
コンピュータ統合手術支援システム

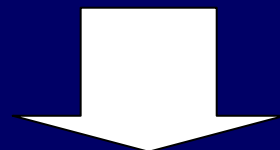
(*Computer Aided Surgery*: コンピュータ外科)

東京大学大学院工学系研究科
精密機械工学専攻
佐久間一郎

※: このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。

医療現場に何が求められているか

病気に罹患した時に、いかにしてその重篤さや合併症の発生を防ぎ、かつ病気の結果として生じる生体の機能低下を軽く食い止めるかが問われている。



低侵襲精密標的診断治療技術

Life expectancy
平均寿命

VS

Active life expectancy
活動可能寿命

内視鏡下外科手術
低侵襲治療として世界中に普及

内視鏡下外科手術の課題
内視鏡画像の限界

現 状

治療時：術前診断情報と
術中内視鏡画像のみ

最大の欠点

視覚、力覚、触覚情報の不足



確実に安全な手術ができない

例) 正確な癌や血管の局在部位の確認ができない

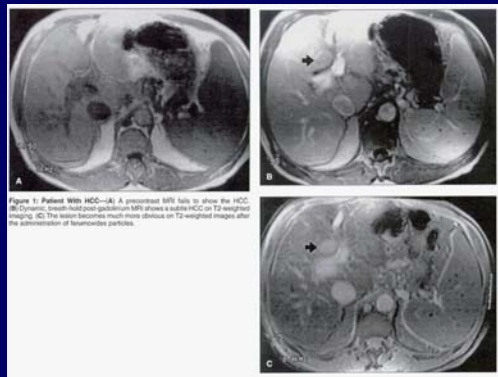
(日本内視鏡外科学会雑誌 Vol.9 No.5 2004より引用)

低侵襲治療のブレークスルー

診断と治療器の融合
画像誘導下手術支援システムの確立

例えば・・・腫瘍摘出術

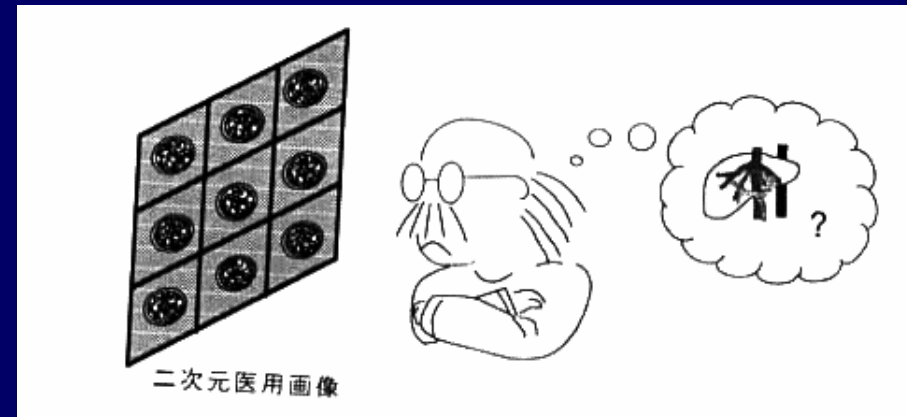
術前の診断 (MRI)



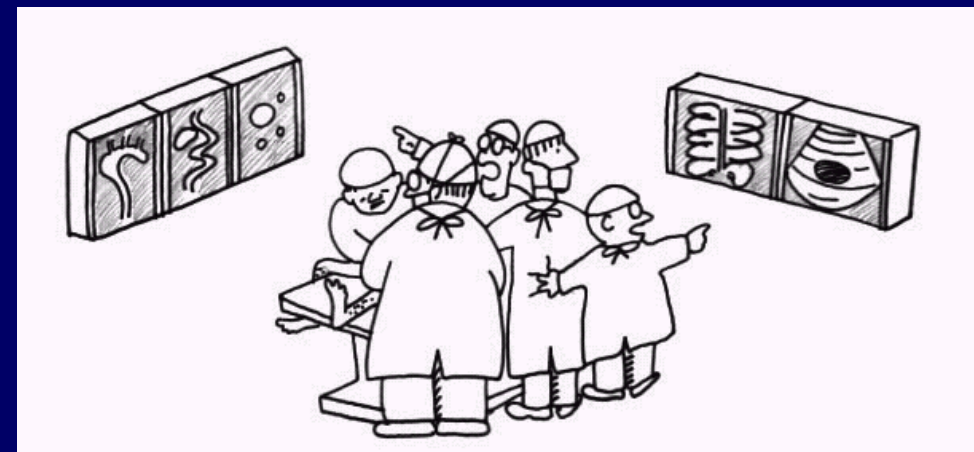
手術

大きめに切開

→ 侵襲大



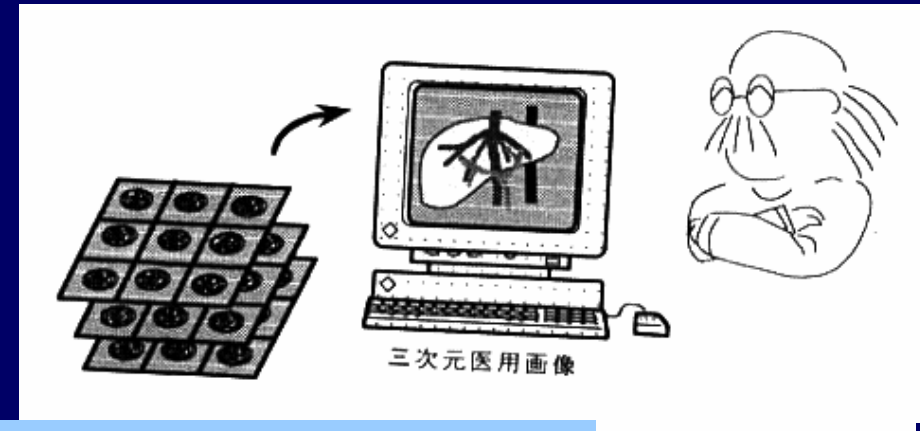
2次元 → 3次元



ガンはどこ？

例えば・・・腫瘍摘出術

術前の診断 (MRI)



術前の診断画像の3次元表示

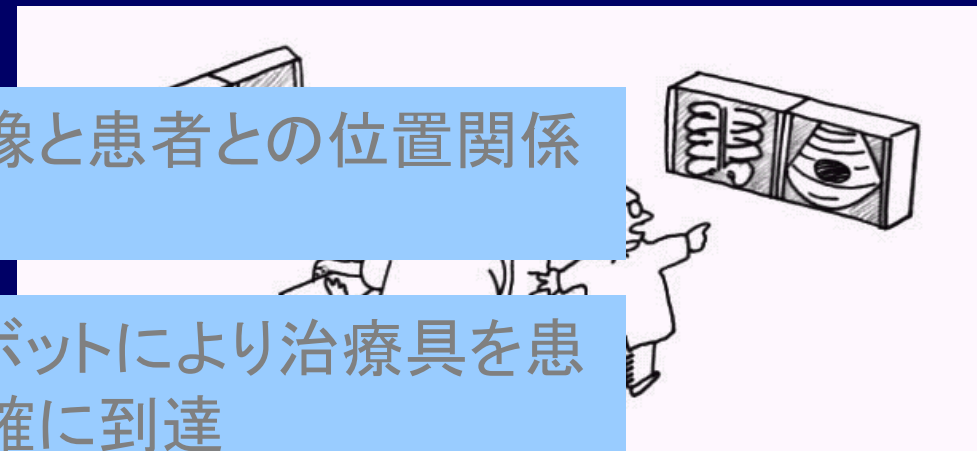
2次元 3次元

手術

小さい切開
→ 侵襲小！！

術前画像と患者との位置関係
の統合

手術ロボットにより治療具を患
部へ正確に到達



ガンはどこ？

コンピュータ外科 術者の新しい目と手

医師の第三の目
画像取得・処理・表示技術により進化した目
(Advanced Vision)



ナビゲーション等

目と手の統合

医師の第三の手
ロボット技術などにより進化した手
(Advanced Hand)

■ 新しい目

- 医用画像処理
臓器の三次元モデリング・可視化手法
- 画像表示法（3次元ディスプレイ）

■ 新しい手

- 手術支援ロボット
- 先端治療器
- 新しい手術手技の確立

■ 情報の統合

- 術前・術中の情報の統合

コンピュータ統合手術支援システム

■ 手術シミュレーション

術前計画

3次元コンピュータグラフィックスを使用した
解剖学的な3次元構造の把握

手術訓練

■ 手術ナビゲーション

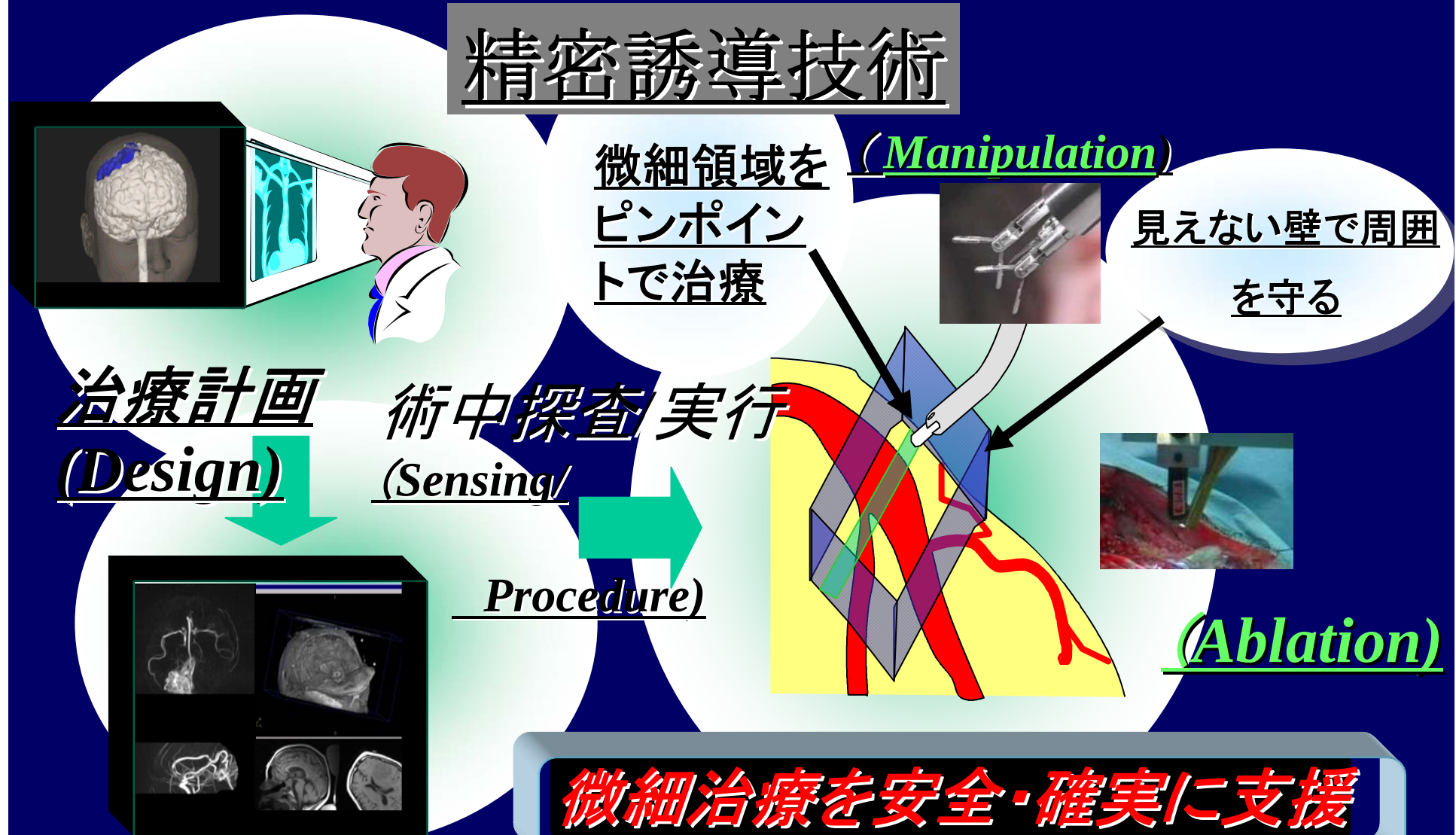
術前画像等により得た患部の位置を術中に術者へと
分かり易く提示する

■ 手術支援ロボット

患部への術具の正確な位置決め
遠隔手術の実現

可視化情報に基づく治療戦略

精密誘導技術



It may seem a strange principle to enunciate
as the very first requirement in a Hospital that
it should do the sick no harm

病院は病人に害を与えないことである

Notes on Hospitals.

John W. London: Parker and Son, 1859.

Florence Nightingale

Source:

http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E5%83%8F:Florence_Nightingale.png



重要な技術的イノベーション

- マニピュレーション
- 低侵襲技術
- 情報技術(医療情報の可視化)

コンピュータ外科：最も重要な観点

- 現在の人間の手による治療の限界を打破する治療技術の提供。
- 治療の一貫性と信頼性・質の向上
- 経済的でより良い結果をもたらす治療環境の提供



患者の福祉, Quality of Lifeの向上

社会復帰・参加の促進

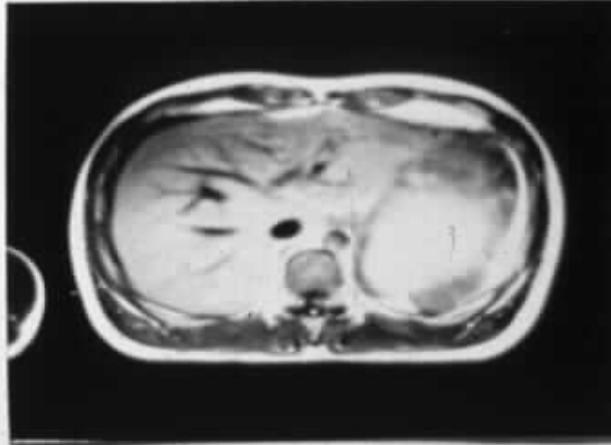
Image acquisition データの取得

: 各種医用画像

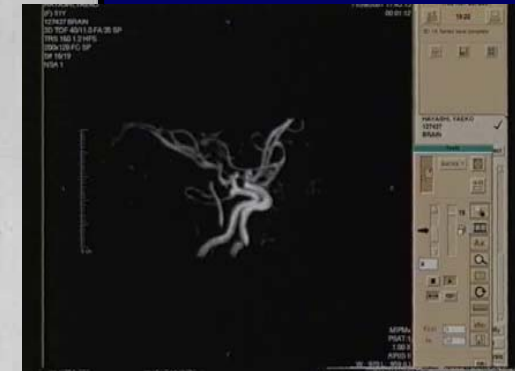
血管造影



MRI



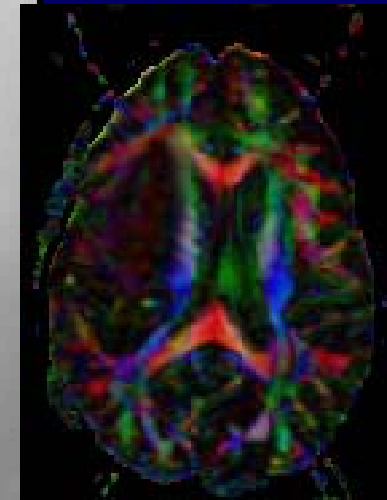
MRI 血管造影



超音波断層画
像



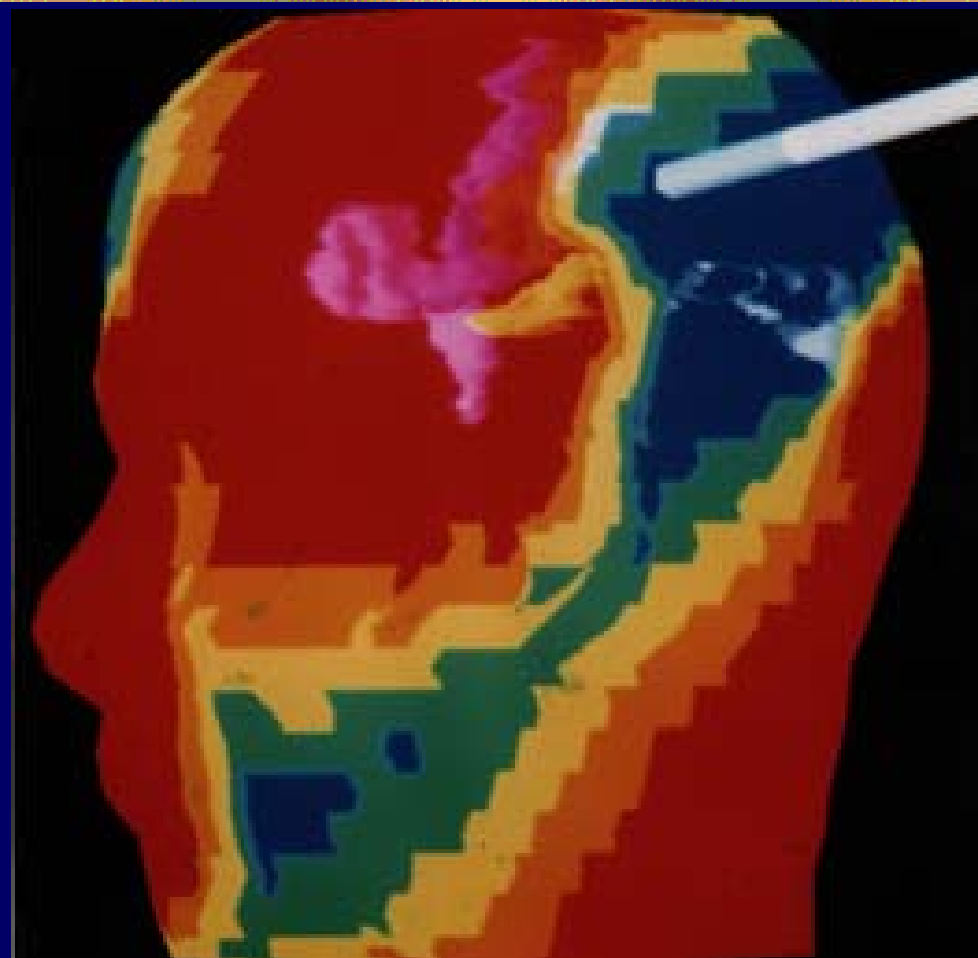
X線CT



MRI Tensor画像

術前計画

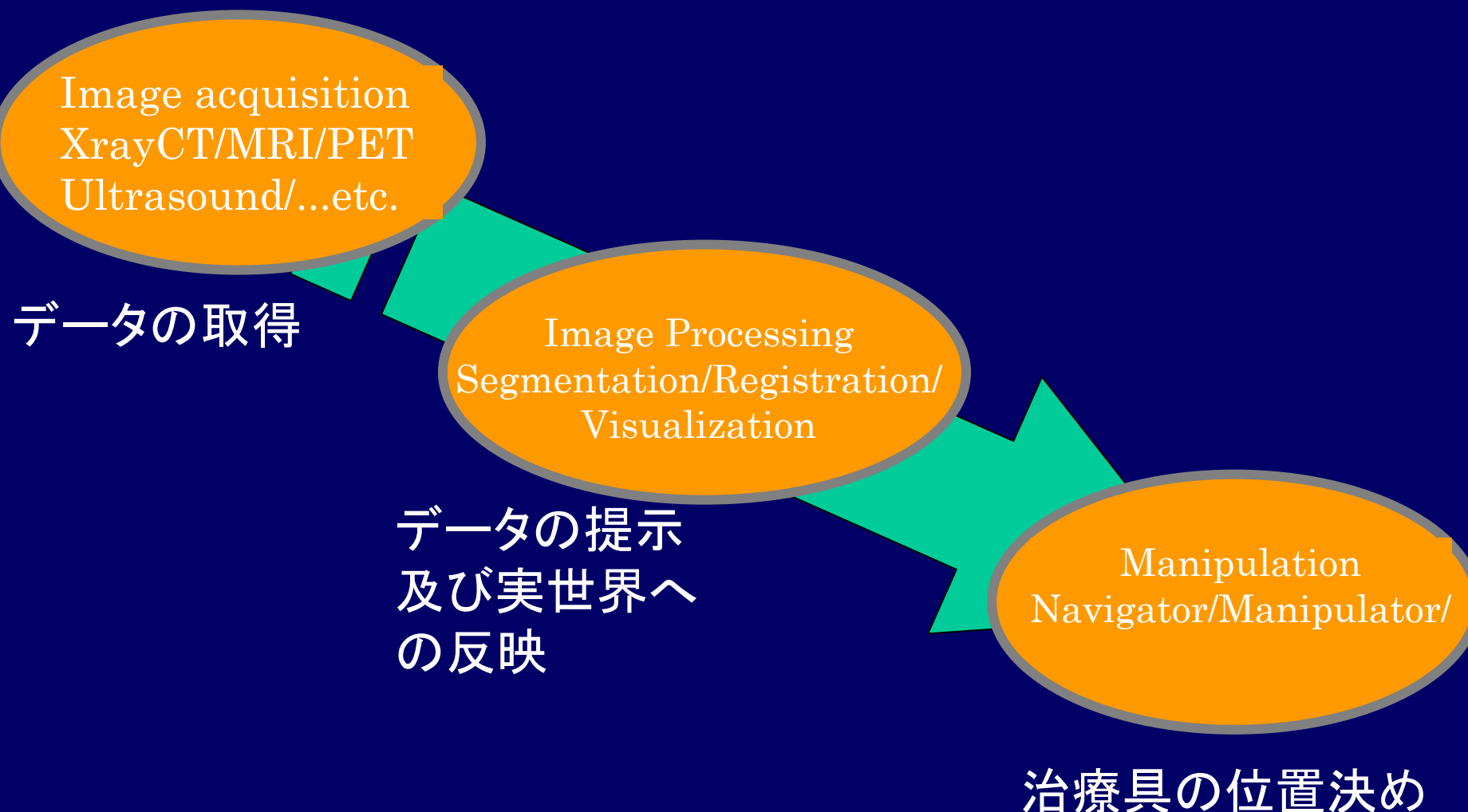
- 3次元コンピュータグラフィックスを使用した解剖学的な3次元構造の把握
- 手術シミュレーション



臓器形状モデルによる穿刺シミュレーション

赤：危険領域，青：安全領域，黄色：境界領域を表現している

手術ナビゲーションの流れ



手術ナビゲーション技術

■ レジストレーション

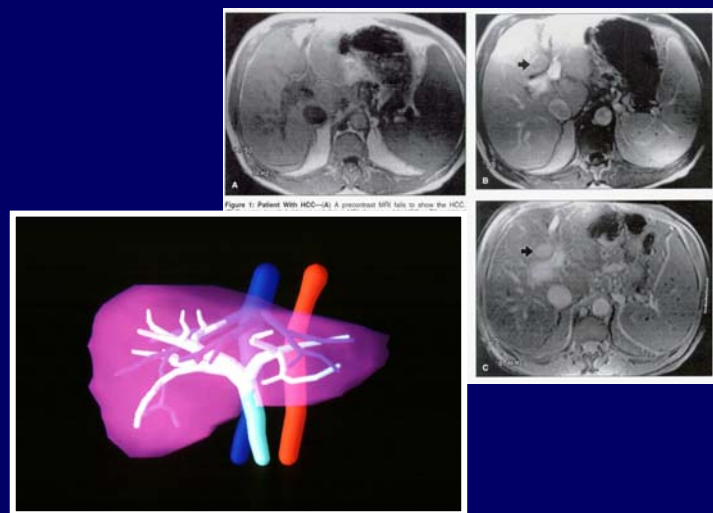
計算機モデル座標系と患者座標系の対応関係の把握
非接触 3 次元計測技術

■ 術者への提示

3 次元ディスプレイ
術者への 3 次元情報の効果的提示

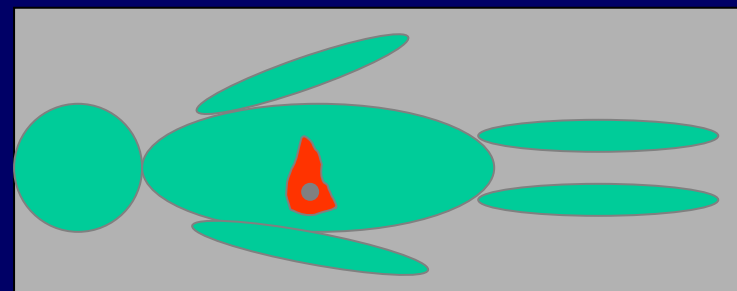
レジストレーション (1)

計算機モデル座標系 (Σ_I) と患者座標系 (Σ_P) の対応関係の把握



Σ_I

画像上の各点の位置が患者の体のどの部分に対応するかを明らかにしなければならない。



Σ_P

手術ナビゲーション技術

■ レジストレーション

計算機モデル座標系と患者座標系の対応関係の把握

画像上の特定の点に対応する患者体内点の3次元位置を非接触で計測する必要

■ 術者への提示

3次元ディスプレイ

術者への3次元情報の効果的提示

レジストレーション (2)

非接触 3次元計測技術

■ 機械式

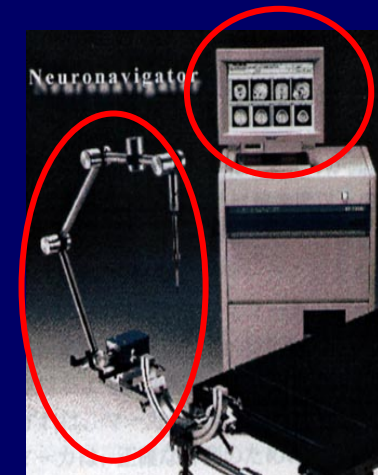
- エンコーダをつけた多関節のアームによる三次元計測装置

■ 光学式

- 光源の位置を複数のカメラで撮影して三角測量法により計測

■ 磁気式

- 送信機のコイルに電流を加えることで磁界を発生させ、その磁界によって受信機のコイルに誘起される電流を測定し受信機の位置及び姿勢を計測する





画像撮影前に画像に描出され
れるマーカを設置

手術前にそれ
らの3次元位
置を計測



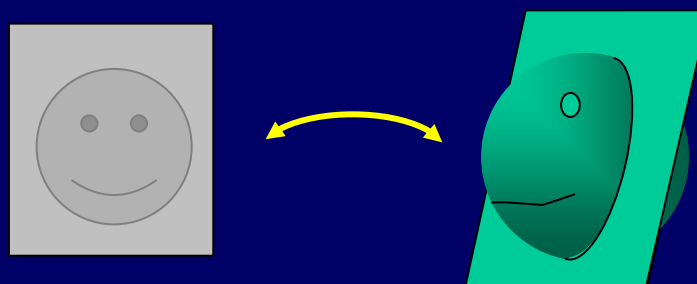
複数の種類の画像情報の統合

- MRIとCT
- MRIと超音波
- CTと内視鏡画像

これらを重ね合わせた合成画像を作り，ナビゲーションに使用する

Medical Image Registration

- 画像を対応面（異種画像（異なる診断装置、時間）、物理空間）に関連づけするために配置するプロセス



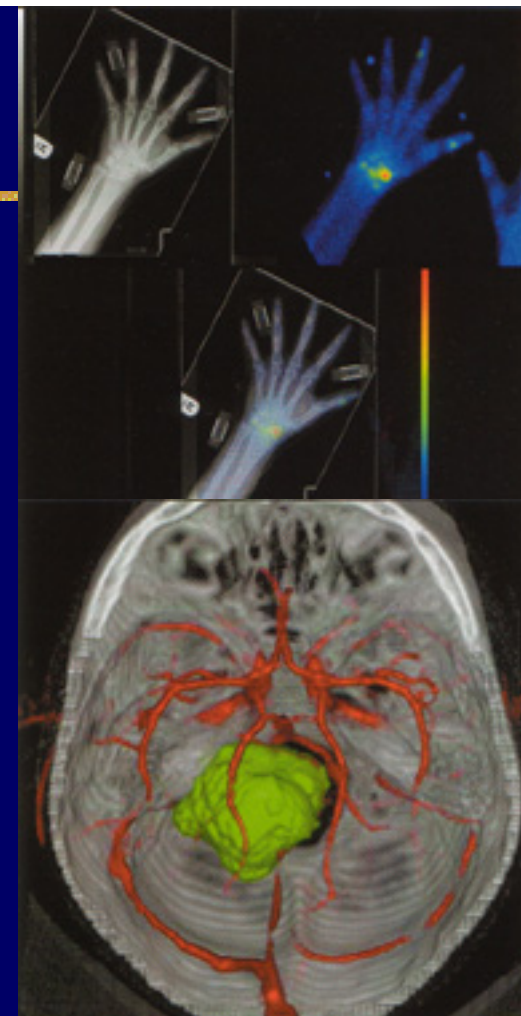
Back Ground: 医用画像の発達、計算機の発達

Image Registration プロセスは1つの画像の中にある位置的な情報を他の画像や物理空間に変換すること

→ 2つの画像の座標系間の変換を求めること

変換の種類

- 2D → 2D
X線透過像と核医学診断装置等
- 3D → 3D
もっとも一般的なRegistration
MRIとX線CT等
- 2D → 3D
MRIとX線透過像や内視鏡画像
画像誘導下手術術前3Dと術中MRI、
CT、超音波等
- 時間
時間による変化を観察
血流や代謝の様子の
観察等

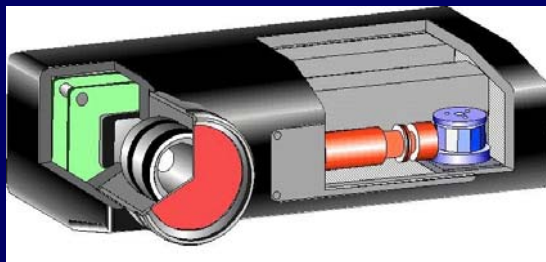


- 患者の画像を標準アトラスに対応
- 組織が変形する部位に対するもの

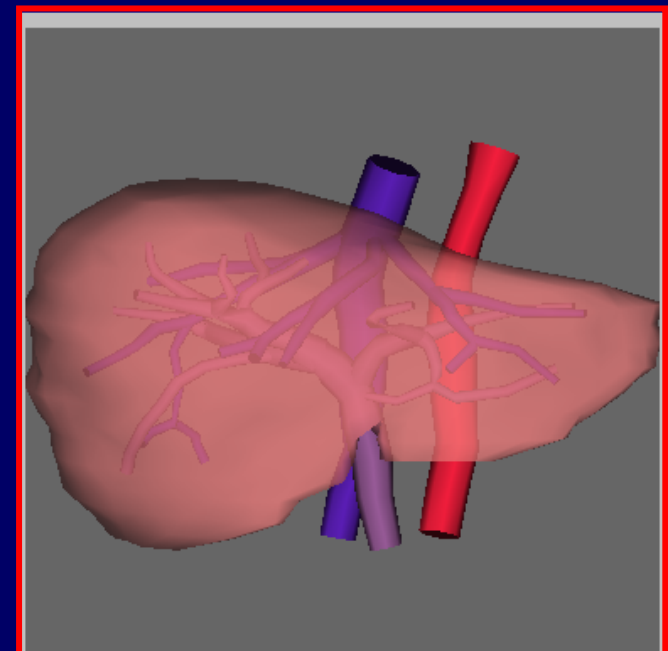
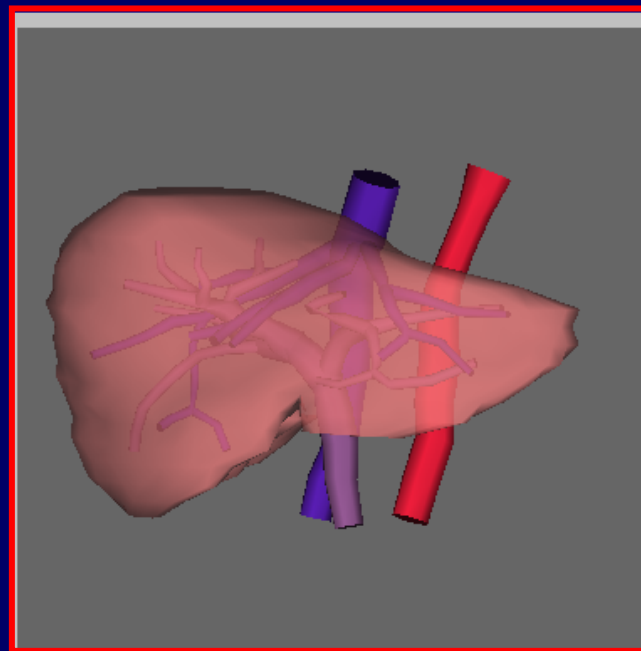
例えば . . .

- 脳標準化
個人の脳を標準脳に合わせることによって、個人の局所の脳機能の変化を調べる。
- MRI の磁場不均一性など、画像診断装置自身に起因する画像ひずみを補正

術中肝臓表面形状計測に基づく術中臓器変形解析



3次元形状センサ



形状センサで計測した表面形状にフィットするように
モデルを変形

手術ナビゲーション技術

■ レジストレーション

計算機モデル座標系と患者座標系の対応関係の把握
非接触 3 次元計測技術

■ 術者への提示

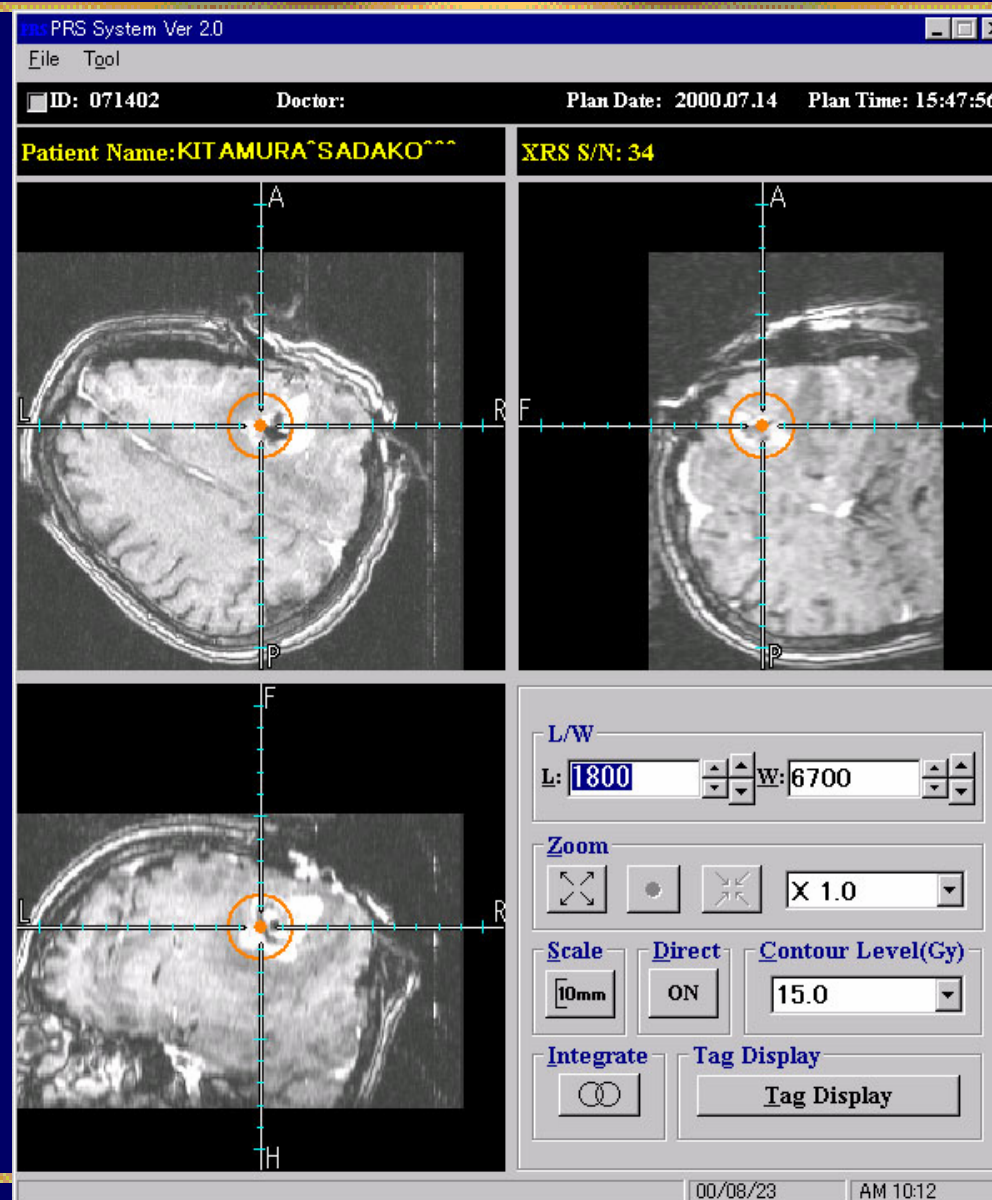
3 次元ディスプレイ
術者への 3 次元情報の効果的提示

ナビゲーションシステムの例

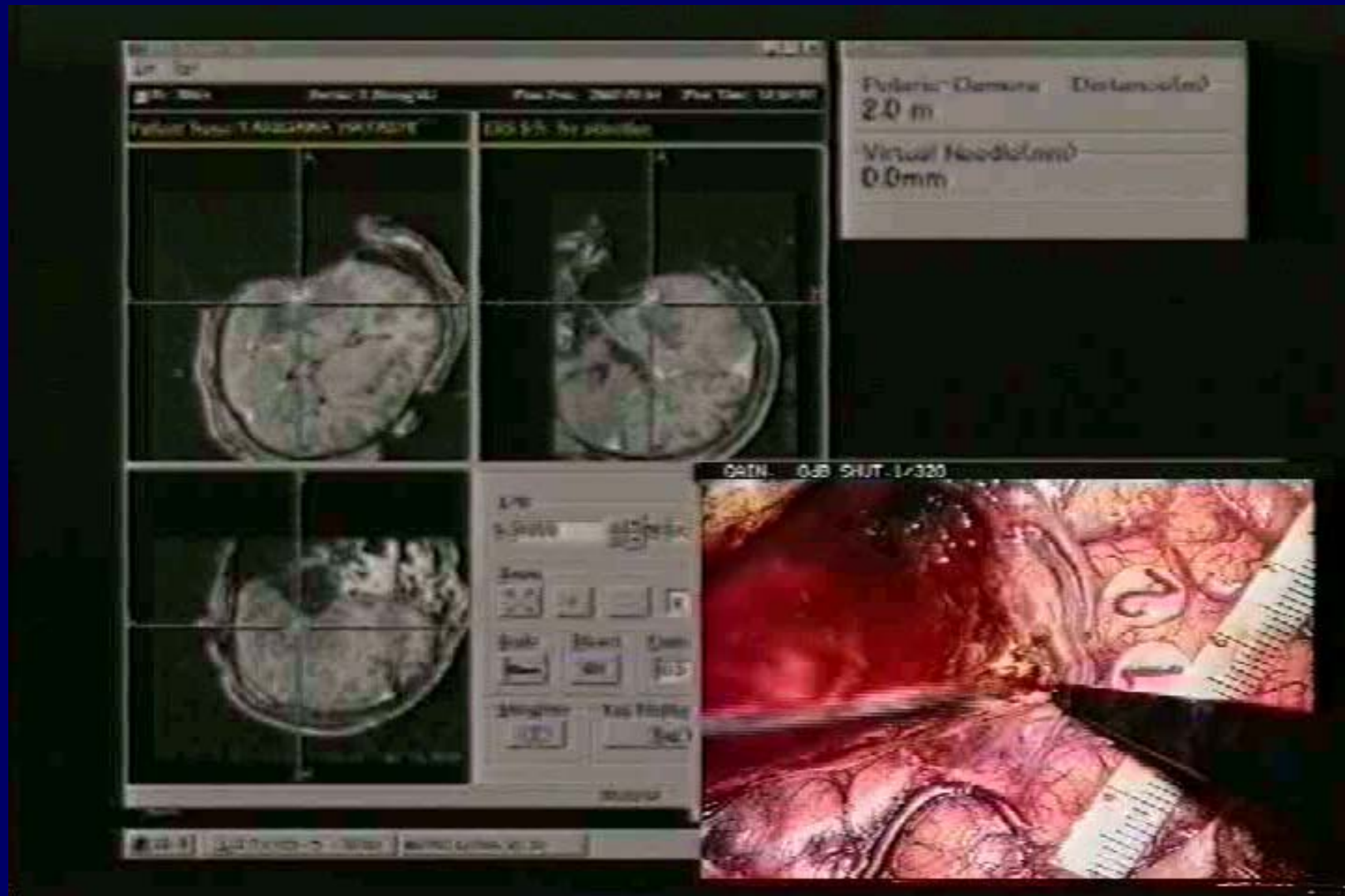
(写真提供：東京女子医科大学 伊関洋先生)



Navigation System



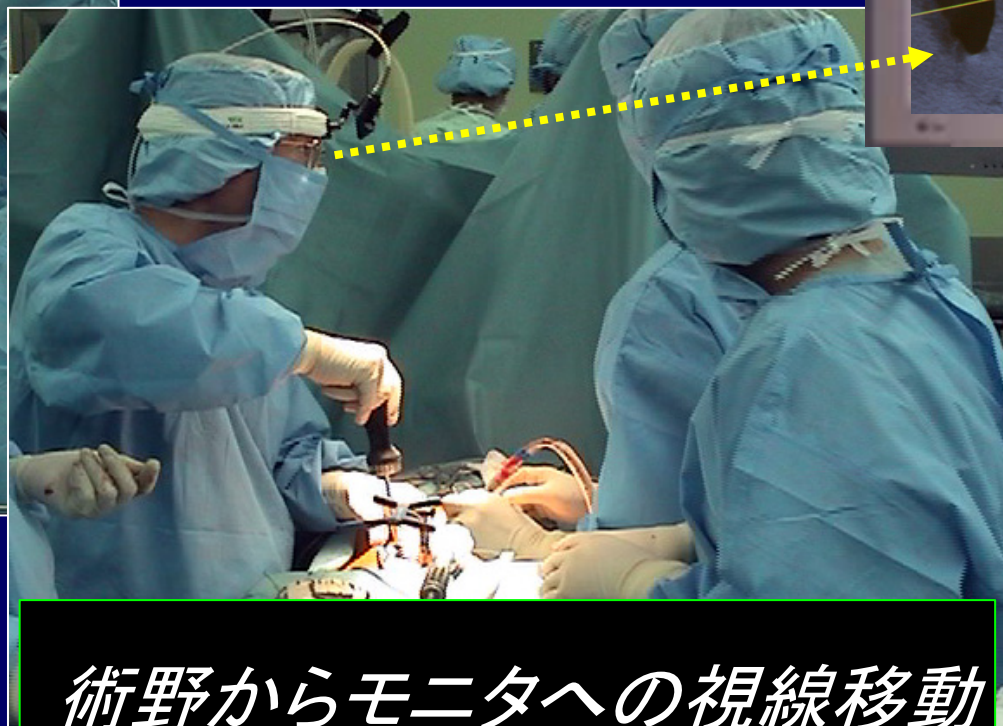
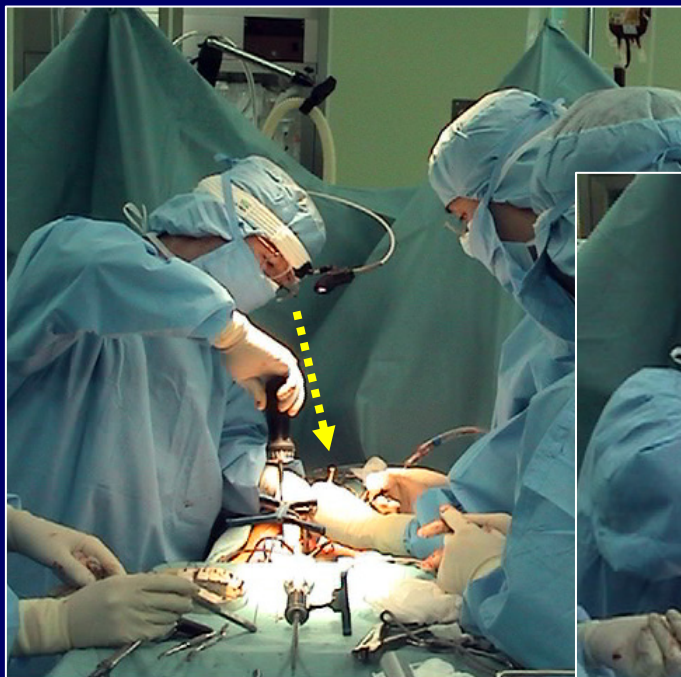
Real-time update navigation and stereotactic PRS irradiation



(映像提供: 東京女子医科大学 伊関洋先生)

Laser Guidance System

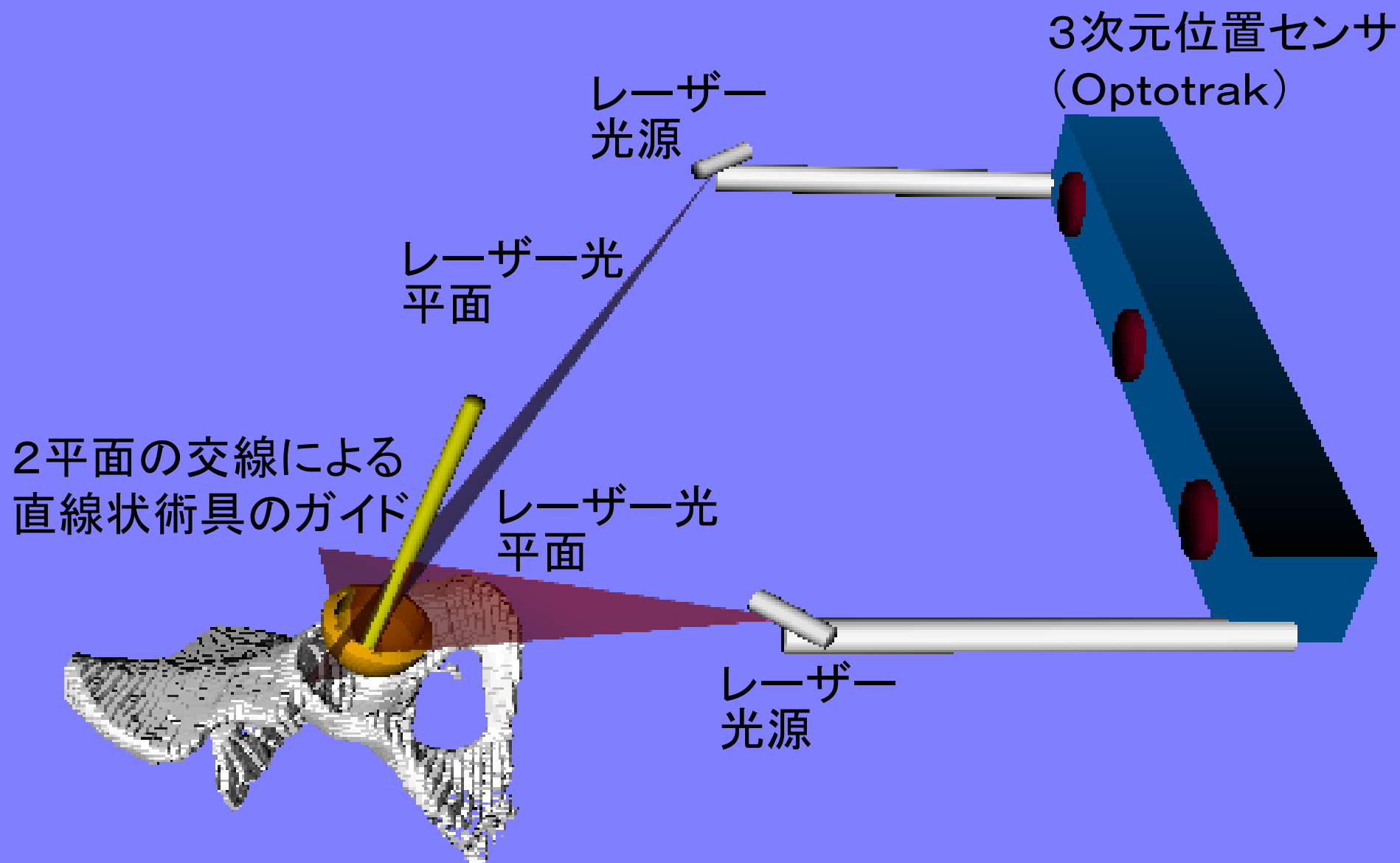
既存ナビゲーションシステムの問題点

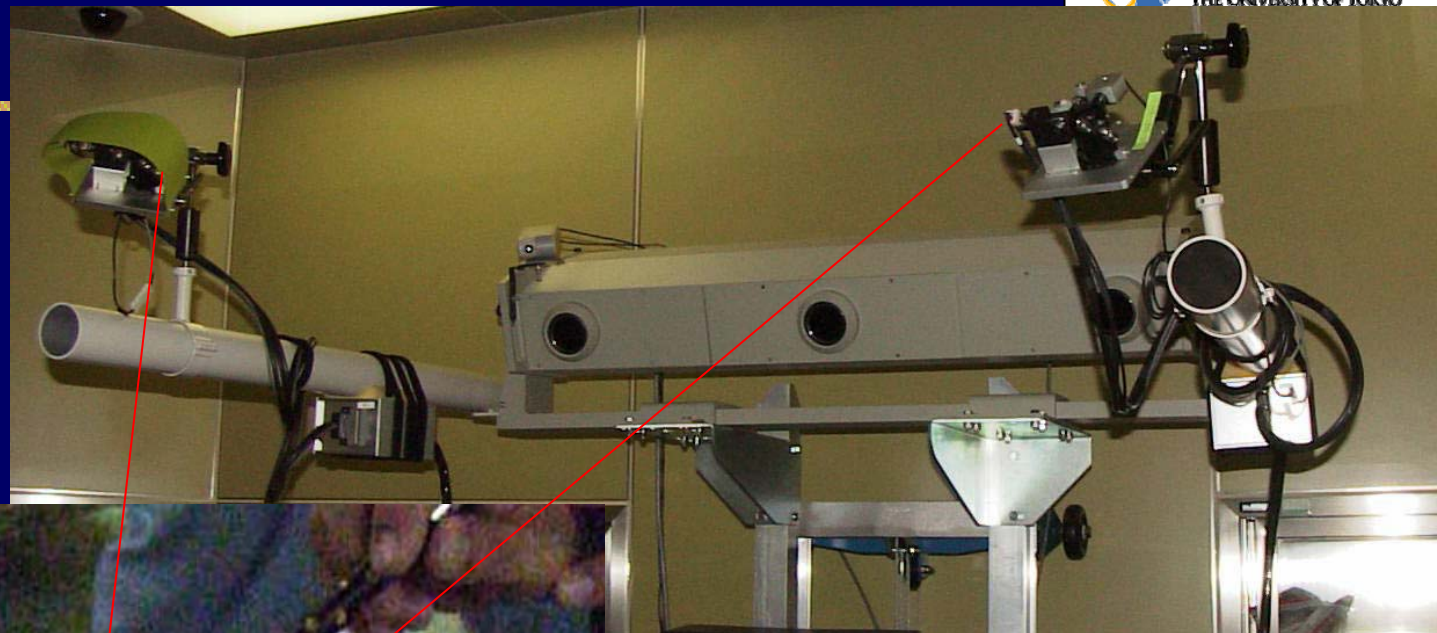


術野からモニタへの視線移動

術具操作時の手振れ？

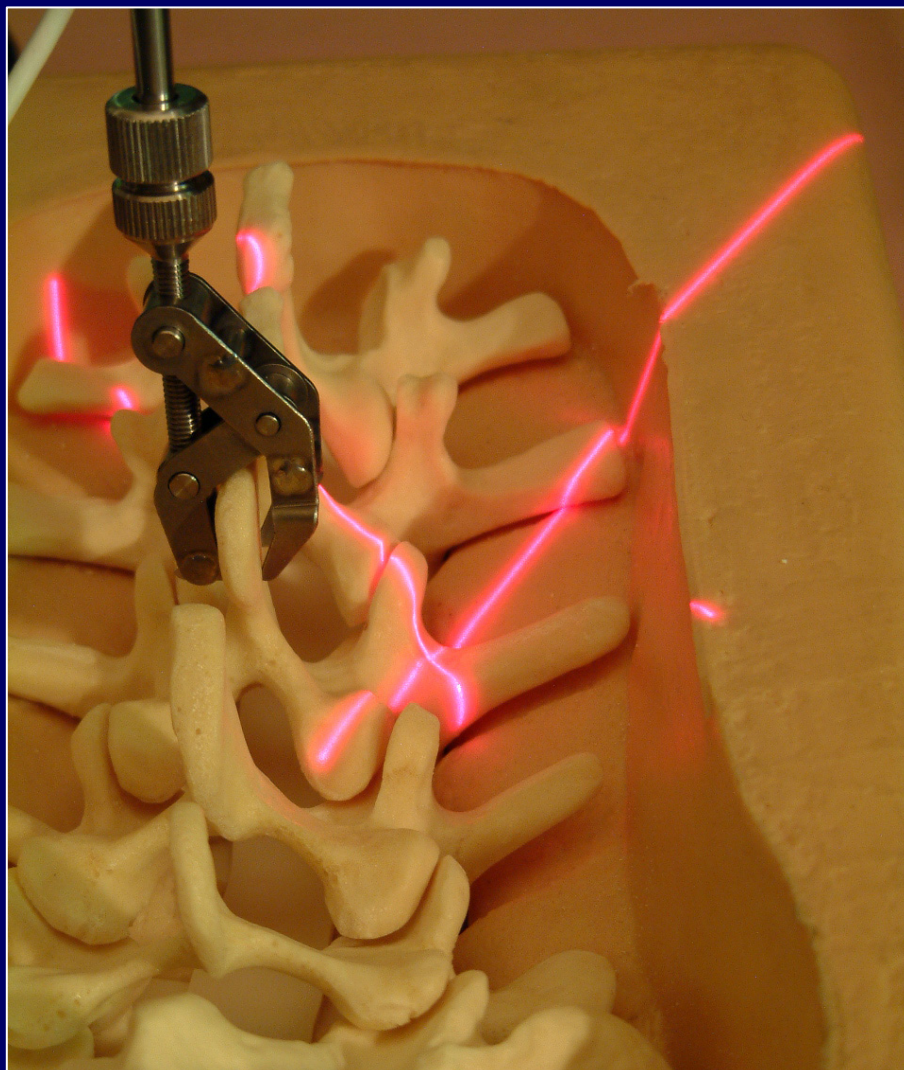
レーザーガイダンスシステム



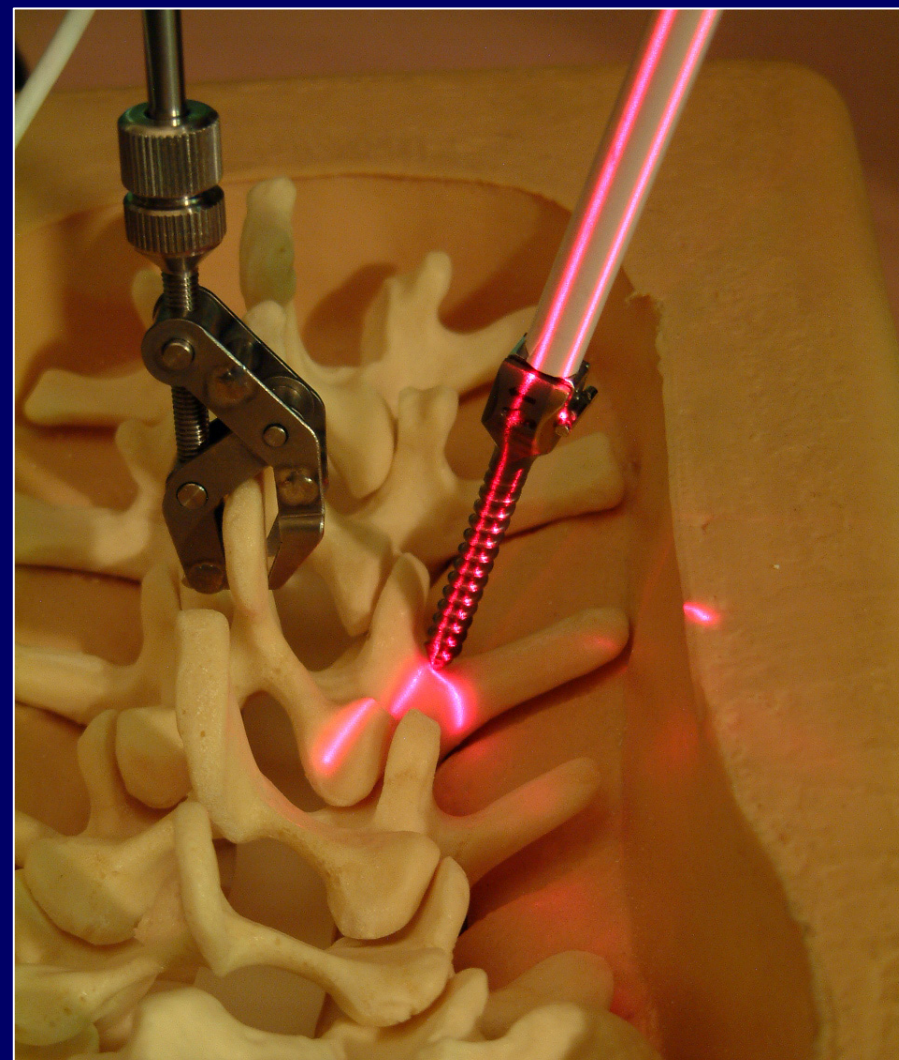


システム概観

刺入・位置のガイダンス



Planned entry point



Planned inserting direction

手術支援ロボット

- 手術支援ロボットの特長
 - 精密な位置決め
 - 繰り返し作業
 - 人間には進入不可能な場所での作業
 - 疲れを知らない
- 術前画像から得られた患部の3次元位置データを利用し、治療器具の位置決めを行うロボット
 - ⇒ 遠隔手術や術者の手の届かない部位での作業

手術用支援ロボットシステム

- 外科医の能力を拡張し，従来不可能であった外科手術を可能とするシステムである
- 必ずしも人間の動作を模倣する必要はない。要求される機能を実現するための最適設計が重要である
- 安全性の確保がきわめて重要である

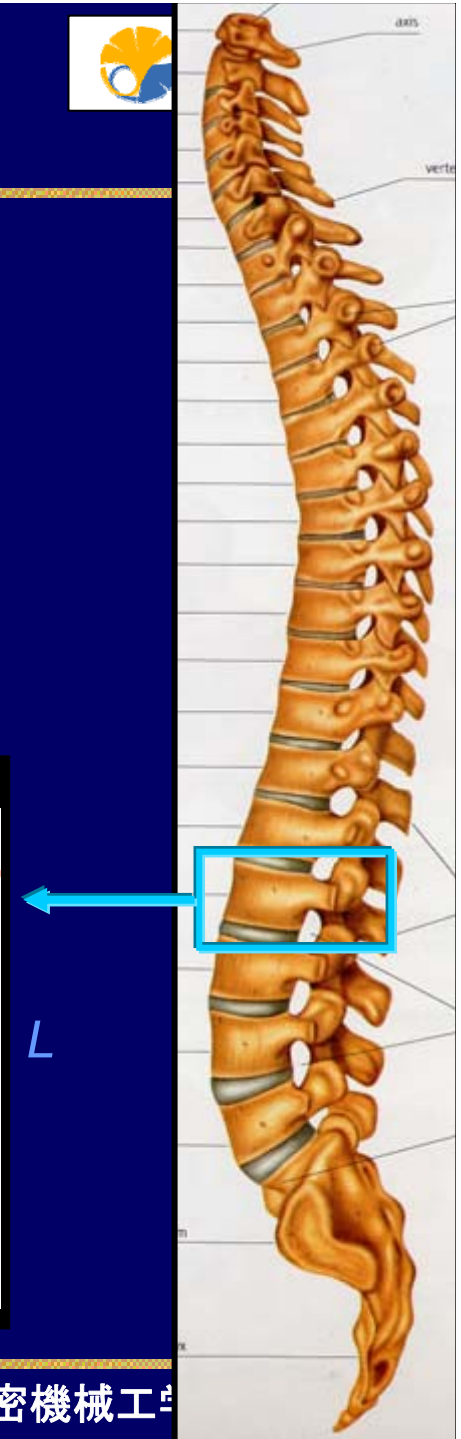
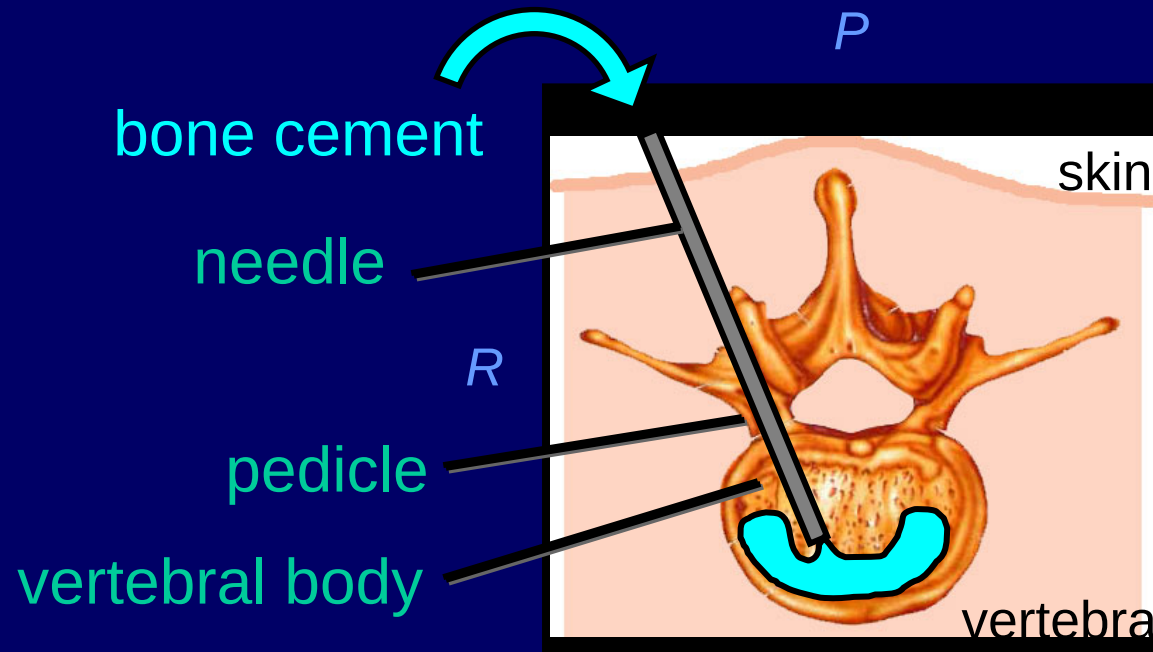
手術支援ロボットと コンピュータ統合手術支援システム

椎体穿刺ロボット



Percutaneous vertebroplasty

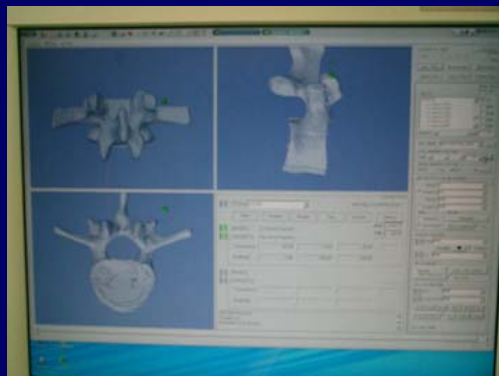
- Osteoporotic compression fracture in vertebra
- Bone cement injection into vertebral body



針刺し支援ロボット(脊椎穿刺)



ナビゲーションとの統合



Navigation

- ・ナビゲーション計画
- ・ロボットへの指令



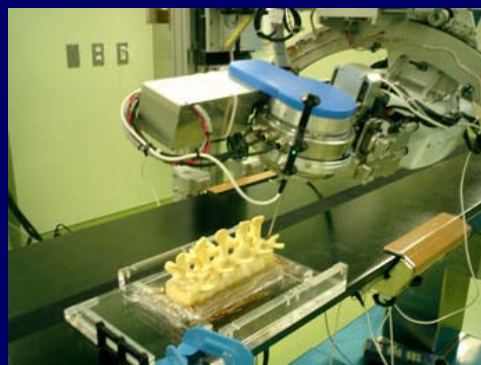
位置姿勢情報

- 穿刺ターゲット
- ロボット



Optotrak

位置姿勢情報取得



マーカ

- 穿刺ターゲット
- ロボット

Robot

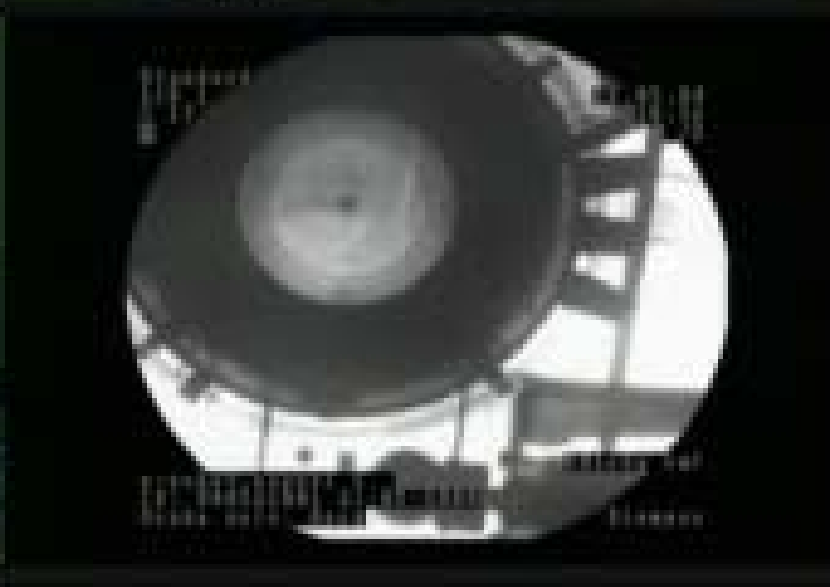
位置決め・穿刺



ナビゲーション画面(モニタリング画面)



システム全景

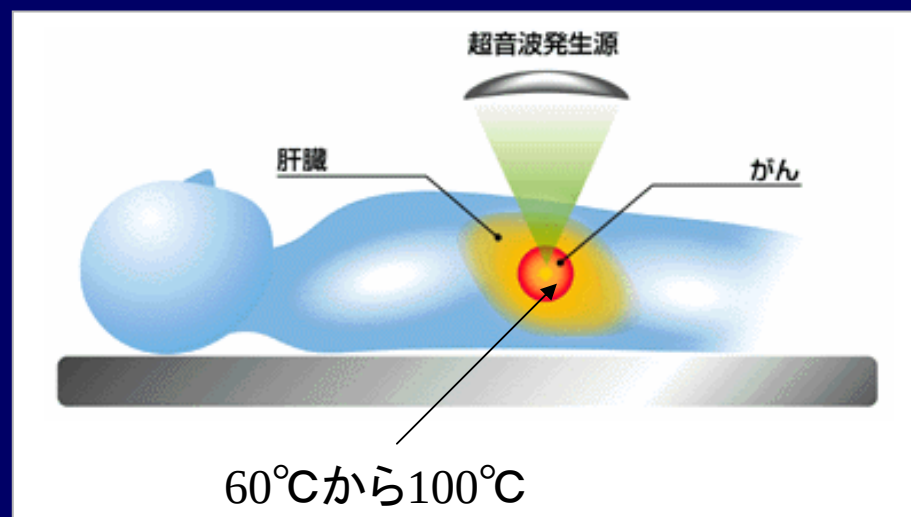


針刺し領域(拡大像)

X線透視画像(側面像)

集束超音波による局所焼灼システム

集束超音波による低侵襲肝臓ガン治療



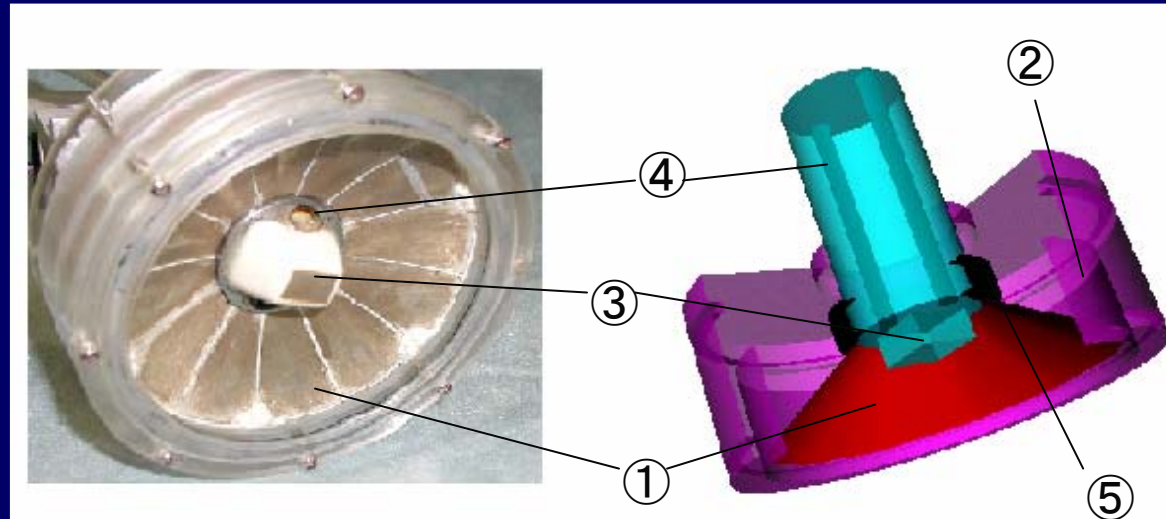
- 集束超音波の Thermal Ablation 効果を利用
 - 超音波エネルギーの集束性
 - 局所的な加熱
- 選択的治療が可能
 - 熱変性が焦点近傍のみ
- 悪性腫瘍に対する温熱治療効果の確認
 - 肝臓ガンへの応用可能性



新たな低侵襲肝臓ガン手術法としての可能性

集束超音波アプリケーション

狭い領域に超音波エネルギーを集中させ治療部位を加熱する



開口径132mm

曲率半径100mm

周波数1.63MHz

焦点強度46.7kW/cm²

焦点距離100mm

①振動子...圧電素子、集束超音波発振

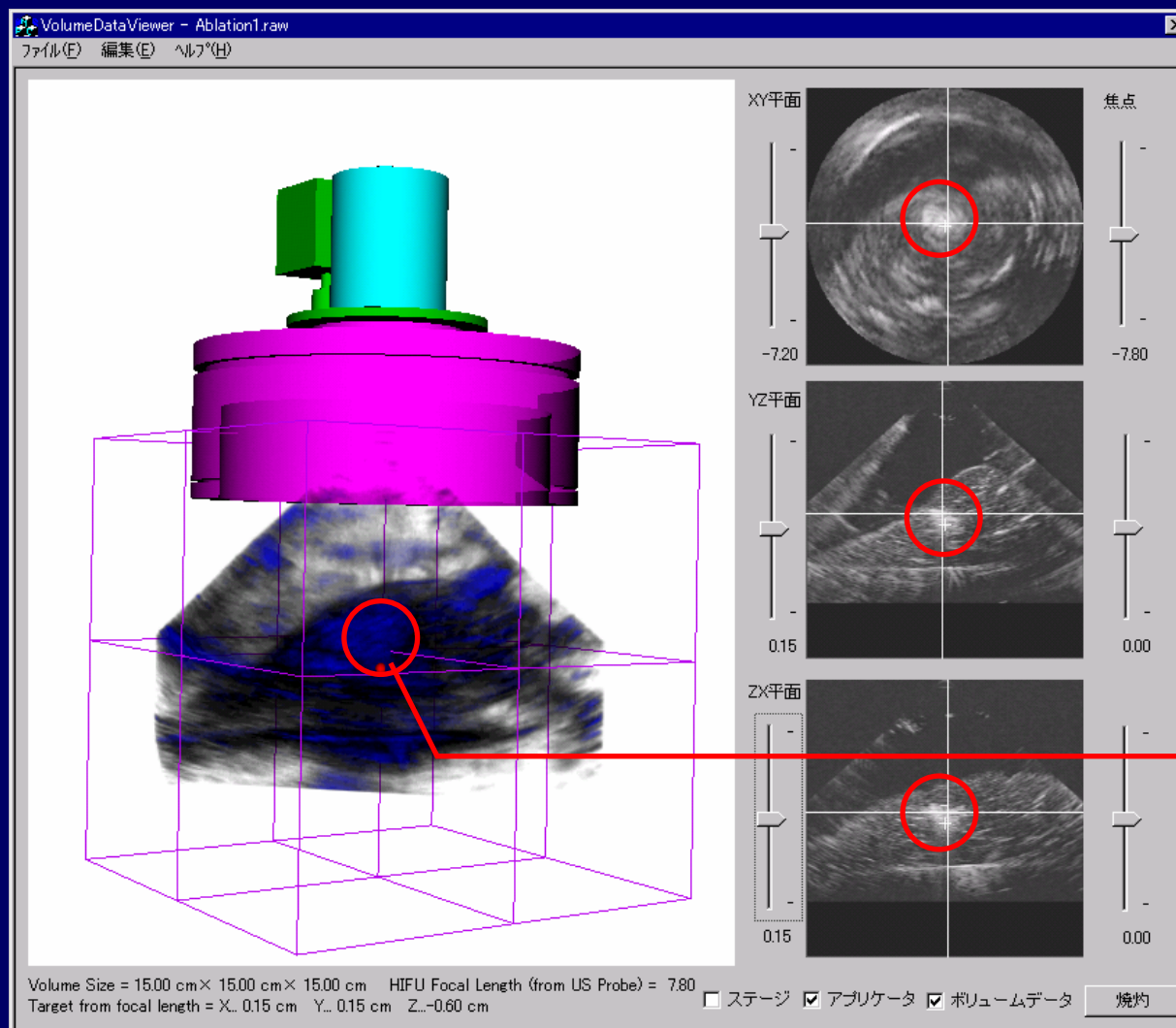
②電子回路...圧電素子の電圧制御

③観察用超音波プローブ

④導水管...振動子内を水で満たす

⑤Oリング...電子回路内への浸水を防ぐ

ブタ肝焼灼実験—焼灼後

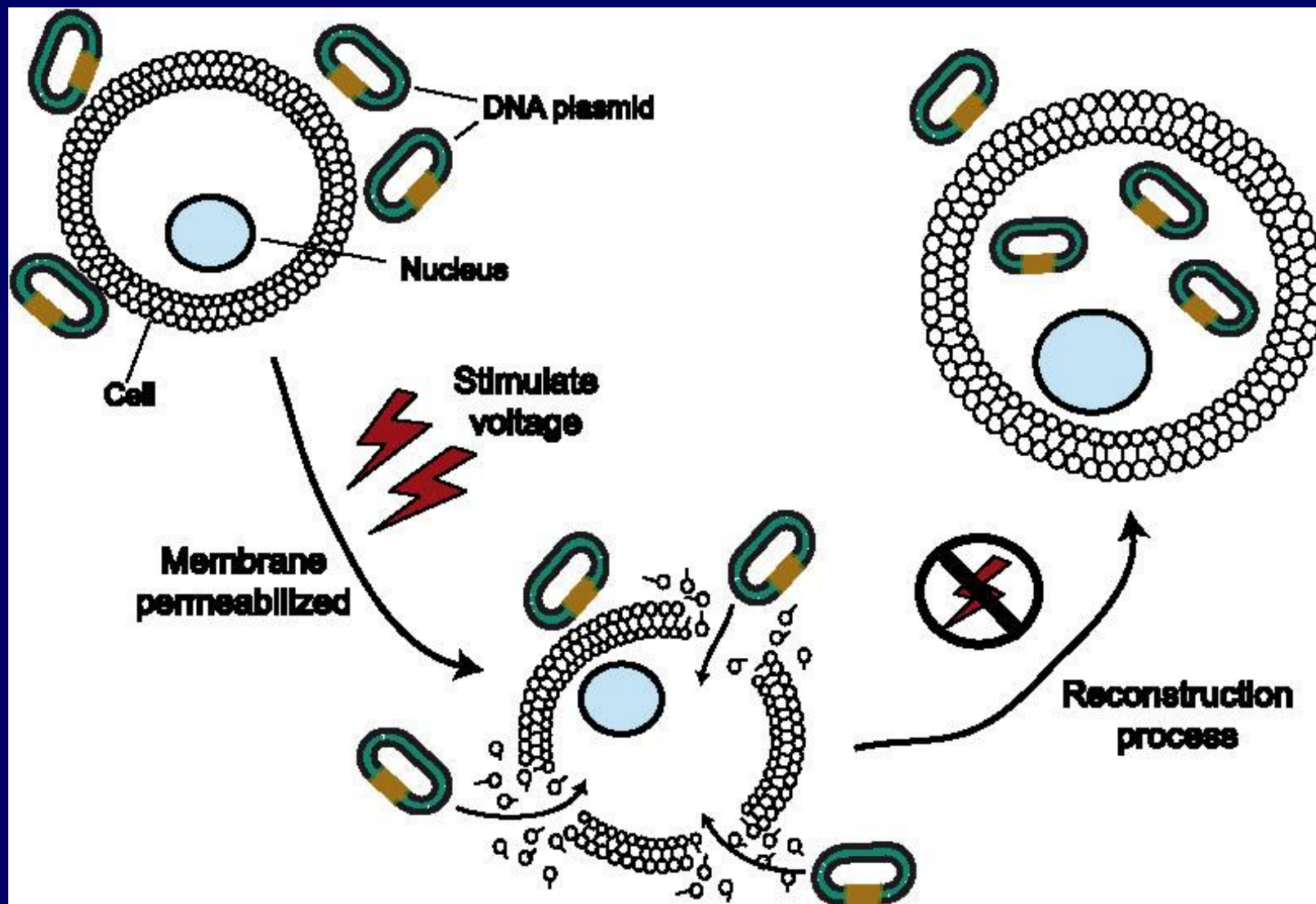


ブタ肝の
焼灼完了領域

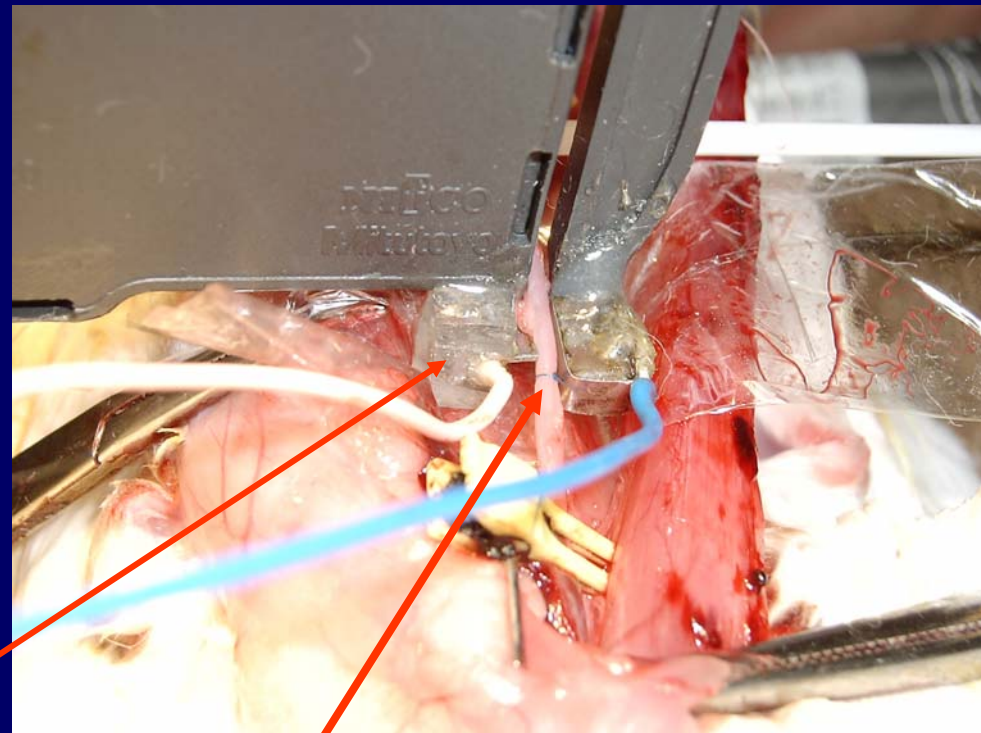
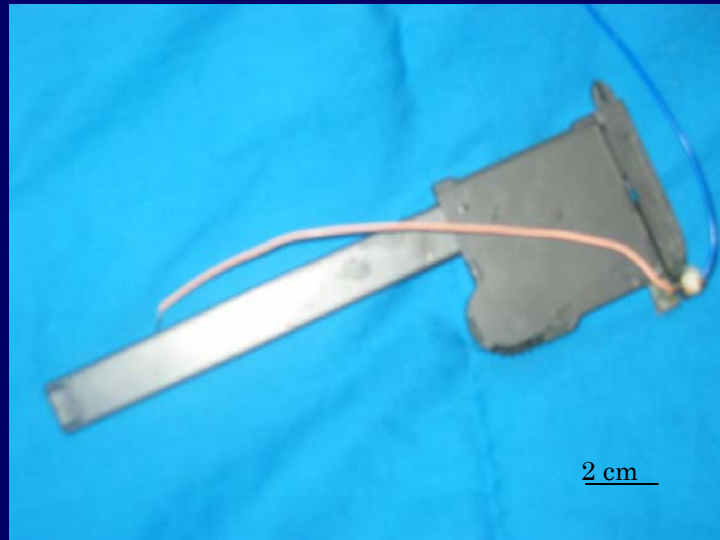


他の先端医療技術との融合

局所電場刺激による遺伝子導入 (electroporation)



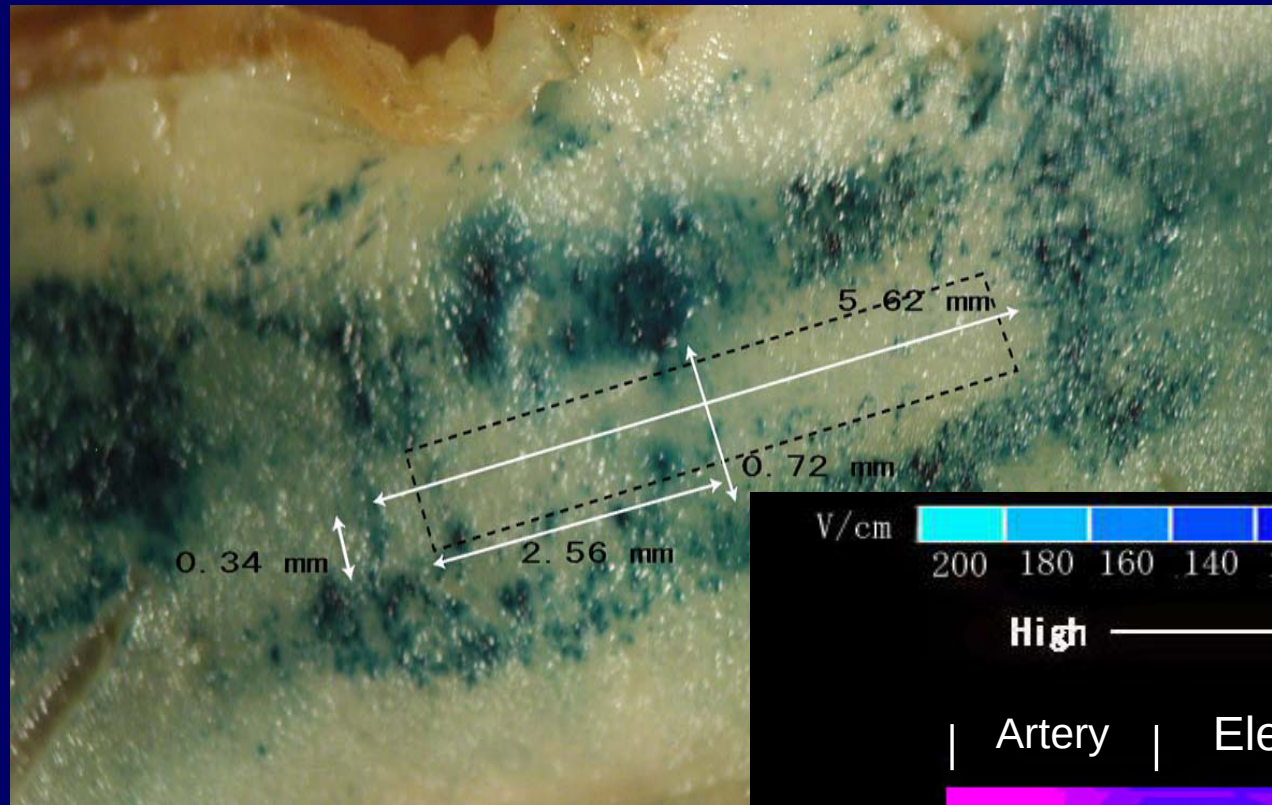
Electroporation 実験用 Electrodes



電極

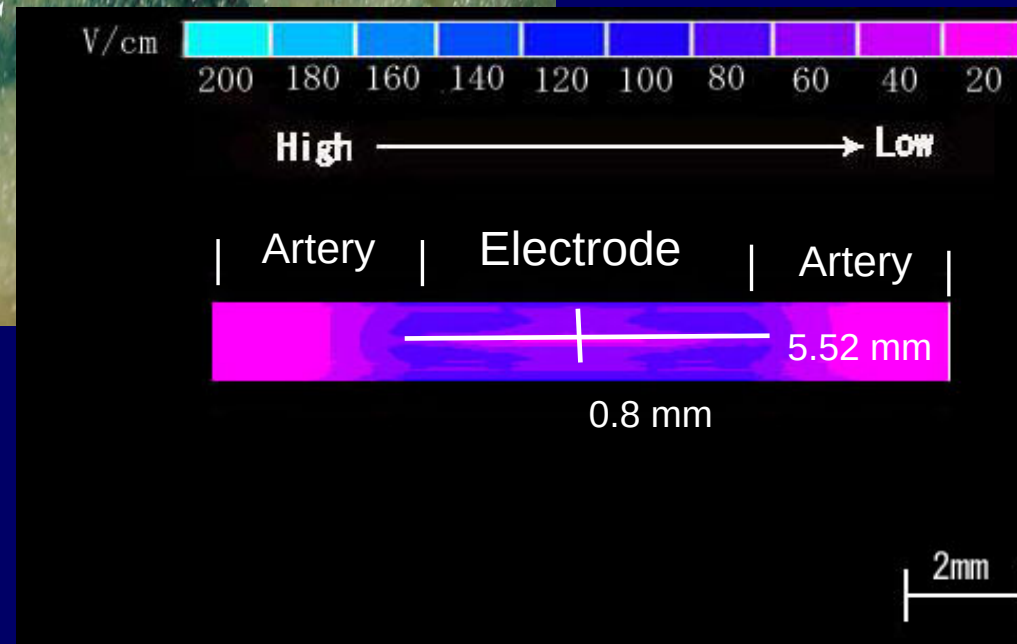
ウサギ頸動脈

In vivo experiments



The measured transfer area in the in vivo experiment was compared with simulation result

According to the measurement, 90V/cm was shown

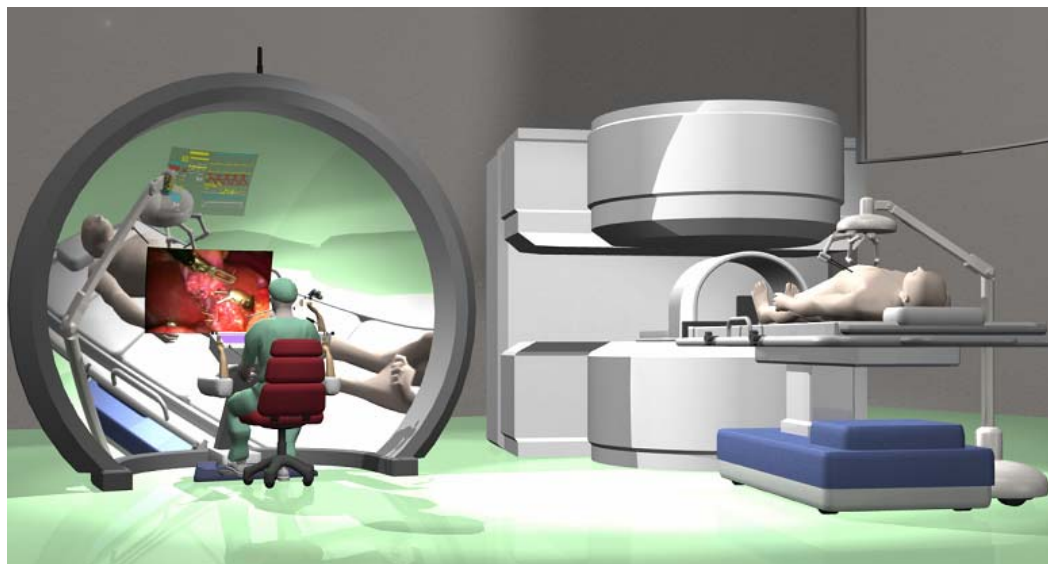


分子イメージング

手術ナビゲーション

リアルタイム画像誘導治療

各種機能画像



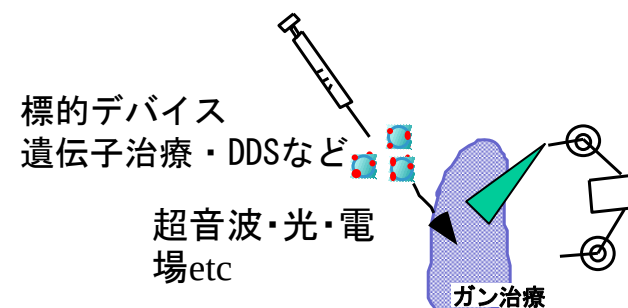
医療システムとの統合化・安全管理



小型化多自由度機構

生体適合性・安全性

新規治療技術との融合



バイオサイエンスとの融合

人間の手では実現できない新たな治療を遠隔操作にて
各種情報誘導下で可能とするロボットテクノロジー

robot応用による低侵襲標的診断治療の実現



患者QOLの向上