平成 12 年度

学士学位論文

遺伝的アルゴリズムを用いた チャネル割当問題の解法

A Genetic Approach for Channel Assignment Problems

1010363　有賀 洋介

指導教員　坂本 明雄

2001 年 2 月 5 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

遺伝的アルゴリズムを用いた チャネル割当問題の解法

有賀 洋介

本論文では，携帯電話の基地局に対して適切なチャネルを割り当てていく，チャネル割当問題を扱う．本論文ではチャネル割当問題を，組合せ最適化問題として扱い，厳密解法と遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm : GA）を用いた解法で実験を行い，比較した．またそれぞれの解法には，同心円グラフを用いた計算実験を行う．厳密解法では，整数線形計画問題へ帰着する式を用い，既存のパッケージソフトウェアで解を求める．また，GA での解法は，その特徴である交叉・複製・突然変異などを用いて解を求める．

本論文の構成は，以下のとおりである．まず，チャネル割当問題とそのモデルとなる同心円グラフについて説明する．次に，厳密解法の説明とチャネル割当問題を整数線形計画問題に定義し，パッケージソフトウェアを用いて解を求める．続いて GA を用いた解法では，GA の説明とその特徴を活かした解法で解を求める．その後，2 つの解法で得た解を比較し，考察する．

キーワード　組合せ最適化問題，厳密解法，遺伝的アルゴリズム，同心円グラフ，整数線形計画問題

Abstract

A Genetic Approach for Channel Assignment Problems

Ariga Yousuke

In this paper, I propose algorithms for channel assignment problems for assign proper channel to vertices. I deal with channel assignment problems as a combinatorial optimization problem, so that I can seek the results and compare the exact method with Genetic Algorithm(GA). I also carry out experiments on each algorithm with concentric disk graphs. In the case of the exact method, I use some formula resulting in an integer linear programming problem and find the results with already existing a package softwear. Regarding algorithm with GA, I seek the results with crossover, reproduction, mutation and so on.

I explain this paper's composition. First, I explain channel assignment problems and concentric disk graphs to be that model. Next, I explain the exact method and define channel assignment problems as integer linear programming problem, and find the results with already existing a package softwear. Finally, I compare find out results by two key to solutions and consider.

key words combinatorial optimization problem, exact method, genetic algorithm, concentric circle graph, integer linear programming problem

目次

図目次

表目次

第 1 章

はじめに

近年，携帯電話の普及率が大幅に高まってきた．それに伴い，携帯電話の基地局も街の至るところに設置されるようになった．携帯電話は，それ同士で通話する際，基地局を通して相手の携帯電話につながる．このときの，携帯電話が 1 回の通話に使用する周波数帯をチャネルと呼ぶ．お互いの距離が近い携帯電話の通話は，混線を避けるために，周波数が離れたチャネルを使用する必要がある．よって，狭い範囲でより多くの携帯電話を使えるようにするには，基地局が使えるチャネルを多くすればよい．

本論文では，混線が起こる危険性を考慮し，1 つの基地局が使えるチャネルを多くする問題を扱う．そこで，遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm：以下 GA）を用いた解法を提案し，その結果を厳密解法と比較する．

本論文の構成は，以下の通りである．この後の第 2 章では，問題の設定をし，また問題のモデル化について説明する．続いて第 3 章では，厳密解法について説明する．問題を整数線形計画法に定式化し，既存のソフトウェアを使って解を求める．そして第 4 章では，GA について説明する．GA の流れや特徴を説明して，その解法を提案し，解を求める．最後に第 5 章では，2 つの解法で求められた解とその計算時間を比較する．

第 2 章

問題の設定

2.1　定義

携帯電話は，通話する際，基地局を通して相手の携帯電話につながるようになっており，その時チャネルが使用される．本論文で扱う問題は，携帯電話の基地局 1 つ 1 つがなるべく多くのチャネルを使えるように割り当てることである．チャネルの割り当ては，各基地局対の距離，および出力に依存するとみなす．本論文では以下のように組合せ最適化問題として定式化された問題を扱う．この解法はすでに論文 [1] で提案されている．

■問題の定式化　チャネル割当問題を表現する方法として，枝重みつき単純無向グラフ

$$G_w = (V, E, w)$$

を用いる．重み w には，基地局対の距離が半径 r_2 以上 r_1 以下ならば重み 1 が与えられ，半径 r_2 以下ならば重み 2 が与えられる．以下の条件を元に全ての頂点にチャネルを割り当てる．

- ・チャネルは自然数で表す.
- ・隣接する節点に割り当てられるチャネルの差は，節点対に接続される枝の重み以上でなければならない.
- ・問題の目的は，割当に使用されたチャネルの最大値を最小にすることである.

割当に使用されたチャネルの最大値を m とすると，上記の問題は，

2.1　定義

$$
\begin{aligned}
\text{min.} \quad & m, \\
\text{s.t.} \quad & |x_i - x_j| \geq w(e) \qquad (\forall_e = \{i, j\} \in E), \\
& 1 \leq x_i \leq m \qquad (\forall_i \in V), \\
& x_i \in N \qquad (\forall_i \in V),
\end{aligned}
$$

と定式化される．

本論文では, チャネル割当問題をCHAP(CHannel Assignment Problem)と呼ぶ．CHAPはこれまでに様々な手法が論文で発表されているが[2]，CHAPはNP完全問題と言われ，効率良く最適解を求めることは難しいとされる．

また，辺の重みとして現れる自然数が高々kである問題をk - CHAPと呼び，本論文では，2 - CHAPの問題を扱う．下図はその問題例である．

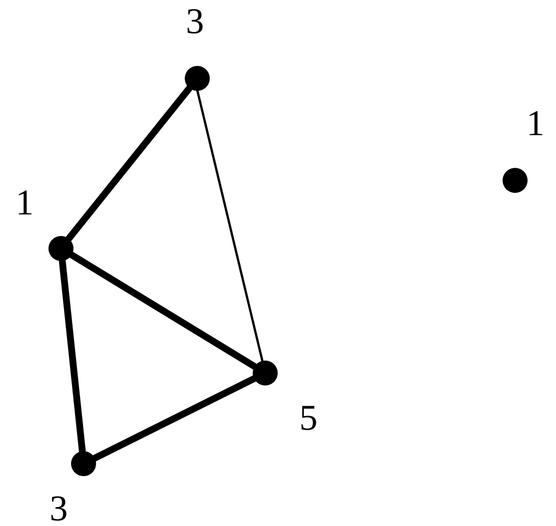

図2.1　2 - CHAP問題例と可能解

図2.1の細い辺は重み1の辺を，また，太い辺は重み2の辺を表す．各節点にある数字は，割り当てたチャネルの数を表している．割り当てていく節点の順番により，解は変わっていくので，可能解は多数あり，図2.1のチャネル割当は可能解の1つである．

2.2　同心円図と同心円グラフ

■同心円グラフの定義　$0 \leq r_2 \leq r_1$ を満たす実数定式 r_1, r_2 が与えられているとする．2 次元平面上に点集合が与えられた場合，各点対の距離が r_1 以下ならば，線分で結ぶ．この線分が r_2 よりも大きい場合，線分に重み 1 を与える．また，線分が r_2 以下であった場合は，線分に重み 2 を与える．こうして得られた図を同心円図と呼ぶ．重みつき単純グラフのうち，同心円図として平面に埋め込むことができるグラフを同心円グラフと呼ぶ.

図 2.2 はその例である．ここでは，破線が重み 1 を表し，太い実線が重み 2 を表している．

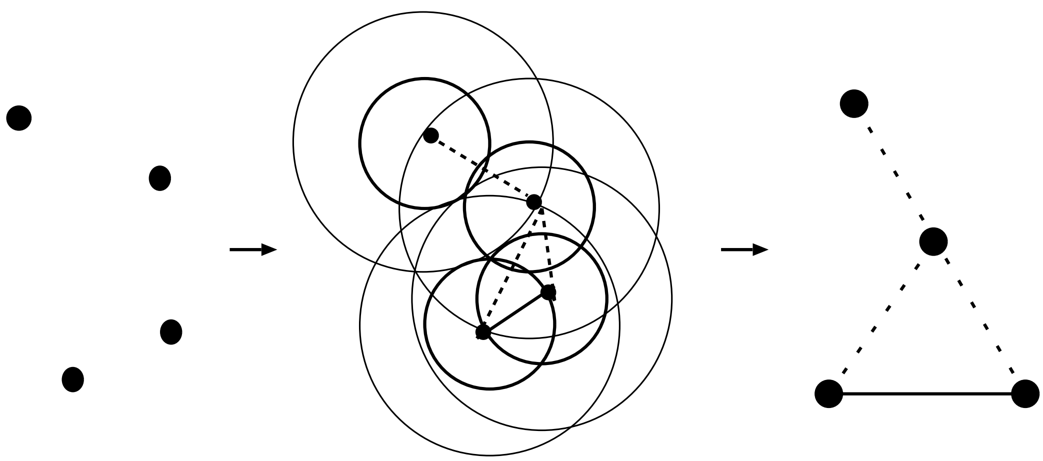

図 2.2　同心円図と同心円グラフ

本論文では，これ以降も問題例は同心円グラフを用いる．その理由を以下に述べる．本論文では，基地局対から発せられる電波の干渉は，基地局対の距離を重視し，発せられる電波の強度や，基地局の指向性については考えない．また，電波の干渉の強さは，基地局対の距離が遠いほど弱くなるものとする．強さは，閾値を決めて，{ 強い・弱い・ない } の 3 つに分類する．強い干渉がある基地局対は，2 つ以上離れたチャネルを使わなければならない．弱い干渉がある基地局対は，1 つ以上離れたチャネルを使わなければならない．干渉がない基地局対は，同じチャネルを使ってもよい，とする．以上の手続きにより作られる問題例は同心円グラフとなる．

第 3 章

厳密解法

3.1　定式化と厳密解法

本章では，CHAP を整数線形計画問題に定式化して，既存のソフトウェアを使って解を求める．

まず，整数線形計画問題とは，目的関数を最大・又は最小にする解を見つける問題である．解を求める際には，連立一次不等式の形で表現されている制約式の下で解を求めていく．このとき，変数は整数でなければならない．

■定式化　本章の定式化は，2-CHAP を頂点とチャネルの間のマッチングとする．

- 与えられたグラフ G は，頂点数を n とする．
- グラフ G が完全グラフで，辺の重みが全て 2 である場合に備えて，チャネルは最大 $2n$ 個まで用意しておく．($C = \{1, \ldots, 2n\}$)
- 添字 i は，グラフ G の頂点を表し，添字 j は用意されたチャネルの値に対応しているとする．
- 変数 x_{ij} は頂点 i に値 j のチャネルを割り当てた時に 1，そうでない時には 0 とする．
- 値 j 以上のチャネルを割り当てた頂点が存在する時，値 j のチャネルは使われているという．
- 変数 y_j は値 j のチャネルが割り当てられている時に 1，そうでない時には 0 とする．
- グラフ G 中の重み 1, 2 は，E_1, E_2 の枝集合で表される．
- V は G の頂点集合を表す．

以上の変数を導入することにより，次の整数線形計画法に定式化される．目的関数は，最大使用チャネルを少なくすることである．

$$min. \quad \sum_{j=1}^{2n} y_j \tag{3.1}$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^{2n} x_{ij} = 1 \quad (\forall_i \in V), \tag{3.2}$$

$$x_{i_1 j} + x_{i_2 j} \leq 1 \quad (\forall_j \in C, \forall (i_1, i_2) \in E_1), \tag{3.3}$$

$$x_{i_1 j} + x_{i_2 j} + x_{i_1 j+1} + x_{i_2 j+1} \leq 1$$
$$(\forall_j \in C \backslash \{2n\}, \forall (i_1, i_2) \in E_2), \tag{3.4}$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad (\forall_i \in V, \forall_j \in C), \tag{3.5}$$

$$1 \geq y_1 \geq y_2 \geq \cdots \geq y_{2n}, \tag{3.6}$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad (\forall_i \in V, \forall_j \in C). \tag{3.7}$$

まず式（1）は，基地局にチャネルは 1 つしか持つことはできないことを表す．式（2）は，基地局対の枝の重みが 1 のとき，同じチャネルは使うことができないことを表す．また式（3）は，基地局対の枝の重みが 2 のとき，基地局対のチャネルは 2 つ以上離れていなければならないことを表す．次に式（4）は，基地局に与えられたチャネルは最大チャネル数以下でなければならないことを表す．そして式（5）は使用するチャネルは 1 以上 $2n$ 以下であることを表す．最後に式（6）は，x_{ij}，y_j は 0，又は 1 で表現されることを表す．

これらを使い，既存のパッケージソフトウェア lp_solve3.0 で計算した．問題例は，1 辺の長さ 100 の正方形上に，ランダムでばらまいた点をもとにした同心円グラフを用いた．また同心円グラフの半径 r_1，r_2 はそれぞれ，70，40 とした．

表 3.3 は，最大使用チャネルとその計算時間を表す．

表 3.1　厳密解法の結果

n	channel	time (sec)
3	2	0.009
4	3	0.013
5	5	0.108
6	6	0.437
7	6	0.721
8	8	7.709
9	8	19.111
10	8	622.521
11	9	660.200

厳密解法は，アルゴリズム上の問題で，節点数 12 個以降の解を求めることができなかった．図 3.1 は，節点数 11 個のとき，各基地局に割り当てられたチャネルを表している．図中の数字はその場の基地局に与えられたチャネルを表し，太い線が重み 2 を，細い線が重み 1 を表す．

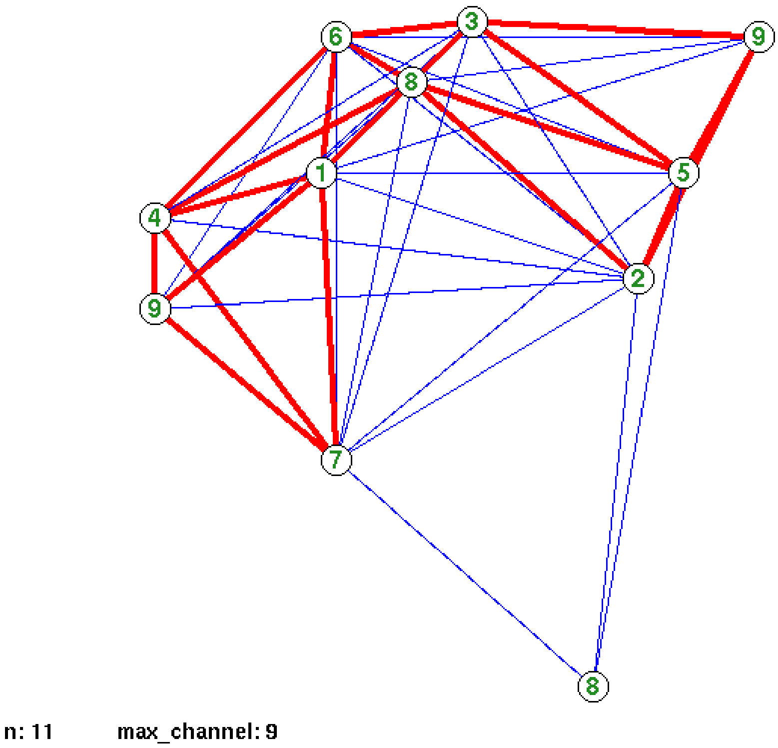

図 3.1　厳密解法

第 4 章

遺伝的アルゴリズムの解法

4.1　遺伝的アルゴリズム

4.1.1　遺伝的アルゴリズムの概要

遺伝的アルゴリズム (GA) [3] [4] [5] は，生物の進化 (選択淘汰・突然変異) の原理からヒントを得たアルゴリズムであり，確率的探索・学習・最適化の一手法と考えることができる．GA は，一般的に次の 3 種類の遺伝操作を使用する．

- 選択 (selection)

  どの個体どうしを交配させるかを決める．

- 交叉 (crossover)

  2 つの親の染色体を組み替えて子の染色体を作る操作．

- 突然変異 (mutation)

  遺伝子を一定の確率で変化させる操作．

解の候補は，染色体と呼ばれる配列で表現される．染色体は，遺伝情報を伝える実態として存在する．また，染色体上で遺伝子が置かれる位置を遺伝子座と呼び，遺伝子の配列からなる染色体を遺伝子型と呼ぶ．

4.1.2　GA の流れ

GA の処理手順は，以下のようになる．

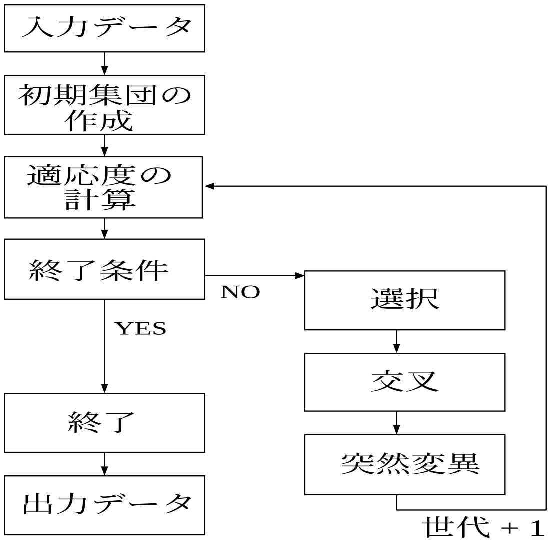

図 4.1　GA の流れ図

まず，初期集団の生成を行う．一般的には，決められた個数体の染色体をランダムに作成する．次に，各々の適応度の評価を行う．この適応度は，次の選択交配に用いられ，基本的に適応度が高いものほど，より多くの子孫を残す機構になっている．これにより優れた個体を生成している遺伝子が集団中に広がる．選択交配される個体対が決まると，染色体の交叉が行われる．交叉の方法は様々であるが，基本的には双方の染色体の一部ずつを採って，子孫の染色体を作る．そして最後に突然変異を加える．これは，ある確率で染色体の一部を変えるという操作である．この操作は，初期の遺伝子の組合せ以外の空間を探索でき，解の質を高める効果がある．

以上の作業が終了すると，新たな世代の初期集団が作成されたことになる．そしてその集団から，また適応度の評価・選択交配・突然変異の作業を行い，さらに新たな世代を作っていく．これは，終了条件が満たされるまで繰り返される．

4.2　GA を用いた解法

4.2.1　コーディング

GA を用いるために，まず入力データを取り入れ，染色体を作成する．染色体は，節点番号をランダムで並べかえた順列を用いる．これは，どの節点からチャネルを割り当てるかによって，解が大きく変わっていくためである．表現としては，以下のようにして表す．

$$1\ 2\ 3\ 4\ 5 \quad \cdots \quad (1)$$

$$2\ 4\ 3\ 5\ 1 \quad \cdots \quad (2)$$

4.2.2　計算方法

次にチャネルを割り当てていく．順番は，各染色体で表されている番号順である．例として，先程の染色体を用い，図 2.1 にチャネルを割り当ててみる．

- 染色体 (1) の場合
  1. 最初にチャネルを割り当てる節点は 1 である．チャネルはできるだけ少なくしたいので，チャネルは 1 を割り当てる．
  2. 次は節点 2 にチャネルを割り当てる．節点 1 と節点 2 には干渉がないので，チャネルは同じく 1 を割り当てる．
  3. 続いて節点 3 は，節点 1 と重み 1 の線分でつながっているので，節点 1 から 1 つ離れた，チャネル 2 を割り当てる．
  4. そして節点 4 は節点 1 および節点 3 から各々線分でつながっている．節点 1 から重み 2 でつながっているため，割り当てられるチャネルは 3 以上でなければならない．また，節点 3 からも重み 2 でつながっているので，割り当てられるチャネルは 0，または 4 以上となる．しかし，チャネルは 1 以上でなければならない．よって，節点 4 に割り当てられるのは，チャネル 4 となる．
  5. 最後に節点 5 は，節点 3・節点 4 とつながっている．節点 3 にはすでにチャネル 2

が割り当てられており，使えるチャネルは 4 以上である．また，節点 4 にもすでにチャネル 4 が割り当てられており，使えるチャネルは 2 以下，または 6 以上となる．この条件を満たすため，節点 5 にはチャネル 6 を割り当てる．

以上により，全ての節点に適切なチャネルを割り当てることができる．

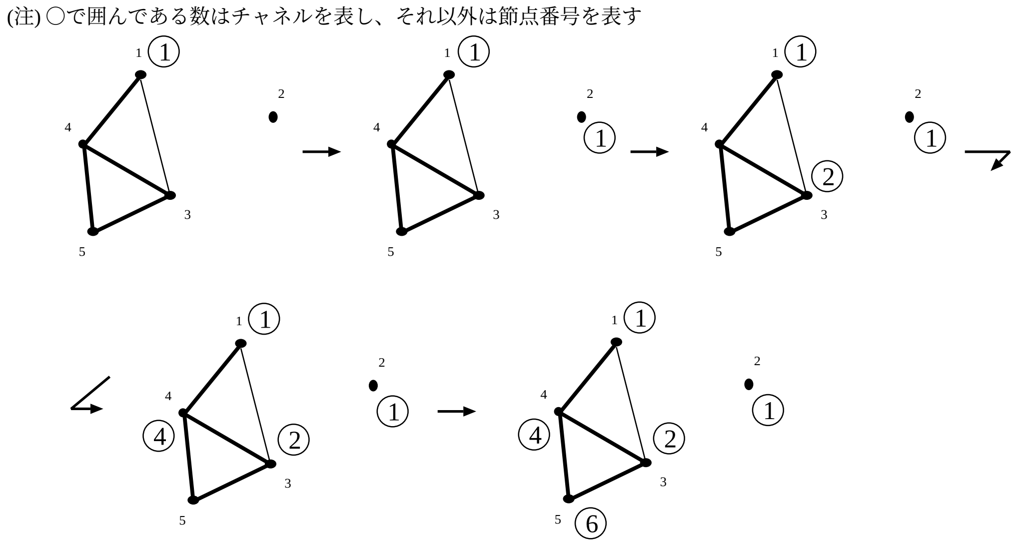

図 4.2　チャネル割当 1

- 染色体 (2) の場合
  1. 染色体の初めの数，節点 2 にはチャネル 1 を割り当てる．
  2. 次に節点 4 には，節点 2 との干渉がないので，チャネル 1 を割り当てる．
  3. 続いて節点 3 には，節点 4 と重み 2 の線分でつながっているので，チャネル 3 を割り当てる．
  4. そして節点 5 は，節点 3 および節点 4 と各々重み 2 でつながっている．節点 3 にはチャネル 3，節点 4 にはチャネル 1 が割り当てられているので，ここで節点 5 に割り当て可能なチャネルは 5 となる．
  5. 最後に節点 1 は，節点 3 と重み 1 でつながっており，節点 4 と重み 2 でつながっているので，割り当て可能なチャネルは 4 となる．

以上により，全ての節点に適切なチャネルを割り当てることができる.

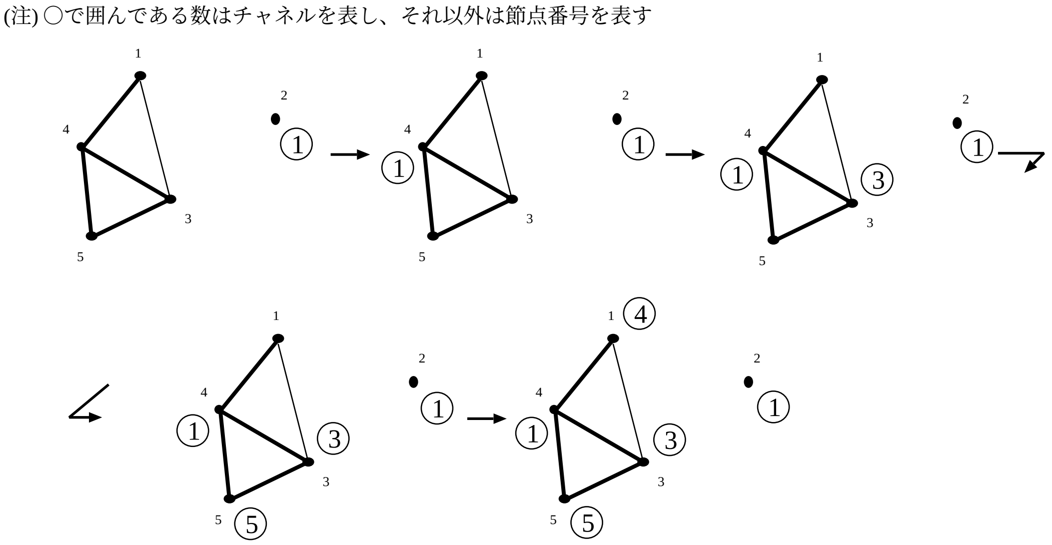

図 4.3　チャネル割当 2

以上の通り，2 種類の染色体を使い，チャネルを割り当てた結果が下図である.

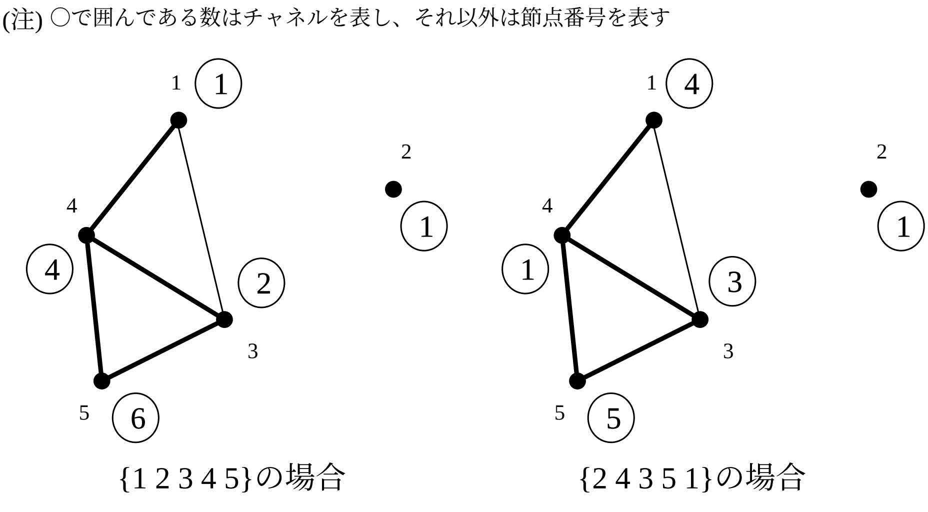

図 4.4　2 つの計算結果

染色体（1）では最大使用チャネルが 6 であったのに対し，染色体（2）では，最大使用チャネルは 5 である．

4.2.3　適応度の計算

適応度の計算式は，本論文では，

$$fitness = \frac{1}{\text{最大使用チャネル}}$$

とする．これは，使ったチャネルが少ないほど，適応度が大きくなるようにするためである．

4.2.4　選択交配

基本モデルとされるルーレット戦略を用いる．ルーレット戦略とは，各個体の適応度に比例した確率で子孫を残せる可能性があるモデルである．適応度が大きければ，次の世代に子孫を残せる確率が上がる．

4.2.5　交叉方法

交叉方法は，大きく分けて，Order crossover(OX), Partially Mapped crossover(PMX), Cycle crossover(CX) の 3 種類を用いる．そしてそれぞれには，異なる 4 種類の交叉方法が存在する．

■Order crossover(OX)　OX は，ランダムで選ばれた交叉点から，親染色体にもう 1 つの親染色体の遺伝子を組み換え，子の染色体を作る方法である．図 4.5 は，1 point right OX を示す．縦線はランダムで選ばれた交叉点を表す．

1 point right OX の方法は，交叉点から右を組み換えていく．図 4.5 の場合，子 1 は，交叉点より前半が親 1 の遺伝子を受け継ぐ．後半はまず，親 2 から 4 の遺伝子を受け継ごうとするが，親 1 はすでに 4 の遺伝子を持っている．そこで，親 2 の先頭から順番に親 1 にまだ使われていない遺伝子を探していく．1 は使われているが，次の 2 はまだ使われていない．

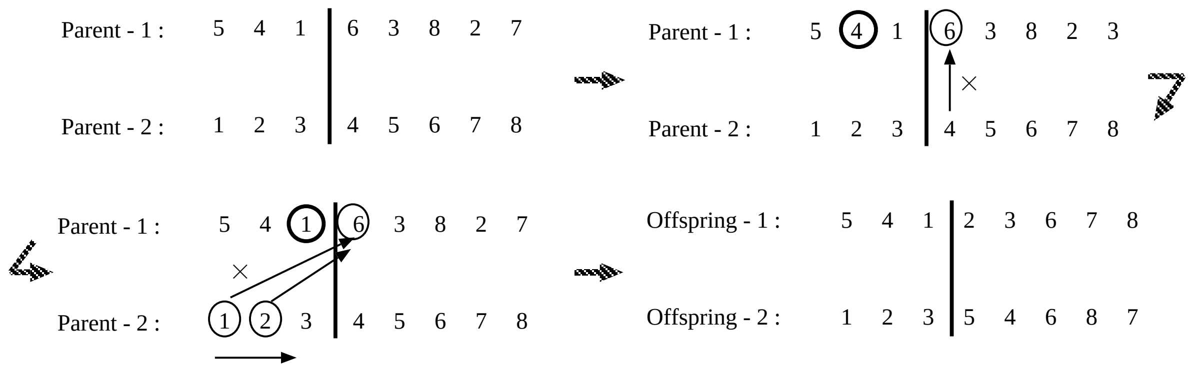

図 4.5　1 point right OX

よってここには 2 が入る．続いて 3, 8, 2, 7 にもこの作業を続けていくと，2 つの親から交叉された子 1，2 ができる．

この他に，1 point left OX, 2 point inside OX, 2 point outside OX を使用する．これらについては，以下に例を示す．

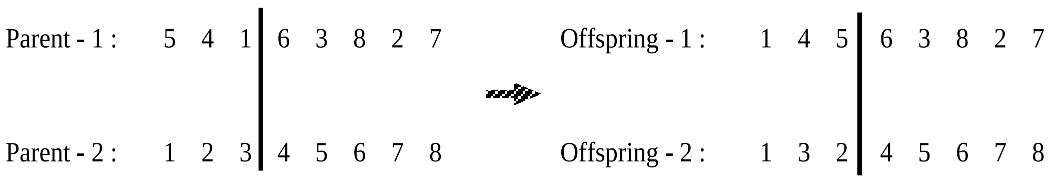

図 4.6　1 point left OX

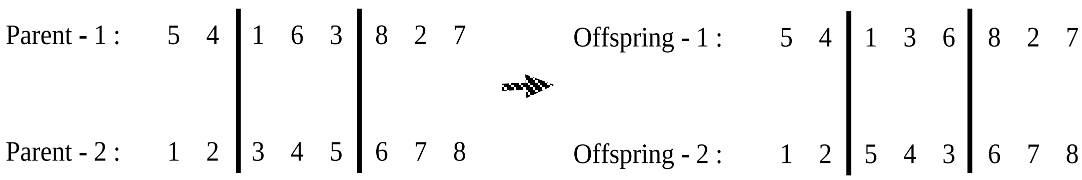

図 4.7　2 point inside OX

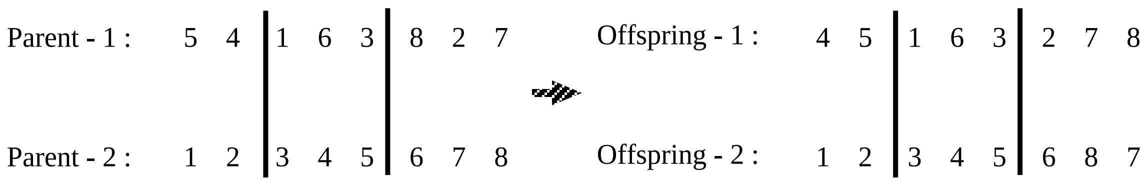

図 4.8 2 point outside OX

■Partially Mapped crossover(PMX) PMX は，親染色体の間で交叉箇所の前後の染色体を交換した後，部分的なパッチを当てることを基本として致死遺伝子を生じないようにする方法である．図 4.9 は，1 point right PMX を示す．縦線はランダムで選ばれた交叉点を表す．

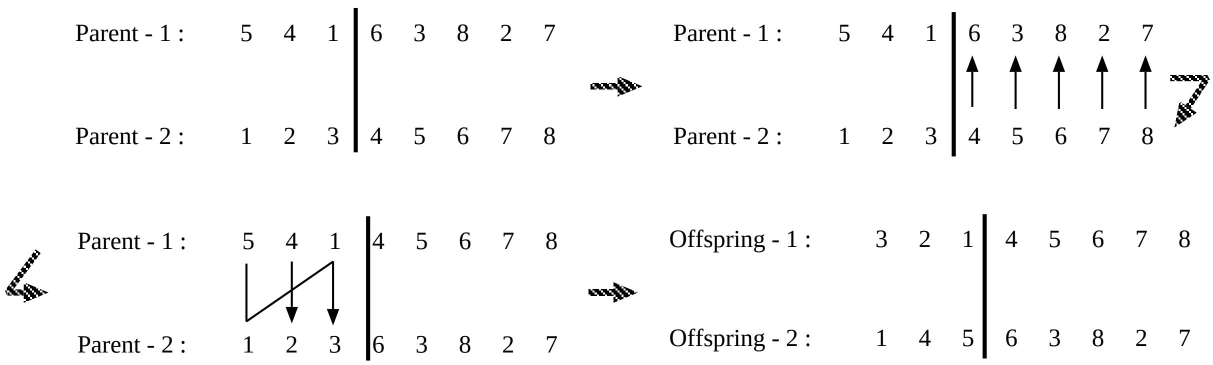

図 4.9 1 point right PMX

1 point right PMX の方法は，まず子 1 の交叉点より後半は，親 2 の後半の遺伝子を受け継ぐ．前半はそのまま親 1 の遺伝子を受け継ぐが，このとき致死遺伝子が発生しないように親 1 の親 2 に対する写像をあてる．図 4.9 では，5 の場所には 1 が受け継ぐが，親 1 に 1 はすでにあるので，親 1 の 1 の写像である 3 を受け継ぐ．そして，4 は致死遺伝子となるので，その写像である 2 を受け継ぐ．この作業を繰り返していくと子 1, 2 ができる．

この他に，1 point left PMX, 2 point inside PMX, 2 point outside PMX を使用する．これらについては，以下に例を示す．

Parent - 1 :	5 4 1 | 6 3 8 2 7	Offspring - 1 :	1 2 3 | 6 5 8 2 7
Parent - 2 :	1 2 3 | 4 5 6 7 8	Offspring - 2 :	5 4 1 | 2 3 6 7 8

図 4.10　1 point left PMX

Parent - 1 :	5 4 | 1 6 3 | 8 2 7	Offspring - 1 :	1 6 | 3 4 5 | 8 2 7
Parent - 2 :	1 2 | 3 4 5 | 6 7 8	Offspring - 2 :	5 2 | 1 6 3 | 4 7 8

図 4.11　2 point inside PMX

Parent - 1 :	5 4 | 1 6 3 | 8 2 7	Offspring - 1 :	1 2 | 5 4 3 | 6 7 8
Parent - 2 :	1 2 | 3 4 5 | 6 7 8	Offspring - 2 :	5 4 | 3 6 1 | 8 2 7

図 4.12　2 point outside PMX

■Cycle crossover(CX)　CX は，2 つの親の染色体から cycle を求め，その遺伝子を子の染色体に受け継いでいく方法である．図 4.13 は CX を示す．縦線はランダムで選ばれた交叉点を表す．

図 4.13 の場合，まず親 1 の遺伝子座 1 を cycle の開始点として親 2 へ写像していき，(5,1,3,5) という cycle を得る．これを子 1 の遺伝子座が受け継ぐ．次に親 2 の遺伝子座 2 を cycle の開始点とすると (2,4,6,8,7,2) という cycle を得て，それを子 1 の遺伝子座が受け継ぐ．この作業は cycle がなくなるまで繰り返し行われる．

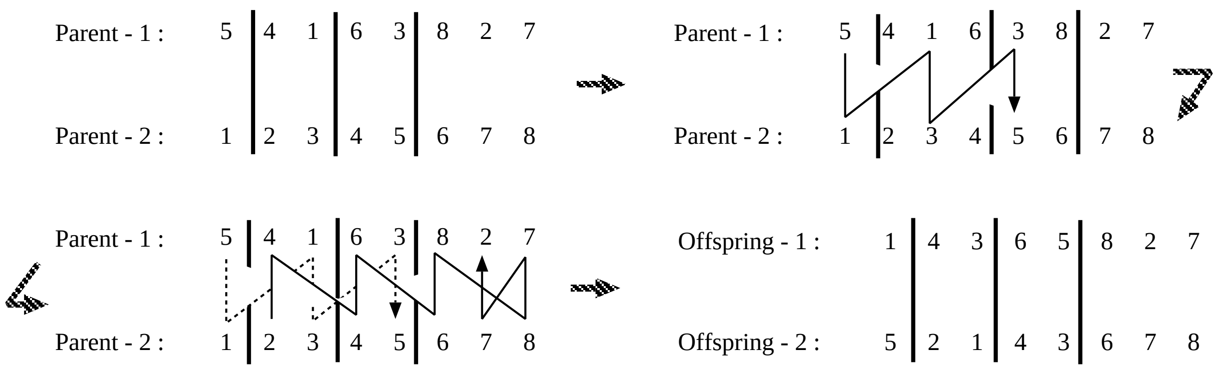

図 4.13　CX

4.2.6　突然変異

本論文では，突然変異手法として，染色体の遺伝子をランダムに 2 点を選びそれらを交換する，という最も単純な突然変異を使用した．

4.2.7　終了条件

本論文では，適応度がある世代数に渡って無進化の場合をアルゴリズムの終了条件する．これを満たすまで繰り返される．

第 5 章

比較

GA のパラメータは，M(染色体数) と T(世代数) を 100 とする．また予備実験として，半径 r_1,r_2 が 70，40 のときの節点数 100 個の問題を，9 通りの P_m(突然変異確率) と 9 通りの P_c(交叉確率) と，9 通りの x(交叉方法) で実験した．このとき，各パラメータでそれぞれ 10 回実験を行った結果，最も良い解を得られた以下のパラメータで実験する．

表 5.1　パラメータ

M	T	P_m	P_c	x
100	100	0.1	0.9	CX

入力データは，n は節点数，同心円グラフの半径 r_1,r_2 は 70，40 とする．厳密解法と GA によって割り当てられた最大使用チャネル数と，計算時間は表 5.2 のとおりである．表の見方は，節点数 n 個のときの厳密解法の解と計算時間と，GA の解と計算時間とを比較してある．GA は，それぞれ 10 回の計算をし，その中から最も計算時間が早かったものを記してある．

表 5.2　厳密解法と GA の比較

n	厳密解法		GA	
	channel	time (sec)	channel	time (sec)
3	2	0.009	2	0.163
4	3	0.013	3	0.249
5	5	0.108	5	0.265
6	6	0.437	6	0.350
7	6	0.721	6	0.517
8	8	7.709	8	0.581
9	8	19.111	8	0.820
10	8	622.521	8	0.855
11	9	660.200	9	1.197

厳密解法は，そのアルゴリズム上の問題で，節点数 12 個以降解が求められなかった．以後，同じパラメータで GA のみ節点数を大きくし，さらに計算実験を行った．

表 5.3　節点数 100 個以上の解

n	channel	GA time (sec)
50	48	25.600
100	90	490.594
150	155	594.069
200	208	839.158
300	316	2384.807

本研究での解法にあたって，与えられたパラメータから最適解を得るには，実質的な計算

時間上で効率的と言えるのは，節点数は 300 個までであると思われる．

図 5.1 は，節点数 50 個のとき，各基地局に割り当てられたチャネルを表している．図中の数字は，その場の基地局に与えられたチャネルを表し，太い線が重み 2 を，細い線が重み 1 を表す．

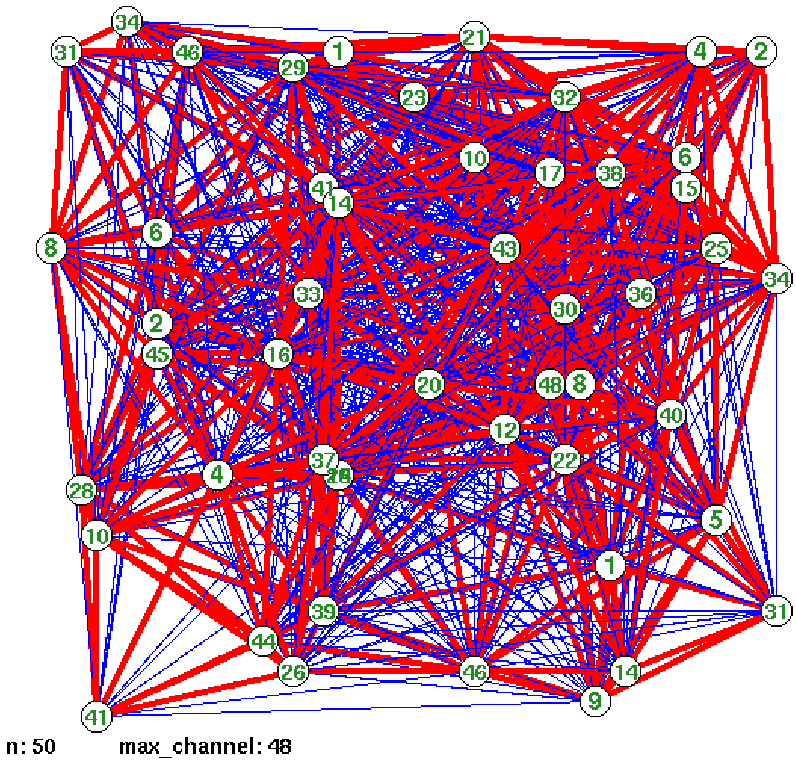

図 5.1　GA

第 6 章

結論

本研究の結果，GA を用いた解法は，厳密解法に比べ効率的であることが分かった．厳密解法は，一度の実行で最適解を出すという利点があるが，節点数がおよそ 11 個まででないと解を出すことができないという欠点があり，また節点数が 9 個を超えると計算時間が急にかかり，あまり効率的とは言えなかった．それに比べ，GA では，近似解ではあるが，最大節点数は大きく上まわり，計算時間も比較的早く解を求めることができた．

しかし，GA にも欠点がある．それは，一度の実行で解を得る厳密解法に比べ，GA には複数のパラメータがあり，組合せによって様々な解を得ている．しかし，組合せの数は膨大にあり，全ての種類を計算するには，手間と時間がかかってしまうことである．

本論文で出された解は，CHAP から見て絶対的に最適解とは言えず，あくまでも予め良い解が出せるであろう，と予想して与えられたパラメータ上の最適解である．しかし，最大節点数や計算時間を考えると，GA を用いた解法の方が効率的であるといえる．

謝辞

この度，私が研究を無事終わらせることができたのは，資料集めやその説明をして下さった坂本明雄教授，並びに院生の橋本学氏の御指導，御協力があったお蔭であり，深く感謝致します．CHAP というこれまで考えたこともなかった問題を私に詳しく説明し，またそれを GA で解くためのアイデアを頂いたお蔭で，無事研究を終わらせることができました．

私は昨年 2 月に坂本研究室に配属したので，研究室の他の方々より勉強のスタートが遅れていました．しかし，この新参者を暖かく迎えてくれた坂本研究室の方々のお蔭で，楽しく GA の勉強や，本研究を進めることができました．本当に感謝しております．自分の研究もあまり進んでいないのにも関わらず，私に C 言語を詳しく教えてくれた登 伸一君，神谷 将司君，ありがとうございました．また，研究を頑張ってよく共に朝を迎えた井上 祐介君，横谷 将樹君，お疲れ様でした．みんなにすごく優しかった院生の久保 真理子さん，癒されました．そして途中からあまり顔を見なくなった折橋 祐一君，山下 由紀子さん，お元気ですか？ 最後に，もっと喋って欲しかった山崎 聖太郎君，お疲れ様です．

こういった個性豊かな人物が集まった坂本研究室は，私にとって非常に過ごしやすい場所でした．本当にどうもお世話になりました．

現 3 年生のみなさん，後々イヤでも思い知りますが，卒業研究は結構大変です．今のうちにできることはやっておきましょう．あと，旅行とか，やりたいことはすでにやっておいたほうがいいかもしれません．就職活動と時期がかぶるときついです．私はきつかった．

それでは残り 1 年，しっかり頑張って下さい．

参考文献

[1] 宮本 裕一郎, 松井 知己, “チャネル割当問題の解法”, 情報処理学会論文誌, vol.40, pp.23-31, Feb, 1999.

[2] 村上 誉, 小川 恭孝, 大鐘 武雄, “遺伝的アルゴリズムを用いた移動無線通信における固定チャネル割当法”, 電子情報通信学芸論文誌, vol.J83-B, no.6, pp.769-779, Jun, 2000.

[3] 片山 謙互, 平林 永行, 成久 洋之, “遺伝的アルゴリズムの交叉法に対する性能評価”, 電学論, vol.J81-D-I, no.6, pp.639-650, 1998.

[4] 電気学会, “遺伝アルゴリズムとニューラルネット”, コロナ社, 1998.

[5] 北野 宏明, “遺伝的アルゴリズム”, 産業図書, 1993.

[6] http://www.nttdocomo.co.jp/corporate/rd/tech/

付録 A

現在の携帯電話システム

補足であるが，現在の携帯電話システム [6] について説明する．

現在の携帯電話機の伝搬方式は，PDC システムと呼ばれるデジタル方式が主流である．PDC システムでは，デジタルデータを送信する変調方式として，デジタルデータを π / 4 シフト QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) を使用している．これは，デジタルデータ (01, 00, 10, 11) を搬送波の位相を π / 4 ずつずらしながら送信する方式である．

一方，アクセス方式は TDMA(Time Division Multiple Access) を使用している．1 つの周波数の電波を 1 つの携帯電話に割り当てると，使用できる周波数帯の電波がすぐに足りなくなる．そのため，1 つの周波数の電波を複数の携帯電話で使用できるように，基地局はデジタルデータを時分割して複数の携帯電話に送信している．各携帯電話機は，これに同期して基地局に送信する．従って，各携帯電話機からの送信は重ならず，基地局はほぼ連続して各携帯電話機からの信号を受信する．

このように携帯電話機は，基地局との間で無線通信により信号の送受信をするため，アンテナが使用される．普通，携帯電話機は，2 つのアンテナを持っており，電波が強く受信できるほうのアンテナを選択して使用されている．これをダイバーシチ方式と呼び，携帯電話が送受信を行っていない空き時間のタイミングで，2 つのアンテナを交互に使用して受信を行い，強く受信できるほうを選択している．

また携帯電話機は，この空き時間に周辺の基地局からの電波の強度を調べて，現在交信中の基地局に他の基地局からの電波の強度を報告している．そのため，携帯電話にはハンドオーバと呼ばれる，別の基地局の電波のほうが強くなった場合，交信先の基地局の変更が支持され，交信している基地局が変更される，という機能が持たれている．

付録 B

実験結果

入力データが，$n = 100$，同心円グラフの半径 r_1,r_2 は 70，40 のときの実験．結果を示す．また，GA のパラメータは，M(染色体数) と T(世代数) を 100 とし，x(交叉方法)，P_c(交叉確率)，P_m(突然変異確率) を変えて最適解を求めた．

交叉方法として CX を用い，$P_c = 0.9$，$P_m = 0.1$ としたとき最も良い解 90 が得られた．

■1 point right OX

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	99	99	100	97	100	99	98	98	100
0.2	99	98	99	99	99	97	100	100	97
0.3	99	98	100	100	100	101	101	100	101
0.4	99	99	99	101	100	102	101	100	101
0.5	99	97	99	99	101	100	100	99	98
0.6	98	99	99	100	99	96	100	101	99
0.7	99	101	99	98	99	99	100	99	101
0.8	100	101	100	101	99	99	100	99	100
0.9	100	101	100	99	99	100	100	101	102

■1 point left OX

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	99	97	99	98	97	99	99	99	98
0.2	99	98	101	101	101	102	102	102	101
0.3	100	101	102	101	102	102	102	103	102
0.4	100	100	102	100	101	102	101	101	102
0.5	99	100	99	101	102	101	102	103	100
0.6	99	100	101	100	103	102	102	97	102
0.7	101	99	103	100	101	102	101	100	101
0.8	101	100	102	102	102	101	102	103	99
0.9	101	101	100	101	100	101	101	101	99

■2 point inside OX

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	100	97	100	99	100	98	99	100	99
0.2	99	100	100	99	99	96	101	100	99
0.3	98	98	98	98	100	99	100	98	99
0.4	99	101	100	100	101	101	98	99	101
0.5	98	100	100	99	100	101	100	99	97
0.6	100	99	99	101	101	100	99	101	99
0.7	100	99	100	98	101	101	100	100	99
0.8	101	100	99	101	99	99	102	99	102
0.9	100	98	99	101	102	99	101	98	101

■2 point outside OX

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	100	100	101	98	100	99	100	98	100
0.2	94	101	101	99	101	100	100	101	98
0.3	97	100	97	100	100	98	101	97	99
0.4	99	101	100	101	100	100	99	99	99
0.5	101	99	101	100	101	100	100	100	101
0.6	99	101	100	102	99	100	101	99	100
0.7	100	101	99	102	98	101	97	100	100
0.8	100	100	100	101	100	98	100	99	102
0.9	100	101	100	101	102	100	100	101	99

■1 point right PMX

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	100	99	97	97	97	100	97	100	97
0.2	98	99	99	96	98	99	101	99	101
0.3	99	99	98	101	100	100	96	101	100
0.4	98	100	101	101	100	100	101	99	101
0.5	100	98	101	100	99	99	99	98	97
0.6	100	98	99	101	101	100	100	97	99
0.7	98	101	99	99	101	99	96	101	99
0.8	100	96	100	100	101	98	98	100	101
0.9	101	102	100	101	101	101	100	102	101

■1 point left PMX

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	96	98	97	98	94	96	95	99	96
0.2	97	98	98	98	98	97	99	99	98
0.3	100	99	101	100	100	99	100	101	99
0.4	98	98	100	98	101	99	100	102	99
0.5	97	102	101	96	100	100	100	101	101
0.6	98	98	100	96	101	100	101	101	101
0.7	99	100	99	99	99	100	99	100	100
0.8	99	99	99	99	99	100	99	99	101
0.9	98	101	100	100	102	100	102	102	100

■2 point inside PMX

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	97	97	99	100	102	101	102	102	102
0.2	99	99	99	101	102	101	102	101	100
0.3	97	100	100	102	102	102	102	101	101
0.4	99	101	102	101	101	100	99	100	99
0.5	99	101	100	101	100	100	101	101	100
0.6	100	99	101	102	99	101	101	101	102
0.7	97	101	98	101	103	101	101	101	100
0.8	100	101	102	99	101	100	101	102	100
0.9	100	101	101	102	102	101	102	102	100

■**2 point outside PMX**

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	95	94	99	98	101	102	99	103	100
0.2	99	96	100	98	102	99	101	101	101
0.3	99	99	98	101	101	102	101	98	101
0.4	99	100	100	99	100	101	102	102	102
0.5	99	101	100	101	100	98	101	101	101
0.6	100	99	102	100	101	102	100	102	102
0.7	101	101	101	100	101	103	98	102	100
0.8	101	98	102	99	101	102	102	102	99
0.9	101	101	101	101	101	103	104	101	101

■**CX**

$P_m \setminus P_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	92	97	97	93	94	95	96	93	•90
0.2	94	98	97	96	94	98	97	99	97
0.3	100	96	97	96	96	97	98	100	97
0.4	99	97	100	98	98	95	99	102	101
0.5	99	100	99	98	100	100	99	101	102
0.6	100	98	100	101	100	101	102	100	101
0.7	100	100	100	101	101	100	100	103	102
0.8	100	101	99	101	100	97	100	100	100
0.9	100	99	100	97	98	99	101	103	103