ノート

Image Guided Radiation Therapy における
6 軸位置補正法の検討中口裕二^{1,2} 荒木不次男³ 河野友宏² 丸山雅人¹

論文受付
2012 年 6 月 15 日

論文受理
2012 年 8 月 29 日

Code Nos. 400
430

¹ 熊本大学医学部附属病院医療技術部² 熊本大学大学院保健学教育部³ 熊本大学大学院生命科学研究部

緒言

定位放射線治療(stereotactic radiation therapy: SRT)や定位放射線手術(stereotactic radiation surgery: SRS)などの高精度放射線治療では、通常の放射線治療に比べ gross tumor volume(GTV)に対する margin が少なく、より正確なセットアップが不可欠である^{1,2)}。正確なセットアップのため治療直前に位置確認画像を取得し、基準画像との照合によって、位置変位量を算出・補正する画像誘導放射線治療(image guided radiation therapy: IGRT)が用いられ、多くの施設で実施可能となっている。さらに、頭尾、腹背、左右の3軸にそれぞれの回転を加えた6軸カウチが開発され、6軸方向の正確な位置補正が実現されている³⁾。今後、高精度放射

線治療の普及とともに6軸補正の使用頻度がさらに拡大すると考えられる。

現在、6軸補正が可能な IGRT システムには、医療用直線加速器(リニアック)に装備された kV-X-ray Volume Imaging(kV-XVI: Elekta 社製)や kV-On-Board Imager(kV-OBi: Varian 社製)を用いたシステムなどがある。また、リニアックと独立して装備された ExacTrac X-ray システム(BrainLAB 社製)があり、各リニアック装置と組み合わせて使用されている。各 IGRT システムの有用性と精度はいくつか報告されている^{4,5)}。

6軸における物体の移動では、6軸の座標変数による座標変換が用いられている。回転がない場合は、任意の順番で座標変換することによって、移動が可能であ

A Practical Method for Six-dimensional Online Correction System with Image Guided Radiation Therapy

Yuji Nakaguchi,^{1,2*} Fujio Araki,³ Tomohiro Kouno,² and Masato Maruyama¹¹Department of Radiological Technology, Kumamoto University Hospital²Graduate School of Health Sciences, Kumamoto University³Faculty of Life Sciences, Kumamoto University

Received June 15, 2012; Revision accepted August 29, 2012

Code Nos. 400, 430

Summary

In this study, we developed a correction method for coordinate transformation errors that are produced in combination with the ExacTrac X-ray system (BrainLAB) and HexaPOD (Elekta) in image guided radiation therapy (IGRT). The positional accuracy of the correction method was compared between the ExacTrac Robotics (BrainLAB) and no correction. We tried to correct iBeam evo couch top (Elekta) by operating two steps drive like ExacTrac Robotics. No correction for HexaPOD showed a maximal error of 4.52 mm, and the couch did not move to the correct position. However, our correction method for HexaPOD showed the positional accuracy within 1 mm. Our method has no significant difference with ExacTrac Robotics (paired t-test, $P>0.1$). But, when the correction values for the rotatory directions were large, the positional accuracy tended to be poor. The smallest setup errors for the rotatory directions are important for IGRT.

Key words: accuracy, six degrees, 6D couch, image guide radiotherapy, couch drive

*Proceeding author

る。しかし、回転が含まれる場合では、移動する順番が重要で、順番次第では異なる位置に移動する。IGRTシステムの6軸カウチの移動に関しても同様に、行列による座標変換が用いられ⁶⁾、座標の移動順番によって移動座標が変化する可能性がある。BrainLAB社製6軸カウチでは、最初に回転方向の座標移動が行われ、次に3軸(x, y, z)の平行移動が行われる、2段階移動方式である。これに対して、Elekta社製6軸カウチは、6軸が同時に移動して座標の位置移動が行われる。ExacTrac X-rayシステムとElekta社製6軸カウチを組み合わせる場合は、Elekta社製6軸カウチとBrainLAB社製6軸カウチの移動方式が異なるために、ExacTrac X-rayシステムで計算する6軸の移動座標に補正が必要となる。したがって、Elekta社製6軸カウチにExacTrac X-rayシステムの6軸の移動座標を補正なしで用いると、カウチが正しい位置に移動せず、誤った位置で治療を行い、医療事故に繋がる可能性がある。これまで、ExacTrac X-rayシステムとElekta社製6軸カウチ、および、その制御システムであるHexaPODとの組み合わせで使用する際の位置座標の補正に関する報告はなく、また、これらのシステムを組み合わせた位置補正精度に関する報告もない。臨床使用においては、位置精度の検証を行う必要がある。

本研究では、ExacTrac X-rayシステムとElekta社製6軸カウチを組み合わせたIGRTの位置補正法を考案し、その位置精度の改善について位置補正を行わない場合と、さらにBrainLAB社製6軸カウチによる位置精度とを比較・検討した。

1. 使用機器

6軸カウチは、ExacTrac Robotics(BrainLAB社製)とiBeam evo couch top(Elekta社製)を用い、両6軸カウチの補正座標の計算にExacTrac X-rayシステム version 5.5.2を用いた。iBeam evo couch topの制御システムはHexaPOD version 1.1(Elekta社製)である。位置精度検証ファントムは、腰部ファントム PUB-3(京都科学社製)を使用した。治療計画装置は、Pinnacle version 9.0(Philips社製)で、computed tomographyはLight Speed RT(GE社製)を使用し、スライス厚は2.5 mmで撮影した。

2. 方法

最初に、ExacTrac X-rayシステムとiBeam evo couch topを組み合わせ、HexaPODの座標計算に2-1の項の位置補正を行わない場合[HexaPOD(補正なし)]と、位置補正を行う場合[HexaPOD(補正あり)]で位置精度を比較した。次に、HexaPOD(補正あり)とExacTrac

X-rayシステムとExacTrac Roboticsの組み合わせ(ExacTrac Robotics)との位置精度を比較した。

2-1 HexaPOD用の位置補正法の考案

本研究では、ExacTrac X-rayシステムとHexaPODを組み合わせたIGRTにおける位置座標の補正法として、最初に回転方向を補正し、次に3軸の水平移動を行い、iBeam evo couch topをExacTrac Roboticsと同様の2段階で操作することによって補正を行った。また、単位がmmとcmで異なり、さらに角度表記も異なるため、単位を表計算ソフトExcel(マイクロソフト社製)のマクロ機能を使用して計算した。ExacTrac X-rayシステムでは、小数点以下第二位まで補正可能であるが、HexaPODでは小数点以下第一位までしか入力できない箇所があるため、必要に応じて、ExacTrac X-rayシステムの最小桁は四捨五入を行った。実際には、ExacTrac X-rayシステムから与えられる回転方向の値のみを使用し、Excelを用いて単位を変換し、最初に回転方向のみの補正を行った。次に、ExacTrac X-rayシステムの赤外線カメラによる計測から得られる3軸平行移動の座標をExcelに入力し、単位変換後、3軸の平行移動を行った。位置座標補正のワークフローと座標系をそれぞれFig. 1とFig. 2に示す。

2-2 セットアップ

ExacTrac X-rayシステムは赤外線マーカによるセットアップが可能であるが、当院では他のIGRTシステムでも治療を行うため、皮膚マーカによるセットアップを行っている。皮膚マーカによるセットアップを行ったとしても、カウチの移動には赤外線マーカが必要である。したがって、カウチ移動のための赤外線マーカにはリファレンススター(BrainLAB社製)を用いた。一方、HexaPODではExacTrac X-rayシステムとHexaPOD用の赤外線マーカ、リファレンススターのほかに、リファレンスフレーム(Elekta社製)を用いた。これは、ExacTrac X-rayシステムはリファレンススターのみで位置検出から補正まで可能であるが、HexaPODではリファレンススターで位置検出を行い、リファレンスフレームでカウチの移動・補正を行うためである。Fig. 3に両システムのファントムのセットアップを示す。

2-3 位置補正精度の比較

腰部ファントム PUB-3を使用し、両システムにおいて、6軸の位置をアイソセンタから毎回任意にずらした後にIGRTを行った。IGRT後のアイソセンタからの位置誤差を計測した。誤差の計測には、再度IGRTを行

Fig. 1 Workflow for the six-dimensional (6-D) correction using the HexaPOD. The 6D correction was performed with two steps (rotation correction and translation correction).

Fig. 2 The coordinate system. Long: cranio-caudal direction. Lat: right-left direction, Vert: anterior-posterior direction, Roll: right roll-left roll direction, Pitch: head up-head down direction, Yaw: counterclockwise-clockwise direction.

Fig. 3 Positioning of phantom using (a) ExacTrac X-ray system and Reference Star frame for Clinac iX, and (b) ExacTrac X-ray system, HexaPOD, and Reference Star frame for Synergy.

a	c
b	d

Fig. 4 The accuracy of the 6D correction for the HexaPOD.

- (a) Correction (-); long, vertical and lateral translation.
 (b) Correction (-); roll, pitch, and yaw rotations.
 (c) Correction (+); long, vertical and lateral translation.
 (d) Correction (+); roll, pitch, and yaw rotations.

Table 1 The accuracy of the 6D correction for HexaPOD

(a) correction (-)

	Translation (mm)				Rotation (degree)		
	Ave	SD	Max		Ave	SD	Max
Vert	1.11	1.79	3.55	Yaw	0.88	1.11	1.35
Long	0.43	0.78	2.50	Pitch	0.79	0.98	1.30
Lat	1.01	1.94	4.50	Roll	0.60	0.93	0.56
3D	2.18	1.62	4.52				

(b) correction (+)

	Translation (mm)				Rotation (degree)		
	Ave	SD	Max		Ave	SD	Max
Vert	0.11	0.11	0.15	Yaw	0.18	0.18	0.38
Long	0.09	0.09	0.13	Pitch	0.12	0.17	0.45
Lat	0.10	0.11	0.15	Roll	0.13	0.24	0.35
3D	0.18	0.03	0.22				

Ave: average absolute error; SD: standard deviation; Max: maximum absolute error

い, ExacTrac X-ray システムの赤外線カメラから得られる値を用いた。赤外線カメラは、アイソセンタに対し ± 0.05 mm 以内の精度で校正されている。ファントムをずらす位置は、当院における皮膚マーカでのセットアップの精度を考慮して 5 mm とした。3 軸方向にそれぞれ 5 mm ずらし、回転はそれぞれの回転軸に沿って 0.5, 1.0, 3.0 度をずらした。3 軸の平行移動方向と回転方向は任意の組み合わせで行った。それぞれの測定は 10 回行った。

3. 結果

HexaPOD の位置補正精度の結果を Fig. 4 と Table 1 に示す。補正なしでは、三次元での最大位置誤差 4.52 mm、平均で 2.18 ± 1.62 mm (1 standard deviation: SD) であり、回転方向で 1.35 度の最大誤差となった。補正ありでは三次元での最大位置誤差は 0.22 mm、平均で 0.18 ± 0.03 mm (1 SD) であり、回転方向に関しては、最大位置誤差 0.45 度であった。一方、ExacTrac

Fig. 5 The accuracy of the 6D correction for the ExacTrac Robotics.

(a) Long, vertical and lateral translation.
(b) Roll, pitch, and yaw rotations.

Table 2 The accuracy of the 6D correction for the ExacTrac Robotics

	Translation (mm)				Rotation (degree)		
	Ave	SD	Max		Ave	SD	Max
Vert	0.13	0.19	0.32	Yaw	0.21	0.30	0.34
Long	0.12	0.16	0.33	Pitch	0.09	0.08	0.14
Lat	0.16	0.24	0.40	Roll	0.14	0.23	0.15
3D	0.27	0.20	0.56				

Ave: average absolute error; SD: standard deviation; Max: maximum absolute error

Roboticsでの位置補正精度の結果を Fig. 5 と Table 2 に示す. 三次元での最大位置誤差は 0.56 mm, 平均で 0.27 ± 0.20 mm (1 SD) であり, 回転方向に関しては, 最大位置誤差 0.34 度であった. ExacTrac Robotics と HexaPOD (補正あり) の位置精度の paired t-test による有意差検定では, 3 軸各方向, 三次元距離, 回転方向のいずれも有意差はなかった ($P > 0.1$). ただし, HexaPOD (補正あり) は, 回転方向においては ExacTrac Robotics と同程度であったが, 三次元での位置誤差の標準偏差が 0.03 mm で ExacTrac Robotics の 0.20 mm に比べ小さかった.

4. 考 察

本研究では, ExacTrac X-ray システムを HexaPOD と組み合わせて使用する場合の位置補正法の考案と, その位置補正精度を検証した. 補正なしでは, 三次元での最大位置誤差が 4.52 mm, 回転方向では 1.35 度の臨床問題となる移動座標の誤差を生じた. しかし, 補正することによって 1 mm 以内の位置精度に改善された.

HexaPOD の位置補正精度について, 武村⁶⁾は 3 軸方向で 0.1 mm と高い精度を報告している. ただし, この報告では回転軸方向で評価されていない. 本研究では, HexaPOD (補正あり) の 3 軸方向の位置精度は平均で 0.10 mm, 回転軸方向では 0.14 度程度で, これまで

の報告⁶⁾と同様な精度であった. 一方, 補正なしでは 3 軸方向で最大 4.50 mm の誤差が生じ, 正しい位置にカウチが移動していないため, ExacTrac X-ray システムと HexaPOD の組み合わせで使用できない. しかし, 補正を行うことによって ExacTrac Robotics と同程度の精度で使用可能である.

ExacTrac Robotics の位置補正精度に関しては, 3 軸方向は 0.3 mm, 回転角度では 0.2~0.3 度以内で補正可能と報告されている^{7,8)}. 本研究における検証では, 3 軸方向は平均で約 0.14 mm, 回転角度は 0.15 度程度でほぼ同じもしくは, 若干よい精度となった.

両カウチとも, 回転軸方向に故意に大きな誤差 (3 度程度) を発生させたとき, HexaPOD (補正あり) で 0.45 度, ExacTrac Robotics で 0.57 度の位置誤差が生じた. Webster ら⁹⁾の報告では回転に関する記載はないが, 3 軸の位置補正距離が大きい程, 位置の補正精度が低下することが報告されており, 可能な限り位置の移動補正を小さくするセットアップが必要である.

Fig. 4 と Fig. 5 に示す HexaPOD (補正あり) と ExacTrac Robotics の位置補正精度の相違による線量分布への影響は, これまでの報告¹⁾から臨床問題にならない誤差と考えられる. HexaPOD (補正あり) は, ExacTrac Robotics と比較してよりバラツキの少ない結果となった. これは, HexaPOD の位置の移動精度が高いことを

示している。ExacTrac Robotics は roll と pitch のみが ExacTrac X-ray システムで制御され、残りの 3 軸と yaw はリニアック装置のカウチで制御されるため、その幾何学的位置精度に依存する。一方、HexaPOD では、複数の関節をもつパラレル構造¹⁰⁾を有し、HexaPOD 本体が 6 軸同時移動を行うことで、高精度な位置移動を可能にしている。

本研究では、ExacTrac X-ray システムと HexaPOD を組み合わせた使用を可能にするため、簡易的な補正法を考案した。しかし、HexaPOD は運動を逆次的に求める逆運動学¹⁰⁾で制御されているため、ExacTrac X-ray システムと組み合わせた場合に正確な位置座標の補正計算を行うことは不可能である。ExacTrac X-ray システムから HexaPOD 用の補正座標が直接的に計算可能であれば、HexaPOD のパラレル構造の利点を生かした、さらに精度の高い位置補正が可能であると考えられる。

5. 結 論

本研究では、ExacTrac X-ray システムと HexaPOD システムを組み合わせる使用する場合の補正法の考案とその精度を検証した。移動方式が異なる 6 軸カウチを使用する場合は、位置座標の補正が必要となる。本研究では、iBeam evo couch top を ExacTrac Robotics と同様の 2 段階移動の操作を行うことによって、1 mm 以内の位置精度で補正可能となった。有意差検定でも BrainLAB 社製カウチを用いた場合と有意差はなかった (paired t-test, $P>0.1$)。しかし、回転軸方向の補正が大きくなると誤差が大きくなる傾向にあった。正確な IGRT のためには、回転軸方向の誤差が最小となるようなセットアップが推奨される。

本研究を進めるにあたり、貴重な情報を提供いただいた、エレクトラ株式会社メディカルフィジックス部、依田 潔氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) Hong TS, Tomé WA, Chappell RJ, et al. The impact of daily setup variations on head-and-neck intensity-modulated radiation therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2005; 61(3): 779-788.
- 2) Li XA, Qi XS, Pitterle M, et al. Interfractional variations in patient setup and anatomic change assessed by daily computed tomography. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2007; 68(2): 581-591.
- 3) Takakura T, Mizowaki T, Nakata M, et al. The geometric accuracy of frameless stereotactic radiosurgery using a 6D robotic couch system. *Phys Med Biol* 2010; 55(1): 1-10.
- 4) Hawkins MA, Aitken A, Hansen VN, et al. Set-up errors in radiotherapy for oesophageal cancers--is electronic portal imaging or conebeam more accurate? *Radiother Oncol* 2011; 98(2): 249-254.
- 5) Lamba M, Breneman JC, Warnick RE. Evaluation of image-guided positioning for frameless intracranial radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2009; 74(3): 913-919.
- 6) 武村哲浩, 上田伸一, 能登公也, 他. 高解像度デジタルカメラを用いた高精度放射線治療用 6 軸寝台の位置精度測定法の検討. *日放技学誌* 2011; 67(9): 1174-1182.
- 7) Verbakel WF, Lagerwaard FJ, Verduin AJ, et al. The accuracy of frameless stereotactic intracranial radiosurgery. *Radiother Oncol* 2010; 97(3): 390-394.
- 8) Jin JY, Ryu S, Faber K, et al. 2D/3D image fusion for accurate target localization and evaluation of a mask based stereotactic system in fractionated stereotactic radiotherapy of cranial lesions. *Med Phys* 2006; 33(12): 4557-4566.
- 9) Webster GJ, Rowbottom CG, Mackay RI. Accuracy and precision of an IGRT solution. *Med Dosim* 2009; 34(2): 99-106.
- 10) 内山 勝. パラレルマニピュレータの機構と特性. *日本ロボット学会誌* 1992; 10(6): 715-720.

図表の説明

Fig. 1 HexaPOD での 6 軸補正の運用図

Fig. 2 使用した座標系

Fig. 3 ファントムのセットアップ

(a) ExacTrac X-ray システム用のリファレンススターと Clinac iX

(b) ExacTrac X-ray システム用のリファレンススターと HexaPOD 用のリファレンスフレームを装備した Synergy

Fig. 4 HexaPOD の補正精度

(a) 補正なし, 3 軸平行移動方向

(b) 補正なし, 3 軸回転方向

(c) 補正あり, 3 軸平行移動方向

(d) 補正あり, 3 軸回転方向

Fig. 5 ExacTrac Robotics の補正精度

(a) 3 軸平行移動方向

(b) 3 軸回転方向

Table 1 HexaPOD の補正精度(平均, 標準偏差)

(a) 補正なし

(b) 補正あり

Ave: 絶対値の平均値, SD: 標準偏差, Max: 絶対値の最大誤差

Table 2 ExacTrac Robotics の補正精度(平均, 標準偏差)

Ave: 絶対値の平均値, SD: 標準偏差, Max: 絶対値の最大誤差

問合せ先

〒 860-8556 熊本市中央区本荘 1-1-1

熊本大学医学部附属病院医療技術部 中口裕二