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

Clinical Application of a Surgical Navigation System for Thoracoabdominal Aortic Replacement

植松美幸 (学生会員) ^{a*}, 青見茂之^b, 鈴木浩一^a, 西井規子^c, 中村亮一^d, 村垣善浩^{d, e}, 伊関洋^{d, e, f}, 上杉繁^f, 梅津光生^{a, f}

^a早稲田大学大学院理工学研究科生命理工学専攻

^b東京女子医科大学附属日本心臓血圧研究所心臓血管外科

^c東京女子医科大学放射線科

^d東京女子医科大学先端生命医科学研究所先端工学外科学分野

^e東京女子医科大学脳神経センター脳神経外科

^f早稲田大学先端科学・健康医療融合機構生命医療工学研究所

Miyuki Uematsu^a, Shigeyuki Aomi^b, Hirokazu Suzukawa^a, Noriko Nishii^c, Ryoichi Nakamura^d, Yoshihiro Muragaki^{d, e}, Hiroshi Iseki^{d, e, f}, Shigeru Wesugi^f, Mitsuo Umezu^{a, f}

^a Major in Integrative Bioscience and Biomedical Engineering, Waseda University

^b Dept. of Cardiovascular Surgery, Heart Institute of Japan, Tokyo Women's Medical University

^c Dept. of Radiology, Tokyo Women's Medical University

^d Faculty of Advanced Techno-Surgery, Inst. of Advanced Biomedical Engineering & Science, Tokyo Women's Medical University

^e Dep. of Neurosurgery, Neurological Institute, Tokyo Women's Medical University

^f Inst. for Biomedical Engineering, Consolidated Research Institute for Advanced Science and Medical Care, Waseda University

Abstract

We have been developing a surgical navigation system for the graft replacement of thoracoabdominal aortic aneurysm. The system supports surgeons to detect the most important intercostal artery among the amount of cavities of the aorta. The world's first clinical trial was performed in July 2006 at Tokyo Women's Medical University. Up to now, the system has been utilized for nine clinical cases. For all cases, the system was assisted for surgeon's decision-making. Good clinical course without paraplegia. This system is highly effective for surgeons and patients to perform the safety and assure surgery.

Key words

Aortic root replacement, Adamkiewicz artery, Surgical navigation system.

*早稲田大学大学院理工学研究科生命理工学専攻

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58-322

miyuki@fuji.waseda.jp

受付 2006 年 11 月 13 日; 採択 2007 年 2 月 22 日

1. はじめに

大動脈は心臓から送られる血液が全身を循環するときに通る体内で最も大きな径をもつ血管である。正常な大動脈の直径は胸部で 30mm、腹部で 15mm 程度であるが、その一部がこぶのように膨らんだものを大動脈瘤という。これが一度破裂すると体内で大出血を起こし、出血性ショック症状に陥る。瘤破裂後の緊急手術での死亡率は 30%であり、手術に至らない例も含めるとかなりの高率となる。

そこで破裂を未然に防ぐため、瘤付近の血管を人工血管に置き換える手術が行なわれる (Fig.1)。置換時は一時的に大動脈中の血液の流れを遮断する。このとき、虚血による臓器障害が起こる可能性があるため、人工心肺や低体温法などの補助手段を施しながら進める。

この手術で注意すべきことのひとつに、脊髄への血流を温存し、対麻痺を回避することがある。対麻痺発生率は各施設により異なるが、LeMaireらによる 1,220 例施行した経験では脊髄障害発生率は 4.6%と報告されている¹⁾。手術により命は助かるものの、対麻痺をきたせば患者の術後QOLを著しく低下させることにつながる。

従来、脊髄への血流確保には肋間動脈をできるだけ多く人工血管と吻合することが必要であると考えられてきた。しかしながら、肋間動脈再建部位の増加、血流回復後の急激な圧変化によって微小循環障害が起こる。したがって、長い血流遮断時間による手術成績の低下は免れない。

近年、前脊髄動脈につながる最も太い前根動脈であるア

ダムキュービッツ動脈 (AKA : Adamkiewicz Artery) の温存が有効である報告がなされた²⁾³⁾。画像診断の進歩により、1~2mmといわれるAKAの描出も可能となってきた⁴⁾⁵⁾。そこで、術前にAKAにつながる 1 本の肋間動脈を同定し、温存することで手術の効率化が図られている。

この重要な肋間動脈の術野における同定作業は術者の技術や経験などに依存する。というのも、左右各 12 本の動脈からなる肋間動脈は大動脈を起始とし、肋骨の下縁に沿って走行しているが、術中にその走行を目視することは難しいためである。そこで、術者は切開した大動脈の内腔側に存在する多くの肋間動脈の開口部から再建する肋間動脈を同定する。その作業は術者が頭の中に描いた解剖学的イメージをもとに行なっており、特に解離性大動脈の場合などは断裂により実際の開口部とイメージした血管の数が一致しないこともあり、判断が難しい。

そこで、筆者らは術前のマルチスライスCT(以下、CT)の画像を利用したナビゲーションシステムにより術者の情報を支援する。術前の画像を地図としてモニタ画面に表示し、術中の術具位置を指し示すことで、ターゲットとする血管の位置を即座に把握する。ナビゲーションにおいては、上下方向の肋間動脈の位置関係の区別をつけるために、臨床側から 5mm以内の精度が求められている。2006 年 1 月にシステムのプロトタイプが完成し⁶⁾、2006 年 7 月から 9 月までに 8 例の臨床応用を行なった。本稿では症例に応じた大動脈瘤手術ナビゲーションの水準について述べる。

(1) Pre-Replacement

(2) Post-Replacement

Fig. 1 Aortic Root Replacement using a Fabric Tube Graft.

2. 方法

2.1 手術ナビゲーションシステム

手術ナビゲーションシステムは車のカーナビのシステムのように現在の作業領域からターゲットまでの位置関係を術中に画像上で確認できるシステムである。ターゲットである肋間動脈は径が2~3mmの管状であり、これを脳外科のナビゲーションシステム⁷⁾で使われるような断層像のみで表示した場合の画像をFig.2に示す。Fig.2-(1)はAxial画像であるが、血管は点で表示される。また、Fig.2-(2)のSagittal画像からは、前脊髄動脈につながる最も太い前根動

脈であるAKAが確認できる。この動脈は一度上行したのち下行するというヘアピン状の走行が特徴である。しかし、これら断片的な情報では、血管の立体的な位置・走行を把握することが難しい。そこで、立体的な構造の理解を助けるためにFig.3に示すように、術前に撮像したCT画像から関心領域を抽出し、輪郭領域を三次元再構築作成したモデルを併用する。これにより、Fig.4のように限られた術視野では見えない情報を補う。

Fig. 2 Multi-Planar Reconstruction Image.

Fig. 3 Three-dimensional Surface Model.

Fig. 4 Operative Field after Aortic Cross Clamping.

2.2 システム構成

本システムの構成を Fig.5 に示す. 図中の①~④は以下の数字に対応する.

① ポインタ: 3つの反射球マーカを剛体として, 取り付けした指示棒. 実空間と画像空間の位置合わせ (レジストレーション), および患部の指示器として使用する. 体中深い位置を指すため, 指示棒の長さは270mmとした.

② 光学式三次元位置計測器(Polaris®, Northern Digital Inc.): ポインタが指し示した先端の位置, 姿勢を計測する.

③ ナビゲーション用PC: 三次元位置計測器で取得する術具情報を受け取り, 患者 CT 画像空間での術具の位置を表示する. CT 画像は3面図で表され, 患部周辺の詳細な情報を確認するために用いる.

④ 三次元再構築モデル表示用PC: 三次元再構築モデルの表示を行なう. ナビゲーション用PCからUDP通信で送られてくる術具情報をリアルタイムにアップデートし, 術具と患部周辺の立体的な位置関係を直感的に把握するために使用する (Fig.6).

Fig. 5 System Configuration.

Fig. 6 Navigation with Human Phantom.

(1) Checking the position of an important artery(magenta) on the three-dimensional surface model that was reconstructed by a series of preoperative images.(CT Image Space)

(2) Searching an important artery among the cavities the arteries on the patient (Patient's Real Space)

2.3 レジストレーション

術中の作業空間を患者のCT画像空間と対応づけるためには両空間に存在する3点の同じポイントをもとにマッチングする。胸腹部領域のナビゲーションでは脳外科領域⁸⁾と異なり、マーカの留置が難しい。そこで、解剖学的特徴点をレジストレーションのマッチングポイントとして利用することにした。術野の状態は患者によって異なるため、ポイントングしやすい特徴点の位置を事前に選んでおき、最終的な位置の選択は術中に行なう。ここで特徴点選択における条件を示す。

1) 再現性がある：誤差軽減のために骨の鋭角部位など再現よく指し示せる箇所を特徴点として設定する。体位の変換によっても位置の変化がないような肋骨や椎骨の形状を利用する。

2) 一直線上に並ばない：選択した点が構成する三角形に対し、法線ベクトルを求めるため、点が直線状にならないようにする。

3. 臨床応用

3.1 対象

東京女子医科大学における2006年7月から9月までに施行された大動脈瘤手術8例の症例に対してナビゲーションを施行した。症例の内訳は胸腹部置換：6例、弓部下行

置換：1例、胸部下行置換：1例であった。本研究にかかわる臨床例は、東京女子医科大学倫理委員会の審査を受け、承認のもと、厳密に規定に則って行なわれた。

3.2 ナビゲーション手順

胸腹部大動脈瘤する人工血管への置換手術において、AKAにつながる肋間動脈同定のため、本ナビゲーションシステムを施行する。ナビゲーション手順を以下の①～④に示す。

① 術前の画像準備：術前にCTの画像を取得し、関心領域を抽出し三次元再構築モデルを構築する。ターゲットとする肋間動脈を赤色の血管で示し、他の血管との違いを明確にする。ここで、実際の手術は右側臥位で行なうが、画像撮影はルーチンの作業に則って、仰臥位で行なう。ここ

Fig. 7 Lateral position on the sand bed.

Fig. 8 Category of Anatomically Specific Points.

Table 1 Registration Error; Group 1.

Case	Average [mm]
1	4.9
2	1.2
3	4.1
4	2.7
5	3.6

で、右側臥位は **Fig.7** に示すように左腕を右側に持ち上げ、身体を斜めに捻り、背中にスポンジや枕を挟むなどして固定する体位である。

② 解剖学的特徴点の設定：レジストレーションのための解剖学的特徴点を術前に選んでおき、術中に術野の状況に応じて決定する。解剖学的特徴点は以下の 3 種類に分けられる。これらの特徴を **Fig.8** に示す。

1) 肋骨 (上縁または下縁) **Fig.8-(1)**

2) 椎骨・椎間板 **Fig.8-(2)**

3) 大動脈 (蛇行屈曲部) **Fig.8-(3)**

③ 術中のレジストレーション：3 点の術野上の位置をポインティングして画像上の位置とのレジストレーションを行なう。大動脈上の特徴のある点をポインティングし、ナビゲーションの動作を確認する。そして、術野上でポイントを走査しながら、三次元再構築モデル上での位置を確認し、術野上の重要な血管にテーピングして印をつけておく。

④ 大動脈遮断後のナビゲーション：大動脈瘤を切開し、大動脈内部から見える開口部の上でポイントを走査し、ターゲットとする肋間動脈の位置を同定する。

Table 2 Registration Error.

(1) Group 2-a

Anatomically Specific Point	Error [mm]
Costa1	0
Costa2	7.5
Flexion Point of Aorta	13.4

(2) Group 2-b

Anatomically Specific Point	Error [mm]
Costa	0
Boundary between Aorta and Costa	4.5
Flexion Point of Aorta	2.7

4. 結果

レジストレーションに使用した点と、そのときの特徴点の一致誤差を求めたところ、選択点によるナビゲーション水準が以下の 3 つに分類できることがわかった。

レジストレーションに用いた 3 点が、

1) 骨のみ：5 例 **Table 1**

2) 骨・大動脈上両方含む：2 例 . . . **Table 2**

3) 大動脈のみ：1 例 **Table 3**

であるとき、今後もこの 3 分類に収束する可能性がある。ここで、用いているレジストレーション手法は、3 点のうち 1 点は固定されるようになっている。そのため、1 点は必ずレジストレーション誤差が 0 となる。

Table 3 Registration Error; Group 3.

Anatomically Specific Point	Error [mm]
Boundary between Aorta and Costa	0
Boundary between Aorta and Costa	14.3
Boundary between Aorta and Vertebra	11.4

5. 考察

5.1 特徴点の選択によるナビゲーション水準

(1) 分類1：骨のみ

平均誤差は3.0mmであり、最大で4.9mm, 最小でも1.2mmであった。いずれも誤差5.0mm以内を実現していた。ここでは、肋間動脈が肋骨に沿って走行していることから、2つの肋骨の起始部を使用した。これより、上下関係の位置関係が保証されていたと考えられる。また、隣り合う椎骨の動きは1mm以下と小さく⁹⁾、肋骨の起始部は椎骨に接しており末端に比べて動きは小さい。このことから、誤差も小さく抑えることができたと考えられる。

(2) 分類2：骨・大動脈上両方含む

分類2についてはさらに2例にわかれた。

(a) 肋骨の特徴点を2点用い、さらに3点目として、大動脈の蛇行屈曲部を用いた場合。

(b) 肋骨、大動脈の蛇行屈曲部を1点ずつ用いた上で、その中間として、3点目に肋骨・大動脈の境界部を用いた場合。

(a) については、大動脈の蛇行屈曲部に誤差が大きくあらわれ、平均誤差としては7.0mmとなった。(b) については、肋骨と大動脈の境界に最大誤差4.5mmが出たが、平均誤差としては2.4mmであった。大動脈と骨の位置関係は術前と術中で変化が大きいと考えられる。大動脈の特徴を用いる必要がある場合は(b)のように骨と大動脈が接するところで中間値をとることで、大動脈の動きの誤差を軽減できると予想される。

(3) 分類3：大動脈のみ

肋骨が大動脈で覆われる場合は、大動脈が胸膜に包まれ、骨に接していることを利用した。この場合、肋骨・椎骨と大動脈の境界についてはあまり動きがみられないと考えた。肋骨と大動脈の境界を2点用いることで上下方向の位置関係は保証できたが、奥行きに関しては必ずしも一致するとはいえなかった。しかしながら、肋骨においても動きの小さい起始部が使えなかったため、体位の違いによる骨の動きを受けたと考えられる。

5.2 体位の違いによる影響について

術前の画像が仰臥位であることと術中の患者が右側臥位をとることによる位置の差が及ぼす影響について述べる。このような体位においては、身体回旋運動による影響が大きいと考えられる。椎骨の構成を考えると頸、胸、腰にわかれており、そのうち今回の手術を行なう領域は胸椎の7番から12番、および腰椎の1番であった。椎骨は前屈運動による前後方向の回転角は大きいですが、回旋運動による動きは頸椎と腰椎によっており、胸椎の動きは小さいことがわかっている。この胸椎には肋骨が接合している。肋骨は呼吸によって前後、上下方向に動きが生じる。胸椎に近い部位である肋骨の起始部においては胸椎の動きが小さいことからその間隔に大きな動きはないが、より外側になると肋骨そのものの動きの影響を受ける。

5.3 手術時間について

ナビゲーションシステムを導入するにあたってかかる時間は、術前の作業としては、画像のセグメンテーションと三次元モデル再構築に6時間程度要する。骨、大動脈を分類することはほぼ自動的に行なえるが、肋間動脈は側副血行路が発達しており、分岐の追跡が難しいためである。また、レジストレーションに用いる特徴点は症例によって異なる。そこで、術者とシステム操作者として毎回打ち合わせを行なっている。検討および特徴点候補の探索が30分程度かかっている。術中の作業としては、ナビゲーション機器の準備および片付けに1時間、レジストレーション用の特徴点3点の術野上での探索およびレジストレーションに5分程度かかる。実際計画通りに選択できないことはあるが、その場合も術前に特徴点を登録した点に変更が可能で、即座に対応できる。

以上のように、一般的な手術に比べ、全体の作業量は増える。また、システムの操作についても操作者の確保が必要となる。今後、操作の簡略化を進めたい。特に、特徴点の選択にはまだ熟練者の技量が求められる点であるので、選択を容易にするポイントの開発を行ないたい。また、術中に使いやすいインターフェースへ改良していくことで、多くの施設に受け入れられるシステムにしたい。

5.4 肋間動脈起始部の探索

上下の肋間動脈の間隔は 20~30mm であるので、5~6mm のずれであれば、隣り合う肋間動脈の位置を間違えることがない。今回の結果では、目指すべきナビゲーションの精度を満たしていたことがわかる。ただし、脊髄の虚血を防ぐには大動脈遮断後の手術時間は短いほどよいので、手術の状況によっては、遮断後のナビゲーション時間は非常に短時間で済ませる必要がある。また、ベッドや患者の体位変更により、画面上でターゲットの位置にずれが生じることがあった。そのためには、遮断前におおよその位置を確認し、印をつけておくことが有用である。

5.5 本ナビゲーションシステムの意義

従来の術者の主観に依存した定性的な手術から、現在の体性感覚誘発電位 (SEP)、運動誘発電位 (MEP) といった感覚系、運動系の機能計測や髄液ドレナージによる脊髄保護、肋間動脈の灌流法といった工夫により、大動脈瘤手術の手術成績は向上してきた。本システムの導入により、さらに形態的な情報の確認ができるようになった。限られた時間の中で、即座の判断を要するときに、術者が確信をもって判断でき、術者の精神的な負担が軽くなった。また、術者以外の人間からも手術の状況が確認できる定量的手術にすることで医療ミスの防止に役立てることができる。患者はもちろんのこと、医療関係者全員が安心できるような手術体制を確立するために、ナビゲーションシステムは重要な役割を果たす。

6. まとめ

胸腹部大動脈置換手術において温存すべき肋間動脈の位置同定のためのナビゲーションシステムを開発し、臨床応用を行なった。その結果以下の2点がわかった。

- 1) 特徴点の選び方による差異はあるが、いずれもターゲットとする肋間動脈を同定できた。
- 2) 肋骨に対する大動脈瘤の配置に応じてレジストレーションに用いる特徴点のパターンを3つに分類し、それぞれのナビゲーションの水準を提示できた。

謝辞: 本研究を推進するにあたり、以下の研究費の援助を受けた。関係諸氏に感謝の意を表する。

- 1) 平成 17 年度 私立大学学術研究高度化推進事業「生命科学・医工学統合研究に基づく未来医療への挑戦的研究」01-F01
- 2) 平成 18 年度 日本学術振興会科学研究費補助金「特別研究員奨励費」18・53202

文献

- 1) LeMaire S A, Miller III C C, Conklin L D, Schmittling Z C, Coselli J S. Estimating group mortality and paraplegia rates after thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *Ann Thorac Surg* 2003; 75(2): 508 - 513.
- 2) Biglioli P, Spirito R, Roberto M, Grillo F, Cannata A, Parolari A. The Anterior Spinal Artery: The Main Arterial Supply of The Human Spinal Cord: A Preliminary Anatomic Study. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2000; 119: 376-379.
- 3) Morishita K, Murakami G, Fujisawa Y, Kawaharada N, Fukada J, Saito T, Abe T. Anatomical study of blood supply to the spinal cord. *Ann Thorac Surg* 2003; 76(6): 1967 - 1971.
- 4) Yoshioka K, Niinuma H, Ohira A, Nasu K, Kawakami T, Sasaki M, Kawazoe K. MR Angiography and CT Angiography of the Artery of Adamkiewicz: Noninvasive Preoperative Assessment of Thoracoabdominal Aortic Aneurysm. *RadioGraphics* 2003; 23(5): 1215 - 1225.
- 5) Kudo K, Terae S, Asano T, Oka M, Kaneko K, Ushikoshi S, Miyasaka K. Anterior Spinal Artery and Artery of Adamkiewicz Detected by Using Multi-Detector Row CT. *AJNR Am J Neuroradiol* 2003; 24(1): 13 - 17.
- 6) 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. 胸腹部領域における手術ナビゲーションシステムの開発; 大動脈瘤を対象として. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2006講演論文集. 2006. 2A1_A04. DVD に収録.
- 7) 伊関 洋, 村垣善浩. 脳外科における術中ナビゲーション(MRI). *医学のあゆみ* 2003; 205(9): 703-707.
- 8) 長嶋義昭, 廣瀬佐智雄, 鈴川浩一, 苗村潔, 高信英明, 村垣善浩, 伊関洋, 梅津光生, 高倉公朋. OpenMRI 下脳外科手術におけるナビゲーションシステムの精度および操作性向上に関する研究. *日本コンピュータ外科学会誌* 2004; 6(1): 5-12.
- 9) Percy MJ, Whittle MW. Movements of the lumbar spine measured by three-dimensional X-ray analysis. *J Biomed Eng* 1982; 4(2): 107-112.