

Implementation of Parallel and Distributed Genetic Algorithms Using a PC-Cluster

Tomoyuki HIROYASU*, Mitsunori MIKI** and Yusuke TANIMURA***

(Received May 6, 1999)

A PC-cluster is one of parallel computers. PC-clusters have high cost performance, but there are very few studies that are concerned with discussions of applications on PC-Clusters. This paper examines the characteristics of parallel genetic algorithms (PGAs) on a PC-cluster. PGAs are roughly classified into two approaches. Those are the island model approach and the distributed evaluate functions approach. In this study, these two approaches are compared from the view point of calculation time and calculation cost. It is made clear that parallel distributed genetic algorithms (PDGAs) using the island models can find optimum solutions in short time and PDGAs are suitable for PC-clusters.

Key words : parallel computing, cluster computing, genetic algorithms

キーワード : 並列計算, クラスタコンピューティング, 遺伝的アルゴリズム

PC-Clusterにおける並列分散遺伝的アルゴリズムの実装

廣安知之・三木光範・谷村勇輔

1. はじめに

並列処理・分散処理は、計算負荷の高いプログラムを高速に処理する手法の1つである。これらに関する研究は歴史的にも数多く行われており¹⁾、その多くは専用設計の並列計算機を用いたものである^{2,3)}。しかし専用設計の並列計算機は導入コストが高く、一般的に利用するには敷居が高いと思われる。それに対して計算負荷の高いプログラムを高速に処理する必要性は高まっており、より「安価な並列計算機」が求められるようになってきた。一方、近年のコンピュータ技術の進歩には目覚ましいものがあ

る。ハードウェアの面では、高性能なPC向けプロセッサの急速な性能向上とPCの量産効果による価格低下が挙げられる。また、イーサネットスイッチや100Mbps級のネットワーク技術が一般化し、高性能なネットワークを比較的安価で構築することが可能となった。ソフトウェアの面では、ネットワークに接続されたコンピュータ群を分散メモリ型の単一の並列計算システムとして利用するPVM (Parallel Virtual Machine)⁴⁾の開発やMPI (Message Passing Interface)⁵⁾が策定されたこと等が挙げられる。これにより並列プログラムの記述性と移植性が著しく向上された。また、Linux⁶⁾やFreeBSDに代表される

* Department of Knowledge Engineering and Computer Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: 0774-65-6638, Fax:0774-65-6780 E-mail: tomo@is.doshisha.ac.jp
** Department of Knowledge Engineering and Computer Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: 0774-65-6434, Fax: 0774-65-6796 E-mail: mmiki@mail.doshisha.ac.jp
*** Graduate School of Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: 090-2384-6531 E-mail: tanisuke@mikilab.doshisha.ac.jp

オープンソースな PC-UNIX の普及は、これらの MPI を PC へ実装する原動力となった。こうして既存 LAN のような複数の PC が接続されたネットワークの一部を 1 つの並列計算システムとして利用することは、極めて容易なこととなったのである。そのような並列計算システムが、PC-Cluster システムである。

このように PC-Cluster システムは実用段階にあるといえるが、PC-Cluster 上でのアプリケーションを実装した際の研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、PC-Cluster 上に時間的コストに問題のある遺伝的アルゴリズム（以下 GA）を実装し、その性能を検証する。GA を並列計算システム上に実装するモデルとしては、単一母集団モデルと分割母集団モデルがあると考えられる。そこで本研究では、母集団を分割して GA を行う時の解の探索性能を調べ、それを踏まえて単一母集団モデルの GA と分割母集団モデルの GA を並列化して実行した時の短縮される計算時間を比較する。本論文では、これらの結果からそれぞれのモデルでどのような並列・分散効率があるかを明確にし、PC-Cluster 上で並列分散 GA を行う際の検討を行う。

2 構築した PC-Cluster システムの仕様

通常、PC-Cluster システムは一般的に手に入りやすいハードウェアと、MPI や PVM などの汎用の並列通信ライブラリを用いて構築される。これにより、従来の専用設計の並列計算システムに比べて、コスト・パフォーマンスの高いシステムを構築することが可能である。本研究で構築した PC-Cluster システムは、Table. 1 に示すように Intel Pentium を搭載した PC 8 台を、10Mbps の Ethernet にスイッチングハブを用いて接続したシステムである。通信ライブラリには MPICH1.0.13 を用いており、マスターノードとスレーブノードは NFS により実行ファイル及びデータファイルを共有している。Fig. 1 にその構成図を示す。

Table. 1 PC-Cluster system spec

processor	Intel Pentium 260MHz	メモリ	64MB
OS	UNIX	ネットワーク	10Mbps Ethernet
通信ライブラリ	MPICH1.0.13		

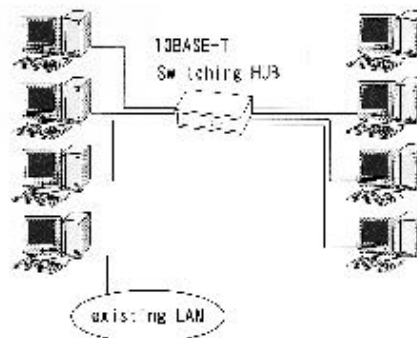


Fig. 1. PC-Cluster system architecture

3. 遺伝的アルゴリズムとその並列化

3.1 並列遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms : GA) は、生物の遺伝と進化を模倣した確率的多点探索手法であり、探索領域が連続な問題にでも離散的な問題にでも対応できる最適化アルゴリズムの 1 つである。GA は Fig. 2 に示すような一連の操作の繰り返しによって最適解が求められる。しかしその計算負荷は高く、大規模な問題を解くには実用性に乏しいという問題点もある。その問題点の解決方法の 1 つとして並列計算システムを用いた並列 GA が考えられる。GA の並列化には、単一母集団において GA 計算の最も時間を要する評価計算の部分をデータ並列化するモデルと、GA を行う母集団を分割して複数の島に分け、各島ごとに GA を行う 2 つのモデルが考えられる。また複数島に分割するモデルでは、島間で個体を交換する移住と呼ばれる操作が必要になる。本研究では、前者の実装モデルを a) 評価計算分散アプローチ、後者を b) 島モデル分散アプローチと呼ぶ。

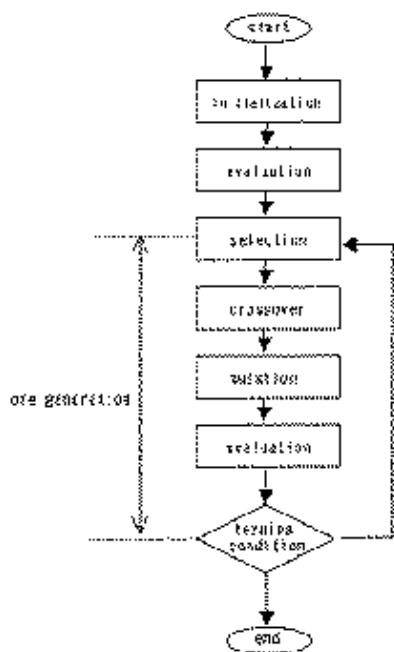


Fig. 2. Simple genetic algorithms

スターノードに返す。c)の操作では、マスターノードは評価値を返してきたスレーブノードにまだ評価されていない個体の遺伝子(ビット列)を送る。このb)とc)の操作を評価されていない個体がなくなるまで繰り返す。全個体の評価が終了するとマスターノードは再び、これらの評価値をもとにGAの操作を続ける。一方、スレーブノードは次の世代の評価計算がマスターノードから与えられるまで待ち状態に入る。このモデルは当然プロセッサ数が3台以上でないと成立せず、PGAPackでは3プロセッサ未満の時には異なるモデルでGAを行うように実装されている。本論文では、3プロセッサ以上を使ったPGAPackのモデルを評価計算分散アプローチと呼ぶことにする。

3.1.1 評価計算分散アプローチ

GAはGoldberg⁷⁾が指摘している通り、潜在的に並列性を有したアルゴリズムである。これまでも多くの並列GAの研究がなされており、高性能な汎用コードもいくつか存在する。Argonne National Laboratoryで開発されたPGAPack⁸⁾もその1つである。これはGAにおける計算時間の大部分を占めると考えられる評価計算のループ部分を並列化したものであり、ホットスポットを並列化して大きく時間短縮を図るといふ並列処理の原則に従った実装である。すなわち、GAの操作は1つのマスターノードで逐次的に行い、スレーブノードは評価計算のみを担当する。この評価部分の具体的な実装はFig. 3に示すように、初めにa)の操作でマスターノードから各スレーブノードに任意の1個体の遺伝子(ビット列)が配られる。次にb)の操作で、全スレーブノードが与えられた個体の評価計算を行う。そして計算の終了したスレーブノードから、求めた評価値をマ

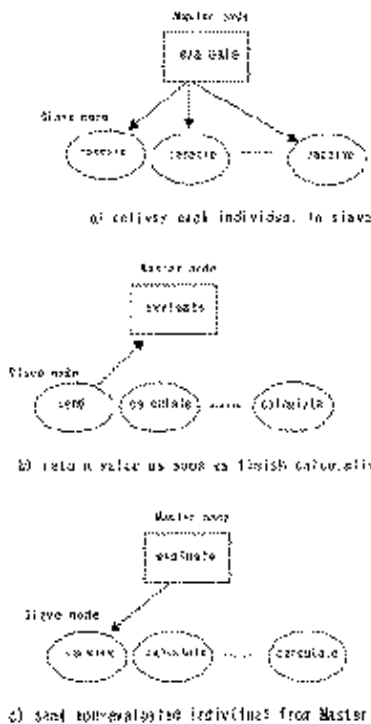


Fig. 3. Distributed evaluating approach

3.1.2 島モデル分散アプローチ

3.1.1の評価計算分散アプローチに対して、SGAのモデルを分散モデル化し、それを並列化するアプローチは一般にPDGA (Parallel and Distributed Genetic Algorithms) と呼ばれる。これはGAの母集団を複数の島に分割し、各島が連携を取りながら世代を重ねていくモデルである。本論文では、このモデルを島モデル分散アプローチと呼ぶことにする。

Fig. 4に、GAの島モデル分散アプローチのプロセスを示す。SGAと異なるのは、選択と交叉の間に移住という操作を設けていることである。移住とは、分割した母集団内でのローカルな探索をグローバルなものとするために、各島間で個体を交換する操作である。普通、移住はある定められた世代間隔で定められた個体数だけ交換を行う。移住の操作には種々の形態があるが、本研究では、以下に述べる移住のモデルを用いることとする。すなわち、各島の個体の移住先については移住のたびにランダムに選択される方法を取り、移住先も移住元も単一とする。母集団全体で見ると、ある1回の移住の操作はFig. 5のようにリング状に行われる。

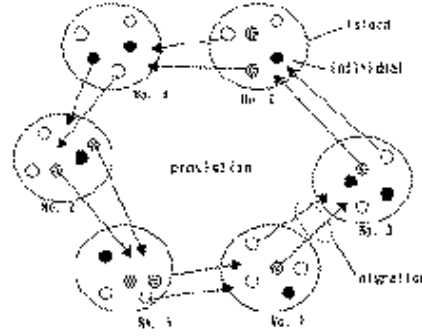


Fig. 5. Migration model example

3.2 GAの分散効果

島モデル分散アプローチは、3.1.2で述べたようにGAの解の探索方法が単一母集団GAとは異なる。そのために、解の探索性能に大きな影響が及ぼされる可能性も考えられる。また、母集団の分割数をどのように決定するかという問題も生じる。本研究では、島モデル分散アプローチの並列化性能を検討する前に、GAの分散による影響について調べる。この実験を行うためにGAのモデルとパラメータに関する検討を行った結果、以下のGAモデルを採用することにした。まず終了条件を「母集団の個体の99%がエリートと同じとなった時GAを終了する」、あるいは「スケリングした適合度値の合計が 10^{-6} 以下になった時GAを終了する」とする。上記の2つの操作については本質的な違いはなく、どちらも新しい個体の生まれる確率がある一定以下になった時にGAを終了するという意味である。次に突然変異を行わずに、スケリングの操作を加えた選択を用いる。これは、GAの評価方法にはいくつか考えられるが、本研究では解探索の継続に意味がなくなった際の最適値とそれまでの計算量を評価とするためである。逆にいえば、突然変異を行わせることで解探索が半永久的に継続されてしまうためである。このようなGAモデルを採用することで、初期個体数がGAの重要なパラメータとなる。つまり、交叉によってのみ新しい個体生まれることはないために、解を求めるために必要な探索領域を十分な初期個体

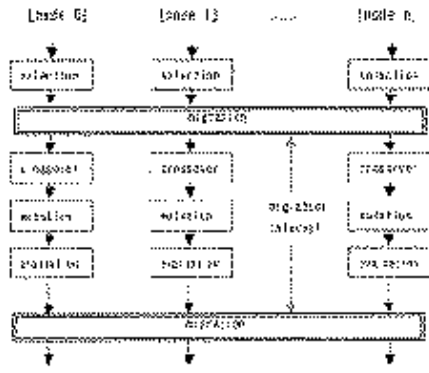


Fig. 4. Island model approach

数によって確保しておかなければならない。そして本研究では、最適解が既知の問題に対して9割以上の確率で最適値が求まる初期個体数の最低値を、必要個体数と呼ぶことにする。当然、必要個体数は問題に依存することになる。

次にGAの計算量について考える。GAの計算の大部分は評価計算であると考えられる。評価部分の総計算量は「1個体の計算量×個体数×世代数」で求められる。ただしGAの評価の操作に、交叉や突然変異を行っていない個体や、過去に1度評価計算を行った個体と同じ遺伝子をもつ個体の評価計算をさせないといったアルゴリズムを組み込むことで、より計算回数を減らすことが可能である。本研究では、GAの評価の操作にこのアルゴリズムを組み込み、個体数を必要個体数にしてGAを行う。これによって測定した評価計算回数は、真の最適解を得ることのできるGAの最小の評価計算回数であると考えられる。そしてこのように測定した評価計算回数は、GAを使って問題を解く場合の問題の難易度や計算負荷の1つの目安となると考えられる。

分散効果はこの評価計算回数を用いて調べることにする。一連の操作手順を述べると、まず単一島及び複数島の必要個体数を調べる。そして必要個体数で複数島のGAを実行して、各母集団の評価計算回数の合計を求める。この結果が必要個体数で単一島のGAを実行した時の評価計算回数より少ない時に、GAの分散効果が得られたということにする。

4. 分散GAモデルの検討

4.1 対象問題と用いるGAの仕様

母集団を分割してGAを行うことによる影響を検討するために以下に説明する数値計算を行う。

最適化問題にはいくつかのタイプがある。最初にそれらの分類を行い、それぞれの問題についてGAの分散効果の影響を調べる。GAでは求める解をビット列の形で表し、「1つの設計変数に対応するビット列×設計変数の数」が1個体の遺伝子長となる。これに着目して分類を行うと、3つのクラスが考えられる。それをTable. 2に示す。

Fig. 6 a) に示すように設計変数が互いに独立であるとは、1つの設計変数を構成する一連のビット列

Table. 2 Classification of problems

class A	maxbit problem	building block
class B	rastrigin	grouping
class C	intermediate	intermediate

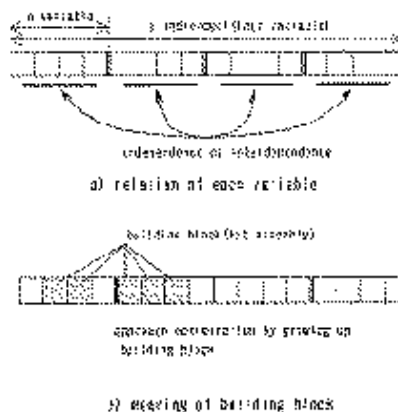


Fig. 6. Classification methods of problems

が他の同様のビット列部分と相関関係がないことである。またビルディングブロックとはFig. 6 b) に示すように、設計変数とは関係なく部分的に存在するビットの集合である。ビルディングブロックは、最適解を生成する個体のビット列の一部である。つまりこのビルディングブロックが、世代が進んでも損なわれずに成長することで最適解の探索を行うことができる問題を、ビルディングブロックに意味がある問題と呼ぶことにする。

本研究では、クラスAの代表にmaxbit問題を用いる。maxbit問題は、GAにおける各個体のビット列を全て1とする問題であり、全てのビット列が1となった時が最適解となる。すなわち、1設計変数が1ビットで表される。本実験ではこれを60ビットで行った。クラスBの代表にはRastrigin関数の最小値探索問題を用いる。これはFig. 7 a) に示した数学的関数の最小値を求める問題である。本実験では1設計変数あたり10ビットで5設計変数の問題を用いた。クラスCの代表にも同様に数学的関数の最小値を求める問題を用いる。Fig. 7 b) に示すようなRosenbrock

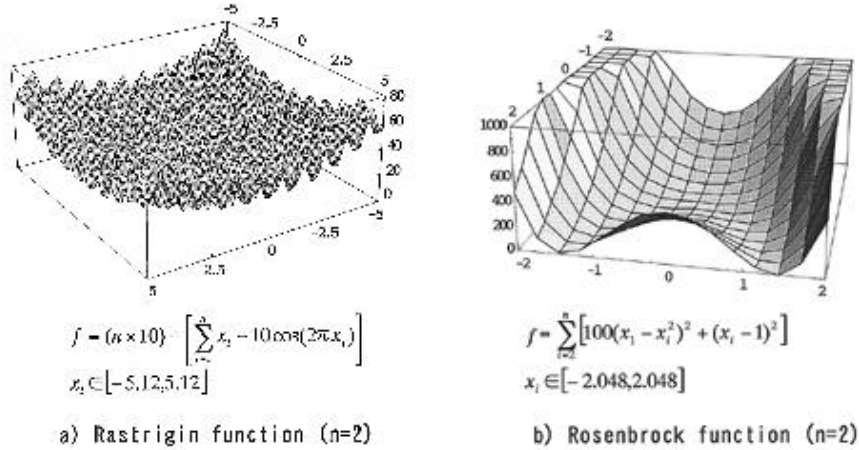


Fig. 7. Mathematical functions of problems

Table. 3 Parameter set up by problems

Problem	maxbit	maxpop	maxgen
maxbit	1	100	100
maxpop	10	100	100
maxgen	10	100	100
maxbit	1	100	100
maxpop	10	100	100
maxgen	10	100	100

関数を1設計変数あたり4ビットで5設計変数の関数として、その最小値探索の問題である。ただし、1設計変数を4ビットとするとグレイコードでは最適値0が求まらないので、デコードされた各設計変数に常に - 0.024を加えた値を実際の設計変数として用いることにする。またクラスBとクラスCの両方の問題において、実際の適合度値は関数fの値に - 1を掛け た値を用いることにする。

3つの問題において、GAの最適なパラメータは多少異なる。ここではTable.3に示すようなパラメータでGAを行うことにする。パラメータの違いは、それぞれの問題に対して最適と考えられるものを用いたことによる。

4.2 実験と結果

[クラスA : maxbit 問題]

本実験で用いた maxbit 問題は1設計変数あたりのビット数が1であること、設計変数間に依存がないことから、非常に簡単な最適化問題であると思われる。実験結果もそれを示し、特に前者の特徴のために一様交叉を用いることで、効果的な探索が行われた。Fig.8の分散効果より4島が最適な島数であり多少の分散効果が得られたが、それ以外の島数ではGAの分散効果が得られなかった。

[クラスB : Rastrigin 関数の最小値探索問題]

Fig.8に示すように、複数島でGAを行うと非常に良い分散効果が現れた。そして分散効果が最大となる島数は16島であり、これがこの問題の最適島数であると考えられる。この時、単一島の約4分の1の評価計算回数で最適値が求まった。また島数が最適島数を超えると、必要個体数が一定値に収束し始める。これは、GAに問題の解探索が行えるための最小の個体数が存在するためであると考えられる。すなわち最適島数以上でGAを行うと、次第にGAの分散効果が減少するという結果が得られた。

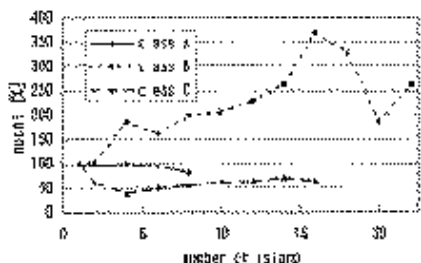


Fig. 8. Effect of distributed GAs

[クラスC : Rosenbrock 関数の最小値探索問題]

この問題では、複数島にすることで必要個体数の低下は見られるものの大きな低下は見られなかった。ゆえに、Fig. 8 に示すように GA の分散効果が得られなかった。つまり総個体数に着目すると、複数島で GA を行うことで GA の解の探索能力が低下しているといえる。これはこの問題が設計変数間に依存があるために、解の探索をすべてランダムサーチに頼らざるを得ないからであると考えられる。そのような問題では、各島において十分な数の個体数が存在しない場合、局所解に初期収束することが予想される。

4.3 GA の分散効果について

クラスAとクラスBのタイプの問題に対しては、母集団を複数島に分けることによる GA の分散効果が得られるのではないかと考えられる。4.2節のクラスAの結果では、本実験で用いた問題が非常に簡単であったためにあまり分散効果が得られていない。しかし、母集団を4島に分割して GA を行った時に多少なりとも分散効果が得られたことから、1設計変数あたりのビット数や設計変数の数が増えた難しい問題であれば、よりはっきりと分散効果が現れるのではないかと考えられる。それに対してクラスBの問題では、5次元の Rastrigin 関数というそれほど複雑な問題でない場合に対しても分散効果が得られることが明らかとなった。このような各設計変数が独立に存在する問題は、GA の多点探索による各設計変数での局所探索と移住という有効な情報交換操作を利用した解の探索法が極めて有効な問題であったといえる。

これらに対してクラスCのタイプの問題は、4.2節で示した結果から、母集団を分割して GA を行うことで悪影響が出ている。これには、設計変数間の依存を探り当てるには交叉のようなビット列の並び替えのみでは難しく、ランダムサーチに大きく依存しなければ解が求まらないためであると考えられる。すなわち、本研究で用いたGAのモデルでは、GA を行う母集団内の個体数を多く確保する必要がある。そのため母集団を分割して、1つの母集団あたりの個体数を減らすのではなく、単一母集団で GA を行うのが良いと考えられる。

5. 並列 GA モデルの検討

5.1 比較実験

a) 評価計算分散アプローチと b) 島モデル分散アプローチの並列 GA のモデルの並列処理の効率を検討するため、計算時間の内分けを測定した。計算時間の内分けは、評価の操作時間とそれ以外の GA の操作時間、そして並列化によって生じた通信によるオーバーヘッド時間の3つに分けられる。ただし評価計算時間は対象問題に依存するため、簡単な評価として Rastrigin 関数の評価計算を用いた場合と、複雑な評価として6節点10部材トラスの構造解析の評価計算を用いた場合に分けて測定を行った。Fig. 9 にその結果を示す。ただしこの結果は、分散効果の影響が現れないようにするために、3章で説明した GA を収束させるモデルを用いた結果ではなく、あらかじめ決められたある一定の世代間隔で GA を終了させた結果である。

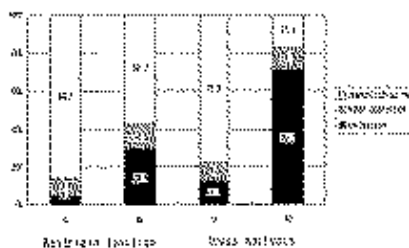


Fig. 9. Detail of execution time

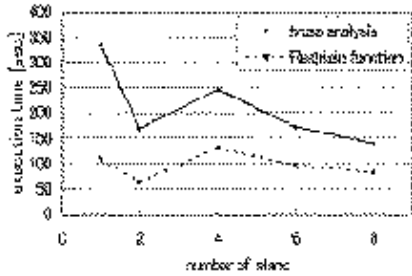


Fig. 10. Execution time of Island model approach

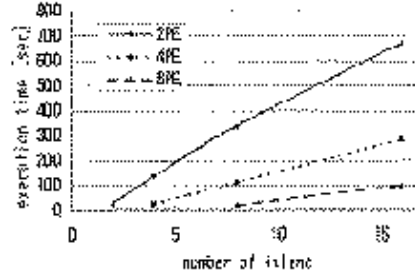


Fig. 11. Available processor and the best number of island

さらに、Fig. 10 に実際に島モデル分散アプローチで GA を行った時の計算時間を示す。Fig. 10 より、評価計算時間のあまりかからない Rastrigin 関数の問題においては、複数の PE を用いることで計算時間の削減が図れる場合とそうでない場合があった。これは Fig. 9 で示したように、通信時間によるオーバーヘッドが非常に大きいためである。一方、評価計算時間の大きいトラスの解析問題は、複数の PE を用いることで計算時間の削減を図ることができた。Fig. 10 で得られる計算時間が Fig. 9 で示した計算時間の内分けほど並列化効率を得られていないのは、本実験で用いた島モデル分散アプローチのプログラムに逐次部分があることや、通信時間以外のオーバーヘッドがあるためであると考えられる。

5.2 島モデル分散アプローチ

本実験で構築した PC-Cluster システムの使用できる最大 PE 数は 8 である。それに対して、4 章で取り上げた Rastrigin 関数の問題を GA で解くには、Fig. 8 より 16 島の PDGA を用いるのが最適であるという結果が得られている。そこで 2PE, 4PE, 8PE を用いた時の島数と計算時間の関係を測定した。Fig. 11 がその結果である。

Fig. 11 より、PE 数を超えて島数が存在すると計算時間が非常に大きくなるのがわかる。その理由には、以下のことが考えられる。島モデル分散アプローチの基本的な実装では、通常 1 つの PE が 1 つの島（プロセス）を担当する。しかし PE 数以上の島数で GA を行おうとする場合には、1 つの PE に複数の島が割り当てられ、複数のプロセスが立ち上がる

ことになる。複数のプロセスが動く PE ではプロセスの切替が起こり、そのオーバーヘッドは大きいと思われる。更に、島モデル分散アプローチではある世代間隔で移住が行われるために、プロセス切替の回数が通常より増加すると考えることができる。そして 1 つの PE に 2 つの並列プロセスが走ると、2 倍以上の計算時間がかかると考えられる。Fig. 11 のグラフに示される通り、今回用いた PC-Cluster システムでこの問題を解くには、8PE を用いて 8 島の PDGA を行うのが最も計算時間を短くする方法であるという結果が得られた。またこの結果は、PC-Cluster システムのような 1 つの PE に複数のプロセスが走ることのできる並列計算システムにおいて、使用可能な PE 数を超えたプロセスを走らせるた時の性能低下の問題を示しているといえる。

5.3 考察

評価計算分散アプローチは、島モデル分散アプローチに比べて通信量が多い。そのため、今回用いたようなネットワーク性能があまり良くない PC-Cluster システムでは、GA の評価計算時間が十分に大きな問題でなければ、実用的な並列化効率は得られないといえる。つまり 4 章で示した GA の分散による影響のために、GA の性能として多少悪くなったとしても、通信によるオーバーヘッドの小さい b) 島モデル分散アプローチを用いて GA を行う方が、計算時間を短縮できる場合もあると考えられる。評価計算分散アプローチの利点は、その実装モデルが非常に簡単なことである。Fig. 3 に示したように、各 PE に 1 個体ずつ評価計算をさせるという手法は、

ロードバランスを考慮することができる。本研究で用いた PE 数の少ない小規模な並列計算システムではなく、数百の PE 数をもつ大規模なシステムにおいて用いる場合には、全ての PE を均等に扱うことができるという点で優れていると思われる。

鳥モデル分散アプローチは、評価計算分散アプローチに比べて通信量が少ない。評価計算時間が極端に少ない問題に関しては、評価計算分散アプローチ同様、並列化によって時間短縮を図ることはできない。しかし、ある程度評価計算時間が大きく、評価計算分散アプローチでは実用的な時間短縮が行えないような問題に対しても、時間短縮が図れる。そのため、今回用いたようなネットワーク性能のあまり良くない小規模な PC-Cluster システムにおいては、非常に適した並列 GA のモデルであったといえる。このアプローチの欠点は、移住などの分割母集団型 GA としてのパラメータ設定が複雑であること、移住のためにある一定の周期で同期をとる必要があるため、ロードバランスが考慮しにくいことが考えられる。また、分割母集団型 GA には最適な鳥数が存在し、それを超えた数の PE が使用できる時に、余剰の分の PE を使用することが無駄になることも考えられる。すなわち、大規模な並列計算システムにはより工夫された実装が必要になると思われる。ただし PE 数が鳥数より少ない場合には、Fig. 11 の結果より、1つの PE に複数のプロセス立ち上げることは非常に不利であるといえる。そうした時に、鳥モデル分散アプローチでは PE 数に合わせて鳥数を設定し GA を行わなければならない。

6. 結論

本研究では、並列計算システムとして8台の PC からなる PC-Cluster システムを構築した。そして、それを用いて遺伝的アルゴリズム (GA) の並列化と分散化についての検証を行い、以下のことが確認できた。

- 1) GA を実装するにはいくつかのモデルが考えられるが、母集団の観点から単一母集団型と分割母集団型の2つのモデルが考えられる。対象問題の設計変数間に互いに依存がある場合には単一母集

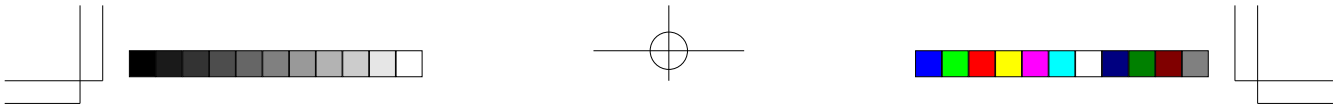
- 2) 並列 GA のモデルには、単一母集団型 GA の並列モデルの実装としての評価計算分散アプローチと分割母集団型 GA の並列モデルの実装としての鳥モデル分散アプローチが代表的である。両者を比較すると、後者の方が通信によるオーバーヘッドを抑えることができ、並列化によって大きく時間短縮が可能であることが確認された。
- 3) 鳥モデル分散アプローチでは、問題によって最適な鳥数が存在する。それに対して複数 PE で処理を行う場合に最適な鳥数に比べて使用可能な PE 数が少ない場合が考えられる。これに対しては PE 数に合わせて GA を行うことにより、計算時間を最も短くできることが確認された。

上記の事項をまとめると、今回用いた PC-Cluster システム上では並列 GA のモデルとして、鳥モデル分散アプローチが通信量の観点から性能が良いといえる。また、使用できる PE 数と同等の鳥数に設定することで最も良い効率を得られる。これらの結果は、比較的 PE 数の少ない PC-Cluster 全般にあてはまる結果であると考えられる。

今後、用いることのできる PE 数と最適な鳥数の関係や、GA の分散効果による影響等の検討が必要である。

参考文献

- 1) <http://www.computer.org/parascopes/>
- 2) S.E.Hambrusch, A.A.Knokhar, *Scalable S-To-P Broadcasting on Message-Passing MPPs*, IEEE TRANSACTION ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS, (1998)
- 3) S.Wallace, N.Bagherzadeh, *Modeled and Measured Instruction Fetching Performance for Superscalar Microprocessors*, IEEE TRANSACTION ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS, (1998)
- 4) http://www.epm.ornl.gov/pvm/pvm_home.html
- 5) <http://www.mcs.anl.gov/mpi/index.html>
- 6) <http://www.linux.or.jp/>
- 7) Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, (Addison-Wesley,



- Reading, MA, 1989)
- 8) D., Levine, XA Parallel Genetic Algorithm for the Set Partitioning Problem, (MCS-P458-0894, 1994)
 - 9) 坂和正敏, 田中雅博, 「遺伝的アルゴリズム」, (朝倉書店, 1997)
 - 10) 三木光範, 畠中一幸, 「並列分散GAによる計算時間の短縮と解の高品質化」, 日本機会学会 第3回最適化シンポジウム, (1998)
 - 11) 三木光範, 笠井誠之, 「PVMを用いたPCクラスタによる並列計算」, フロンティア事業研究発表会, (1998)
 - 12) Colin R.Reeves, 「モダンヒューリスティックス」, (日刊工業新聞社, 1997)

