

並列分散GAによる計算時間の短縮と解の高品質化

On the Reduction of Computation Time and the Improvement of Optimum Solution
by Parallel Distributed Genetic Algorithms

正 三木光範 (同志社大学工)
Mitsunori Miki

Knowledge Engineering Dept, Doshisha University, Kyoto, Japan.

学 畠中 一幸 (同志社大学院)
Kazuyuki Hatanaka

Genetic Algorithm (GA) has three major problems, Firstly, GA requires large amount of computer resources. Secondly, solution depends on its initial condition. Thirdly, it is difficult for users to adjust the GA parameters in order to get optimum solutions. This papers deal with a new parallel distributed genetic algorithms which can reduce the former two problems.

Key Words: Genetic Algorithm Optimization, Distributed Model, Parallel Processing.

1 はじめに

遺伝的アルゴリズム(以下GAと略記する)は生物の進化を模倣した確率的最適化法である¹⁾。GAは非常に適応範囲の広い最適化法ではあるが、計算負荷が高いこと、初期値依存性があること、アルゴリズムに含まれる各種パラメータ設定が経験的であるなどの問題を有する²⁾。本研究ではこれらの問題のうち前2者の解決法として注目されている並列分散GA³⁻⁷⁾を取り上げ、初期値依存性の減少と解の高品質化をもたらす現象の解明を行なう。

2 GA概説

2.1 GA及びその問題点

遺伝的アルゴリズムは、生物の進化を模倣した確率的最適化法である。GAは古典的な最適化法と比較して、以下のような特徴を持つと言える²⁾。

- 1) パラメータをコーディングしたものを直接利用する。
- 2) 一点探索ではなく、多点探索である。
- 3) サンプリングによる探索でブラインドサーチである。
- 4) 決定論的規則ではなく、確率的オペレータを用いる探索である。

これらの特徴からGAは、これまでの古典的手法に無い特徴を備えた新たな探索手法として注目を集めた。そしてスケジューリング問題、ネットワーク最適化問題など古典的最適化法で最適化困難な問題に適応され、その有効性が立証された。しかしながらGAが多くの問題に適応されるにつれ、以下のような問題が指摘されるようになった²⁾。

- 1) 初期値依存性が高い。
 - 2) 母集団が多様性を失うと、局所解へ収束する。
 - 3) 各種パラメータ設定の最適値が問題により異なる。
- 本研究では、これらの問題のうち前二者について、並列分

散GAを用いることにより解決を試みる。

2.2 並列分散GA

並列分散GA(以下、PDGA)を実現するにあたりさまざまな方法³⁻⁷⁾が存在するが、本研究では以下の方法を用いた。まず母集団を分割し、分割母集団を形成する。並列コンピュータの各プロセッサにおいて分割母集団の間する単純GA(以下SGAと略記する)を行う。本研究ではSGAとは、母集団が単一で、選択方法はルーレット選択にエリート保存戦略を加えたもので、交叉方法が一点交叉のGAを指している。しかし並列に処理を行うだけでは、処理速度向上以外の効果は期待できない。そこで一定期間ごとにプロセッサ間で個体の交換を行う移住と言う操作を加える。移住をする世代の間隔を移住間隔と言い、分割母集団の大きさに対する、移住する個体の割合を移住率という。移住相手となるプロセッサの選択方法にはさまざまな方法があるが、ここでは移住のたびにランダムに選択される方法とった。ただし、移住先も移住元も単一としたため、母集団全体で見るとある1回の移住はFig.1のようにリング状におこなわれる。

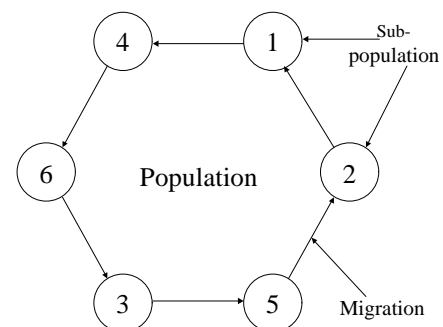


Fig. 1 Model of Parallel Distributed Genetic Algorithm
(The migration sequence is changed randomly at each migration time)

3 最適化問題

本研究ではトラス構造物の最適化問題を考える。各部材の材料は、簡単のため線形弾性体を使用しているが、全体の変形には幾何学的非線型性を考慮した。

最適化の対象とするトラス構造物をFig. 2に示す。節点の数は6、部材の数は10である。節点1および2は単純支持とする。節点4および6にはそれぞれ右向きに10kNの水平過重が作用する。このトラス構造物について、最小体積となる部材断面積を求める。制約条件として全体制約条件と局所制約条件を考える。局所制約条件は部材の引っ張り応力が40MPa以内であることと、座屈破損が生じないことである。全体制約条件は、接点6のX方向の変位が0.03m以内とする。適合度関数は目的関数と、節点の変位と部材の破損状況による制約条件から構成される。またトラスの構造解析には、任意の非線型現象が取り扱える、オブジェクト指向に基づく構造解析手法^{8,9)}を用いた。

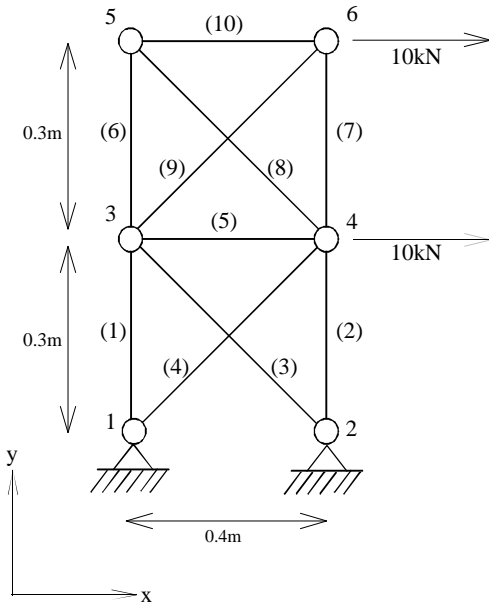


Fig. 2 10Member Truss

4 並列分散GAへの定式化

4.1 設計変数

1部材断面積あたり12ビットを使用する。これより設計変数の値域は1~4096mm²となる。最小値は1とした。したがって1つのトラスは120ビットで表される。コード化には隣り合う符号同士の間隔が一定となる、グレイコードを用いた。

4.2 適合度関数

まず、最小化すべき評価関数を式(1)に示す。

$$H = w_v + P_L + P_G \quad (1)$$

$$P_G = w_d \times d^2 \quad \text{if } (d > d^*) \quad (2)$$

$$\text{else } 0$$

$$P_L = \sum_{k=1}^N P_k \quad (3)$$

$$P_k = 1 \quad \text{if } ((S_n > S_0) \text{ or } (L_k > L_k^*)) \quad (4)$$

$$\text{else } 0$$

ここで、 V はトラス構造物の総体積、 w_v 、 w_d は重み係数、 d^* は節点6の変異の上限値、 P_G 、 P_L はそれぞれ全体制約と局所制約に関するペナルティ関数である。 S_k は引張強度、 L_k は部材kの座屈荷重である。 d^* の値は0.03であり、 w_v および w_d は経験的に600、1000とした。全体制約条件はトラス構造物全体に関わる制約条件で、節点6の変位 d が d^* より小さいならペナルティは0、 d^* 以上であれば変位の2乗の w_d 倍がペナルティとして架せられる。局所制約は、圧縮または伸長に関する条件を満たしていない部材の数がペナルティとなる。適合度関数 F は式(1)の逆数で表され、次式の形となる。

$$F = \frac{1}{H} = \frac{1}{w_v + P_L + P_G} \quad (5)$$

5 使用した並列計算機

本研究で使用した並列計算機は、64プロセッサを有する米国nCUBE社製のnCUBE2Eである。この計算機は分散メモリ型の並列計算機で、各プロセッサは、ハイパーキューブの相互結合網で結合されている。n次元のハイパーキューブ結合は 2^n 個で構成され、1つのプロセッサは隣接するn個のプロセッサと直接結合されている。そのため全情報交換をn回で行うことが可能である。

プログラムを作成するにあたり使用した言語は、プロセッサ間通信のための関数が追加されたnCUBE C++である。

6 計算結果と考察

6.1 各種パラメータ設定と計算条件

以下の条件下で、データの採取を行った。

- 1) 適合度の総計算回数を16万回と固定。
- 2) 分割母集団数を 2^n ($n:0-6$)とする。
- 3) 選択方法はルーレット選択を用いる。
- 4) 交叉率は0.6、交叉方法は1点交叉とする。
- 5) 突然変異率は染色体長分の一とする。
- 6) 終了世代数は500世代とする。

これらの設定の下で移住間隔、移住率を変化させ、それによる解の精度、最適解への収束の様子について考える。GA

では初期値が収束した後に及ぼす影響が大きいため、本研究では 1 つのパラメータ設定の組み合わせについて、異なる初期値から 10 通りのデータを採取し、それらの試行平均をもとに議論を行った。

6.2 計算時間の短縮

まず始めに計算時間の短縮について考えてみる。母集団を n 個に分割した PDGA では、理論的には計算時間は $1/n$ になる。分割母集団数と、10 回の試行平均時間の関係を Fig. 3 に示す。図中「理想的時間」は 1 プロセッサでの結果を分割母集団数で割った理想時間を示している。図よりどの分割数においても、試行平均時間は理想時間に極めて近い値を示している。分割数が 8 以下の場合には、試行平均時間を理想時間で割った並列化効率は、80%以上の非常に高い値となる。このことより PDGA は、並列コンピュータ上に実装するのに非常に適した最適化手法であると言える。

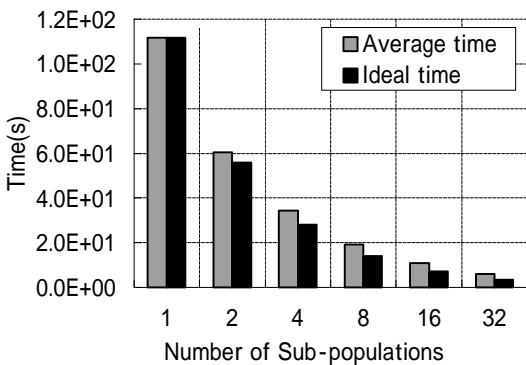


Fig. 3 Effect of Parallelization

6.3 移住間隔、移住率が解に与える影響

移住間隔と移住率が解に与える影響について考えてみる。Fig. 4は、分割母集団数が 8 の場合について、10 回の試行により求められたトラス構造物の総体積の試行平均値を、移住間隔と移住率ごとに表示したものである。

図より移住間隔の変化は、解に大きな変動を与えることが判明した。移住率を 0.3 に固定した状態では、移住間隔 1 の状態から値を増やすごとに改善され、50 で最も良い結果が得られている。間隔が 50 を超えた場合には逆に試行平均値は改善されている。これより移住間隔には、最適値が存在するといえる。

移住率については、移住間隔が長い場合には高めに設定し、移住間隔が狭い場合には低く設定すれば良いと考えられる。しかし、移住間隔の変化ほど解に大きな変動を与えていないと言える。

また図より、分割母集団数が 8 の場合には、最適な移住間隔と移住率は、おのおの 50 と 0.3 であることが判明した。

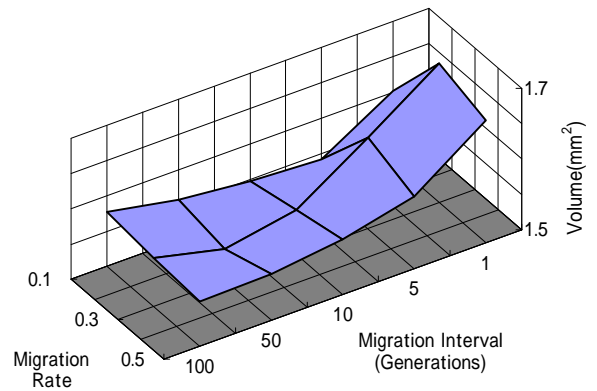


Fig. 4 Effect of Migration Interval & Migration Rate (Number of Sub-populations:8)

Fig. 5は分割母集団数が 32 の場合について、Fig. 4と同様のグラフを作成したものである。分割母集団数が 8 の場合と同様に、移住間隔が解に及ぼす影響は大きく、移住率与える影響は少ない。分割母集団数が 32 の場合には移住間隔 10 世代、移住率 0.3 が良いと考えられる。分割数が 8 の場合と比較して最適な移住間隔が狭まっている理由は、次で述べる。

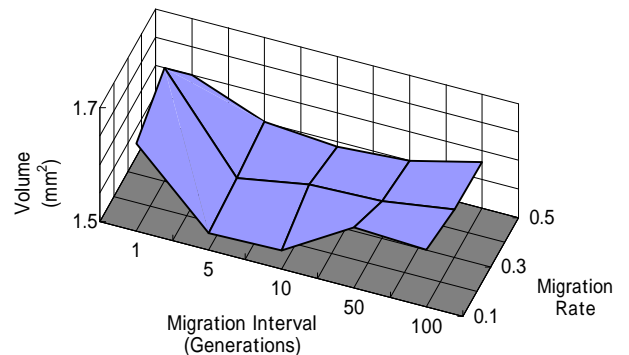


Fig. 5 Effect of Migration Interval & Migration Rate (Number of Sub-populations:32)

移住間隔を一定にした場合に、分割数が異なると解の収束にどのような影響があるかを考えてみる。例として移住間隔が 10 世代の設定下において、分割数 4 と 16 の場合を比較する。

分割数 4 の場合、どこかの分割母集団で得られた最適解が母集団全体に広がるまで 20 世代はかかる。一方、分割数を 16 にした場合には、最低でも 40 世代はかかる。

これらの違いから移住間隔を一定にしている場合には、分割数が多くなるほど、個体が母集団全体に広がるのに多くの世代を必要とする。そのため分割数が多い場合には、最

適な移住間隔は狭くなるといえる。

6.4 信頼性の向上と解の高品質化

母集団を分割してGAを行った場合に、解にどのような影響が現れるのかについて考える。そのため母集団の初期状態が異なる10状態について、SGAと総母集団数が等しく分割数が異なるPDGAを適応し、解の精度、収束の様子がどのように異なるのかを調査した。

Fig. 6はSGAと移住を行わないPDGAについて比較を行った図である。横軸に分割母集団数、縦軸にトラス構造物の総体積を示している。また図中、左端がSGAについての結果を示している。図よりPDGAを用いた場合には、試行平均値、試行最良値ともにSGAより良好な結果であることがわかる。またPDGAを用いることにより、試行最良値と試行最悪値の差が、SGAより狭まっているのがわかる。これより、母集団を分割することにより解の信頼性が向上していると言える。

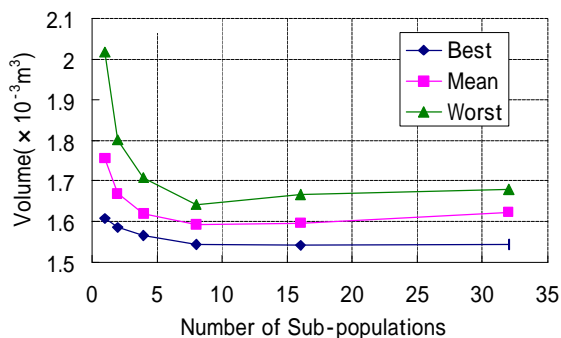


Fig. 6 Effect of the Number of Sub-populations (Without migration)

Fig. 7は移住間隔50世代、移住率30%のパラメータ設定下でPDGAを行い、Fig. 6と同様の図を表したものである。移住を行った場合には、移住を行わなかった場合より解の信頼性が向上し、さらに解の品質も向上している。これより同じ初期母集団に対し、適切な移住間隔と移住率を与えたPDGAを適用した場合には、移住を行わないPDGA以上に高品質で安定した解が得られることが判明した。次節でそれについての原因を考える。

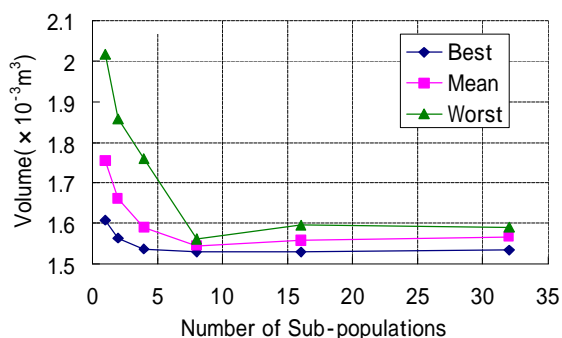


Fig. 7 Effect of the Number of Sub-populations

(With migration)

6.5 3方法による最適解の比較

同じ初期母集団に対し、SGA、移住無しPDGA、移住ありPDGAを適用し、得られた解およびその生成過程について考えてみる。PDGAを行なうにあたり分割数は8とした。また、移住を行ったものについて移住間隔と移住率は、それぞれ50および0.3とした。Fig. 8は0世代における適合度に関する上位8個体の断面積の分布を示したものである。これより初期母集団がランダムに生成されているのがわかる。

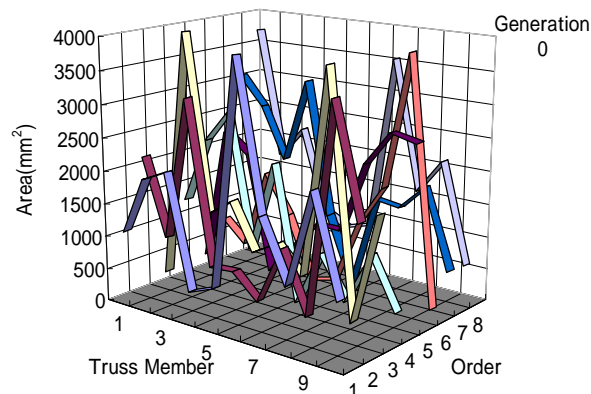


Fig. 8 Best-8 Solutions(Generation:0)

Fig. 9およびFig. 10は49世代目のSGAとPDGAの結果を示している。PDGAについては母集団全体から見た上位8個体ではなく、分割母集団内の最高降適合度を持つ個体を並べた。同一の初期母集団について適用されたにも関わらず、SGAとPDGAでは結果が大きく異なっている。

SGAによって得られた上位8個体の形状はどれも類似している。一方PDGAでは、分割母集団のエリート個体は性質の異なる個体であることがわかる。

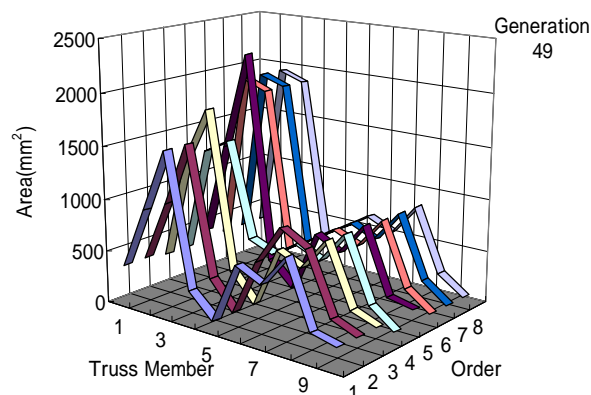


Fig. 9 Best-8 Solutions(SGA:Generation 49)

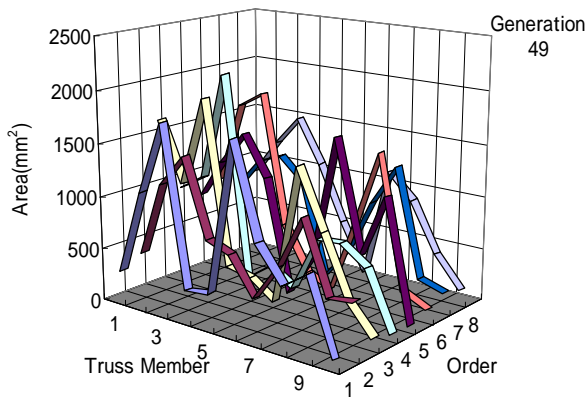


Fig. 10 Best-8 Solutions(PDGA:Generation 49)

これは個体が影響を与えられる範囲が、その個体が存在する母集団のみであることが原因となっている。したがって母集団を分割した場合には、各母集団ごとに異なる性質を持つ個体が生成できる。反対に単一母集団で世代交代を繰り返すと、ある適合度の高い個体の子孫のみが生き残り、その結果、多様性が失われる。これより分割母集団を用いた場合には単一母集団と比較して、解の多様性が保持できると言える。

Fig. 11からFig. 13はそれぞれ、SGA、移住無しのPDGA、移住ありのPDGAの最終世代での解の状態を示している。大域的最適解と比較を行なうため、個体番号0として最適解となった個体の断面積分布を示す。

Fig. 11のSGAによる結果では、トラスの総体積は $1.8754 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$ となった。これは最適解 $1.5058 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$ と比較すると精度の悪い解であり1.25倍の体積がある。また、断面積の分布の状態も最適解と異なっている。上位8個体の形状が類似していることから世代数を増加させても、最適解を得るためにはかなりの世代数が必要となると考えられる。

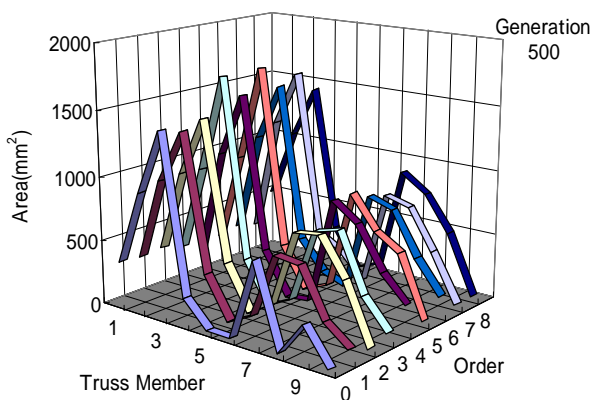


Fig. 11 Best-8 Solutions(SGA:Generation 500)

移住無しのPDGAでは母集団を分割したことによって、各母集団ごとに異なる最適解が生成された。この場合、分

割母集団1が最も高い適合度を示し、その総体積は $1.6235 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$ であった。これは最適解と比較して1.08倍の体積であるが、その断面積分布は最適解にかなり類似している。そのため世代数を増加させれば、最適解にたどり着く可能性は十分にある。しかし最適解を得るために必要なのは分割母集団1のみであり、これはたまたま分割母集団の初期値が良好だったことに起因する。このため移住なしPDGAは単一母集団GAより良い解を得ることができるとしても、かなり初期依存性が残る。

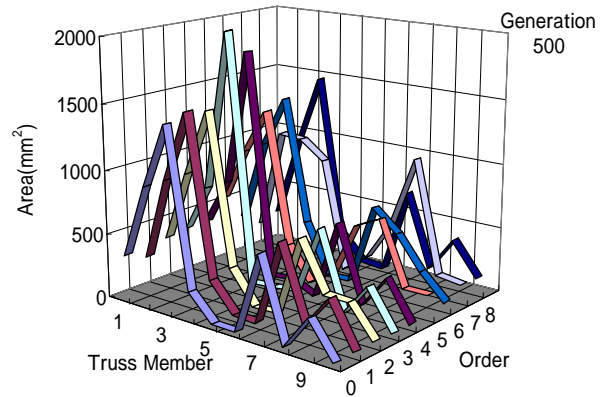


Fig. 12 Best-8 Solutions(SGA:Without migration)

移住ありPDGAではさらに良い解がえられた。トラスの総体積は最適解の1.02倍と非常に近い値であり、トラスの断面積分布も最適解に非常に類似している。また移住を行わない場合と異なり、どの分割母集団においてもほぼ同様の解が得られている。これは移住により、ある母集団で生成された高い適合度を持つ個体が母集団全体に広がり、その結果、最適解付近の十分な探索が行われ、解の品質が向上したと思われる。

これより同じ初期母集団に対してGAを適用する場合には、適切な移住間隔、移住率を設定したPDGAが最も良い結果が得られることが判明した。

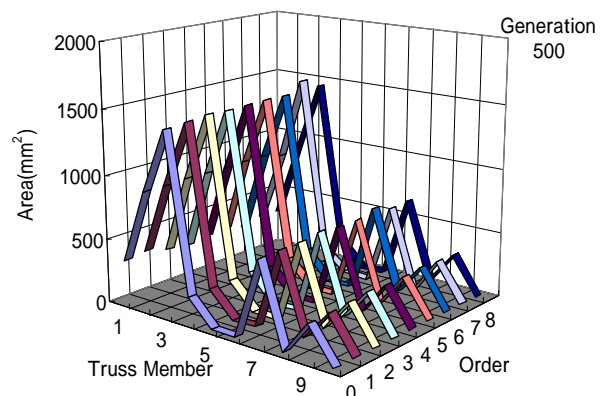


Fig. 13 Best-8 Solutions(SGA:With migration)

6.6 PDGA で得られた最適解

最適解となった部材の断面積とその状態をTable 1に記す。また、最適解の形状をFig. 14に記す。パラメータはのものを使用した。この時トラスの総体積は0.0015058m³となった。この解では、部材5が消滅し、節点4に負荷された水平荷重は、部材4によって支持されている。

Table 1 Status of Optimum Answer

Global margin = -3.1198×10^{-5}

Member	Area(mm ²)	Load(N)	Stress(MPa)	Buckling Stren
1	337	7324.267365	21.733731	0
2	916	-7315.090737	-7.985907	-7322.144904
3	1412	-6259.298442	-4.432931	-6263.531504
4	197	6661.951513	33.817013	0
5	1	39.222263	39.222263	0
6	1	-0.000087	-0.000087	-0.008727
7	631	-3470.672737	-5.500274	-3474.610202
8	1	0.000146	0.000146	0
9	269	6150.070098	22.862714	0
10	1	-0.000118	-0.000118	-0.004909

Total Volume = $1.5058 \times 10^{-3} (m^3)$

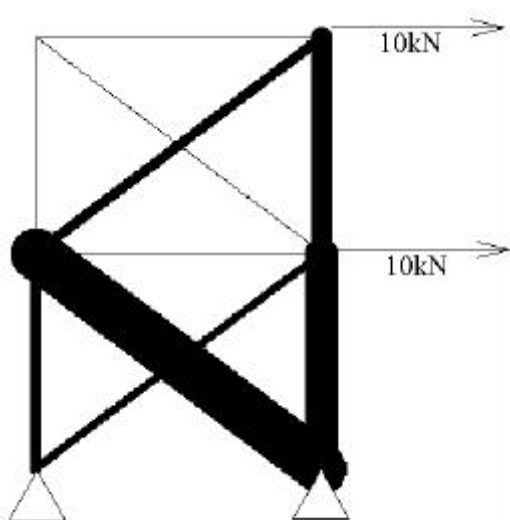


Fig. 14 Distribution of the sectional areas

Table 2 Parameter setting

Parameter	Value
Total_Populationsize	320
Number_of_sub_populations	8
Maximum generation	5000
Migration interval	50
Migration Rate	0.3
Crossover Rate	0.6
Mutation Rate	1/120

7 結論

分散並列モデルによる並列遺伝的アルゴリズム (PDGA) は、以下の点で単純遺伝的アルゴリズムよりも優れていることが判明した。

- 1) 並列処理を行なうことにより、計算時間が短縮される。
- 2) 母集団を分割することにより、解の信頼性が向上する。
- 3) 適切なパラメータ設定の下で移住を行うことにより、

移住無し PDGA 以上に、解の信頼性と品質が向上する。

- 4) PDGA におけるこれらの長所は分割母集団において解の多様性が保持され、移住によってより大域的な最適解が生成される。

以上により GA を並列化することは、きわめて有効であるといえる。

8 参考文献

- [1] J.H.Holland : "Adaptation In Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, 1975 .
- [2] 坂和正敏, 田中雅博: "遺伝的アルゴリズム", 朝倉書店, 1995 .
- [3] Johgno NANG and Kazuhiro Matsuo : "A Surbey on the Parallel Genetic Algorithms", 計測と制御 第 33 巻 第 6 号, P500 ~ P509, 1994 .
- [4] Theodore C.Belding : "The Distributed Genetic Algorithm Revisited", PROCEEDING OF THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC ALGORITHMS P114 ~ P121, 1995
- [5] Reiko Tanse : "Distributed Genetic Algorithms", Proc.3rd International Conf. Genetic Algorithms. Morgan Kaufmann. P434 ~ P439, 1989 .
- [6] T.Starkweather, D.Whitley and K.Mathimas : "OPTIMIZATION USING DISTRIBUTED GENETIC ALGORITHMS", Parallel Problem Solving form Nature, Springer Verlag, P176 ~ P183, 1991 .
- [7] Jose L.Riberio Filho and Philip C.Treleaven : "Genetic -Algorithm Programming Environments", COMPUTER P28 ~ P43, June 1994 .
- [8] 三木光範: "並列分散最適化のためのアルゴリズム", 日本計算機学会 第 2 回最適化シンポジウム論文集, 1996 .
- [9] 古市 昌弘: "自律分散処理に基づく離散的システムの最適化", 同志社大学大学院修士論文, 1996 .