

整形外科手術ナビゲーションの原理

Principle of computer assisted orthopaedic surgical navigation

佐藤嘉伸 笹間俊彦 仲程 啓 菅野伸彦
西井 孝 大園健二 越智隆弘 田村進一

はじめに

手術を客観的かつ定量的にモニタリングするための医療機器として、コンピュータ支援による手術ナビゲーションシステムが注目されつつある。整形外科領域では、その必要性の高さに加えて、骨が硬組織であり組織の変形を無視することが可能で、技術的取り扱いが比較的容易であることから、脳神経外科に次いで、手術ナビゲーションの研究が早期に開始された¹⁾。本稿では、骨切り術^{2),3)}や人工関節置換術⁴⁾などを想定し、対象となる患部が剛体(変形しない)であると仮定して議論を進める。骨は、剛体と仮定して差し支えないと考えられるが、関節全体としてとらえた場合、剛体とはみなせない。よって、例えば、股関節の場合、股関節全体を考えず、手術ナビゲーションの対象は、骨盤あるいは大腿骨の一方であると仮定する*1。以下では、まず、手術ナビゲーションのポイントとなる構成要素と基本概念を自動車用ナビゲーションとの対比に基づいて導入した後、構成要素と基本概念の個々について詳しく説明する。

手術ナビゲーションにおける構成要素と基本概念

手術ナビゲーションにおける構成要素と基本概念

手術ナビゲーション(以下、手術ナビ)の基本的な構成要素は、自動車用ナビゲーション(以下、カーナビ)と同様に、「三次元位置センサ(カーナビの場合はGPS)」と「地図」である。手術ナビでは、「地図」として、通常、術前CT/MR画像が用いられる。自動車の位置を地図上で確認するのと同様、手術器具の先端位置や方向を術前CT/MR画像上で確認することが、手術ナビの1つの目的である。図1に、手術ナビ画面の例を示す。以下では、カーナビとの相違点に着目することにより、本稿で取り上げる構成要素と基本概念の導入を行う。

■ 光学式三次元位置センサ

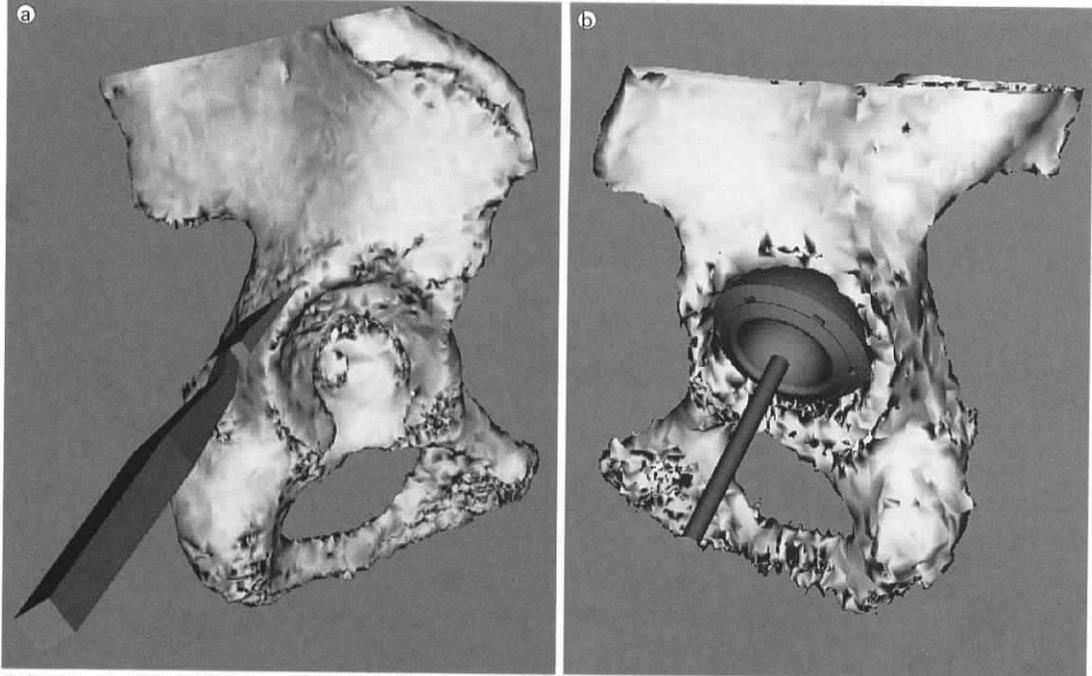
手術室環境での使用に適した、カーナビのGPSに相当する三次元位置センサが必要である。手術室のような限られた空間内を計測するための三次元位置センサには、光学方式、多関節方式、磁気方式などがある。多関節方式では、精度的には優れているが、計測点が機械的に関節結合されているため操作性に問題がある。ま

Key words : computer assisted surgery, surgical navigation, osteotomy, total hip replacement, three-dimensional position sensor, calibration, tracking, registration

Y. Sato, T. Sasama, K. Nakahodo, S. Tamura : 大阪大学医学部附属バイオメディカル教育研究センター機能画像診断学 ; N. Sugano, T. Nishii, K. Ohzono : 大阪大学医学部整形外科 ; T. Ochi : 大阪大学医学部医工学治療学

* 1 : 骨盤あるいは大腿骨の両方をナビゲーション対象としたい場合、これから述べていく手順を、骨盤と大腿骨のそれぞれに別個に行うことが必要である。

図1 股関節手術ナビゲーションの例



術中において、実際に計測された手術器具の位置および方向が、ナビゲーション画面において、実時間でモニタリングできる。①：骨盤骨切り術における骨ノミの誘導。②：人工股関節置換術におけるcupの誘導。

た、同時に1カ所しか計測できないという問題がある。磁気方式は、操作性には最も優れているが、金属性の物体が近くにあると、磁場の歪みが生じて、十分な精度が得られないという問題がある。精度の高さと手術室環境での使いやすさにおいて、現在のところ、整形外科手術ナビにおいては「光学方式」の三次元位置センサ(図2)が最も優れている。

■ キャリブレーション

カーナビでは、三次元位置センサで計測された位置を、そのまま車の位置とみなせるのに対して、手術ナビでは、直接的に三次元計測がなされる場所と、手術において位置・方向確認が必要とされる場所(この場合、手術器具の先端とする)が異なっている(図3)。術前に、直接計測位置・方向と器具先端位置・方向との空間関係(数学的には座標変換行列で表現される)を求めておく処理を「キャリブレーション(calibration)*2」とよぶ。

bration)*2」とよぶ。

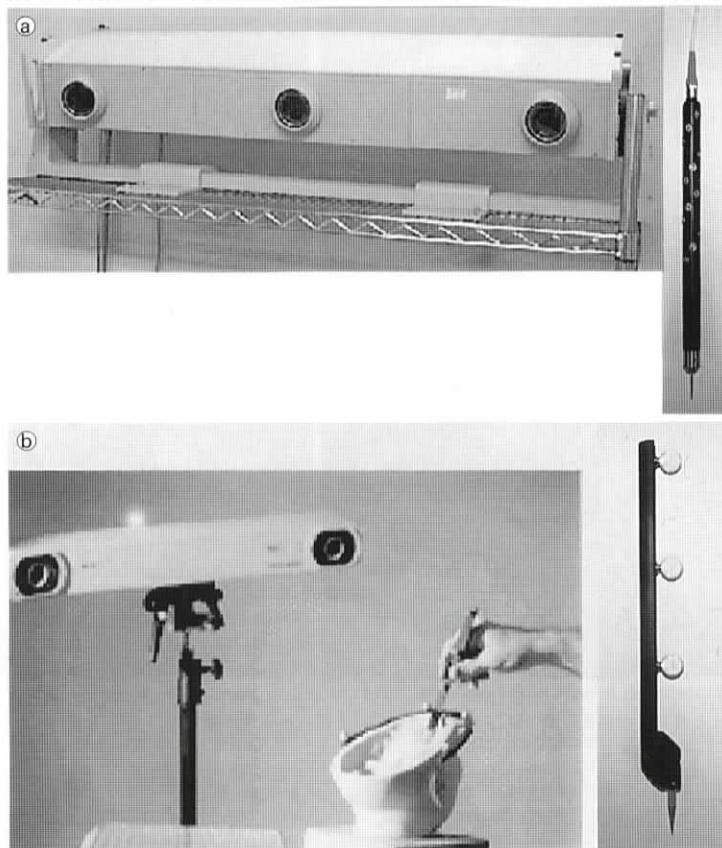
■ トラッキング

カーナビでは、地図に対応する実体(地面や道路)が移動するということはないが、手術ナビでは、手術中の患者の姿勢の変化などで、手術対象となる骨が移動することがしばしばある。この動きを、三次元位置センサを用いて、手術中絶えずモニタリングし、位置ずれを補正する処理を「トラッキング(tracking)*3」とよぶ。

*2：元来の意味は、計測機器において、測定値から真値を得るための補正である。

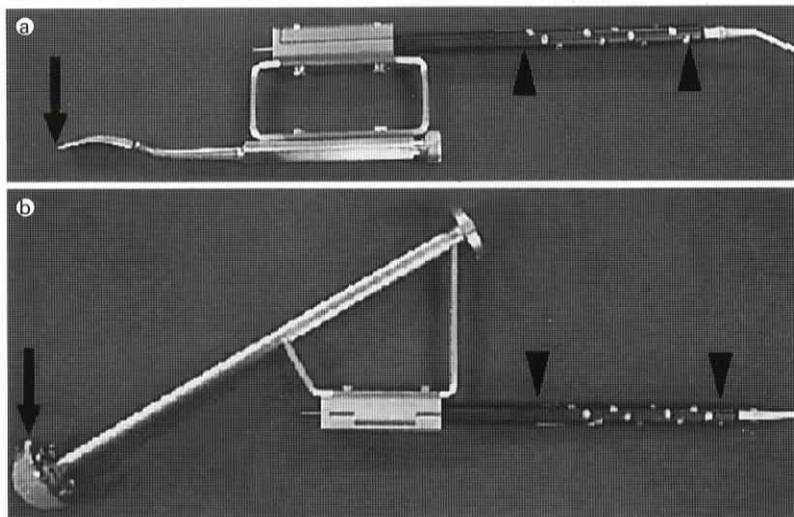
*3：トラッキングは、手術器具の動きの追跡という意味にも用いられることも多いが、本稿では、「手術対象となる骨の動きを追跡し補正処理を行う」という意味に限定して用いる。

図2 代表的な光学式三次元位置センサ(左図)と専用ペンブローブ(右図)



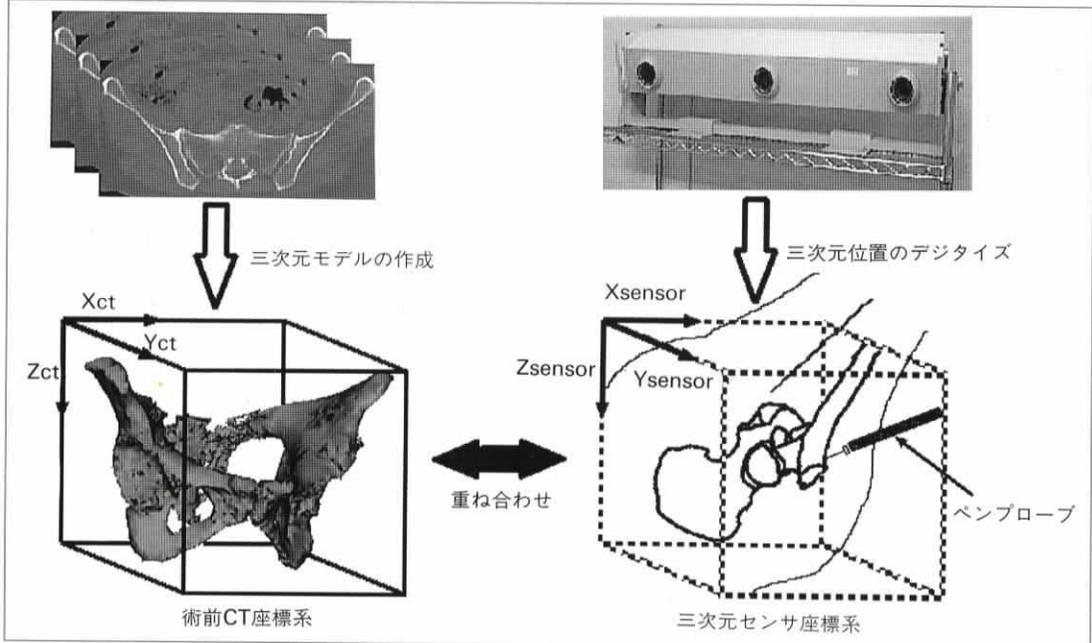
Ⓐ: Optotrak, Ⓑ: Polaris. Polarisでは、専用ペンブローブは、反射式マーカを用いたものを示している。

図3 手術ナビゲーション用手術器具の例



矢印は、実際に計測したい部分、矢頭は、直接計測される部分(光学マーカ付き剛体)を示す。
Ⓐ: 骨ノミ, Ⓑ: 人工股関節用cup誘導器具。

図4 レジストレーションの概念図



術前CT座標系と三次元センサ座標系において、同一点に対応する箇所が、正確に重ね合わせできるような座標変換を求める。

■ レジストレーション

カーナビでは、三次元位置センサで計測される座標値（例えば、緯度と経度）が、地図上の座標値と一致しているのに対して、手術ナビでは異なっている。すなわち、三次元位置センサで計測される座標値は、三次元位置センサが定義する「センサ座標系」での三次元座標であり、地図上での座標値は、「CT/MR座標系」での三次元座標である（図4）。この2つの座標系の位置合わせを行う処理を、「レジストレーション (registration)*4」とよぶ。

光学式三次元位置センサ

光学式センサは複数のテレビカメラで構成され、両眼（多眼）立体視の原理を用いて、テレビカメラで撮影された光学マーカの像を解析す

ることにより三次元位置を計測する。光学マーカとしては、通常、発光ダイオード (light emitted diode; LED) が用いられ、発光点の三次元座標が計測される。その原理から明らかなようにセンサと光学マーカの間で光線が遮蔽されると計測は行えない。遮蔽は、臨床適用においても、しばしば大きな制約となり、手術室におけるセンサと計測対象の配置に関して、十分な検討を行う必要がある。

現在、市販されている代表的な光学センサを表1にまとめる。Optotrak (Northern Digital Inc. (NDI), Ontario, Canada) が、性能的には最も優れているが、サイズ・重量がかなり大きくなる。また、Polaris (NDI) では、小型軽量、かつ、光学マーカとして、LEDのような発光式マーカ（発光させるための電源供給が必要で、コード接続されている）のみならず、反射式マーカ（電源供給が不要なので、コードレス）を用いることが可能で、使いやすさの点で優れている。図2に、OptotrakとPolarisの概観を示す。これらのセンサの基本機能は、光学マーカ

*4：元来の意味は、多色刷り写真製版における各色の版の正確な重ね合わせであり、画像処理の分野では画像同士の位置合わせの意味によく用いられる。

表1 代表的な光学式三次元位置センサ

商品名	Optotrak 3020	Polaris (hybrid)	FlashPoint 5000
計測マーカー精度	LED 0.1mm	LED, 反射球体 0.35mm	LED 0.3mm
センサ重量	45kg	2kg	5kg
計測範囲	約1.2m四方	半径50cm	半径50cm
計測速度 ^a	600Hz/マーカー	60Hz/剛体(発光式) 20Hz/剛体(反射式)	300Hz/マーカー
ベンダー	Northern Digital Inc. ^b	Northern Digital Inc. ^b	Image Guided Technology Inc. ^c
概算米国価格	\$60,000	\$30,000	\$25,000

^aPolarisでは、「複数マーカーを組み合わせた剛体の位置・姿勢計測」および「専用プローブによる位置計測」の結果を直接出力し、マーカー単位の位置計測はサポートされていない。同時に最大3個の剛体に対しての計測が可能である。一般に、1個の剛体計測に対して最低3個のマーカーが必要であるので、3個の剛体計測を行う場合の計測速度は、Optotrakに関して、600/(3×3)Hz/剛体、FlashPointに関して、300/(3×3)Hz/剛体、と概算できる。^b<http://www.ndigital.com/>、^c<http://www.imageguided.com/>。

の三次元座標の位置計測であるが、実際には、複数のマーカーの計測値を組み合わせることで、以下の2つの用途に用いられる。

■(手術器具や骨に取り付けられた)剛体 (rigid body) の位置・方向の計測

剛体^{*5}の位置・方向の自由度は、6自由度(平行移動3, 回転3)であり、それを決定するためには、剛体上の少なくとも(一直線上でない)3カ所での三次元位置の計測が必要になる。手術器具に取り付けられた剛体の例は、図3に示されている。

■専用ペンプローブを用いた三次元位置のデジタイズ

専用のペンプローブを用いることにより、ペンプローブ先端の三次元位置座標を入力する(図2右図)。

キャリブレーション

キャリブレーションは、術前に行われる処理で、直接計測位置と器具先端位置の関係が固定

している場合には、1回だけ行われるものであり、手術ごとに行う必要はない。この処理によって、直接計測位置の情報に基づいて、器具先端位置を計算することが可能になる。手術器具には、複数の光学マーカーが埋め込まれた剛体を取り付ける。キャリブレーションを行うには、光学マーカー付き剛体の位置・向きを三次元センサで計測すると同時に、手術器具の先端位置と方向^{*6}を専用プローブでデジタイズする。以上の計測値に基づいて、光学マーカー付き剛体と手術器具の先端位置と方向の相対的な空間関係(座標変換行列)を算出する。

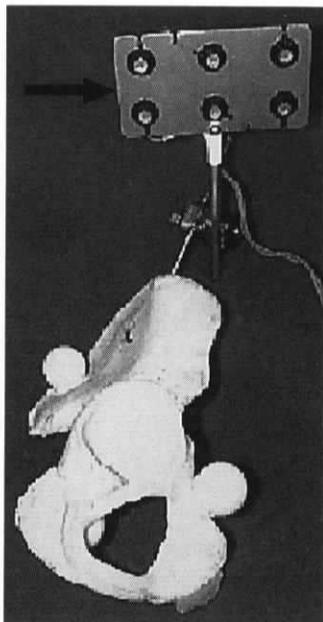
トラッキング

手術ナビを行うにあたって、術中に最初に行うべき操作は、複数の光学マーカーが設置された剛体を手術対象となる骨に固定することである(図5)。手術ナビに必要なあらゆる三次元計測を行う際に同時に、骨に固定した剛体(基準剛体)の位置と向きを計測する。そして、すべての三次元計測値は、基準剛体からの相対座標に変換される。これにより、手術対象となる骨の移動による影響を除去することができる。

*5: 本稿では、剛体 (rigid body) は、主に、「光学式三次元位置センサを用いた物体の位置・方向計測において、計測対象物体に取り付けるための剛体性の物体」という限定した意味に用いる。

*6: 方向のデジタイズは、器具先端の方向に沿った2点の三次元座標をデジタイズすることで行う。

図5 トラッキングのための手術対象（骨盤）への基準剛体の固定



矢印は、骨盤に固定された基準剛体を示す。基準剛体には、6つのLED(発光式マーカ)が設置されている。

レジストレーション

レジストレーションは、各手術ごとに、前述のトラッキングのための基準剛体の固定の後、ナビゲーションの開始前に行われる処理で、手術ナビの精度に大きな影響を与える重要な処理である。「術前CT/MR座標系」中の対象物体(例えば、骨盤)の像と「三次元センサ座標系」中の同じ対象物体(術中の骨盤)の実物とをピッタリ重ね合わせできるような「術前CT/MR座標系」と「三次元センサ座標系」の空間関係(座標変換行列)を求めることが、レジストレーションの目的である。これを行う代表的な方法に、以下の2つの方法がある

■ 基準マーカ法

CT撮影前に、3カ所かそれ以上の基準点マーカを骨盤に埋め込み、CT画像での基準点マーカ像の三次元座標(CT座標系)と、術中にデジタル化した基準点マーカ実物の三次元座標(センサ座標系)が、すべての基準点において正確に重ね合わせできるような座標変換を求めること

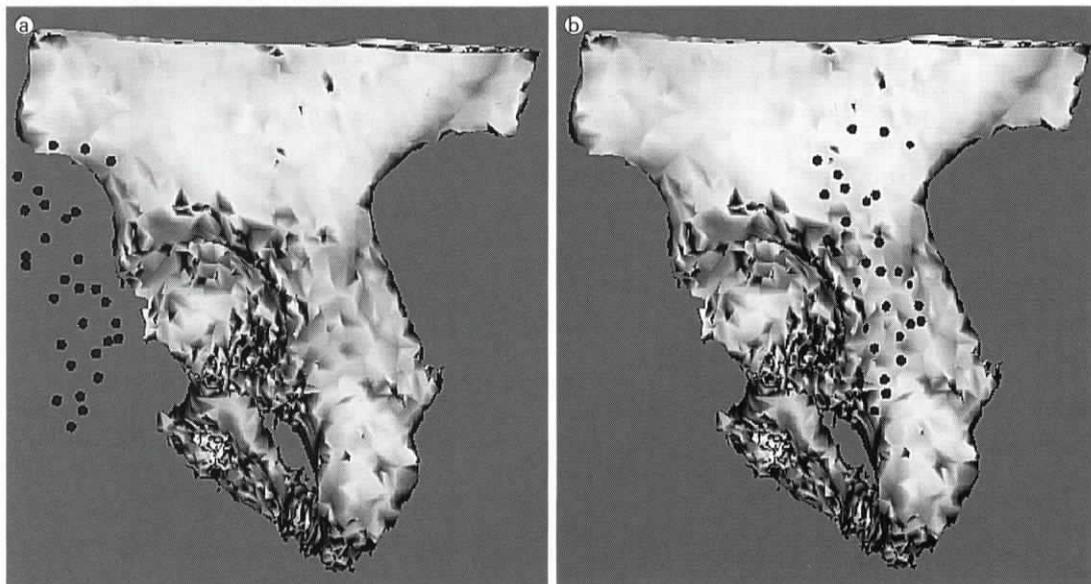
で、レジストレーションを行う。

■ 表面照合法

術前CT画像から骨の三次元表面モデルを再構成し、術中に骨表面を多数点デジタル化して得られた三次元点の集合に正確に重ね合わせできるような座標変換を求めることで、レジストレーションを行う。

後者の場合には、三次元表面モデルの精度(CTのスライス厚)、デジタル化する点の数や術野におけるデジタル化の範囲などに注意を要するが、骨盤や大腿骨のレジストレーションに関しては、位置誤差2mm以下、方向誤差2°以下で、精密に達成できることが確認されている^{5),6)}。図6は、術前モデルと実際に術中にデジタル化された骨盤表面上の三次元点を、表面照合法によるレジストレーションの前後で比較して表示している。後者の方法は、術前の基準マーカ埋め込みの手間と侵襲性が小さい点で優れているが、今のところ、CT/MR画像から三次元表面モデルを再構成する手間においてやや問題が残る。

図6 レジストレーションの実際



術中にデジタル化された骨盤表面上の三次元点を黒点で表示し、術前CTから再構成された骨盤三次元モデルと重ねて示している。
①：レジストレーションを行う前の状態。②：表面照合法によるレジストレーションの結果、術中にデジタル化された骨盤表面上の点の、術前CTモデルの表面への正確な重ね合わせが達成されている。

おわりに

■まとめ

整形外科手術ナビの原理に関して、ポイントとなる構成要素と概念を説明した。これまで述べたきた術前のキャリブレーション、術中のトラッキングおよびレジストレーションが十分な精度で達成されることが、手術ナビを正確に行うための前提条件である。以上の前提条件が整えば、手術器具の先端位置・方向を術前CT/MR画像上で確認するのみならず、術前CT/MR画像(CT/MR座標系)を用いた手術計画で設定した関節部品の設置位置・角度や骨切りの切断位置・角度と、術中における実際の位置・角度との差分を、実時間で確認することが可能になる。

■術者のシステム操作

手術ナビを行うにあたり、本稿で述べた処理手順に対して、将来的に、術者自身がどの程度関与する必要があるかを以下にまとめておく。

キャリブレーションに関しては、将来的に、手術ナビシステムが医療機器製品として商業的に確立すれば、メーカーにおいてキャリブレーション済みの器具が普及するとも考えられ、その場合、術者が意識する必要はなくなる。トラッキングに関しては、基準剛体の設置は、術者に委ねられる操作であり、光学式三次元センサとの遮蔽が起りにくいように確実に固定することが重要である。レジストレーションに関しても、将来的にも、かなりの部分が術者に委ねられると考えられる。レジストレーション精度を向上させるためのさまざまなノウハウは、研究が進むにつれ確立されていくことが予想されるが、さまざまなノウハウのなかから最適な手順を選択し、それを実行するのは、あくまで術者である。レジストレーションの結果は、全体の精度に与える影響がとくに大きく、その精度的限界、および、手間/侵襲性と精度との兼ね合いを、術者が十分に把握してレジストレーションの方法を選択し実行することが重要である。

■今後の発展

カーナビシステムとの相違のなかで、本稿では取り上げなかった重要なものとして、「手術が進行するにつれ、地図そのものを術中更新していかなければならない」という点があげられる。そのためには、術中CT/MR/X線などのイメージングモダリティが必要とも考えられるが、骨の手術に限った場合、術中画像モダリティなしでも、手術ナビシステムにより得られる手術器具の三次元軌跡情報と術前CT/MR情報の組み合わせに基づいて、かなり正確な術中三次元再構成が可能になると考えている^{2),3)}。

■文献

- 1) Taylor, R. H., et al., eds. : Computer-integrated Surgery. The MIT Press, Cambridge MA, 1996.
- 2) Sato, Y., et al. : Image guided orthopedic surgery using osteotome with 3D localizer. Journal of Computer Aided Surgery (Proc. Second International Symposium on Computer Aided Surgery (ISCAS'95), Tokyo, Japan), 1 Supl. : 26-27, 1995.
- 3) 中島義和ほか : 整形外科手術支援システム—寛骨臼回転骨切り術—. Medical Imaging Technology, 15(2) : 87-94, 1997.
- 4) Sugano, N., et al. : Combined acetabular and femoral surgical navigation in total hip arthroplasty. Computer Assisted Radiology and Surgery : 13th International Symposium and Exhibition (CARS '99), Paris, France, in press, 1999.
- 5) Sasama, T., et al. : Accuracy evaluation of shape-based registration for image-guided hip surgery—Effect of quality of preoperative CT model and intraoperative data on registration accuracy—. Computer Assisted Radiology and Surgery : 12th International Symposium and Exhibition (CAR '98), Tokyo, Japan, 911, 1998.
- 6) Sasama, T., et al. : Accuracy evaluation in computer assisted hip surgery. Computer Assisted Radiology and Surgery : 13th International Symposium and Exhibition (CARS '99), Paris, France, in press, 1999.