原 著

Deformable image registration による rigid image registration からの輪郭変形精度の向上予測

街道亮斗¹ 武村哲浩² 大澤 翼³ 能登公也⁴
小島礼慎⁴ 磯村直樹⁴ 上田伸一⁴

論文受付
2019 年 9 月 24 日

論文受理
2020 年 4 月 6 日

Code No. 524

¹ 福井大学医学部附属病院放射線部

² 金沢大学医薬保健研究域保健学系

³ 行田総合病院放射線部

⁴ 金沢大学附属病院放射線部

緒 言

現在、放射線治療におけるイメージング技術の発展は目覚ましく、その技術により治療期間中の日々の解

剖学的変化を可視化することが可能となった。また計画時の患者位置を再現する技術として画像誘導放射線治療(image-guided radiation therapy: IGRT)が行われ

Improvement Prediction on Contour Deformation Accuracy Using Deformable Image Registration Results Compared to Rigid Image Registration Results

Ryoto Kaido,¹ Akihiro Takemura,^{2*} Tsubasa Osawa,³ Kimiya Noto,⁴ Hironori Kojima,⁴ Naoki Isomura,⁴ and Shinichi Ueda⁴

¹ Department of Radiology, University of Fukui Hospital

² Pharmaceutical and Health Sciences, Kanazawa University

³ Radiology, Gyoda General Hospital

⁴ Department of Radiology, Kanazawa University Hospital

Received September 24, 2019; Revision accepted April 6, 2020

Code No. 524

Summary

Purpose: The aim of this study was to analyze improvement prediction on contour deformation accuracy using deformable image registration (DIR) results compared to rigid image registration (RIR) results. **Method:** Radiotherapy plans for 31 cases (seven head and neck cases, 10 chest cases, six abdomen cases and eight female pelvis cases) from the privately open database for DIR were used. These cases used at least two radiotherapy plans, and registration was performed using two plans, not only for one case but also for different cases. The DIR and RIR were performed using the DIR software MIM Maestro (MIM software Inc., Cleveland, USA). The registration results for the following organs were analyzed: eye balls, optic nerves, brain stem, spinal cord and right and left parotid glands for head and neck; right and left lungs for chest; liver and right and left kidneys for abdomen; and rectum and bladder for pelvis. Dice similarity coefficient (DSC) for the organs was calculated from the results of RIR and DIR. The improvement in the DSC was observed. **Results and discussion:** DIR improved the DSC values by more than 0.2 for simple shapes, well-defined boundaries and large volumes such as eye balls, brain stem, lungs and liver. The minimum DSC for these organs was approximately 0.7. The improvement in DSC for the organs eye balls, brain stem, lungs and liver had ceiling values 0.95, 0.90, 1.0 and 1.0, respectively. DSC for the spinal cord, parotid gland, bladder and kidney also improved by DIR compared to RIR; however, DIR could not improve the DSC value for rectum compared to RIR because of a large difference in the position, shape and size due to stool and gas.

Keywords: deformable image registration, rigid image registration, adaptive radiation therapy, image-guided radiation therapy, accuracy improvement

*Corresponding author

Table 1 Number of cases and target organs on the body site

Body region	Number of case	Target organ
Head and neck	7	eye balls, optic nerves, brain stem, spinal cord, parotid glands
Chest	10	lungs
Abdomen	6	liver, kidneys
Pelvis (female)	8	rectum, bladder

ている¹⁾。IGRT では照射前に cone-beam computed tomography (CBCT) や光学カメラにより患者の位置を画像化することで計画時のポジショニングのズレを監視、修正することができる。しかし、放射線治療の期間中、腫瘍体積の縮小や体重の減少などにより治療計画時と比べて解剖学的変化が生じることがあり、これらの変化は IGRT では修正することができず、治療計画に沿わない照射へとつながる。この問題を解決するため、患者の解剖学的変化を監視し、適宜治療計画を修正していく適応放射線治療 (adaptive radiation therapy: ART) が行われる。ART では、computed tomography (CT) 撮影の増加により被ばく線量が増えるが、正常組織への副作用を減少させ、治療効果の向上にもつながる。ART の中で、繰り返し行われる治療計画に対して局所的に画像を変形することができる deformable image registration (DIR) という技術が用いられる^{2~4)}。DIR により、標的体積やリスク臓器の自動輪郭抽出をすることができ、コンツールリングによる労力を削減することができる。また、dose warping による異なる治療計画間の線量合算^{5~6)} や 4 dimensional computed tomography (4DCT) 等の多位相情報を利用した四次元の治療計画⁷⁾ にも応用されている。

画像間での registration には rigid image registration (RIR) と DIR の二つが使用される。RIR では並進や回転、拡大、縮小といった線形変換が行われ、画像全体が同一の変化となる。それに対して DIR は局所的な変形が行われ、細部にわたる位置合わせが可能となる。

2017 年に米国医学物理学会から DIR を含む画像レジストレーションに関するガイドライン、国内でも翌年に日本放射線腫瘍学会 (JASTRO) からガイドライン⁵⁾ が発刊され、DIR の使用方法や使用上の注意点が明らかになったが、具体的なコミッショニングや許容値などには言及されていない。DIR ソフトウェアの妥当性評価も難しく、ブラックボックス化した状態で商用システムを利用していることが現状である。

DIR は RIR よりも局所的な変形が可能であるため、一般的に 2 画像間の位置合わせ精度が向上する。しか

し、RIR に対して DIR の変形による向上がどれだけあるかの予測といった検討はまだ行われていない。

DIR に比べて RIR は複雑な手順が必要ないため、RIR の精度結果から DIR の変形精度結果が予測できれば無駄な時間を費やすことを避けることができ、DIR が適切に行われていない場合にもその異常に気付く判断の助けになる。そこで今回は同一患者間と別患者間において RIR と DIR を行い、自動輪郭描出と propagation という視点での DIR による臓器輪郭の変形精度に注目した。Atlas-based segmentation による自動輪郭描出では一般的に異なる患者間で DIR が行われ、幾何学的観点と臓器輪郭の overlap の観点から優れた DIR 結果が保証されているという報告もある^{8~11)}。本研究の目的は、RIR の精度から DIR を用いた輪郭変形による精度向上を解析することである。RIR の結果から各臓器の DIR の輪郭変形精度を予測できれば、DIR が適切な精度をもって画像変形されたかどうかを判断する一指標になる。

1. 方 法

1-1 対象症例と使用機器

本研究は放射線治療計画支援ソフトウェア MIM Maestro ver. 6.7.4 (MIM software Inc., Cleveland, USA) を用いて RIR, DIR を行った。症例は DIR データベース¹²⁾ のデータを用いた。データベースの詳細については付録に示す。Table 1 に部位ごとの症例数と評価対象臓器を示す。骨盤部のデータは女性のみである。すべての症例が治療計画を変更しており 2 セットの治療計画データをもっている。2018 年 10 月時点で公開されているすべてのデータを対象とした。すべての症例に対して同一患者間で RIR, DIR を行った。輪郭変形精度に関して変形量の大きいデータをとるため、別患者間でも RIR および DIR を行い、同一患者のデータと比較をした。別患者間で RIR, DIR を行う際には、重複しないすべての組み合わせとした。

1-2 RIR および DIR の手順

頭頸部、胸部、腹部、骨盤部ごとに目標画像、被変

形画像を決めて、DIR ソフトウェアを用いた全組み合わせで RIR, DIR を行った。このとき、データベース上の患者番号が小さいデータを目標画像、大きいデータを被変形画像とし、一方向のみ registration を行った。RIR では、目視で骨構造、特に椎体や骨盤骨を可能な限り合わせるように目標画像に一致させ、その後ソフトウェアによる自動の位置修正を行った。DIR は、RIR が行われた結果をもとに、そこから DIR による registration が行われた。DIR ソフトの MIM Maestro では DIR を行う際にボクセルの移動の自由度を調整する smooth 係数を設定できるが、デフォルトの 0.5 の状態で実行した。MIM Maestro は constrained intensity based free form method のアルゴリズムにより DIR を行っており、similarity metric として 2 画像間の各ピクセル信号強度の差の二乗和をとる sum of squared difference、最適化には gradient descent method を採用している。

1-3 評価方法

精度評価指標に Dice similarity coefficient (DSC)^{13~14)}を用いた。DSC は 0~1 の値となり、値が大きいほど二つの輪郭の類似度が高くなる。治療計画時に臓器に沿って描かれた輪郭を用いて式(1)により計算を行った。

$$DSC = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、A は基準画像の対象臓器の輪郭体積、B は RIR, DIR 後の対象臓器の輪郭体積、 $A \cap B$ はそれぞれの対象臓器の輪郭で一致している体積である。DSC は症例ごとにすべての評価対象臓器で求めた。

同一患者間のみにおいて、RIR と DIR の DSC 値の相関に関して回帰分析を用いて t 検定 (有意水準 $\alpha = 0.05$) を行った。RIR と DIR の DSC 値をプロットした散布図の線形近似曲線を回帰直線とした。RIR による DSC 値のヒストグラムでは 0.8 程度をピークとして標準偏差 0.19 で山形の分布となり、平均値は 0.67 であった。DIR の精度に関して DSC 値のトレランスとして 0.8~0.9 が用いられている⁵⁾。DSC 値の向上を示す値の基準としてそれぞれのヒストグラムピーク値を用いて低精度を 0.6、高精度を 0.8 とした。RIR の各 DSC 値 0.6, 0.8 において、DIR と RIR の DSC の回帰直線を用いて、DIR により DSC 値が 0.6 および 0.8 からどれだけ向上したかを求めた。

同一患者と別患者を合わせた場合においても同様の解析を行い、向上値を求めた。RIR の DSC 値のヒストグラムでは 0.6 程度をピークとして標準偏差 0.25 の

山形の分布となり、平均値は 0.53 であった。

2. 結 果

頭頸部の RIR と DIR の DSC 値の関係を Fig. 1 に示す。また、頭頸部における各臓器の RIR 後、DIR 後の画像の一例を Fig. 2 に示す。

Figure 1a より、眼球では右左ともに DSC 値が 0.7 以上と高い輪郭変形精度が得られた。左右眼球とも、0.95 を上限として RIR の結果にかかわらず DIR で大きな改善があった。同一患者間のみ注目すると左右眼球ともに有意ではなかったが回帰直線は同一患者と別患者で平行に近く、傾きは右眼球で 0.085、左眼球で 0.094 であった。また、RIR, DIR ともに DSC 値 0.9 付近に分布し高い輪郭変形精度が得られた。Figure 2a より、眼球は形状が単純であり、RIR では位置にずれがあるが、DIR により正しく変形されている。

Figure 1b より、視神経では右左ともに DSC 値が 0.3 から 0.7 程度と DIR の輪郭変形精度が低いことがわかる。RIR の DSC 値に関しても 0.5 未満と低く、DSC が 0 と視神経が重ならないこともあった。左右ともに有意ではなかったが、DIR による大きな改善がみられ、特に RIR での DSC 値がより低い場合にその傾向がみられた。同一患者間のみにおいても RIR での DSC 値が 0.5 程度と視神経の位置ずれが大きい結果となった。DIR による改善もみられたが DSC 値 0.8 未満と精度が低く、左視神経においては RIR での DSC 値が高いほど改善がみられなかった。Figure 2a より RIR では右視神経の高さが異なり大きなずれがあるが、目標画像上の輪郭に一致するよう正しく変形されていることがわかる。しかし、細部にわたる変形にまでは至っていない。

Figure 1c より、脳幹では DSC 値 0.7 以上と高い DIR 精度が得られ、DSC 値 0.9 を上限に RIR の DSC 値にかかわらず安定した大きな改善がみられる。有意に相関が認められなかったが、回帰直線の傾きは 0.143 と小さかった。RIR の DSC 値がより低いほど DIR による改善が大きいことがわかる。同一患者間のみにおいても同様の傾向がみられ、別患者を含めた分布と比べても大きな違いはみられなかった。Figure 2b より、脊椎を中心に位置合わせを行ったため別患者間においても脳幹の位置ずれは小さく、その小さなずれも DIR により正しく位置合わせされていることがわかる。

Figure 1c より、脊髄では RIR の DSC 値が高くなるほど DIR の DSC 値も高くなり一様に DIR による改善がみられた。有意に相関が認められ、回帰直線の傾

きが0.705となった。RIRのDSC値が高くなるほどDIRによる改善が小さくなるが、その上限はみられなかった。同一患者間のみに注目するとより高いRIR精度、DIRによる輪郭の変形精度を示しており、別患者間を含めたデータと同様の傾向にあった。左下の丸で囲まれた点が他の分布と外れているが、これは撮影部位が頭部のみであり脊椎の輪郭が頸部付近で途切れていた影響である。Figure 2bより、RIRでは脊椎の湾曲にずれがあるがDIRにより正しく変形されている。

Figure 1dより、耳下腺において、RIRのDSC値がより高くなるに従いDIRのDSC値も高くなり、一様にDIRによる向上がみられた。しかし、位置ずれが小さくなるほどその向上値が小さくなっている。同一患者間のみでも有意ではなかったが同様の傾向がみられたFigure 2cより、顎の大きさや顔の傾きによる左右耳下腺の位置ずれがDIRにより正しい方向に変形されているが、変形量が小さくまだ変形の余地があるようにみられる。

体幹部のRIRとDIRのDSC値の関係をFig. 3に示す。また、体幹部の各臓器におけるRIR後、DIR後の一例をFig. 4に示す。

Figure 3aより、肺では左右ともにDSC値0.8以上とRIRの結果にかかわらず高いDIR精度が得られた。上限値は1.0であった。同一患者間においてもDSC値0.9以上と非常に高い精度を示し、DIRによる高い向上が得られた。Figure 4aより、RIRでは肺の大きさが大きく異なるが正確にDIRされている。

Figure 3bより、肝臓ではDSC値0.7以上と高いDIR精度が得られRIRの結果にかかわらず高精度であった。上限値はほぼ1.0であった。Figure 4bより、RIRでは形状が大きく異なるがDIRにより正しい方向に変形されている。しかし、腸による影響で誤って変形されている部分がみられる。

Figure 3cより、腎臓ではRIRのDSC値が高くなるほどDIRのDSC値も高くなり一様にDIRによる改善がみられた。同一患者間のみに注目するとDSC値0.8以上と高いDIRによる輪郭変形精度を示した。両腎とも有意ではなく、回帰直線の傾きは右腎で-0.342、左腎で0.270であった。Figure 4bより、両腎とも腸や血管などの周囲の影響により誤ってDIRされていることがわかる。

Figure 3dより、直腸ではDSC値0.3~0.7と低いDIR精度を示した。同一患者間のみに注目するとDIRによる輪郭変形精度は0.8未満と高精度とはいえない。有意ではなく回帰直線は平行に近く、その傾きは0.182であった。Figure 4cより、直腸の大きさや形

状が大きく異なり、DIRにより改善されていないことがわかる。

Figure 3dより、膀胱ではRIRのDSC値が高くなるほどDIRのDSC値も高くなっており、一様にDIRによる向上がみられた。同一患者間のみでは0.6~0.8と高精度ではない。Figure 4cより、膀胱の位置が大きくなるがDIRにより修正されている。しかし、腸の影響を受けている部分がみられる。

各臓器のRIRからのDIRのDSC値の向上をTable 2に示す。RIRのDSC値0.6のときに0.20以上の向上が得られた臓器は両眼球、両肺、肝臓であった。これらの臓器はRIRのDSC値0.6からDIRにより高精度0.8までの向上が得られたといえる。また脊椎、両耳下腺、膀胱、両腎はDIRにより向上が得られた。直腸はDIRによる向上を得られなかった。両耳下腺、脳幹は有意ではなかったため向上値を算出することができなかった。また、脊椎、右肺、膀胱では同一患者間においても有意であり、特に右肺はRIRのDSC値0.6のときに0.30、DSC値0.8のときに0.14の向上が得られた。

3. 考 察

RIRとDIRの関係について今回対象とした臓器で両眼球、脳幹、両肺、肝臓はDIRによるDSC値が0.7以上でありこれ以上の輪郭変形精度が望めない上限値が確認できた、もしくはRIRのDSC値が0.6のときにDIRにより高精度となる0.2以上の改善があり高精度な変形結果が得られた。球のように形状が単純であるものや臓器境界が明瞭なもの、体積が大きく位置の変動が小さいものでありRIRの結果に関係なく、変形が容易であることが理由として挙げられる。Kumarasiriら¹⁵⁾は頭頸部臨床画像を用いてDIRによる輪郭伝播を四つの市販のアルゴリズムで評価し、右眼球で0.84~0.88、左眼球で0.81~0.89、脳幹で0.74~0.78とDSC値0.7以上の結果となった。Hardcastleら¹⁶⁾は三つのアルゴリズムを用いて胸部のDIR評価を行い両肺でDSC値が0.96~0.97であった。Leeら¹⁷⁾は再発肝細胞癌患者を対象に反復して行われるstereotactic body radiation therapyの安全性を評価するためDIRを使用し、肝障害のリスクを評価した。Intensity basedアルゴリズムを用いた肝臓のDSC値の平均はRIRで0.87、DIRで0.93程度であった。関連研究論文^{15~17)}の結果からも、各臓器のDSC値は0.7以上と高い値となり、同様の結果が得られた。

脊椎、耳下腺、両腎、膀胱はRIRのDSC値がより高くなるほどDIRのDSC値も高くなった。これらの臓

Fig. 1 The relation between DSC from the RIR results and DSC from the DIR results for head and neck cases.

(a) Eye balls, (b) Optic nerves, (c) Brain stem and spinal cord, (d) Parotid glands

The data in the circle on the graph were calculated using pairs of cases who had a large difference in the length of delineated spinal cords.

Fig. 2 Example images after RIR and DIR in the head and neck.

(a) Right eye ball and right optic nerve, (b) Brain stem and spinal cord, (c) Parotid glands

Fig. 3 Relation between DSC from the RIR results and DSC from the DIR results for the chest, abdomen and pelvis.
(a) Lungs, (b) Liver, (c) Kidneys, (d) Rectum and bladder

(a) Lungs

(b) Liver, kidneys

(c) Rectum, bladder

Fig. 4 Example images after RIR and DIR for the chest, abdomen and pelvis.
(a) Lungs, (b) Liver and kidneys, (c) Rectum and bladder

Table 2 Improvement in DSC

DSC value of RIR	All patients		Only same patient	
	0.6	0.8	0.6	0.8
Right eye ball	0.36	0.20	–	–
Left eye ball	0.21	0.06	–	–
Right optic nerve	–	–	–	–
Left optic nerve	–	–	–	–
Brain stem	–	–	–	–
Spinal cord	0.15	0.09	0.08	0.10
Right parotid	0.13	0.03	–	–
Left parotid	0.12	0.02	–	–
Right lung	0.31	0.15	0.30	0.14
Left lung	0.30	0.15	–	–
Liver	0.22	0.10	–	–
Right kidney	0.08	0.05	–	–
Left kidney	0.09	0.07	–	–
Rectum	–0.03	–0.14	–	–
Bladder	0.16	0.15	0.12	0.06

器の特徴として大きさや形状、位置が変動しやすいことが挙げられる。それゆえ別患者間と比べ同一患者間ではずれ量が小さいため、高い DIR による輪郭変形精度が得られやすいと考える。Woerner ら¹⁸⁾ は頭頸部、前立腺および膀胱の三つの部位での CT-CBCT 間の DIR 輪郭伝播精度を評価し RIR, DIR の DSC 値がそれぞれ脊髄で 0.75, 0.80, 右耳下腺で 0.70, 0.72, 左耳下腺で 0.78, 0.78, 右腎で 0.83, 0.85, 左腎で 0.81, 0.83, 膀胱で 0.72, 0.83 程度であり高くはないが DIR により改善がみられ、本研究と同様の結果となった。

女性骨盤の直腸は DIR による向上がみられなかった臓器であり、便やガスによって位置や形状、大きさが大きく異なり、RIR の方がよい DSC 値となった。Zambrano ら¹⁹⁾ は女性骨盤を対象に独自に開発した featurelet-based method²⁰⁾ と iPlan[®] BrainLab treatment planning system ソフトウェアに含まれる iPlan method の二つのアルゴリズムを用いて DIR による輪郭変形の評価を行ったが、女性骨盤における DSC 値が featurelet-based method において RIR 0.62, DIR 0.63, iPlan method においてそれぞれ 0.61, 0.57 であり大きな改善がみられなかった。男性骨盤部の直腸における DIR による輪郭変形の DSC 値として、Anaya ら²¹⁾ は RIR で 0.67n Ana, DIR で 0.69n Ana, Woerner ら¹⁸⁾ は RIR で 0.75, DIR で 0.76 程度と少しの向上がみられた。男性直腸も女性直腸と同様に DIR による向上が小さくガスや便などの影響により同一患者においても臓器位置が日によって異なり、正確な変形が行

うことができていないと考えられる。

両眼球において、RIR からの DIR の輪郭変形の向上が右眼球で低精度な場合で 0.36 の向上、高精度な場合で 0.20 の向上が得られた。左眼球でもそれぞれ 0.21 と 0.06 の向上が得られ、RIR で低精度なほうが DSC の向上が大きく DIR の容易さを示唆している。また同一患者間では、位置ずれが少なく DSC 向上範囲が狭くなっている結果である。つまり、臓器により若干の値の違いはあるが、DIR の DSC 値には上限値があるといえる。眼球のほかにも DIR により高精度な結果を得られた脳幹、肺、肝臓においても同様である。Kumarasiri ら¹⁵⁾ によると DIR による DSC 値が高い臓器の特徴として体積が大きく、境界が明確なものが挙げられる。両眼球は境界が明確であり、精度よく DIR されるが体積が小さく少しのずれが DSC 値に大きく影響されるため上限値が 1.0 に満たずに 0.95 程度になったと考える。脳幹は位置ずれが小さく形状も似ているが、境界が明瞭ではないため完璧な変形にいたらず上限値が 0.9 になった。肺や肝臓は体積が大きいため輪郭の少しのずれは DSC 値へ影響しにくい。そのため上限値 1.0 のほぼ完璧な変形が可能となると考える。また、視神経は体積が小さく細長い形状をしているため RIR がどのような結果であっても低い輪郭変形精度を示した。Kumarasiri ら¹⁵⁾ は DIR 結果を右視神経で 0.39~0.47, 左視神経で 0.39~0.64 と報告している。本研究の結果と比較しても同様の結果とみられ上限値を 0.8 程度と考える。

これらの結果より、各臓器によって RIR からの DIR による輪郭変形の向上に特徴がみられ、RIR の結果から DIR の輪郭変形精度を予測できるといえる。

研究のリミテーションとして、本研究で用いた骨盤症例は女性のみである。男性骨盤の場合に異なる結果になる可能性もある。DIR ソフトに関しても MIM Maestro のみを用いて研究を行っているため、他のソフトを用いた場合異なる結果となる可能性がある。また、Demons algorithms では別患者間においても十分な臓器輪郭評価が可能という文献^{9~12)}が存在するが、今回用いた MIM Maestro においても同様であるかは確かではなく別患者間における RIR の DSC 値が低い領域では信頼性が低下する可能性がある。

4. 結 語

本研究では、同一患者や別患者間で RIR、DIR を行い、RIR を基準として DIR による registration の臓器輪郭変形精度向上を検討した。両眼球、脳幹、両肺、肝臓といった形状が単純であるものや体積が大きく位置の変動が小さいものは、RIR の結果にかかわらず DSC 値 0.7 以上の高い DIR 輪郭変形精度を示し、DIR が非常に DSC の向上に効果的な臓器として分類でき

ることがわかった。これらの臓器には DIR による上限値が確認され、両眼球で 0.95、脳幹で 0.90、両肺と肝臓で 1.0 となった。神経、脊髄、両腎、膀胱などの大きさと形状、位置が変動しやすい臓器は RIR での位置ずれが小さくなるに従い、高い DIR 輪郭変形精度を示した。直腸は位置や形状、大きさが大きく異なり、周囲の便やガスにより誤って変形される恐れがあり DSC の向上に効果的でないといえる。

今回の検討により、RIR の結果から各臓器の DIR による輪郭の変形精度を予測でき、臨床において DIR が適切な精度を持って画像変形したかどうかを判断する一つの指標になると考える。

謝 辞

本研究に際しご指導いただいた金沢大学の武村哲浩教授に感謝申し上げます。また、本研究にご協力してくださいました皆様に深く感謝いたします。

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) 日本放射線腫瘍学会 編. 放射線治療計画ガイドライン 2012 年度版. 金原出版, 東京, 2013; 22-23.
- 2) Sharp MB, Michael Velec, Brock KK, et al. 12 Image registration and segmentation in radiation therapy. Image-guided radiation therapy. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2012: 203-223.
- 3) X. Allen Li. Adaptive Radiation Therapy. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- 4) Nie K, Pouliot J, Smith E, et al. Performance variations among clinically available deformable image registration tools in adaptive radiotherapy-how should we evaluate and interpret the result?. J Appl Clin Med Phys 2016; 17(2): 328-340.
- 5) 日本放射線腫瘍学会 QA 委員会 DIR ガイドラインワーキンググループ. III. 3. 線量合算. 放射線治療における非剛体画像誘導レジストレーション利用のためのガイドライン 2018 年版 略称: DIR ガイドライン 2018. 2018; 22-25.
- 6) Kadoya N, Miyasaka Y, Yamamoto T, et al. Evaluation of rectum and bladder dose accumulation from external beam radiotherapy and brachytherapy for cervical cancer using two different deformable image registration techniques. J Radiat Res 2017; 58(5): 720-728.
- 7) Castillo E. Quadratic penalty method for intensity-based deformable image registration and 4DCT lung motion recovery. Med Phys 2019; 46(5): 2194-2203.
- 8) Monti S, Pacelli R, Cella L, et al. Inter-patient image registration algorithms to disentangle regional dose bioeffects. Sci Rep 2018; 8(1): 4915.
- 9) Acosta O, Dreon G, Ospina JD, et al. Voxel-based population analysis for correlating local dose and rectal toxicity in prostate cancer radiotherapy. Phys Med Biol 2013; 58(8): 2581-2595.
- 10) Palma G, Monti S, D'Avino V, et al. A voxel-based approach to explore local dose differences associated with radiation-induced lung damage. Int J Radiat Oncol Biol Phys 2016; 96(1): 127-133.
- 11) Monti S, Palma G, D'Avino V, et al. Voxel-based analysis unveils regional dose differences associated with radiation-induced morbidity in head and neck cancer patients. Sci Rep 2017; 7(1): 7220.
- 12) 日本放射線技術学会 中部支部. 第 10 回中部放射線医療技術学術大会抄録集. 2017.
- 13) Taha AA, Hanbury A. Metrics for evaluating 3D medical image segmentation: analysis, selection, and tool. BMC Med Imaging. 2015; 12, 29.
- 14) Dice LR. Measures of the amount of ecologic association between species. Ecology 1945; 26(3): 297-302.
- 15) Kumarasiri A, Siddiqui F, Liu C, et al. Deformable image registration based automatic CT-to-CT contour propagation for head and neck adaptive radiotherapy in the routine clinical setting. Med Phys 2014; 41(12): 121712.
- 16) Hardcastle N, van Elmpt W, De Ruyscher D, et al. Accuracy of deformable image registration for contour propagation in adaptive lung radiotherapy. Radiat Oncol 2013; 8: 243.
- 17) Lee S, Kim H, Ji Y, et al. Evaluation of hepatic toxicity after repeated stereotactic body radiation therapy for recurrent hepatocellular carcinoma using deformable image registration.

- Sci Rep 2018; 8(1): 16224.
- 18) Woerner AJ, Choi M, Harkenrider MM, et al. Evaluation of deformable image registration-based contour propagation from planning to cone-beam CT. *Technol canter Res Treat* 2017; 16 (6): 801-810.
 - 19) Zambrano V, Furtado H, Fabri D, et al. Performance validation of deformable image registration in the pelvic region. *J Radiat Res* 2013; 54 (Suppl 1): i120-i128.
 - 20) Zambrano V, Fabri D, Stock M, et al. P0-0865 A phantom study for the validation of an in-house deformable registration algorithm for dose accumulation. *Radiother Oncol* 2012; 103 (1): S338-S339.
 - 21) Anaya VM, Fairfoul J. Assessing the feasibility of adaptive planning for prostate radiotherapy using Smartadapt deformable image registration. *Med Eng Phys* 2019; 64: 65-73.

付録

DIR データベース (Deformable image registration-database)

URL: <https://takemuralab.net/dirdb2/>

金沢大学武村研究室ホームページ (<https://takemuralab.net/>) が公開しているデータベースであり, DIR の臨床研究において最初の課題となる画像確保を助け, DIR 研究の推進を目的としている. 2019 年 11 月現在で頭頸部 11 例, 胸部 16 例, 腹部 7 例, 骨盤部 8 例, 密封小線源治療 6 例, デジタルファントムが公開されている.

問合せ先

〒920-0942 金沢市小立野 5-11-80
金沢大学医薬保健研究域保健学系 武村哲浩