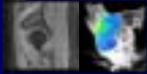


# 医用ボリュームデータ定量化の原理 MR画像からの厚み計測



佐藤 嘉伸



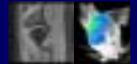
大阪大学 大学院医学系研究科  
多角的画像解析分野

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

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

## アウトライン

・動機と背景: 軟骨厚の3次元の厚み計測



・厚み計測基本アルゴリズム

・3次元方向2次微分に基づく画像強調, 検出, 定量化\*

\* Y Sato et al: *IEEE Transactions on Medical Imaging*, in press.

・数値シミュレーションによる精度限界の導出

- ・MR撮像プロセスのモデル化
- ・後処理による厚み計測プロセスのモデル化
- ・非等方解像度 (ボクセル) による影響の分析

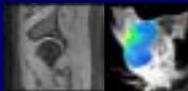


・In Vitro 実験による検証

・摘出骨頭を等方 (高) 非等方 (通常) 解像度により撮影したMR画像からの厚み計測結果の解析



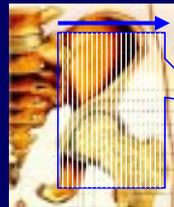
# 動機と背景: MR画像からの軟骨厚の3次元の厚み計測



・動機と背景: 軟骨厚の3次元の厚み計測

- ・厚み計測基本アルゴリズム
- ・数値シミュレーションによる精度限界の導出
- ・In Vitro 実験による検証

## MR画像からの股関節軟骨定量化



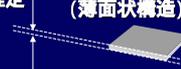
MR Images (Sagittal sections)

SPGR, 3D-FT  
0.625 × 0.625 × 1.5 (mm<sup>3</sup>) voxel

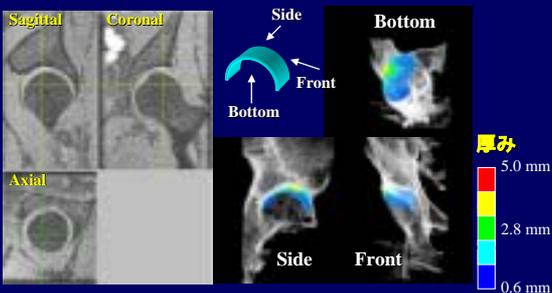


白蓋 (ソケット) 軟骨  
大腿骨頭 (ボール) 軟骨

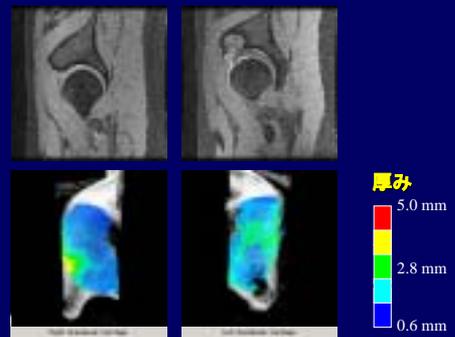
厚み推定  
軟骨 (薄面状構造)



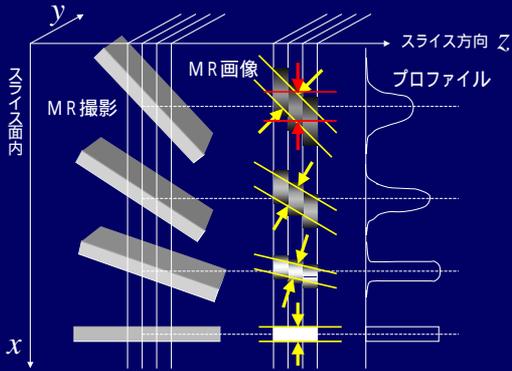
## MR画像からの股関節軟骨定量化



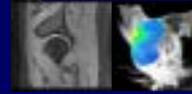
## MR画像からの股関節軟骨定量化



## MR画像からの3次元的厚み計測

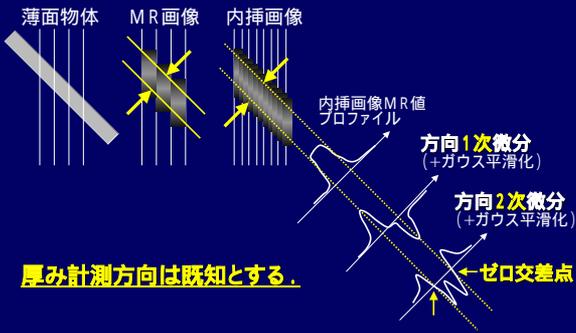


## 厚み計測基本アルゴリズム

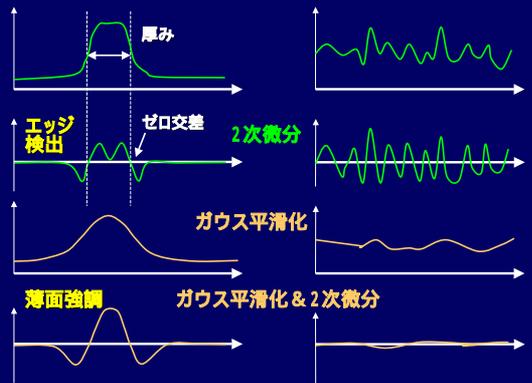


- 動機と背景: 軟骨厚の3次元的厚み計測
- 厚み計測基本アルゴリズム
- 数値シミュレーションによる精度限界の導出
- *In Vitro* 実験による検証

## MR画像からの3次元的厚み計測



## MR画像からのエッジ検出と薄面強調



## エッジ検出と薄面強調のための3次元フィルタリング

### 3次元放射方向2次微分

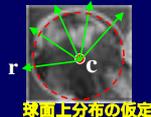
(薄面強調とゼロ交差のサブボクセル探索)

仮定: 軟骨は球面上に分布している。

$$D(x, y, z, \sigma) = \sigma^{-3} \nabla^2 J(x, y, z)$$

where **C**: 骨頭中心  
**r**: 放射状方向  
ヘッセ行列

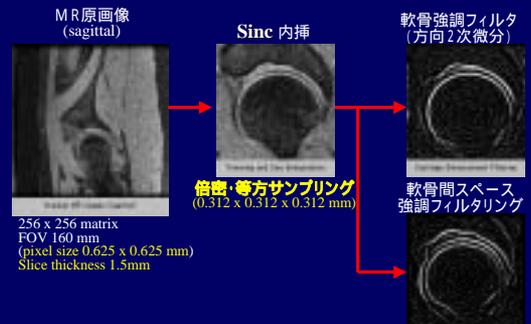
$$H = \frac{\partial^2 J}{\partial x^2}$$



球面上分布の仮定

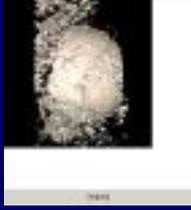
$$\nabla^2 J(x, y, z) = \begin{bmatrix} J_{xx}(x, y, z) & J_{xy}(x, y, z) & J_{xz}(x, y, z) \\ J_{xy}(x, y, z) & J_{yy}(x, y, z) & J_{yz}(x, y, z) \\ J_{xz}(x, y, z) & J_{yz}(x, y, z) & J_{zz}(x, y, z) \end{bmatrix}$$

## 股関節軟骨厚計測 軟骨領域の強調と切り出し



## 股関節軟骨厚計測 軟骨領域の強調と切り出し(結果)

Sinc内挿画像(MR原画像)  
のSurface Rendering

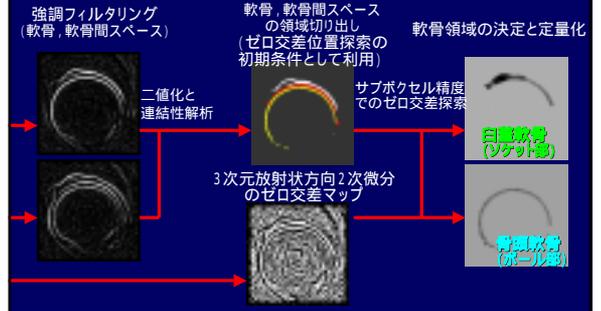


軟骨強調フィルタリング  
画像のSurface Rendering



## 股関節軟骨厚計測 軟骨領域の精密境界推定と厚計測

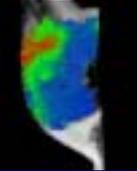
すべての処理は3次元的に行なわれる。



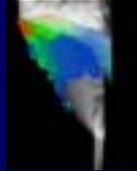
## 股関節軟骨厚計測 軟骨領域の精密境界推定と厚計測(結果)

Sagittal像  
からの再構成

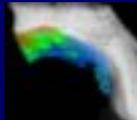
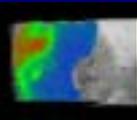
Bottom view



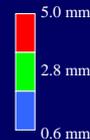
Posterior view



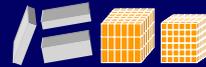
Coronal 像  
からの再構成



厚み

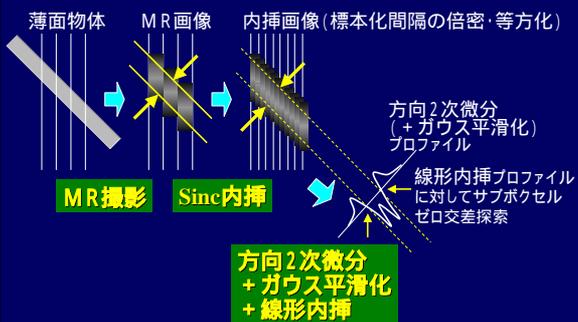


## 数値シミュレーションによる 精度限界の導出

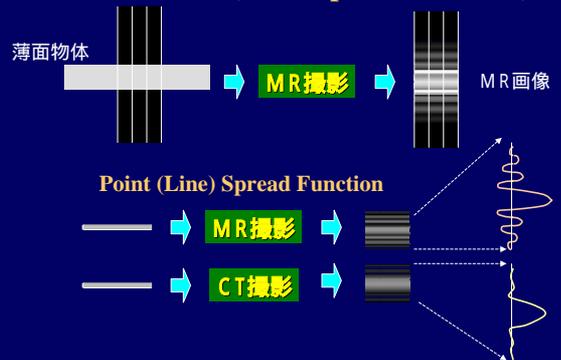


- 動機と背景: 軟骨厚の3次元的厚み計測
- 厚み計測基本アルゴリズム
- 数値シミュレーションによる精度限界の導出
- In Vitro 実験による検証

## MR画像からの3次元的厚み計測



## MR撮影のPSF (Point Spread Function)



### MR画像からの3次的厚み計測 数値シミュレーション

**MR撮影**

対象物体(薄面構造)の周波数特性  $S(u; t, \cdot)$   
厚み  $t$ , 方向

MR撮影のPSFの周波数特性  $M(u; x_y, z)$   
ボクセルサイズ  $x_y \times x_y \times z$

**後処理**

Sinc内挿後のサンプリングピッチ  $D_2(u; \cdot, \cdot)$   
方向2次微分+ガウス平滑化の周波数特性  
ガウス標準偏差

線形内挿の周波数特性  $L(u; w)$

方向2次微分プロフィールの周波数特性  $S(u; t, \cdot) \times M(u; x_y, z) \times D_2(u; \cdot, \cdot) \times L(u; w)$

### MR画像からの3次的厚み計測 数値シミュレーション: 薄面構造モデル

空間領域

周波数領域 (k-space)  $S(u; t, \cdot)$

薄い面

やや厚い面

方向の異なる面

### MR画像からの3次的厚み計測 数値シミュレーション: MR撮影のPSF

空間領域

周波数領域 (k-space)  $M(u; x_y, z)$

等方ボクセル

非等方ボクセル

Truncate

### MR画像からの3次的厚み計測 数値シミュレーション: 結果

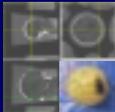
非等方ボクセル  $x_y = 0.625 \text{ mm}$   
 $z = 1.5 \text{ mm}$   
 $w = 0.5 \times x_y$

等方ボクセル  $x_y = z = 0.7 \text{ mm}$   
 $w = 0.5 \times x_y$

推定幅 (mm)

x軸まわりの回転角 (薄面法線とy軸のなす角) (degree)

### In Vitro 実験による検証



- 動機と背景: 軟骨厚の3次的厚み計測
- 厚み計測基本アルゴリズム
- 数値シミュレーションによる精度限界の導出
- In Vitro 実験による検証

### MR画像からの3次的厚み計測 In Vitro 実験による数値シミュレーションの検証

撮影対象: 摘出大腿骨頭

側面

上面

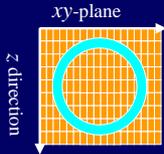
摘出



## In Vitro 実験による数値シミュレーションの検証 摘出骨頭のMR撮影条件

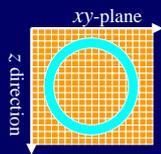
### 非等方ボクセル

$$\begin{aligned} xy &= 0.625 \text{ mm} \\ z &= 1.5 \text{ mm} \\ w &= 0.5 \text{ } xy \end{aligned}$$



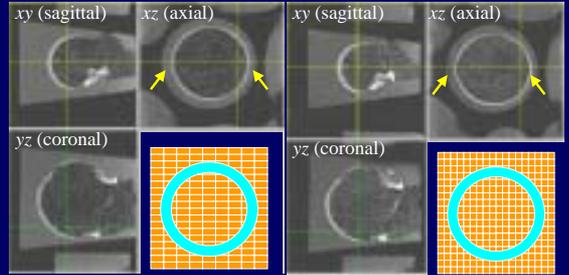
### 等方ボクセル

$$\begin{aligned} xy &= z = 0.7 \text{ mm} \\ w &= 0.5 \text{ } xy \end{aligned}$$



## In Vitro 実験による数値シミュレーションの検証 摘出骨頭のMR画像

### 非等方ボクセル (0.625<sup>2</sup> × 1.5 mm<sup>3</sup>) 等方ボクセル (0.7<sup>3</sup> mm<sup>3</sup>)



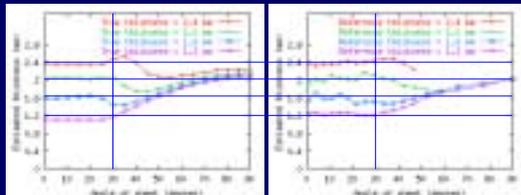
## MR画像からの3次元の厚み計測 In Vitro 実験と数値シミュレーションの対比

### 数値シミュレーション

### In Vitro 実験

(真幅は、等方ボクセルの推定幅とする)

推定値 (mm)



x軸まわりの回転角 (薄面法線とy軸のなす角) (degree)



## まとめ：考察、今後の課題



- 研究動機と背景：軟骨厚の3次元の厚み計測
- 厚み計測基本アルゴリズム
- 数値シミュレーションによる精度限界の導出
- In Vitro 実験による検証

## Validationとしての意義

### 従来のValidation法 その1 (MRM 96)

MR画像からの推定値と標本実物からの推定値の比較

### 従来のValidation法 その2 (MRM 97)

MR画像からの計算機自動推定値とマニュアル計測値の比較

### 本研究でのValidation法

精度限界の理論とIn Vitro実験の対比

Ideal Case

理論

In Vitro 実験



### パラメータ空間

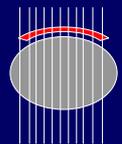
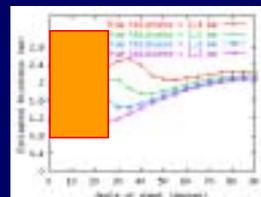
ボクセルサイズ

$$xy \times xy \times z$$

Sinc内挿後の標本化間隔  
ガウス標準偏差  $w$

## MR撮影パラメータの最適設定

対象とする薄面構造の方向分布がある程度既知の場合、本研究の数値シミュレーションにより、要求精度、S/N比、撮影時間などを考慮した撮影パラメータの最適設定を行なうことができる。



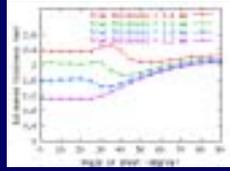
## 今後の課題

### 厚み推定精度の向上法.

- シミュレーション結果は精度補正テーブルとして利用できる.
- 複数のの結果を有効利用.

### CTからの厚み推定.

MRのPSFをCTのPSFにおきかえることにより同様の議論が適用可能.



### 計測方向の自動推定.

Hessian行列の固有ベクトルの利用. 方向推定も含めた厚み計測精度限界の導出.

### 計測とセグメンテーションの統一的枠組み.

多重スケールHessian行列の利用.

## 演習問題1

以下のプロフィール(やや平滑化されたステップエッジ)の1次微分と2次微分のプロフィールを示せ.

ステップ  
エッジ



1次微分



2次微分



## 演習問題2

- PSF (Point Spread Function) とは何か説明せよ.
- CT, および, MRIのPSF (Point Spread Function) は、どのように求めたらよいか考えよ.