

肝動脈での roadmap 機能における横隔膜位置を用いた呼吸性移動の補正手法の信頼性評価

武村 哲浩[†], 三井 渉^{††}, 茶島 光浩^{††}, 飯田 泰治^{††},
奥村 悠祐^{†††}, 鈴木 正行[†], 原内 一^{††††}

[†]金沢大学医薬保健研究域保健学系 〒920-0942 石川県金沢市小立野 5-11-80

^{††}金沢大学附属病院放射線部 〒920-8641 石川県金沢市宝町 13-1

^{†††}石川県済生会金沢病院放射線科 〒920-0353 石川県金沢市赤土町ニ 13-6

^{††††}川崎医療短期大学放射線技術科 〒701-0194 岡山県倉敷市松島 316

(2009年7月28日受付, 2009年10月1日最終受付)

Reliability of the roadmap technique with the respiratory motion compensation using hemi-diaphragm position for hepatic arteries

Akihiro TAKEMURA[†], Wataru MITSUI^{††}, Mitsuhiro CHABATAKE^{††}, Hiroji IIDA^{††},
Yusuke OKUMURA^{†††}, Masayuki SUZUKI[†] and Hajime HARAUCHI^{††††}

[†]Faculty of Health Sciences, Institute of Medical, Pharmaceutical and Health Sciences, Kanazawa University
5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa 920-0942, Japan

^{††}Kanazawa University Hospital

13-1 Takaramachi, Kanazawa, Ishikawa 920-8641, Japan

^{†††}Ishikawa Saiseikai Kanazawa Hospital

Ni 13-6 Akado, Kanazawa, Ishikawa 920-0353, Japan

^{††††}Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

316 Matsushima, Kurashiki, Okayama 701-0194, Japan

(Received on July 28, 2009. In final form on October 1, 2009)

Abstract: Miss-placement of arteries while using the roadmap technique in endovascular interventions for abdominal arteries occurs because of respiration. It has been reported that abdominal arteries move mainly in a superior-inferior direction and that diaphragm position helps to compensate for the miss-placement. We investigated the reliability of a roadmap technique with respiratory motion compensation that used diaphragm positions to cancel out any miss-placement of the hepatic arteries. From three patients, we obtained five pairs of fluoroscopic sequences and digital subtraction angiography (DSA) images. The coordinates of the right hemi-diaphragm and a micro guide-wire tip were noted for every frame of the fluoroscopic sequence along with the coordinates of the right hemi-diaphragm on the DSA image. The micro guide-wire tip coordinates were corrected using the difference of the Y coordinate values from both hemi-diaphragms. The tip positions that were successfully placed on arteries in the DSA image were counted and the success rate calculated. Mean success rates for two cases were over 90%, though that for the other was under 10%. The results indicate that reliability of the roadmap technique with respiratory motion compensation depends on the particular case. However, this method could stabilize the micro guide-wire tip position.

Key words: Roadmap, Reliability, Hepatic artery, Respiratory motion compensation, Diaphragm motion

1. はじめに

血管造影検査や血管内手術においてカテーテルやガイドワイヤのナビゲーション機能として roadmap 機能が使われている。頭部など動きのない部位では、回転 RA からの3次元再構成により装置の透視角度にも追従する3次元 roadmap が可能になっている[1]。しかし、肝臓への経血管動脈塞栓術 (TAE) など血管内手術の施行が多い上腹部では、呼吸により大きく臓器や血管が移動するため、実際の血管位置と roadmap で示される血管の位置とズレが生じる。roadmap 機能は撮影中の透視画像と造影剤を注入し撮影した画像もしくは透視画像の一部を用いて画像間演算し撮影中の透視画像に血管像を重ねる。血管像の画像は息止めもしくはある呼吸位相で撮影された画像のため、それによる

roadmap 画像もある一時期の呼吸位相のときにしか実際の血管位置と血管像は一致しない。

呼吸による上腹部血管の動きを補正することが出来れば、肝臓に対する血管内手術などでの roadmap ナビゲーションにおいてこのようなズレを抑えることができ、より良いナビゲーションを行うことができることとなる。

補正方法を検討する上で問題となる腹部臓器の呼吸性移動の解析は、放射線治療の分野で良く行われている。Clifford MA らによる review article[2]では、いくつかの呼吸による肝臓の動きや肝内の腫瘍の動きを調べた論文を紹介しまとめている。

それによると、いくつかの論文[3, 4]では肝臓自体の動きは横隔膜の動きによる上下動 (約 10 mm-20 mm 程度) が主であると報告されたが、別の論文[5, 6]では内部の腫

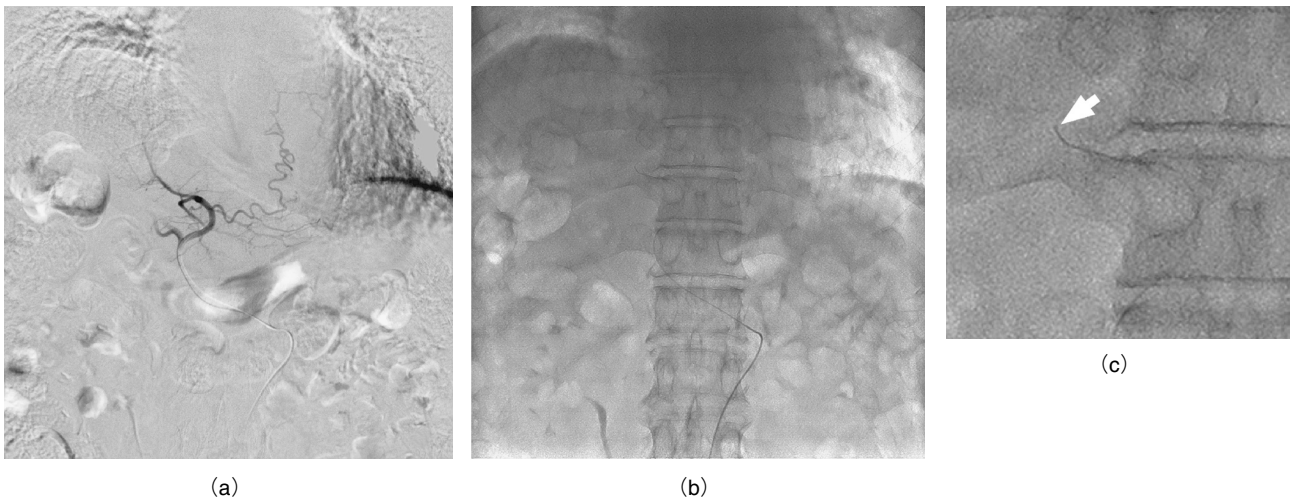


Fig.1 Digital subtraction angiography image and fluoroscopic image with a micro guide-wire. (a) a DSA image, (b) a frame of fluoroscopy, and (c) the magnified image of the image (b) which includes micro guide-wire tip (white arrow).

瘍は肝臓の変形により 5 mm 程度前後左右にも動くとも報告され、統一されない。また、手術により膵臓に付けられたクリップを X 線シミュレーターによる透視で確認しその動きを調べた論文[7]では、上下動は約 5-10 mm 程度で最大で約 7-18 mm、前後動は 2.5-7 mm で最大約 4-9 mm 程度とされた。腹部血管では、Draney MT らが腎動脈のみではあるがその呼吸性の動きを解析し、上下前後動は 1 mm 程度大きくても 2.5 mm としている[8]。

我々は呼吸をしながら撮影された血管造影画像から呼吸による血管の動きを解析した[9]。その解析では、腹腔動脈や肝動脈の動きはほぼ上下動であり、左右どちらかの横隔膜頂点の動きに一致しているため、横隔膜頂点の位置で補正できることが示唆された。

本研究では、横隔膜頂点の位置による上腹部血管の呼吸性移動に対する補正法を roadmap の呼吸性移動補正方法として使用した際の信頼性について、肝動脈の血管造影画像と同検査中に撮影された透視画像を用いて評価を行った。

2. 対象および方法

血管造影検査が行われた 3 症例から、digital subtraction angiography (DSA) 画像とその直前に撮影された透視画像を取得した。DSA 画像は、造影剤をカテーテルを通して血管に注入し撮影した画像から、造影剤を注入直前の画像を差し引いた画像である。これら注入前後の撮影は一連の撮影として行われ、理論的には造影剤が入った部分のみ写し出される (Fig.1(a))。血管造影画像と透視画像の画像セットは合計 5 セット用いた。症例は 68 歳女性、68 歳女性、80 歳男性であった。それぞれの症例で使用されたマイクロカテーテルは Meister Cath 2.7F (メディキット株式会社、東京)、プログレード α 2.0F (TERUMO、東京)、Carry Win 1.8F (株式会社ユー・ティー・エム、愛知) であり、マイクロガイドワイヤーは全症例ラジオフォーカスガイドワイヤー M 0.016 inch (TERUMO、東京) であった。

取得した DSA 画像は全て 1024×1024×8 bits 画像であり、照射野も全て 298×298 mm² である。DSA 画像は、3 f/s で撮影されたシーケンス画像のうち動脈相の 1 フレームを roadmap 用の血管像として使用した (Fig.1(a))。撮影条件は全て自動であり、管電圧は 82-86 kV、管電流は 125-320 mA、パルス幅は 35.4-49.3 msec であった。

透視画像は、同様に 1024×1024×8 bits 画像であり、照射野も全て 298×298 mm² である (Fig.1(b))。フレームレ-

率は全て 15 f/s であり、撮影条件は管電圧は 70 もしくは 80 kV、管電流は 78-116 mA、パルス幅は 4.56-9.61 msec であった。透視画像のフレーム数は 58-300 フレームであり、それぞれ 1 回から 2.5 回の呼吸周期が含まれている。

2.1 信頼性評価

信頼性評価として、DSA 画像と透視画像の横隔膜頂点位置を合わせ、DSA 画像上の補正されたマイクロガイドワイヤーの先端位置座標を求めた。補正されたマイクロガイドワイヤーの先端位置座標が DSA 画像の血管像上にある場合を成功とし、透視画像全フレームのマイクロガイドワイヤー位置で同様に処理・判断しその成功率を求め評価した。また、横隔膜の位置 (高さ) や動きのスピードによる成功率への影響を確認した。

評価にあたり、まず透視画像のフレームごとに画像上のマイクロガイドワイヤーの XY 座標値 X_{fg} , Y_{fg} を手動計測により求めた。マイクロガイドワイヤー先端は約 2 pixel 幅であるが、認識するのに十分なコントラストを有している。そのため拡大することで正確に計測することが可能である (Fig.1(c))。計測には National Institutes of Health により開発配布されている画像処理ソフト Image J を用いた。今回の 3 症例はいずれも肝臓を対象とした血管造影検査であったため固有肝動脈あたりに位置したマイクロガイドワイヤーとなっている。そのため、横隔膜頂点の位置も、右横隔膜にて計測を行い Y 座標値 Y_{fd} を求めた。横隔膜位置計測では、Image J の解析用ライン選択ツールを用い、ラインを画像に対して水平に引き、そのラインを上下させ横隔膜に接した位置の Y 座標を得た (Fig.2)。DSA 画像でもわずかなミスレジストレーションにより横隔膜が判別できるため、同様に右横隔膜頂点位置 Y_{ad} を求めた。いずれの座標値の計測も画像を十分拡大し注意深く行った。また、座標値の原点は画像の左上角となる。

血管造影画像および透視画像の右横隔膜の Y 座標から、式 1 のようにマイクロガイドワイヤー先端位置の Y 座標を補正する。

$$Y'_{fg} = Y_{ad} + Y_{fg} - Y_{fd} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Y'_{fg} は補正後のマイクロガイドワイヤーの Y 座標である。最終的に X_{fg} , Y'_{fg} が補正後のマイクロガイドワイヤーの位置となる。

評価では、この X_{fg} , Y'_{fg} が DSA 画像で血管像の上に位置

されれば成功とした。補正後のマイクロガイドワイヤの位置が血管像上であるかどうかの判断はその位置 (X'_{fs}, Y'_{fs}) の画素値により判断した。判断には DSA 画像全体の画素値の平均 M とその標準偏差 SD を求め、閾値を $M-2 \times SD$ とし、座標 (X'_{fs}, Y'_{fs}) の画素値がその閾値以下であるなら血管像上であると判断した。ただし、今回使用した DSA 画像は、血管像は黒く表示され画素値は低い値となる。

横隔膜の位置、つまり吸気時もしくは呼気時により成功率が異なるかを調べるため、透視画像の各シーケンスで、シーケンス内における右横隔膜の Y 座標の最大値および最小値からその中間値を求めた。中間値以上の Y 座標値を持つフレームを吸気時とし、逆に中間値未満を呼気時として分類し呼気時、吸気時で成功率を求めた。

成功率に対する横隔膜の動きのスピードの影響を調べるため、右横隔膜 Y 座標のフレーム間の差を求め、1 フレームあたり 4 pixel (約 1.16 mm) 以上移動した場合を呼吸性移動が早い時期、4 pixel 未満を遅い時期として分類して成功率を求めた。この 4 pixel 以上の移動があるフレームは全体の約 17% 程度しかなく、また手動で計測しているため実際は横隔膜が動いていなくても 1, 2 pixel の変動はあり得る。そのため、4 pixel を区切りとした。

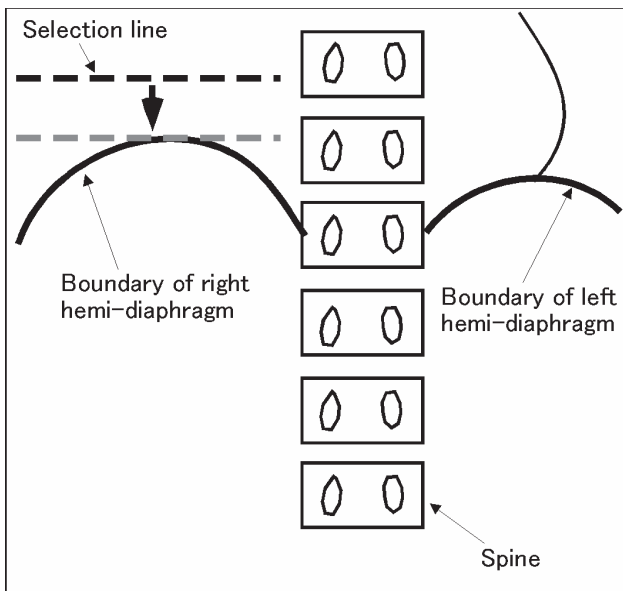


Fig.2 Schematic image of diaphragm position measurement. A selection line is moved to the boundary of right hemi-diaphragm to obtain a Y coordinate value.

3. 結果

全症例の透視画像シーケンスごとの成功率を Table 1 に示す。Case A, B に関しては 90% 以上の成功率を示しているが、case C に関しては 5.9% とした。シーケンス別に見ても case C に関しては良い方で 7% の成功率であり、case C のみ極端に成功率が低くなっている。

呼気時、吸気時に分けた際の成功率は、どのシーケンスでも呼気時の方がよい傾向にあり (Table 2), 全シーケンスの成功率の平均値においても呼気時 59.4%, 吸気時 54.2% と同様であった。ただし、 t -検定による有意差検定では有意差は得られなかった ($p > 0.05$)

横隔膜の動きの早さで分類した結果は、例えば case B のように同じ症例においてもシーケンスにより早いほうがよい成功率であったりその逆であったりするため、明確な違いはなかった (Table 2)。成功率の平均値においては、動きの速いフレームが 63.1% 動きの遅いフレームが 58.3% で 5% 程度動きの速い際に成功率は上がったが、 t -検定による有意差は得られなかった ($p > 0.05$)。

4. 考察

Case A および B に関しては 90% 以上の成功率を示し信頼性高い結果となった。しかし、Case C では全く逆の 10% にも満たない成功率であり、全ての症例に対して高い信頼性があるとは限らない結果となった。

Case C の 1 シーケンス目では、Fig.3(b) にも表されているように、補正後のマイクロガイドワイヤ先端位置は血管の右上に位置している。また、Fig.3(a) の補正前のマイクロガイドワイヤの先端位置は、最上位置を基準とすると右下方向に移動している。この 1 シーケンス目では、 X 座標値の変化は、最大値-最小値間で 40 pixel (約 11.6 mm) である。ただし、終わり 24 フレームはガイドワイヤが引

Table 1 Success rates for sequences and cases

Case	Age/gender	Number of frames	Success rate (%)	
			sequence	case
A	68/F	296	92.6	92.6
B	68/F	150	90.7	94.7
		150	98.7	
C	80/M	130	5.4	5.9
		57	7.0	

Table 2 Success rates for respiration and diaphragm velocity

Case	Respiration		Diaphragm velocity	
	Expiration	Inspiration	≥ 4 pixel/f	< 4 pixel/f
A	93.4% (197/211)	90.6% (77/85)	76.9% (20/26)	94.1% (253/269)
B	92.3% (108/117)	84.8% (28/33)	93.3% (42/45)	89.4% (93/104)
	97.5% (119/122)	89.3% (25/28)	95.1% (39/41)	96.3% (104/108)
C	6.7% (17/105)	0.0% (0/25)	0.0% (0/18)	6.3% (7/111)
	7.3% (3/41)	6.3% (1/16)	50.0% (1/2)	5.6% (3/51)
Mean	58.90%	59.40%	63.10%	58.30%
SD	47.9	46.7	39.6	47.9

alues in parentheses : correct frames/all frames
SD : standard deviation

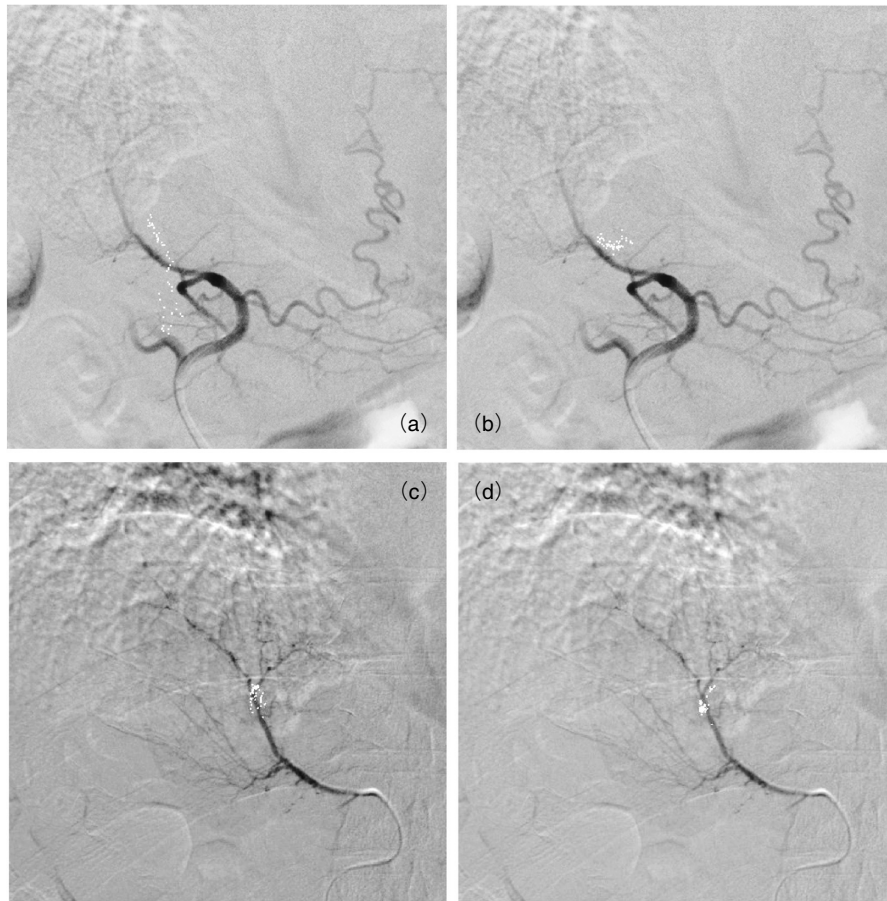


Fig.3 DSA images with uncorrected and corrected micro guide-wire tip positions
 White dots in the images are micro guide-wire tip positions. Images on left side show the micro guide-wire tip positions without respiratory motion compensation, and images on right side show these with respiratory motion compensation. The top images are for the first sequence (130 frames) of Case C and the bottom images are for the second sequence (57 frames). The micro guide-wire positions in images on left side move about because of respiration ; those in images on right are stable.

き抜かれ大きく移動しているためそれらのフレームを除いた。それに対し、Case B の2シーケンスではX軸方向6-7 pixel (1.75-2.0 mm)しか動かない。そのため、Case C ではこのX方向の移動が成功率に影響したと考える。

Case C の2シーケンス目では、X軸方向の動きは最大17 pixel (約4.9 mm)と1シーケンス目と比べ横隔膜の上下動の範囲が小さい分だけX軸方向の動きは小さいがCase B よりは大きい動きとなっている。またさらに、Case C の2シーケンス目においては、マイクロガイドワイヤが挿入されている血管の幅が他のシーケンスと比べ狭い。他のシーケンスではマイクロガイドワイヤが挿入されている血管の直径は8 pixel (約2.3 mm)以上あるが、このシーケンスでは3 pixel程度 (約0.98 mm)であり半分以下である。我々の以前の研究では腹部血管はX軸方向にも2mm程度の動くと報告しており[9]、2 mm幅程度の血管では無視しえるとした。しかし、このCase CのようにX軸方向に良く動く場合に限らず、1 mm程度の血管幅では、Y軸方向のみ補正する本法の限界である。

Case Cのように成功率に影響を及ぼすX軸方向の動きの原因は明確ではない。Case A, BとCase Cの違いとしては、性別と年齢が挙げられるが、性別による呼吸形式の違いやもしくは体格や年齢等により異なる可能性もある。この原因を判断するには、今後症例を増やして評価する必要がある。

呼吸時期の違いによる結果や横隔膜の移動速度の違いによる結果からは有意な差が得られなかった。成功率が極端に低いCase Cを外れ値として検定からはずしたとしても同様であり、実際にこれらによる影響はないと考える。

Case Cでは悪い成功率となったが、補正前と補正後のマイクロガイドワイヤ位置を確認すると、DSA画像の血管位置から全体的にずれてはいるが、補正前より集約されている (Fig.3(b), Fig.3(d))。成功率は低い値となったが、呼吸周期による位置ずれが少なく表示でき、血管造影のナビゲーションとしては有用な補正手法であると言える。

4. 結論

Roadmap機能に対する横隔膜位置を用いた呼吸性移動の補正方法は、3症例のうち2症例にて90%を超える成功率を示し、かつ、呼吸時期の違いや横隔膜の動きの早さに影響されず2例においては高い信頼性を示した。成功率の低い症例においても、マイクロガイドワイヤの先端位置が補正前よりも集約しており、成功率が低くてもroadmap機能に対し有用であることが示唆された。また、この成功率が悪くなった原因のX軸方向の動きに関して、その要因を明らかにするには今後症例数を増やし検討する必要がある。

謝 辞

この研究は、文部科学省科学研究費（若手研究(B) 19700417) の助成を受けた。

参考文献

- [1] Soderman M, Babic D, Homan R, et al. : 3D roadmap in neuroangiography : technique and clinical interest, *Neuro-radiology*, 47, 735-740, 2005.
- [2] Clifford MA, Banovac F, Levy E : Assessment of hepatic motion secondary to respiration for computer assisted interventions, *Comput Aided Surg.*, 7, 291-299, 2002.
- [3] Korin HW, Ehman RL, Riederer SJ, et al : Respiratory kinematics of the upper abdominal organs : A quantitative study, *Magn Reson Med*, 23, 172-178, 1992.
- [4] Davies SC, Hill AL, Holmes RB, et al : Ultrasound quantitation of respiratory organ motion in the upper abdomen, *Br J Radiol*, 67, 1096-1102, 1994.
- [5] Shimizu S, Shirato H, Aoyama H, et al : Highspeed magnetic resonance imaging for four-dimensional treatment planning of conformal radiotherapy of moving body tumors, *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 48, 471-474, 2000.
- [6] Rohlfing T, Maurer CR, O'Dell WG, Zhng J : Modeling liver motion and intensity-based free-form registration of gated MR images, *Proceedings of SPIE*, 4319, 337-348, 2001.
- [7] Gierga DP, Chen GTY, Kung JH : Quantification of respiration-induced abdominal tumor motion and its impact on IMRT dose distributions, *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 58, 1584-1595, 2004.
- [8] Draney MT, Zarins CK, Taylor CA : Three-dimensional analysis of renal artery bending motion during respiration, *J Endovasc Ther*, 12, 380-386, 2005.
- [9] Takemura A, Suzuki M, Sakamoto K, et al : Analysis of respiration-related movement of upper abdominal arteries –preliminary measurement for the development of a respiratory motion compensation technique of roadmap navigation–, *Radiol Phys Technol*, 1(2), 178-182, 2008.