

粒子線治療における6軸自動位置照合のコミッショニング

吉野慎一¹⁾²⁾ 多湖正夫³⁾ 奥山康男¹⁾ 吉川宏起¹⁾

1) 駒澤大学大学院 医療健康科学研究科 診療放射線学専攻

2) 神奈川県立がんセンター 放射線治療技術科

3) 帝京大学医学部附属溝口病院 放射線科

炭素線や陽子線などを用いて治療を行う粒子線治療は装置の小型化などから多くの施設で導入されつつあり、日本国内でも一部の悪性腫瘍において、2016年4月から診療報酬点数も算定できるようになった。粒子線治療はX線治療と比較して線量勾配が大きく、患者セットアップの精度が線量分布形状に大きく影響する。特に線量分布に影響するのが密度の高い骨組織である。そのため粒子線治療の位置照合は現在でも2方向のX線写真での骨照合が主流である。さらには粒子線治療においても自動位置照合が多くの施設で導入されてきている。本報告では実際の臨床条件に近く、骨情報が多く含まれる頭部及び骨盤ファントムを使用し、更に寝台移動を含めた粒子線治療専用装置の自動位置照合システムの評価を行った。

寝台の駆動について各並進軸0.2 mm、各回転軸0.1°以内の精度で動作することを確認済みである。自動位置照合用のDigitally Reconstructed Radiograph (DRR) 作成のために頭部ファントムと骨盤ファントムのCT撮影を行った。スライス厚は0.5 mm、1 mm、2 mm、5 mmの4種類と変化させ、Field Of View (FOV) は頭部ファントムで320 mm、骨盤ファントムで550 mmとし、このCTをもとに放射線治療計画を作成した。位置照合では手動照合結果を基準とし各スライス厚での照合結果として、3並進軸の合成ベクトル量Root Mean Square of Translation (RMS_{tr}) と3回転軸の合成ベクトル量Root Mean Square of Rotation (RMS_{ro}) を算出した。同時に照合時間も取得した。

FOVの小さな頭部ファントムにおける RMS_{tr} 及び RMS_{ro} はCTスライス厚0.5 mm、1 mm、2 mm、5 mmのとき0.04 - 0.26 mm、0.03 - 0.18°であった。FOVの大きな骨盤ファントムにおける RMS_{tr} 及び RMS_{ro} は0.16 - 0.84 mm、0.03 - 0.14°であった。自動位置照合時間は頭部ファントムでは6秒程度、骨盤ファントムで7秒程度となった。対して手動照合では60 - 180秒であった。これより自動位置照合システムでは臨床利用において高精度な照合が短時間で利用可能であることを確認できた。

1. 諸言

現在、炭素線や陽子線などを用いて治療を行う粒子線治療は装置の小型化などから多くの施設で導入されつつある。また日本国内でも一部の悪性腫瘍において、2016年4月から先進医療だけでなく診療報酬点数も算定できるようになった。これは粒子線治療施設数が増えてきたことだけでなく粒子線治療の有用性の証左である。

粒子線治療はその独特のブラッグピークを用いることにより、正常組織への線量を最少限にし、

腫瘍にのみ高線量を与えることができる^[1]。しかしながら粒子線治療はX線治療と比較して線量勾配が大きく、患者セットアップの精度が線量分布形状に大きく影響する。特に線量分布に影響するのが密度の高い骨組織である^[2]。そのためCone Beam CTなどによる位置照合が標準になりつつあるX線治療に対して、粒子線治療は現在でも2方向のX線写真での骨照合が主流である。さらには粒子線治療においても自動位置照合が多くの施設で導入されてきている^[3-5]。

当院で行なわれている X 線写真での骨照合も例外ではなく、正側 2 方向の X 線画像を用いて 3 並進軸と 3 回転軸の補正を行っている。しかしながら 2 枚の平面画像から 3 次的に 6 軸の補正を手動にて行うことは技術的にも高度であり、精度は術者の技量に大きく依存する。そこで利用されるのが 6 軸自動位置照合システムである。参照画像として 3D CT ボリュームデータより作成された Digitally Reconstructed Radiograph (以下、DRR) を用いており、正側 X 線画像がこれと一致するよう 6 軸補正を行う。

Sharma らはリニアック付属の位置照合システムを用いた 6 軸補正システムの精度や再現性を報告している¹⁶⁾。しかしながら補正に使用している画像として CT 画像解析用ファントムである Catphan phantom (ファントムラボラトリー社製) を用いていることから、骨情報がなく実際の臨床条件とは異なる可能性が示唆される。そこで本報告では実際の臨床条件により近く、骨情報が多く含まれる頭部及び骨盤ファントムを使用し、更に寝台移動を含めた粒子線治療専用装置の自動位置照合システムの評価を行った。

2. 方法

主な使用装置は粒子線治療システム(東芝社製)である。粒子線治療システムの主な構成は、加速器、室内管理システム、室内統合システム、位置決め関連システム、さらに治療室内においては寝台関係、In room CT (On rail CT)、治療 RIS、X 線撮影系など多岐にわたる。(Fig. 1)

この構成システムの一部である位置決め関連システムが自動位置照合を行う装置である。(Fig. 2)

2.1. 基本性能

事前準備として米国医学物理学会タスクグループ 142 レポートに基づく、位置照合システム自身の基本性能である表示スケール試験、空間分解能、コントラスト、画像均一性及びノイズに関

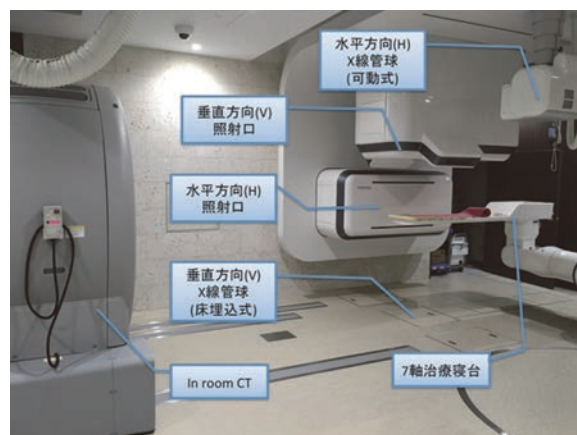


Fig.1 粒子線治療室内

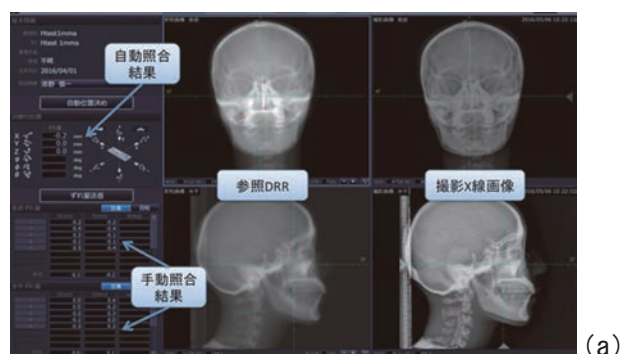


Fig.2 位置決め関連システム(a)とその周辺機器(b)

してはデータを取得済みである¹⁷⁾。また寝台の駆動について各並進軸 0.2 mm 各回転軸 0.1° 以内の精度で動作することを確認済みである。また画質関係においても位置照合を行うについて十分許容できるものと判断した。

位置照合に使用する X 線画像は Flat Panel Detector (キヤノンライフケアソリューションズ社製) (以下、FPD) より取得する。この FPD の基本性能は 17 inch、画素ピッチ 160 μm、画素数

2688×2188 pixel、有効エリア 43×35 cm、階調 12 bit である。FPD は照射口前面に配置されており、治療ビーム照射時は FPD は退避する仕様となっている。対する X 線管球（島津製作所製）は治療ビームと対向に設置されており、水平方向 X 線管球は高架式、垂直方向 X 線管球は床の埋め込み式になっている。（Fig. 3）

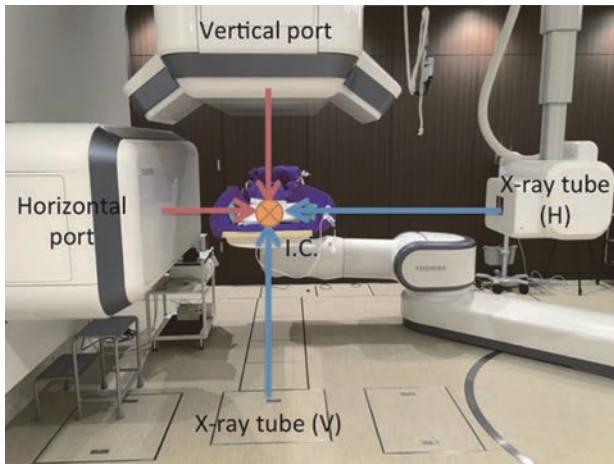


Fig.3 X線撮影システムの配置

2.2. CT撮影

自動位置照合を行う参照 DRR 作成のために CT 撮影を行った。使用した CT 装置は Aquilion LB（東芝メディカルシステムズ社製）で、頭部ファントム（京都科学社製）及び骨盤ファントム（ブレインラボ社製）を撮影した。頭部及び骨盤ファントムには撮影前に位置認識のための 1 mmφ 鉄球（ハイキューパーツ社製）を 5-7 箇所配置した。

撮影条件は 120 kV、200 mA、1s とし、DRR を作成した際に S/N が十分確保できるものとした。スライス厚は 0.5 mm、1 mm、2 mm、5 mm の 4 種類と変化させ、頭部ファントムの Field Of View（以下、FOV）は 320 mm、骨盤ファントムでは 550 mm とした。

2.3. 放射線治療計画作成

位置照合を行うために放射線治療計画を放射線治療計画装置 Monaco（エレクタ社製）にて作成した。各スライス厚でアイソセンタ位置に変化が

ないよう、CT の撮影中心をアイソセンタと設定した。

2.4. 自動位置照合

作成した放射線治療計画を治療 RIS である Mosaik（エレクタ社製）経由で位置決め関連システムに転送した。まず鉄球陰影を比較参照とした手動での位置照合を行い、その寝台位置を基準とした。その後各 CT スライス厚にて作成した DRR を用いて自動位置照合を行い、それぞれ寝台位置を取得し、鉄球を用いた手動位置照合の結果と比較した。並進及び回転の 6 軸については寝台に対して左右方向を X、頭尾方向を Y、背腹方向を Z、X 軸を中心に回転する pitch を ψ 、Y 軸を中心に回転する roll を ϕ 、Z 軸を中心に回転する rotation を θ と定義した（Fig. 4）。また比較には 3 並進軸の合成ベクトル量 Root Mean Square of Translation（以下、 RMS_{tr} ）と 3 回転軸の合成ベクトル量 Root Mean Square of Rotation（以下、 RMS_{ro} ）を残余誤差として算出した。なお、この実験では位置照合後に寝台を動作させているため、寝台の駆動精度を含む結果となっている。

$$RMS_{tr} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

$$RMS_{ro} = \sqrt{\Delta \psi^2 + \Delta \phi^2 + \Delta \theta^2}$$

また手動での照合時間及び自動位置照合の照合時間も同時に取得し、比較を行った。

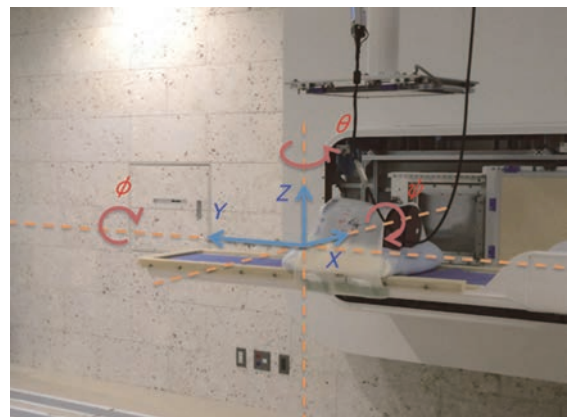


Fig.4 6軸の定義

3. 結果

鉄球を利用した手動位置照合結果を基準としたときのCTスライス厚の違いによる自動位置照合の結果を Fig. 5, 6 に示す。

頭部ファントムにおける RMS_{tr} はCTスライス厚 0.5 mm のとき 0.04 ± 0.14 mm、1 mm のとき 0.26 ± 0.14 mm、2 mm のとき 0.20 ± 0.13 mm、5 mm のとき 0.15 ± 0.11 mm であり、 RMS_{ro} は 0.5 mm のとき $0.04 \pm 0.05^\circ$ 、1 mm のとき $0.03 \pm 0.07^\circ$ 、2 mm のとき $0.08 \pm 0.04^\circ$ 、5 mm のとき $0.18 \pm 0.04^\circ$ であった。

骨盤ファントムにおける RMS_{tr} はCTスライス厚 0.5 mm のとき 0.16 ± 0.25 mm、1 mm のとき 0.45 ± 0.21 mm、2 mm のとき 0.45 ± 0.18 mm、5 mm のとき 0.84 ± 0.45 mm であり、 RMS_{ro} は 0.5 mm のとき $0.14 \pm 0.09^\circ$ 、1 mm のとき $0.03 \pm 0.07^\circ$ 、2 mm のとき $0.08 \pm 0.10^\circ$ 、5 mm のとき $0.04 \pm 0.11^\circ$ であった。

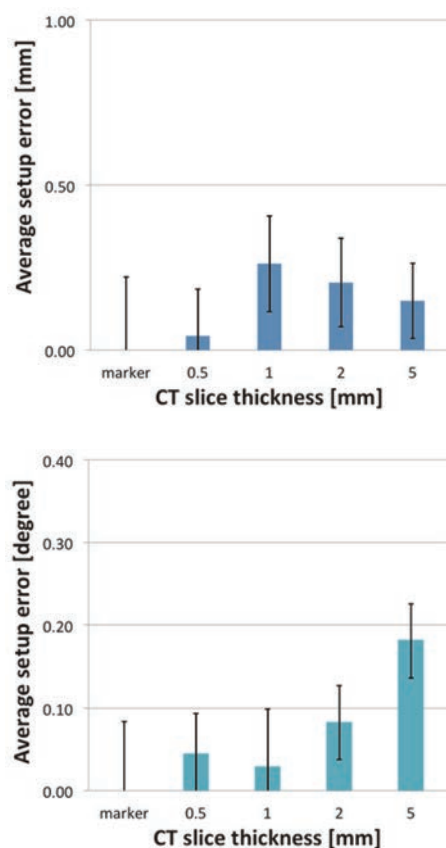


Fig.5 頭部ファントム自動位置照合における残余誤差
上：3 並進軸の合成ベクトル量 RMS_{tr} 、
下：3 回転軸の合成ベクトル量 RMS_{ro}

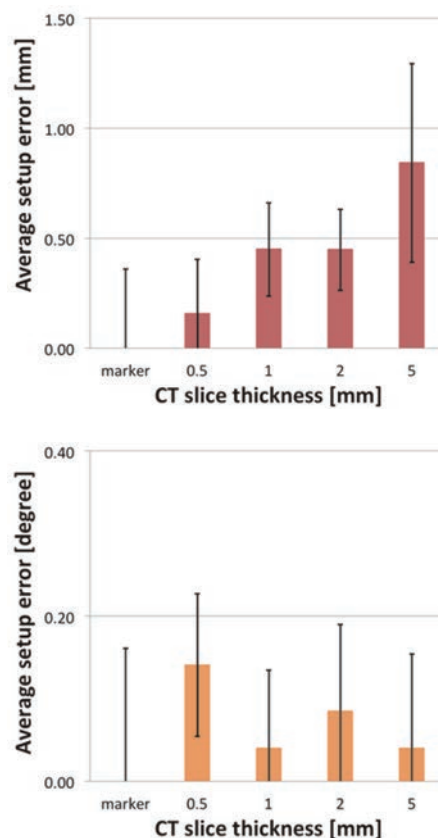


Fig.6 骨盤ファントム自動位置照合における残余誤差
上：3 並進軸の合成ベクトル量 RMS_{tr} 、
下：3 回転軸の合成ベクトル量 RMS_{ro}

照合時間を Table 1, 2 に示す。自動位置照合の照合時間は頭部ファントムでは 6 秒程度、骨盤ファントムで 7 秒程度となった。手動での照合時間は 60 - 180 秒と幅のある結果となった。これは術者の技量や画像解像度などに左右されるためと考えられた。

Table 1 頭部ファントムにおける照合時間

CT slice thickness [mm]	Auto registration time [s]	Manual registration time [s]
0.5	6.1	
1	5.9	60 - 180
2	5.9	
5	5.7	

Table 2 骨盤ファントムにおける照合時間

CT slice thickness [mm]	Auto registration time [s]	Manual registration time [s]
0.5	7.0	
1	6.8	60 - 180
2	6.5	
5	6.2	

4. 考察

今回の実験条件においてスライス厚と自動位置照合結果に相関は見られなかった。その理由として寝台の駆動精度が考えられる。今実験では寝台を駆動させて残余誤差を確認している。そのため寝台移動の精度である各並進軸 0.2 mm、各回転軸 0.1°、すなわち、最大で RMS_{tr} 0.35 mm、 RMS_{ro} 0.17° が残余誤差に含まれていることとなる。したがってこのばらつき以内であれば、自動位置照合の結果に差異はないと考えられる。

また頭部ファントムと比較して骨盤ファントムの残余誤差が大きい原因は CT 撮影時の FOV 設定にあると考えられる。頭部 CT のピクセルサイズが 0.63 mm であるのに対して、骨盤 CT のピクセルサイズが 1.07 mm であるために計算結果に影響を与えていると考えられる。

照合時間に関しては頭部、骨盤両者において手動位置照合と大きな差があった。手動位置照合は術者の技量や画像の見やすさである解像度などによる時間の増減はあるものの、自動位置照合を超えることはなかった。そのため治療時間の短縮という点においては自動位置照合が有利だと考えられる。

しかしながら問題も考えられる。自動位置照合後の画像の一致確認である。参照 DRR と撮影画像の一致の確認が必須事項であるが、参照 DRR の分解能が悪ければ一致確認の精度も悪くなる。

また自動位置照合が正常に動作しない場合も同様である。今回の実験では自動位置照合が正常に動作しなかった例は確認できなかったが、実際の治療において動作しなかった場合は手動位置照合が必要である。そこでも参照 DRR の分解能が手動位置照合の精度を左右する。以上のことを踏まえて手動位置照合にも一定の精度で対応出来るスライス厚での DRR 作成が要求される。

5. 結語

本研究において頭部ファントム及び骨盤ファン

トムでの寝台駆動精度を含めた自動位置照合の精度を確認した。CT 撮影時の FOV の小さい頭部ファントムでは CT スライス厚が 2 mm 以下、CT 撮影時の FOV の大きい骨盤ファントムでは CT スライス厚が 1 mm 以下であれば寝台の駆動精度である RMS_{tr} 0.35 mm、 RMS_{ro} 0.17° 以内であり、臨床利用において高精度な照合が可能であることを確認できた。

また照合時間も 6, 7 秒と小さく、手動での照合時間を大きく削減することができ、治療時間短縮の一助になる。

参考文献

- [1] Furukawa T et al. : Performance of the NIRS fast scanning system for heavy-ion radiotherapy; *Med. Phys.* 37, 11, pp5672-82 (2010)
- [2] Kanematsu N et al. : A CT calibration method based on the polybinary tissue model for radiotherapy treatment planning; *Phys. Med. Biol.* 48, 8, pp1053-64 (2003)
- [3] Mori S et al. : Patient handling system for carbon ion beam scanning therapy; *J. Appl Clin Med Phys*, 13, 6, pp226-40 (2012)
- [4] Mori S et al. : First clinical experience in carbon ion scanning beam therapy: retrospective analysis of patient positional accuracy; *J Radiat Res*, 53, 5, pp760-68 (2012)
- [5] Fattori G et al. : Image guided particle therapy in CNAO room 2: Implementation and clinical validation; *Phys. Med.* 31, 1, pp9-15 (2015)
- [6] Sharma SD et al. : Evaluation of automated image registration algorithm for image-guided radiotherapy (IGRT); *Australas Phys. Eng. Sci. Med.*, 35, 3, pp311-09, (2012)
- [7] Klein EE et al. : Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators; *Med. Phys.* 36, 9, pp4197-212 (2009)
- [8] 工藤 剛吏、他：頭部および骨盤部画像誘導放

射線治療における ExacTrac X-ray 6D と Cone-beam CT によるセットアップ精度の比較; 日放線技会, 68, 12, pp1644-51, (2012).

- [9] Wu J et al. : Evaluation of similarity measures for use in the intensity-based rigid 2D-3D registration for patient positioning in radiotherapy ; Med. Phys. 36, 12, pp5391-403 (2009)
- [10] Lehmann J et al. : Commissioning experience with cone-beam computed tomography for image-guided radiation therapy; J. Appl Clin Med Phys, 8, 3, pp21-36 (2007)
- [11] Ma J et al. : ExacTrac X-ray 6 degree-of-freedom image-guidance for intracranial non-invasive stereotactic radiotherapy: Comparison with kilo-voltage cone-beam CT; Radiother. Oncol. 93, 3, pp602-8 (2009)

論文執筆 : 吉野 慎一

執筆責任者 : 吉川 宏起

研究指導 : 多湖 正夫、奥山 康男

Commissioning of 6 axes automated image registration for particle therapy

Shinichi Yoshino¹⁾²⁾, Masao Tago³⁾, Yasuo Okuyama¹⁾, Kohki Yoshikawa¹⁾

1) Graduate Division of Health Sciences, Komazawa University

2) Division of Radiation Technology, Kanagawa Cancer Center

3) Department of Radiology, Teikyo University Mizonokuchi Hospital

Abstract

Many facilities are introducing particle therapy systems. In Japan, some of cancers have been treated by particle therapy using national health insurance since April 2016. Particle dose gradient is larger than that of photon, and positional accuracy in patient setup and high density materials such as bone affect dose distributions. So most particle therapy systems now use two orthogonal X-ray images for setup verification, and automated image registration system has been introduced in some facilities in recent years. The aim of this study is the evaluation of the automated image registration system of our particle therapy system using the head and pelvis phantoms.

It had been confirmed that translation and rotation accuracies of the treatment couch were within 0.2 mm and 0.1 degree respectively. We took the CT images of head and pelvis phantoms for the reference digitally reconstructed radiographs and the treatment planning. The CT slice thicknesses were 0.5, 1, 2, and 5 mm, and fields of view were 320 mm for the head, and 550 mm for the pelvis. In the registration, we calculated Root Mean Square of Translation (RMS_{tr}) and Root Mean Square of Rotation (RMS_{ro}) in each CT slice thickness that were defined as the residual errors of translation and rotation after manual registration.

The RMS_{tr} and RMS_{ro} of head phantom were 0.04 – 0.26 mm and 0.03 – 0.18 ° respectively. The RMS_{tr} and RMS_{ro} of pelvis phantom were 0.16 -0.84 mm and 0.03 -0.14 ° respectively. The times for registration were 6 - 7 seconds and 60 - 180 seconds for automated and manual registration respectively. We suggest that our automated image registration system is available for clinical use with high positional accuracy and short registration time.

(date received)