

# 利用帯域が限定された固定チャネル割当問題に対するパラメータフリー遺伝的アルゴリズム

渡 邊 勇<sup>†</sup> 松 井 正 一<sup>†</sup> 所 健 一<sup>†</sup>

移動無線通信の需要増加にともない、チャネル(帯域)の利用効率を高める割当方式が要求されている。これまでに筆者らは、固定チャネル割当問題の最小スパン割当てを求めるための、割当順序表現を用いた遺伝的アルゴリズム(GA)を提案している。しかし、利用可能帯域があらかじめ与えられており、ある程度の干渉を許容してできるだけ多くの通話を可能とする割当問題の需要も多い。これらの問題に対しては、最小スパン割当てを求める手法とは異なる割当方式が必要となる。本論文では、Jinらによって定式化された干渉による損失と呼損による損失の加重和を最小化する問題に対し、パラメータフリーGAに基づく新しいアルゴリズムを提案し、数値実験によりその性能が高いことを示す。

## A Parameter-free Genetic Algorithm for a Fixed Channel Assignment Problem with Limited Bandwidth

ISAMU WATANABE,<sup>†</sup> SHOUICHI MATSUI<sup>†</sup> and KEN-ICHI TOKORO<sup>†</sup>

Increasing the channel re-usability is necessary for reducing the call-blocking rate in any cellular systems with limited bandwidth and a large number of subscribers. To increase the re-usability, we need an efficient channel assignment algorithm that minimizes the sum of blocking cost and interference cost. We propose a new genetic algorithm (GA) for the problem based on the Parameter-free GA (PFGA). The proposed GA finds a good sequence of codes for a virtual machine that produces a channel assignment. Results are given which show that our GA, without tedious parameter tuning, produces far better solutions to several practical problems than the existing GAs.

### 1. はじめに

近年の移動無線通信の需要増加にともない、限られた帯域の効率的利用の必要性が高まっている。このためには、チャネル(帯域)の利用効率を高める割当方式が必要となる。この問題はチャネル割当問題(Channel Assignment Problem)と呼ばれており、実社会では重要な問題の1つとして考えられている。チャネル割当問題には様々なバリエーションが存在するが、特に必要帯域を最小化する最小帯域割当問題(Minimum Span Frequency Assignment Problem: MSFAP)について数多くの研究が行われている。しかし、チャネル割当問題はNP困難な組合せ最適化問題であり、大規模な問題に対しては厳密解を実用時間で求めることは非常に困難である。このため、様々な近似解法が提案されている<sup>1)</sup>。

MSFAPに対しては、遺伝的アルゴリズム(Genetic

Algorithm: GA)による解法も数多く報告されている。しかし、従来の適用方式では許容解や最適解が求まらないことが多い、必要な反復回数が多く、他の近似解法より性能が低いことが多いとされてきた。これに対して、解の候補をGAの染色体として直接表現するのではなく、GAを貪欲法による割当順序を制御するメタヒューリスティクスとして使うことで、他の発見的方法よりも性能の高いGAが構成できることが示された<sup>2)</sup>。筆者らは、割当順序に優先度を付けて探索空間を小さくすることで、従来手法より格段に性能の高い方式となることを示した<sup>3),4)</sup>。また、GAの性能を向上する方法として、(1)割当順序の表現方式の改良、(2)突然変異率の適応的制御方式、(3)新しい初期集団の生成方式を提案し、性能向上を行った<sup>5),6)</sup>。パラメータフリー遺伝的アルゴリズム<sup>7),8)</sup>のMSFAPへの適用方式についても報告した<sup>9)</sup>。

これに対し、利用可能帯域があらかじめ与えられており、ある程度の干渉を許容してできるだけ多くの通話を可能とする割当問題の需要も多い。この形の固定チャネル割当問題はJinらによって初めて定式化され、

<sup>†</sup> 財団法人電力中央研究所情報研究所  
Communication & Information Research Laboratory,  
Central Research Institute of Electric Power Industry

この問題を解くための GA に基づくアルゴリズムも提案されている<sup>10)</sup>。さらに、Horng らや Park らによってアルゴリズムの改良もなされている<sup>11),12)</sup>。しかし、これらの解法は解の候補を GA の染色体として直接表現するために、性能面で課題が残されている。また、筆者らが提案している MSFAP に対する解法は、この形の問題にはそのままでは適用できない。

本論文では、Jin らによって定式化された、利用可能帯域が限定された場合の固定チャンネル割当問題に対し、パラメータフリー遺伝的アルゴリズムに基づく新しい解法を提案し、数値実験によりその性能が高いことを示す。

## 2. 問題の定式化

本章では、利用帯域が限定された固定チャンネル割当問題について述べる。利用帯域が限定されている場合、呼損および干渉の発生は不可避な問題として顕在化する。ここでは、呼損による損失と干渉による損失の加重和を最小化する形での定式化<sup>11)</sup>について述べる。

### 2.1 表記法

$N$  個のセル(ゾーン, 基地局)からなる移動無線システムを考え、各セルを 1 から  $N$  までの番号で識別する。移動無線システムでは信号対干渉電力比(CIR)の許容値を設定し、全セル内で CIR が許容値より下回る確率(劣化率)が一定値以下になるように設計する。この条件を表現するために、セル  $i, j$  に割り当てられるチャンネルの周波数が満たすべき条件を、非負の要素からなる  $N \times N$  の対称行列(Channel Separation Matrix: CSM)  $C = (c_{ij})$  で表す。CSM の要素  $c_{ij}$  が  $\nu$  ならば、セル  $i$  に割り当てられるチャンネルの周波数  $f_i^k$  とセル  $j$  に割り当てられるチャンネルの周波数  $f_j^l$  は  $|f_i^k - f_j^l| \geq \nu$  を満たす必要があることを表す。チャンネルに対応する周波数を等間隔とする場合には、CSM で割り当てるチャンネル番号の間隔条件を指定する。セル  $i$  にいる移動局  $j$  が通話(周波数の割当て)を要求する場合に 1 をとる 2 値変数を  $X_{ij}$  とし、 $n_i$  でセル  $i$  にいる移動局の数を表すものとする。また、時分割多重方式 TDMA (Time Division Multiple Access) によって各周波数に割り当てられるチャンネル数を  $T$  とする。セル  $i$  で必要なチャンネル数を確率変数  $X_i = \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}$  で表し、 $\mu_i$  と  $\sigma_i$  で確率変数  $X_i$  の平均と標準偏差を表す。各セルの需要はシステムで計測可能であるとし、 $\mu_i$  と  $\sigma_i$  はセル単位で推定可能とする。

### 2.2 呼損による損失

多数の移動局が含まれるセルでは呼損が発生し、そ

れはサービス低下につながる。したがって、できるだけ呼損が生じないような割当てが重要となる。 $H_i$  でセル  $i$  に割り当てられているチャンネル数を表すと、セル  $i$  での呼損数の期待値は

$$\sum_{j=H_i+1}^{n_i} P(X_i = j)(j - H_i) \quad (1)$$

となる。システム全体での呼損による損失は、各セルでの呼損数の期待値の総和で定義される。

さらに、確率変数  $X_i$  が正規分布  $N(\mu_i, \sigma_i^2)$  に従うと仮定すると、式(1)の  $H_i$  を  $x$  で置き換えた式は、次式で定義される  $I_E(x)$  を用いて近似することができる。

$$\begin{aligned} I_E(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \int_x^{\infty} (y-x) e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_i}{\sigma_i}\right)^2} dy \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma_i \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ &\quad + \frac{1}{2}(\mu_i - x) \operatorname{erfc}\left(\frac{x-\mu_i}{\sqrt{2}\sigma_i}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\operatorname{erfc}(x)$  は次式で定義される余誤差関数(complementary error function)である。

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt \quad (3)$$

### 2.3 干渉による損失

干渉波の電力が無視できない程度に強い場合はセル間で干渉が発生し、呼損と同様にサービスの低下を招くことになる。セル間の干渉発生に影響を及ぼす要因として、基地局間の距離、障害物の有無、出力、アンテナの形状などがあげられる。干渉が発生しやすいセル間では離れた周波数を割り当てる必要があり、基地局どうしが地理的に十分離れている場合は同じ周波数を再利用することができる。

干渉発生は移動局およびシステム全体に対し損失を与えることを意味しており、その損失の程度は周波数距離と電波強度に依存する。セル  $i, j$  に割り当てられた周波数をそれぞれ  $p, q$  とすると、この割当てによって生じる干渉がシステムに及ぼす損失  $f(i, j, p, q)$  を以下のように定義する。 $|p - q| \geq c_{ij}$  であれば干渉は発生しないため  $f(i, j, p, q) = 0$  となる。 $|p - q| < c_{ij}$  のときは干渉が生じ、同一セル内の場合( $i = j$ )は

$$f(i, j, p, q) = f_{ip} f_{jq} \Psi_C(c_{ij} - |p - q|) \quad (4)$$

各セル内での発呼要求数はポアソン分布に従うと仮定するのが一般的であるが、既提案の手法との比較の意味から同一の定式化を用いた。なお、Jin らの呼損による損失の考え方は、特定の分布に特化したものではない点に留意されたい。

とし、セルが異なる場合 ( $i \neq j$ ) は

$$f(i, j, p, q) = f_{ip} f_{jq} \Psi_A(C_{ij} - |p - q|) \quad (5)$$

とする。ただし、 $f_{ip}$  はセル  $i$  に周波数  $p$  が割り当てられる場合に 1 をとり、それ以外では 0 をとる変数であり、 $\Psi_C, \Psi_A$  はそれぞれ狭義の増加関数 (strictly increasing function) を表している。チャンネル間隔がシステムに与える損失の程度は、CSM の設定および  $\Psi_C, \Psi_A$  の形状に依存する。たとえば、干渉による損失として同一チャンネル間干渉および隣接チャンネル間干渉のみを考慮する場合、CSM の非対角成分を 2 以下に設定することで対処可能である。

## 2.4 目的関数

本論文中で扱う固定チャンネル割当問題は、呼損と干渉による損失の加重和を最小化することを目的とする。したがって、問題は以下のように定義される。

$$\text{Min.} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^Z \sum_{q=1}^Z f(i, j, p, q) + \alpha \sum_{i=1}^N I_E(TF_i)$$

ここで  $F_i = \sum_{p=1}^Z f_{ip}$ 、 $Z$  は利用可能なチャンネル数、 $\alpha$  は呼損による損失と干渉による損失に対する重みづけパラメータである。

## 2.5 関連研究

固定チャンネル割当問題は NP 困難な組合せ最適化問題であり、大規模な問題に対しては厳密解を実用時間で求めることは非常に困難である。このため、様々な近似解法が提案されている<sup>1)</sup>。

GA による解法は、許容解や最適解が求まらないことが多い、必要な反復回数が多く、他の近似解法より性能が低いことが多いとされてきた。これらの GA はいずれも、割り当てる周波数 (チャンネル) をビット列あるいは整数値列として染色体中に直接表現する方式である。これに対して、GA を貪欲法による割当順序を制御するメタヒューリスティクスとして使うことで、タブーサーチなどの他の発見的解法よりも性能の高い GA が構成できることが示された<sup>2)</sup>。送信機へのチャンネルの割当順序を順列として表現し、実際の割当では貪欲法で行うものである。筆者らは、割当順序に優先度を付けて探索空間を小さくすることで、従来手法よりも格段に性能の高い方式となることを示した<sup>3),4)</sup>。また、筆者らは突然変異率の適応的制御方式と初期化に工夫を加えることで、非常に性能の高い GA が構成できることを示した<sup>5),6)</sup>。さらに、割当順序を制御するメタヒューリスティクスとして、澤井らが提案したパラメータフリー GA (Parameter-free GA: PfGA) を用いる方式についても報告した<sup>9)</sup>。

しかし、これらの方式は利用帯域を最小化する形の

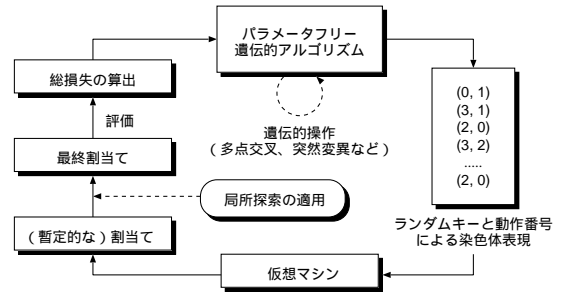


図 1 PfGA に基づく提案手法の枠組

Fig. 1 Proposed algorithm based on PfGA.

問題に対しては有効であるが、本章で示した利用帯域が限定された固定チャンネル割当問題にはそのままでは適用できない。この形の固定チャンネル割当問題は Jin らによって初めて定式化され、この問題を解くための GA に基づくアルゴリズムも提案されている<sup>10)</sup>。さらに、Horng らや Park らによってアルゴリズムの改良もなされている<sup>11),12)</sup>。しかしこれらの解法は、解の候補を  $N \times Z$  の行列を用いて直接的に表現している点や、基本となる GA に単純 GA を用いている点など課題が残されている。Rothlauf らが示しているように、GA へのコーディングが適切でない場合には、GA としては高度なものを用いる必要がある<sup>13)</sup>。

## 3. PfGA に基づく提案手法

前章で示した固定チャンネル割当問題に対する新たな解法を提案する。周波数の割当作業を行う仮想マシンへの入力となるコード列を GA の染色体として間接的に表現し、損失の加重和を最小化するコード列を GA を用いて探索する (図 1)。提案手法で用いる GA として、澤井らが提案した PfGA<sup>7),8)</sup> の遺伝子座の値を整数値の組に拡張したものをを用いる。PfGA では、従来 GA で必須の集団の大きさ、交叉率、突然変異率などのパラメータを持たず、問題ごとのパラメータ調整が不要であることから実用的価値が高い。PfGA の詳細については付録 A.1 を参照されたい。

### 3.1 必要チャンネル数の算出

目的関数の第 2 項 (呼損による損失) は割り当てるチャンネル数  $F_i$  の増加にともない減少するが、第 1 項 (干渉による損失) は逆に増加してしまう。いま、セル  $i$  内で生じる干渉および呼損による損失  $C_i(F_i)$  のみを考える。

$$C_i(F_i) = \sum_{p=1}^Z \sum_{q=1}^Z f(i, i, p, q) + \alpha I_E(TF_i) \quad (6)$$

この  $C_i(F_i)$  を用いて適切な  $F_i$  の値を求めること

表 1 割当方法の規定

Table 1 Action specification.

動作番号	割り当てる周波数
0	周波数間隔 $S_i^m$ の周波数
1	周波数間隔 $S_i^m + 1$ の周波数
2	利用可能な最小周波数

にする.  $F_i$  の値を 1 から  $\bar{F}_i = \lceil \mu_i + 5\sigma_i \rceil$  まで変化させ,  $C_i(F_i)$  を最小化する  $F_i^*$  を求める. ここで  $\bar{F}_i = \lceil \mu_i + 5\sigma_i \rceil$  としたのは,  $x \geq \mu_i + 5\sigma_i$  では  $I_E(x)$  の値がほぼ 0 と見なせるためである.

$$F_i^* = \operatorname{argmin}_{F_i \in \{1, \dots, \bar{F}_i\}} C_i(F_i) \quad (7)$$

したがって, セル  $i$  において  $C_i(F_i)$  が最小となる周波数間隔  $S_i^m$  は, 次式によって計算される.

$$S_i^m = \min \left\{ \left\lfloor \frac{(Z-1)}{(F_i^* - 1)} \right\rfloor, c_{ii} \right\} \quad (8)$$

また, 目的関数の最適値の概算値 (目標値) として  $\sum_{i=1}^N C_i(F_i^*)$  を用いることもできる.

### 3.2 仮想マシン

GA から与えられたコード列を用いて各セルへの周波数の割当作業を行う仮想マシンについて述べる.  $(Z-1) \bmod (F_i^* - 1) = 0$  が成り立つ場合, すべての周波数を間隔  $S_i^m$  で割り当てることで  $C_i(F_i^*)$  は最小となるが,  $(Z-1) \bmod (F_i^* - 1) \neq 0$  の場合は, いくつかの周波数については間隔  $S_i^m + 1$  で割り当てる必要がある. ただし,  $C_i(F_i)$  は異なるセル  $i, j$  間の干渉については考慮していないため, この規則に従って周波数を割り当てたとしても総損失を最小化することはできない.

以上の理由より, 仮想マシンは少なくとも表 1 に示す 3 種類の動作をサポートする必要がある. また, セルへの割当順序も非常に重要であることから, 仮想マシンの命令は  $(cell\_number, action)$  のペアで規定する必要がある. 命令  $(cell\_number, action)$  は, 表 1 の動作番号  $action$  に従って決定される周波数  $f$  が  $1 \leq f \leq Z$  を満たす場合にはセル  $cell\_number$  に周波数  $f$  を割り当て, それ以外は何もしないことを意味する. セル  $cell\_number$  に周波数  $f$  を割り当てた後は, すべてのセルについて利用可能な周波数の集合を更新する. この場合に, セル  $i$  内の周波数間隔条件としては  $c_{ii}$  の代わりに  $S_i^m$  を用いる.

### 3.3 染色体表現と突然変異

命令  $(p, a)$  はセル  $p$  への周波数の割当てを意味することから, 総命令数 (コード列長) は  $L = \sum_{i=1}^N F_i^*$  となる. したがって, コード列は

$$S = \{(p_1, a_1), (p_2, a_2), \dots, (p_L, a_L)\} \quad (9)$$

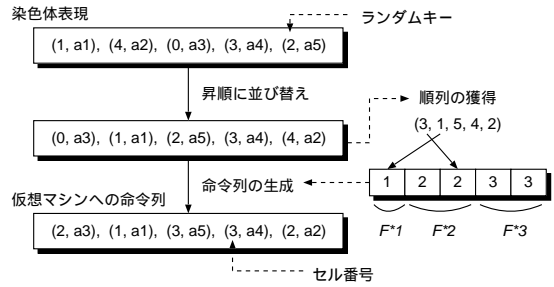


図 2 ランダムキーによる染色体表現  
Fig. 2 Permutation by random keys.

と表現される. ここで, PfGA の交叉や突然変異で実行不能解を生成しないために, コード列  $S$  の  $cell\_number$  についてはランダムキーによる順列表現を用いる<sup>14)</sup>. ランダムキーは数値列を整理した結果を用いて順列を表現する方式であり, 数値列は整理のキーとして用いられる. 例として以下の数値列を考える.

$$(1, 4, 0, 3, 2)$$

この数値列を昇順に整理することで順列

$$3 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 2$$

が得られる.

したがって, 提案手法で用いる PfGA の染色体は, ランダムキーと動作番号の 2 つの整数からなる遺伝子  $(r, a)$  の列として表現される (図 2).

$$0 \leq r \leq L-1, \quad a \in \{0, 1, 2\} \quad (10)$$

突然変異は, 染色体中の無作為に選んだ部分列に対して適用される. 選択された部分列のランダムキーおよび動作番号は, それぞれ式 (10) の定義域から無作為に選んだ整数によって置き換えられる. 突然変異の操作を行うか否かも無作為に決定する.

### 3.4 局所探索

仮想マシンによる割当てが完了した時点で, 局所探索による解の改善の可能性が残されている. あるセルに割り当てられた周波数  $f_p$  は干渉条件を侵すものであり, そのセルで利用可能な周波数  $f_q$  が残っている場合には,  $f_p$  を  $f_q$  で置き換えることで総損失は必ず減少する. この改善を行い, 染色体を変更して改善結果を反映させる. 改善は干渉による損失が大きいセルから順に行う.

染色体の変更では, コード列中の命令の順番の入れ替えと  $action$  部の変更を行う. この基本的な考え方は以下のとおりである.

- 周波数  $f_q$  が局所探索により割り当てられたものならば, それに対応する命令をコード中の最後にまわす.

```

Procedure Modification
BEGIN
Initialize:
(1) Let two sequences of  $S_1$  and  $S_2$  be empty.
(2) Sort assigned frequencies in ascending order
    for each cell, and let the result be
     $(f_{i,1}, f_{i,2}, \dots, f_{i,F_i})$ . And also let  $f_{i,0} \leftarrow 1 - S_i^m$ .
Scan genes from head to tail:
LOOP
(1) Let  $i$  be the cell number and  $a$  be the action of
    current gene that corresponds to the  $k$ -th assignment
    to cell  $i$ .
(2) Calculate frequency separations  $s \leftarrow f_{i,k} -$ 
 $f_{i,(k-1)}$ 
(3) If  $(s > S_i^m + 1)$  or  $(s < 0)$  then  $t \leftarrow 2$  else
 $t \leftarrow s - S_i^m$ 
(4) If  $t = 2$  then
    If  $f_{i,k}$  is generated by the local search then
    append instruction  $(i, t)$  to  $S_2$ .
    else append instruction  $(i, t)$  to  $S_1$ .
    else
    If  $a = 2$  then append instruction  $(i, a)$  to
     $S_1$ .
    else append instruction  $(i, t)$  to  $S_1$ .
UNTIL all genes are scanned.
Return the concatenation of  $S_1$  and  $S_2$ .
END

```

図3 局所探索アルゴリズム  
Fig.3 Modification algorithm.

- 利用可能な最小周波数を割り当てる *action* 部は変更しない。

具体的なアルゴリズムを図3に示す。このアルゴリズムは変更されたコード列を返すものである。この変更に対応するように、染色体中のランダムキー部分はコード列中の順番に変更し、割り当てられる周波数間隔に対応するように *action* 部も変更する。

## 4. 計算実験

### 4.1 ベンチマーク問題

Horng ら<sup>11)</sup> や Park ら<sup>12)</sup> と同様に、セル間の最小周波数距離を規定する3種類のチャンネル間隔条件行列  $C_1, C_2, C_3$  と3種類の通信要求データ  $D_1, D_2, D_3$  を組み合わせて構成された8種類のベンチマーク問題を用いて数値実験を行った結果について示す。問題の定義は表2に示すとおりである。なお、各データの詳細については文献11)を参照されたい。干渉による損失の計算に用いる2種類の関数について  $\Psi_C(x) = 5^{x-1}$ ,  $\Psi_A(x) = 5^{2x-1}$  とし、 $\alpha = 1000$ ,  $T = 8$  に設定した。また、個体の適応度として目的関数値(呼損と干渉による損失の加重和)の逆数を採用した。

Horng らの文献では P1 の通信要求データと  $\alpha$  の値に誤植があり、また  $T$  値の記述がない。本論文では、Horng 氏に確認したうえで誤植を修正したデータを用いている。

表2 ベンチマーク問題の定義  
Table 2 Benchmark problem specification.

問題	N	Z	C	D	L
P1	21	60	$C_1$	$D_1$	130
P2	21	60	$C_2$	$D_1$	123
P3	21	60	$C_3$	$D_1$	123
P4	21	60	$C_2$	$D_2$	109
P5	21	60	$C_3$	$D_2$	109
P6	21	40	$C_3$	$D_1$	109
P7	21	40	$C_3$	$D_2$	100
P8	21	64	$C_3$	$D_3$	275

### 4.2 計算結果

各問題について提案手法を100回適用した結果を表3および図4に示す。比較のために Horng ら<sup>11)</sup> と Park ら<sup>12)</sup> の計算結果もあわせて示す。表中に示した最適値の概算値(目標値)として  $\sum_{i=1}^N C_i(F_i^*)$  を用いた。すべての実験において、最大個体評価回数を利用可能チャンネル数  $Z$  の1,000倍(問題P1ならば60,000回)に設定した。

表3および図4に示した計算結果より、提案手法の性能は従来手法と比較して優れていることが分かる。問題P1, P2に対しては最適値の概算値と同じ解を求めており、問題P3, P4についても概算値に近い解を求めている。問題P1, P2, P3については、提案手法を用いることで干渉による損失のない割当てが得られており、結果としてシステム全体の損失の大幅な低減を実現している。

### 4.3 計算時間の比較

計算時間について Park ら<sup>12)</sup> と比較した結果を図5に示す。提案手法の計算時間は問題規模で異なり、1個体の評価に必要な時間は命令列長  $L$  にほぼ比例し、総計算時間は1個体の計算時間と最大個体評価回数の積にほぼ比例する。Pentium III 933 MHz での1回あたりの計算時間は、最も計算時間の短いP7で28.7秒、最も計算時間の長いP8で158.0秒ある。これに対して、従来の解法の中では得られる解の品質が良い Park らの手法では、Pentium III 750 MHz での計算時間で、最も計算時間の短いP6でも35,790秒、最も長いP8では135,224秒である。

このことから、提案手法は得られる解の品質が高く、かつ計算時間も短いものであり、従来手法を大きく改善した解法であることが確認できる。

### 4.4 局所探索による改善効果

局所探索による改善効果を確認するために、局所探索を利用しない場合と局所探索による改善を染色体に戻さない場合の2ケースについて計算実験を行った結果を表4に示す。表4から、局所探索による改善効

表 3 ベンチマーク問題に対する計算結果  
Table 3 Simulation results to the benchmark problems.

問題	目標値	Horng らの GA <sup>11)</sup>		Park らの GA <sup>12)</sup>			提案手法		
		最良値	平均値	最良値	平均値	計算時間 †	最良値	平均値	計算時間 ‡
P1	3.7e-4	203.4	302.6	0.4	0.5	65504	3.7e-4	3.7e-4	62.7
P2	4.1	271.4	342.5	27.9	30.9	88692	4.1	4.1	58.0
P3	4.1	1957.4	2864.1	63.1	79.3	89918	7.2	21.8	57.0
P4	231	906.3	1002.4	675.8	684.1	95585	243.8	247.9	51.0
P5	231	4302.3	4585.4	1064.1	1092.5	87905	695.9	982.3	50.2
P6	190	4835.4	5076.2	1149.8	1227.3	35790	820.8	1210.0	29.5
P7	2232	20854.3	21968.4	5636.7	5831.8	37323	3891.7	5275.3	28.7
P8	22518	53151.7	60715.4	41883.0	41967.5	135224	34286.5	38605.9	158.0

† CPU seconds on Pentium III 750MHz, ‡ CPU seconds on Pentium III 930MHz.

表 4 局所探索の改善効果  
Table 4 Solution improvement by including modification algorithm.

問題	目標値	局所探索なし		染色体変更なし		提案手法	
		最良値	平均値	最良値	平均値	最良値	平均値
P1	3.7e-4	3.7e-4	67.7	3.7e-4	0.1	3.7e-4	3.7e-4
P2	4.1	7.6	82.5	4.1	13.4	4.1	4.1
P3	4.1	109.3	665.3	58.9	268.1	7.2	21.8
P4	231	351.0	552.6	279.8	345.7	243.8	247.9
P5	231	1341.3	3108.9	1261.3	1985.0	695.9	982.3
P6	190	1487.9	3227.2	1081.4	2570.0	820.8	1210.0
P7	2232	5128.9	9253.4	5280.2	7740.2	3891.7	5275.3
P8	22518	36605.1	46335.7	40337.2	46232.0	34286.5	38605.9

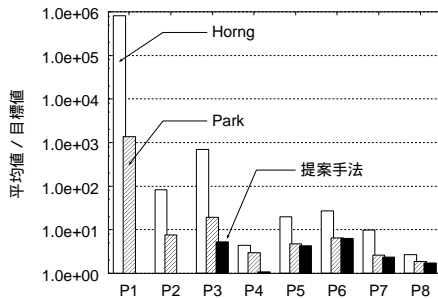


図 4 ベンチマーク問題に対する計算結果

Fig. 4 Simulation results to the benchmark problems.

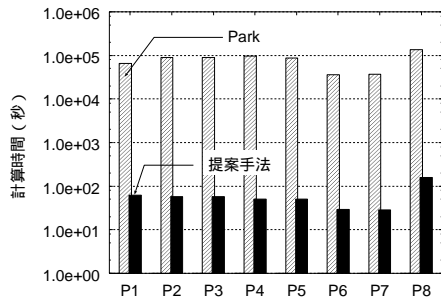


図 5 計算時間の比較

Fig. 5 Computation time.

果と染色体の変更による効果が大きいことが分かる。

局所探索を利用しないケース、局所探索による改善を染色体に戻さないケースでの計算時間は、提案手法とほぼ同等であり、改善の効果は大きいことから、局所探索による改善とその結果の染色体へのフィードバックは有効な方式といえる。

4.5 並列分散型による計算結果

並列分散型 PfGA の効果を確認するための計算も行った(並列分散型 PfGA の概要については付録 A.2 を参照されたい)。局所集団ごとの個体の評価回数の上限を逐次型と同じ利用可能チャンネル数の 1,000 倍とし、局所集団数 (n) を  $n = \{2, 4, 8, 16, 32\}$  と変えて、逐次型と同様に乱数の初期値を変えた独立した 100 回

の計算を行った。

一様分散方式の移民方式では文献 9), 15), 16) で示したように、UD0 の結果は UD1 よりも悪いため、UD1 方式でのみ計算した。計算結果を表 5 に示す。

表 5 から以下が分かる。

- 局所集団数を増加させると解の平均値は減少することから、局所集団数を増やすだけで容易に解の改善が可能である。これは全体としての個体の評価回数が増加すること、ならびに局所集団が異なる領域を探索するためと考えられる。
- 局所集団数を増加させても、最良解は改善されないこともある。

表 5 並列分散型 PfGA による計算結果 ( 移民方式 UD1 )  
Table 5 Simulation results of distributed parallel PfGA.

問題	局所集団数 2		局所集団数 4		局所集団数 8		局所集団数 16		局所集団数 32	
	最良値	平均値	最良値	平均値	最良値	平均値	最良値	平均値	最良値	平均値
P1	3.7e-4	3.7e-4	3.7e-4	3.7e-4	3.7e-4	3.7e-4	3.7e-4	3.7e-4	3.7e-4	3.7e-4
P2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
P3	7.2	18.6	7.2	12.0	7.2	9.9	7.2	8.9	5.8	7.7
P4	243.8	247.4	243.8	245.1	243.8	244.5	243.8	244.1	243.8	243.8
P5	628.0	908.7	632.0	845.2	596.6	781.4	600.0	732.2	586.0	687.0
P6	673.4	1121.1	624.0	999.7	613.1	914.3	604.3	820.6	601.7	778.4
P7	3725.5	4892.1	3623.7	4698.2	3483.5	4381.2	3508.3	4060.8	3379.7	3931.9
P8	34046.8	37412.6	32411.7	36053.3	31064.2	34373.5	30882.0	33345.1	30781.1	32125.3

## 5. おわりに

本論文では、利用可能帯域が限定された固定チャネル割当問題に対する新しい解法を提案し、ベンチマーク問題を用いた数値実験によりその性能が高いことを示した。提案した解法はパラメータフリー遺伝的アルゴリズム ( PfGA ) を用いて、チャネル割当てを行う仮想マシンへの適切な命令列を探索するものである。既存の GA よりも優れた性能を示すうえに煩雑なパラメータ設定も不要なため、実用性の高い解法となっている。ただし順列問題<sup>15)</sup> や関数最適化問題において高い性能を示す PfGA が、より複雑な制約条件を有する組合せ最適化問題に対しても、同様に優れた性能を示すことが確認できた。

## 参考文献

- Hurley, S., Smith, D.H. and Thiel, S.U.: FASoft: a system for discrete channel frequency assignment, *Radio Science*, Vol.32, No.5, pp.1921–1939 (1997).
- Valenzuela, C., Hurley, S. and Smith, D.: A permutation based algorithm for minimum span frequency assignment, *Proc. PPSN V*, pp.907–916 (1998).
- 松井正一, 所 健一: 割当順序表現を用いる遺伝的アルゴリズムによる移動通信における固定チャネル割当ての高速解法, *信学論 B*, Vol.J83-B, No.5, pp.645–653 (2000).
- Matsui, S. and Tokoro, K.: A new genetic algorithm for minimum span frequency assignment using permutation and clique, *Proc. GECCO-2000*, pp.682–689 (2000).
- Matsui, S. and Tokoro, K.: Improving the performance of a genetic algorithm for minimum span frequency assignment problem with an adaptive mutation rate and a new initialization method, *Proc. GECCO-2001*, pp.1359–1366 (2001).
- 松井正一, 所 健一: 固定チャネル割当問題の

ための遺伝的アルゴリズムの性能向上方式, *信学論 D-I*, Vol.J85-D-I, No.1, p.2002 (2002).

- Sawai, H. and Kizu, S.: Parameter-free genetic algorithm inspired by “disparity theory of evolution”, *Proc. PPSN V*, pp.702–711 (1998).
- 澤井秀文, 木津左千夫, 足立 進: パラメータ設定不要の遺伝的アルゴリズムとその並列分散処理, *遺伝的アルゴリズム 4*, 第 3 章, 北野宏明 ( 編 ), 産業図書 (2000).
- 松井正一, 渡邊 勇, 所 健一: パラメータフリー遺伝的アルゴリズムの固定チャネル割当問題への適用方式, *信学論 D-I*, Vol.J85-D-I, No.4, pp.350–359 (2002).
- Jin, M.H., Wu, H.K., Horng, J.T. and Tsai, C.H.: An evolutionary approach to fixed channel assignment problems with limited bandwidth constraint, *Proc. IEEE ICC 2001*, pp.2100–2104 (2001).
- Horng, J.T., Jin, M.H. and Kao, C.Y.: Solving fixed channel assignment problems by an evolutionary approach, *Proc. GECCO-2001*, pp.351–358 (2001).
- Park, E.J., Kim, Y.H. and Moon, B.R.: Genetic search for fixed channel assignment problem with limited bandwidth, *Proc. GECCO-2002*, pp.1172–1179 (2002).
- Rothlauf, F., Goldberg, D.E. and Heinzl, A.: Bad coding and the utility of well-designed genetic algorithms, *Proc. GECCO-2000*, pp.355–362 (2000).
- Bean, J.C.: Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization, *ORSA Journal of Computing*, Vol.6, No.2, pp.154–160 (1994).
- 松井正一, 渡邊 勇, 所 健一: だまし順列問題に対するパラメータフリー遺伝的アルゴリズムの組合せ最適化問題への適用性の実験的評価, 第 8 回 MPS シンポジウム, pp.155–162 (2001).
- Matsui, S., Watanabe, I. and Tokoro, K.: A parameter-free genetic algorithm for a fixed channel assignment problem with limited bandwidth, *Proc. PPSN-VII*, pp.789–799 (2002).

## 付 録

## A.1 PfGA の概略

澤井らによって提案されている PfGA の基本アルゴリズムは以下のとおりである<sup>(7),(8)</sup>。PfGA は初期集団数、交叉率、突然変異率などの遺伝的パラメータを持たず、選択や淘汰に関しても目的関数のスケールリングなども行わないシンプルなアルゴリズムである。

- 手順 0 全個体集合を  $S$ 、部分集合を  $S'$  とする。  
 手順 1  $S$  から 1 個体を無作為抽出し  $S'$  に加える。  
 手順 2  $S$  から 1 個体を無作為抽出し  $S'$  に加える。  
 手順 3  $S'$  から 2 個体  $P_1, P_2$  を無作為抽出し、多点交叉で 2 種類の子個体  $C_1, C_2$  を生成する。  
 手順 4  $C_1, C_2$  のうち無作為に選んだ 1 個体に対し、ランダムな位置と数において反転突然変異 (bit-flip) を行う。反転するかしないかもランダムに決定する。  
 手順 5 適応度の大小に応じて  $P_1, P_2, C_1, C_2$  のうち 1 個体から 3 個体を選択して  $S'$  に戻す (選択操作については後述する)。  
 手順 6 適応度の評価を一定回数終了した時点で終了、それ以外は手順 7 へ。  
 手順 7  $|S'| > 1$  ならば手順 3 へ、そうでなければ手順 2 へ戻る。

上述のアルゴリズムの手順 5 において適用される選択操作では、以下の規則に従って  $P_1, P_2, C_1, C_2$  のうち 1 個体から 3 個体を選択し、部分集合  $S'$  に戻す。

- 規則 1  $C_1, C_2$  とともに  $P_1, P_2$  よりも適応度が大きい場合は、 $C_1$  と  $C_2$ 、そして  $P_1, P_2$  の適応度の大きい方を  $S'$  に戻す。  
 規則 2  $C_1, C_2$  とともに  $P_1, P_2$  よりも適応度が小さい場合は、 $P_1, P_2$  の適応度の大きい方を  $S'$  に戻す。  
 規則 3  $P_1, P_2$  のうち、どちらかが子個体の適応度よりも大きい場合、 $C_1, C_2$  の適応度の大きい方と、 $P_1, P_2$  の適応度の大きい方を  $S'$  に戻す。  
 規則 4 その他の場合、 $C_1, C_2$  の適応度の大きい方を  $S'$  に戻し、さらに  $S$  から無作為に抽出した 1 個体を  $S'$  に加える。

## A.2 並列分散 PfGA の概要

並列分散 PfGA は、局所集団を複数用意し (以下では局所集団数を  $n$  で表す)、前述の規則 1 または規則 4 に合致する、親個体よりも適応度の高い子個体の中で適応度の大きい個体  $C$  を移民として他の局所集団に分配する方式である。澤井らは、並列アーキテク

チャとして一様分散とマスタースレーブ型の 2 種類、移民方式として直接移民型と間接移民型の 2 種類を組み合わせて、いくつかの移民方式を提案している<sup>(7),(8)</sup>。

ここでは、一様分散型で直接移民型の方式である UD0 と UD1 の 2 つの移民方式のみを紹介する。UD0 方式は移民候補を他のすべての局所集団に分配する方式であり、UD1 方式はランダムに選んだ他の 1 つの局所集団に分配する方式である。

- UD0: ある局所集団  $S'_i (i = 1, 2, \dots, n)$  において、規則 1 または規則 4 で生じた 2 つの子個体中で適応度の大きい個体  $C$  を、他の局所集団  $S'_j (j \neq i)$  のすべてにコピーして分配する。
- UD1: ある局所集団  $S'_i (i = 1, 2, \dots, n)$  において、規則 1 または規則 4 で生じた 2 つの子個体中で適応度の大きい個体  $C$  を、無作為に選んだ他の局所集団  $S'_j (j \neq i)$  にコピーして分配する。いずれの方式においても、分配を受けた局所集団では最悪個体を淘汰して個体数を一定に保つ。  
 (平成 15 年 4 月 11 日受付)  
 (平成 15 年 6 月 2 日再受付)  
 (平成 15 年 7 月 11 日採録)



渡邊 勇 (正会員)

平成 8 年東京工業大学大学院経営工学科修士課程修了。同年 (財) 電力中央研究所入所。現在、同研究所情報研究所主任研究員。日本 OR 学会、人工知能学会各会員。



松井 正一 (正会員)

昭和 56 年東京大学大学院情報工学科修士課程修了。同年 (財) 電力中央研究所入所。現在、同研究所情報研究所上席研究員。昭和 55 年度情報処理学会論文賞受賞。平成 14 年電気学会論文賞受賞。日本 OR 学会、土木学会、ACM、ISGEC 各会員。



所 健一 (正会員)

平成元年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 (財) 電力中央研究所入所。現在、同研究所情報研究所主任研究員。平成 14 年電気学会論文賞受賞。日本 OR 学会、電気学会各会員。