

粒子線治療装置スケジュールへのGAの適用

一治療日スケジュール

青山 功*, 佐藤 裕幸*, 浅見 廣愛*, 土谷 昌晴**, 坂本 豪信**

* 三菱電機 (株) 情報技術総合研究所

** 三菱電機 (株) 通信機製作所

癌治療法の1つである粒子線治療を行うための装置(粒子線治療装置)は大規模且つ高価であり, 効率の良い運用が要求される。粒子線治療装置の運用スケジュール(粒子線治療装置スケジュール)は, 治療計画に則った患者の治療, 効率の良い加速器の運転, 効率の良い治療室の利用などを考慮しなければならず, また, 一度に数ヶ月分のスケジュールを立案するため, 複雑で大規模なスケジューリング問題である。この粒子線治療装置スケジュールの患者治療日の決定に共存型GAを適用し, UNIXワークステーション(CPU: 160MHz, メモリ: 128Mbyte)上で, 実用規模のスケジュールを7分以内に立案できることを示した。

A Genetic Algorithm for Particle Treatment Facilities Scheduling Problem: A Treatment Date Schedule

Isao Aoyama*, Hiroyuki Sato*, Hiroai, Asami*, Masaharu Tsuchiya**, Hidenobu Sakamoto**

* Mitsubishi Electric Corp. Information Technology R&D Center

** Mitsubishi Electric Corp. Communication Systems Center

A Particle Treatment is one of treatment methods for cancer. Particle Treatment Facilities must be used efficiently since they are huge and expensive. A Particle Treatment Facilities Scheduling Problem (PTFSP) is to decide treatment date, treatment time and accelerators and treatment rooms of all patients, considering treatment plans of patients, efficient operations of accelerators and efficient use of treatment rooms. And it is planned for several months at a time. So, PTFSP is a complicated and large-scale problem.

We applied cooperative GA to decide treatment date of all patients. Our method takes less than 7 minutes to plan a real-scale schedule on UNIX Work Station (CPU: 160MHz, Memory: 128Mbyte).

1. はじめに

癌治療法の1つである粒子線治療は, ヘリウム, 炭素, ネオンなどの重粒子線を患部に集中して照射し, 周辺の正常細胞への影響を最小限に抑え, 患者の早期社会復帰を可能とする非常に有効な癌治療方法である。粒子線治療を行うための装置(粒子線治療装置)は, 原子をイオン化する重イオン源, 重イオンを加速する加速器, 治療(患部への粒子線の照射)を行う治療室等で構成される。粒子線治療装置は大規模で且つ高価なものであり, 効率良く運用されることが要求される。

粒子線治療装置の運用スケジュール(粒子線治療装置スケジュール)は, 治療計画¹に則った患

者の治療, 効率の良い加速器の運転, 効率の良い治療室の利用など様々な条件を考慮しなければならず, また, 全患者のスケジュールを一度に立案するためには, スケジュール期間が3~4ヶ月となり, 複雑で大規模なスケジューリング問題である。また, 患者の容体の変化により見直しも頻繁に行われる。現在, 粒子線治療装置スケジュールは人手により立案されているが, 立案作業は立案者にとって大きな負担となっており, 立案の自動化が望まれている。このため, 我々は粒子線治療装置スケジュールを自動立案する粒子線治療装置スケジューラの開発を行っている[1][2][3]。

粒子線治療装置スケジュールは見直しが頻繁に行われるため, 実用性の観点からは短時間でスケジュールを立案することが重要である。しかし, 厳密に粒子線治療装置スケジュールの最適解を求めようとすると, 大抵の場合は長時間を要し, 実

¹ 患者の治療部位毎に, 使用する粒子線の種類, 治療回数, 治療期間などの治療内容を指定。

用性に欠けるものになってしまう。そこで、大規模な問題に対しても短時間で解を求めることができ、実装が比較的容易である遺伝的アルゴリズム (GA) を適用した。更に、全て (数ヶ月分) の治療の実施日と各日の治療順を一度に求めることも時間を要すると考え、治療日の決定 (治療日スケジュール) [1]と、各日の治療順の決定 (治療順スケジュール) [3]の 2 段階に分けた立案を行うことにした。

本稿では、このうち前段の処理である治療日の決定への共存型 GA[4]の適用について述べる。

2. 粒子線治療装置スケジューリング問題

粒子線治療装置スケジューリング問題とは、粒子線治療装置を運用するにあたって、各患者の治療日時を決定する問題である。スケジュールの立案にあたっては、(1)各患者毎に定められた治療計画に則った治療の実施、(2)効率の良い加速器の使用、(3)効率の良い治療室の使用、を考慮しなければならない。

(1) 治療計画

治療計画は患者の治療部位毎に作成され、「照射」と呼ばれる単位で構成される。各照射で指定される項目は、使用する粒子種およびエネルギー強度、使用するポート²、1 回の照射線量、総照射線量、治療開始予定日、1 週間の治療回数等である。治療部位が複数ある患者は複数の治療計画が作成され、1 つの治療部位に複数のポートを用いる患者の治療計画には複数の照射が含まれる。

(2) 加速器

粒子線治療装置は 1 台以上の加速器を備えている。照射される粒子線の種類は粒子種とエネルギー強度によって決まり、粒子種やエネルギー強度を切り替えることで 1 台の加速器から複数種類の粒子線を発生させることができる。ただし、1 台の加速器からは同時に 1 種類の粒子線しか発生させることができない。また、加速器からポートまでの粒子線の通り道をビームコースと呼び、1 台の加速器からは同時に 1 つのビームコースにしか粒子線を照射できない。

粒子種、エネルギー強度、ビームコースの切替え時には切替え時間が発生し、その間は粒子線の

照射は行えない。

効率の良い加速器の使用とは、『1 日の切替え時間を最小にして、できるだけ多くの患者の治療が行えるようにする』ことである。

(3) 治療室

粒子線治療装置は 1 室以上の治療室を備えていて、治療室はそれぞれポートの数と種類が異なる。患者は患部によって使用するポートが決まっているので、患者によって治療を受けられる治療室が異なる。

患者の入退室時には、準備時間、後片付け時間、患者入れ替え時間が必要であり、同じ治療室に連続して照射を行う場合、後片付け+入れ替え+準備の間治療が行えない。

効率の良い治療室の使用 (これは治療室が複数ある場合のみ) とは、『複数の治療室を交互に使用し、ある治療室で治療を行っている間に他の治療室で治療の準備をしておくことで、治療が行えない時間を最小にする』ことである。

3. 治療日スケジュール

治療日スケジュールの立案は、患者毎に治療計画で定められた治療の実施日を決定することである。図 1 に治療日スケジュールの例を示す。

治療日スケジュールの制約条件 (厳守すべき条件) および最適化条件 (目的値との差をできるだけ小さくする条件) を以下に示す。

患者	治療計画	照射	2/2	2/3	2/4	2/5
0001	01	01	○	●	○	●
		02	●	○	●	●
	02	01	○	●	○	●
		02	○	●	○	●
0002	01	01	●	●	○	○

- : 治療を実施する日
- : 治療を実施しない日

図 1 治療日スケジュール例

● 制約条件

- (1) 治療開始予定日以降に治療を割り付ける。
- (2) 治療計画毎の 1 週間の治療回数は指定された回数とする。
- (3) 各照射は毎週必ず 1 回は治療を行う。
- (4) 加速器および治療室の 1 週間の総照射線量は上限値 (法定値) を越えない。

² ポートとは粒子線の照射口のことであり、各治療室は 1 つ以上のポートを有する。ポートの照射方向には、水平、垂直、斜め 45 度などがある。

(5) 患者の治療不可能日には割り付けない。

● 最適化条件

- (1) 実際の治療開始日と治療開始予定日との差を最小にする。
- (2) 治療計画毎および照射毎の治療日間隔は等間隔とする。
- (3) 1日の最終治療終了時刻の、指定時刻からの超過時間を最小にする。
- (4) 1日の粒子種およびエネルギー強度の切替え回数を最小にする。
- (5) 連続照射³指定の治療は同じ日に実施する。

4. 治療日スケジュールへの共存型 GA の適用

治療日スケジュールは、日毎の最適化 (図 1 の縦方向) と治療計画毎および照射毎の最適化 (図 1 の横方向) の 2次元の最適化を行わなければならない。この様な問題に一般的な 1次元配列の GA を適用した場合、致死遺伝子を生成しないために複雑な交叉が必要になる。

そこで、我々は共存型 GA[4]を治療日スケジュールに適用した[1]。共存型 GA は複数の個体を合わせて 1つの解を表現し、各個体毎の最適化と個体の集合全体に対する最適化の両方を行うことで解の改善を図るモデルである。治療日スケジュールへの共存型 GA の適用例を図 2に示す。各個体が 1日に実施する治療を表し、全個体を合わせて治療日スケジュールを表す。各遺伝子座は照射と対応し、遺伝子は治療の実施の有無を表わしている。

患者	治療計画	照射	2/2	2/3	2/4	2/5
0001	01	01	○	●	○	●
		02	●	○	●	○
	02	01	○	●	○	●
		02	○	●	○	●
0002	01	01	●	○	○	

↑ 個体

図 2 共存型 GA の適用例

スケジュールの立案は以下に示す手順で行う。

- (1) 制約条件に違反しない様に、適当な解を M 個生成する (初期化)。

³ 同じ患者の異なる照射の治療を同じ日に続けて実施する場合、それらの治療を「連続照射」として指定。

- (2) 全 M 個の解から復元抽出でランダムに選択された N 個の解に対して交叉を行い、新たな解を生成する (交叉)。
- (3) M+N 個の解の中から適応度の良い順に M 個の解を残す (淘汰)。
- (4) 以下の 3つの条件のうち、いずれか 1つが満たされれば立案終了。そうでなければ(2)に戻る。
 - a. 更新世代数が上限値に達した。
 - b. 立案経過時間が上限値に達した。
 - c. 最良解の適応度が X 回連続して変化しなかった。

なお、本手法では照射毎の総治療回数を変化させないため突然変異は行わないこととした。

4.1. 交叉

共存型 GA の交叉は、任意の 2つの個体を選択し、選択された 2 個体間で任意の同じ位置の遺伝子を入れ替える。しかし、治療日スケジュールでは、治療計画毎に 1 週間の治療回数が決めているので、異なる週の 2 個体間で交叉を行うと 1 週間の治療回数が変わってしまう場合がある。そこで、交叉は『同じ週に含まれる 2 個体間で行う』こととする。図 3は、2/2~2/5 が同じ週である場合の交叉例を示している。この場合、2/2 と 2/5 の個体を交叉対象として選択し、そのうち上から 1, 4, 5 番目の遺伝子を 2 個体間で入れ替える。

交叉の手順を以下に示す。

- (1) 各週毎に、その週の個体に対して交叉を行うかどうかを交叉率 A に基づいて判断する。
- (2) 交叉を行うと判断された週に含まれる個体をランダムに 2つ選択する。
- (3) 選択された個体の遺伝子座毎に、交叉を行うかどうかを交叉率 B に基づいて判断する。
- (4) 交叉を行うと判断された遺伝子座の遺伝子を 2 個体間で入れ替える。ただし、交叉によって制約違反が生じる場合は交叉を行わない。

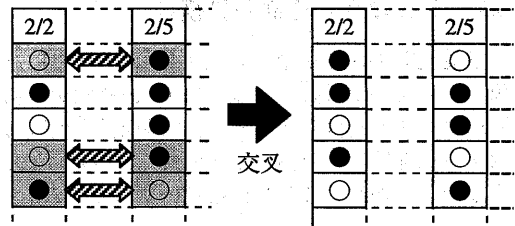


図 3 共存型 GA の交叉例

4.2. 適応度計算

各最適化条件の評価値は、取りうる値の範囲やその単位がそれぞれ異なるので、評価値を正規化したものを各最適化条件の適応度とする。評価値は条件を最も満たす場合を0とし、この最適な状態からのずれが大きくなるほど評価値を大きくする。従って、評価値が小さいほど良い解となる。

粒子線治療装置スケジューリング問題は多目的な（最適化条件が複数ある）問題で、通常、最適化条件には優先度があると考えられる。そこで、各最適化条件の優先度を適応度に反映するために各条件毎に重み係数を設定する。重み係数はその最適化条件の重要度が高いほど大きな値を取るものとする。

解の適応度は各最適化条件の適応度と重み係数の積和により求める。この重み係数により、優先度の高い最適化条件ほどその評価値が大きく適応度に反映される。

以下に各最適化条件の評価値の求め方を示す。

最適化条件(1)の評価値：

『実際の治療開始日と治療開始予定日との差』の1照射当たりの平均値。

最適化条件(2)の評価値：

『治療日間の分散』の1照射当たりの平均値。

最適化条件(3)の評価値：

『指定時刻からの超過時間』の1日当たりの平均値。

最適化条件(4)の評価値：

『1日に使用する粒子種の数、エネルギー強度の数』の1日当たりの平均値。

最適化条件(5)の評価値：

『連続照射指定をされた照射のうち、同じ日に割り付かなかった照射の割合』の連続照射グループ⁴当たりの平均値。

4.3. 1日の終了時刻の見積り

最適化条件(3)を評価するためには1日の最終治療の終了時刻が必要である。1日の最終治療が何時に終了するかは、その日の治療順と各治療で使用する加速器および治療室が決まらなければ求まらない。しかし、これらは後段の処理である治療

⁴ 連続して治療を行う照射の集まり。

順スケジュールで決定される。そこで、1日の最終治療の終了時刻を大まかに見積りすることで最適化条件(3)の評価を行う。この見積りでは、患者の都合を無視してできる限り治療が早く終わるような治療順と各患者への加速器・治療室の割り当てを行う。

後段の治療順スケジュールでは、希望時間等患者の都合も考慮するので、ほとんどの場合、実際の終了時刻は見積り時刻よりも遅くなる。従って、最適化条件(3)で用いる『指定時刻』は実際に終了させたい時刻よりも早い時刻を指定する。

以下に見積りの手順を示す。

- (1) 粒子種およびエネルギー強度の切り替え回数が最小となるように、同じ粒子種を用いる治療が連続し、更に同じ粒子種を用いる治療の中で同じエネルギー強度を用いる治療が連続するように治療順を仮決める。
- (2) 仮の治療順に従い、各治療が最も早く始められるように使用する加速器と治療室を仮決めし、各治療の治療開始時刻を前詰めに決めていった時の最終治療の終了時刻を見積り終了時刻とする。

5. 評価実験

実際の規模のデータを用いて提案手法の評価実験を行った。使用した計算機は UNIX ワークステーション (Mitsubishi ME RC160, CPU: PA-8000, 160MHz, メモリ: 128Mbyte) で、使用したデータは評価用に生成したものである。評価用データの主な数値を表 1 に示す。

表 1 評価データ

患者数	50
スケジュール期間	2ヶ月
患者毎の治療計画数	1~3の間でランダムに設定
治療計画毎の照射数	2~4の間でランダムに設定
各照射の1週間の治療数	2または3
各照射の治療期間	3または4週間でランダムに設定
1日の治療数	40~60

また、

- ❖ 各世代で保持する解の数を 10
- ❖ 終了条件を
 - ① 更新世代数が 1,000 回に達したら終了
 - ② 最良解の適応度が連続して 50 回変化しなければ終了とする。

(1) 交叉率と適応度, 更新世代数の関係

交叉時に生成される解の数を 10, 交叉率 A, B の値の組み合わせを, {0.7,0.3}, {0.3,0.7}, {0.7,0.7}, {0.3,0.3} の 4 通りとし, 同じデータに対して乱数のシードを変えて最良解の適応度および収束までの更新世代数を 100 回測定した. なお, 交叉率 A は, 各週毎に, 交叉を行う 2 個体を選択するかどうかを判断するために用い, 交叉率 B は, 選択された個体の各遺伝子座毎に交叉を行うかどうかを判断するために用いる.

測定の結果, 最良解の適応度と収束までの世代更新回数は交叉率 A の影響が大きく, 交叉率 B はほとんど影響が無いことが示された. 図 4 に交叉率 A, B が {0.7,0.3} と {0.3,0.3} の場合の測定結果を示す (交叉率 A, B が {0.7,0.7} の場合は {0.7,0.3} と, {0.3,0.7} の場合は {0.3,0.3} とほとんど同じであった).

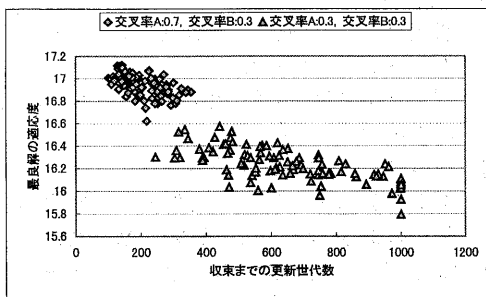


図 4 交叉率と適応度, 更新世代数の関係

図 4 より, 交叉率 A の値が大きければ収束は早く, 交叉率 A の値が小さければ適応度が良いことが示された. また, 交叉率 A が小さい場合は終了条件である最大世代更新回数まで達しているものもいくつか見られた.

図 5 に, 交叉率 A と交叉率 B の組み合わせが {0.7,0.3} と {0.3,0.3} の場合の最良解の適応度変化を示す. 右上のグラフは最初の 40 世代までの変化を拡大したものである. 交叉率 A の値が大きいと最初のうちは適応度の改善率が良いが, すぐに横ばいになることが分かる.

(2) 新規解の数と適応度, 立案時間の関係

交叉率 A, B の値を {0.7,0.3} とし, 交叉時に生成される新規解の数を 2, 5, 10 と変えた場合, 同じデータに対して乱数のシードを変えて最良解の適応度と立案時間を測定した. 測定回数は, 適応度が 100 回, 立案時間が 30 回である.

測定の結果, 新規解の生成数が多いほど適応度

の良い解が得られ, 世代更新時間は新規解の生成数に比例することが示された.

適応度分布を図 6 に, 立案時間の分布を図 7 に示す.

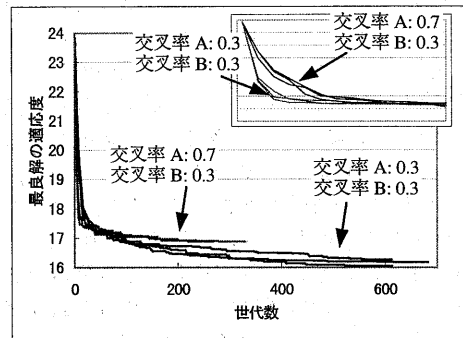


図 5 適応度変化

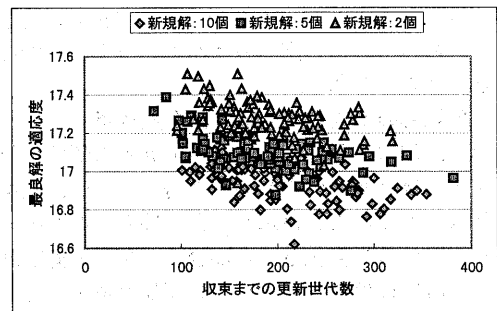


図 6 新規解の生成数と適応度分布の関係

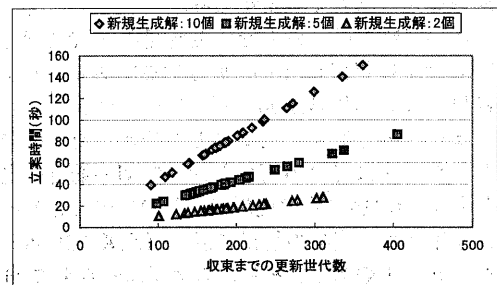


図 7 立案時間の分布

6. 考察

(1) 交叉率と適応度, 更新世代数

最良解の適応度および収束までの更新世代数には交叉率 A の影響が大きく, 交叉率 A の値が大きければ少ない世代更新数で収束し, 交叉率 A の

値が小さければ適応度の良い解が得られるという結果が得られた。

これは、各週毎に交叉率 A の確率で交叉を行っているので、交叉率 A の値が大きければ毎世代交叉が行われる週の数が多くなり、治療日の変更も多くなる。そのため、1 回の交叉での変化が大きく、形質遺伝がされにくくなり、適応度の改善が進まないため収束が早くなると考えられる。交叉率 A が小さい場合はその逆で、1 回の交叉での変化が小さいため形質が遺伝されやすく、かつ、少しずつ適応度の改善が進むので、収束は遅くなるが適応度の良い解が得られると考えられる。

以上述べたように、収束時間と最良解の適応度はトレードオフの関係にあり、これらの値は交叉率 A の値により左右される。従って、実用性の観点から最適な交叉率 A の値を決めることが今後必要である。

一方、交叉率 B に関してはほとんど違いが見られず、最良解の適応度、収束時間に与える影響は小さいと考えられる。

(2) 新規解の生成数と適応度、立案時間

図 6、図 7 より、交叉時に生成される新規の数が多いほど適応度の良い解が得られるが、立案時間は長くなることが示された。即ち、新規生成される解の数を変化させた場合、最良解の適応度と立案時間にはトレードオフの関係があることが分かった。従って、立案時間が長すぎず、ある程度適応度の良い解が得られるような、新規生成解の最適な数を求める必要がある。

今回の実験では、最大世代更新回数 (1,000 回) まで達せずに収束したものが 95.5% であり、本手法はほとんどの場合、1,000 回以内の世代更新でスケジュールの立案が行えることが分かった。図 7 より、新規生成される解の数が 10 個の場合の立案時間は“ $0.415 \times$ 状態更新回数”で近似できるので、本手法は、実際の規模に近い (患者: 50 名, スケジュール期間: 2 ヶ月) スケジュールを 7 分以内に立案できる。

7. まとめ

癌治療法の 1 つである粒子線治療における粒子線治療装置の運用スケジュールを、患者治療日の決定と各日の治療順の決定の 2 段階処理で立案し、そのうち前段の患者治療日の決定に共存型 GA の適用を提案した。

実験の結果、実際の規模の治療日スケジュールを 7 分以内に立案できることが示された。

しかし、各週毎に、その週で交叉を行うかどうかの判断に用いる交叉率 (交叉率 A) の値を変化させた場合、および、交叉時に生成される新規解の数を変化させた場合、立案時間と最良解の適応度トレードオフの関係にあり、交叉率 A の値または新規解の生成数によっては立案時間が 7 分以上になることも有り得る。

従って、今後は、立案時間が長すぎず、適応度の良い解が得られるような交叉率 A と新規解の生成数を求める必要があると考える。

また、今回の評価では、終了時刻の見積り方式の妥当性、最適解との比較、他手法との比較等については未評価であり、今後これらの評価を行う予定である。

参考文献

- [1] 青山 他, “粒子線治療装置スケジュールリングシステム—治療日スケジュール—”, 情報処理学会第 56 回全国大会予稿集, 4W-2 (1998).
- [2] 佐藤 他, “粒子線治療装置スケジュールリングシステム—システム概要—”, 情報処理学会第 56 回全国大会予稿集, 4W-1 (1998).
- [3] 浅見 他, “粒子線治療装置スケジュールリングシステム—治療順スケジュール—”, 情報処理学会第 56 回全国大会予稿集, 4W-3 (1998).
- [4] 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム 2, 産業図書 (1995).