行うエージェントが生成できない、GPによる探索空間が大きいなどの問題があった。

本研究では、エージェント同士の通信⁶⁾を行うことで情報共有できる仕組みを追加し、より協調的な救助エージェントの設計を試みる。また、探索の効率化を図るため、GPの進化過程でヒューリスティックを含んだ個体を、集団の中に取り入れることとする。なお、探索空間を縮小するために、救助エージェントの中でも、消防隊エージェント (Fire Brigade : FB) のみを自動設計する。実験により、エージェント間の通信の有効性を確認した。

2. 関連研究

2.1 RoboCup Rescue Simulation

RCRSは被災した都市を対象として、マルチエージェントによる効率的な救助戦略の実現を目指すマルチエージェントシステムである。マルチエージェントとは、知的な行動主体であるエージェントの集団である。RCRSには、救助エージェントとして、救急隊 (Ambulance

^{†1} 鹿児島大学 理工学研究科 情報生体システム工学専攻 Department of Information Science and Biomedical Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University



図 1 RCRS の GUI

Team : AT), 消防隊 (Fire Brigade : FB), 啓開隊 (Police Force : PF) が存在する。RCRS の参加者は、これらの救助エージェントを実装し、被災した都市における効率的な救助活動を目指す。RCRS は毎年、世界大会が開かれ、各チームが研究、開発した救助エージェントによる救助戦略を競っている。図 1 は、RCRS のマップの一つであり、神戸市がモデルとなっている。

RCRS には二つの通信方式が存在する。一つは発話による直接通信を行う方式である。発話による通信は限られた範囲内にいるエージェントと通信が可能である。もう一つの方式は、無線による間接通信である。この方式は、範囲に制限はなく、マップ上のすべてのエージェントと通信が可能となる。また、RCRS の 1 ステップの通信料は 256byte に制限されている。

RCRS では、都市に設定されている都市の価値をどれだけ維持できたかで優劣が決定される。この都市の価値がスコアとなり、リーグ参加者はこのスコアを競っている。RCRS の結果であるスコア算出の式を式 (1) に示す。

$$Score = \left(p + \frac{H}{H_{max}} \right) \times \sqrt{\frac{B}{B_{max}}} \quad (1)$$

P :生存している市民、災害救助エージェントの数

H :すべての市民、災害救助エージェントの残りの体力の合計

H_{max} :初期状態のすべての市民、災害救助エージェントの体力の合計

B :燃え残った建物の面積

B_{max} :初期状態のすべての建物の面積

2.2 ウイルス感染進化論

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) や、GP は最適解探索手法の一つであり、初期条件に依存せず局所最適解を避け、最適解の探索が可能という特徴をもつ。一方で、最適解を得るまでの計算時間が長いという欠点がある。計算時間を短縮する方法として、ウイルス感染進化論がある。ウイルス感染進化論は生物はウイルスの感染により進化するという考えに基づいている。ウイルス感染進化論は、ある個体に生じた性質が集団に波及するまでに世代を重ねる必要がなく、ウイルスの爆発的な感染力によって、個体から個体へ遺伝子が急速に拡散し、進化することが可能となる。この点に着目し、GA、GP の計算時間の短縮が期待できる。中谷らは¹⁰⁾、ウイルスを遺伝子を運ぶ生物器官の一つとしてとらえ、ウイルス感染を唯一の探索操作としている。ウイルスとして、適応度の高い染色体のもつ遺伝子の一部を集団全体に拡散させている。中谷らが提案したウイルス感染進化論に基づく進化型アルゴリズムは、GA と比較を行い、計算時間が短く、収束も速く、最適解を得る確率も高いという結果が確認されている。

2.3 先行研究

現在、複数の自律的なエージェントが協調することにより複雑な問題の実現を目指すマルチエージェントシステムが注目されている。マルチエージェントシステムは、人間が問題に対応した協調行動を完全に記述することが困難であるため、機械学習を用いて協調行動の獲得を行う研究が行われている。

GP は様々な自律エージェントの設計に応用されている⁷⁾⁸⁾⁹⁾。Runka⁵⁾ は、RCRS の救助エージェントの意思決定手順を木構造で表現し、GP に適用する方式を提案している。

GP で、三種類の救助エージェントを自動設計した。この方式では、単体のエージェントとして論理的な行動を生成できる。しかし、複数のエージェント間における協調行動が生成できない、GP の探索空間が大きいという問題があった。

3. 提案する方式

3.1 概 要

本稿では、RCRS の消防隊エージェントを GP により自動設計する。本稿で提案する方式と Runka⁵⁾ が提案している方式を比較すると以下のような違いがある。

- 自動設計する救助エージェントの種類

先行研究では 3 種類の救助エージェント (AT, FB, PF) を自動設計しているが、本研究では、1 種類の消防隊エージェント (FB) のみ自動設計する。

- 通信の有無

先行研究では、エージェント間における通信を行っていないが、本研究では、通信を行い、情報の共有を図る。

- ヒューリスティックの利用

本研究では、GP の進化の過程で、ヒューリスティックを含んだ個体を集団に取り入れることとした。

3.2 従来手法における木構造を構成するノード

一般的に、木構造において、子ノードをもつノードを非終端ノード、子ノードをもたないノードを終端ノードと呼ぶ。本方式で生成する木構造では、非終端ノードと終端ノードをさらに 4 種類のシンボルに分類する。表 1 に 4 種類のシンボル (A, B, S, L) の説明を示す。Andrew⁵⁾ は、これらのノードを組み合わせることで木構造を生成している。本セクションでは、木構造を構成するノードの種類について述べる。

Action(A) シンボル

救助エージェントの行動を表すノードである。このノードによって、FB エージェントは、移動するか、消火するかなどの行動を決定する。A シンボルに分類されるノードを表 2 に示す。以後、本稿では括弧内に子ノードを表し、終端ノードは括弧内が空とする。各ノードは戻り値をもっており、親ノードがその戻り値を受け取る。A シンボルの中でも、if Action

表 1 シンボルの説明

シンボル名	名 前	説 明
A	Action	木の根となるノードでエージェントの行動を表す
B	Boolean	真, 偽を表し, エージェントの判断基準となる
S	Selector	エージェントの行動対象を選択する
L	List	条件にあうオブジェクトのリストを表す

表 2 Action に分類されるノード

ノード名	戻り値	説 明
if(B, A1, A2)	A	B を評価し, 真ならば A1, 偽ならば A2 を返す
Move(T)	A	T まで移動する
Extinguish(Tbuild)	A	T を消火する
MoveRandomly()	A	ランダムに移動する
Rest()	A	何もしない or 給水活動する

表 3 Boolean に分類されるノード

ノード名	戻り値	説 明
atFire()	B	怪我を負った市民の付近にいる場合真を返す
pathExists(T)	B	引数の T までの経路がある場合真を返す
waterIsUnderHalf()	B	タンクの水量が半分以下の場合真を返す

は特別な記号であり、エージェントが意思決定をする際の分岐を実現するため、三つの子ノードをもつ。第一子ノードは判定部分となり、後述する Boolean シンボルがつづく。第二子ノードは、判定部分が真であった場合の A シンボルが続く、第三子ノードは判定部分が偽であった場合の A シンボルが続く。

Boolean(B) シンボル

救助エージェントが意思決定する際の判定基準となり、真偽を返すノードである。if Action の第一子ノードとなり、木構造における分岐を実現する。B シンボルに分類されるノードの一例を表 3 に示す。

List(L) シンボル

マップ上で条件にあうすべてのターゲット候補のリストを返すノードである。L シンボルには Environmental List と List Refiner があり、これらのノードはリストを構成するター

表 4 L シンボルの分類

L シンボルのサブタイプ		
Lagent	AgentList	Agent のリストを表す
Lbuild	BuildList	Building のリストを表す
Lciv	CivilianList	Civilian のリストを表す
Lroad	RoadList	Road のリストを表す

表 5 Environmental List に分類されるノード

ノード名	戻り値	説明
allFires()	Lbuild	すべての火災のリスト
exploredBuilds()	Lbuild	すでに訪れたことがある建物のリスト
getEntrances(Tbuild)	Lroad	引数 Troad のすべての入り口
getAdjacentBuilds(Troad)	Lbuild	引数 Troad につながるすべての建物

表 6 List Refiner に分類されるノード

ノード名	戻り値	説明
buildBurning(Lbuild)	Lbuild	引数の Lbuild で火災が起きていない建物を除去する
buildExtinguished(Lbuild)	Lbuild	引数の Lbuild で火災が起きている建物を除去する
buildMinorFiery(Lbuild)	Lbuild	引数の Lbuild で燃焼度が 0~3 の建物を除去する
buildServerFiery(Lbuild)	Lbuild	引数の Lbuild で燃焼度が 4~8 の建物を除去する
buildHasCiv(Lbuild)	Lbuild	引数の Lbuild で市民がいない建物を除去する
buildInRange(Lbuild)	Lbuild	引数の Lbuild で消火不可能な範囲にある建物を除去する

ゲットの種類によってサブタイプに分類される。表 4 に L シンボルのサブタイプを示す。これら二種類のノードについて説明する。

1. Environmental List

Environmental List はマップ上で条件にあうターゲットのリストを返し、FB エージェントは返されたリストの一つを行動の対象とする。Environmental List に分類されるノードの一例を表 5 に示す。

2. List Refiner

List Refiner は、子ノードに必ず Environmental List ノードを必要とし、子ノードのリストのサイズを条件に従って縮小するノードである。このため、List Refiner ノードに、終端記号は存在しない。表 6 に List Refiner に含まれるノードの一例を示す。

表 7 S シンボルの分類

サブタイプ	名前	ターゲット (T) の種類	説明
Sgeneral	generalSelector	T	任意のターゲットを選択できる
Sbuild	buildSelector	Tbuild	建物を選択する
Sciv	civSelector	Tciv	市民を選択する
Sroad	roadSelector	Troad	道路を選択する

表 8 General Selector に分類されるノード

ノード名	戻り値	説明
farthest(L)	T	引数の L の中で、自分から最も遠いターゲットを選択する
randomElement(L)	T	引数の L の中からランダムにターゲットを選択する
nearest(L)	T	引数の L の中で、自分に最も近いターゲットを選択する

表 9 従来手法から拡張したノード

ノード名	戻り値	説明
allOfAllFires	Lbuild	通信も含め、FB エージェントが認識したすべての火災
allFiresToldByOtherAgent	Lbuild	通信によって、FB 以外のエージェントが認識した火災

Selector(S) シンボル

救助エージェントが行動する際、対象となるターゲットが必要となる。S シンボルに分類されるノードは子ノードとなる L シンボルから、条件にあうターゲットを一つ選択する。S シンボルは、選択するターゲットの種類によって、サブタイプに分類される。表 7 に S シンボルのサブタイプを示し、表 8 に S シンボルのサブタイプの一つである、generalSelector を示す。

3.3 本方式で拡張したノード

従来手法⁵⁾とは異なり、本方式では、救助エージェントが使用可能な通信コマンドを利用する⁶⁾。通信コマンドを利用する主な目的は、マップ上の情報を共有することにより、協調的な行動を生成することである。AT, PF エージェントは、各々の救助活動を遂行しながら、発見した火災情報を FB エージェントに通信コマンドを利用して知らせることとした。この結果、FB エージェントが把握できなかった火災情報を得ることができ、協調的な行動の生成が期待できる。本方式で生成される木構造では、通信によって得られた火災情報を L シンボルとし、Environmental List を拡張した。表 9 に本方式で拡張したノードを示す。

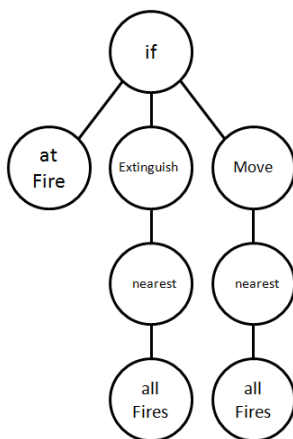


図 2 木構造の例

3.4 木構造生成方式

本方式では、3.2 章、3.3 章に示すノードを組み合わせることで エージェントの意思決定手順を表す木構造を生成する。図 2 に本方式における木構造の例を示す。根ノードが if Action であるため、分岐構造であり、左にリンクされた子ノードが第一子ノード (判定部分)、中央にリンクされた子ノードが第二子ノード (判定部分が真の場合の Action)、右にリンクされた子ノードが第三子ノード (判定部分が偽の場合の Action) を表す。それぞれの、子ノードの意味は、次に示すようになる。if Action を二つ以上繰り返すことで、And、Or の構造を生成することが可能となる。

- 第一子ノード：このエージェントの消火可能範囲に火災がある場合
- 第二子ノード：すべての火災 (allFires) から、直近 (nearest) の建物を消火 (Extinguish)
- 第三子ノード：すべての火災 (allFires) から、直近 (nearest) の建物まで移動 (Move)

3.5 ウイルス感染

本方式では、GP の進化過程で、ウイルスを含んだ個体を集団の中に取り入れる。感染させるウイルスには、RCRS におけるヒューリスティック情報を用いることとする。図 3 は、本方式でウイルスとした部分木を含む木構造である。このウイルスは、「タンクが空であり、

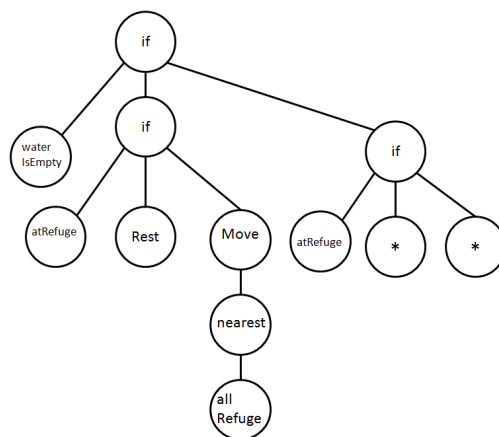


図 3 ウイルスを含む木構造

かつ避難所にいるならば給水活動を行い、避難所にいない場合は避難所へ向かう」という部分木を含んでいる。ノード「*」は、3.4 章に基づいて、ランダムな部分木を GP によって探索する。FB エージェントは自分のタンクが空になった場合、消火活動を行えず、給水する必要がある。このウイルスによって、適切なタイミングで給水活動を行うようなエージェントの生成を期待する。

3.6 評価関数

解候補である木構造は、RCRS を逐一実行することで評価する。式 (2) が本方式で利用する評価関数である。式 (2) の第一項は、RCRS のスコアである式 (1) の一部であり、建物関係のスコアを表している。式 (2) の第二項は、RCRS 終了時に残った面積が広いほど高い値をとるため、消火活動を積極的に行うエージェントが評価されることを期待する。式 (2) の第二項は、積極的にマップ上を探索したエージェントを評価することを期待するものである。NF はこのエージェントが認識した火災の数を表しており、NA は、定数を表している。NA の値は 100 として実験を行った。

$$Fitness = \sqrt{\frac{B}{B_{\max}}} + \frac{NF}{NA} \quad (2)$$

3.7 実装したシステムの処理手順

本章では、実装したシステムの処理手順を説明する。以下にシステムの処理手順を示す。

- (1) **初期集団生成**
個体数分の木構造を生成し、母集団とする。
- (2) **評価**
集団中の各個体毎に RCRS を実行し、適応度を得る。
- (3) **選択**
集団の中で適応度が最も高い木構造をエリート個体として、次世代集団へコピーする。その後、ルーレット選択によって、親子体となる木構造を二つ選択する。
- (4) **交叉・突然変異**
選択された二個体を親とし、交叉により子個体を生成する。生成された子個体に対して突然変異を起こす。
- (5) **ウイルス感染**

表 10 実験環境

使用マップ	mitake マップ
AT エージェント	5
FB エージェント	7
PF エージェント	1
個体数	15
世代数	100
選択	ルーレット選択
交叉率	80 %
突然変異率	5 %
ウイルス感染率	1 %

表 11 発見火災数と消火火災数

	通信有り	通信無し
火災発見数平均	14.80385	2.063143
消火火災平均	0.120667	0.103524

一定確率を満たした場合、エリート以外の集団にウイルスに感染した個体を取り入れる。最大世代数まで (2) から (5) を繰り返し、最適解を探索する。

4. 評価実験

表 10 に示す実験条件で実験を行った。計算機 (CPU:2.66GHz, RAM:3.23Gbyte) を 15 台用いてプログラムを実行した。通信を行う場合と行わない場合の二つの木構造生成方式について比較実験を行った。

表 11 にそれぞれの木構造生成方式における「火災発見数」,「消火火災数」の平均を示す。比較実験より、通信を行う場合がマップ上の火災を多く把握でき、消火ターゲットの選択肢が増えたことが確認できた。しかし、FB エージェントが消火した火災の数に差は確認できなかった。これは、FB エージェントが火災を認識し、火災現場まで移動したが、ターゲットの火災を消火する能力がなかったためであると考ええる。

通信を行う場合の適応度の変化を図 4 に、通信を行わない場合の適応度の変化を図 5 に、通信を行った場合の最良個体の木構造を図 6 に、通信を行わない場合の最良個体の木構造を 7 に示す。図 4 および図 5 から、通信を行う場合が適応度が良いことが確認できた。消火した火災の数に変化は見られなかったが、通信によって得た火災情報をもとにマップ上を広く探索したため、適応度に変化があったと考える。

5. 結論と今後の課題

本研究では、遺伝的プログラミングのベンチマーク問題として、ロボカップレスキューシミュレーションにおける消防隊エージェントの自動設計を試みた。エージェント間の通信を行い、複数のエージェントで火災情報を共有することを確認した。しかし、火災消火数に変

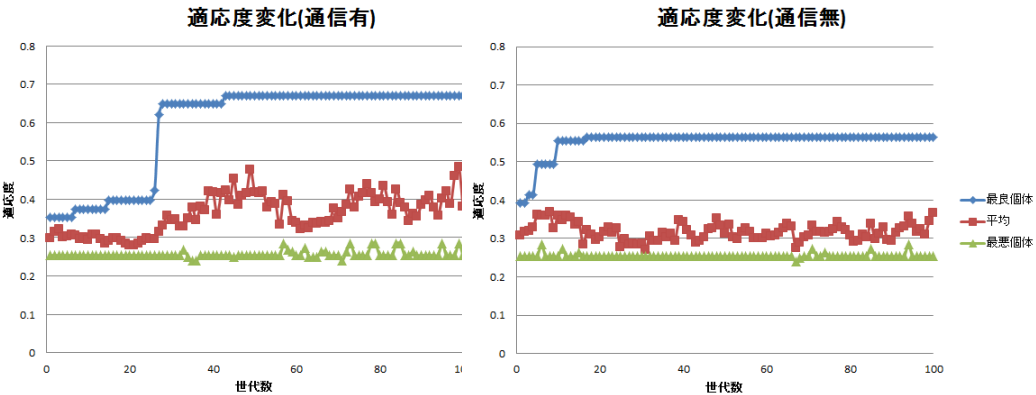


図 4 適応度変化 (通信有り)

図 5 適応度変化 (通信無し)

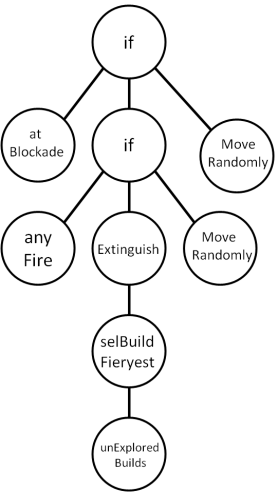


図 6 最良個体の木構造 (通信有り)

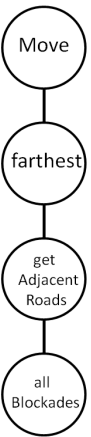


図 7 最良個体の木構造 (通信無し)

化が見られなかった。今後、評価関数、ウイルスを見直し、よりスコアの高いエージェントの自動設計を試みる。

参 考 文 献

- 1) 松原 仁, 田所 諭, 北野 宏明, 竹内 郁雄, 高橋 友一, 神成 敦司, 野田 五十樹 ロボカップレスキュープロジェクト: マルチエージェントシステム研究の大規模災害救助への応用を目指して (特集●社会・経済におけるマルチエージェント), 一般社団法人日本ソフトウェア科学会, Vol.17, No5, pp426-434, 2000
- 2) 伊藤暢浩 ロボカップレスキューシミュレーションの動向 (<特集>ロボカップ 12 年), 人工知能学会誌, Vol.25, No.2, pp.220-228, 2010
- 3) 大西那生, 藤原千絵, 健山智子, 榊原一紀, 陳 延偉免疫系ネットワークを用いたマルチエージェント型自律学習アルゴリズムによる魚群の生成 (インタラクティブシステム・画像入力デバイス・方式, 及び一般), 映像情報メディア学会技術報告, Vol.35, No.23, pp.5-8, 2011
- 4) 中村真理, 浅間一, 進化計算による蟻コロニーモデルの自動設計, 情報処理学会論文誌. 数理モデル化と応用, Vol.2, No.1, pp.47-56, 2009
- 5) Andrew Runka “Genetic Programming for the RoboCup Rescue Simulation System”, Master thesis, Faculty of Computer Science, Brock University, 2010.
- 6) RoboCup-Rescue Simulator Manual version 0 revision 4, <http://www.robocuprescue.org/docs/robocup-manual-v0-r4.pdf>
- 7) 山本哲也, 遺伝的プログラミングを用いた協調行動の獲得, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文, 2001
- 8) 池田 欽一, エージェント理論とオンラインオークション (<特集>インターネット・マーケティング), オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol.51, No.12, pp.740-745, 2006
- 9) 陳曉榮, 時永祥三, 共進化 GP を用いたマルチエージェントシステムの構成とその人工市場分析への応用 (非線形問題), 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界, Vol.86, No.10, pp.1038-1048, 2003
- 10) 中谷直司, 金杉昭徳, 近藤邦雄, ウイルス進化論に基づく進化型アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.5, pp.2346-2355, 1999
- 11) 武田和大, 小野智司, 中山茂, 異機種混合並列計算ミドルウェア JSGrid(試作・評価・実用化, サービス管理, ビジネス管理, 料金管理, 及び一般), 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント: IEICE technical report, Vol.108, No.24, pp.1-6, 2008