



Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 形状に基づく画像処理

✓ 形状(幾何学)に基づく画像処理は古くからある.

- Level Set法: 陰関数・曲率流など.
- 拡散テンソルMRI処理: 高次多様体の測地線.
- 中心軸(Medial Axis): 計算幾何学・認識[Blum' 67].
- Graph Cut, Region Growing, etc.



Crash.barkley.edu/~sehan

**測地Active Contour** [Caselles' 97]

長さ(滑らかさ)/曲率  
+ 画像(エッジ)フィット

**最小化** = 画像勾配で作られる  
多様体上の測地線



M. Campen and I. Kobbelt, EG'11

✓ 基本方針: 幾何計量(弧長、面積など)を適応する.

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 異方距離

✓ 二点x, y間のユークリッド距離は内積で与えられる

$$|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^2 = (\mathbf{x} - \mathbf{y})^T (\mathbf{x} - \mathbf{y})$$

✓ エルミート形式の正定値行列Mを用いて、内積を拡張すると、異方距離を定義できる:

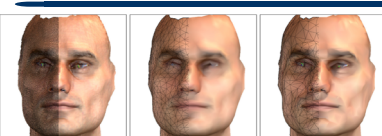
$$|\mathbf{x} - \mathbf{y}|_M^2 = (\mathbf{x} - \mathbf{y})^T \mathbf{M} (\mathbf{x} - \mathbf{y})$$

- 例えば、 $M = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  なら均一に横方向だけ二倍.

**Mを各評価点でデータ依存に定式化・モデリング.**


Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 画像(付加データ)に基づく形状処理



QSlim with Appearance

H. Hoppe, IEEE Vis'99.

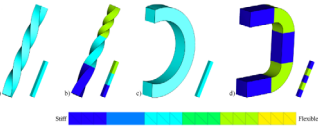


Signal-specified Parameterization

P. Sander et al., EG'02.

基本、幾何計量(弧長、面積など)や幾何変換をデータ依存に適応する:  
例えば、 $(\mathbf{x} - \mathbf{y})^T \mathbf{A}^T \mathbf{M} \mathbf{A} (\mathbf{x} - \mathbf{y})$

画像 曲面 画像



Material-aware Deformation

T. Pops et al., IEEE SMI'06.

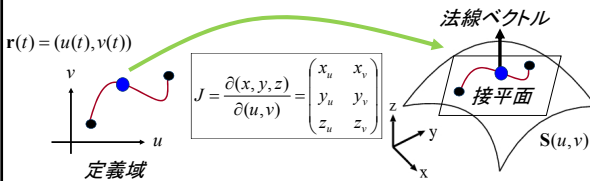
Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 曲線の長さ・曲面上の弧長

✓ 平面曲線  $\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t))$  の長さは、極限により、

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \delta t \sum_i \sqrt{\left(\frac{x_i - x_{i+1}}{\delta t}\right)^2 + \left(\frac{y_i - y_{i+1}}{\delta t}\right)^2} = \int \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt$$

✓ 曲面  $S(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$  上の曲線 $\mathbf{r}(t)$ の長さは、定義域の各点を接平面へ写像し、積分:  
- 接平面への写像: Jacobian.



$\mathbf{r}(t) = (u(t), v(t))$

法線ベクトル

接平面

定義域

$$J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v)} = \begin{pmatrix} x_u & x_v \\ y_u & y_v \\ z_u & z_v \end{pmatrix}$$

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

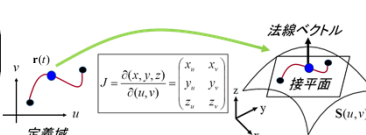
## 弧長とRiemannの共変計量テンソル

✓ 曲面上の曲線  $\mathbf{r}(t) = (u(t), v(t))$  の長さは、

$$\int \left| J \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| dt = \int \sqrt{\left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right)^T J^T J \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right)} dt = \int \sqrt{E \left(\frac{du}{dt}\right)^2 + 2F \left(\frac{du}{dt}\right) \left(\frac{dv}{dt}\right) + G \left(\frac{dv}{dt}\right)^2} dt$$

$$J^T J = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}$$

Riemannの共変計量テンソル (構造テンソル)



法線ベクトル

接平面

定義域

$$J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v)} = \begin{pmatrix} x_u & x_v \\ y_u & y_v \\ z_u & z_v \end{pmatrix}$$

この計量で決まる異方距離の形になっている:  $(\mathbf{x} - \mathbf{y})^T \mathbf{M} (\mathbf{x} - \mathbf{y})$   
 $(du, dv)^T J^T J (du, dv)$

✓ 画像多様体  $(\mathbf{x}, R(\mathbf{x}), G(\mathbf{x}), B(\mathbf{x}))$  上で弧長を計算.

✓ データ依存への拡張も可能:  $M = B^T J^T A^T A J B$

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

# 応用: エッジ保存平滑化

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## エッジ保存フィルタ

単純な平滑化      エッジ保存平滑化

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## エッジ保存フィルタの応用先

✓ 計算Photography、自然科学・工学など:

- Noise Reduction、超解像度、領域抽出、アーティスト処理、Tone Mapping、周波数分解・解析...

R. Fattal et al., SIGGRAPH 2007.  
H. Kang et al., IEEE TVCG 2009.  
E. Eisemann and F. Durand, SIGGRAPH '04.

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## エッジ保存フィルタの応用先

周波数分解:

Input HDR Signal = Edge-Aware Filtered Signal + Piecewise Linear Low-Frequency

R. Fattal et al., SIGGRAPH 2007.  
H. Kang et al., IEEE TVCG 2009.  
E. Eisemann and F. Durand, SIGGRAPH '04.

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 測地距離とエッジ保存フィルタ

✓ 画像多様体上の測地線の長さ(測地距離)を変数とした量み込みはエッジ保存平滑化フィルタを与える!

正規化量み込み:  $I^{new}(x) = \frac{\int f(x,y)I(y)dy}{\int f(x,y)dy}$

Bilateralフィルタ: ユークリッド距離

$$\exp\left(-\frac{|x-y|^2}{2\sigma^2} - \frac{|I(x)-I(y)|^2}{2c^2}\right) = G_\sigma(|p-q|)$$

測地距離  $f(x,y) = g_\sigma(I(x)-I(y))g_\sigma(x-y)$

もエッジ保存効果  $G_\sigma(r) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 定義域変換法

✓ 測地距離を各画素に(高次元で)計算するのは非効率的.

✓ 同じ長さをもつ低次元の定義域に変換できれば効率的.

✓ Domain Transform + Separable O(N):  
- E. Gastal and M. Oliveira, SIGGRAPH '11.

1次元の等長写像( $L^1, R^1 \rightarrow R$ ) + Separable実装

✓ 我々の定式化: 曲線のL<sup>2</sup>長さ

S. Yoshizawa and H. Yokota, EG'13 poster.

$$L_2: T(p) = \int_0^p \sqrt{1 + \lambda^2 |\nabla I(t)|^2} dt, \quad \lambda = \sigma / \phi,$$

$$I^{new}(x) = \frac{\int G_\sigma(T(p), T(q)) I(y) dy}{\int G_\sigma(T(p), T(q)) dy} \quad G_\sigma(r) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

X方向のフィルタ  
Y方向のフィルタ

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 既存法の問題点&提案法1

✓ 定義域変換後は飛び飛びのピクセルの集合:

変換後の定義域で線形量み込み

✓ 非均一な量み込み自体が難しい問題.

✓ 既存法[Gastal et al., SIG'11, SIG'12]では、L<sup>1</sup>距離:

- Moving-Average法: **Box Kernel**だけ!
- 線形補間: 誤差の制御が困難.

✓ 提案法1: 定義域変換(L<sup>2</sup>) + 高速ガウス変換(FGT):  
[Greengard '91]

- L2 Gaussian Kernel.
- 1Dは高速、低メモリ&安定.
- 誤差精度が解析的に保証.

S. Yoshizawa and H. Yokota, EG'13 poster.  
www.riken.jp/brict/Yoshizawa



Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## Box & 打ち切り vs Gaussian

✓ 大きな積分領域 → 高品質な結果 & 計算量が莫大.

- 小さい領域 → Box Kernel.
- 周波数領域(フーリエ変換): Gaussian → Gaussian.
- Box(算術平均) → Sinc関数.

空間領域

$$F[g_\sigma(x)] = F[\exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2})](\sigma) = \exp(-\frac{\sigma^2}{2}\omega^2)$$

$$F[\text{Box}_\sigma(x)](\omega) = \text{sinc}(\omega\sigma)$$

Kernel =  $g_\sigma(x)\text{Box}_\sigma(x)$

周波数領域

低周波 高周波

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 数値実験結果

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 参考図書: エッジ保存平滑化フィルタ

✓ 2階ボーンデジタルのブース: ソースコードあり!

### Computer Graphics Gems JP 2012

- コンピュータグラフィックス技術の最前線 -

三谷 純 (著), 五十嵐 悠紀 (著), 井尻 敦 (著), 梅谷 信行 (著), 安東 遼一 (著), 原田 隆宏 (著), 岩崎 慶 (著), 徳吉 雄介 (著), 吉澤 信 (著), 高山 健志 (著), 岡部 誠 (著), 向井 智彦 (著), 山本 龍田 (著), 幸季宗 (著), 加藤 誠 (編), ボーンデジタル, 2012

Computer Graphics Gems JP 2012  
コンピュータグラフィックス技術の最前線

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 提案法2

✓ L1 Gaussianの定義域分割法:

- S. Yoshizawa and H. Yokota, "Fast L1 Gaussian Convolution via Domain Splitting", to appear in Proc. of IEEE ICIP'14. www.riken.jp/brict/Yoshizawa

$$J(x_j) = I(x_j) + \{G(x_j - x_1) \sum_{i=1}^{j-1} \frac{1}{G(x_i - x_1)} I(x_i)\} + \{ \frac{1}{G(x_j - x_1)} \sum_{i=j+1}^n G(x_i - x_1) I(x_i) \}$$

多重定義域分割による近似へ拡張

- L1 Gaussian Kernel.  $G(x) = \exp(-\frac{|x|}{\sigma})$
- 計算複雑度:  $O(N)$  &  $O(1)$
- 1Dは超高速、低メモリ & 安定.
- 誤差精度が解析的に保証.
- FGTやFFTより高精度でMoving Averageより高速!!

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 数値実験結果

線形フィルタでの定量評価

Average PSNR (dB, log scale)

Average Speed (Mega Pixels/Sec.)

Precision vs Speed

Our (non-uniform pixels: 3.66)

FGT<sub>1</sub>, CBS, FGT<sub>2</sub>, CBS, FFT, Box L1, N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 応用: 細部保存 画像合成

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## テクスチャーを考慮した画像合成法

What's new? EG'13 poster & GCAD研究会'14(和光)

- ✓ 新しい画像合成法: **ポアソン画像類推**  
Poisson Image Synthesis + Edge-preserving Filter  
+ Image Analogy (Example-based, Pixel Transfer).
- 写実的に細部を生成するSeamless Cloning.

入力                      既存法の結果                      提案法の結果

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## Poisson Image Editing

- ✓ Idea: 良いBlendingはSource画像の勾配(Gradient=エッジ)を可能な限り保持する事が重要.

Source画像のGradient(マスク内)をTargetにコピーしマスク内だけTargetの境界条件で新しい輝度値Iを解く.

$$\min \int |\nabla I - \mathbf{g}|^2 \rightarrow \Delta I = \text{div } \mathbf{g}$$

P. Perez et al. SIGGRAPH'03.

Target画像  
Source画像  
Poisson方程式を解く!

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## Poisson Image Editingの問題点

- ✓ テクスチャーが異なる場合に(色合いは自然でも)境界が目視できる不自然な結果: Seamlessではない.

Source                      Target                      PIEによる合成結果

- ✓ Mixed Gradients:  

$$\Delta I = \begin{cases} \text{div } \nabla \mathbf{g} & \text{if } \|\nabla \mathbf{g}\| \geq \|\nabla h\| \\ \text{div } \nabla h & \text{else} \end{cases}$$
- 顔などTargetに特徴的な形状がある場合にダメ!

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 既存法

- ✓ Harmonization: [Sunkavalli, SIG' 10]: 多重解像度ノイズを付加.
- ✓ Melding [Darabi, SIG' 12]: 複雑な非線形最適化問題.

Poisson                      Harmonization                      Melding

S. Darabi et al. SIGGRAPH'12.

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 我々のアプローチ

- ✓ Main Idea: テクスチャー(高周波)とベースの色合い(低周波+シャープエッジ:特徴)を提案法1を用いて別々に処理:

入力                      低周波+特徴                      差分:高周波

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

## 提案フレームワーク: ポアソン画像類推法

- ✓ 画像類推法を用いて、フィルタ前後のエフェクトをポアソン合成結果に付加し(細部の復元)最終合成結果とする.

Cut & Paste                      Target                      Source

エッジ保存平滑化

ポアソン合成

画像類推 A:A'::B:B'

提案法の結果                      Result



Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

### 画像類推: Image Analogy

A. Hertzmann et al. SIGGRAPH'01: テクスチャ合成法の一つ。多重解像度表現された局所テクスチャを特徴ベクトルとし類似検索する事で、類推したピクセルを転写。

A. Hertzmann et al., SIGGRAPH'01. B'

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

### 線画効果

A A' B B'

B B'

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

### 提案フレームワーク

Target Source

エッジ保存平滑化

ポアソン画像合成

画像類推 A:A' :: B:B'

Result

Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

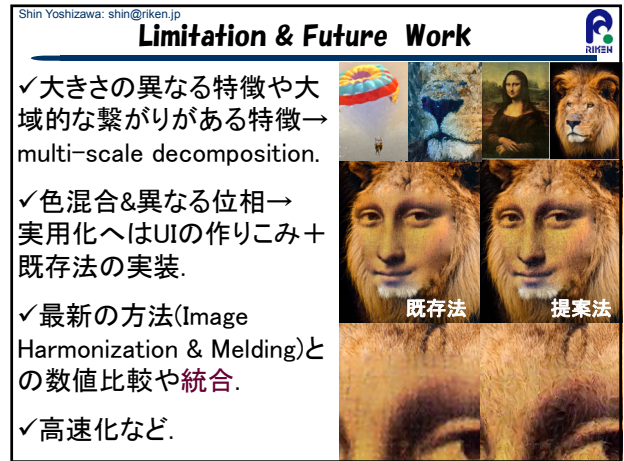
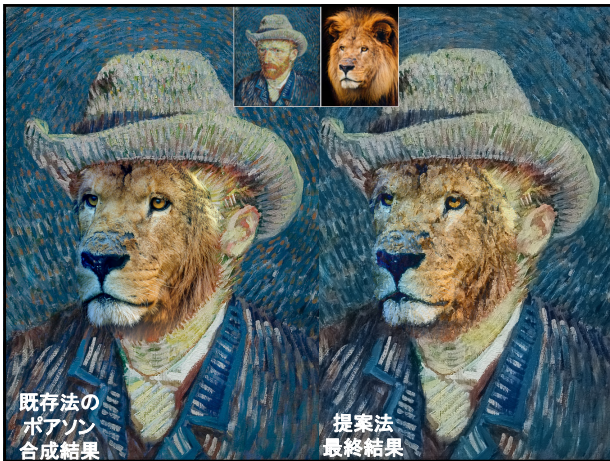
### 合成結果と比較

既存法のポアソン合成結果

提案法最終結果

既存法のポアソン合成結果

提案法最終結果



Shin Yoshizawa: shin@riken.jp

### まとめ

- ✓ 内容: 画像と形状を統一的に取り扱う方法と応用
- ✓ 方法: 長さなどの計量をデータ依存・高次元へ適応
  - 基礎: 異方距離、測地距離、画像多様体.
  - エッジ保存フィルタ: 定義域変換・分割法 + FGT.
  - 画像合成: ポアソン画像類推.

画像からの形状モデリング、形状に基づく画像処理

✓ 講演1: 吉澤 信: 形状 → 画像

✓ 講演2: 井尻 敬: 画像 → 形状

Questions?

Thank you very much for your attention!

www.riken.jp/briict/Yoshizawa/