

報告番号	甲	第	号
------	---	---	---

主論文の要旨

論文題目 手術シミュレーション・ナビゲーション
のための画像処理に関する研究
氏名 出口 大輔

論文内容の要旨

本論文は、手術シミュレーションと手術ナビゲーションのための画像処理に関する研究成果をまとめたものである。

近年、患者にかかる負担の軽減（低侵襲性）、入院期間の短縮化、医療費削減、および患者の QOL(Quality Of Life)の向上の面から、患者にかかる負担が小さい低侵襲な検査・手術が非常に注目されている。現在では、内視鏡を用いた手術、さらには手術支援ロボットの導入などにより、非常に低侵襲な手術が実現されつつある。その反面、これらの手術機器の操作には高度な技術が必要であり、手術支援システムの開発に関する要求は非常に高い。一方、X線写真に代表される医用画像が登場してから 100 年が経過した現在、医用画像は画像診断に利用されるだけでなく、手術支援にも広く利用されるようになった。特に手術への利用を考えた場合、(i) 術前の手術計画への利用、(ii) 術中の参照画像としての利用、の 2 つの点で医用画像が大きな役割を果たしている。現在では、単に医用画像を観察するだけでなく、バーチャルリアリティ（Virtual Reality: VR）や複合現実感（Mixed Reality: MR）の技術を用いて医用画像を処理し、手術支援へ応用しようという試みがなされてきている。

高度な外科治療・手術を実現する上で、手術シミュレーションや手術ナビゲーションは欠かすことができない技術である。手術シミュレーションは手術計画の立案と評価という意味で「術前支援」であるのに対し、手術ナビゲーションは「術中支援」を実現する技術である。これら「術前支援」と「術中支援」の 2 つにより、外科手術における一連の流れを支援するシステムが実現される。手術シミュレーションと手術ナビゲーションの実現においては、シミュレーションを行う対象の認識、ナビゲーションに用いるナビゲーション情報の生成という点で、臓器認識の技術はどちらにも共通であり、かつ必要不可欠な前処理となる。そのため、人体内に存在するさまざまな臓器を個別に認識する技術の開発が非常に重要である。人体内の臓器が個別に認識されることにより、各臓器を対象とした手術シミュレーションによる「術前支援」、さらには手術ナビゲーションを用いた「術中支援」が実現される。そこで、本論文では、臓

器認識，手術シミュレーション，手術ナビゲーション，の3つを対象とし，それらを実現するための画像処理技術について述べる．具体的には，

- (1) 多時相 CT 像からの肝臓領域抽出手法，
- (2) 仮想前立腺に対する針生検シミュレーションシステム，
- (3) 気管支鏡ナビゲーションシステム実現のためのカメラ動き推定手法，
について述べる．

(1) 多時相 CT 像からの肝臓領域抽出手法

手術シミュレーションと手術ナビゲーションを実現する上で，画像中の各臓器を個別に認識することは必要不可欠な前処理である．手術シミュレーションにおいては，手術前に手術計画の立案と評価を臓器毎，もしくは臓器と臓器の隣接関係などの情報を用いて行う必要があるため，各臓器を個別に認識する機能が必然的に必要となる．また，手術ナビゲーションにおいては，術中に医師が触れている臓器名称を表示するといったナビゲーション情報を生成する上でも全臓器の認識が非常に重要である．これらのことから，手術シミュレーションと手術ナビゲーションを実現するためには，画像中の各臓器を個別に認識する技術の開発が必要不可欠である．

ヘリカル CT の登場以降，3次元 X 線 CT 像から，胸部，腹部に存在する各臓器領域の抽出に関する研究が数多くなされている．腹部の診断・手術においては，各臓器の位置関係の把握や病変位置の特定のために，非造影の CT 像に加え，造影剤を注入してからの時間が異なる早期相，門脈相，晩期相の4時相の CT 像が用いられる．しかし，これまでの研究の多くは非造影の CT 像などの単一時相を用いた臓器領域の認識がほとんどであった．これは，造影剤の浸透具合が撮影のタイミングの違いや個人差によって大きく変化するため，安定して臓器領域を認識するためのしきい値決定が難しかったためである．そこで，本論文では時相間での造影剤による CT 値の変化に対応可能な，臓器領域の自動抽出手法を提案する．提案手法を肝臓領域の自動抽出に適用し，安定した臓器領域の認識が可能であることを示す．

(2) 仮想前立腺に対する針生検シミュレーションシステム

手術シミュレーションは，正確でスムーズな手術を行うための術前計画の立案に有用である．ここでは，前立腺がんの確定診断時に行われる針生検に着目し，臨床で行われている針生検手法に対し，計算機を用いたシミュレーションによる能力評価を考える．わが国におけるがんの死亡者は，1981年以降には死因の第1位を占め，2004年には総死亡数の約31.1%を占めている．ひとえにがんといっても，肺がん，胃がん，大腸がんなどさまざまである．これらのがんの確定診断は，実際の組織標本（病変部の細胞）を用いて行われるため，正確に組織採取を行うことが重要となる．特に，肺がんや前立腺がんにおいては生検針を用いた組織採取が行われ，経気管支的，経直腸的に生検が行われている．これらの生検方法では，直接目視にて病変部を観察することができないため，どの位置でどの方向に生検を行えば病変を採取できるかが非常に分かりにくいという問題がある．前立腺がんに対する生検では，系統的に生検を行うことで高い検出率を得ることができるという報告はあるが，針の配置や角度をどのように変化させるべきかに関する検討は行われていない．そこで，統計的な病変発生

モデルを作成し、そのモデルに対して針生検をシミュレーションすることにより、各針生検手法の能力評価が行えるシステムの構築を目指す。

(3) 気管支鏡ナビゲーションシステム実現のためのカメラ動き推定手法

高度な外科手術を実現する上で手術ナビゲーションシステムの実現は必要不可欠となる。ここでは、患者にかかる負担が小さく、非常に低侵襲な検査・手術が可能な内視鏡を対象としたナビゲーションシステムの構築を目的とする。内視鏡を用いた検査・手術では、内視鏡の先端が人体内部に挿入されてしまうということから、(a)内視鏡で観察している位置を目視により確認できない、(b)開胸・開腹手術とは異なり各臓器に手で触れることができない、といった問題がある。内視鏡で観察している位置を目視で確認できないため、現在どこを観察しているかを把握することが難しく、目的とする部位まで内視鏡を挿入することが非常に困難である。また、各臓器に手で触れることができないため、内視鏡から得られる画像情報のみを用いて診断・手術を行う必要があり、医師の経験と知識が非常に重要となる。そのため、これらの手術を支援する手術ナビゲーションシステムの開発が重要な課題となっている。

手術ナビゲーションシステムの実現にはナビゲーション情報の生成と表示、医用画像と実人体の対応付けが必要不可欠である。ここで、ナビゲーション情報の生成と表示には、これまでに開発されてきた仮想化内視鏡システムが応用可能であり、残るは実内視鏡と仮想化内視鏡をどのようにして対応付けるかが最大の問題となる。そこで、本論文では気管支鏡を対象としたナビゲーションシステム実現を目的とし、連続した実気管支鏡像と仮想化内視鏡像間のイメージレジストレーションによる気管支鏡カメラの動き推定手法を提案する。

本論文は、6つの章からなる。第1章は本論文の序論であり、本論文の研究背景ならびに各章の位置付けについて述べたものである。ここでは、医学史における手術の歴史的変遷を概観し、医用画像を用いた高度な手術支援とその重要性について述べる。

第2章では、多時相CT像からのCT値の確率分布推定に基づく肝臓領域抽出手法について述べる。これは、手術シミュレーションと手術ナビゲーションを実現するために必要不可欠である臓器認識に関する一検討である。ここでは、肝細胞がんの診断に有効とされる早期相と晩期相のCT像から、肝臓、筋肉、脾臓に対応するCT値の分布を推定することにより肝臓領域抽出を行う。

第3章では、仮想前立腺に対する針生検シミュレーションシステムについて述べる。これは、前立腺がんの確定診断に用いられる針生検をシミュレーションするシステムであり、針生検手法の能力評価へ応用可能なシステムである。ここでは、前立腺内の解剖学的分類と前立腺内での病変発生分布データを用いて仮想前立腺を作成し、それに対する針生検のシミュレーションを行う。また、前立腺に対する針生検結果の3次元表示も可能であり、視覚的に生検の結果が確認可能なシステムである。

第4章では、気管支鏡ナビゲーションシステム実現を目的とし、イメージレジストレーションを用いたカメラ動き推定手法について述べる。ここでは、特徴的な領域に限定した類似度計算法について述べ、実気管支鏡ビデオ画像に対する実験を通して提案する類似度計算法の有効性を示す。

第 5 章では，第 4 章に引き続き，気管支鏡カメラの動き推定性能向上を目指し，気管支鏡カメラの動き予測を用いた動き推定について述べる．第 4 章で述べるカメラ動き推定手法では，気管支鏡カメラの動きが大きい経路において，動き推定に失敗するという問題がある．そこで，実気管支鏡のフレーム間での動きをカルマンフィルタを用いて予測し，フレーム間でのカメラ動きが大きい経路における推定性能の改善を図る．

最後に，第 6 章において本論文を総括し，今後の課題と展望について述べる．