

体表面レジストレーションの導入による 手術ナビゲーションシステム運用の改善

Improvement of a surgical navigation system

by applying anatomical point-based registration on skin surface

○ 植松美幸 (国立衛研) 坂本怜 (早大院) 許家群 (早大院)
市橋琢弥 (早大) 梅津光生 (早大) 青見茂之 (女子医大)
中村亮一 (千葉大院) 鈴木孝司 (女子医大) 村垣善浩 (女子医大)
伊関洋 (女子医大)

Miyuki UEMATSU, National Institute of Health Sciences

Rei SAKAMOTO Chia-chun HSU, Takuya ICHIHASHI, Mitsuo UMEZU, Waseda University

Shigeyuki AOMI, Tokyo Womens' Medical University

Ryoichi NAKAMURA, Chiba University

Takashi SUZUKI, Yoshihiro MURAGAKI, Hiroshi ISEKI, Tokyo Womens' Medical University

Key Words: surgical navigation system, registration, aortic aneurysm

1. はじめに

われわれは大動脈瘤手術を対象にしたナビゲーションシステムの開発をおこなってきた[1]. 初期のシステムでは局所画像のみを用いたナビゲーションを行い、医師からも好評を得た[2]. しかし、画像空間と手術空間を一致させるためのレジストレーション作業において体内の特徴点探索にスキルを要した. 近年は開胸前に大局画像を用いたナビゲーションを行うことで、体表上から体内の骨や血管の位置関係を大まかに把握できるようにしている.

システム開発当初は画像の精度を考慮し、肋間動脈などの位置や形状の情報は局所画像を用いることを原則とした[3]. そこで、大局ナビゲーションの導入後も局所画像と大局画像の併用によるナビゲーションを行っていた[4]. 現在では画像精度の向上により、大局画像でも肋間動脈の描出が可能となり、ナビゲーションも大局画像でのナビゲーションへの一本化を図っているところである[5].

本ナビゲーションシステムのコンセプトは手術経験の少ない医師が使用しても十分設定することができ、有用な情報が呈示されることで、手術中の状況確認ができることである. ここで、有用な情報とは大動脈を人工血管に置換する際に温存すべき肋間動脈の位置と走行のことである. システムの設定については、レジストレーションに用いる特徴点探索にスキルを要した経緯を踏まえ、開胸前に体表上から選択した骨の解剖学的特徴点を用いることにした.

体表上からの特徴点選択は各点の形状や周辺組織との関係から生じる計測誤差が異なると考えられる. 本稿では、解剖学的特徴点ごとの位置決め誤差を算出するため、1) 解剖学的特徴点の位置認識のしやすさと固定のしやすさ、2) 解剖学的特徴点の誤差傾向の把握について論じる.

2. 方法

2.1 体表面レジストレーション

手術ナビゲーションシステムは手術中の患者の身体的位置をポインティングデバイスで計測したときに、患者自身の画像の中でポインティングデバイスがどの位置にどの方向にあるのか連動して示すことができる. ナビゲーションの正確さは画像空間と手術空間の位置合わせ精度に依存する.

多くの場合、レジストレーションは手術空間に置いた 3

点以上のマーカを基準としている. 手術空間に置いたマーカを画像でも同様に撮影し、一致させる剛体レジストレーションが用いられる. 大動脈手術を対象にした場合、位置合わせ用のマーカを設置し、手術中に画像を撮影することは現実的でない. また、医師のオリエンテーションスキルに依存しない方法をとるため、体表上から骨の特徴ある点をポインティングデバイスで計測することにより、マーカレスのレジストレーションを行う.

レジストレーションでは手術空間の座標系を画像空間の座標系に変換する行列 ${}^Q T_P$ を算出する. 座標系 P と座標系 Q におけるそれぞれの計測点の位置を P_i , Q_i とすると、以下の式における平均誤差 (Average Registration Error: ARE) を最小とする T が求める変換行列 ${}^Q T_P$ である.

$$ARE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - T(Q_i)|^2}$$

(N: 計測点の数, T: 4×4 の変換行列)

臨床における体表面レジストレーションの結果から、解剖学的特徴点ごとに位置決め精度に差があることや、皮下組織厚によって体表面レジストレーションの結果の信頼性が低下することがみられた. 体表面レジストレーションの結果の信頼性を向上させるために、これらの影響について考慮したい. しかし臨床における体表面レジストレーションの結果から計算する誤差は絶対誤差ではない. また臨床という条件下で体表面レジストレーションを行う対象の条件を整えることや繰り返し実験を行うことは困難である. そこで、体表面レジストレーションの評価にあたってはファントムを作成し、誤差傾向の調査を行う.

2.2 解剖学的特徴点の選択

レジストレーションに用いる解剖学的特徴点の候補は以下の 7 点 (左右鎖骨頭, 頸切痕, 胸骨角, 左右腸骨棘, 恥骨稜) とした. これらの点にはそれぞれの骨の位置する部位, 骨の形状や骨の上に存在する皮下組織厚の影響がある. 特徴点の位置する部位は大きく胸部 (①鎖骨頭, ②頸切痕, ③胸骨角), 腹部 a (④腸骨棘), 腹部 b (⑤恥骨稜) にわけられる. これら胸部, 腹部 a, 腹部 b から 1 点ずつを選択し、レジストレーションを行う.

3 実験

作製したファントムを Fig.3.1 に示す. また, 各特徴点の上の皮下組織厚を Table 3.1 に示す事前準備では MDCT での撮影で得られた DICOM 画像を元に赤外線反射球の画像座標系での中心座標と, 評価を行う各解剖学的特徴点の目標点の座標を登録する. また事前に解剖学的特徴点の位置把握を行うため, DICOM 画像から骨格などを抽出した 3 次元画像を作成する.

3.1 解剖学的特徴点の位置認識および固定のしやすさ

胸部の特徴点 3 点 (①鎖骨頭, ②頸切痕, ③胸骨角) について, 下記 2 つに関する質問をする. シェッフエの対比較法によって 2 点の比較を行い, 被験者からの回答を集計する. ここで被験者は 5 名とし, 比較対象の呈示はランダムに行った.

(A) 特徴点の位置の認識

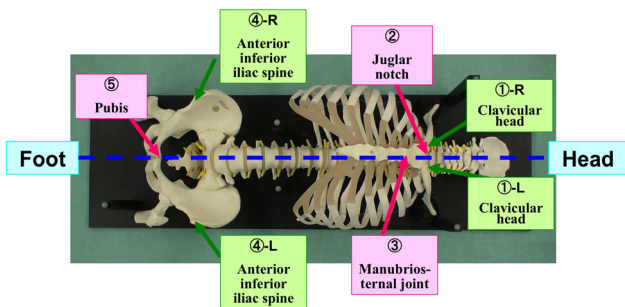
(B) 特徴点上でのポインティングデバイスの固定

3.2 解剖学的特徴点の誤差傾向の把握

実験台に固定したファントムの反射球マーカの位置を光学式位置計測装置 (Polaris®, Northern Digital Inc.) により計測し, DICOM 画像で取得された反射球マーカとの位置を校正する.

被験者に各解剖学的特徴点を呈示し, ポインティングデバイス (Fig.3.2) を用いた計測を行う. ここで, 皮下組織厚モデルを変更しながら行った. 被験者は非医師 12 名とした. 光学式位置計測装置はファントムの右手側に配置し, 計測を行う被験者はファントムの左手側に位置する.

各解剖学的特徴点をポインティングした際の座標とあらかじめ設定したレジストレーション点の座標との差を算出し, 位置決め誤差とした.



①Clavicular head ②Jugular notch ③Manubriosternal joint
④Anterior inferior iliac spine ⑤Pubis

Fig3.1 Registration points

Table 3.1 Experiment condition of tissue thickness

Anatomical specific point	Thickness mm			
	No.1	No.2	No.3	No.4
①Clavicular head	0	3	6	9
②Jugular notch	0	3	6	9
③Manubriosternal joint	0	3	6	9
④Anterior inferior iliac spine	0	5	10	15
⑤Pubis	0	10	20	30

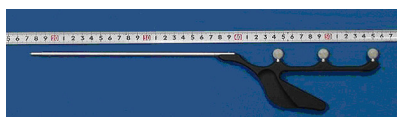


Fig3.2 Pointing device

4 結果および考察

4.1 解剖学的特徴点の位置認識および固定のしやすさ

(A) については, ①鎖骨頭→②頸切痕→③胸骨角の順で位置の認識がしやすいという結果を得た. これは, 比較的鎖骨頭が皮膚上からも見えやすいことから, ①鎖骨頭を探し, その中間に位置する②頸切痕を特定するという流れになるためと考えられる. ③胸骨角については見た目ではわかりづらく, 手探りで見つけていくために位置の認識がしづらかったと考えられる.

(B) については, ③胸骨角→②頸切痕→①鎖骨頭の順でポインティングデバイスの固定がしやすいという結果を得た. これは特徴点の形状に依存すると考えられる. ③胸骨角がほぼ水平の形状の骨に位置するのに対し, ②頸切痕は末端に位置し, さらに①鎖骨頭は曲面上に位置するためと考えられる.

4.2 解剖学的特徴点の誤差傾向の把握

胸部の解剖学的特徴点は腹部と比較し, 皮下組織厚の影響が小さかった. 皮下組織厚の値や変化が小さいためと考えられる. また誤差の方向に関してすべての点で皮下組織厚がある場合, 頭足方向では頭方向に, 背腹方向では腹方向にずれることが多かった.

①鎖骨頭

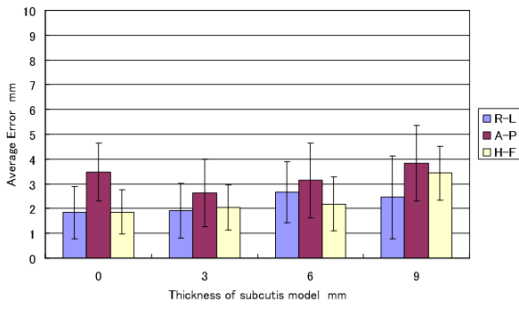
鎖骨頭の臨床と同じ配置で実験を行った結果は Fig3.3 と Fig3.4 で示すように左鎖骨頭の左右方向の誤差が右鎖骨頭と比較大きいものであった. しかし臨床と左右を逆にした配置の場合, 左右方向の誤差に大きな差はなく, 頭足方向の誤差の違いの方が大きい結果となった. このことから鎖骨頭の誤差傾向は左右で等しくないが, 位置が奥側か手前側かということのみで決まるものではないと言える. 鎖骨頭付近は頭足方向の軸に対して斜めになっており, これが術者の立ち位置が変化すると術者から見て左右逆の傾斜になるため, レジストレーション点の搜索に影響することが考えられる. また鎖骨頭は球面であるため明確な位置が分かりづらい. このことから他の点と比較し目標点だと認識している点と実際の目標点の間の差が生じやすいと言える. 誤差の方向に注目すると誤差の方向の傾向は左右方向について左右の鎖骨頭の間で関係性が見られなかった.

これらのことから鎖骨頭は誤差要因が多く, またそれぞれの誤差要因を分解して扱うことが難しい. また鎖骨頭は体の中心線付近にあるため左右方向の精度を確保するのに向かず, 頭足方向には近い位置により誤差の小さい胸骨角があるため, レジストレーション点としての有用性は低いと言える.

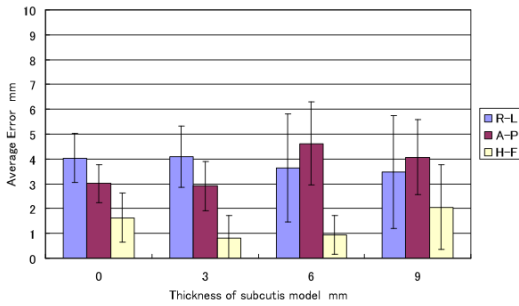
②頸切痕

頸切痕の誤差は Fig3.5 のように背腹方向の誤差が非常に大きくなった. これは頸切痕の位置が胸骨の上端であるので, 骨の形状の背腹方向の変化が大きいためであると考えられる. また左右方向に注目すると皮下組織厚との関係は見られず, 2mm 以内の誤差となっている. この結果は他の解剖学的特徴点と比較し小さい値である. これは頸切痕が体の中心線上にあることや, 頸切痕の形状が体の正面から見て V 字型になっていることが要因であると考えられる. 誤差方向に注目すると頭足方向と背腹方向について誤差の方向は皮下組織との関係は見られず, 常にほぼ一定の割合であった.

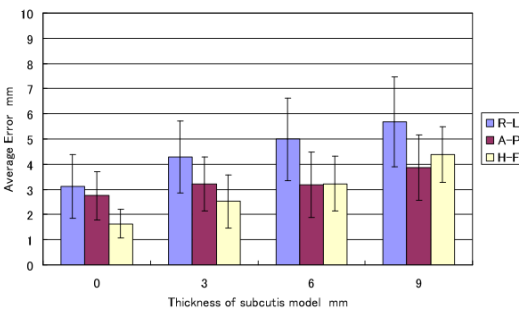
これらのことから, 頸切痕をレジストレーション点として使用する際は背腹方向の信頼性が低い傾向, 左右方向の信頼性が高い傾向があると言える. このため頸切痕は背腹



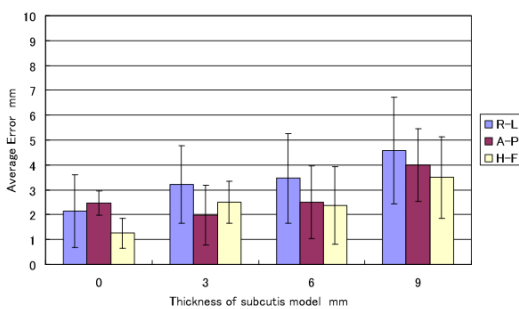
Stand position: clinical use (left side of the phantom)



Stand position: opposite (right side of the phantom)
Fig.3.3 Average Error (right clavicular head)



Stand position: clinical use (left side of the phantom)



Stand position: opposite (right side of the phantom)
Fig.3.4 Average Error (left clavicular head)

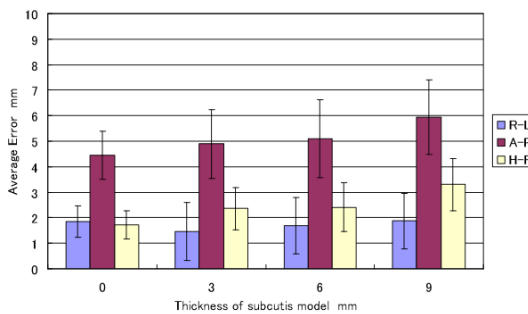


Fig.3.5 Average Error (jugular notch)

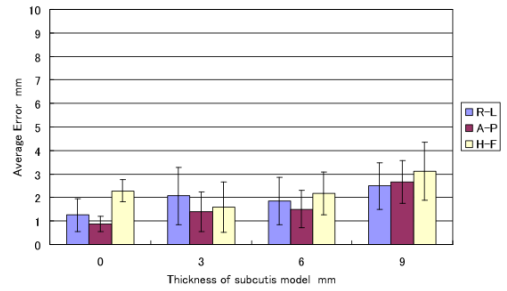
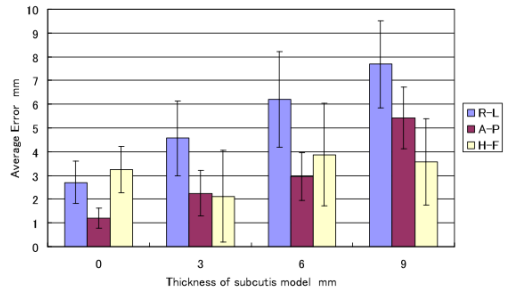
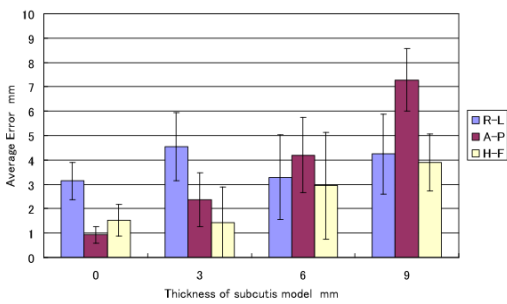


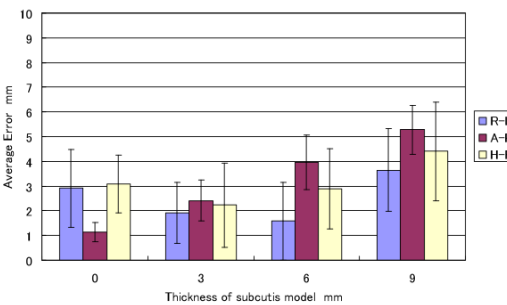
Fig.3.6 Average Error (manubriosternal joint)



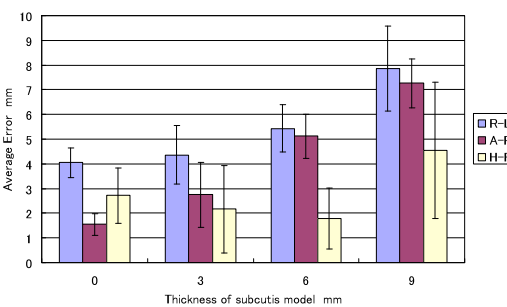
Stand position: clinical use (left side of the phantom)



Stand position: opposite (right side of the phantom)
Fig.3.7 Average Error (right anterior inferior iliac spine)



Stand position: clinical use (left side of the phantom)



Stand position: opposite (right side of the phantom)
Fig.3.8 Average Error (left anterior inferior iliac spine)

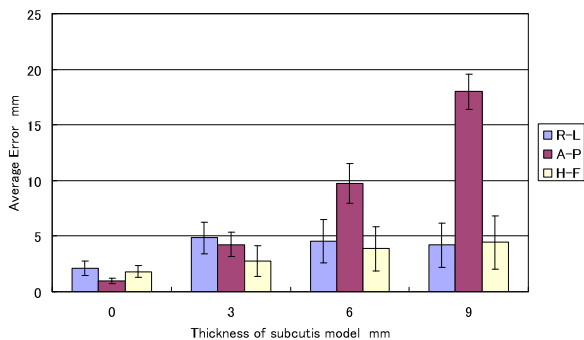


Fig.3.9 Average Error (pubis)

方向の精度が必要な際は使用しないか、背腹方向の値は使用せず左右方向と頭足方向のみを使用することで精度向上を図れる可能性がある。

③胸骨角

胸骨角の誤差はFig3.6のように各軸の間に有意な差がみられなかった。全体的な誤差は他の解剖学的特徴点と比べ小さいものであった。これは胸骨角が胸骨という平面状の突起であり、他の解剖学的特徴点のような立体的な形状をしていないため認識やポインティングツールで指すことが、比較的容易であると考えられる。また体の中心線上に位置していることや、胸骨上であるため皮下組織厚が小さいことも誤差が小さい要因としてあげられる。誤差方向に注目すると、左右方向の誤差方向の傾向と背腹方向の誤差方向の傾向が非常に似た曲線になった。

これらのことから胸骨角はレジストレーション点として他の解剖学的特徴点と比較し、信頼性が高いと言える。

④腸骨棘

腸骨棘の臨床と同じ配置で実験を行った際の結果はFig3.7とFig3.8で示すように皮下組織厚が大きくなるにつれ、右の腸骨棘の左右方向の誤差が左の腸骨棘の左右方向の誤差と比較し大きくなった。その一方で臨床と左右を逆にした配置で実験を行った際の結果はFig3.7とFig3.8で示すように皮下組織厚が大きくなるにつれ左の腸骨棘の誤差の方が大きくなった。このことから腸骨棘における左右方向の誤差についてはレジストレーションを行う術者から遠い点にある方の誤差が大きくなるといえる。これは腸骨棘に対する角度が手前側のもとの奥側のもので異なるため、ポインティングツールで指す際の角度や、腸骨棘を探索する際に周辺を手で触る時に手前側では押すように触るのに対し奥側では引くように触ることになることや、手前側の腸骨棘を探す際には視線と左右軸が直角になるのに対し、奥側の腸骨棘を探す際には視線と左右軸の角度が小さくなることなどが要因として考えられる。このことから腸骨棘をレジストレーション点として使用するには術者に近い位置を使用する方が左右方向の誤差を低減できると考えられる。誤差の方向に注目すると、左右の腸骨棘の間で似た傾向を持つのが背腹方向であり、この軸に関してはともに皮下組織厚が増すにつれ誤差方向が腹方向であることが多くなった。しかし左右方向と頭足方向については関係が見られなかった。

背腹方向と頭足方向の誤差については左右での差が見られなかった。背腹方向の誤差は左右どちらの腸骨棘についても皮下組織厚に比例する関係がみられた。またその比例係数は小さな差であるが配置によらず奥側の方が大きかった。背腹方向の誤差については皮下組織厚を考慮し、レジストレーション点を設定することで誤差の低減が図れるこ

とが示唆された。

⑤恥骨稜

恥骨稜の誤差はFig3.9のように皮下組織厚が大きくなるにしたがって、背腹方向の誤差が他の軸と比較し顕著に大きくなった。これは恥骨周辺の皮下組織厚が他の解剖学的特徴点周辺よりも大きいことが要因と考えられる。また皮下組織厚と背腹方向の誤差は比例関係にあることが分かる。このため恥骨稜をレジストレーション点として使用する際には、皮下組織厚の影響を考慮し骨上から皮膚側にレジストレーション点を移動させて設定することで誤差を低減できることが示唆された。

他の軸に関しては皮下組織厚と誤差の大きさの間に関係が見られなかった。このため皮下組織厚に関わらず頭足および左右方向については一定の信頼性を保つと言える。

誤差方向に関しては背腹方向に関して皮下組織厚を設けた場合、誤差方向はほとんど腹方向になった。これは恥骨稜付近の皮下組織厚が非常に大きく、体表面が背腹方向の軸に垂直に近いからであると考えられる。

5 まとめ

レジストレーション評価用ファントムを用いて、体表から選択した各解剖学的特徴点の誤差の値と傾向の調査を行った。その結果、以下のように結論づけられる。

- (i) 開胸位置の決定や、対象血管の同定に重要な頭足方向の誤差はいずれの点においても平均誤差 5mm 以下であった。
- (ii) 解剖学的特徴点ごとに誤差の値や傾向、皮下組織厚の影響のしかたが異なった。
- (iii) 左右対称の解剖学的特徴点においても誤差の傾向は左右対称にならなかった。

参考文献

- (1) 植松美幸, 鈴川浩一, 上杉繁, 安藤隼人, 森田篤, 青見茂之, 西井規子, 飯村浩, 中村亮一, 伊関洋, 梅津光生, 胸腹部大動脈置換術のためのナビゲーションシステムの開発, 日本コンピュータ外科学会誌, vol.7, no.3, pp.469-pp.470, 2005
- (2) 青見茂之, 植松美幸, 伊関洋, 齊藤聡, 富岡秀行, 西井規子, 飯村浩, 中村亮一, 村垣善浩, 鈴川浩一, 安藤隼人, 原美紀子, 黒澤博身, 梅津光生, 胸腹部大動脈置換術用の新しいナビゲーションシステムの開発と臨床応用, 適応医学, vol.10, no.2, pp.9-pp.13, 2006
- (3) 植松美幸, 青見茂之, 鈴川浩一, 西井規子, 中村亮一, 村垣善浩, 伊関洋, 上杉繁, 梅津光生, 胸腹部大動脈置換術用ナビゲーションシステムの臨床応用, 日本コンピュータ外科学会誌, vol.8, no.4, pp.417-pp.424, 2007
- (4) 植松美幸, 中野喜隆, 松川紘大, 宇都宮隆平, 中村亮一, 村垣善浩, 伊関洋, 青見茂之, 梅津光生: 大血管手術の安全性を高める画像支援ナビゲーションシステム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.14, no.1 pp.39-pp.48, 2009
- (5) 植松美幸, 体内構造を透かし見て目標血管を特定する～大血管ナビゲーションシステム～, 未来医学, vol.24, pp.76-pp.79, 2009