

放射線治療装置の回転座標系誤差が軸外 target の照射精度に及ぼす影響と TG142 のトレランスの評価

中山貴裕^{1*} 田辺悦章²  藤井康志¹

抄 録

【目的】放射線治療装置の回転座標系の誤差が軸外 target の照射精度に及ぼす影響を定量的に評価し、TG142 における回転座標系誤差 ($\pm 1.0^\circ$) のトレランスの妥当性を検討する。【方法】Elekta 社製放射線治療装置 (Elekta, Stockholm, Sweden) と MultiMet-WL QA ファントム (Sun Nuclear, Melbourne, FL, USA) を用いて、6 個の target に対して off isocenter の Winston-Lutz test (WL test) を実施した。Baseline の測定に加え、意図的に collimator, gantry, couch に $+0.5^\circ$, $+1.0^\circ$ 回転誤差を加えた 6 条件で測定を行い、照射野中心と target 中心のベクトル距離 (S 値) および各方向 (gantry-target: GT, left-right: LR, anterior-posterior: AP) の位置ずれを解析した。【結果】Isocenter からの距離が大きい target ほど位置ずれが顕著であった。特に collimator 回転誤差の影響が最も大きく、isocenter から 7 cm 離れた target では 0.5° の回転誤差でも S 値が最大 1.24 mm に達した。次に影響が大きかったのは couch 回転であり、gantry 回転は target の配置が回転軸に近いものが多く相対的に影響が少なかった。回転座標系の誤差は幾何学的誤差の影響が強く、位置ずれに方向依存性があった。【結語】Collimator や couch の影響が大きく、 0.5° の誤差でも 1 mm 以上の位置ずれが生じることがあった。Gantry の影響は target の配置依存があり、相対的に小さかった。軸外 target の照射において、TG142 の $\pm 1.0^\circ$ のトレランスは放射線治療装置の種類にかかわらず最低限遵守すべき基準であり、target の配置次第では臨床的に十分なマージンを保証できない可能性が示された。Target 配置に応じたより厳格な基準と定期的 quality assurance (QA) の重要性が示唆された。

Key words: off-isocenter Winston-Lutz test, rotation error, off-axis targets, Elekta, TG142

緒 言

近年、放射線治療技術の向上により、一つの isocenter で複数の target の治療を volumetric modulated arc therapy (VMAT) で行うことが可能となった。この手法は、従来の複数の isocenter による治療法と比べてより短時間で治療が可能である¹⁻⁶⁾。

体幹部と比較して、頭部の照射ではねじれやゆがみなどのずれが生じにくいためにセットアップエラーが少ない。脳幹や下垂体、視神経などのリスク臓器と隣接していることや脳壊死のリスク⁷⁾を低下させるため、単発の脳定位照射ではマージン設定は 1 mm が一般的である⁸⁾。同様に、多発脳転移の治療でも target と

isocenter の距離によらずマージン設定は 1 mm とされることが多い^{1,2,9)}。

先行研究において、isocenter から target が離れるにつれて、回転誤差に強く影響を受け、位置ずれが発生してしまうことが示唆されており^{3,10-15)}、gantry などの回転座標系の精度の低下によって、設定されたマージンを超える危険性がある。AAPM Task Group 142 report (TG142) や AAPM Task Group 198 report (TG198) などでは quality assurance (QA) の多くが isocenter で実施、確認されるものであり、定位放射線治療は回転座標系の精度のトレランスが設定されているが^{16,17)}、軸外の target における回転座標系の精度については言及されていない。なお、TG142 における回転座標系に対する $\pm 1.0^\circ$ のトレランスは、AAPM Task Group 40 report (TG40)¹⁸⁾ や AAPM report No. 13¹⁹⁾ に基づき、線量誤差を $\pm 5\%$ 、空間的不確かさを ± 5 mm に収めることが可能なよう、当時の放射線治療装置や治療方法を加味し設定されている。また、これらの数値は規制値ではなく推奨値であり、各施設の状況に応じて最適化すべきであるとされている。

いくつかの調査や研究では、治療計画装置のシミュレーションや商用ファントムを用いて、回転座標系の

論文受付：2025 年 1 月 28 日

論文受理：2025 年 9 月 29 日

¹ 公立学校共済組合中国中央病院放射線科

² 岡山大学学術研究院保健学域放射線技術科学専攻

* 連絡先著者：〒720-0001 広島県福山市御幸町大字上岩成字正戸 148 番地 13

公立学校共済組合中国中央病院放射線科 中山貴裕

E-mail: nakayama-takahiro@kouritu-cch.jp

doi: 10.6009/jjrt.26-1566



本論文は、クリエイティブ・コモンズ CC-BY-NC-SA (表示-非営利-継承) 4.0 国際の下で利用できる。
© 2025 日本放射線技術学会

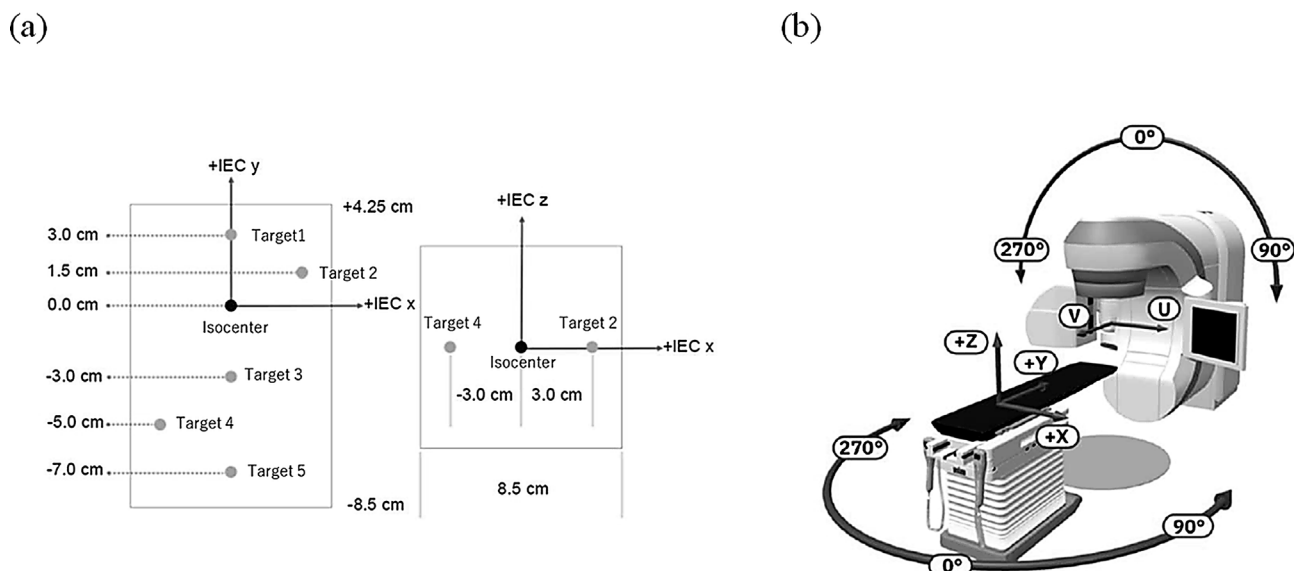


Fig. 1 MultiMet-WL QA phantom internal structure and analysis result geometry display
(a) AP direction and transverse image of MultiMet-WL QA phantom. (b) Geometry display of analysis results: The results are displayed in UV coordinates for each irradiation angle.

誤差が与える影響について報告されている^{3, 10-15, 20}。しかし、放射線治療装置に関する報告の多くは Varian Medical Systems (Palo Alto, CA, USA) 社製の放射線治療装置である^{11, 14, 15}。Elekta (Stockholm, Sweden) 社製の放射線治療装置は Varian Medical Systems 社製と比較して、加速管が長いことやガントリの機構が異なること、また couch の回転機構も異なることから、回転座標系の誤差が軸外 target の照射精度に与える影響が Varian Medical Systems 社製と異なる可能性がある。

そこで、本研究では Elekta 社製の放射線治療装置を用いて、一つの isocenter で複数の target を治療する際に回転座標系の誤差が軸外 target の照射位置精度に与える影響を定量的に評価し、TG142 における回転誤差 ($\pm 1.0^\circ$) のトレランスの妥当性を検討する。本研究は、軸外 target に合わせたマージン設定による放射線治療装置の品質管理を反映した最適な治療法の検討や、複数 isocenter への変更などリスクを減らす治療法への一助となると考える。

1. 方法

1-1 対象および使用機器

放射線治療装置は Infinity (Elekta)，電子的放射線治療照合装置 (electronic portal imaging device: EPID) は iViewGT (version 3.4.1)，Winston-Lutz test (WL test) 用ファントムは MultiMet-WL QA ファントム (Sun Nuclear, Melbourne, FL, USA)，解析ソフトは MultiMet-WL QA Software (version 2.1.0; Sun Nuclear) を使用した。なお、

定期 QA にて multileaf collimator (MLC)，jaw の位置精度などは保証済みである。MultiMet-WL QA ファントムは $8.5 \times 8.5 \times 12.75 \text{ cm}^3$ の直方体で直径 $5.0 \pm 0.025 \text{ mm}$ の 6 個のタングステンカーバイト球が配置されている (Fig. 1a)。Isocenter に一つ挿入されており，target 1 は Y 軸方向に +3.0 cm，target 2 は X 軸方向に +3.0 cm，Y 軸方向に +1.5 cm (isocenter から 3.4 cm の距離)，target 3 は Y 軸方向に -3.0 cm，target 4 は X 軸方向に -3.0 cm，Y 軸方向に -5.0 cm (isocenter から 5.8 cm の距離)，target 5 は Y 軸方向に -7.0 cm，それぞれ $\pm 0.05 \text{ mm}$ の精度でオフセットされている。

MultiMet-WL QA Software では、放射線治療装置や MLC の種類に応じて Software 内にある Sun Nuclear 社から提供されるプランをダウンロードする。本研究では、放射線治療装置は Elekta 社、MLC は agility、また couch 45° を含む 19 本の固定ビーム (field number 1~field number 19) を照射するプランを選択した。このプランでは各 target に対して $2 \times 2 \text{ cm}^2$ の照射野を作成し、照射野中心と target 中心のベクトル距離 (S 値) および照射野中心に対する target の位置がプロットされた 2 次元座標系を出力する。通常 1 ビームで 6 個の target すべてに対して照射野を形成できるが、gantry 角度が 90° および 270° では、近接する target の照射野が重なり、正確に照射野中心を検出することができない。そのため、解析する target を分割した照射野を作成し、解析結果を合算した。例えば、field 10 と field 11，field 12 と field 13 などとは同一の照射方向で target を 4 個と 2 個

Table 1 Irradiated plan information and 2D coordinate display

Field	Beam number	Treatment delivery angle			Target	Two-dimensional coordinate	
		Gantry	Couch	Collimator		U	V
1	1	0	0	0	Isocenter, Targets 1–5	LR	GT
2	2	0	0	90		LR	GT
3	3	0	0	270		LR	GT
4	4	0	45	45		LR	GT
5	5	0	45	225		LR	GT
6	6	0	90	0		LR	GT
7	7	0	270	0		LR	GT
8	8	0	315	135		LR	GT
9	9	0	315	315		LR	GT
10	10	90	0	90	Isocenter, Targets 1, 3, 5	AP	GT
11		90	0	90	Targets 2, 4	AP	GT
12	11	90	0	270	Isocenter, Targets 1, 3, 5	AP	GT
13		90	0	270	Targets 2, 4	AP	GT
14	12	180	0	0	Isocenter, Target 1–5	LR	GT
15	13	180	0	90		LR	GT
16	14	270	0	90	Isocenter, Targets 1, 3, 5	AP	GT
17		270	0	90	Targets 2, 4	AP	GT
18	15	270	0	270	Isocenter, Targets 1, 3, 5	AP	GT
19		270	0	270	Targets 2, 4	AP	GT

“Targets” indicates the number of targets being irradiated. For irradiation directions with gantry angles of 90° and 270°, adjacent target fields overlapped and were therefore divided into separate fields (fields 1–19). For analysis, the results of these fields were summed and treated as a single beam (beams 1–15).

に分けて照射し、解析時にはそれらの結果を合算して一つの beam (beam 10, 11) として扱った (Table 1). 評価対象としての解析単位は全 15 ビームであった. 2次元座標系は照射野ごとに異なり、gantry 角度が 0°と 180°では left-right (LR) 方向と gantry-target (GT) 方向、gantry 角度が 90°と 270°では anterior-posterior (AP) 方向と GT 方向である (Fig. 1b).

1-2 照合装置を用いた MultiMet-WL QA ファントムのセットアップ

MultiMet-WL QA ファントムを linac 室のルームレーザを用いてアライメント調整したのち、Elekta 社の X-ray Volume Imaging (XVI) を用いて、cone beam CT (CBCT) を撮影した. ファントム設置の傾きを検証するため、解析ソフトからダウンロードした照合専用の“CBCT”データを XVI に送信し、撮影画像との位置照合を行った. その結果、pitch, roll, yaw 方向の位置ずれはいずれも 0.1°以内であった. 次に、0.05 mm 程度でのファントムセットアップ再現性の担保とサギン

グ補正を目的として、辰巳らの開発したソフトウェア (W/L Analysis Software) を用い²¹⁾、MV ビームの中心に isocenter の金属球が一致するように補正を行った. 6 MV の X 線、フィールドサイズ 2×2 cm²、gantry 角度が 5 方向 (0°, 90°, clockwise (CW : 時計回り) 180°, 270°, counterclockwise (CCW : 反時計回り) 180°) の条件で照射を行い、iViewGT を用いて MultiMet-WL QA ファントムの isocenter の金属球の画像を取得した. 取得した 5 枚の画像を解析し、isocenter の金属球が各照射野の中心位置座標から算出した平均座標 (重心) に位置するように Elekta 社の HexaPOD evo RT system を使用し、AP, LR, GT 方向の並進方向に対する 3 軸補正でサギング補正を行った. LR, GT 方向の補正は gantry 角度 0°, CW 180°, CCW 180°の画像を、AP 方向の補正は gantry 角度 90°, 270°の画像を用いて補正した. 各画像から算出した理想的な金属球の位置と実際の金属球のずれは、0.05 mm 以内に調整した. その結果、各照射野の中心と isocenter の金属球の中心の位置ずれの平均値は 0.51 mm であった.

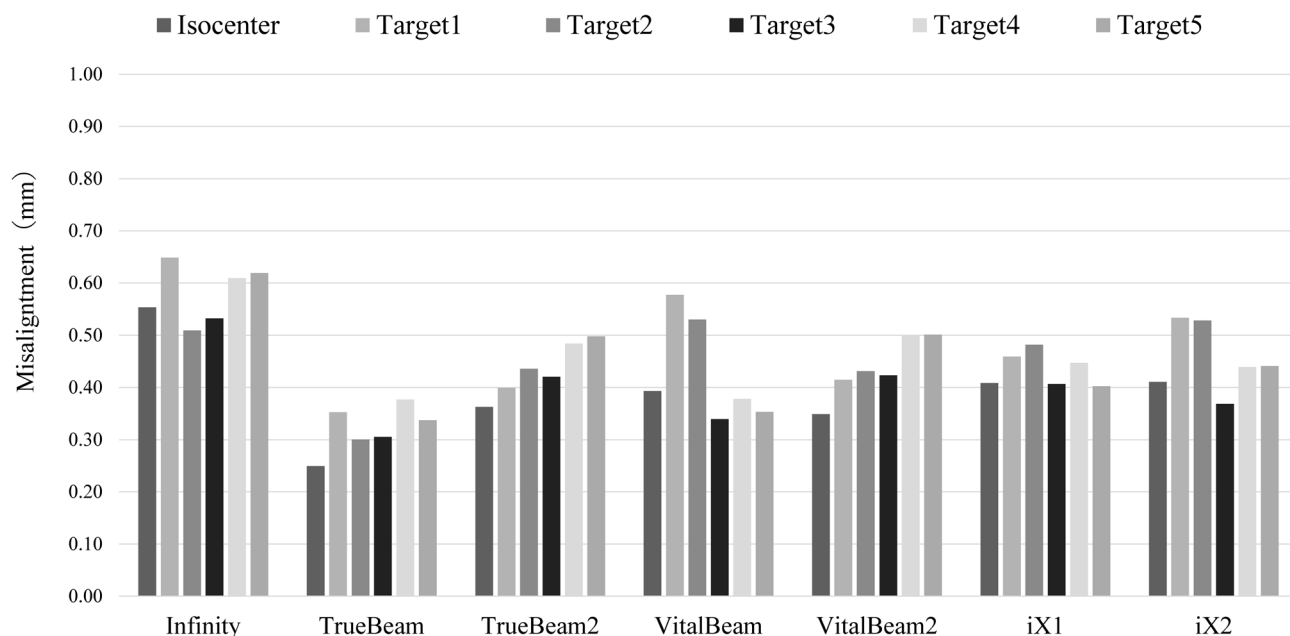


Fig. 2 Comparison of S values for each target between Elekta (Stockholm, Sweden) and Varian Medical Systems (Palo Alto, CA, USA) linear accelerators
The mean S values across all 15 beams are shown for each target, and the results from Gao et al. are compared with those of our study.

1-3 MultiMet-WL QA ファントムを用いた Winston-Lutz test (WL test) の取得

Table 1 のダウンロードしたプランを照射し、iViewGT で 19 枚の画像を取得した。取得した画像を MultiMet-WL QA Software で解析し、結果を baseline とした。次に 19 本のビームの照射ごとに、collimator, couch, gantry いずれかを $+0.5^\circ$ と $+1.0^\circ$ 手動で変更して、6 通りの回転誤差を含んだ状態で off isocenter WL test を行った。Baseline は測定の再現性を評価するため 3 回実施し、平均値を採用した。回転座標系の誤差の測定は、baseline の測定再現性が確認されたことを踏まえ、1 回の測定とした。

2. 結果

Baseline の 3 回測定の S 値の平均値は isocenter で 0.56 mm, target 1 で 0.61 mm, target 2 で 0.51 mm, target 3 で 0.55 mm, target 4 で 0.61 mm, target 5 で 0.60 mm であった。全 target における S 値の標準偏差は平均 0.11 mm, 最大 0.25 mm であり、3 回測定間の最大差は平均 0.21 mm, 最大 0.49 mm であった。Varian Medical Systems 社製との比較のため、MultiMet-WL QA ファントムを用いて、Varian 装置で off isocenter WL test を行った Gao らの研究¹⁴⁾と本研究結果の baseline の S 値の平均値を Fig. 2 にプロットした。S 値の平均値の違いで最大となった TrueBeam との差は isocenter で 0.30 mm,

target 1 で 0.30 mm, target 2 で 0.21 mm, target 3 で 0.21 mm, target 4 で 0.23 mm, target 5 で 0.28 mm であった。

次に、baseline と 6 通りの回転誤差を発生させた場合の S 値のばらつきを Fig. 3 に示す。各条件で得られた全 15 ビームの S 値を集計し、変動を評価した。Isocenter ではいずれの条件でも最大 S 値は 1.0 mm 以内であった。Target 4 および target 5 において、couch, collimator の回転誤差 1.0° の条件では最大値、中央値が baseline と比較して増加し、1.0 mm を超過した。特に target 5 の collimator 1.0° では最大 S 値は 1.94 mm, 中央値 1.54 mm, 四分位範囲は 0.35 mm であった。Couch 1.0° では最大 S 値は 1.85 mm, 中央値 1.35 mm, 四分位範囲は 0.87 mm であった。Gantry の影響は比較的小さく、gantry 1.0° の条件で target 4 は最大 S 値 1.38 mm, 中央値は 0.63 mm であった。回転誤差 0.5° の条件では target 5 のみ collimator で中央値が 1.0 mm を超過し、最大 S 値は 1.24 mm, 四分位範囲は 0.39 mm であった。

各 target における baseline と 6 通りの回転誤差を発生させた場合の各方向 (GT, LR, AP) の位置ずれを Fig. 4 に示す。なお、AP 方向は対象となるビームが少なく、他方向よりも解析に用いたデータ数が少ない。Isocenter では、すべての条件において各方向の位置ずれは ± 1.0 mm 以内であった。Couch 1.0° の条件下で位置ずれが大きいのは target 5 で、最大絶対値、中央

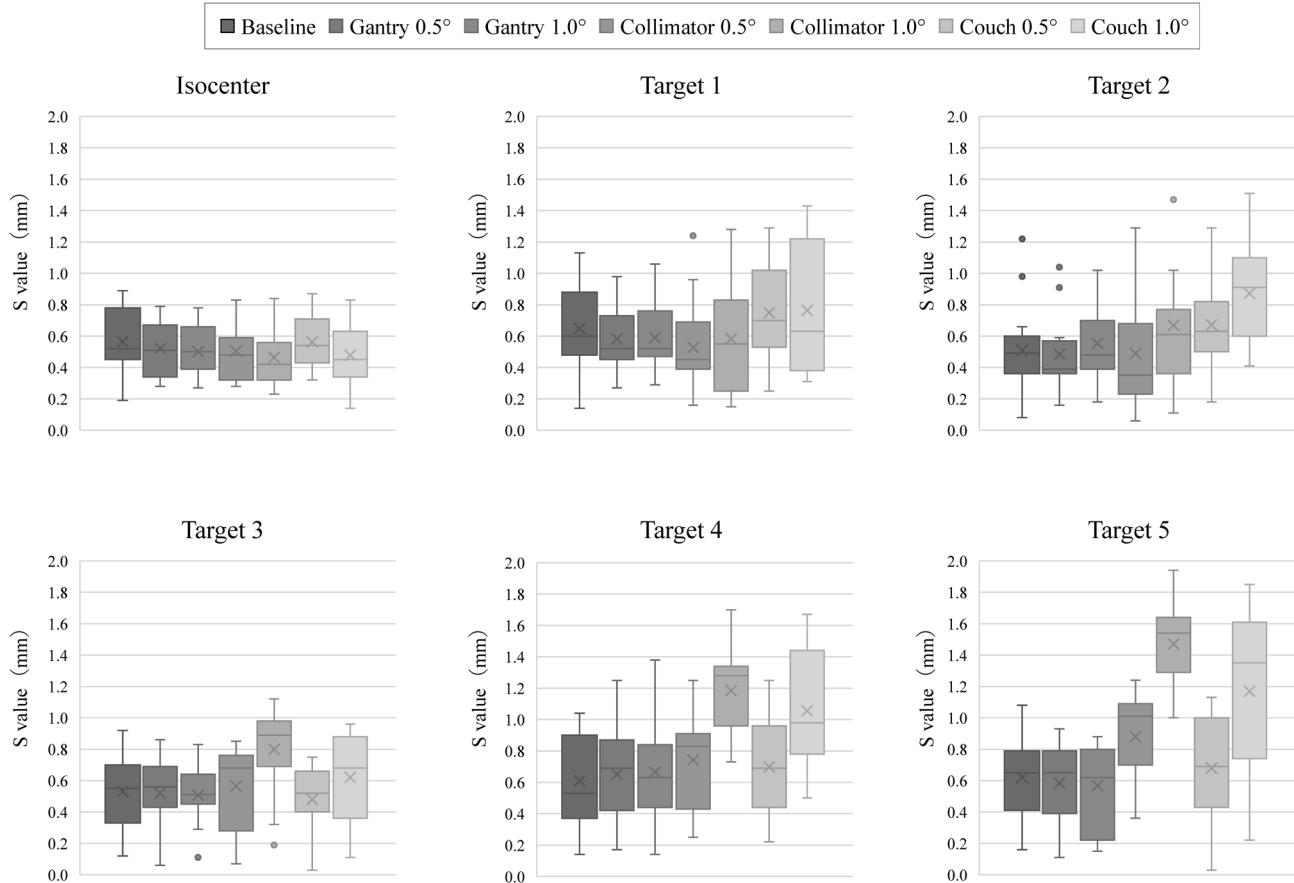


Fig. 3 Comparison of baseline and S values for each of the six rotation errors for each target

値, 四分位範囲はそれぞれ LR 方向 (1.81 mm, 1.25 mm, 0.66 mm), GT 方向 (0.86 mm, -0.02 mm, 0.93 mm), AP 方向 (0.25 mm, -0.31 mm, 0.78 mm) であった. 同様に collimator 1.0° の条件下も target 5 の位置ずれが大きく, 最大絶対値, 中央値, 四分位範囲はそれぞれ LR 方向 (1.56 mm, -0.65 mm, 1.71 mm), GT 方向 (1.51 mm, -0.15 mm, 1.01 mm), AP 方向 (1.94 mm, -0.18 mm, 3.42 mm) であった. Gantry 1.0° の条件下では target 4 の AP 方向で位置ずれが大きく, 最大絶対値, 中央値, 四分位範囲はそれぞれ LR 方向 (0.54 mm, 0.13 mm, 0.31 mm), GT 方向 (0.94 mm, -0.39 mm, 0.71 mm), AP 方向 (1.37 mm, -0.63 mm, 1.07 mm) であった.

Couch 回転誤差に関して, ガントリ角度ごとの評価をするため, target 5 の S 値をガントリ角度 0° と 180° (a 群), 90° と 270° (b 群) の 2 群に分け分布を Fig. 5 に示した. 最大の位置ずれは couch 1.0° の a 群で, 最大値は 1.85 mm, 中央値は 1.42 mm, 四分位範囲は 0.34 mm であった. 一方, b 群はどちらの誤差条件でも同様の分布を示し, couch 1.0° で最大値は 0.74 mm, 中央値は 0.37 mm, 四分位範囲は 0.43 mm であった.

3. 考察

本研究は MultiMet-WL QA ファントムを用いて, Elekta 社製放射線治療装置の回転座標系誤差が軸外 target の照射精度に及ぼす影響を定量的に評価し, TG142 における回転座標系誤差 ($\pm 1.0^\circ$) のトレランスの妥当性を検討した.

Baseline の 3 回測定では全 target の S 値のばらつきは小さく, 測定の再現性が高いことが確認された. Varian 装置と比較すると, 両者の S 値の平均値差は最大 0.3 mm 程度で, 全 target の S 値は 1.0 mm 以内に収まっており, Elekta 装置の照射精度は妥当な範囲である. 一方, Elekta 装置の方がサギングの影響が大きいと報告されている²²⁾. Elekta 装置では, おおよそ 1.3 mm 程度発生する gantry のサグの影響を補正するため, gantry WL test を行い MV isocenter を同定する. 今回の研究においても, MultiMet-WL QA ファントムの isocenter にある金属球に対して gantry 角度 5 方向で WL test を行い, サギング補正した. その結果, GT 方向は他の方向よりも位置ずれは大きい, 一定の抑制に効果があった. 軸外の target に関しては, isocenter の位置ずれと大差なかった. Gao らは, isocenter からの

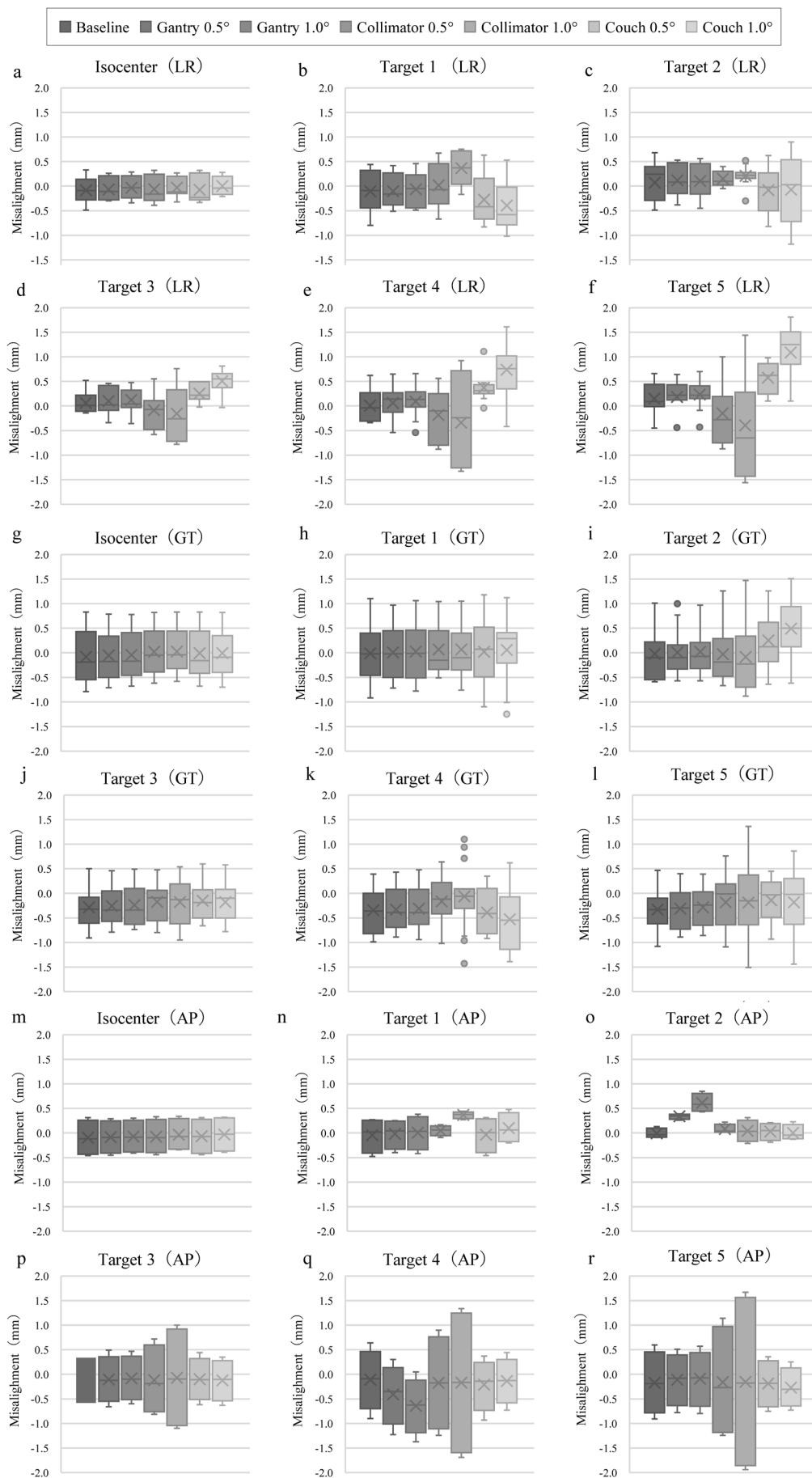


Fig. 4 Comparison of positional deviations in each direction (AP, LR, GT) for each target between baseline and six rotational error conditions

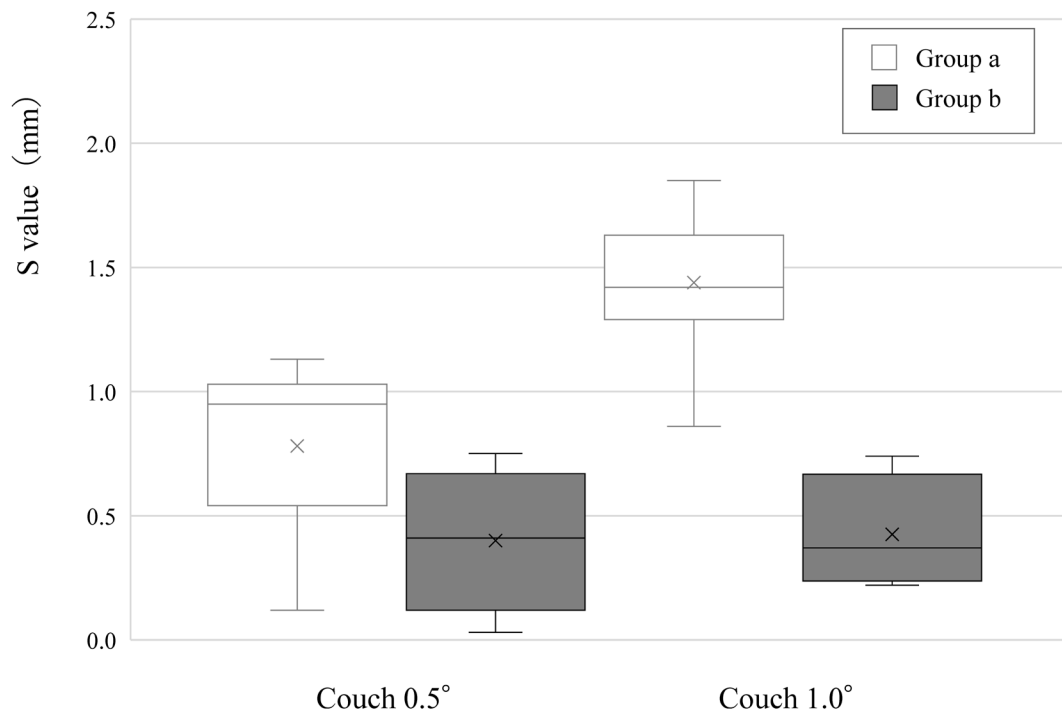


Fig. 5 The S values at target 5 for couch rotational errors (0.5° and 1.0°) for two gantry angle groups: group a (0° and 180°) and group b (90° and 270°)

距離が増加するにつれて位置ずれが増加する装置としない装置があり、主因はEPIDの中心と軸外の信号強度の違いにあるとしている¹⁴⁾。本研究では増加しない装置に該当しているが、EPIDの感度補正を事前に特別実施したわけではなく、定期点検時に行われる標準的な補正のみ行った。そのため、EPIDの感度補正の影響は最小限と考えられるが、本研究のみからElekta装置固有の特性かどうかを断定することはできない。軸外のずれにはEPIDの感度のみならず、MLCやjawの位置やキャリブレーション方法、ビームアライメントのずれなども関係し、これらのQAによって軸外の位置ずれを減少させることができる。DuらはVarian装置において、MV isocenterの検出を0.2 mm以内の精度で行うためには、gantry角度4方向、対向するcollimator角度2方向の合計8方向の照射野が必要であるとしている²³⁾。Elekta装置においても、isocenterでより精度の良いサギング補正を行うことで、軸外のtargetの照射位置精度向上につながる可能性がある。また、Varian Medical Systems社製の放射線治療装置において、軸外targetの位置ずれを1.0 mm未満に維持するために、isocenterからの距離は7 cm以内にすべきであるという報告もある¹⁴⁾。しかし、放射線治療装置や解析手法によって異なる可能性があり、事前に自施設でそれぞれの特性を検証すべきである。

回転誤差が発生すると、回転誤差の種類やtargetの

位置によって照射精度を低下させ、その主たる要因は幾何学的誤差である。Isocenterから離れたtargetに関しては、回転誤差の影響を強く受けることが知られており²⁴⁾、target 5ではcouchとcollimatorの回転誤差1.0°によりS値は1.0 mm以上となる傾向があった。Collimator回転誤差はS値のばらつきが比較的小さく、全15ビーム一様に位置ずれが発生していることを示している。同様に、方向別の詳細な評価でもGT、AP、LR方向すべてに1.0 mm以上の位置ずれが生じており、collimator精度管理の重要性が認識できる。また、collimator回転誤差は0.5°でもtarget 5のS値の中央値は1.0 mmを超過しており、臨床的にも無視できない位置誤差である。Couch回転誤差はS値のばらつきが大きく、ビームごとに位置ずれの差があることを示している。gantry角度ごとの評価では、a群(gantry角度0°/180°)と比較してb群(gantry角度90°/270°)はS値が小さい。これはcouch回転誤差の影響には方向依存性があることを示しており、方向別の詳細な評価でもLR方向のみ明らかに大きな位置ずれ(中央値1.25 mm)が生じている。これは幾何学的誤差の影響が大きい。Couch 0°の時、回転 θ によりisocenterからGT方向にY cmオフセットされたtargetのLR方向の変位 ΔX (cm)は式(1)で表される。

$$\Delta X = Y \cdot \sin(\theta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

Target 5 の $X=7.0$ cm, $\theta=1^\circ$ を挿入すると約 1.22 mm である。AP, GT 方向は couch 回転軸と平行であり、ほぼ影響を受けない。Couch 1.0° と baseline の方向別の平均値の差は LR: 0.94 mm, AP: 0.10 mm, GT: 0.15 mm であり、幾何学的誤差の影響が強いことがわかる。Gantry 回転誤差は他の回転誤差と比較して、位置ずれは小さい傾向にあった。Gantry 回転誤差による位置ずれも couch 回転誤差と同様に幾何学的誤差が主因である仮定すると、target の配置が関係している。MultiMet-WL QA ファントムの target の配置は、ほとんど gantry 回転軸上にあり、target 2 と target 4 が回転軸から 3 cm 離れているのみである。そのため幾何学的誤差の影響を受けにくく、検出しづらいと推測される。しかし、target 4 の AP 方向では 1.0 mm を超える位置ずれが観察され、gantry 回転誤差の影響が完全に排除されているわけではない。

一つの isocenter で複数の target を治療する際、TG142 の回転誤差のトレランスは臨床的に十分であると言いきれない可能性がある。TG142 では、回転誤差のトレランスとして gantry・collimator 角度の表示値と実際の差は治療機タイプによらず 1.0° 、couch の指示値と実際の位置の差は stereotactic radiosurgery (SRS)/stereotactic body radiation therapy (SBRT) では 0.5° 、それ以外は 1.0° としている³⁾ また、治療機タイプ別では isocenter, off isocenter の治療として明確に区別はされていない。この基準は AAPM report No. 13 などに基づき、線量誤差を $\pm 5\%$ 、空間的不確かさを ± 5 mm 以内に収めることを目的として、当時の治療装置や治療方法を踏まえて設定された推奨値である。したがって、複数の target に 1 mm のマージンを設定するような高精度治療においては、このトレランスを最低限遵守することが不可欠である。本研究では collimator および couch の回転誤差により、軸外 target において 1.0 mm を超える位置ずれが発生した。特に collimator は照射ごとに軸外 target の位置精度を低下させるため、軸外 target に対して 1.0 mm 程度の margin で照射を行う際には、collimator 回転誤差を 0.5° 以下に抑制するような、より厳密な精度管理が求められる。Couch 回転誤差は 0.5° に抑制できれば、isocenter から 7 cm 以内の target に対して、位置誤差を許容範囲に維持できる可能性がある。また、位置照合機器によっては、couch 回転誤差を検出し、位置補正が可能である。Gantry 回転誤差の影響は限定的であったが、target の配置によるものと考えられる。幾何学的誤差を考慮すると gantry 回転軸から target が離れている場合は、 $\pm 1.0^\circ$ が許容できない可能性がある。また、実際の治療では複合的に回転誤差が発生すると思われ、単体での回転誤差による位置ずれよりも影響が大きい可能

性がある。Pudsey らは、回転座標系の誤差は患者 QA では検出できない可能性があり、off isocenter の WL test を毎月定期的に行うべきとしている²⁵⁾。本研究でも同様に、回転座標系の誤差について使用機器や target 位置に応じて、定期的に QA を行う必要性を示唆している。なお、本研究では回転座標系の誤差に焦点を当て検討したが、単一 isocenter の軸外 target 照射では MLC 動作検証等も重要であり、包括的な QA が不可欠である。

本研究は既成品ファントムを使用した研究のため、任意の照射角度で撮影できないことや target 配置が限定されており、回転誤差に対する線量の評価も行っていない。今後は、より自由度の高いファントムを用いて、さまざまな照射をシミュレーションし、線量測定を実施することや回転座標系の誤差を複合的に組み合わせた評価などが必要である。

4. 結 語

本研究では Elekta 社製の放射線治療装置を用いて、一つの isocenter で複数の target を治療する際に、回転座標系の誤差が軸外 target の照射位置精度に与える影響を定量的に評価し、TG142 における回転誤差 ($\pm 1.0^\circ$) のトレランスの妥当性を検討した。回転座標系の種類によって、位置ずれの大きさや方向依存性が異なることや幾何学的誤差の影響が大きいことが明らかとなった。Collimator, couch の影響が強く、特に collimator は 0.5° の回転誤差でも 1 mm 以上の位置ずれが生じた。Gantry の影響は target の配置に依存して、比較的小さかった。単一 isocenter で軸外 target の照射を行う場合、TG142 における $\pm 1.0^\circ$ のトレランスは、装置の種類にかかわらず最低限確実に遵守すべき基準であり、target の配置によっては臨床的に必要とされるマージンを許容できない可能性がある。そのため、target の配置に応じて、TG142 のトレランスよりも厳格な基準を設定する必要性を示唆している。それぞれの治療施設において定期的な QA を行い、回転座標系の精度を把握し、軸外 target を含む治療における最適なマージン設定や治療手法を選択することが重要である。

研究助成金

本研究は助成を受けていない。

利益相反

筆頭著者および共著者全員が開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) Faccenda V, Panizza D, Pisoni V, et al. Single-isocenter linac-based radiosurgery for brain metastases with coplanar arcs: a dosimetric and clinical analysis. *Cancers (Basel)* 2023; 15: 4496.
- 2) Uto M, Torizuka D, Mizowaki T. Single isocenter stereotactic irradiation for multiple brain metastases: current situation and prospects. *Jpn J Radiol* 2022; 40: 987–994.
- 3) Roper J, Chanyavanich V, Betzel G, et al. Single-isocenter multiple-target stereotactic radiosurgery: risk of compromised coverage. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2015; 93: 540–546.
- 4) Thomas EM, Popple RA, Wu X, et al. Comparison of plan quality and delivery time between volumetric arc therapy (rapidarc) and gamma knife radiosurgery for multiple cranial metastases. *Neurosurgery* 2014; 75: 409–418.
- 5) Minniti G, Capone L, Alongi F, et al. Initial experience with single-isocenter radiosurgery to target multiple brain metastases using an automated treatment planning software: clinical outcomes and optimal target volume margins strategy. *Adv Radiat Oncol* 2020; 5: 856–864.
- 6) Iwai Y, Ozawa S, Ageishi T, et al. Feasibility of single-isocenter, multi-arc non-coplanar volumetric modulated arc therapy for multiple brain tumors using a linear accelerator with a 160-leaf multileaf collimator: a phantom study. *J Radiat Res* 2014; 55: 1015–1020.
- 7) Kohutek ZA, Yamada Y, Chan TA, et al. Long-term risk of radionecrosis and imaging changes after stereotactic radiosurgery for brain metastases. *J Neurooncol* 2015; 125: 149–156.
- 8) Guckenberger M, Roesch J, Baier K, et al. Dosimetric consequences of translational and rotational errors in frame-less image-guided radiosurgery. *Radiat Oncol* 2012; 7: 63.
- 9) Meeks SL, Mercado CE, Popple RA, et al. Practical considerations for single isocenter LINAC radiosurgery of multiple brain metastases. *Pract Radiat Oncol* 2022; 12: 195–199.
- 10) Faught AM, Trager M, Yin FF, et al. Re-examining TG-142 recommendations in light of modern techniques for linear accelerator based radiosurgery. *Med Phys* 2016; 43: 5437–5441.
- 11) Gao J, Liu X. Winston-Lutz-Gao test on the true beam STx linear accelerator. *Int J Med Phys Clin Eng Radiat Oncol* 2019; 8: 9–20.
- 12) Peng JL, Liu C, Chen Y, et al. Dosimetric consequences of rotational setup errors with direct simulation in a treatment planning system for fractionated stereotactic radiotherapy. *J Appl Clin Med Phys* 2011; 12: 61–70.
- 13) Prentou G, Pappas EP, Logothetis A, et al. Dosimetric impact of rotational errors on the quality of VMAT-SRS for multiple brain metastases: comparison between single- and two-isocenter treatment planning techniques. *J Appl Clin Med Phys* 2020; 21: 32–44.
- 14) Gao J, Anand D. Off-iso Winston-Lutz test on seven linear accelerators. *J Appl Clin Med Phys* 2024; 25: e14470.
- 15) Ono T, Kido T, Nakamura M, et al. Automatic measurement of beam-positioning accuracy at off-isocenter positions. *J Appl Clin Med Phys* 2023; 24: e13844.
- 16) Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al. Task Group 142 report: Quality assurance of medical acceler. *Med Phys* 2009; 36: 4197–4212.
- 17) Hanley J, Dresser S, Simon W, et al. AAPM Task Group 198 report: An implementation guide for TG 142 quality assurance of medical accelerators. *Med Phys* 2021; 48: e830–e885.
- 18) Kutcher GJ, Coia L, Gillin M, et al. Comprehensive QA for radiation oncology: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40. *Med Phys* 1994; 21: 581–618.
- 19) Svensson GK, Baily NA, Loevinger R, et al. Physical aspects of quality assurance in radiation therapy (AAPM report No. 13). American Institute of Physics, 1984.
- 20) Tsui SSW, Wu VWC, Cheung JSC. Comparison of dosimetric impact of intra-fractional setup discrepancy between multiple- and single-isocenter approaches in linac-based stereotactic radiotherapy of multiple brain metastases. *J Appl Clin Med Phys* 2022; 23: e13484.
- 21) 辰己大作, 家永晃功, 中田良成, 他. 定位放射線照射における放射線アイソセンタの定量的管理手法の構築. *日放技学誌* 2012; 68: 1333–1339.
- 22) Wack LJ, Exner F, Wegener S, et al. The impact of isocentric shifts on delivery accuracy during the irradiation of small cerebral targets—quantification and possible corrections. *J Appl Clin Med Phys* 2020; 21: 56–64.
- 23) Du W, Johnson JL, Jiang W, et al. On the selection of gantry and collimator angles for isocenter localization using Winston-Lutz tests. *J Appl Clin Med Phys* 2016; 17: 167–178.
- 24) Nakano H, Tanabe S, Utsunomiya S, et al. Effect of setup error in the single-isocenter technique on stereotactic radiosurgery for multiple brain metastases. *J Appl Clin Med Phys* 2020; 21: 155–165.
- 25) Pudsey LMM, Biasi G, Ralston A, et al. Detection of rotational errors in single-isocenter multiple-target radiosurgery: is a routine off-axis Winston–Lutz test necessary? *J Appl Clin Med Phys* 2022; 23: e13665.

Impact of Gantry, Collimator, and Couch Rotational Errors in Radiation Therapy Devices on the Irradiation Accuracy of Off-isocenter Targets and Evaluation of TG142 Tolerance

Takahiro Nakayama,¹ Yoshinori Tanabe,²  and Yasushi Fujii¹

¹ Department of Radiology, Public Mutual Aid Association Chugoku Central Hospital

² Department of Radiological Technology, Graduate School of Health Sciences, Okayama University

Received January 28, 2025; Revision accepted September 29, 2025

Abstract

Purpose: The aim of this study was to quantitatively evaluate the impact of gantry, collimator, and couch rotational errors in a linear accelerator on the irradiation accuracy of off-isocenter targets, and to assess the validity of the rotational error tolerance ($\pm 1.0^\circ$) specified in American Association of Physicists in Medicine TG142. **Methods:** Using an Elekta linear accelerator (Elekta, Stockholm, Sweden) and the MultiMet-WL QA phantom (Sun Nuclear, Melbourne, FL, USA), an off-isocenter Winston–Lutz test was performed on six targets. In addition to baseline measurements, six conditions were evaluated by intentionally introducing rotational errors of $+0.5^\circ$ and $+1.0^\circ$ in the collimator, gantry, and couch. The vector distance (S value) between the field center and the target center, as well as positional deviations in each direction (gantry-target: GT, left-right: LR, anterior-posterior: AP), were analyzed. **Results:** Targets located farther from the isocenter exhibited more significant positional deviations. The collimator rotation had the greatest impact; at 7 cm from the isocenter, even a 0.5° error resulted in a maximum S value of 1.24 mm. Couch rotation had the next largest effect, while gantry rotation had relatively smaller effects, likely because most targets were located near the gantry's rotational axis. The rotational errors mainly caused geometric deviations with direction-dependent positional shifts. **Conclusion:** The effects of the collimator and couch were substantial, with positional deviations exceeding 1 mm even for a 0.5° rotation error. The influence of the gantry was relatively small and dependent on the target configuration. For irradiation of off-axis targets, the TG142 tolerance of $\pm 1.0^\circ$ should be regarded as a minimum standard that must be strictly observed regardless of the type of linear accelerator. However, depending on the target arrangement, clinically adequate margins may not be ensured. These findings suggest the necessity of applying stricter criteria according to target configuration and emphasize the importance of regular quality assurance.

Key words: off-isocenter Winston–Lutz test, rotation error, off-axis targets, Elekta, TG142