



2010年10月14日

大阪大学臨床医工学融合研究教育センター 医工学専攻修士課程「画像医学」

医用画像解析と手術支援 計算解剖学的アプローチ

大阪大学 大学院医学系研究科 放射線医学講座 画像解析グループ







yoshi@image.med.osaka-u.ac.jp

http://www.image.med.osaka-u.ac.jp/member/yoshi/





主な共同研究者

- **Osaka** University
- 大阪大学 大学院医学系研究科
 - 放射線科•画像解析:中本将彦, 岡田俊之
 - 放射線科: 堀雅敏, 田中寿, 大須賀慶吾, 富山憲幸, 村上卓道(現 近畿大)
 - 整形外科: 菅野伸彦, 西井孝, 高尾正樹、菅本一臣
 - 乳腺内分泌外科:玉木康博
 - 大阪大学 臨床医工学融合研究教育センター
 - 山崎隆治, 鍵山善之
 - 大阪大学医学部附属病院 未来医療センター
 - 塩野裕之(現 大阪警察病院)
 - - 神戸大学 工学部
 - 多田幸生、音丸格, 横田太
 - 立命館大学: 陳延偉
 - Cleveland Clinic
 - Osamu Ukimura (Currently, USC), Indibir Gill (Currently, USC)



Cleveland Clinic





目次

・医用画像の可視化と理解

- ・計算解剖学の導入
- ●解剖モデル
- ●疾患モデル
- ・治療モデル





目次

医用画像の可視化と理解 計算解剖学の導入

- ・解剖モデル
- ・疾患モデル
- ・治療モデル





可視化画像





3次元医用画像可視化 ボリュームレンダリングの原理

ボリュームレンダリング = 疑似カラー表示+「透明度」







イントロダクション

3次元医用画像の可視化と理解

"可視化"から"理解"へ



















可視化と画像理解

























画像理解の必要性

- 医師が見逃す可能性のある腫瘍を検出する。
- 腫瘍の体積、臓器の体積を測る。
- 血管を通って腫瘍(付近)に到達するための経路を決める。
- 腫瘍と同じ血管系に養われている肝組織の範囲を推定する。
- 生体組織毎に材料力学的特性を付与して、手術器具で臓器の把持 や切開の(内視鏡)手術シミュレーションを行う。
- 計算機により(自動的に)最適治療計画を立案する。
- ロボットが自動的に手術(治療)を行う。

可視化(航空写真)



画像理解(地図)







医用画像理解とは?

- 画像理解の3要素
 - **データ**D: 入力画像データ
 - **モデル** *P*(*M*): 認識理解対象*M*に関する情報(知識)
 - アルゴリズム: データ中のモデルのインスタンス(モデルの具体例)を探索するアルゴリズム
 - Dが与えられ、次式を最大化するMを求める。 $P(M \mid D) \propto P(M)P(D \mid M)$
- 3次元CT画像からの肝臓領域抽出

スを探索するアルゴリズム

- データ: 3次元CT画像
 ニーマル: 肝臓のモデル ?? 計算解剖モデル/統計アトラス
 - アルゴリズム: 3次元画像中の肝臓モデルのインスタン





目次

・医用画像の可視化と理解

- ・計算解剖学の導入
- ●解剖モデル
- ●疾患モデル
- ・治療モデル





目次

・医用画像の可視化と理解

•計算解剖学の導入

- ・解剖モデル
- ・疾患モデル
- ・治療モデル





本としての(紙媒体上の) 人体解剖アトラス

解剖学者による典型例のスケッチ 全身の詳細な2次元カタログ





Frank H. Netter, Atlas of Human Anatomy





電子媒体上の人体解剖アトラス 電子アトラス

ー個体画像データから生成 全身3次元構造の詳細なモデル化 しかし、個体画像データ(個別患者データ)に対して適用困難











http://www.voxel-man.de/gallery/

×

VOXEL-MAN (Univ. Hamburg)







個体群データから生成

個体群における共通性と多様性をモデル化

患者画像への当てはめにより患者固有アトラスを自動生成







文科省•科研費•新学術領域研究

「計算解剖学」(2009-2013,代表:小畑秀文)

- 「計算解剖学」とは、情報学の成果と高精細化した 人体イメージング技術に立脚し、
- 1. 臓器などの解剖学的構造の数理的記述である 「計算解剖モデル」の構築
- 2. 計算解剖モデルを利用した計算機による「医用 画像完全理解」の追究
- 3. 医用画像完全理解に基づく画像診断・治療支援 および基礎医学研究・教育への貢献

を目的とする学問領域である。





文科省•科研費•新学術領域研究 「計算解剖学」(2009-2013, 代表:小畑秀文)

- 「計算解剖モデル」とは、
 - 人体の正常もしくは疾患の解剖学的構造に対し、膨大な 画像データサンプルに基づいて大量個体群における共通 性と多様性を体系的かつ数理的に記述した計算機内表現
- •「医用画像完全理解」とは、
 - 医用画像上で観察される全ての臓器・血管等の解剖学的 構造物を計算機が頑健かつ精密に理解すること







目次

・医用画像の可視化と理解

- ・計算解剖学の導入
- ●解剖モデル
- ●疾患モデル
- ・治療モデル





目次

医用画像の可視化と理解 計算解剖学の導入

- 解剖モデル
- ・疾患モデル
- ・治療モデル

研究リーダ: 岡田俊之





セグメンテーション

MEcenter

(画像からの対象領域の切り出し)

 画素単位の処理における典型的な失敗例は、病変が存在する 場合である。







統計アトラスの例:統計形状モデル

- 多数個体データの主成分分析により得られるパラメトリックモデル
- 対象臓器の"個体差の範囲内で"自由な変形が可能な形状モデル







統計アトラスの例:統計形状モデル

- 多数個体データの主成分分析により得られるパラメトリックモデル
- 対象臓器の"個体差の範囲内で"自由な変形が可能な形状モデル



第1主成分

第2主成分

第3主成分





統計アトラスの例:統計形状モデル

- 多数個体データの主成分分析により得られるパラメトリックモデル
- 対象臓器の"個体差の範囲内で"自由な変形が可能な形状モデル





• 解空間の効果的削減

(少数の基底関数で定義される 部分空間)



• ベイズ推定の事前確率分布

 $P(M \mid D) \propto P(M)P(D \mid M)$









- 汎化性 (Generality)
 - 対象カテゴリーのどんな形状も精度よく表現できる。
- 特異性 (Specificity)
 - 対象カテゴリーの形状以外の形は表現できない







多階層統計形状モデル [Okada et al. MICCAI 2007]

(Multi-level statistical shape model, ML-SSM)

- 全体形状を複数の部分領域に再帰的に分割
- 個々の部分領域に対して主成分分析を適用
- 対象形状固有の制約(特異性)と表現能力(汎化性)向上の両立
- 部分領域間の整合性を維持する拘束条件の導入









[Okada et al. MICCAI 2007]











[Okada et al. Acad Radiol 2008]

• セグメンテーション結果の例



画素単位のセグメンテーション



統計形状モデル Level O













[Okada et al. Acad Radiol 2008]

・ (部分領域間の)整合性維持拘束の評価









[Okada et al. Acad Radiol 2008]

• セグメンテーション誤差の定量評価







複数臓器モデルへの拡張

• 複数臓器統計モデル



単一臓器統計モデル (Level 0)の単純拡張1



複数の臓器を単一形状とみなす。

汎化性(表現精度)に限界: 複数臓器には、単一臓器よりもさらに大きな 個体間バリエーションが含まれる。





複数臓器モデルへの拡張

PCA

• 複数臓器統計モデル





複数臓器間において、存在しえない関係が 表現されてしまう。





複数臓器モデルへの拡張

個々の臓器の統計モデルを構築し、 階層的複数臓器統計モデル 一方で、臓器間の整合性を維持する "局所隣接統計モデル"を導入する。 [MICCAI 2008] 単一臓器統計モデル (汎化性の維持) 個体群データ 多階層モデル PCA Gallbladder IVC Liver 局所隣接統計モデル(特異性の維持) Liver-IVC Liver-Gallbladder IVC and closely related Gallbradder and subsub-shape of liver shape of liver





複数臓器モデルへの拡張



- 臓器間、臓器内の階層関係を表現
- 多様な臓器形状および臓器間関係に適応
- 臓器間整合性の維持






 ・ 階層的複数臓器統計モデル
 [MICCAI 2008]





Inferior Vina Cave

Gallbladder

Yellow: Ground truth Red: Extracted





股関節統計アトラスによる セグメンテーション



- 初期領域の抽出
 - -2値化により抽出
 - 関節部分は未分離





股関節統計アトラスによる セグメンテーション



統計アトラス当てはめ





股関節統計アトラスによる セグメンテーション



- 統計アトラス当てはめ
 - 初期当てはめ
 - 階層的アトラスの詳細
 化による骨盤・大腿骨の
 精密当てはめ





股関節統計アトラスによる セグメンテーション



骨盤·大腿骨個別モデル 1 階層的統合モデル

Error: 2.04 mm

Case 1





Error: 4.56 mm

Error: 4.56 mm



Error: 2.62 mm

Extracted boundaries Red (pelvis) Green (femur)

Manual traces Yellow (pelvis) Cyan (femur)

























- トポロジーバリエーションを表現可能な統計アトラス
- 物理・生理パラメータ分布(機能画像)の統計アトラス
- 動態、変形、加齢、疾患などを反映した統計アトラス





セグメンテーション まとめと今後の見通し

- 統計アトラスの利用により、従来、自動化・実用化が 難しいという印象の強かった医用画像のセグメン テーションが実用化・商用化されていくと、期待され る。
- 今後10~20年以内にセグメンテーション(解剖学的 ラベル付けも含む患者解剖モデル構築)は自動的、 高速、安定な処理になり、ボリュームレンダリングな どと同様に臨床ツールとして普及することが、期待される。





目次

・医用画像の可視化と理解

- ・計算解剖学の導入
- ●解剖モデル
- ●疾患モデル
- ・治療モデル





目次

医用画像の可視化と理解 計算解剖学の導入



・疾患モデル

・治療モデル





疾患に伴う臓器形状の局所的変形解析

 疾患(肝硬変)に伴う肝臓形状の局所的変形 を統計的に解析する。

正常形状

疾患(肝硬変)形状









疾患肝臓の局所変形統計解析 肝表面の解剖学的対応付け

 多症例データの肝表面各点での比較を行うため、基準腹腔に 基づく位置・形状補正後に、基準形状表面と各症例の非剛体 位置合わせを行い、症例間の解剖学的対応関係を求める。









法線方向の表面位置が、疾患群が正常群と比べて統計的に有意に異なるかどうかを調べた。



有意差が示された肥大、委縮箇所については、経験則と一致した傾向がみられた。







法線方向の表面位置が、疾患群が正常群と比べて統計的に有意に異なるかどうかを調べた。



有意差が示された肥大、委縮箇所については、経験則と一致した傾向がみられた。





疾患に伴う臓器形状の大局的変形解析

 疾患(変形性股関節症)に伴う大腿骨形状の大局的 変形を統計的に解析する。

正常形状

疾患形状









大腿骨の統計形状モデル

臓器形状データの主成分分析により、個体群における形状個体差をモデル化する。

正常データの 正常疾患混合データ 疾患データの 統計モデル の統計モデル 統計モデル



疾患データを含む個体群データを用いても、正常範囲内の個体差と 疾患による変形を明確に切り分けたモデルは構築されない。







疾患データの主成分分析を、正常データの主成分分析により定義される部分空間の直交補空間で行うことにより、疾患に起因する変形のみを抽出・表現する。

正常統計モデル A

正常部分空間の直交補空間での 疾患統計モデル **B**



疾患データを含む個体群データを用いても、正常範囲内の個体差と疾患による変形を明確に切り分けたモデルは構築されない。



疾患による変形の生成

各個体の正常データに、本モデルにより生成される疾患による変形成分を付加することにより、疾患による変形生成が可能になる。



正常の個体データに疾患成分を付加した例

今後、疾患の定量解析、正常・疾患の自動識別などへの応用を目指している。





目次

・医用画像の可視化と理解

- ・計算解剖学の導入
- ●解剖モデル
- ●疾患モデル
- ・治療モデル





目次

- ・医用画像の可視化と理解
- ・計算解剖学の導入
- ・解剖モデル
- ・疾患モデル
- ・治療モデル





腎移植ドナー



腎部分切除(赤:腫瘍、青:正常、黄:中間、緑:切除面)









Dr. Ukimura and Dr. Gill, (Cleveland Clinic) と共同研究











• 術中再構成と術後レントゲンの比較









従来の 手術ナビゲーションから

計算解剖学に基づく 新しい 手術ナビゲーションへ





術具・臓器位置誘導の 物理空間(Physical space) ナビゲーションから

計算解剖学的手法に基づく **意思決定**(Decision making)の 解空間(Solution space) ナビゲーションへ







個体群データから生成

個体群における共通性と多様性をモデル化

患者画像への当てはめにより患者固有アトラスを自動生成





症例群データから生成

<u>手術症例群</u>における共通性と多様性をモデル化

患者形状モデルに当てはめることにより<u>手術計画</u>を自動生成







計算解剖モデルに基づく 整形外科手術支援システムの開発事例 **AutoImPlan**







• 股関節CT画像が与えられ、自動的に、人工股関節全置換術の手術計画を立案するシステムを開発する。





 システムは、自動セグメンテーション、および、自動手術計 画の2つのモジュールから構成される。





自動セグメンテーションでは、CT画像が与えられ、股関節形状モデルの再構成、解剖学的特徴の位置決め、座標系の設定が行われる。





 自動手術計画では、股関節形状モデルとインプ ラントデータベースが与えられ、患者の骨格に 適合し、脚長差や関節可動域などの関節として の機能を最大化するインプラントのサイズ、位 置・方向を決定する。








自動セグメンテーション





• 自動手術計画



Q 人工股関節自動手術計画:AutoImPlan[™]









• ステム表面から髄腔表面までの距離の平均と分散









アトラスの距離分布との差を最小にするステムサイズ・位置・角度を計算









実験結果

47症例(すべて実際に ナビゲーション手術に使用 された手術計画症例) Centpillar stem (Stryker)

Leave-one-out cross validation

従来法(外科医へのインタビューにより得られた制約条件に基づく方法)

■ アトラス法









• 骨盤とカップの大局的な位置関係

• カップ表面における骨残厚の平均と分散









アトラスにおける骨盤とカップの位置関係および残厚 分布との差を最小にするカップサイズ・位置を計算







今後の方向

• 統計アトラスとシミュレーションとの統合

- 統計アトラスにより解候補を絞り、可動域シミュ レーション、脚長などの定量的に定義可能な評価 項目の最適化を行う。

- 生体力学的評価を導入する。







統計アトラスに基づく Closed-Loop 手術支援



手術支援 (Surgical CAD/CAM)

























- 統計アトラスは、多数の症例データの学習によって得られる「お手本」の計算機内表現である。
- Closed Loopの枠組みにより、症例データが増えるにつれ、「お手本」はより広範な症例をカバーする(経験を積む)ことができる。
- ・症例データ(あるいは、得られた「お手本」)を施設間で共有できれば、各施設の「お手本」の違いの評価し、それらを統合することにより、より良い「お手本」つくりが可能になる。





主な共同研究者

- **Osaka** University
- 大阪大学 大学院医学系研究科
 - 放射線科•画像解析:中本将彦, 岡田俊之
 - 放射線科: 堀雅敏, 田中寿, 大須賀慶吾, 富山憲幸, 村上卓道(現 近畿大)
 - 整形外科: 菅野伸彦, 西井孝, 高尾正樹、菅本一臣
 - 乳腺内分泌外科:玉木康博
 - 大阪大学 臨床医工学融合研究教育センター
 - 山崎隆治, 鍵山善之
 - 大阪大学医学部附属病院 未来医療センター
 - 塩野裕之(現 大阪警察病院)
 - Ⅰ州大学 九州大学 大学院医学研究院 → 橋爪誠,小西晃造,吉野一郎(現 千葉大)
 - 神戸大学 工学部
 - 多田幸生、音丸格, 横田太
 - 立命館大学: 陳延偉
 - Cleveland Clinic
 - Osamu Ukimura (Currently, USC), Indibir Gill (Currently, USC)



Cleveland Clinic







Osaka University



Thank you for your attention!

This work was partly supported by

- "Computational anatomy for computer-aided diagnosis and therapy : Frontiers of medical image sciences" funded by Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, MEXT, Japan
- MEXT Global COE Program at MEI Center: A center of excellence for an *in silico* medicine-oriented worldwide open platform, Osaka University
- Stryker Japan, Biovisiq Japan