臨床技術

論文受付
2020年2月27日

論文受理
2020年7月9日

Code No. 751

前立腺 IMRT における dynamic MLC 位置精度 解析ソフトを用いた dynamic MLC パラメータの推定

白崎展行¹ 武村哲浩²

¹ 富山大学附属病院放射線部

² 金沢大学医薬保健研究域保健学系

緒言

近年、強度変調放射線治療(intensity-modulated radiation therapy: IMRT)が多く施設で行われるようになった。高精度放射線治療である IMRT を安全かつ高精度で行うためには、作成したプランの検証が欠かせない。その検証項目は評価点絶対線量検証と相対線量分布検証に大別され、それぞれ全門検証と各門検証がある。そして、その検証において、照射精度が許容範囲内であることを確認する必要がある^{1~4)}。

Dynamic multileaf collimator (DMLC) による IMRT (DMLC-IMRT) は高い DMLC 位置精度が要求されるため、当院では IMRT プランの線量検証時に DMLC 位置精度解析ソフトである DynaLog File Viewer

(DFV, Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA) を使用し、MLC 位置誤差の評価を行っている。DMLC-IMRT ではギャップ幅と MLC 位置精度が線量誤差に大きく影響することが知られているが⁵⁾、評価点絶対線量検証の結果と DFV の結果が相関しないことが多くみられる。しかし、DMLC 位置誤差と線量計の位置関係、ギャップ幅と DMLC 位置誤差の関係によって評価点絶対線量への寄与が変わってくる。ことが十分考えられるため、一概に相関の有無は言い難い。また、絶対線量測定の測定精度に寄与する要素が多くあり、複雑な DMLC-IMRT 照射の MLC 位置誤差がどの程度線量誤差に影響しているか把握することは難しい。先行研究では DFV は平均偏差やその最大

Estimation of Dynamic MLC Parameters Using Dynamic MLC Position Accuracy Analysis Software in Prostate IMRT

Nobuyuki Shirosaki^{1*} and Akihiro Takemura²

¹ Department of Radiology, Toyama University Hospital

² Faculty of Health Sciences, Institute of Medical, Pharmaceutical and Health Sciences, Kanazawa University

Received February 27, 2020; Revision accepted July 9, 2020

Code No. 751

Summary

It is necessary to verify an intensity-modulated radiation therapy (IMRT) plan and to confirm dose error within the tolerance, in order to perform it securely and precisely. IMRT with dynamic multi-leaf collimator (DMLC) requires high DMLC position accuracy. The DMLC position accuracy analysis software DynaLog File Viewer (DFV; Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA) is used to analyze position errors of DMLC for IMRT plans. We analyzed correlation between DMLC parameters and position error of DMLC obtained from DFV in prostate IMRT. A regression analysis of the position error and the DMLC parameters was performed. As a result, a strong correlation was found between MLC position error and each of the DMLC parameters: leaf speed, gap width, and segment monitor unit (MU). We found the factors for the DMLC position error in this study. DMLC position error could be estimated from leaf speed, gap width, and segment MU when we analyze IMRT cases in the further study.

Key words: dynamic multi-leaf collimator (DMLC), intensity-modulated radiation therapy (IMRT) dose verification, multi-leaf collimator (MLC) log file

*Corresponding author

値を示すが、その位置の同定を行わないため、DMLC 位置誤差と線量誤差の相関を求めることは困難と報告されている⁶⁾。したがって、現在は評価点絶対線量検証の結果と DFV の結果を切り離して評価しているのが実状である。しかし、DFV の結果から相関を見つけることができれば臨床上有用であり、その相関を示すことで DFV の情報からどのような DMLC 照射なのか推定することができ、DMLC 位置誤差の原因究明に役立つ可能性がある。また、どのような DMLC 照射条件で位置誤差が起きやすいかなどの解明も行え、IMRT プラン作成時の有用な情報としても期待できる。これまでの研究では DFV を用いて DMLC の精度管理や精度解析を行った報告^{7,8)}や DMLC の log file を用いて IMRT の線量検証を行った報告^{9~11)}はあるが、DFV の結果と臨床プランの DMLC の相関についての報告はない。そこで、本研究においてわれわれは DFV の結果が臨床へフィードバックすることができると考え、臨床プランで作成したビームの DMLC 各種パラメータ (DMLC リーフ速度、DMLC 移動距離、照射野面積、ギャップ幅、monitor unit (MU) 値、セグメント数など) の相関を解析した。

1. 方 法

1-1 対象症例

当院で施行した前立腺 IMRT のうち 28 症例、144 ビームを対象とした。対象患者の年齢は 61~82 歳 (中央値 73 歳)、ステージは T1c~T3bN0M0 であった。直線加速器は Clinac iX (Varian Medical Systems)、X 線エネルギー 10 MV を用いた。本研究は人を対象とした研究のため、当院臨床研究・倫理センターの承認を得た (承認番号 臨 27-97)。

1-2 DMLC パラメータの解析

放射線治療計画装置 Eclipse Ver.10 (Varian Medical Systems) から照射野の MLC ファイルを取得し、DMLC パラメータの解析を行った。MLC ファイルには dynamic 照射を分割 (セグメント) し、その際の各リーフの位置情報が記載されている。MLC は Millennium 120 MLC (Varian Medical Systems) で、60 対 120 本のリーフで構成されている (中心部: 5 mm 幅 40 対、両端: 10 mm 幅 20 対)。リーフの先端は円弧形状である。Dynamic 照射では X 線照射中、一定方向に各リーフを変速的、連続的に移動させることで照射野内に強度変調させた線量分布を得ることができる。DMLC パラメータの解析は MLC ファイルから得た各セグメントにおける MLC 位置情報から各セグ

メントのギャップ幅を算出し、その平均をリーフのギャップ幅とした。各セグメントのギャップ幅とリーフ幅から各セグメントの照射面積を求め、その合計を照射野の照射面積とした。リーフ速度は各リーフのセグメント間の移動距離と照射時間から各セグメント間のリーフ速度を算出し、その平均を各リーフのリーフ速度 (各リーフ速度) とした。リーフ速度は各リーフ速度、キャリッジ A (Crg. A) のリーフ速度、キャリッジ B (Crg. B) のリーフ速度、全リーフのリーフ速度について求めた。キャリッジのリーフ速度は Crg. A、または Crg. B の全リーフの速度の平均を意味し、全リーフ速度は Crg. A と Crg. B すべてのリーフ速度の平均を意味する。また、MU 値、セグメント数を用いてセグメント MU (MU 値/セグメント数)、セグメント数と照射面積を用いてセグメント照射面積 (照射面積/セグメント数) も DMLC パラメータとして求めた。

1-3 DFV の解析

DFV は MLC が駆動している間 (dynamic 照射中)、50 ms ごとに MLC 位置が log file に記録され、リーフ位置誤差を定量的に解析することができるソフトウェアである。Figure 1 に示すように、DFV は 1 門あたりの各リーフの平均偏差、およびその最大値を root mean square (RMS) で示す error RMS data とリーフ位置誤差の割合を示す error histogram data、また、それらをプロットしグラフ化した結果を得ることができる。RMS は (1) 式で求められる。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{P_i(plan) - P_i(actual)\}^2}{n}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

RMS はリーフの特定ポイント i (50 ms ごと) におけるリーフ位置の計画値 $P_i(plan)$ と実際のリーフ位置の値 $P_i(actual)$ の誤差の二乗を合計して、サンプル数 n で除算し、その平方根を求めた結果である。Error RMS data では各リーフにおける平均偏差と Crg. A、Crg. B の平均偏差とその最大値を用いた。Error histogram data はリーフ位置誤差によって Bin No.1 から Bin No.21 まで区切られており、本研究では Bin No.1 (0-0.005 cm)、Bin No.2 (0.005-0.05 cm)、Bin No.3 (0.05-0.1 cm) の割合 (%) の値を用いた。Bin の区切りは DFV で決まっており、Bin No.4 以降は 0.5 cm 間隔で区切られている。

Fig. 1 Result of DFV.

1-4 DFV と DMLC パラメータの相関

DFV の結果と DMLC パラメータについて回帰分析を行い、得られた直線回帰式の傾きについて t 検定を行って相関の有無を調べた。DFV の結果から得られる error RMS data と治療計画装置から得られる DMLC パラメータの相関について、各リーフの RMS 平均偏差を説明変数とし、各リーフ速度、各リーフギャップ幅を目的変数として回帰分析を行った。次に、Crg. A, B の RMS 平均偏差、その最大値を説明変数とし、Crg. A, B リーフ速度を目的変数として回帰分析を行った。更に、Crg. A, Crg. B の RMS 平均偏差の和を説明変数とし、全リーフ速度、ギャップ幅、照射面積、セグメント数、セグメント照射面積、セグメント MU を目的変数として回帰分析を行った。回帰分析より得られた直線回帰式の傾きについて、相関があるか t 検定を行った。

また、DFV の結果から得られる error histogram data と DMLC パラメータの相関について、DMLC 位置誤差の割合である Bin No.1, 2, および 3 の値を説明変数とし、全リーフ速度、ギャップ幅、照射面積、セ

グメント数、セグメント照射面積、セグメント MU を目的変数として回帰分析を行った。Bin No.1, 2, および 3 の値は DMLC 位置誤差の頻度割合を示しており、照射中 50 ms ごとに記録された DMLC 位置誤差の全計測数に対する割合である。回帰分析より得られた直線回帰式の傾きについて t 検定を行い、相関の有無を調べた。これらの組み合わせの相関を調べることで、DMLC 位置誤差に影響する DMLC 照射条件を見出だした。

2. 結果

2-1 DMLC パラメータの解析

MLC ファイルから求めた DMLC パラメータの全 144 ビームの平均値と標準偏差を Table 1 に示す。照射野面積、MU 値、セグメント数は照射野によってばらつきが大きかった。また、各リーフの DMLC リーフ速度、ギャップ幅では照射野辺縁のリーフにおいてリーフ速度が遅く、ギャップ幅が小さい照射野がみられた (Table 2)。

Table 1 Mean value and standard deviation of DMLC parameters

(n=144)

Gap width (cm)	Irradiation field area (cm ²)	Segment irradiation area (cm ²)	Leaf speed (cm/s)			MU	Segment MU	Number of segments
			Crg. A	Crg. B	All			
2.615±0.48	1829±373.1	18.78±4.32	0.241±0.044	0.237±0.042	0.239±0.042	105.58±15.49	1.073±0.19	100.78±19.84

Crg: carriage, MU: monitor unit

Table 2 One case of leaf speed and the gap width of each leaf

Leaf no.	Leaf speed (cm/s)		Gap width (cm)
	Crg. A	Crg. B	
23	0.147	0.126	1.716
24	0.201	0.169	2.612
25	0.240	0.198	3.086
26	0.299	0.202	3.458
27	0.328	0.206	3.775
28	0.339	0.209	3.978
29	0.355	0.354	4.137
30	0.384	0.217	4.307
31	0.379	0.221	4.274
32	0.354	0.233	3.981
33	0.383	0.239	4.163
34	0.365	0.369	4.259
35	0.378	0.335	4.177
36	0.336	0.202	4.278
37	0.297	0.191	3.337

Crg: carriage

Table 3 Mean and standard deviation of error RMS data

(n=144)

Ave		Max	
Crg. A (cm)	Crg. B (cm)	Crg. A (cm)	Crg. B (cm)
0.0191±0.0038	0.0188±0.0035	0.0302±0.0054	0.0294±0.0051

Crg: carriage

2-2 DFV の解析

Table 3 に DFV から求めた全 144 ビームの Crg. A, Crg. B の平均偏差とその最大値の平均値と標準偏差, Table 4 に全 144 ビームの error histogram data の Bin No.1, 2, および 3 の値の平均値と標準偏差を示す. error RMS data では平均偏差とその最大値が Crg. A, B 間で有意差 ($p=0.393$, $p=0.191$) はなかった. Error histogram data では Bin No.1, 2 で約 90-95% を占め, Bin No.3 の割合は, 10% 未満であった.

2-3 DFV と DMLC パラメータの相関

2-3-1 各リーフの RMS 平均偏差とリーフ速度

全 144 ビーム (4096 リーフ) の各リーフの RMS 平均偏差とリーフ速度において, 有意な相関 ($p<0.001$) がみられた. また, 強い相関を示し, 回帰直線の決定係数 (R^2) の値が高かった (Fig. 2).

2-3-2 各リーフの RMS 平均偏差の和とギャップ幅

各リーフの Crg. A, B の RMS 平均偏差の和とギャップ幅において, 有意な相関 ($p<0.001$) はあったが, ギャップ幅 0.85 cm 以下のリーフ対, かつ RMS 平均偏差の和が 0.03 cm 以上のデータは回帰直線から大きく外れた. このデータを除くと強い相関を示し,

Table 4 Mean and standard deviation of error histogram data (n=144)

Bin No.1 (%)	Bin No.2 (%)	Bin No.3 (%)
31.32±10.10	64.35±10.01	4.08±2.28

Fig. 2 Relationship between RMS of each leaf and leaf speed.

Fig. 3 Relationship between the sum of RMS and gap width.

Fig. 4 Relationship between Crg. A leaf speed (cm/s) and Crg. A RMS mean deviation.

Fig. 5 Relationship between Crg. A leaf speed (cm/s) and Crg. A RMS maximum deviation.

回帰直線の決定係数(R^2)の値が高くなった(Fig. 3).

2-3-3 Crg. A, B の RMS 平均偏差, その最大値と Crg. A, B リーフ速度

Crg. A の RMS 平均偏差, その最大値と Crg. A リーフ速度, Crg. B の RMS 平均偏差, その最大値と Crg. B リーフ速度の四つの組み合わせすべてにおいて, 有意な相関($p < 0.001$)はあったが, Fig. 4, 5 より, 最大値と比較して平均偏差で強い相関を示した.

2-3-4 Crg. A, B の RMS 平均偏差の和と全リーフ速度, ギャップ幅, 照射面積, セグメント数, セグメント照射面積, セグメント MU

Crg. A, B の RMS 平均偏差の和と全リーフ速度,

照射面積, セグメント数, セグメント MU において有意な相関($p < 0.001$)がみられ, その中でも全リーフ速度, セグメント MU で強い相関を示した(Fig. 6). 照射面積, セグメント数も相関はあったが, 中程度の相関であった(Fig. 7). ギャップ幅とセグメント照射面積では相関はみられなかった(Fig. 8).

2-3-5 Error histogram data と全リーフ速度, ギャップ幅, 照射面積, セグメント数, セグメント照射面積, セグメント MU

Bin No.1, 2 では照射面積以外で有意な相関($p < 0.001$)がみられたが, 中程度から弱い相関であり, 回帰直線の決定係数(R^2)の値も高くなかった. Bin No.3

Fig. 6 (a) Relationship between the sum of Crg. A and Crg. B RMS (ave.) and all leaf speeds.
(b) Relationship between the sum of Crg. A and Crg. B RMS (ave.) and segment MU.

Fig. 7 (a) Relationship between the sum of Crg. A and Crg. B RMS (ave.) and irradiation area.
(b) Relationship between the sum of Crg. A and Crg. B RMS (ave.) and segment number.

Fig. 8 (a) Relationship between the sum of Crg. A and Crg. B RMS (ave.) and gap width.
(b) Relationship between the sum of Crg. A and Crg. B RMS (ave.) and segment irradiation area.

Fig. 9 Relationship between percentage of Bin No.3 and all leaf speed.

Fig. 10 Relationship between percentage of Bin No.3 and segment MU.

ではセグメント照射面積以外で有意な相関があり、全リーフ速度との相関が error histogram data の中で最も強い相関を示し、次いでセグメント MU であった (Fig. 9, 10). その他の項目については強い相関を示さなかった.

3. 考 察

DFV で得られた error RMS data と error histogram data より DMLC パラメータを推定できるか回帰分析を行った. 各リーフの RMS 平均偏差とリーフ速度は強い相関を示し、決定係数 (R^2) の値も高く、各リーフの RMS 平均偏差の値より直線回帰式を用いてリーフ速度を推定できると考えられる. また、これらは正の相関であり、RMS の値が大きいうことはリーフ速度が速いということを表している. すなわち、リーフ速度が速い場合はリーフ位置誤差も大きくなることを示唆している. 各リーフのギャップ幅において、ギャップ幅が 0.85 cm 以下で回帰直線から大きく外れることがあり、それらを除くと決定係数 (R^2) の値が高くなり、直線回帰式から ± 1 cm 以内でおおよそ推定できると考える. RMS の値はリーフ速度に依存しており、ギャップ幅とリーフ速度の関係が重要と思われる. ギャップ幅は線量への影響が大きい因子であり、その際の MLC 位置誤差が重要である⁵⁾. RMS の値と Gap 幅の関係より、絶対線量誤差の影響について究明できる可能性がある.

Crg. A, B の RMS 平均偏差、その最大値と Crg. A, B リーフ速度では、最大値よりも平均偏差との相関がよかった. 最大値は RMS の値の中で頻度の多いものとは考えにくく、平均偏差の方が代表的な数値として

適当だと思われる. したがって、RMS 平均偏差との相関の方がよかったものと思われる. Crg RMS 平均偏差の値がその照射野の DMLC リーフ速度の代表値としてみなすことができ、ダイナミック照射の詳細なリーフ移動情報を知ることが可能である.

Crg. A, B の RMS 平均偏差の和と DMLC パラメータでは、全リーフ速度、セグメント MU で強い相関を示した. 全リーフ速度は正の相関があり、各リーフ速度、Crg リーフ速度と同じ相関傾向であった. セグメント MU では負の相関であり、RMS の値が大きくなるにつれて、セグメント MU の値が小さくなる関係であった. すなわち、リーフ速度が速いと各セグメントにおける出力を表すセグメント MU が小さくなるといえる. これより、RMS の値が大きければ各セグメントにおける出力が小さくなるため、絶対線量への影響が小さくなる可能性がある. 一方で、出力が小さければわずかな誤差で相対的線量誤差は大きくなる可能性もあると推測される. したがって、セグメント MU の線量測定誤差に対する影響を把握することが課題である.

Error histogram data から得られた DMLC 位置誤差の割合 (%) と DMLC パラメータにおいて、Bin No.1, 2 では照射面積以外の DMLC パラメータとの相関はあったが、強い相関ではなかった. この結果から、DMLC パラメータを推定するのは難しいと考える. Bin No.3 ではセグメント照射面積以外の DMLC パラメータで相関がみられ、その中では全リーフ速度とセグメント MU で比較的強い相関であった. Error histogram data の中では Bin No.3 の値が重要だと思われるが、全リーフ速度とセグメント MU は Crg. A,

Crg. B の RMS 平均偏差の和で強い相関を示している。そのため、DMLC パラメータとの推定について error histogram data より error RMS data の方が重要な値だと考えられる。

前立腺 IMRT 症例(T1c~T3bN0M0)において、error RMS data から直線回帰式を用いて、リーフ速度、ギャップ幅、セグメント MU は推定できる精度があるが、その他の DMLC パラメータの推定については困難だと思われる。また、error histogram data において、相関を示した DMLC パラメータもあったが、推定できる精度ではないと考える。前立腺以外の部位に対する IMRT において、頭頸部 IMRT のような照射範囲が広く、照射野内に複雑な強度変調が存在する場合、前立腺 IMRT と比べて、より複雑なダイナミック照射になると考えられることから、本研究結果を用いることは注意が必要であり、改めて調査することを推奨する。

4. 結 語

本研究では前立腺 IMRT の DFV の結果と DMLC パラメータについて回帰分析を行い、得られた回帰直

線の傾きについて相関があるか検定を行った。その結果、RMS の値とリーフ速度、ギャップ幅(0.85 cm 以上)、セグメント MU に強い相関関係を示し、推定できることを確認した。Error histogram data との相関では Bin No.3 の値が最も相関がよく、error histogram data の中では Bin No.3 の値が重要であることを示した。また、DFV はどのようなダイナミック照射であるか推定するのにも有用である。

謝 辞

本研究に際し、ご指導いただいた金沢大学医薬保健研究域保健学系の武村哲浩教授、研究協力していただいた富山大学附属病院放射線部放射線治療スタッフの皆様にご感謝とともに御礼申し上げます。

また、本研究の要旨は日本放射線技術学会第 73 回総会学術大会(2017 年、横浜)にて発表した。

利益相反

筆頭著者および共著者全員に開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) Low DA, Sohn JW, Klein EE, et al. Characterization of a commercial multileaf collimator used for intensity modulated radiation therapy. Med Phys 2001; 28(5): 752-756.
- 2) Dirkx ML, Heijmen BJ. Testing of the stability of intensity modulated beams generated with dynamic multileaf collimation, applied to the MM50 racetrack microtron. Med Phys 2000; 27(12): 2701-2707.
- 3) 幡野和男, 奥村雅彦, 小澤修一, 他. 強度変調放射線治療における物理・技術的ガイドライン 2011. IMRT 物理 QA ガイドライン専門小委員会 編. 2011.
- 4) 河内 徹, 遠山尚紀, 小島 徹, 他. 強度変調放射線治療の線量検証法 医物理 2020; 30 (suppl 6): 1-210.
- 5) LoSasso T, Chui CS, Ling CC. Physical and dosimetric aspects of a multileaf collimation system used in the dynamic mode for implementing intensity modulated radiotherapy. Med Phys 1998; 25(10): 1919-1927.
- 6) 奥村雅彦, 橋場久幸, 早雲里絵, 他. Dynamic MLC IMRT の QA プランでの線量モニタ単位数のリーフ位置精度と線量プロファイルへの影響. 日放技学誌 2002; 58(6): 773-782.
- 7) 小野 薫, 中村哲之, 大和真一郎, 他. Dynamic Log File による Dynamic Multileaf Collimator の精度試験. 日放技学誌 2007; 63(7): 766-773.
- 8) 奥村雅彦. 放射線治療用直線加速器における dynamic multileaf collimator の限界速度および位置精度評価に関する研究. 名古屋大学大学院 平成 22 年度博士学位論文, 2011.
- 9) Calvo-Ortega JF, Teke T, Moragues S, et al. A Varian DynaLog file-based procedure for patient dose-volume histogram-based IMRT QA. J Appl Clin Med Phys 2014; 15(2): 100-109.
- 10) Litzenberg DW, Moran JM, Fraass BA. Verification of dynamic and segmental IMRT delivery by dynamic log file analysis. J Appl Clin Med Phys 2002; 3(2): 63-72.
- 11) LEE JW, Lee DH, CHOI KS. Inverse verification of the dose distribution for intensity modulated radiation therapy patient-specific quality assurance using dynamic MLC log files. J Korean Phys Soc 2009; 55(4): 1649-1656.

問合先

〒930-0194 富山市杉谷 2630 番地
富山大学附属病院放射線部 白崎展行