数理解析研究所講究録 1252 巻 2002 年 7-12

不確定環境型遺伝的アルゴリズムとモンテカルロ法による確率的スケジューリング問題の近似解法

京都府立大・人間環境学部・環境情報学科　吉冨　康成(Yasunari Yoshitomi)
Dept. of Environmental Information, Fac. of Human Environment
Kyoto Prefectural Univ.

1．緒言

著者らは、確率計画問題の解法として、遺伝的アルゴリズム(GA)の環境(目的関数、制約条件)に確率変動を導入した手法(不確定環境型 GA)を提案した[1]。本法では、世代ごとに、目的関数、制約条件で定義される適応度関数を所与の確率分布に応じて変化させ、全世代を通じての個体の集合とその出現頻度を算出する。そして、まずこれにより、期待値最大の解が得られるかどうかの検討を行なった。その結果、選択方式として、適応度に比例して選択確率が高くなるルーレット戦略の下で、発生頻度が最も高い個体(解)を選べば、それが期待値最大を与える個体となることを実証した[1]。そして、本法を確率的画像圧縮問題へ適用し、その有効性を示した[1]。

次に、広範な応用展開が期待できる確率的スケジューリング問題にこの不確定環境型 GA を適用し、その有効性を示した[2-5]。まず、スケジューリング問題の中で、代表的で、かつ、実用性の高いジョブショップ問題を取り上げ、次いで、確率的ナーススケジューリング問題を取り上げた[2-5]。

本報では、確率的スケジューリング問題に不確定環境型 GA とモンテカルロ法をハイブリッドに用いる方法について検討した結果を報告する。

2．不確定環境型 GA とモンテカルロ法のハイブリッド適用法

確率計画問題において、確率変数の変動に伴い解の目的関数値や制約条件が変動することを、GA においては、同じ個体の適応度が確率的変動を含んでいると考えることとする。この適応度の確率的変動を各世代の適応度関数を確率的に変動させることにより実現する。すなわち、GA の各世代の環境が不確定(確率的)であるとして取り扱う。そして、全世代を通じての個体の集合とその出現頻度を算出する。この方法を不確定環境型 GA と呼ぶこととし、以下に示す手順で計算を行う。

1）初期集団の生成
2）終了条件が満たされるまでループ
(a)各確率変数に対して、その確率分布に従う乱数を用いて適応度関数(目的関数、制約条件)を確定
(b)適応度の計算
(c)選択, 交叉, 突然変異
3）所定世代以降、最終世代までの各個体(解)の発生頻度を求める

不確定環境型 GA による確率計画問題の解法として、まず、期待値最大(または最小)の解を得ることを目標としてきた。このため、選択方式として、適応度に比例して選択確率が高くなるルーレット戦略を取り、所定世代以降、最終世代までの個体出現頻度を求め、高頻度個体に相当する解を近似最適解候補とする。

上記複数の近似最適解候補に対して、モンテカルロ法を用いて期待値の近似値を求め、その値が最大（または最小）となる解を近似最適解とする。

3．対象とする問題

3．1　確率的ジョブショップ問題－1

ガントチャートに配置する仕事の順番を決めるジョブショップ問題において、機械の処理所要時間を確率変数とした、以下のような確率的ジョブショップ問題(P_1)を対象とした。

- ひとつの機械は、同時に１つの仕事しか処理できない。
- 機械における処理は中断できない。
- 仕事ごとに、機械にかけられる順番が指定されている。
- 各機械における処理は、ガントチャートに前詰めで配置される。
- 機械の処理所要時間の変動は、各仕事ごとに所与の確率分布に従う。
- 全ての仕事が完了する時間の期待値を最小にするような、ガントチャートへの各仕事の投入順番を決める。

ここで、ガントチャートに投入する時の仕事の順番を決めるという問題設定は、GA における致死遺伝子の処理の容易さから選択したものである。

３．２　確率的ジョブショップ問題―２

機械の処理所要時間を確率変数とした、以下のような一般的な確率的ジョブショップ問題(P_2)を対象とした。

・ひとつの機械は、同時に１つの仕事しか処理できない。
・機械における処理は中断できない。
・仕事ごとに、機械にかけられる順番が指定されている。
・各機械における処理は、ガントチャートに前詰めで配置される。
・機械の処理所要時間の変動は、各仕事ごとに所与の確率分布に従う。
・全ての仕事が完了する時間の期待値を最小にするような、各機械での各仕事の処理順番を決める。

３．３　確率的ナーススケジューリング問題

患者数を不確定とし、患者数に対して看護婦の数が不足する勤務時間帯数の期待値を最小にする問題を対象にした。近年注目されてきた２交替制を扱った。そして、複数の看護婦の１ヶ月分のスケジュールを決定する以下の問題(P_3)を対象にした。

看護婦の勤務パターンは、休日、日勤、夜勤の３つとし、スケジュール表では、各々、0, 1, 2 と表す。なお夜勤は、2 日にわたる勤務なので、連続する２つの記号(22)で表す。解候補は、複数の看護婦の１ヶ月分の勤務表に、これらの勤務パターンを割り当てることで得られる。そして、勤務時間帯の種類及び担当する患者の種類に応じて、看護婦１人が担当可能な上限患者数を設定する。

患者数を確率変数とし、以下のようにして計算する。実数としての患者数が、所定の範囲に一様分布すると仮定し、その一様分布の中央値を確率変数として取り扱い、その確率分布を正規分布と仮定する。その正規分布の平均値と標準偏差を与え、その中央値の変動の大きさを表すパラメータとして、変動係数(標準偏差／平均値)を用いる。患者数は整数なので、上記方式で与えられた実数としての患者数の確率は、患者数を整数とした確率に変換されて用いられる。

次いで、１ヶ月分のスケジュールでのそれぞれの勤務時間帯で看護婦不足の有無を調べ、看護婦数の不足する勤務時間帯個数を x とし、x の期待値を目的関数とし、目的関数を最小にするスケジュールを求める。制約条件は、文献[7]を基に以下のように与える。

・夜勤は連続でできない。
・夜勤のあとは必ず休みを I 日入れる。
・夜勤と夜勤の間は必ず J 日以上空ける。
・１ヶ月の夜勤回数は K 回から L 回とする。
・日勤は連続 M 日まで。
・7 日間の内に最低 N 日は休みを入れる。
・「休み、日勤、休み、日勤、休み」のパターンを入れない。
・1か月の休みを P 日から Q 日とする。
・前月末の6日間のスケジュールを前提条件として用いる。

４．不確定環境型 GA の処理条件

４．１　確率的ジョブショップ問題－１

各世代で、機械の処理所要時間を所定の確率分布に従う乱数を用いて確定させる。GA の処理条件として、遺伝子型としては順序表現を用い, ルーレット戦略, 1 点交叉, 1 点突然変異を採用、適応度関数 f は、$f = t_{max}/(T - t_{max})$ とした (t_{max} :各仕事を単独で処理した場合の処理所要時間が最大となる仕事の処理所要時間, T :全ての仕事の完了時間)。

４．２　確率的ジョブショップ問題－２

各世代で、機械の処理所要時間を所定の確率分布に従う乱数を用いて確定させる。

各機械での仕事の処理順番を順序表現を用いて表し、その順序表現された遺伝子を全機械分並べて遺伝子型個体とした。アクティブスケジュールを作成する Giffler と Thompson のアルゴリズム(GT) [8] を用いて、初期集団として、ランダムなアクティブスケジュールを発生させた。そして、適応度関数 f は、上記確率的ジョブショップ問題－１と同じとし、ルーレット戦略, 後述する不確定環境型 GA 用のアルゴリズムによる交叉、各機械毎の１点突然変異を用いた。突然変異では、所定の個体数までセミアクティブスケジュールを発生させ、GT アルゴリズムを応用してアクティブスケジュールに変換した。

GT を GA の交叉に利用したアルゴリズム (GA/GT) [9] では、GT アルゴリズムを基に、(a) ランダム交叉、(b) 前の世代のスケジュールにおける各処理完了時間を基にしたヒューリスティック交叉、を所定の割合で行なう。不確定環境型 GA の場合、前の世代の各処理完了時間は、その世代で発生した乱数に依存しており、GA における程の重要な量ではないと考えられる。そこで、不確定環境型 GA では、前の世代 1 世代だけでの各処理完了時間の代わりに、前の世代までの処理完了時間の各平均値を基にしたヒューリスティック交叉を行なう。

４．３　確率的ナーススケジューリング問題

全看護婦のスケジュールを１つの個体に対応させ

る。左端から看護婦 a の 1 日から月末日までのスケジュールを並べ、その後に看護婦 b のスケジュールを 1 日から月末日まで並べ...という要領で遺伝子型個体を作成する。初期集団として、制約条件を満たす個体を所定数に達するまでランダムに発生させる。そして、各世代で、各勤務時間帯の患者数を所与の確率分布に従う乱数を用いて確定させる。1 ヶ月分のそれぞれの勤務時間帯について看護婦の必要人数を求め、スケジュール表と比較して不足の有無を調べ、不足する勤務時間帯個数を x として、適応度 $f=1/(1+x)$ を求める。交叉ペアーはルーレット戦略で選択し、一列に並んだスケジュール内を部分的に交叉させる。その時、看護婦 1 人のスケジュールの左端、右端も交叉点とすることができる 2 点交叉を行なう。なお、交叉点の選択は、夜勤スケジュールの並び(22)を壊さないという条件で行う。致死遺伝子の処理は交叉した個体について行い、制約条件を満たしていない個体には以下の処理を行なう。

- 0(休日)、1(日勤)、0(休日)、 1(日勤)、0(休日)の並びがあれば、2、3、4、5 番目からランダムに 1 つ選び、0 は 1 に、1 は 0 に置き換える。
- 「日勤は連続 M 日まで」の制約条件を満たしていなく、日勤が連続 M+1 日続いた場合、連続 M+1 日の最後の日勤を休日にする。
- 1 ヶ月の休日数の制約条件を満たしていないときは、休日が多い場合には、休日をランダムに 1 つ日勤に変え、日勤が多い場合には、日勤をランダムに 1 つ休日に変える。
- 1 ヶ月の夜勤回数の制約条件を満たさないときは、致死遺伝子でない個体からランダムに 1 つ選び、クローンとして置き換える。

突然変異は、遺伝子の 0(休日)、1(日勤)のみに対して行い、ランダムに 1 つ選び、0 を 1 に、1 を 0 に置き換える 1 点突然変異を用いる。この際、制約条件を満たさなくなる突然変異は施さない。

5 適用例

5．1 確率的ジョブショップ問題－1

表 1 に示した 6 仕事, 6 機械のジョブショップ問題[6]において、各機械の処理所要時間を確率変数とし、その確率分布を、それぞれ表 1 の処理所要時間を平均値とするような正規分布と仮定した。そして、その標準偏差は、平均値の(1)0.1 倍, (2)0.2 倍, (3)0.3 倍, の 3 通りの条件に設定し、参考のため、処理所要時間を表 1 の値に固定した場合の GA の計算も合わせて行なった。そして、処理所要時間を、表 1 の値に固定した場合について、全ての実行可能解(720 個)における全ての仕事の完了時間を別途求めた。また、モンテカルロ法を用いて、全ての実行可能解について、(1), (2), (3)の条件における全ての仕事の完了時間を 10 万回の計算で求め、その平均値が最小となる解と個体数最大の解の比較を行なった。

GA の条件としては、3000 個体, 2000 世代, 交叉確率：0.6, 突然変異確率：0.05 を用いた。

仕事	機械（処理所要時間）					
1	3(1)	1(3)	2(6)	4(7)	6(3)	5(6)
2	2(8)	3(5)	5(10)	6(10)	1(10)	4(4)
3	3(5)	4(4)	6(8)	1(9)	2(1)	5(7)
4	2(5)	1(5)	3(5)	4(3)	5(8)	6(9)
5	3(9)	2(3)	5(5)	6(4)	1(3)	4(1)
6	2(3)	4(3)	6(9)	1(10)	5(4)	3(1)

表 1：6 仕事, 6 機械のジョブショップ問題

処理所要時間を、表 1 の値に固定した場合の全ての仕事の完了時間の小さい値のものから 10 個(同じ値のものがあるため 13 個)の解を表 2 に示す。各機械の処理所要時間を確率変数とし、モンテカルロ法を用いて得た全ての仕事の完了時間平均値の小さいものから 10 個の解を表 3, 表 4, 表 5 に示す。また、各場合での全ての仕事の完了時間またはその平均値の最小値と最大値を表 6 に示す。ここで、解とは、ガントチャートへの仕事の投入順番を表す表現型の個体である。表 2, 3, 4, 5 にからわかるように、変動係数(=標準偏差/平均値)が増加するに伴い、全ての仕事の完了時間の上位解が変化している。

次に、処理所要時間を、表 1 の値に固定した場合の GA の全世代で発生頻度の多いものから 10 個の解を表 7 に示し、各機械の処理所要時間を確率変数とした場合の本法の全世代で発生頻度の多いものから 10 個の解とモンテカルロ法の結果比較例を表 8, 表 9, 表 10 に示す。処理所要時間を固定した場合、全ての仕事の完了時間平均値が最小の解は GA の全世代で発生頻度最大の解と一致した(表 7)。また、変動係数:0.1 と 0.3 の場合には、全ての仕事の完了時間平均値が最小の解を、最大個体数の解として見つけることができた(表 8, 表 10)。一方、変動係数:0.2 の場合には、全ての仕事の完了時間平均値が最小の解と、GA の全世代で発生頻度最大の解は一致しなかった(表 9)。しかしながら、この場合でも、GA の全世代で発生頻度の大きい解には、全ての仕事の完了時間平均値が最小に近いものが多く含まれていた(表 9)。

そこで、変動係数:0.2 の場合に、GA の全世代で発生頻度の上位 1%以内、2%以内の解について、モンテカルロ法ですべての仕事の完了時間平均値を求め、その各最小値を与える解を求めた(表 11)。不確定環境型 GA で求められた複数の頻度上位解に対してモンテカルロ法で最良解を求めることにより、良好な近似最適解が得られた。

解	全ての仕事の完了時間
1 2 5 4 3 6	61
1 2 5 4 6 3	61
2 5 3 6 1 4	61
1 2 5 6 4 3	62
1 2 6 5 4 3	62
2 1 4 3 6 5	62
2 3 6 5 1 4	63
3 2 6 5 1 4	63
6 2 1 5 4 3	63
6 2 4 5 3 1	63
6 2 5 4 1 3	63
6 2 5 4 3 1	63
6 5 2 1 4 3	63

表2：処理所要時間固定の場合の上位解

解	全ての仕事の完了時間平均値
1 2 5 6 4 3	64.49
1 2 6 5 4 3	64.88
1 6 5 2 4 3	66.07
6 2 4 3 5 1	66.36
6 5 2 1 4 3	66.45
1 6 2 5 4 3	67.11
1 2 6 4 5 3	67.32
2 3 4 6 5 1	67.56
3 2 4 6 5 1	67.58
6 1 5 2 4 3	67.62

表3：処理所要時間が確率変数の場合の上位解-1(変動係数:0.1)

解	全ての仕事の完了時間平均値
6 1 5 2 4 3	68.75
6 2 4 3 5 1	68.96
2 3 1 4 6 5	70.06
6 1 2 5 4 3	70.08
3 2 4 6 5 1	70.53
2 3 4 6 1 5	70.55
2 3 6 4 1 5	70.56
3 2 4 6 1 5	70.61
3 2 1 4 6 5	70.66
2 3 4 6 5 1	70.73

表4：処理所要時間が確率変数の場合の上位解-2(変動係数:0.2)

解	全ての仕事の完了時間平均値
6 2 4 3 5 1	71.43
2 3 6 4 1 5	72.19
6 1 5 2 4 3	72.23
2 3 4 6 1 5	72.35
6 2 4 3 1 5	72.41
2 3 6 4 5 1	72.45
3 2 4 6 1 5	72.62
6 2 4 1 3 5	72.68
3 2 4 6 5 1	72.70
2 3 4 6 5 1	72.78

表5：処理所要時間が確率変数の場合の上位解-3 (変動係数:0.3)

変動係数	0(固定)	0.1	0.2	0.3
最小値	61	64.49	68.75	71.43
最大値	97	95.66	95.24	94.44

表6:全ての仕事の完了時間(平均値)の範囲

個体数	解	全ての仕事の完了時間(順位)
2508679	1 2 5 4 6 3	61 (1)
1939503	1 2 5 4 3 6	61 (1)
639639	1 2 5 6 4 3	62 (4)
139304	1 2 6 5 4 3	62 (4)
85217	2 1 5 4 6 3	63 (14)
71517	2 1 5 4 3 6	63 (14)
40776	1 2 6 4 5 3	65 (32)
30765	1 2 3 5 4 6	67 (57)
27432	1 2 5 3 4 6	68 (83)
27030	1 2 6 4 3 5	68 (83)

表7：GAの発生頻度上位解の全ての仕事完了時間

個体数	解	全ての仕事の完了時間平均値(順位)
1478704	1 2 5 6 4 3	64.49 (1)
1205618	1 2 5 4 6 3	67.78 (11)
579092	1 2 6 5 4 3	64.88 (2)
523411	1 2 5 4 3 6	67.85 (14)
148911	1 2 6 4 5 3	67.32 (7)
148122	1 2 3 6 5 4	73.81 (155)
135354	2 1 6 5 4 3	78.79 (332)
125950	1 2 4 6 5 3	73.92 (158)
101866	1 5 2 6 4 3	70.25 (49)
85651	1 2 6 3 5 4	71.24 (71)

表8：発生頻度上位解とモンテカルロ法の結果-1
(変動係数:0.1)

個体数	解	全ての仕事の完了時間平均値(順位)
204338	2 3 6 5 1 4	75.37 (125)
143512	2 3 6 5 4 1	71.04 (19)
136858	2 3 6 1 5 4	76.45 (160)
133505	2 3 6 4 1 5	70.56 (7)
126802	2 3 1 6 5 4	77.93 (234)
124731	2 3 4 6 1 5	70.55 (6)
120823	2 3 4 6 5 1	70.73 (10)
119497	3 2 6 5 1 4	75.36 (24)
104059	3 2 6 5 4 1	71.92 (27)
103714	2 3 6 4 5 1	70.73 (11)

表9：発生頻度上位解とモンテカルロ法の結果-2
(変動係数:0.2)

個体数	解	全ての仕事の完了時間平均値(順位)
191733	6 2 4 3 5 1	71.43 (1)
137910	6 2 4 3 1 5	72.41 (5)
126763	6 2 3 5 4 1	73.64 (17)
120072	6 2 4 1 3 5	72.68 (8)
119189	6 2 1 4 3 5	72.88 (12)
117236	2 3 6 4 5 1	72.45 (6)
114086	3 2 5 4 6 1	75.95 (83)
108825	2 3 5 4 6 1	76.83 (107)
105373	6 2 1 5 4 3	75.52 (63)
100207	6 2 5 1 4 3	75.14 (51)

表10：発生頻度上位解とモンテカルロ法の結果-3
(変動係数:0.3)

	解	全ての仕事の完了時間平均値(順位)
最頻度解 ;	236514	75.37 (125)
頻度上位1%以内 ; での最良解	236415	70.56 (7)
頻度上位2%以内 ; での最良解	231465	70.06 (3)

表11：不確定環境型GAにモンテカルロ法を付加した結果(変動係数:0.2)

5．2 確率的ジョブショップ問題－2

表1に示した6仕事,6機械のジョブショップ問題において、各機械の処理所要時間を確率変数とし、その確率分布を、それぞれ表1の処理所要時間を平均値とするような正規分布と仮定した。そして、その確率分布における変動係数(=標準偏差/平均値)を、(1)0, (2)0.1, (3)0.2, (4)0.3, の4通りの条件に設定した。そして、従来法として、各4つの条件で、ガントチャートに投入する仕事の優先順位を最適にする問題P_1を、モンテカルロ法を用いて全ての場合(6!=720とおり)において、全ての仕事の完了時間を求め、得られる(近似)最適解と本法の比較を行なった。対象とする問題P_2の場合、莫大な種類の実行可能解が発生することが予測されたため、全世代での発生頻度最大の解に限らず、全世代での発生頻度の上位20の解について、モンテカルロ法を用いて全ての仕事の完了時間平均値を求めた。

GAの条件としては、1000個体,200世代、ランダム交叉率を0.5とし、100世代での予備実験を行ない、突然変異率、交叉率を決定した。そして、予備実験の結果、(1),(2),(3),(4)の各条件に対して、突然変異率、交叉率を各々、(1)0.3,0.3, (2)0.5,0.5, (3)0.4,0.4, (4)0.3,0.2で、本実験を行なった。

個体数	解	全ての仕事の完了時間平均値
19656	143625 246153 312546 364125 253416 362154	56.82
7893	134625 624135 132546 361452 235461 362514	60.31
184	416532 642513 351246 631542 521463 635124	60.81
173	146352 625413 513246 631452 524613 653214	61.03
142	413652 462513 351246 364152 524361 365214	59.45
138	146352 625413 513246 634152 524631 635214	60.16
131	413625 426513 315246 364125 235461 362154	60.23
123	413652 642513 531246 631452 523461 635214	62.56
121	461532 645213 534126 634512 524361 635214	61.45
93	134625 246153 312546 361425 253416 362154	58.48

表12：出現頻度の上位解(変動係数：0.1)

変動係数 ;	0	0.1	0.2	0.3
従来法 ;	61	64.49	68.75	71.43
最頻度法 ;	56	56.82	61.59	67.13
本法 ;	55(2)	56.82(1)	59.80(7)	63.61(3)

表13：従来法と本法の比較(全ての仕事の完了時間(平均))

実験結果の例を表12に示す。ここで、解とは、各機械での仕事の処理順序を表す表現型の個体である。発生した解の種類は、変動系数、0,0.1,0.2,0.3の各条件で、57457,97715,80249,60416であった。また、従来法と本法の比較を表13に示す。ここで、最

頻度法は、不確定環境型 GA での出現頻度最大の解での値、本法は、出現頻度上位 20 位までの解での全ての仕事の完了時間(平均)が最小の値を示す。本法における()内の数字は、選ばれた解の出現頻度順位を示している。本法により、良好な近似最適解が得られた。上位解の中から、モンテカルロ法を用いて、全ての仕事の完了時間(平均)の最小のものを選ぶ方法が有効であった。

5．3 確率的ナーススケジューリング問題

文献[7]を参考にして、看護婦を 28 人、1 ヶ月を 30 日とし、制約条件のパラメータを、$I=1$，$J=3$，$K=0$，$L=5$，$M=3$, $N=1$, $P=8$, $Q=11$ とし、前月末 6 日間のスケジュールを作成した。そして、予備実験の結果を基に、個体数 3000, 世代数 1000, 交叉率 0.6, 突然変異率 0.1 で、患者数に関する変動係数は、0～0.3 の条件で本実験を行った。看護婦 1 人あたり担当可能な患者数は、表 14 の条件を用いた。個体の出現頻度を、世代 501～1000 の間で調査し、高頻度上位 10 個の個体(解)を候補とし、モンテカルロ法を用いて、その候補解から近似最適解を求めた。

各世代での看護婦不足の勤務数の平均値と最小値(ベスト値)の例を図 1 に示す。実験結果例を表 15 に示す。ここで、表 15 における( )内の数字は、選ばれた近似最適解に対応する個体の出現頻度順位を示している。各実験において、501～1000 世代での個体の種類は、81～83 万であった。また、上位 10 位までの個体の出現頻度は 47～28 であった。不確定環境型 GA により、良好な近似最適解の候補が得られた。また、モンテカルロ法を近似最適解決定に用いることも有効であった。

	平日日勤	平日夜勤	土日祝日日勤	土日祝日夜勤
外来患者	2		2	
入院患者	8	10	8	10

表 14：看護婦 1 人あたりの担当可能な上限患者数

変動係数	0	0.1	0.2	0.3
看護婦不足	4.0(1)	3.8(1)	7.4(8)	11.9(6)

表 15：近似最適解での看護婦不足の勤務数平均値

6．結論

確率的スケジューリング問題へ不確定環境型 GA とモンテカルロ法のハイブリッド適用を検討し、その有効性を示した。今後、ハイブリッド化のための一般的指針を明らかにする必要がある。

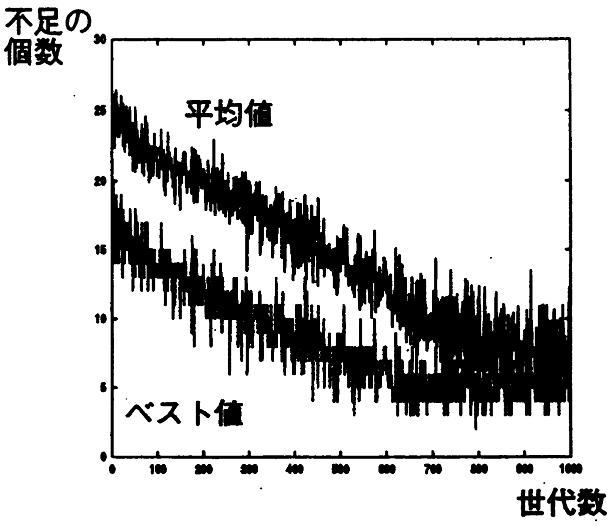

図 1：各世代での看護婦不足の勤務時間帯数の平均値と最小値(ベスト値)（変動係数：0.2）

参考文献

[1] Y. Yoshitomi, H. Ikenoue, T. Takeba and S. Tomita, "Genetic Algorithm in Uncertain Environments for Solving Stochastic Programming Problem", 日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌, 43(2000), 266-290.

[2] 吉冨康成, 山場久昭, 冨田重幸, "不確定環境型ＧＡの確率的スケジューリング問題への適用", 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, (1999), 202-203.

[3] 吉冨康成, "不確定環境型遺伝的アルゴリズムによる確率的ジョブショップ問題の解法", スケジューリング・シンポジウム'９９ 講演論文集, (1999), 119-124.

[4] 吉冨康成, 山口理絵, "不確定環境型 GA とヒューリスティック法による確率的ジョブショップ問題の近似解法", 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, (2000), 96-97.

[5] 吉冨康成, 橋本一郎, "不確定環境型遺伝的アルゴリズムとモンテカルロ法による確率的ナーススケジューリング問題の近似解法", 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, (2001), 180-181

[6] J. F. Muth and G. L. Thompson, *Industrial Scheduling*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1963), 226.

[7] 池上敦子, 丹羽明, "ナーススケジューリングに有効なアプローチ ―２交替制アルゴリズムにおける実現―", 日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌, 41(1998), 572-587.

[8] B.Giffler and G.L.Thompson, "Algorithms for Solving Production Scheduling Problems", *Operations Research*, 8(1969), 487-503.

[9] T. Yamada and R. Nakano, "A Genetic Algorithm Applicable to Large Scale Job-Shop Problems", *Parallel Problem Solving from Nature 2*, (1992), 281-290.