

人工現実感手術室

4 医療ナビゲーションシステム

大阪大学大学院医学系研究科多元的画像解析分野
田村 進一 tamuras@image.med.osaka-u.ac.jp

大阪大学大学院医学系研究科多元的画像解析分野
佐藤 嘉伸 yoshi@image.med.osaka-u.ac.jp

タイプと基礎技術

コンピュータによる手術支援の目的は患者の負担軽減と術後機能向上である。この目的達成のため、手術ナビゲーションシステムは視覚機能を拡大し、見えないところを可視化・計測・判断するナビゲーション技術と、それに基づき手や術具が届きにくいところを操作するロボット技術から構成される。

画像誘導ナビゲーションにおいては、患者の実体内、あるいは計算機内の仮想化された体内を画像的手法により誘導する。ナビゲーションには対象、手法により、対象の変形(剛体、非剛体)、対象部位(近体表、深部、臓器・器官)、術具のガイド法(モニタ表示、半透明表示、眼鏡モニタ、機械式ガイド、光ガイド)、画像センシング手法(CT、MR、超音波、X線)、位置センシング手法(光、磁気、超音波、機械式)などのいろいろな側面・分類法がある。その最も基礎となる技術は計算機内の患者モデルと実際の患部との対応を付ける位置合わせ(registration)である。registrationとは一般的に言えば異なる座標系で表現された画像データ間の位置的対応関係を求めることである。この良否がナビゲーションの精度に大きな影響を与え、手術の適応を決定する。その最近の動向を次章に簡潔に記しておく。ついで大阪大学におけるナビゲーションシステムの開発事例とその特徴を記すことにより、次世代型ナビゲーションシステムにかけられている期待の一端を紹介したい。

位置決めと誤差¹⁾

医療ナビゲーションにおける患者モデルと実際の患部との対応関係を求める位置合わせ手法には、体に付けた外部マーカや突起・分岐など特定の固有特徴点をもとに行う手法、表面形状に基づく手法、濃淡値ボリュームデータ(3次元画像)に基づく手法などがある。

表面データを用いる場合の代表的手法であるICP(Iterative Closest Point)アルゴリズム²⁾は、計測した表面データ点から計算機内に事前に作成した患者のモデ

ル表面までの最小2乗距離の総和を小さくするよう逐次的に形状を合わせ込んでいく手法である。この収束性を改善するため、いくつかの対応可能性を保ったまま解を求めていく手法としてEM(expectation-maximization)法³⁾が提案されている。

濃淡値に基づく手法には、2つの画像データが一番よく線形関係になる位置を整合位置と決定する従来からの正規化相関法に加えて、一方の画像データからもう一方の画像データをどれだけ予測できるかを計算する相互情報量に基づく手法がある。さらに最近、一方の画像がどれだけでも一方の画像のエネルギーを説明できるかを計量する相関比に基づく手法が提案されている。正規雑音条件のもとでは、相互情報量手法と相関比はともに最尤推定法に一致する。相互情報量手法では少数サンプル点からの確率密度関数推定法、確率近似法等により高速化・収束性向上が図られている。これらの手法の優劣については多くの研究がなされているが、相互情報量手法の問題点は、濃淡値の“近さ・連続性”を無視することであり、これを考慮する相関比は、計算量の点からも優位にあるように見える。しかしながら、もとよりこれらは手法のもととなる対象の性質に対する仮定と対象とする画像の統計的性質に依存するところが大きい。

濃淡ボリュームデータと表面データによる位置合わせ手法では、一概にいけないものの濃淡ボリュームデータがやや優勢な状況にある。これは前者の濃淡3次元ボリュームデータの方が後者の表面のみのデータに比べて情報が多く残されているためと思われる。

位置合わせが済んだ後の体動をトラッキング(追跡)するためには、3次元位置決め装置が用いられる。代表的な光学式3次元位置決め装置(localizer)では、赤外発光ダイオード(IRED)をマーカとし、それを複数組み合わせ配置したrigid bodyと呼ばれるマーカユニットを位置と向きの6自由度で計測し、結果としてそれを装着し

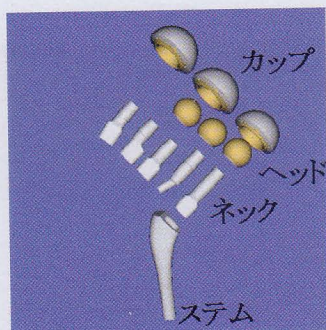


図-1 人工関節部品の表面モデル

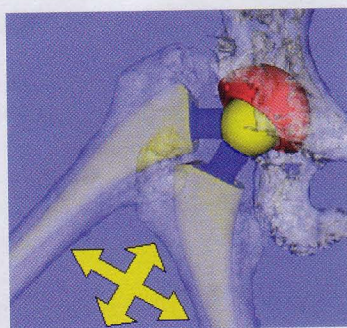


図-2 股関節の運動

た体部の3次元的動きを追跡する。このとき、個々のマーカ単体の位置決め誤差は小さくても（たとえば0.1mm）、それから離れた注目対象部位の位置決め誤差（TRE; Target Registration Error）はrigid bodyの方向推定誤差等のため前者よりかなり大きくなる。これは実効的な位置決め誤差であり、これを要求精度（たとえば1mm）以内に抑える必要がある。Fitzpatrickらはそれがマーカ単体の位置決め精度とrigid bodyの形状因子から算出できることを示した⁴⁾。複数の位置決め装置およびrigid bodyを用いた場合の複合的な位置決め誤差については、我々は手術支援システムの誤差伝播モデルを作成し、座標変換のヤコビ行列をもとにTREを推定できることを示した⁵⁾。これを用いると、3次元位置計測装置やマーカユニットなどのシステム構成要素を変更したときにどれくらいの精度が達成できるかの推定/システム設計を行うことができる。また、シミュレーション的にシステム誤差を推定することも行われている。

大阪大学における手術ナビゲーション

人工股関節：術中関節機能解析

関節がすり減る変形性股関節症等では、人工股関節への置換手術が行われる。この際、大腿骨骨頭と骨盤の臼蓋（寛骨臼; 骨頭のはまる陥凹部）の両者が置換される。従来の代表的な股関節手術ナビゲーションシステムであるROBODOC（大腿骨側のみ）とHipNav（骨盤側のみ）は、関節の一方のコンポーネントしか扱っておらず、本質的に、関節としての機能を評価することが困難であった。我々の開発した股関節手術ナビゲーションシステム⁶⁾は、大腿骨側、骨盤側ともにトラッキングすることにより、術中にシミュレーションによる関節機能評価および手術計画修正が行えるようになっていく。これにより、患者の術後QOL（Quality Of Life）を向上させることができる。

本システムで使用する人工部品システムは、骨盤臼蓋へ設置するカップ、大腿骨髄空へ設置するステムの他、ステムへ組み込んで使用するヘッドとネックから

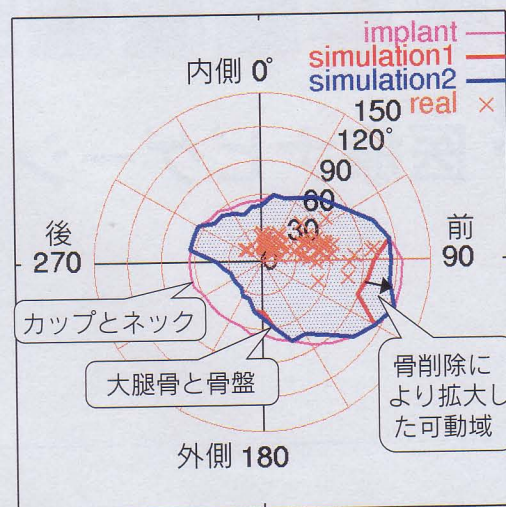


図-3 関節可動域

カップとネックの構造による可動範囲内で大腿骨と骨盤の衝突が起こらない範囲。必要に応じて術中に骨を削り、可動域を広げる。×印は術中に足を動かして確認した方向。

なっている（図-1）。ネックとヘッドにはさまざまな長さや角度のものが用意されており、その選択によって、脚長と可動範囲は大きな影響を受ける（図-2）。このため、術者は、骨盤臼蓋へのカップ設置、大腿骨髄空へのステム設置の後でも、ネックとヘッドの選択を変更することで、脚長と可動範囲を調整できる。また、可動範囲は、股関節動作時の骨盤と大腿骨の衝突や、設置した人工部品同士の衝突などによって制限されるが、十分な可動範囲を確保するために、骨の衝突部分を骨切によって除去し、可動範囲を広げる場合がある（図-3）。術中シミュレーションを行うことで、適切なネックとヘッドの選択と、骨切を行う部位の選択を支援する。我々は術後CTとの比較に基づく検証を行い、シミュレーション精度が、位置誤差約3mm、角度誤差約3度であり実用上有効であることを確認している。

現在のところ関節可動範囲は、骨および人工関節部品の衝突シミュレーションに基づいて予測している。しかし、実際には、筋肉組織などの軟組織の影響を無視することはできない。今後、可動範囲シミュレーションに、軟組織の影響を考慮することにより、さらに精度の高い可動範囲の予測を行うことを検討している。

臼蓋形成不全では臼蓋の大腿骨頭への被さりが十分でなく、臼蓋の一部に過重な力がかかり、傷害を引き起こす。そこで、臼蓋を回転的にずらせる寛骨臼回転骨切り術が行われる。我々はこの手術においても同様の原理で、被覆率、接触面積などのパラメータの術中計測を行っている⁷⁾。

副鼻腔：皮膚マーカの利用

頭部は頭蓋骨に囲まれ、軟組織が比較的固定してい

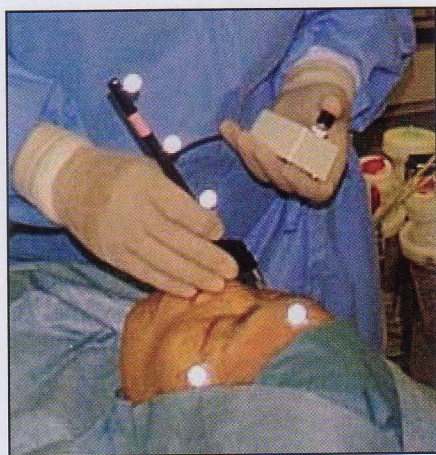


図-4 位置合わせのため顔形状（80点）をペンプロープで入力しているところ

3次元位置決め装置POLARIS用に、額に受動型マーカ（反射球；3個のうち1個は隠れている）が付けられている。ペンプロープにも位置トラッキングのためマーカが付けられている。

るため、脳神経外科等で術中ナビゲーションの研究が早期より最も盛んに行われてきた。

現在、頭部のトラッキング手法には、剛体性の高いフレームを頭部に固定する方法など、装着力を強くしたり、ナジオン（鼻根）や耳の穴、上歯などを巧みに用いて追跡用のマーカを取り付けた装着物が頭蓋骨と一体となって運動するように考えられている。しかし、精度維持のために強く装着する必要があることや装着物の「ずれ」を防ぐため、患者に全身麻酔を施して適用しているのが実情である。これに対して我々は、意識下にある人間に対しても不快感が少なく長時間使用可能であり、高い精度が維持されるトラッキング手法として、皮膚にマーカを装着する手法を提案している（図-4、図-5）⁸⁾。

本手法は、皮膚に光学式3次元位置計測装置の赤外線発光ダイオード（IRED）マーカを顔面皮膚に直接貼り付け、それらの位置を計測するときに、痛みなどによる表情の変化を同時に求める。皮膚に接着した3個あるいは4個のマーカの配置が一定時間（たとえば10秒）に渡って変わらない場合を安定表情とし、この場合のみトラッキング可能とする。この方法では、装着デバイスを用いる必要がないため、意識下にある人間に適用しても不快感が極力抑えられる。また、装着デバイス特有のずれ・ドリフトが生じないというメリットがある。マーカの設置場所にもよるが、額周辺の3個のマーカでTRE 0.45～0.9mm、4個のマーカで0.45mm～0.67mmの臨床的に十分な精度が得られている。

肝臓：超音波画像の利用

内視鏡手術は開創手術に比べて傷口が小さく、患者の負担が小さい。しかしながら、患部が見えないうえ

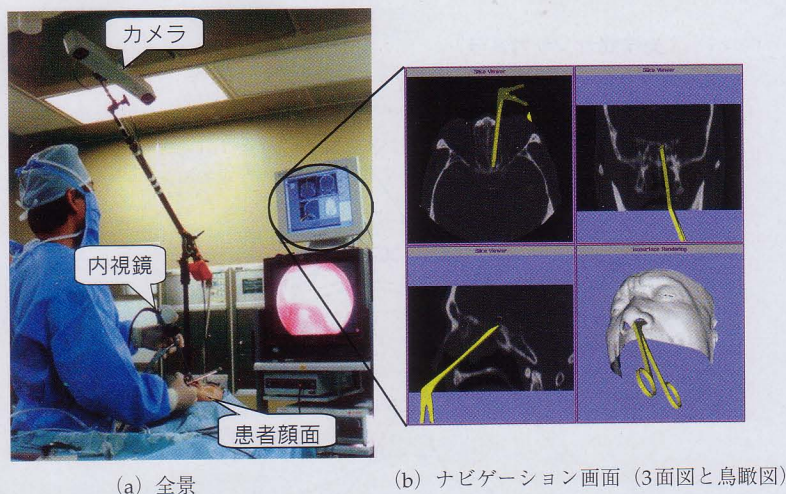


図-5 副鼻腔ナビゲーション手術

に手術動作が制限され、その分、術者の負担が大きくなる。そのため、手術ナビゲーションの必要性が大きい。

腹部手術の際には、曲がらない剛性内視鏡の一種である腹腔鏡が使用される。腹腔鏡下手術は、視野制限や、実空間と内視鏡画像間のスケールの差異、臓器の変形などにより、術前・術中に得た3次元画像の情報と術野との対応付けが難しい。我々は、腹腔鏡手術用超音波装置で術中に肝臓内部の3次元超音波画像を取得し、腹腔鏡画像に3次元超音波画像を重畳表示するシステムを開発している⁹⁾。システムの概要を図-6に示す。腹腔鏡画像と3次元超音波画像を位置合わせして融合表示するため、それぞれの空間位置を計測する。腹腔鏡は光学式センサで位置計測する。また、腹腔鏡下手術用超音波プローブの先端部は走査面内で首振り回転が可能である。超音波画像撮影時に下記に示す光磁気ハイブリッドセンサでプローブの位置計測を行うことで、空間位置が定まった3次元超音波画像を構成できる。

磁気式センサは小型化でき体内でも使用できる特長を持つが、周囲環境から磁場の影響を受けやすく、特に遠距離では精度のよい計測を行うことが難しい。さらに、腹腔内で使用できる1mm径棒状超小型センサは計測が、位置3自由度、方向3自由度のうち、軸回り回転を除いた5自由度に制約される。そこで光磁気ハイブリッドセンサでは、広範囲かつ高精度な計測を光学式センサで行い、腹腔内での計測は磁気式センサで行う。光学式センサはPOLARIS (Northern Digital Inc.)、磁気式センサはAURORA (Northern Digital Inc.) で構成している。AURORAの計測は5自由度であるが、体外に出る超音波プローブの操作部にも図-6のようにPOLARISのマーカを取り付けることで1自由度を補足し、超音波プローブの6自由度の計測を行っている。実

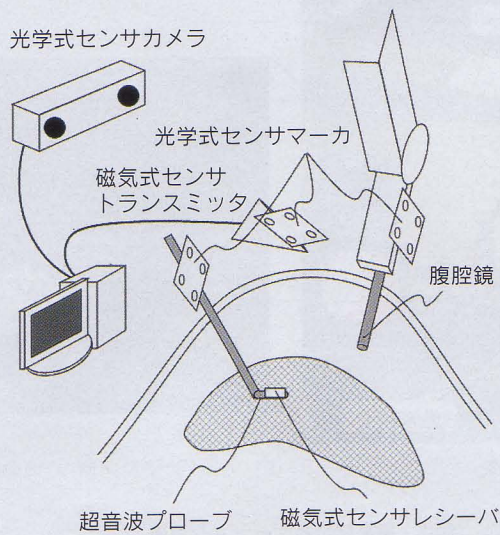


図6 腹腔鏡下手術支援システム概要

マーカ（小さな○）4個を配した矩形板がrigid body（3枚）。

験では偏り0.8mm, RMS誤差1.0mmという受容可能な結果を得ている。現実画像上に仮想化された血管を重ね合わせ表示した（増強現実感表示）結果を図-7に示す。

次世代ナビ

画像誘導ナビゲーションを支える基礎技術として最も基礎となる位置合わせ技術の動向についてまず述べ、次に阪大における手術支援システムとそれらの技術的新規性について述べた。本稿では触れなかったが、現行技術の問題点の1つは変形に対する追従予測能力に限界があることである。軟組織は一般に硬さなどの未知パラメータが多く、十分その特性を表現しきれないことが多い。特に患部は異常な組織性状を持つため、一層問題を複雑にしている。困難な問題ではあるが、精度のよい変形予測手法の開発と遠隔センターを含めた高速並列計算体制の利用が1つの解となろう。

今後の医療ナビゲーションの発展は、高機能化、簡便化による適応拡大に向かうものとみられる。医療ナビゲーション（手術支援）の対象領域は数多くあり、新しい画像取得法や先端操作具（end effector）の開発とそれに適した画像取得・計測・予測・評価・誘導法の開発が相まって、さまざまな対象疾患に対するそれなくしては実現不可能（代替不能）な新しい治療法として発展していくことが期待できる。また、これこそが手術支援システムとしての真価を発揮する場面でもある。たとえば、現状では1~2mm程度の誤差を許容できる部位のみが研究開発の対象となっている。これ以上の精度が要求される対象部位は数多くあり、たとえば特定部位への針刺しや薬剤・遺伝子注入において体内に局所微細画像獲得が可能なセンサプローブが挿入ができれば、順次詳細な位置決めを行っていく多重解像度



図7 拡張現実感表示画像

術中超音波画像から得られた血管像（白矢印等）が肝臓の腹腔鏡画像に重ね合わせ表示されている。

センシングや複数のセンサを利用して精度を向上させたり、計測範囲を拡大するセンサ融合により、高精度治療が可能となり、ナビゲーション手術独自の治療法の展開が期待できる。一方、医療ナビゲーションシステムの一段の普及のためには、簡便化の方向が必要であり、医師1人ないしは少人数で操作できる高い操作性が不可欠である。またスーツケース型と称される可搬型システムも1つの方向であると思われる。

参考文献

- 1) 田村進一: 表面および濃淡値に基づく剛体の位置合わせ, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.3, No.2, pp.53-61 (2001).
- 2) Besl, P.J. and McKay, N.D.: A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., Vol.14, No.2, pp.239-256 (1992).
- 3) Granger, S., Pennec, X. and Roche, A.: Rigid Point-Surface Registration Using an EM Variant of ICP for Computer Guided Oral Implantology, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2001, Niessen, W.J. and Viergever, M.A. (Eds.), Lecture Notes in Computer Science 2208, pp.752-761, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 4) Fitzpatrick, J.M., West, J.B. and Maurer Jr., C.R.: Predicting Error in Rigid-Body Point-Based Registration, IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.17, No.5, pp.694-702 (1998).
- 5) 笹間俊彦, 仲程 啓, 井階美歩, 佐藤嘉伸, 菅野伸彦, 米延策雄, 越智隆弘, 田村進一: 人工股関節手術支援システムの誤差伝播モデルに基づく精度検証, 信学技報, Vol.100, No.172, MI2000-29, pp.61-66 (July 2000).
- 6) Sato, Y., Sasama, T., Sugano, N., Nakahodo, K., Nishii, T., Ohzono, K., Yonenobu, K., Ochi, T. and Tamura, S.: Intraoperative Simulation and Planning Using a Combined Acetabular and Femoral (CAF) Navigation System for Total Hip Replacement, Lecture Notes in Computer Science, 1935 (Proc. Third International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI2000), Pittsburgh, Pennsylvania), Springer, Berlin, pp.1114-1125 (2000).
- 7) Nakahodo, K., Sasama, T., Sato, Y., Sugano, N., Ohzono, K., Nishii, T., Nishihara, S., Yonenobu, K., Ochi, T. and Tamura, S.: Intraoperative Update of 3-D Bone Model During Computer Navigation of Pelvic Osteotomies Using Real-Time 3-D Position Data, Proc. 14th International Congress and Exhibition: Computer Assisted Radiology and Surgery (H.U.Lemke et al. Eds.), pp.252-256, Elsevier, Amsterdam (2000).
- 8) 土屋 啓, 余田真人, 佐藤嘉伸, 田村 学, 川本将浩, 不二門尚, 久保 武, 田村進一: 意識下における人間頭部のトラッキング手法, 信学技報 Vol.100, No.172, MI2000-28, pp.55-60 (July 2000).
- 9) 宮本仁樹, 中島義和, 中本将彦, 佐藤嘉伸, 橋爪 誠, 田村進一: 腹腔鏡下手術支援を目的とした光磁気ハイブリッドセンサによる3次元超音波画像の獲得, 信学技報, PRMU2001-3, MI2001-15, pp.17-22 (May 2001).

(平成14年4月2日受付)