

PC クラスタ環境下の組合せ最適化問題に対する新解法：
巡回セールスパーソン問題に対する並列タブーサーチの適用

榎原博之・長谷川裕之介・田中裕也



文部科学大臣認定 共同利用・共同研究拠点
関西大学ソシオネットワーク戦略研究機構
関西大学ソシオネットワーク戦略研究センター
(文部科学省私立大学学術フロンティア推進拠点)

Research Center of Socionetwork Strategies,
“Academic Frontier” Project for Private Universities, 2003-2009
Supported by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

The Research Institute for Socionetwork Strategies,

Joint Usage / Research Center, MEXT, Japan

Kansai University

Suita, Osaka, 564-8680 Japan

URL: <http://www.rcss.kansai-u.ac.jp>

<http://www.kansai-u.ac.jp/riss/index.html>

e-mail: rcss@ml.kandai.jp

tel: 06-6368-1228

fax. 06-6330-3304

PC クラスタ環境下の組合せ最適化問題に対する新解法： 巡回セールスパーソン問題に対する並列タブーサーチの適用

榎原 博之* 長谷川 裕之介† 田中 裕也‡

2010 年 2 月

概要

近年、PC の性能向上と単価の下落が進んでいる。このことから、大規模計算を単体のスーパーコンピュータではなく、複数台の PC をネットワークに接続して構築されたクラスタ PC で計算する手法が注目されている。本研究では、同一 LAN 内に配置された複数台の PC により構築された PC クラスタ環境において、組合せ最適化問題の代表例である巡回セールスパーソン問題 (TSP) を、メタヒューリスティック手法のひとつであるタブーサーチを用いて、近似解を求める並列アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムの特徴は、共有タブーリストの導入と解の交叉による局所解からの脱出である。実験の結果、同一計算時間ならば、PC 間の通信を行うほうが行わない場合よりも、はるかに良い近似解が得られることが判明した。

Keyword: タブーサーチ, PC クラスタ, 並列化, 巡回セールスパーソン問題, 組合せ最適化,

*関西大学 システム理工学部, 関西大学 ソシオネットワーク戦略研究センター研究員, Email: ebara@kansai-u.ac.jp

†関西大学大学院 理工学研究科, Email: hasegawa.yunosuke@gmail.com

‡関西大学 工学部 電子情報システム工学科, Email: twilight_star@hotmail.co.jp

New Algorithm for Combinatorial Optimization Problem on a PC Cluster: Application of Parallel Tabu search for Travelling Salesperson Problem

Hiroyuki Ebara¹, Yunosuke Hasegawa², and Yuya Tanaka³

February, 2010

Abstract

In recent years, the improvement in performance and the falling in price of PCs are progressing. Therefore, not a supercomputer but a PC cluster, in which PCs are connected to the LAN, attracts attention. In this research, we propose a parallel algorithm which calculates an approximation solution for the travelling salesperson problem (TSP) using the tabu search on a PC cluster. The features of our proposed algorithm are the introduction of a shared tabu list and breaking away from a local solution by crossover of solutions. As a result of the experiment, it became clear that our proposed algorithm provided good approximate solutions.

Keyword: Tabu Search, PC Cluster, Parallelization, Travelling Salesperson Problem, Combinatorial Optimization

¹Faculty of Engineering Science, Kansai University, Research Fellow, The Research Center of Socionetwork Strategies, Email: ebara@kansai-u.ac.jp

²Graduate School for Science and Engineering, Kansai University, Email: hasegawa.yunosuke@gmail.com

³Department of Electronic, Faculty of Engineering, Kansai University, Email: twilight_star@hotmail.co.jp

1 はじめに

近年、PCの性能の向上と価格の下落が急速に進むにつれ、比較的高性能なPCを個人で所有することが一般化しつつある。同時に、現在ではほとんどのPCはそれ単体で使用するのではなく、何らかのネットワークに接続して使用される。ネットワーク技術の発展により通信速度も飛躍的に向上しており、通信機能を持ったアプリケーションが普及してきている。

このようなPC技術、ネットワーク技術の発展と並行して、現在多様な分野からの計算要求がある。例えば、生命・化学系分野に代表される遺伝子情報組み換えなどの大規模計算や、物理・工学系分野におけるシミュレーション実験などの学術研究を目的とした計算処理要求がある。これら従来から存在する分野に加え、現在では環境分野における地球変動の予測シミュレーションや社会科学分野における大規模シミュレーションなど、幅広い分野で大規模計算に対する要求が増加している。

大規模計算には、データ量が莫大な問題と計算処理に長時間要する問題がある。後者の問題の代表的なものの1つに組合せ最適化問題がある。組合せ最適化問題とは、制約条件と目的関数が与えられたとき、制約条件を満たす組合せの中から目的関数が最適（最大あるいは最小）になる組合せ（最適解）を求める問題である。

組合せ最適化問題に対する解法は従来から数多く研究されている [3]。求めたい結果が厳密な最適値でなければならない場合も存在するが、一般にはある程度の精度を持つ近似解でも許容され、短時間で解を得たいという場合がほとんどである。組合せ最適化問題には問題の規模に対して指数関数的に実行時間がかかることが知られている問題が多く、長時間をかけて最適な値を出すよりも短時間で充分最適解に近い近似解を得ることが重要であり、それに対する解法も数多く研究されている [11]。数ある近似解法の中でも、特に、メタヒューリスティック手法は多くの問題に適応できる汎用的な解法であることから幅広く研究されている [10]。

本研究では、組合せ最適化問題の代表的な問題である、巡回セールスパーソン問題に対する近似解をメタヒューリスティック手法の1つであるタブーサーチを使って精度の高い近似解を求める並列アルゴリズムを提案する。並列計算環境としては、同一LAN内に管理用サーバを中心とした、複数台の計算用PCが接続されたPCクラスタシステムを用いる。本研究では、各計算用PCをグループ分けし、グループ間でタブーリストを共有する。さらに、解が局所解に陥った場合には、遺伝的アルゴリズムに倣って解の交差を行い、局所解からの脱出を試みる。

2 巡回セールスパーソン問題

巡回セールスパーソン問題とは、訪問対象となる n 個の都市を一度ずつ訪問して出発した都市に戻る巡回路の中で距離が最小のものを求める問題である [18]。

n 個の都市の集合 $V = \{1, \dots, n\}$ と都市 i と都市 j の間の距離を C_{ij} とすると、目的関数 $f(x)$ を最小化する式は以下のように数式化できる：

$$f(x) = \sum_{k=1}^{n-1} C_{x(k) x(k+1)} + C_{x(n) x(1)} \quad (1)$$

ここで、 $x(k) = i$ は、 k 番目に訪れる都市が i であることを表す。

巡回セールスパーソン問題は、現実にある実際の問題に関しても様々な応用が可能である。基盤の配線や VLSI の設計など、様々な例がある。巡回セールスパーソン問題を効率よく解くことにより、実際の問題での時間と資源のコストを削減することが可能となる。

3 タブーサーチ

3.1 メタヒューリスティック

メタヒューリスティックは、近似解法と様々な戦略を組み合わせるより精度の高い解を求める汎用性の高い手法である。メタヒューリスティックの基本的な枠組みを以下に示す。

1. 初期解の生成

近似解法により最初の解を求める

2. 探索の反復

探索戦略に従って探索を繰り返す

3. 終了

繰り返し数や時間などの一定の条件で終了する

メタヒューリスティック手法の主なものとして、シミュレーテッド・アニーリング法 (Simulated Annealing)、アントコロニー法 (Ant Colony Optimization)、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)、タブーサーチ (Tabu Search) などが挙げられる [10] [17]。

3.2 タブーサーチ

タブーサーチ (Tabu Search) は、初期解の生成から以下のアルゴリズムに従って解を探索する。

1. 初期解を生成する

2. 近傍探索を繰り返し、タブーリストに含まれない遷移可能な解に遷移する

3. 解の遷移と同時に、その情報をタブーリストに保存する

4. 局所最適解に至っても、解の遷移を許し、探索を続ける

5. 指定の終了条件になれば、探索を終了する

タブーサーチでは、解の探索過程において局所最適解に至っても終了条件が満たされるまで解を遷移し探索を続行する。局所最適解に至ると改悪方向への遷移を行うが、その後改善方向への探索を行うと遷移元の解に戻ってしまう可能性がある。タブーサーチには、これを防ぐ仕組みとしてタブーリストがある。

3.3 タブーリスト

タブーリストには探索済みの解の遷移情報が保存され、タブーリスト上の解（タブー解）への遷移を禁止する。解の探索過程において、局所最適解に至っても改悪方向への解の遷移を許し、探索を続行する。探索過程においてタブー解への遷移を制限することで、過去に探索した解に遷移することを防ぎ、未知の解への遷移を可能とする。また、タブーリストに登録された解をタブー解として扱う期間を設定する。タブー期間の長さは、タブーサーチの重要なパラメータとして扱われる。

3.4 初期解生成

タブーサーチでは、プロセスの初期段階として初期解を生成する。初期解の生成には、既存の近似解法を利用する方法が一般的である。以下に、巡回セールスパーソン問題に対する近似解法の代表例を紹介する。

1. グリーディ法 (Greedy method)

貪欲法とも呼ばれる。解を段階的に構築していく際にその時点で最善となるものを選択し、これを繰り返して1つの解を構成する方法である。巡回セールスパーソン問題では、都市間のすべての枝の中から最短のものを選択し、1つの巡回路ができるまでこれを繰り返す。

2. 最近近傍法 (Nearest Neighbor method)

解を逐次的に構築していく方法である。始めにある都市を選択し、選択した都市から最も近い都市を次の都市として選択し、これを繰り返して巡回路を構築する方法である。乱数によって最初の都市を決めることで、ある程度のランダム性を確保することが可能である。

3.5 近傍探索

近傍探索とは、解空間の中で1つの解から近傍の解を探索する方法である。探索戦略は、解の遷移を制御するための戦略であり、探索戦略自体には、解の改善・改悪の方法は決められていない。また、近傍も探索戦略と同様、方法ごとに定義される。

本研究で扱う巡回セールスパーソン問題を例にすると、枝を選択し、繋ぎ換えを行うことで近傍の解を探索する。探索中の解を暫定解としてその時点を開始点とする1つの探索ととらえると、あ

る枝を選択し、繋ぎ換えを行った解は元の解に隣接した解となる。このように隣接した解を求めることで改善もしくは改悪となる解に遷移を行う。

次に、巡回セールスパーソン問題に対する最も一般的である λ -opt 近傍探索について説明する。 λ -opt は、巡回セールスパーソン問題に特化した近傍探索法である。 λ は繋ぎ換えを行う具体的な枝の本数を指す。 $\lambda = 2$ の場合は *2-opt* と表記し、 $\lambda = 3$ の場合は *3-opt* と表記する。*2-opt* では、都市と都市を結ぶ枝を2つ選択し、枝の繋ぎ換えを行うことで、巡回路の改善・改悪を行う (図1)。

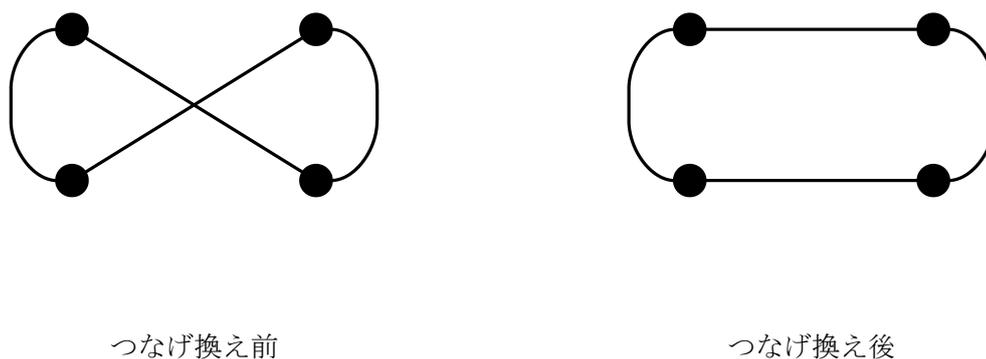


図 1: 2-opt 法

4 並列システムとその通信機能

4.1 PC クラスタ

PC クラスタ [12] とは、サーバを中心にネットワークで複数の PC が接続されているシステムである (図2)。

PC クラスタに属する PC は互いに通信を行い、クラスタ全体で1つの処理を行うことができるという特徴を持つ。多くの場合 PC クラスタは、LAN に代表されるような外部から遮断された独自のネットワーク環境内で構築される。このため、一般的な PC クラスタ環境において、計算処理を行う際すべての PC は計算のために占有され、高速な処理を実現する。PC クラスタ環境構築ソフトウェアの代表例として SCore[9] が挙げられる。

4.2 SCore

SCore とは、技術研究組合新情報処理開発機構において開発された PC クラスタのための、HPC(High Performance Computing) 型システムソフトウェアである。SCore は Linux カーネル上に構築され、OpenMP[7] や MPI[4] といった並列プログラミング環境をサポートしている。

Beowulf 型クラスタ [12] が一般的な通信プロトコルである TCP/IP を用いて並列計算を行っているのに対し、SCore は独自に開発された PMv2 高性能通信ライブラリを用いて並列計算を行ってい

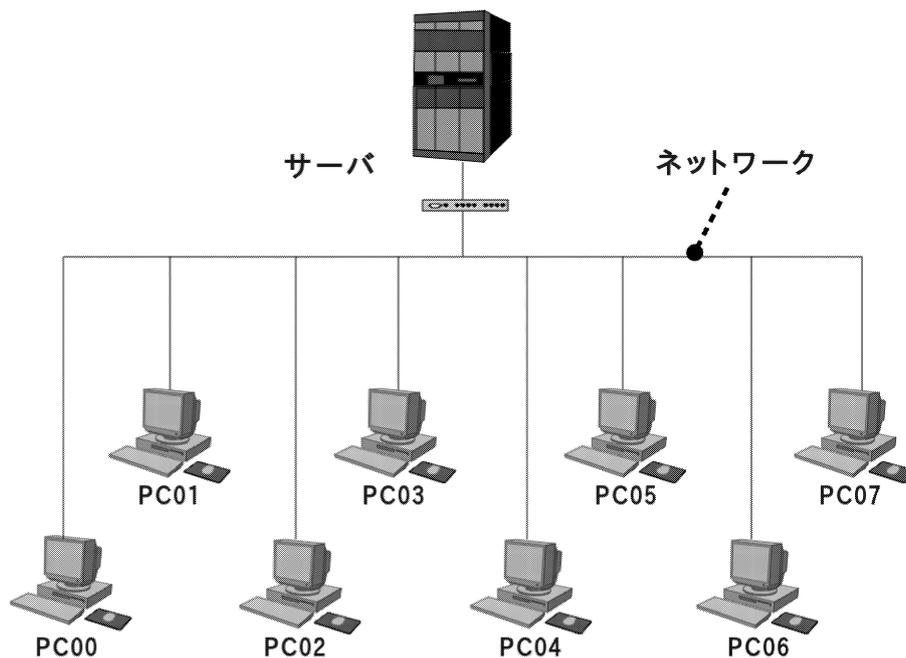


図 2: PC クラスタ

る。これにより、Ethernet でつながれた小規模クラスタから、ギガビット Ethernet や Myrinet のようなネットワークで構築された大規模クラスタまで、シームレスに利用することが可能となる。

4.3 MPIによる並列化

MPI (Message Passing Interface) とは、メッセージパッシング方式に基づいた仕様であり、分散メモリ型の並列計算を行うためのライブラリを定義する。実行ライブラリとして、OpenMPI や MPICH2[5] などが存在する。代表的な MPI 構築環境ソフトウェアとして SCore などが挙げられる。高速で容易なプロセス間通信を実現するが、共有メモリ型の通信と比較すると通信コストは大きくなる。

4.4 タブーサーチの並列化

タブーサーチを並列化する上で、どの処理を並列化するのか、こういった手法を用いて並列化するのか、といった選択は重要である。共有メモリ型が持つ利点と MPI 通信の利点を加味し、高速かつ大量に通信を行う場合は共有メモリ型を、少量の情報ならば MPI 通信を選択するといった、用途による通信機能の使い分けを行う必要がある。

5 提案手法

5.1 実験システム

本研究で用いる実験環境は、PC クラスタコンソーシアム [9] が配布している MPI 環境構築フリーソフトウェアである SCore を用いて構築されている。これにより、関西大学システム理工学部アルゴリズム工学研究室にある 1 台のサーバと、8 台の計算処理用 PC がギガネットイーサスイッチを介して同一 LAN 内で接続されており、互いに MPI 通信を行うことができる。図 3 に本研究で利用した実験システムを示す。

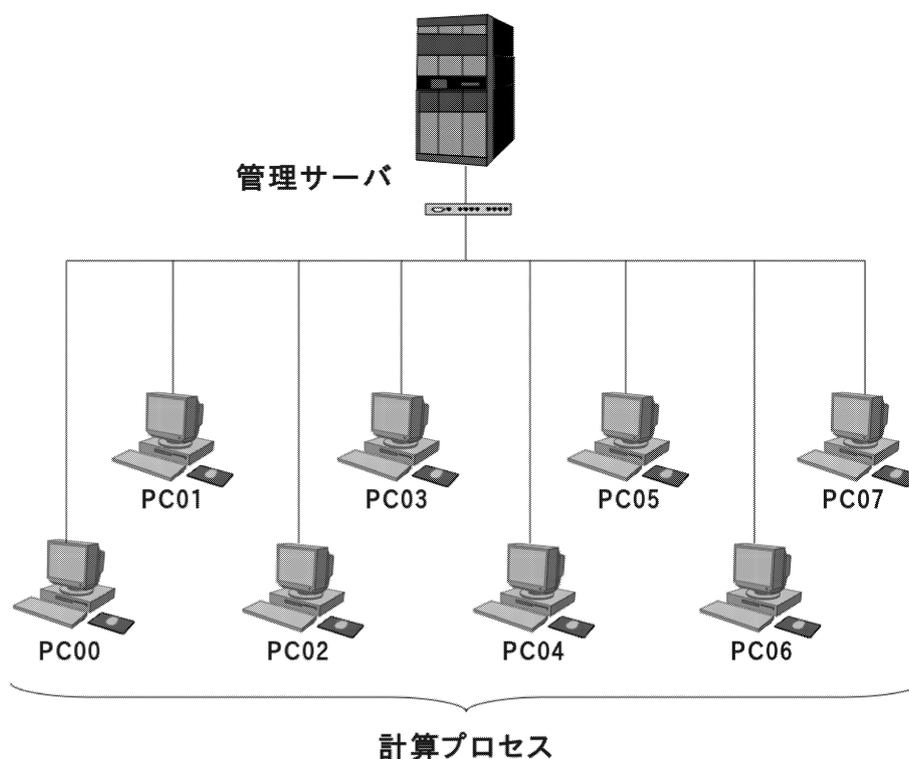


図 3: 実験システム

5.2 提案手法

本研究では、巡回セールスパーソン問題に対して、タブーサーチを並列化することにより、解空間の探索範囲を広げ、より良い近似解を得ることを目的とする。提案する手法を以下に列挙し、それぞれについて説明する。

1. 計算プロセスのグループ分け

提案手法では、複数の計算プロセスをいくつかのグループに分割する。例えば、計算プロセス数が 8、分割グループ数が 4 である場合は、1 グループに含まれる計算プロセス数は 2 である (図 4)。ここで、タブーサーチを行うプログラムを 1 つの計算プロセスとする。

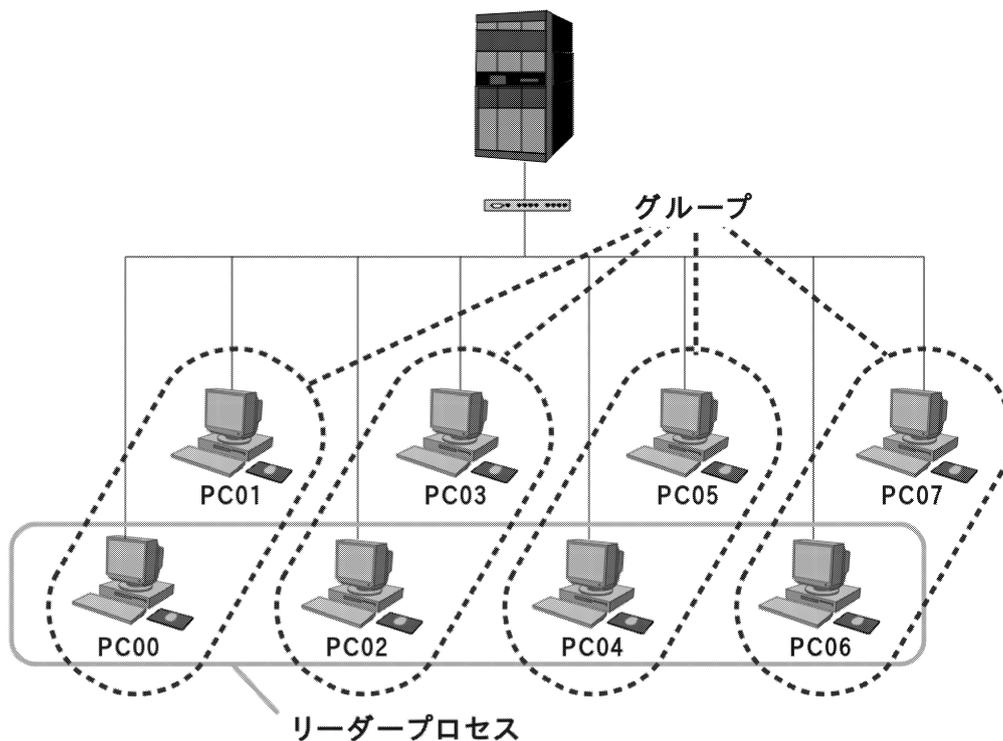


図 4: 計算プロセスのグループ分け

ここで分割されたグループにおいて、グループ内とグループ間では、通信頻度と通信データ内容が異なっている。

1つのグループ内には1つの計算プロセスがリーダーに選ばれる(リーダープロセス)。グループ間通信はこの選ばれたリーダープロセスのみが行う。リーダーに選ばれなかったプロセスはグループ内通信のみを行い、リーダープロセスはグループ間通信とグループ内通信の双方を行う。

2. グループ内通信 (解経路情報の共有)

グループ内通信では、各計算プロセスが各々で記録した最良の局所最適解の経路情報がやりとりされる。探索が開始されてから一定以上の探索が行われた後にこの通信が開始され、局所最適解の値が更新される度にグループ内のすべての計算プロセスへと順次情報が送信される。この解の経路情報は、解生成時や解の交叉の際に使用される。

3. グループ間通信 (タブーリストの共有)

リーダープロセスは他のグループのリーダープロセスとタブーリストを共有する。ただし、共有されるタブーリストと、各計算プロセスで利用されるタブーリストは別々に用意され、リーダープロセス(グループ)間では、この共有されるタブーリストの情報のみを通信して共有する。

各リーダープロセスのタブー探索の際に、既にタブーとしてリストに登録されている解の遷移が隣接する解の遷移候補として選ばれた場合、この解の遷移情報を、共有されるタブーリストとして登録する。これにより、個別に保有するタブーリストの中でも、特に頻繁に隣接する解として選択される解の遷移候補が抽出される。リーダープロセスは、この共有のためのタブーリストが一定数蓄積された段階で、他のグループに属する全てのリーダープロセスに情報を送信する。リーダープロセスは、他のリーダープロセスから受信した共有タブーリストを、各自が保有するタブーリストと併せて探索に使用する。

4. 解の交叉

巡回セールスパーソン問題では、すべての都市を一度ずつ通るという条件があるため、Grefenstetteらが考案した順序表現による交叉を用いる [1]。まず、次に巡回する都市が、残っている都市リストの中で何番目に位置するかを順番に列挙していく。例えば、パス表現で表した親1{a,e,d,c,b}は、順序表現で表すと{1,4,3,2,1}、親2{d,b,a,e,c}は、{4,2,1,2,1}となる。順序表現よって得られた2つの親を2番目と3番目の間で1点交叉すると、{1,4, | 1,2,1},{4,2, | 3,2,1}が得られ、パス表現に戻すと、子1{a,e,b,d,c}、子2{d,b,e,c,a}となり、条件を満たした2つの新たな解ができる (図5)。この交叉を用いた場合、子1は交叉地点までの親1の情報、子2は交叉地点までの親2の情報のみを受け継いでおり、交叉した地点以降の都市は不規則に並び変わっている。本提案手法において、解が停滞した場合、順序表現を用いた解の交叉により、解の経路が大幅に修正される。

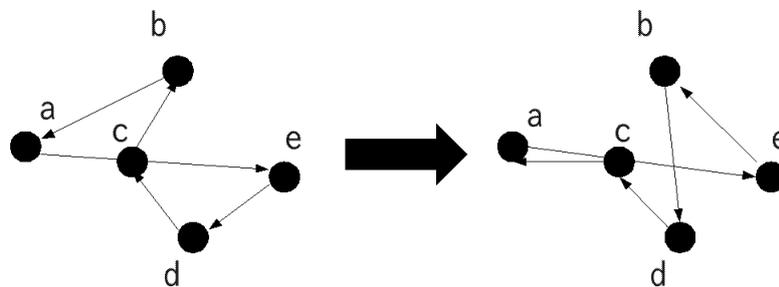


図 5: 解の交叉

5.3 提案アルゴリズム

以下に提案アルゴリズムを詳述する。

1. 初期解の生成

初期解の生成は、3.4節で述べた最近近傍法を用いて生成される。最近近傍法は、ある点から最も近い点を探して進む探索方法であるため、始めに選択する点と同じであれば生成される経路も全く同じものになる。よって、探索開始点の決定を固定化せず、探索毎にランダムに始点を決定することで初期解の多様性を実現している。

2. 近傍探索

初期解が生成されると、3.5 節で述べた *2-opt* 探索を行う。初期段階では、距離が最も改善される枝を選択し、枝交換を行う。

3. 解の停滞を感知

探索が繰り返されるにつれて、枝交換によって距離が改善されなくなる。保存されている直近の探索結果の中に同じ距離の結果が続くと、小規模な解の停滞であると見なされ、タブーサーチへと移行する。

4. タブーサーチ

タブーサーチでは、あらかじめ設定された割合を超えない程度の改悪を許容した解の遷移が行われる。この際、タブーリストに交換した枝の情報を記録させ、解の遷移を制限する。

5. 解の停滞を感知

局所最適解が一定回数探索を行っても更新されていないことを感知すると、中規模な解の停滞であると見なされ、交叉へと移行する。

6. 解の交叉

5.2 節で述べた順序表現を用いた解の交叉を行う。現在探索中の解を親 A とし、新たな解である親 B を用意する。親 B は、初期解として最近近傍法を用いて生成され、交叉後は子 B の解を利用する。また並列処理を行った場合、別のノードから送られてきた解を親 B とする。交叉によって得られた子 A を初期解として新たに探索を繰り返す。

7. 最終終了条件

終了条件は探索時間によって決定し、あらかじめ設定しておいた時間になると探索を終了し、最も良い解を表示する。

6 実験結果

6.1 実験環境

本研究で使用した実験システムの詳細を示す。サーバ 1 台と計算プロセス 8 台で実験を行う。各々の性能を表 1、2 に示す。

表 1: サーバの性能

CPU	Intel Xeon X5470 3.33GHzX4
Memory	4GB
OS	CentOS 5.2
MPI	SCore version 7 Beta 2

表 2: 計算プロセスの性能

CPU	Intel Core2Duo E6850 3.00GHzX2
Memory	4GB
OS	CentOS 5.2
MPI	SCore version 7 Beta 2

6.2 実験結果

本実験は、巡回セールスマン問題のベンチマーク問題例を提供している TSPLIB[13] より、都市数 575 の問題 (rat575) と都市数 318 の問題 (lin318) を対象に実験する。探索時間は 30 分であり、各平均値と各最小値は 10 回の計算結果からの平均値と最小値を示す。

表 3 は、都市数 575 の問題例に対する結果である。表 3 より、通信を用いた並列計算を行う場合とそうでない場合を比較した場合、平均値・最小値双方ともに通信を用いた並列計算処理による結果が優れていることがわかる。特に、最小値に関しては良い結果が出ている。

表 3: rat575 の結果 (最適解:6773)

rat575		総距離	最適解との誤差 (%)
通信 有り	平均	6910.75	2.03
	最小	6869.12	1.42
通信 無し	平均	6934.58	2.39
	最小	6923.48	2.22

表 4 は、都市数 318 の問題例に対する結果である。表 4 より、rat575 と同様に lin318 も並列計算を行った方が平均値・最小値ともに優れた結果となっている。lin318 よりも問題サイズの大きい rat575 の場合と比較して、大幅に良い結果が得られていることがわかる。

表 4: lin318 の結果 (最適解:42029)

lin318		総距離	最適解との誤差 (%)
通信 有り	平均	42358.54	0.78
	最小	42082.42	0.13
通信 無し	平均	42414.07	0.92
	最小	42326.44	0.71

6.3 考察

実験結果より、通信を用いた並列計算と通信を用いない各自の計算を比較した場合、問題サイズにかかわらず、通信を用いる提案法がより優れた結果となった。これは、通信を用いる本研究の提案手法で用いた共有タブーリストが、重複する探索を回避し、探索に良い影響を与えたことを示している。

このことから、タブーサーチにおける解の探索は、ある一定以上の精度の局所最適解に至ると、その解に辿り着くまでのアプローチが異なっても、類似した解の遷移を行うことが推測される。共有タブーリストは、過去に登録した解の遷移情報と重複した遷移を防ぐ役割を持つため、単一の計算プロセスでは到達できない多様な解の遷移を、複数のプロセスが互いの遷移記録を共有することで、実現することができたと考えられる。

また、タブーリストによる解の遷移の制限だけではなく、解の交叉という遷移方法を用いることにより、単純な 2-opt 法による解の遷移だけでは到達不可能な大幅な解の遷移を行うことができた。一時的には急激に改悪方向へと解が遷移するが、最終的に結果が優れていたことから、解の多様化に大いに貢献したといえる。

全体の結果から、解の遷移を並列化して効率的に探索を行うこと、そして解を多様化することが、近似解法における優れた解を導く方法として、非常に有効であることが導かれた。

7 おわりに

本研究では、MPI 通信を用いた並列環境において、巡回セールスパーソン問題に対する並列タブーサーチアルゴリズムを提案した。本提案手法では、解の多様性を高め解の停滞を防ぐために、共有タブーリストを導入し、遺伝的アルゴリズムに倣った解の交叉を行うことで、効率的な探索を試み、それを計算機実験により検証した。実験結果から、従来法に比べ、良い近似解が得られており、多様な解への探索と重複の少ない探索が実現できていることが分かった。

巡回セールスパーソン問題の応用分野は、現在のところ生命科学（遺伝子解析）、ロボット工学（表面実装ロボットの動作計画）、電子工学（電子基盤設計）などに限定されている。しかし、わ

れわれは、金融・保険業における ATM（自動窓口業務機）に対する現金回収費用の最小化問題をはじめとして、社会科学の各分野に応用可能であると考えている。

今後、提案手法を改善し、より良い近似解を求めて行きたい。また、より多くの問題例で計算機実験を行うことにより、提案手法の性能をより深く検証していくつもりである。

謝辞

本研究は文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業（学術フロンティア推進事業）による助成を受けて行った研究成果である。

参考文献

- [1] John J. Grefenstette, Rajeev Gopal, Brian J. Rosmaita, and Dirk Van Gucht: " Genetic algorithms for the travelingsalesmanproblem ", John J. Grefenstette: Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms, pp.160-168, Lawrence Erlbaum Associates: Hillsdale, New Jersey, (1985)
- [2] K. Helsgaun: " An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic ", Eur.J.Oper.Res., vol.126, no.1, pp.106-130, (2000)
- [3] Bernhard Korte、Jens Vygen 著、浅野孝夫、浅野泰仁、小野孝男、平田富男 訳、組合せ最適化 第2版、シュプリンガー・ジャパン株式会社、(2009)
- [4] Message Passing Interface Forum, <http://www.mpi-forum.org/>
- [5] MPICH2, <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpich2/>
- [6] Hung Dinh Nguyen, Ikuo Yoshihara, Kunihiro Yamamori, and Moritoshi Yasunaga : " Implementation of an Effective Hybrid GA for Large-Scale Traveling Salesman Problems ", IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Part B, vol.37, no.1, pp.92-99 (2007)
- [7] Open MPI Open Source High Performance Computing, <http://www.open-mpi.org/>
- [8] Peter S.Pacheco 著、秋葉 博 訳、MPI 並列プログラミング、培風館、(2001)
- [9] PC Cluster Consortium (PCCC) , <http://www.pccluster.org/>
- [10] Colin R. Reeves 編、横山 隆一 (他) 訳、モダンヒューリスティックス 組合せ最適化の先端手法、日刊工業新聞社、(1997)
- [11] Sadiq M. Sait, Habib Youssef 著、白石 洋一 訳、組合せ最適化アルゴリズムの最新手法、丸善、(2002)

- [12] Thomas L. Sterling、John Salmon、Donald J. Becker、Daniel F. Savarese 著、北野宏明 監修、奥乃博、諸橋峰雄、京田耕司、中臺一博 訳、PC クラスタ構築法 Linux によるベオウルフシステム、産業図書株式会社、(2001)
- [13] TSPLIB, <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/tsp/>
- [14] 浅野 哲夫、和田 幸一、増澤 利光 著アルゴリズム論、オーム社、(2006)
- [15] 北野 宏明、遺伝的アルゴリズム 1、産業図書、(1993)
- [16] 棟朝 雅晴 著、遺伝的アルゴリズム、その理論と先端的手法、森北出版、(2008)
- [17] 柳浦睦憲、茨木俊秀 著、組合せ最適化-メタ戦略を中心として-、朝倉書店、(2001)
- [18] 山本芳嗣、久保幹雄 著、巡回セールスマン問題への招待、朝倉書店、(1997)