



医用画像におけるレジストレーションの基礎と 先端技術

千葉大学
フロンティアメディカル工学研究開発センター

羽石秀昭



レジストレーション手法構築の手順

1. 画像の変形をモデル化する

剛体変換でよいか、非剛体変換か
線形変換(アフィン変換)か非線形変換か

2. 画像の類似性の評価尺度を決める

位置合わせする画像の濃度値の性質などから決める。

3. 評価尺度を最適化するアルゴリズムを決める

設定された評価尺度(評価関数)の形状などから判断。
非線形変形では、類似性以外に、変形の滑らかさの条件、特徴点などの拘束条件が評価項に加わることもある。



講演内容

■基礎

■画像の変形のモデル

■大域的変形

- 剛体変換
- アフィン変換
- 高次多項式を用いた変換

■局所的変形

■画像の類似性の評価尺度

■残差の二乗和

■相関

■相互情報量

■評価尺度を最適化するアルゴリズム

■パウエル法他、多数

■具体例

■肺野画像の位置合わせ



画像の変形のモデル

■ 大域的変形

■ 剛体変換 対象が剛体またはそう近似できる場合

■ アフィン変換 剛体ではないものの線形変換で変形を表現できる場合

■ 高次多項式を用いた変換 剛体ではないものの全体の変形を多項式で近似できる場合

■ 局所的変形

変形の局所性が強く、多項式で表現できない場合



剛体変換とアフィン変換

剛体変換

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}\mathbf{r} + \mathbf{d}$$

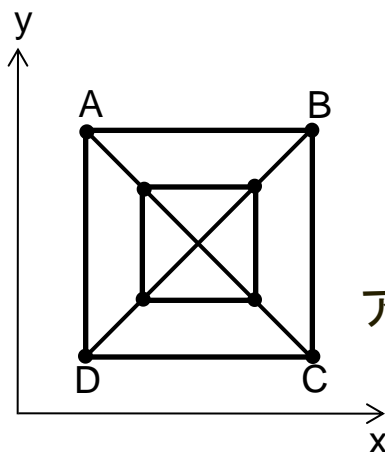
回転

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \alpha \\ 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

並行移動

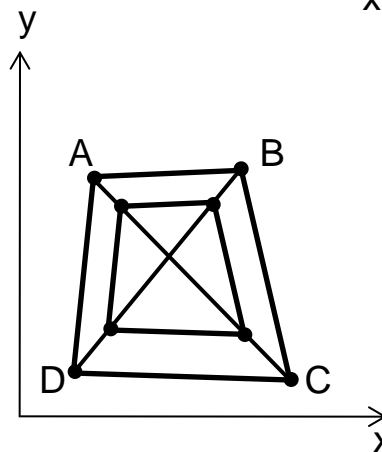
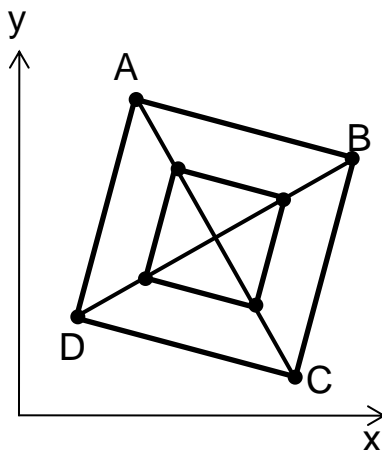
$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}$$

回転と並行移動
パラメータ数: **6**



剛体変換

アフィン変換



アフィン変換

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}\mathbf{r} + \mathbf{d}$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{bmatrix}$$

任意の線形変換
パラメータ数: **12**



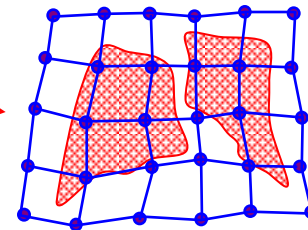
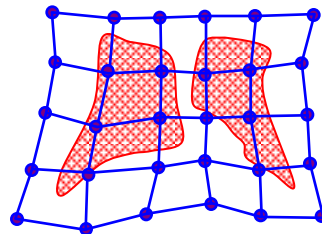
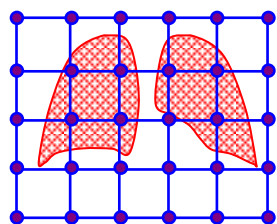
非線形変形

制御点を移動させる方法

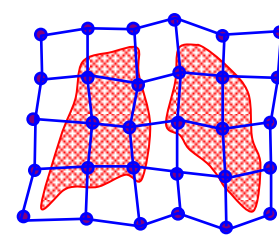
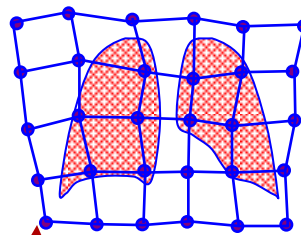
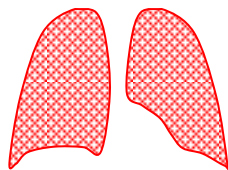
一方の画像(フローティング画像)に制御点を等間隔に配置し、局所的な類似度を向上させるように、他方の画像(参照画像)に非線形に合わせ込む。

制御点以外の点の移動量は制御点の移動量から補間する。

フローティング画像



参照画像



制御点(実際は3D的に配置)

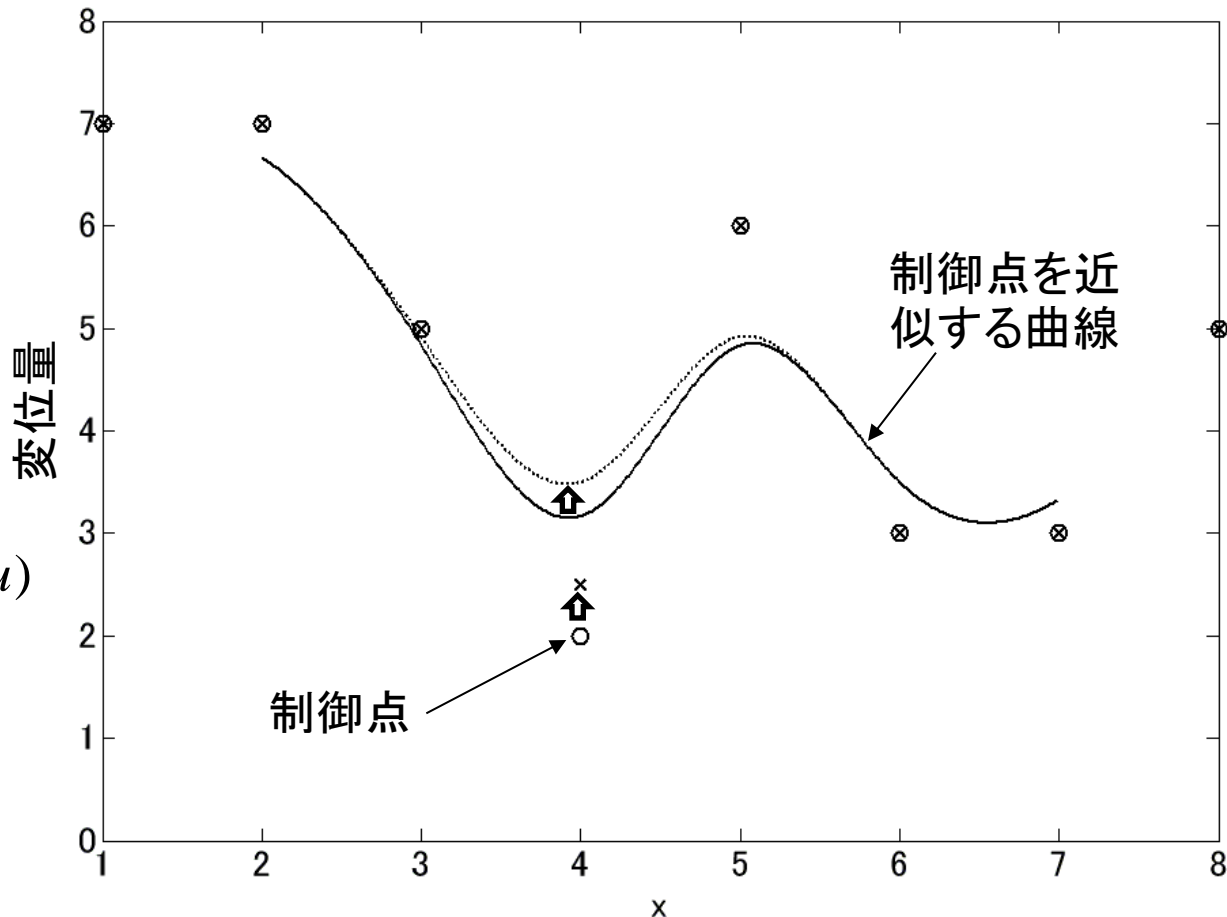


非線形変形

B-splineを用いたFree-form deformation(FFD)

制御点があくまでも近傍の移動量を制御するための点。
制御点により近傍のスムーズな移動量を決定する方法。

1次元の例



$$\phi(x) = \sum_{i=0}^3 \phi_{i+l} B_i(u)$$

■基礎

■画像の変形のモデル

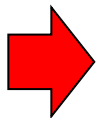
■大域的変形

- 剛体変換
- アフィン変換
- 高次多項式を用いた変換

■局所的変形

■画像の類似性の評価尺度

■残差の二乗和



■相関

■相互情報量

■評価尺度を最適化するアルゴリズム

■パウエル法他、多数

■具体例

■肺野画像の位置合わせ



画像の類似性の評価尺度

- 残差2乗和 SSD: Sum of squared difference

$$SSD = \frac{1}{n} \sqrt{\sum (g(\mathbf{r}) - f(\mathbf{r}))^2}$$

- 正規化相互相関 NCC: Normalized cross correlation

$$\begin{aligned} NCC &= \frac{\sum (f(\mathbf{r}) - \bar{f})(g(\mathbf{r}) - \bar{g})}{\sqrt{\sum (f(\mathbf{r}_1) - \bar{f})^2} \sqrt{\sum (g(\mathbf{r}) - \bar{g})^2}} \\ &= \sum \frac{(f(\mathbf{r}) - \bar{f})}{\sqrt{\sum (f(\mathbf{r}_1) - \bar{f})^2}} \times \frac{(g(\mathbf{r}) - \bar{g})}{\sqrt{\sum (g(\mathbf{r}) - \bar{g})^2}} \end{aligned}$$

- 相互情報量または正規化相互情報量 MI: Mutual information



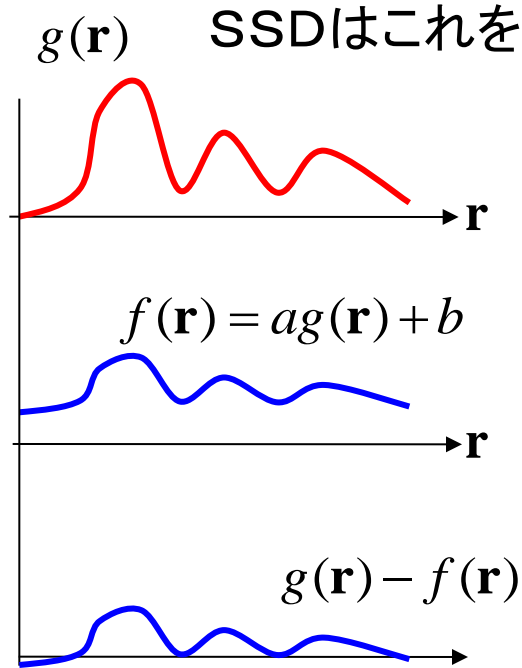
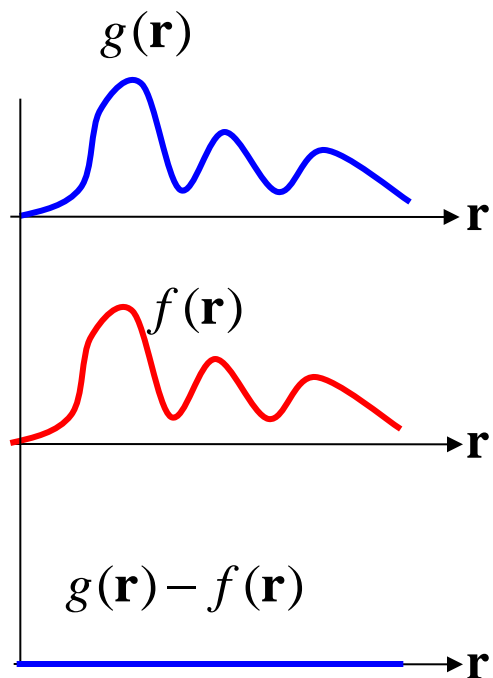
残差2乗和 SSD

■残差2乗和

SSD: Sum of squared difference **対応する画素間の濃度差の2乗和**

$$SSD = \frac{1}{n} \sqrt{\sum (g(\mathbf{r}) - f(\mathbf{r}))^2}$$

2枚の撮影画像間で、ゲインやバイアスが異なっている場合、被写体が同一でも異なる信号となる。SSDはこれを区別してしまう。

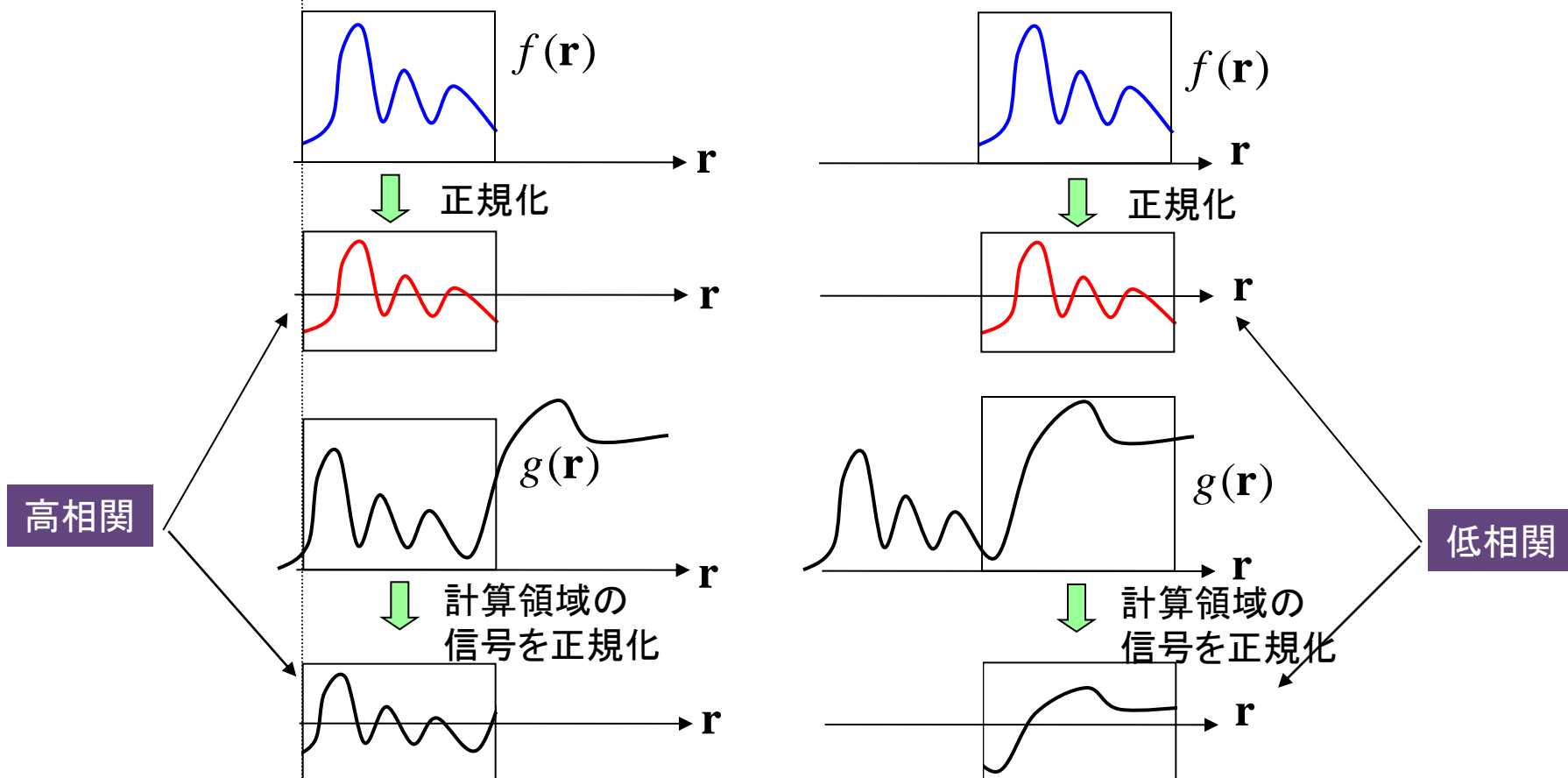




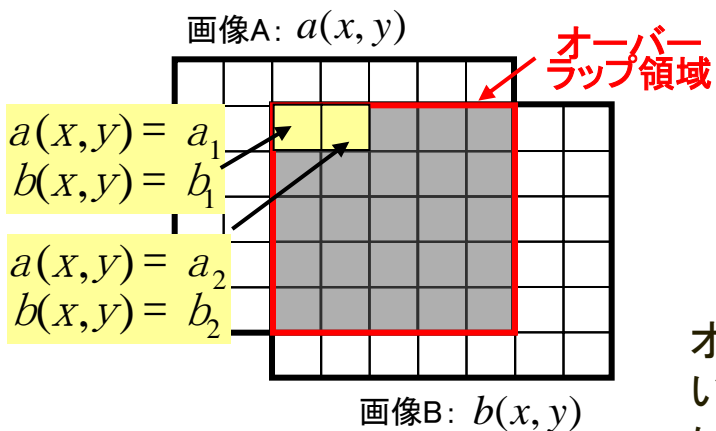
正規化相互相関 NCC

$$NCC = \sum \frac{f(\mathbf{r}) - \bar{f}}{\sqrt{\sum (f(\mathbf{r}_1) - \bar{f})^2}} \times \frac{g(\mathbf{r}) - \bar{g}}{\sqrt{\sum (g(\mathbf{r}) - \bar{g})^2}}$$

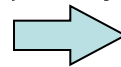
2つの計算領域で、それぞれ平均をゼロ、ノルムを1に正規化した後で、相関演算



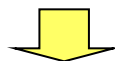
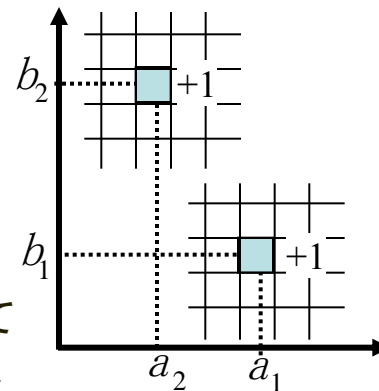
相互情報量 MI



2次元ヒストグラム作成



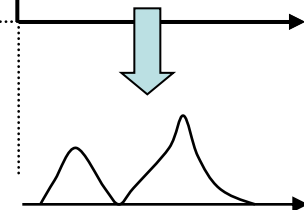
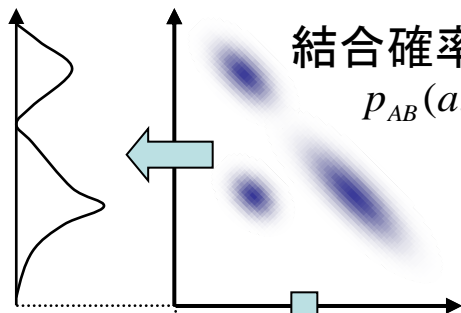
オーバーラップしている全画素を対象に繰り返す



結合確率密度

$$p_{AB}(a, b) \Rightarrow H(A, B)$$

$$p_B(b) \Rightarrow H(B)$$



周辺確率密度

$$p_A(a) \Rightarrow H(A)$$

相互情報量

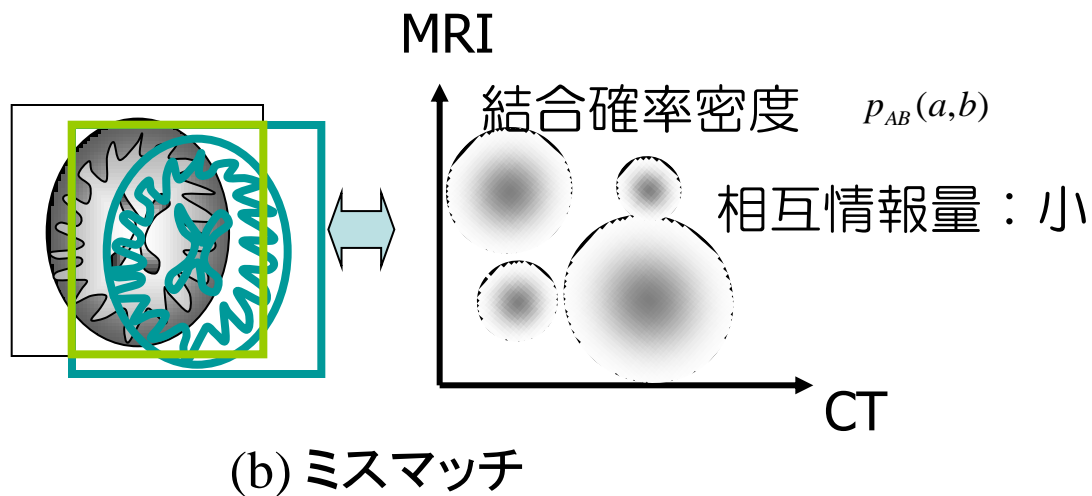
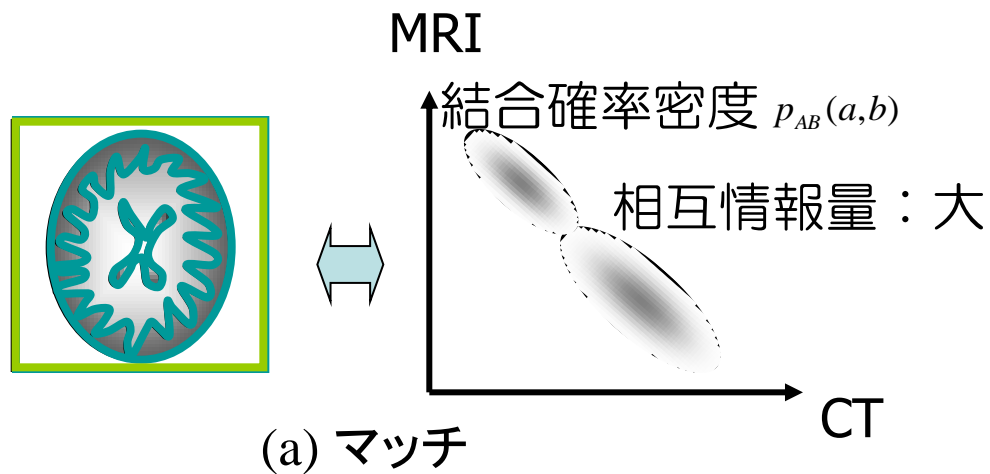
$$I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B)$$

$$H(A) = -\sum_a p_A(a) \log p_A(a)$$

$$H(B) = -\sum_b p_B(b) \log p_B(b)$$

$$H(A, B) = -\sum_{a,b} p_{AB}(a, b) \log p_{AB}(a, b)$$

相互情報量

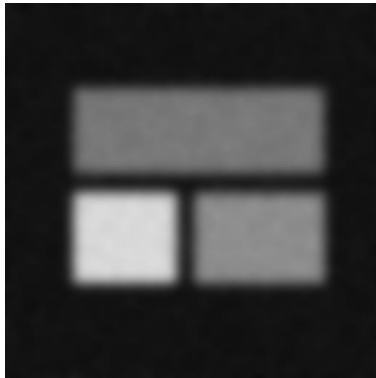




相互情報量と相関による位置合わせ評価 (位置合わせ前)

シミュレーションによる検証

参照画像と同じ濃度分布で
回転・並行移動しているもの



参照画像

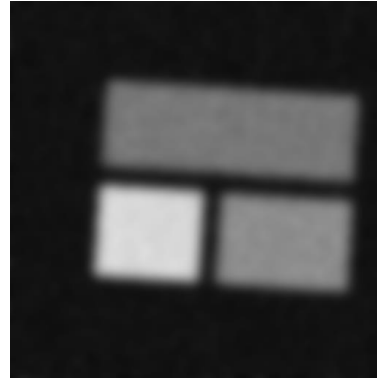


Image 1

Image 1と濃度特性
が異なるもの

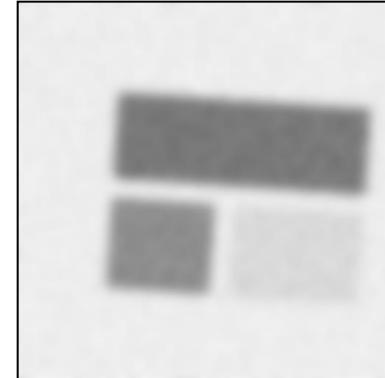
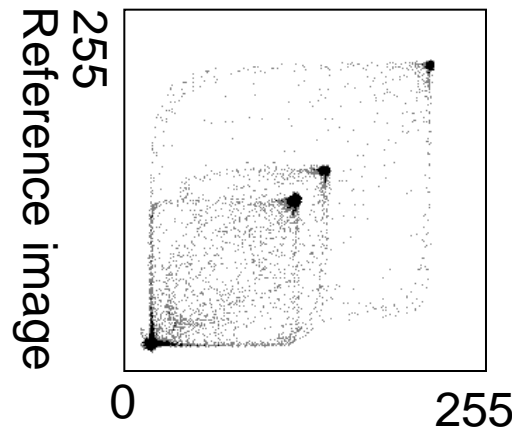
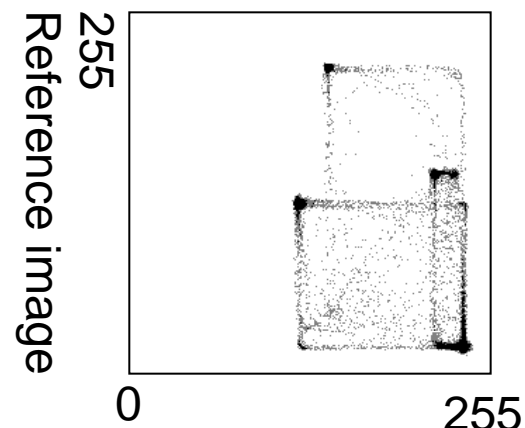


Image 2



Floating Image 1



Floating Image 2



相互情報量と相関による位置合わせ評価 (位置合わせ後)

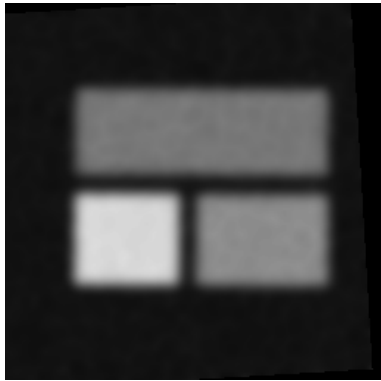


Image 1

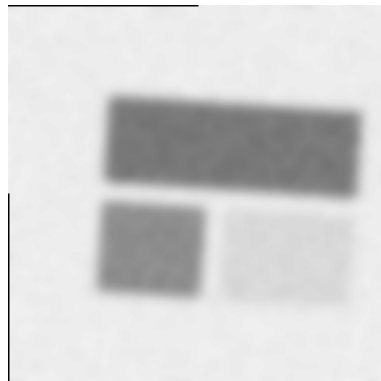


Image 2

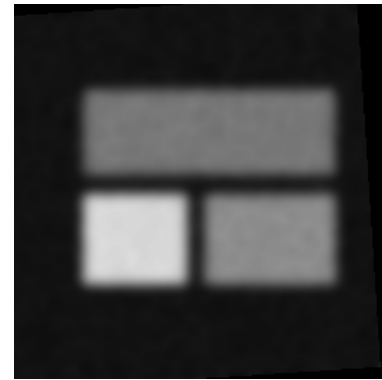


Image 1

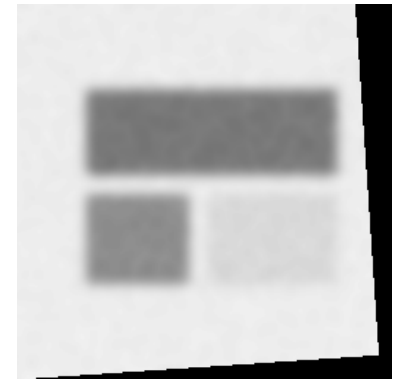
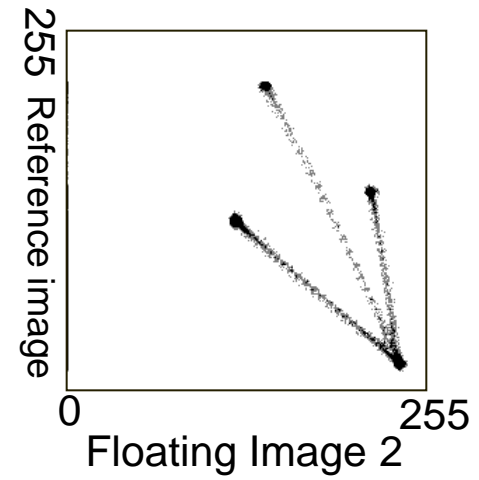
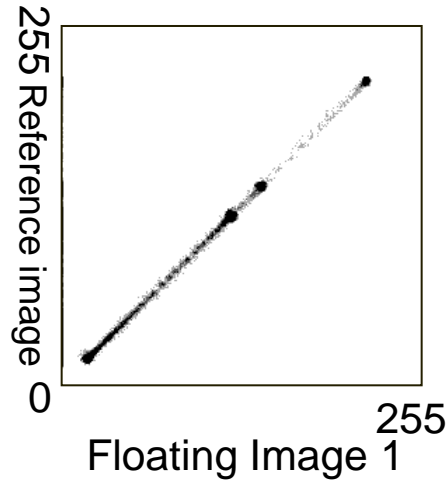
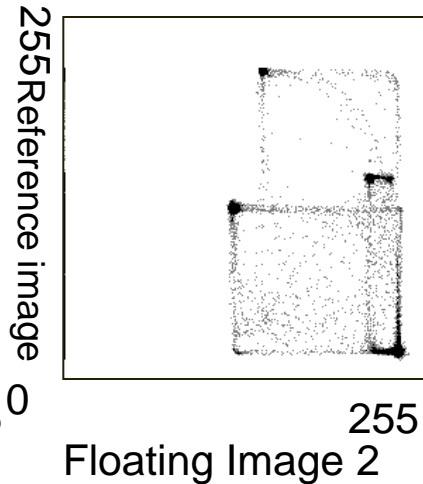
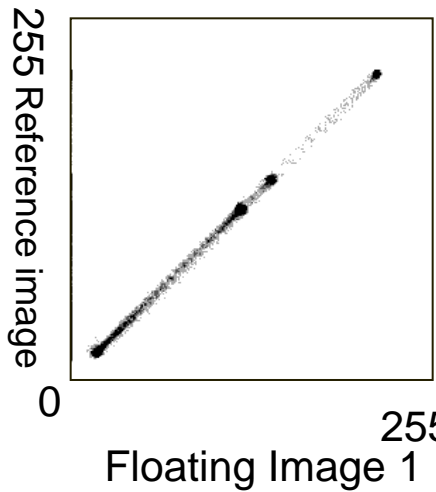


Image 2



相関による位置合わせ結果

相互情報量による位置合わせ結果

■基礎

■画像の変形のモデル

■大域的変形

- 剛体変換
- アフィン変換
- 高次多項式を用いた変換

■局所的変形

■画像の類似性の評価尺度

■残差の二乗和

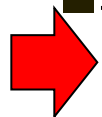
■相関

■相互情報量

■評価尺度を最適化するアルゴリズム

■パウエル法他、多数

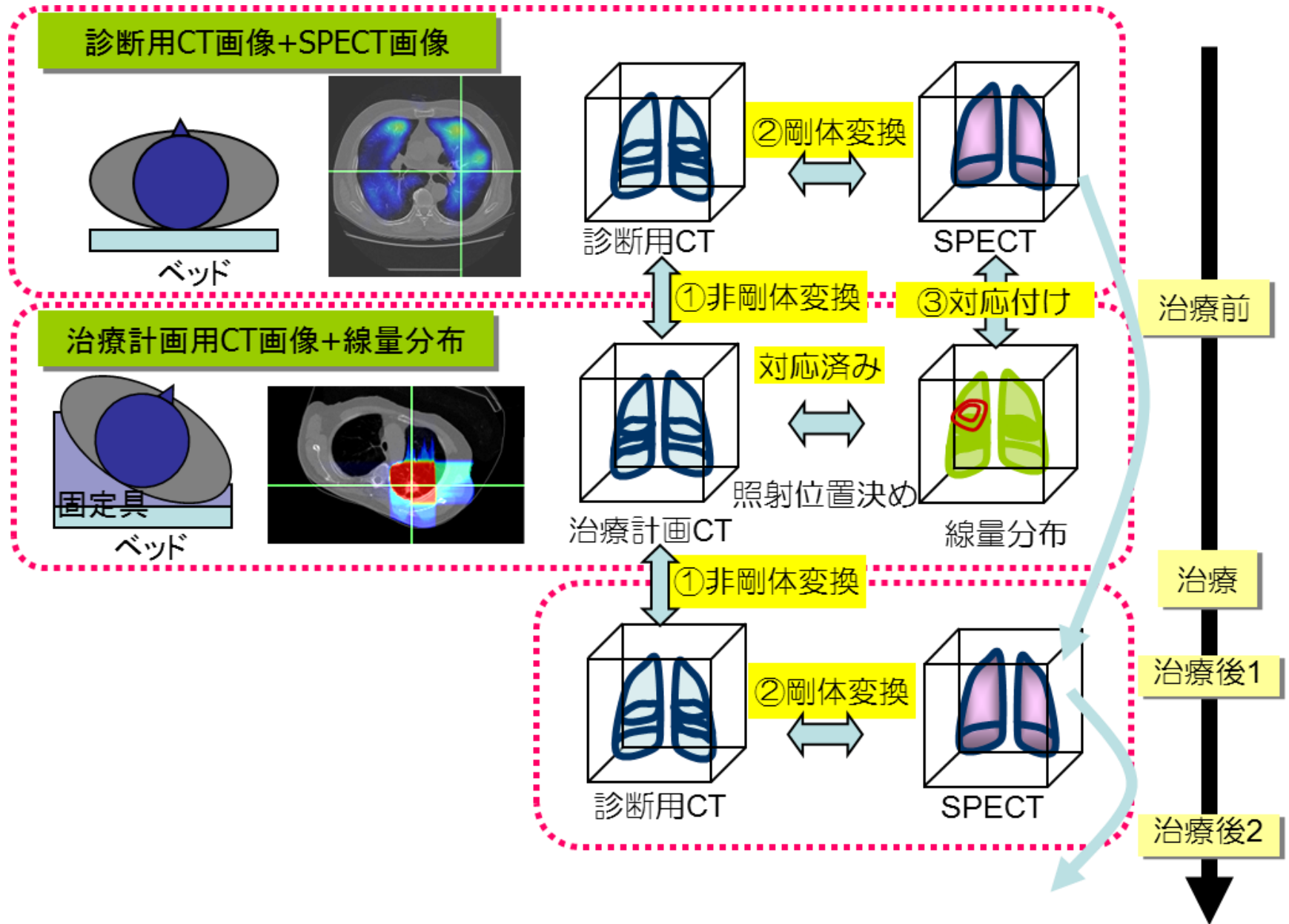
■具体例



■肺野画像の位置合わせ

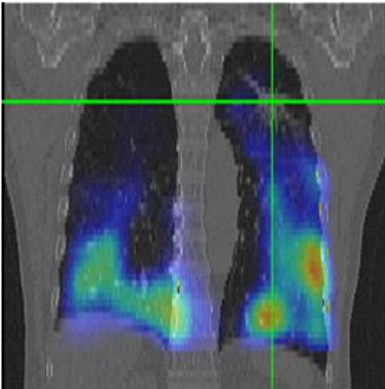
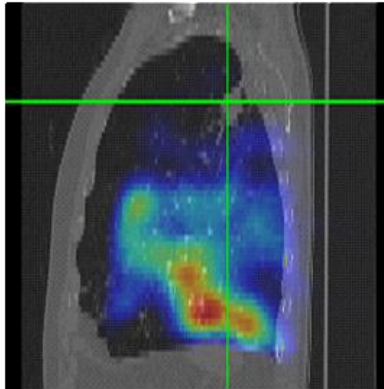
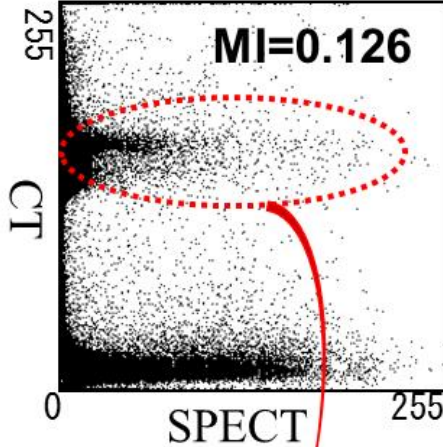
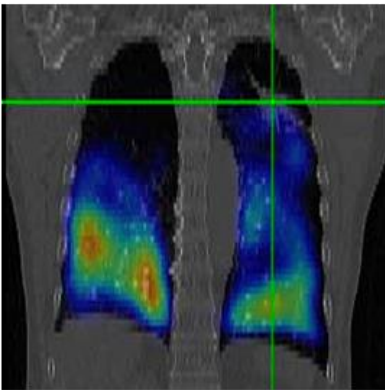
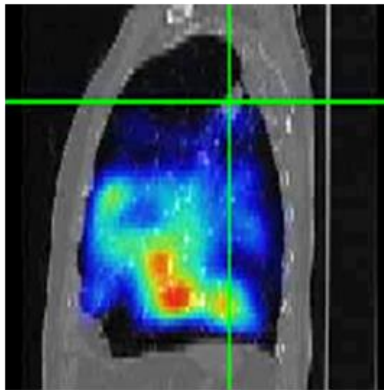
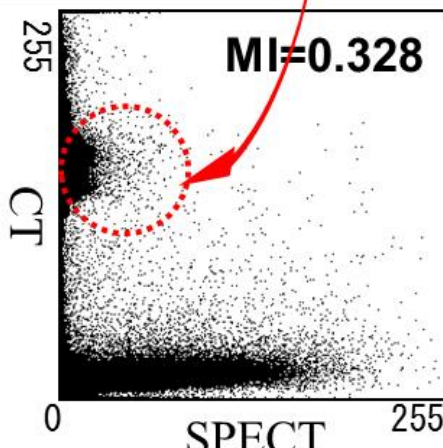


応用例：粒子線治療における画像レジストレーション



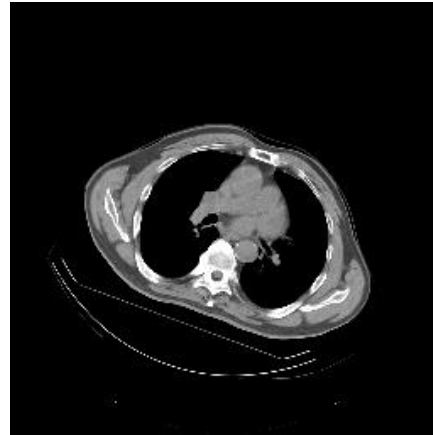
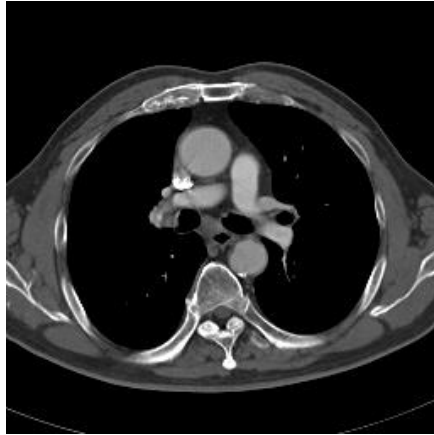


CTとSPECTとの重ね合わせ

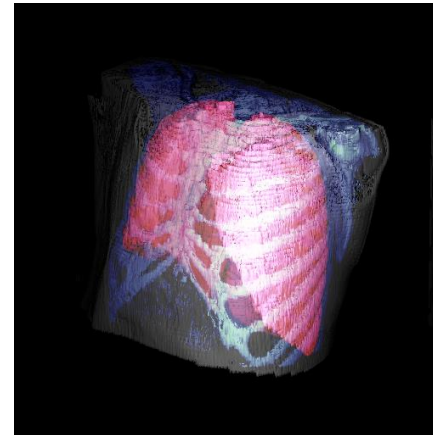
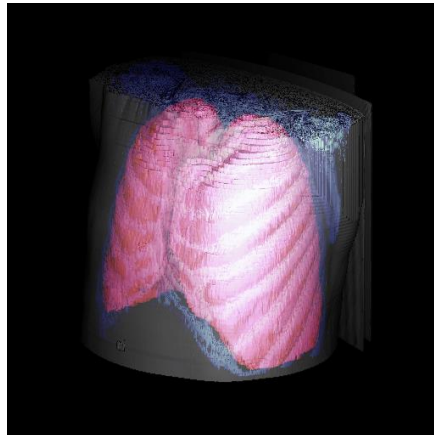
	コロナル	サジタル	2次元ヒストグラムと相互情報量(MI)
位置合わせ前			 <p>MI=0.126</p>
位置合わせ後			 <p>MI=0.328</p>



異なる体位でCT撮影された肺のレンダリング画像



断層像



レンダリング像

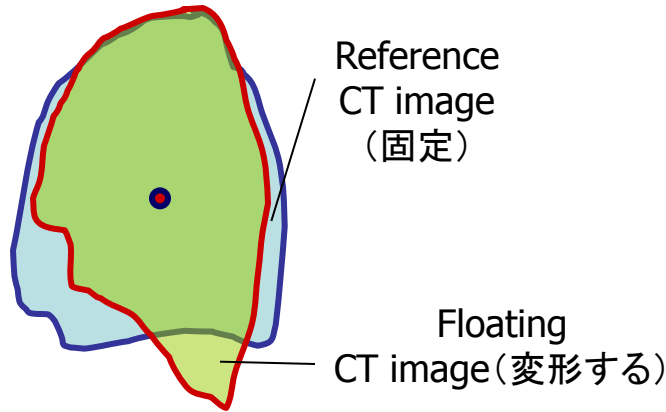
診断用CTで得られた胸部画像

治療計画用CTで得られた胸部画像

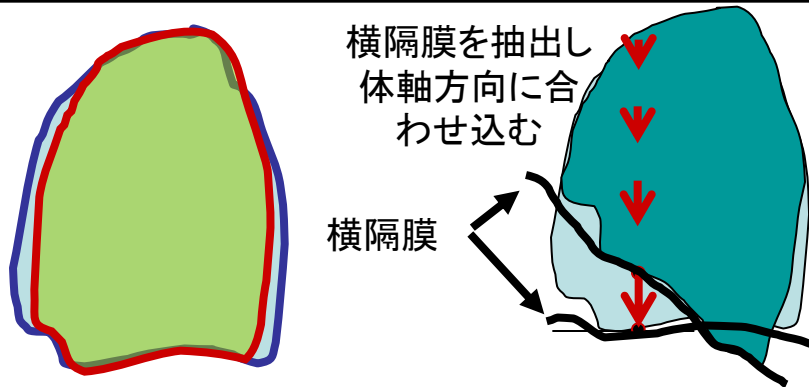


異なる肺CT画像の位置合わせ

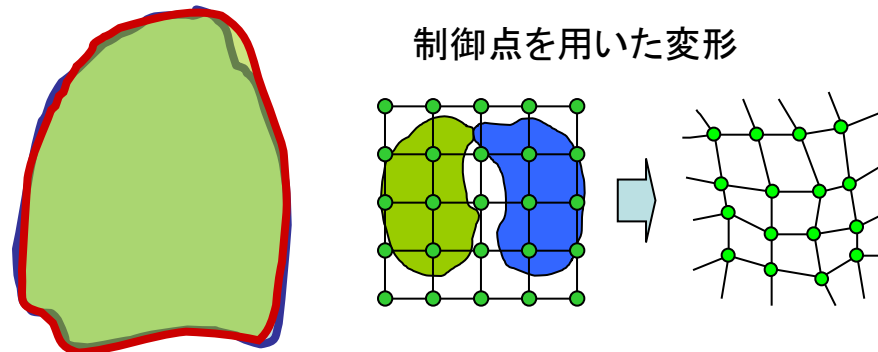
STEP1:
剛体変換により
位置合わせ
(重心合わせ)



STEP2:
横隔膜付近の
補正(体軸方向
のみの補正)

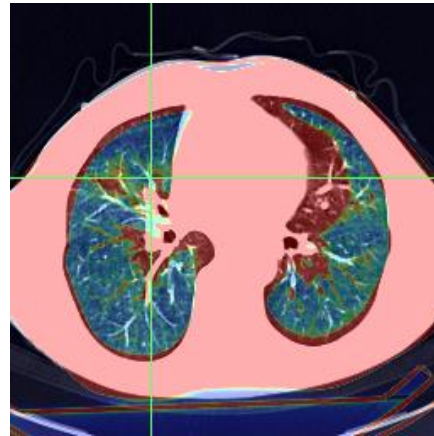


STEP3:
非剛体変換
(Free Form
Deformation)

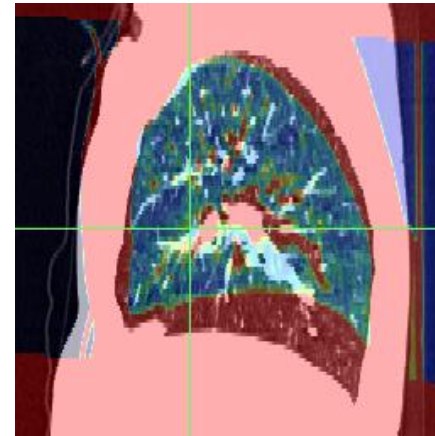




CTの画像位置合わせ 剛体変換と非剛体変換の比較

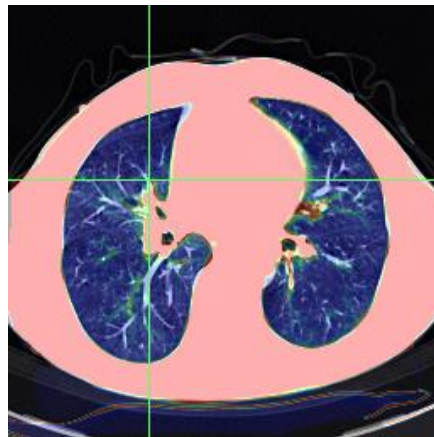


アキシャル面

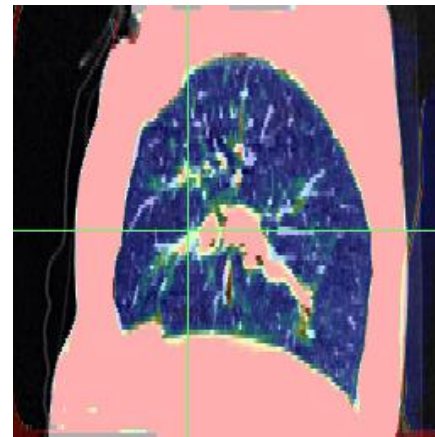


サジタル面

剛体変換による位置合わせ



アキシャル面

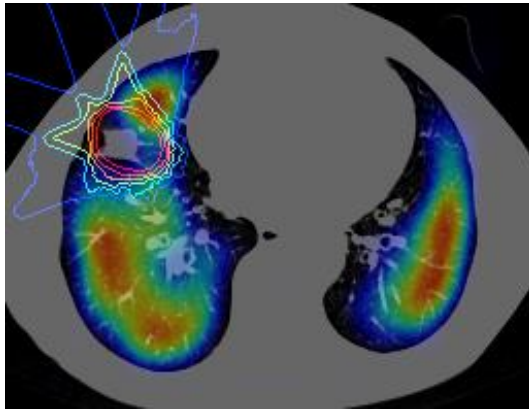


サジタル面

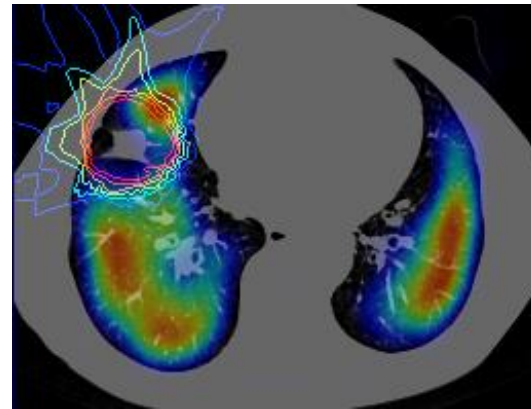
非剛体変換による位置合わせ

- レジストレーションの基礎として、以下の項目を整理した。
 - 画像の変形のモデル
 - 画像の類似性の評価尺度

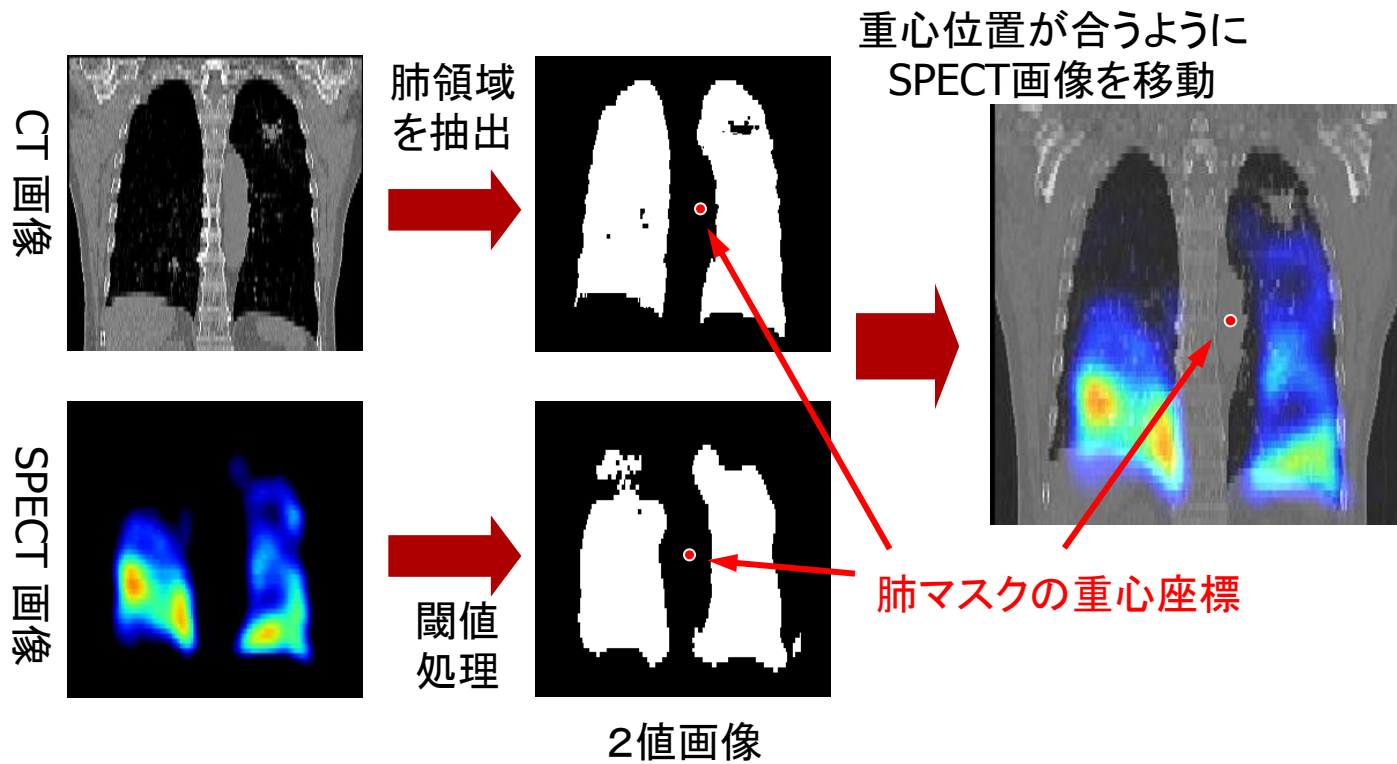
- レジストレーションの具体例として、以下の研究例を紹介した。
 - 粒子線治療における画像レジストレーション



剛体変換



非剛体変換





位置合わせに用いる2枚のMRI画像



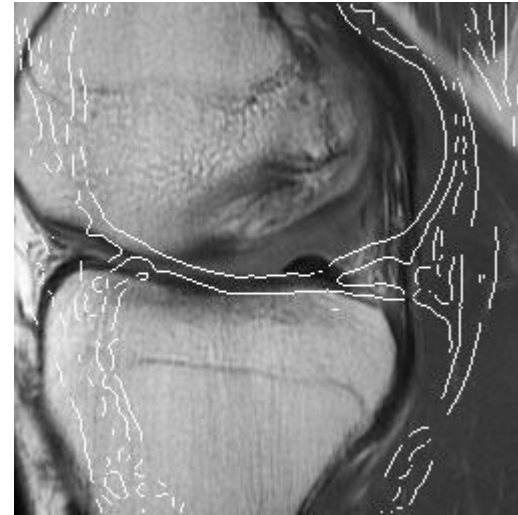
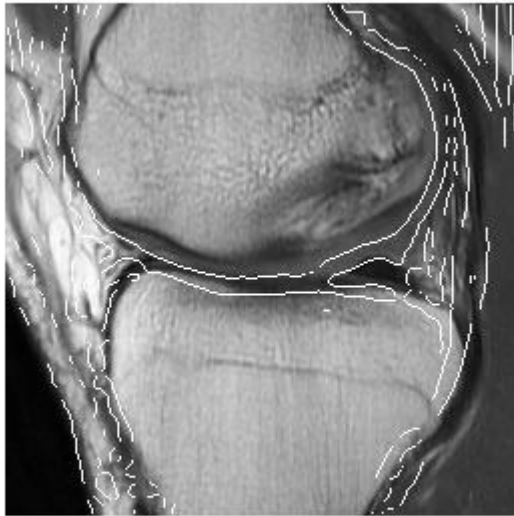
(a) MRI画像A



(b) MRI画像B

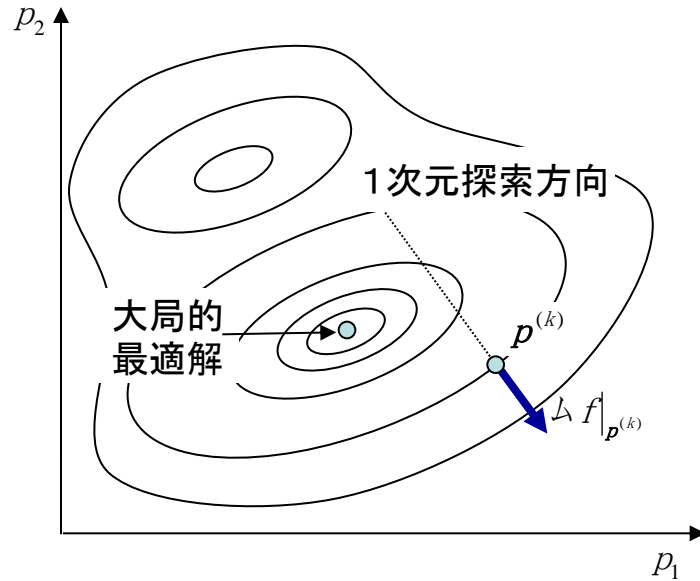
2枚の画像の合成表示

一方の画像を、エッジ抽出して表示

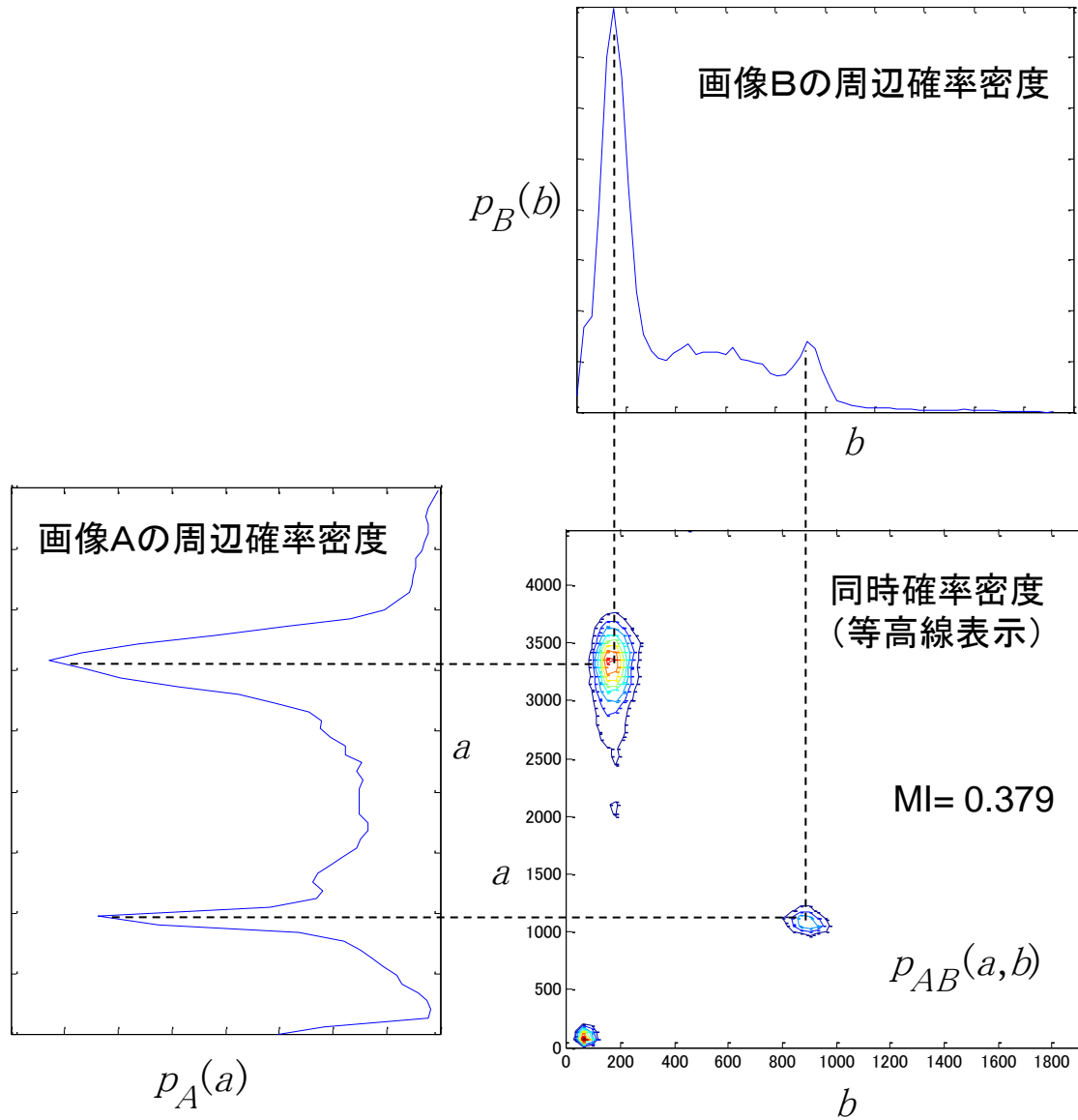




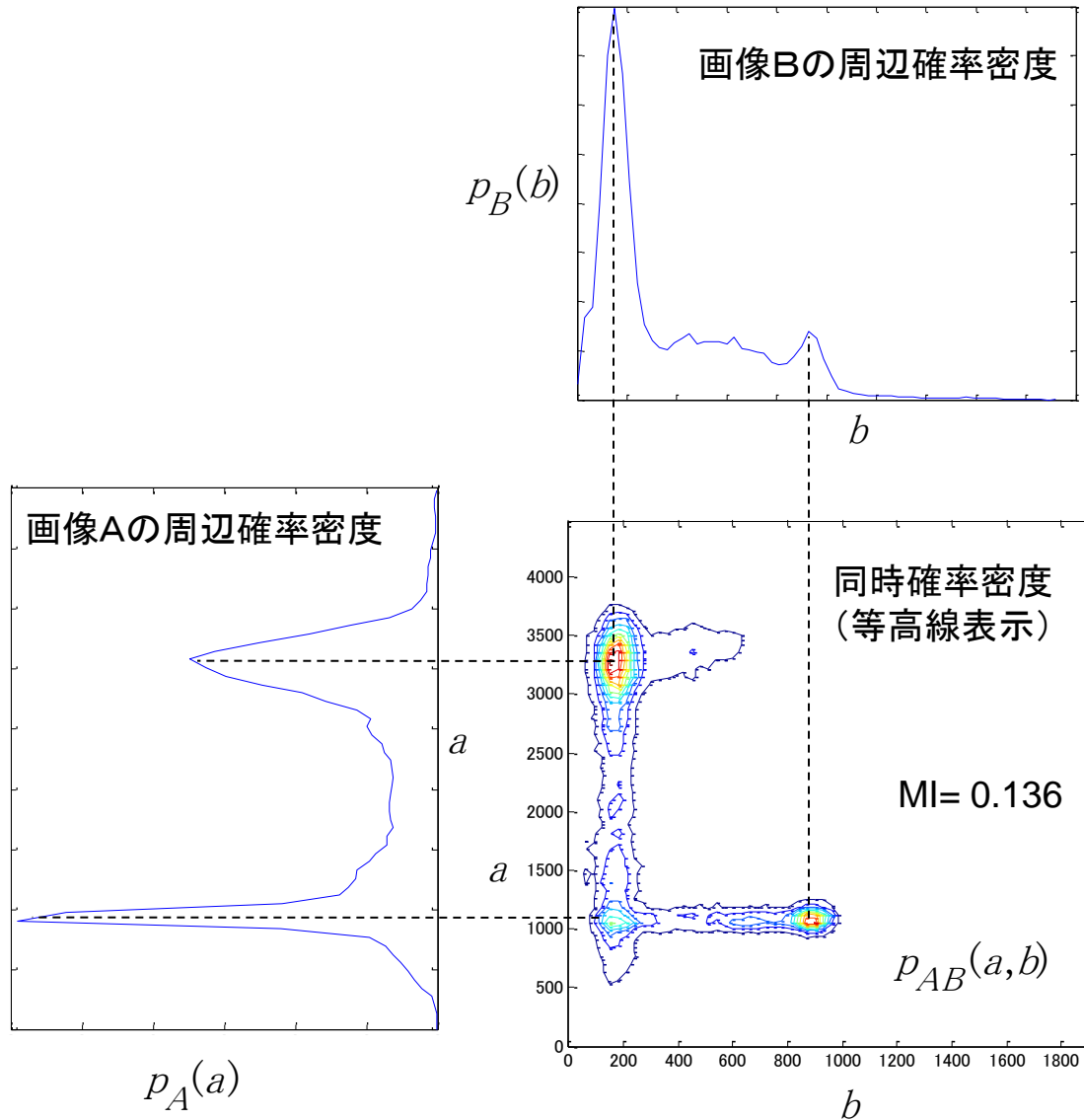
最急降下法の概念図



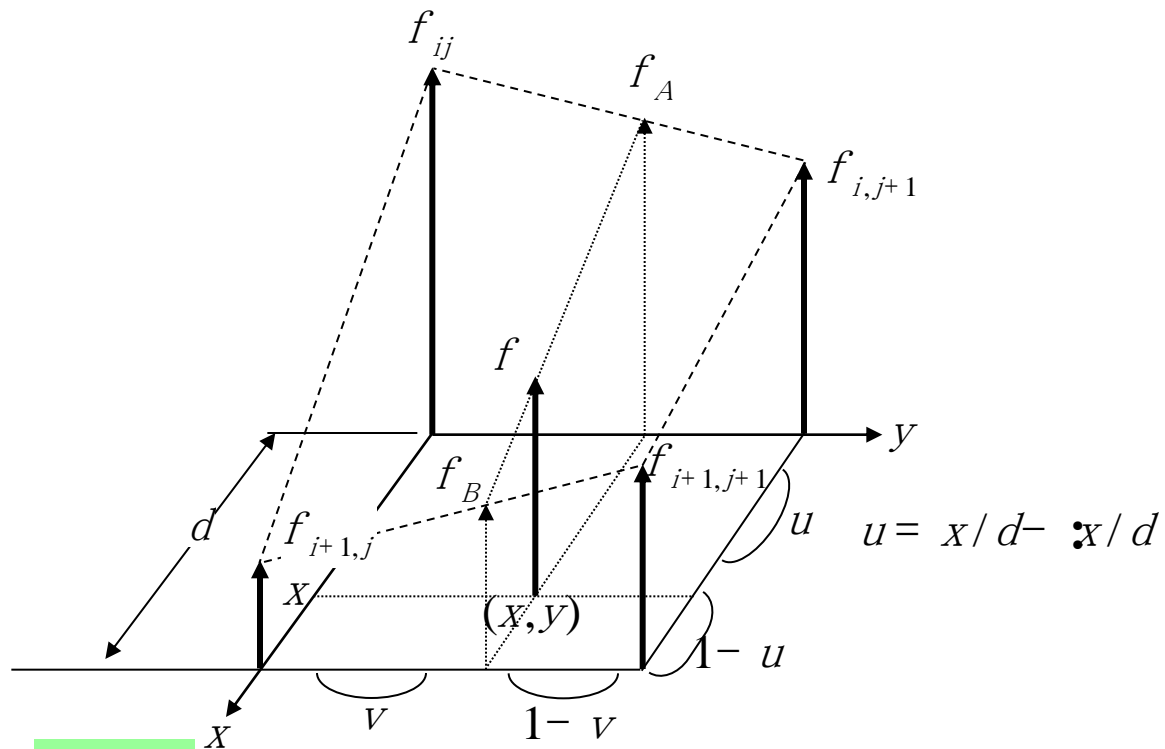
類似度が高い場合



類似度が低い場合



Bi-linear 補間



STEP1

$$f_A = (1-v)f_{i,j} + vf_{i,j+1}$$

$$f_B = (1-v)f_{i+1,j} + vf_{i+1,j+1}$$

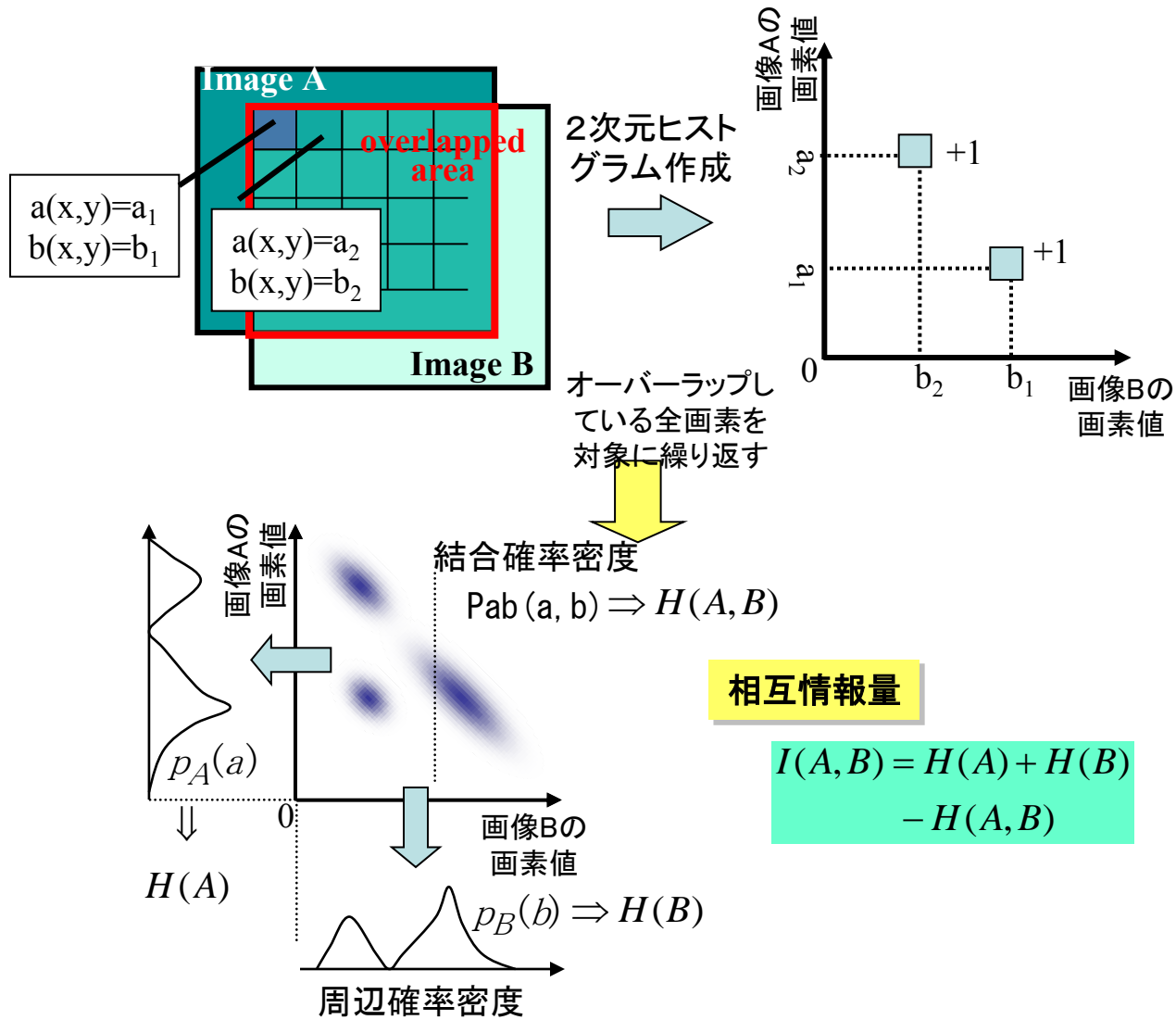
STEP2

$$f = (1-u)f_A + uf_B$$

$$= (1-u)[(1-v)f_{i,j} + vf_{i,j+1}] + u[(1-v)f_{i+1,j} + vf_{i+1,j+1}]$$

$$= (1-u)(1-v)f_{i,j} + v(1-u)f_{i,j+1} + u(1-v)f_{i+1,j} + uvf_{i+1,j+1}$$

相互情報量



制御点における移動の模式図

図2 制御点における移動量の模式図

