

(64) 連続組織切片からの3次元復元のための位置合わせ全体最適化

船富卓哉, 山田重人, 宇都宮夏子, 藤村友貴, 榎田貴弘, 向川康博 (奈良先端大・JST さきがけ・京大)

電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解 (PRMU) 研究会
 共催: 電子情報通信学会 情報論的学習理論と機械学習研究会 (IBISML)
 連催: 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (IPSI-CVIM)
 2023年3月2日(木)~3日(金) はこだて未来大学



解析の対象: 京都コレクション

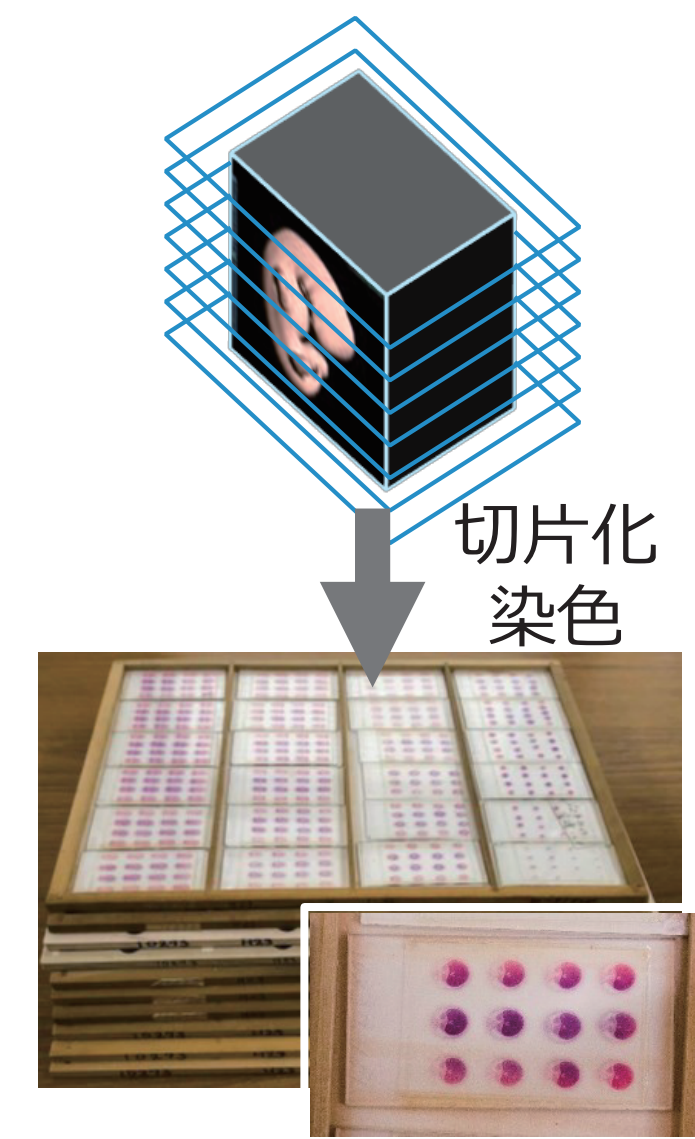
ヒト胚子約1,000例の連続組織切片

- ✓ 器官や組織の詳細な弁別が容易
- ✗ 3次元的な形態の把握が困難

連続切片からの3次元再構成

- 1標本から数百枚の切片
- 切片製作時に物理的な歪みが発生

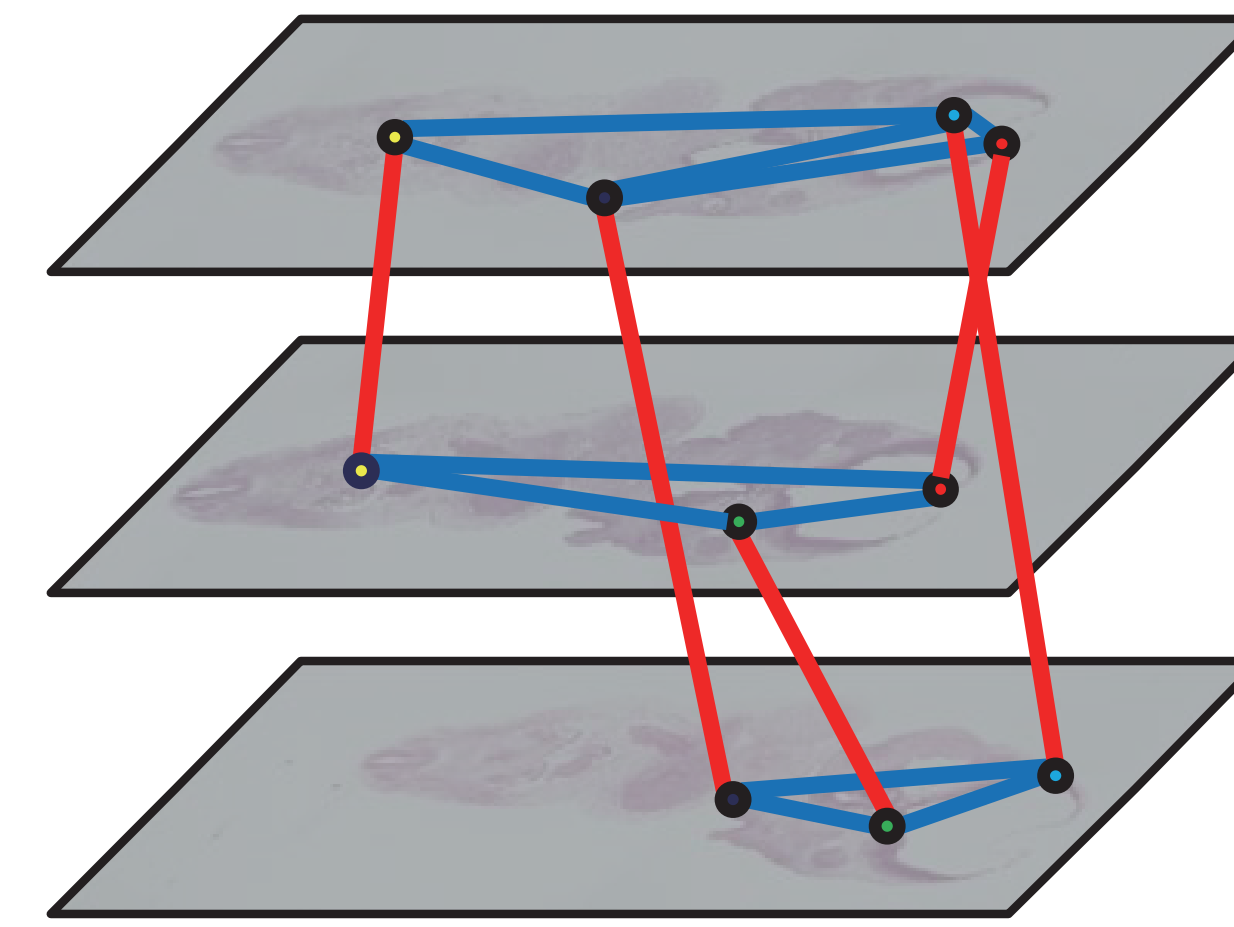
課題: 切片系列に対して逐次的に位置合わせすると**変形が蓄積**



本研究のポイント

非剛体位置合わせの全体最適化

- 変形を幾何変換の場として表現
少数の幾何変換で変形場をモデル化
コンパクトな表現によりスケール化可能
- 位置合わせグラフを用いた最適化
隣接切片だけでなく、**近傍切片との非剛体位置合わせを考慮**
- 各切片での**変形を抑えつつ**、整合性の取れる非剛体位置合わせを実現

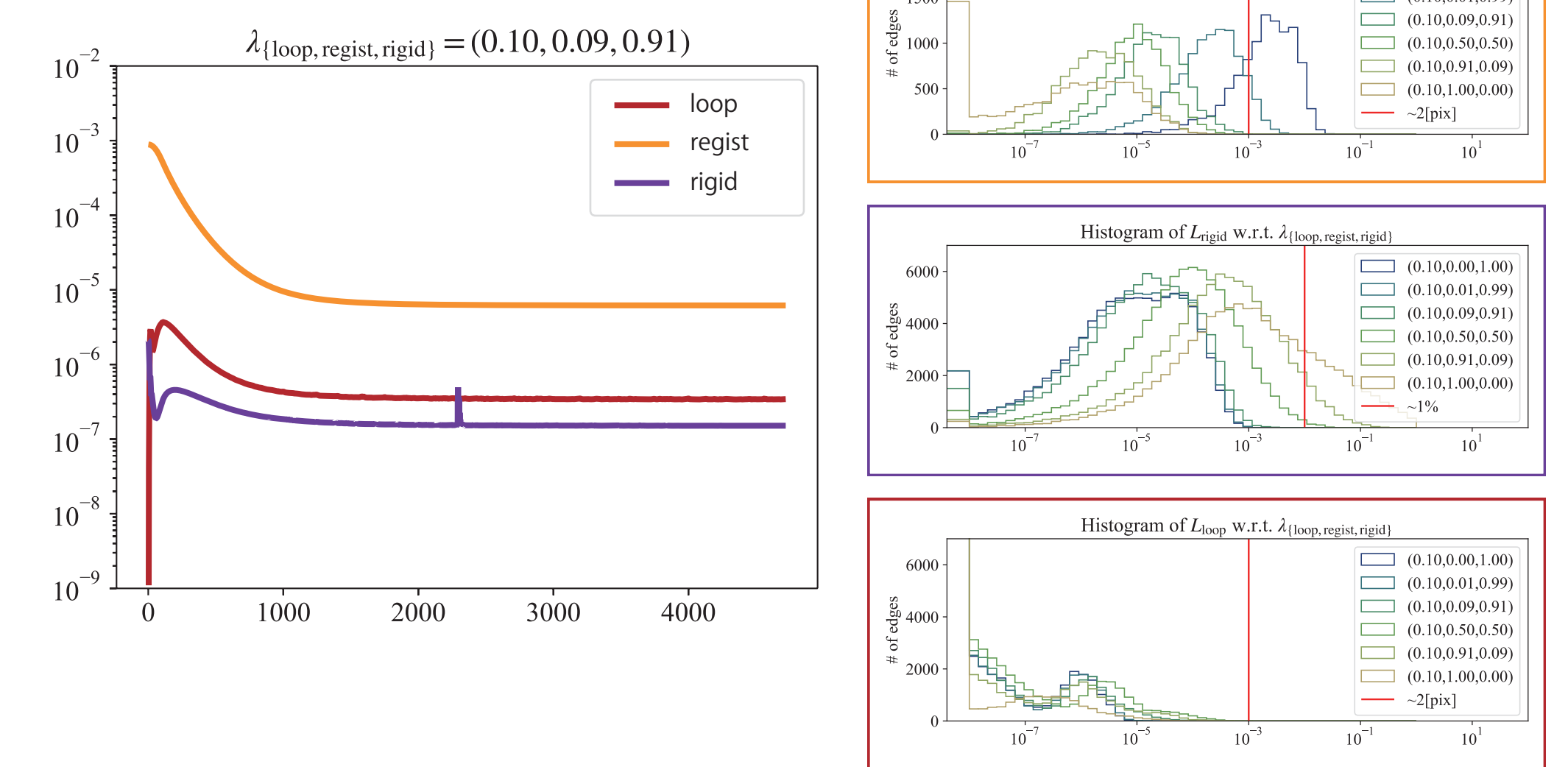


実験結果

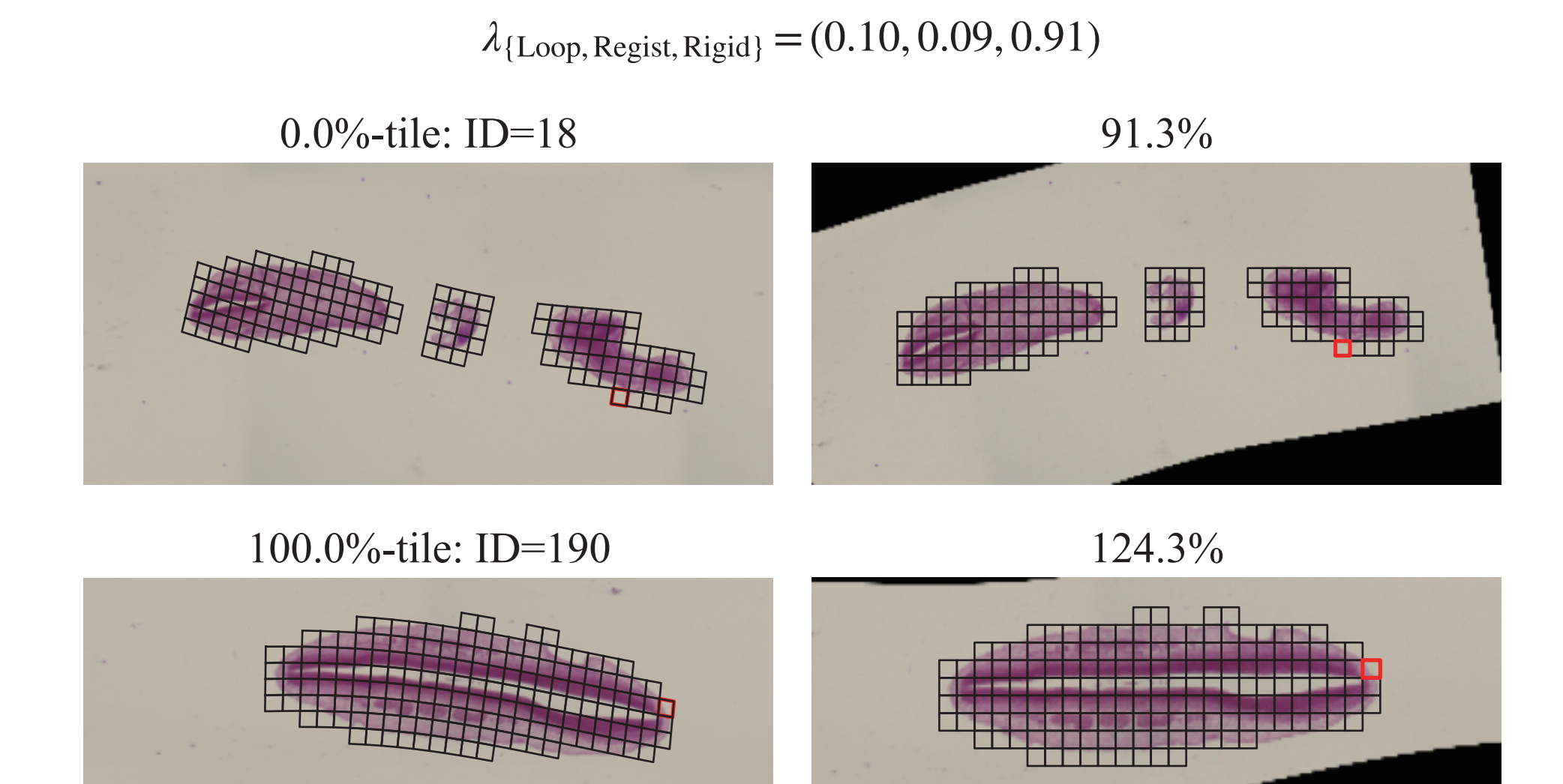
実際の連続切片に対応するグラフ

- 切片枚数: 190, 近傍5切片と位置合わせ
- 構築されたグラフ
 - 10,098 節点
 - 99,652 枝 (画像間枝: 89,554, 画像内枝: 10,098)
 - 4,897,625 閉路

グラフ最適化結果

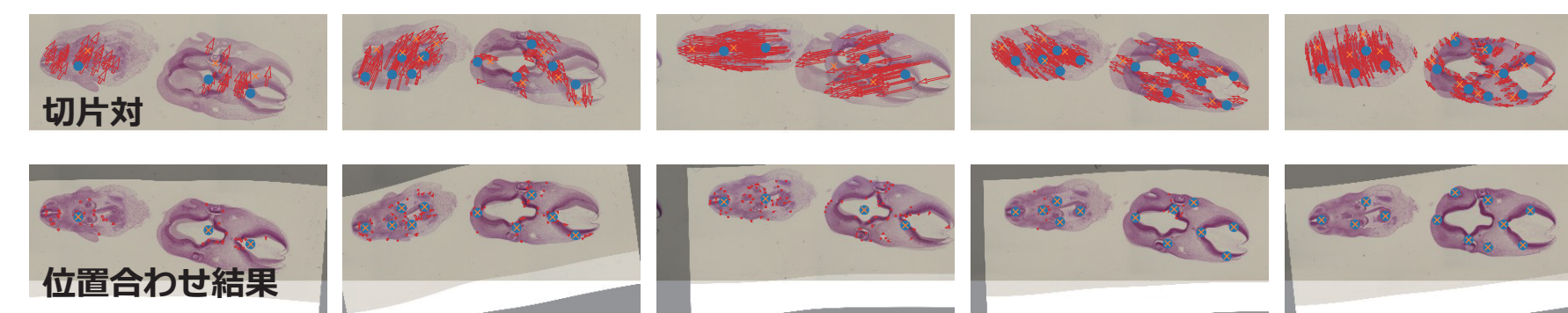


変形量の定量評価

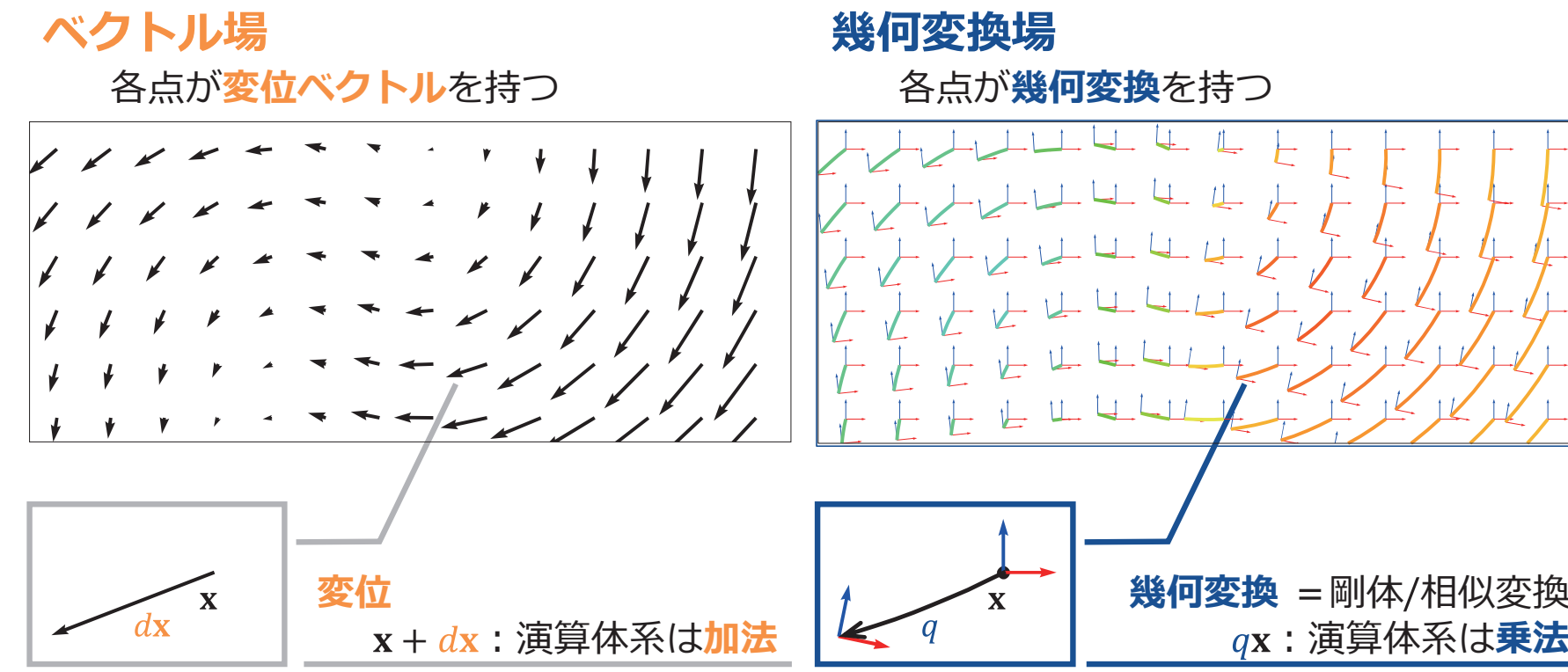


近傍切片との非剛体位置合わせ

→: 画像の局所特徴量による疎な対応付け
 Superglue (深層学習ベース)
 ●/×: 対応付けクラスタ
 最適なクラスタ数を探索



幾何変換場による変形のモデル化



幾何変換を対象としたスパース回帰

問題設定
 $x_n \in \mathbb{R}^2$: 画像座標
 $y_n \in SE(2)$: 剛体変換
 から幾何変換場 $y(x)$ をモデル化

回帰モデル
 $y(x) = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2$
 $c_i \in SE(2)$: 剛体変換
 幾何変換は加法で閉じていない

乗法に基づくカーネル回帰 (RBF補間)

一般のカーネル回帰
 $f(x) = \sum c_i \phi_i(x)$
 $\phi_i(x)$: カーネル関数
 ガウシアンカーネルの場合
 $\phi_i(x) = \exp(-\gamma \|x - x_i\|^2) \in (0, 1]$
 $c_i \in \mathbb{R}$: 係数を求める
 過学習を防ぐため、
 正則化 $\|c_i\|_p$ を含める

幾何変換のカーネル回帰
 $y(x) = \arg \min_{y \in SE(2)} \sum \phi_i(x) \text{Log}_q(c_i)$
 $\{y_n \in SE(2), x_n \in \mathbb{R}^2\}$ に対し
 係数 $c_i \in SE(2)$ を求める
 • データ項: $y(x_n)$ を y_n に近く
 • スパース正則化項: $\{c_i\}$ を少なく

位置合わせを表すグラフ構造

幾何変換のペアに2種類の関係を想定

- 各切片の歪みによる幾何変換場は少数の幾何変換の合成としてモデル化
- 特徴点クラスタを節点とする
 $x_{l,i}$: l 番目の切片における i 番目のサンプル
- 切片間 (l, l_m) の関係
 - 節点 ($x_{l,i}, x_{m,j}$) 間の位置合わせ $r_{m,j}^{l,i}$
 - 切片内の関係
 - 各切片の変形は小さい
 - 近傍に位置する節点間は恒等変換に近い

変換の定義@節点

節点に関連付けられた変換

- 節点の画像座標: $x_{l,i} \in \mathbb{R}^2$
- 絶対的な変換: $y^{l,i} \in SE(2)$
最終的な推定対象
- 位置合わせ: $y^{l,i}, x_{l,i} \in \mathbb{R}^2$
対応点の組: $(x_{m,j}, x_{l,i})$
 $y^{m,j} \cdot x_{m,j} = y^{l,i} \cdot x_{l,i}$

変換の定義@枝

枝に関連付けられた変換

相対的な変換: $r_{m,j}^{l,i}$
 $y^{m,j} \cdot x_{m,j} = y^{l,i} \cdot x_{l,i}$
 $\Rightarrow r_{m,j}^{l,i} = (y^{m,j})^{-1} y^{l,i}$

画像対の位置合わせではこの推定値が得られる

合成: $r_k^j r_j^i = (y^k)^{-1} y^j (y^i)^{-1} y^i = r_k^i$

幾何変換を対象とした最適化

多様体上での最適化

勾配 $\frac{\partial}{\partial v} \mathcal{L}$ の計算

- 幾何変換の指数・対数写像、およびその微分は自前で実装
- 残りは自動微分の機構を利用
PyTorch Autograd Engine

局所位置合わせへの忠実性

• 画像間の枝

- 2D 画像座標: $x_{l,i}, x_{m,j} \in \mathbb{R}^2$
- 変換の推定値: $r_{m,j}^{l,i} \in SE(2)$
 $x_{m,j} = r_{m,j}^{l,i} \cdot x_{l,i}$
- 枝に関連付けられた変換 (最適化変数): $r \in SE(2)$

再投影誤差
 $0 \approx \|r_{m,j}^{l,i} - r\|_{x_{l,i}} = \|r_{m,j}^{l,i} \cdot x_{l,i} - r \cdot x_{l,i}\|_2 = \|x_{m,j} - r \cdot x_{l,i}\|_2$
 ◎ 対称性: $\|r_{m,j}^{l,i} - r^{-1}\|_{x_{m,j}} = \|x_{l,i} - r^{-1} \cdot x_{m,j}\|_2 \stackrel{\circlearrowleft}{=} \|r \cdot x_{l,i} - x_{m,j}\|_2$

剛体性

• 画像内の枝

- 2D 画像座標: $x_i, x_j \in \mathbb{R}^2$
- 変換の推定値: $l \in SE(2)$
画像が非剛体変形しなければ、相対的には恒等変換
- 枝に関連付けられた変換 (最適化変数): $r \in SE(2)$
 - 絶対的な変換: y^i on x_i, y^j on x_j (y^i, y^j は未知)
 - 再投影誤差
 $\|x_i - x_j\|_2 \approx \|y^i \cdot x_i - y^j \cdot x_j\|_2 \stackrel{\circlearrowleft}{=} \|r^i \cdot x_i - x_j\|_2$
 $r^j = (y^j)^{-1} y^i$

閉路に対する制約

辿る経路に依らず同じ変換になって欲しい
 各閉路の枝について、変換を積算

$$r_{m,j}^{l,i} \approx r = y_{m,j}^{m,k} \cdot r_{m,k}^{l,k} \cdot r_{l,i}^{l,i}$$

$$r_{m,j}^{l,i} \approx r' = y_{m,j}^{m,k} \cdot r_{m,k}^{n,j} \cdot r_{n,i}^{n,i} \cdot r_{l,i}^{l,i}$$

再投影誤差
 $\|r_{m,j}^{l,i} - r\|_{x_{l,i}} = \|r_{m,j}^{l,i} \cdot x_{l,i} - r \cdot x_{l,i}\|_2 \approx 0$

グラフ最適化

誤差の総和を最小化

$$\mathcal{L} = w_{\text{regist}} \mathcal{L}_{\text{regist}} + w_{\text{rigid}} \mathcal{L}_{\text{rigid}} + w_{\text{loop}} \mathcal{L}_{\text{loop}}$$

- 切片間の関係は推定された変換に近い
 $\mathcal{L}_{\text{regist}} = \sum \|x_{m,j} - r \cdot x_{l,i}\|_2^2$
- 切片内の節点間の距離はあまり変わらない
 $\mathcal{L}_{\text{rigid}} = \sum \left(\frac{\|x_i - x_j\|_2}{\|r^j \cdot x_i - x_j\|_2} - 1 \right)^2$
- グラフ上で辿る経路に依らず同じ変換になって欲しい
 $\mathcal{L}_{\text{loop}} = \sum \|r_{m,j}^{l,i} \cdot x_{l,i} - (r_{m,j}^{m,k} \cdots r_{l,i}^{l,i}) \cdot x_{l,i}\|_2^2$

積層結果の横断面

