ミツバチの採餌行動を模した最短経路探索法 動的な環境での挙動

3C1-OS14-8

Proposition of the Optimization Algorithm Imitating the Honey-Bee Foraging Experiments in Changing Environment

古川 まき[*1]
Frukawa Maki

鈴木 泰博[*2]
Suzuki Yasuhiro

[*1] 名古屋大学
Nagoya University

[*2] 名古屋大学
Nagoya University

We propose a novel bio-inspired optimization algorithm, the Honey Bees Optimization algorithm, HBO; HBO is based on foraging activities of honey bees. In order to examine characteristics of the HBO, we apply the HBO for solving the Traveling Salesman Problem.

1. はじめに

蜜蜂の採蜜行動は周知で，それを模したマルチエージェントシステムによる最適化アルゴリズムがいくつか提案されている．アルゴリズムは大きく2つに分けられ，1つは，Artificial Bee Colony [Karaboga 2007] や Bee Colony Optimization [Wong 2008] のような，全てのエージェントの持つ情報を一カ所に集約するものであり，もう1つは，BeeHive [Farooq 2009] のような，複数のルックアップテーブルを各拠点となるものに個別に設置するものがある．いずれの場合でも，各エージェントの持つ情報を十分に利用し解の探索の高速化と効率化を図るため，情報は集積され，解の収束を防ぐためには別途乱数が用いられる．たとえば BeeHive はデータ通信の際のサーバーのルーティングに特化したアルゴリズムであるが，各サーバーには近接サーバーとの通信の遅延状況を示したテーブルがあり，エージェントは各サーバーを訪れたときテーブルを参照して次に移動するサーバーを決定し，また遅延情報を更新する．

このように既存の蜜蜂の採蜜行動を利用した最適化アルゴリズムはルックアップテーブルを使用したり，エージェント全体で情報を共有する手法をとっている．しかし，蜂の採蜜行動で最も大きな特徴は，8の字ダンスと呼ばれる振身行動によってコミュニケーションを取ることであり，ルックアップテーブルに相当するようなフェロモンに類する化学物質を場に残す方法は利用せず[Biesmeijer 2005]，巣ですれ違う少数グループにおける限定された情報だけで，適切な餌場の選択や放棄の基準を実現している．

このような口コミによる情報伝達は人気飲食店の移り変わりなど，人間社会にも見られる．工業の分野では自家発電によって生じた余剰電力を効率よく利用するためのローカルな制御が必要とされている．また，近年の情報通信技術の発達により，各種携帯端末（電話，流通 POS，配送システム端末など）を用いた情報通信が一般的になり，端末間で動的に通信経路を構築していくアドホックネットワークが注目されている[田森 2006] [中沢 2006]．いずれも中枢制御システムではなく，自律分散的な情報の伝達と制御が必要となるものである．

このような特性を理解しアルゴリズム化するため，ルックアップテーブルを使わずエージェント同士の一対一の情報のやりとりだけを使った最適化アルゴリズムの開発を行ってきた．本稿では，これを巡回セールスマン問題(Traveling Salesperson Problem， 以下 TSP)に対し適用し，結果を示す．また，上記のような応用を考えるにあたり，動的な環境下での挙動を観測する必要がある．そのため，ある都市を通行不能にした状態から探索を始め，通行可能に切り替えた場合の結果を示す．

連絡先：古川まき，名古屋大学，愛知県名古屋市千種区不老町， Email：furukawa.maki@d.mbox.nagoya-u.ac.jp

2. Honey Bee Optimization

本稿では採蜜行動を模した最適化アルゴリズム Honey Bee Optimization (以下 HBO) を提案する．主な構成要素は以下の通りである．

- 蜂エージェント
- 巣
- 蜜源

HBO では，蜂エージェントは巣と蜜源を移動しながら他のエージェントとコミュニケーションを取り，解を改善する．

2.1 都市の移動

各々の蜂エージェントは巡回する都市のリストを”解”としてあらかじめもっているとする．TSP に適用した場合は，エージェントが持っている巡回する都市のリストが解にあたる．このリストを以下では都市リストと呼ぶ．

都市リストは{0,1,3,4,2}のように表される．このリストを持つエージェントは 0→1→3→4→2→0…の順に都市を巡回する．都市リストは全都市を一回ずつ含み，初期のリストにおいて都市の順序はランダムに生成される．その様子を Fig. 1 に示す．

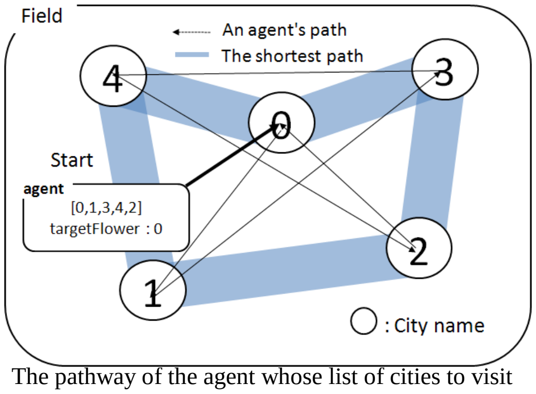


Fig.1. The pathway of the agent whose list of cities to visit {0, 1, 3, 4, 2}

このとき，すべての都市を一巡する順路を経路と呼び，一巡したときの距離を経路長と呼ぶ．

2.2 解の改善

エージェントの持つ解の改善行動は蜂の8の字ダンスを模したものである．8の字ダンスは巣（現在位置）から蜜源（目標位置）までの距離と方角を表すことができる．TSP においては，現在いる都市が巣に相当し，次に行くことのできる都市の候補が全て蜜源に相当する．

各エージェントはある都市（巣）に到着したとき，後述の閾値の定義に則ってエリートエージェントとノーマルエージェントに分かれる．エリートエージェントは自分が次に行く都市（蜜源）を宣伝する．ノーマルエージェントはもしその場にエリートエージェントがいればその中の一個体を無作為に選択し，そのエージェントが宣伝する都市（蜜源）を参照し，自分の都市リストを改善する．宣伝が終了，または都市リストの書き換えが終了したらエージェントは自分の都市リストに従い次の都市へ移動する．都市 1 におけるエリートエージェントを A 群，ノーマルエージェントを B 群とし，この改善過程を，以下に記述する(Fig. 2)．

たとえば，都市リストの一部に都市 1 から都市 3 へ移動する{…1,3…}を持つ，ある B 群に含まれるエージェント B0 を考える．B0 は都市1に到着したとき，A 群の中から無作為にエリートエージェント A1 を選択する．{…,1,2,…}という都市リストを持つ A1 を選択するとした場合，B0 は都市 1 から都市 2 への移動を参照して都市リストを{…,1,3,…}から{…,1,2,3,…}へと書き換える．

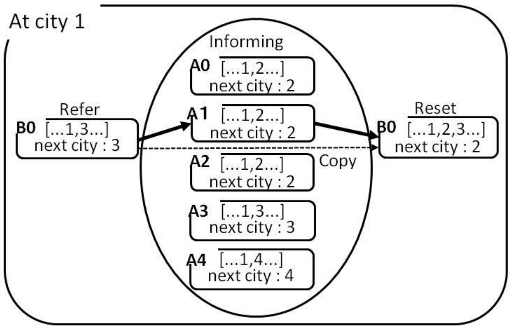


Fig.2. Improvement of normal agent's list of cities to visit
B0: normal agent, A0,…, A4 : elite agents

この情報伝達は，極めて部分的な改善であり，宣伝を行うエリートエージェントの経路全体の構成や，経路長そのものは伝わらない．そのため，情報を受け取ったエージェントにとってその情報が有益であるとは限らず，情報を受け取った結果，さらに経路長が長くなってしまう可能性もある．

2.3 閾値の定義

各エージェントが持つ解の改善のため，より良い解を持つエージェントはエリートエージェントとして他のエージェントに自分の解を宣伝する．

TSP において，あるエージェントがすべての都市を一巡する距離を経路長と呼び，L とする．L が閾値未満であれば，そのエージェントは任意の都市に到着したときエリートエージェントとなる．それ以外はノーマルエージェントとなる．

閾値は，全エージェントの経路長の最小値（最短経路とは限らない）に，平均値と最小値の差の x%を加えたものとする．以下，Fig. 3と式（1）に詳細を示す．

T : エリートエージェント選別のための閾値
L : エージェントが持つ都市リストに従って全都市を回ったときの経路長
L. min : 全エージェントの最短経路長
L. ave : 全エージェントの平均経路長
x : エリートエージェントの割合を決定する変数

$$T = L.\ min + (L.\ ave - L.\ min) * \frac{x}{100} \tag{1}$$

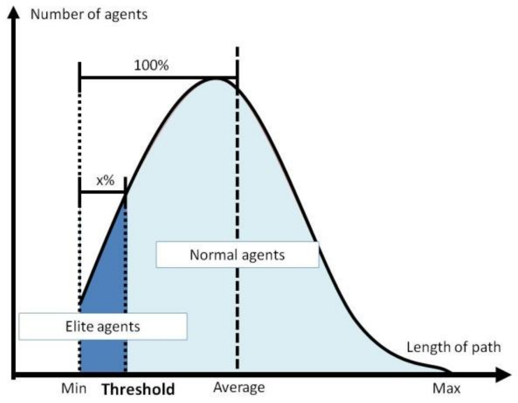


Fig.3. Evaluation elite agents

この選別法は直接全個体の比較を行わない．エリート数の制限は行わないため，時間の経過とともにエリートエージェントの数は増え，最終的には全てのエージェントの持つ解が一つに収束する．従って，適度な乱数を発生させることで多様性を保つ必要がある．だが，簡単のため本稿では乱数を使用しない場合を想定している．

2.4 TSP への適用

HBO を TSP に適用する場合，以下の手順によって実行する．

初期化にてエージェントはリストの最初の都市に移動する．試行開始後はリストに従って都市を訪れる．試行を開始し，都市の移動と解の改善を規定回数（100,000 回）繰り返すか，最短経路を発見するか，収束した場合に計算を終了する．

図示したものを Fig. 4 に示す．

```
Initialize
Counter=0
Loop for 100,000 Iterations
   (or until satisfying conditions)
      Move and reach the city
      Improve of the city list
Counter  ++
End
Output  Counter
```

Fig.4. The algorithm of HBO

3. 実験

都市のデータセットとして TSPLIB[1]より burma14 を使用する（Fig. 5）.

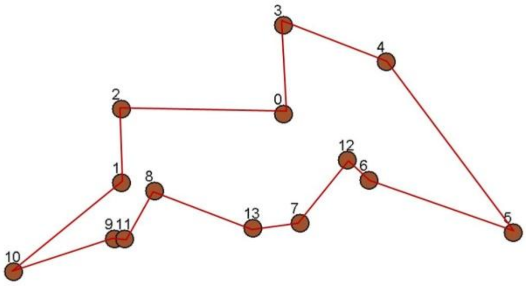


Fig.5.　The burma14

エージェント数は 20～2000 を使用し，閾値の値は 10≦x≦90 の範囲で x を 5 ずつ変化させたものを使用する．試行は 100 回行い，得られた数値の平均値を使用する．

通常の試行に加えて，burma14 の都市のうち都市 2 を通行不可能にした状態からの試行を行う．都市 2 を除いた 13 の都市での最短経路を発見したのちに，全エージェントの都市リストのランダムな位置に都市 2 が挿入され，都市 2 は通行可能となる．

このような条件において，両試行での最短経路到達確率と到達までにかかった繰り返し回数を計測した．

4. 結果と考察

14 都市での試行と，都市 2 を除いた 13 都市から始めて一旦最短経路を発見してから続けて 14 都市での探索を行った試行において，最短経路到達確率と到達までにかかった繰り返し回数をエージェント数別，閾値別に計測した．

まず，両試行の最短経路到達率を Table. 1 に示す．

全体を通して，エージェント数が多いほど，またエリートエージェントの割合を決める x の値が大きいほど最短経路の発見率は高い．

先述の通り，HBO においては，エージェントは情報を蓄積するルックアップテーブルを使用せず各都市を巡回しながら他のエージェントとの接触によって解の改善を行う．また，より良い解であるエリートエージェントの解は保存され（変化せず），エリートエージェントの解の一部をノーマルエージェントがコピーすることによって解の改善が生じる．すなわち，最短経路に到達するためには多くのノーマルエージェントがエリートエージェントと接触する機会が必要である．

このような理由から，エージェント数が多くエリートエージェントの割合が大きいとき最短経路の到達率は高くなる．

通常の試行と 13 都市から開始した試行の発見率を比較すると，13 都市から開始した場合の方が発見率は低い．これは，13 都市で最短経路に到達した後に，新たに 14 都市での最短経路の探索を行うことになるため，実質的には 2 段階での最短経路に到達しなければならないためである．もともと最短経路の発見に多くのステップ数が必要な少ないエージェント数での試行においては，13 都市での最短経路にほとんどのエージェントが集まってしまい改善そのものが行われない事態が生じやすい．従って規定繰り返し回数 100,000 回以内に 14 都市の発見ができない試行が増え，発見率が下がる．エージェント数が多い場合は 13 都市の結果を 14 都市の場合に有効に用いることができるため，エージェント数 500 の場合に見られるように発見率が良くなる場合がある．

続いて，最短経路到達までにかかった繰り返し回数（平均値）を Fig. 6， Fig. 7 に示す．Fig. 7 は繰り返し回数の常用対数をとったものである．

まず，両試行に共通する現象を述べる．

繰り返し回数はエージェント数が多い場合と少ない場合で異なる挙動を示す．エージェント数が少ない場合は，閾値が増えるに従って繰り返し回数は少なくなる．これは，エリートエージェントが増え発見率が上がることによるものである．

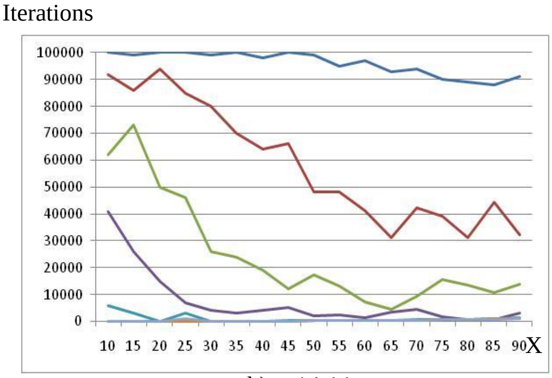
エージェント数が多い場合は，エリートエージェントの割合を決める x の値が大きくなるに従って繰り返し回数が増える．これは，x の値が大きくなるとエリートエージェントが増えるため経路の改善をするノーマルエージェントが減り，結果的に改善が遅れるためである．また，このとき新しくエリートエージェントとなったエージェントは比較的長い経路を通るエージェントであり，宣伝される経路は最短経路の一部とは大きく異なる可能性高い．ノーマルエージェントは誤った経路を学習することになり，解の改善率が下がる．従って繰り返し回数が増える．

また，比較的エージェント数が多いときに見られるように，繰り返し回数には下限値が存在する．これは以下の理由による．

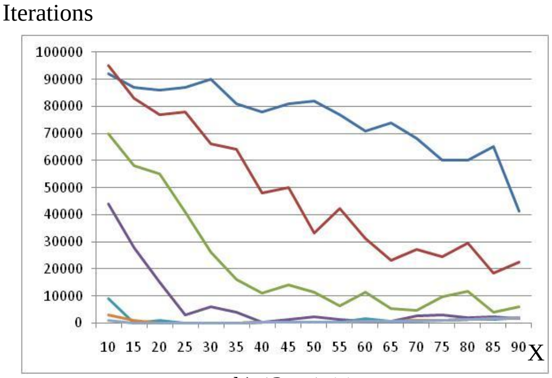
1 http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/

Table.1 The ratio of findings optimal-path in 14cities and in 13cities adding 1 city (%)

X of threshold length (%)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Num of agents	with 14cities (%) / with 13cities + 1city (%)																
20	0/0	0/0	0/0	0/0	0/1	1/0	2/0	2/0	1/0	3/1	2/1	1/1	4/3	8/5	9/3	3/5	8/5
50	1/1	5/2	11/0	9/7	23/5	21/19	33/22	37/24	51/29	39/28	47/41	60/54	63/37	62/37	56/51	61/43	64/46
100	17/12	32/16	40/32	50/38	66/57	80/60	78/73	86/75	84/78	90/81	87/87	88/86	89/82	82/79	83/80	91/87	92/78
200	49/38	64/56	84/73	92/77	92/89	93/92	96/90	96/90	96/97	95/93	100/94	98/96	95/95	95/99	98/96	98/99	98/95
500	90/82	100/93	99/100	99/96	98/100	100/99	100/100	100/100	100/100	100/100	99/100	100/100	100/100	100/99	100/100	100/100	100/100
1,000	97/99	99/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/99	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
2,000	99/99	100/99	100/100	100/99	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100



b) 14citie



b) 13 + 1cities

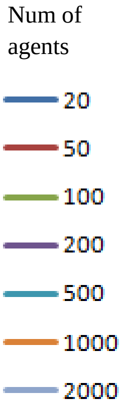
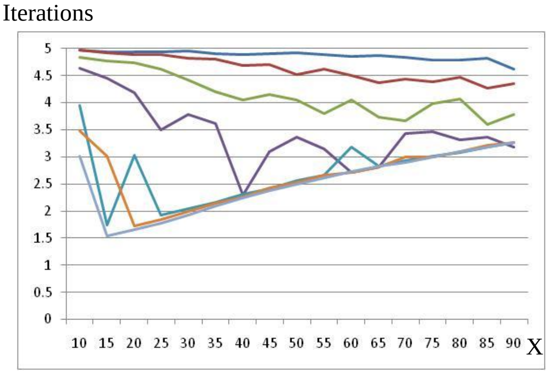
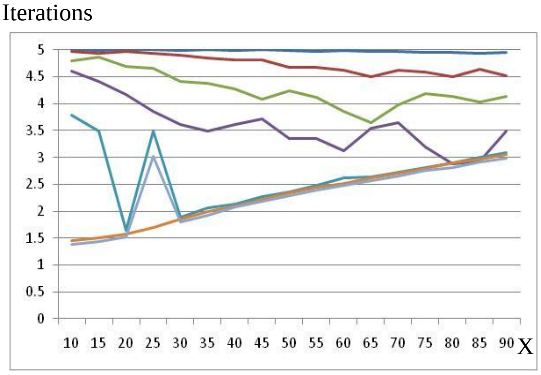


Fig.6 The number of iterations to finding optimal-path



a) 14citie



b) 13 + 1cities

Fig.7 The base 10 logarithm of the number of iterations to finding optimal-path

各エージェントの持つ都市リストはランダムに生成されるため，各エージェントの経路長は正規分布を形成する．そのため，宣伝される経路長の分布は x の値に依存し，最短経路到達までに必要な繰り返し回数の期待値はエージェント数に関係なく等しくなる．次に，通常の試行と一都市を通行不可能にした場合とを比較すると，エージェントが多い場合は 13 都市から開始した試行の方が繰り返し回数が少ない．都市数が減ることで最短経路が発見しやすくなり，さらに部分解を利用することで 14 都市の解を素早く発見しているためである．すなわち，十分なエージェント数が確保できる場合は，解を分割した方が早くなると言える．

5. まとめ

本論文では，ミツバチ採蜜行動を模したエージェントによる最短経路探索法 HBO を提案し，TSP に対し適用した．そして，burma14 を使用し，通常の試行に加え一都市を通行不可能にした条件から開始したものと比較し，発見率と繰り返し回数について検討を行い，エージェント数が十分多い場合は最短経路到達までの繰り返し回数が少なくなることを示した．

他手法との比較検討や応用が今後の課題である．

参考文献

[Karaboga 2007] Dervis Karaboga and Bahriye Basturk : "Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems", LNAI 4529, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.

[Wong 2008] L．P．Wong, M．Y．H．Low, and C．S．Chong : "Bee colony optimization with local search for traveling salesman problem", in Proc．of the 6th IEEE Int. Conf．on Industrial Informatics 2008.

[Farooq 2009] Muddassar Farooq : Bee-Inspred Protocol Engineering: From Nature to Networks．Springer (2009)

[Biesmeijer 2005] J．C．Biesmeijer and T．D．Seeley : "The use of waggle dance information by honey bees throughout their foraging careers", Behavioral Ecology and Sociobiology, Springer 2005.

[田森 2006] 田森正紘，石原進，水野忠則："アドホックネットワークにおける端末の位置を考慮した複製配布方式の評価", 情報処理学会研究報告, 情報処理学会 2006.

[中沢 2006] 中沢淳一，高橋謙三："情報通信ネットワークの災害対策", 電子情報通信学会誌, 電子情報通信学会 2006.