

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, 櫛田貴弘, 向川康博
奈良先端大/JSTさきがけ/京都大学

2023年3月3日 PRMU/IBISML/CVIM@はこだて未来大学



世界屈指の貴重なヒト胚子の標本群

ヒトの発生過程は未解明

- 主要器官は受精後2ヶ月で形成
(妊娠発覚時には大抵完了)
- 体内で起こる変化で観察が困難

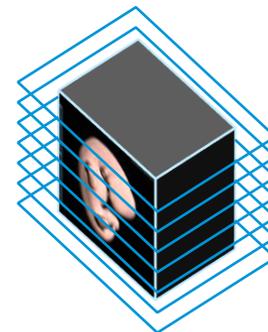
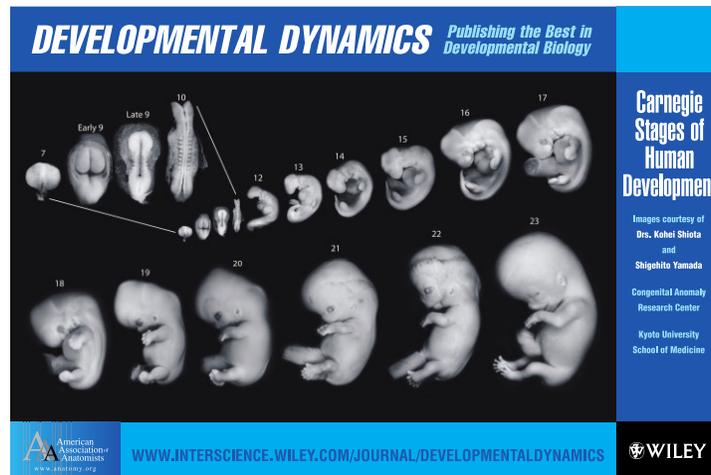
約1,000例の連続組織切片

約50年前に製作，新規収集は困難

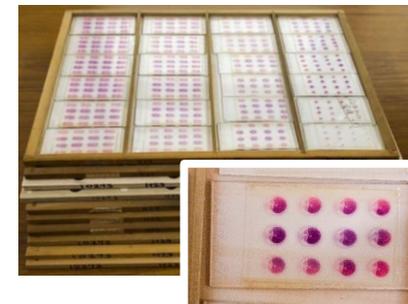
- ✓ 器官や組織の詳細な弁別が容易
- ✗ 3次元的な形態の把握が困難

➡連続切片からの3次元再構成

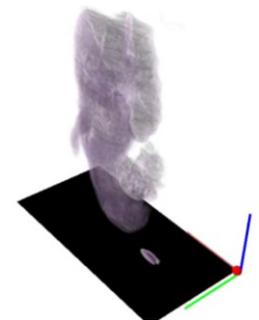
- 1標本から数百枚以上の切片
- 切片製作時に物理的な歪みが発生



切片化
染色



デジタル化
位置合わせ

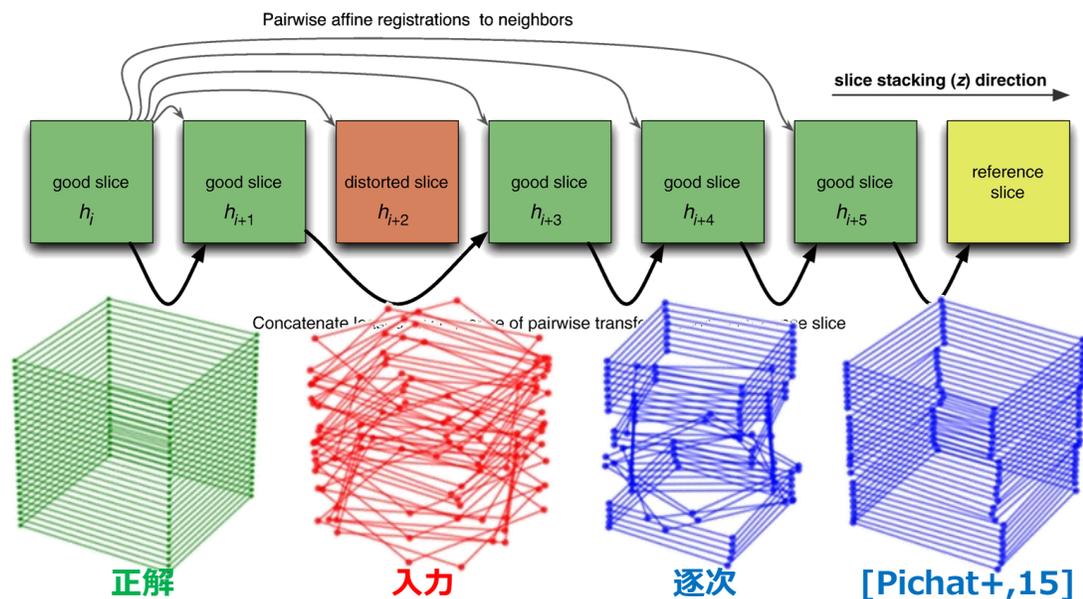




課題：切片系列に対して 逐次位置合わせすると**変形が蓄積**

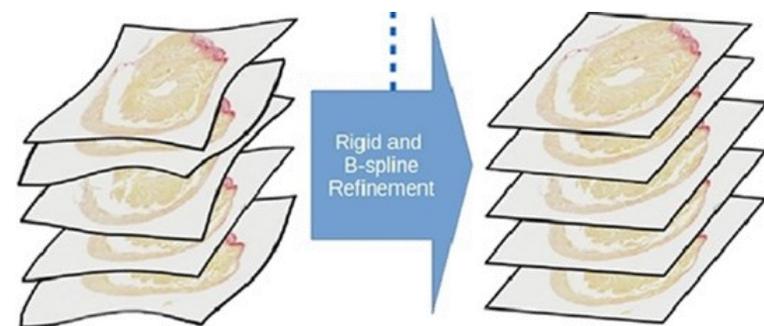
隣接切片だけでなく近傍を考慮
(剛体変換のみ) [Adler+14, Pichat+15]

- 逐次位置合わせでは
失敗すると断裂が生じる



変換の平滑化フィルタリング
(並進/Affine/B-Spline) [Casero+,17]

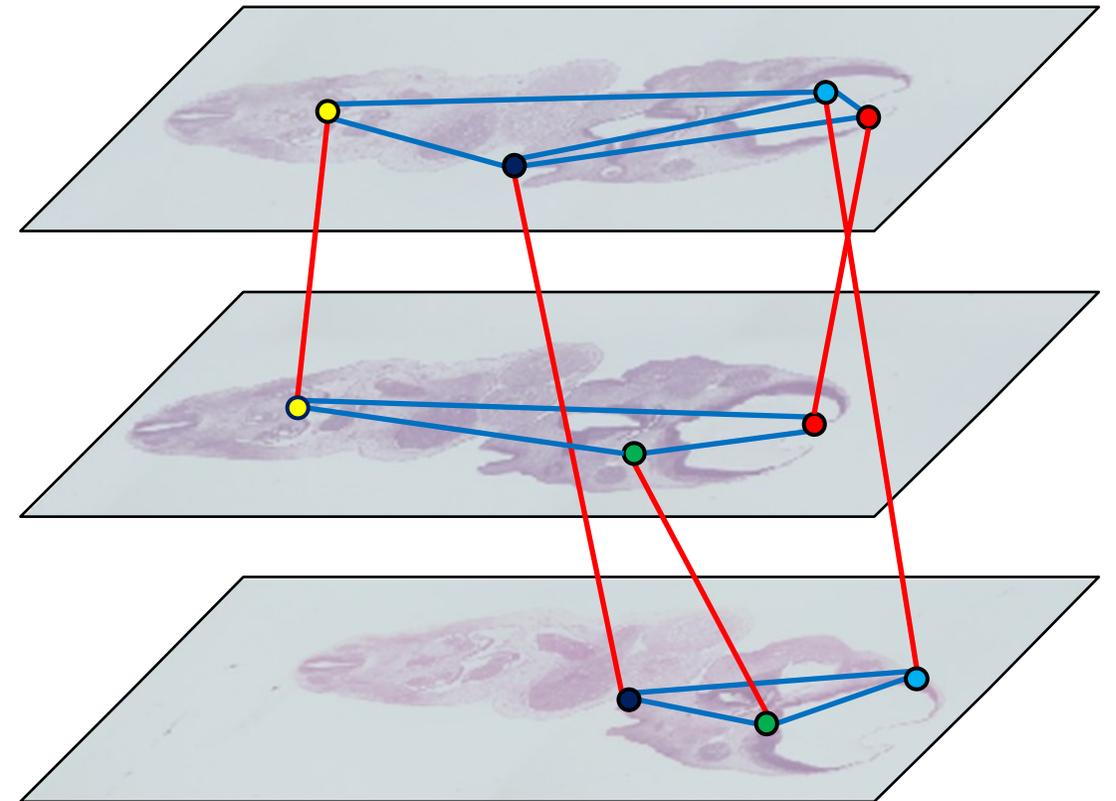
- 各切片に係る変換に対する
低域通過フィルタによる平滑化
 - 並進：ベクトル成分の平滑化
 - Affine:行列のexp/logによる平滑化
 - B-Spline:制御点位置の平滑化



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
特徴点マッチングベースで
染色に違いなどの影響にロバスト
 - コンパクトな表現により**スケール化**
数百枚の切片でも対応可能
- **位置合わせグラフ**を用いた最適化
 - **非剛体位置合わせ**について
隣接切片だけでなく**近傍切片も考慮**
 - 各切片での**変形を抑えつつ**、
整合性の取れる位置合わせを実現



研究のポイント（1）

少数の幾何変換で変形場を表現

→ : 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

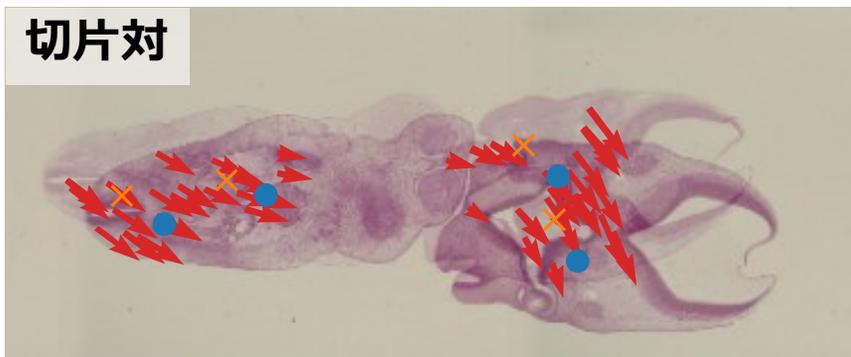
幾何変換場の回帰 [MIRU'22]

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \operatorname{argmin}_{q \in \text{SE}(2)} \left\| \sum_i \frac{\Phi_i(\mathbf{x})}{\sum_j \Phi_j(\mathbf{x})} \text{Log}_q(c_i) \right\|$$

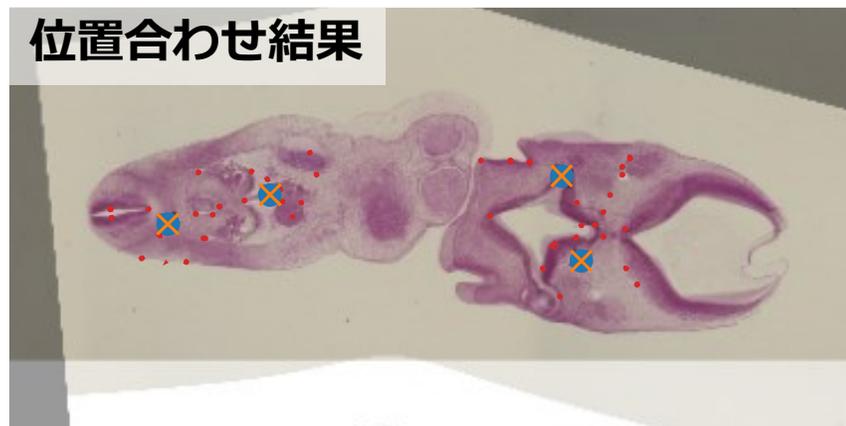
\mathbf{x}_n : 各クラスタ中心

y_n : 各クラスタの剛体変換SE(2)

切片対



位置合わせ結果



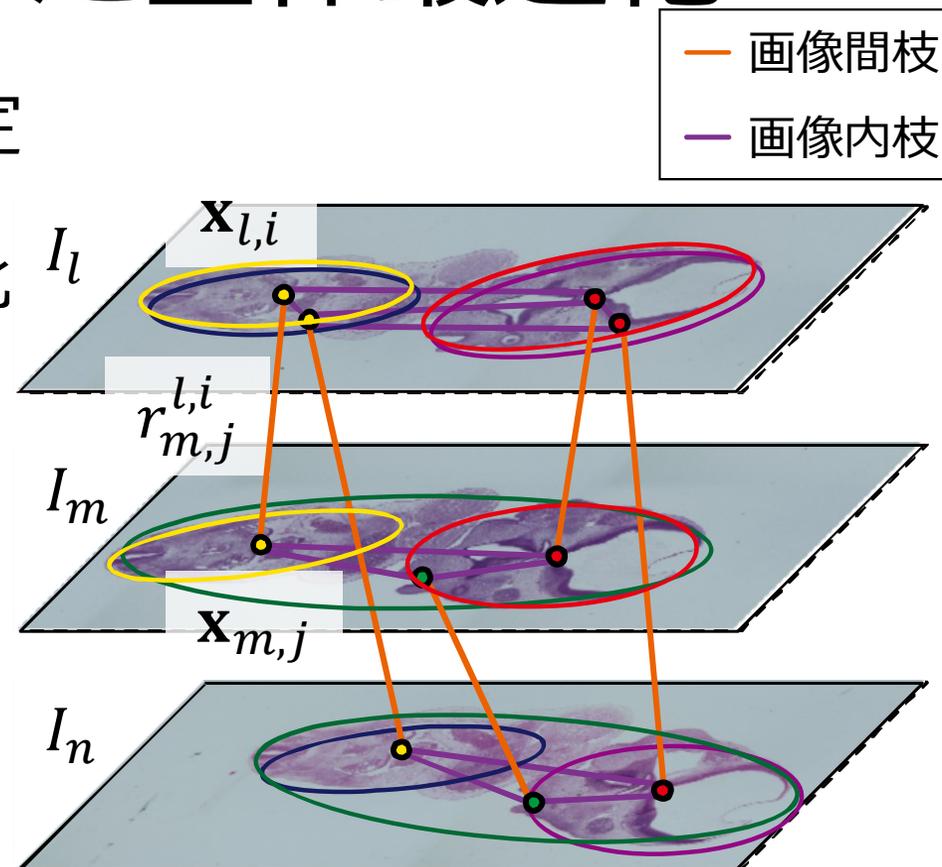


研究のポイント（２）

幾何変換を変数とした全体最適化

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
 - $\mathbf{x}_{l,i}$: l 番目の切片における i 番目のサンプル
- 切片間(I_l, I_m)の関係
 - 節点($\mathbf{x}_{l,i}, \mathbf{x}_{m,j}$)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





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

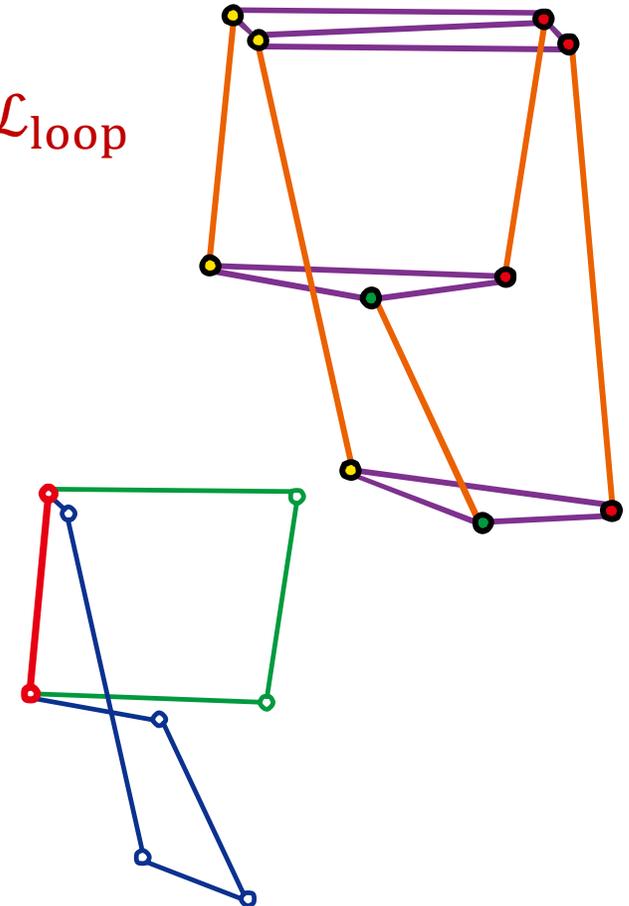
$$\mathcal{L}_{\text{regist}} = \sum \|\mathbf{x}_{m,j} - r \cdot \mathbf{x}_{l,i}\|_2^2$$

- 切片内の節点間の距離はあまり変わらない

$$\mathcal{L}_{\text{rigid}} = \sum \left(\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2}{\|r_j^i \cdot \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2} - 1 \right)^2$$

- グラフ上で辿る経路に依らず同じ変換になって欲しい

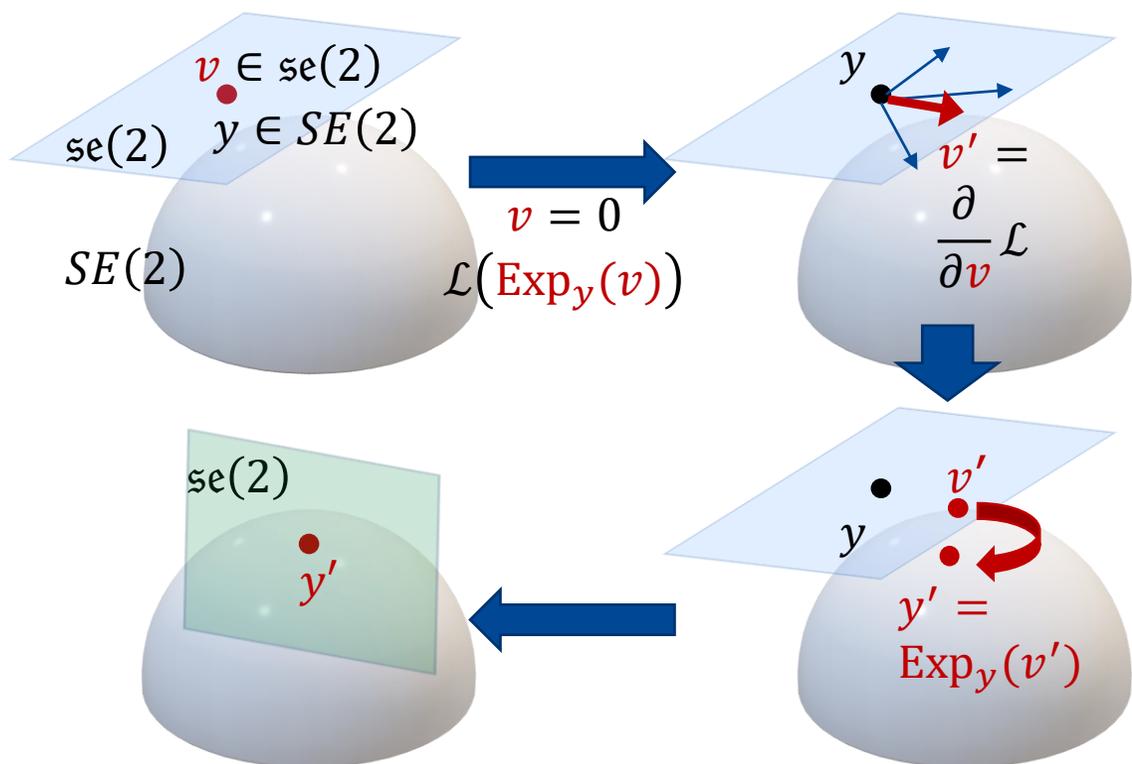
$$\mathcal{L}_{\text{loop}} = \sum \|\mathbf{r}_{m,j}^{l,i} \cdot \mathbf{x}_{l,i} - (r_{m,j}^{\dots} \dots r_{\dots}^{l,i}) \cdot \mathbf{x}_{l,i}\|_2^2$$





幾何変換を対象とした最適化

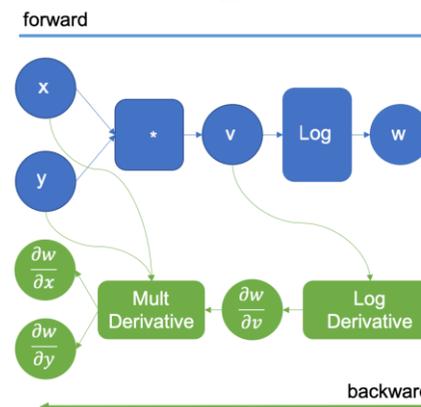
多様体上での最適化



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

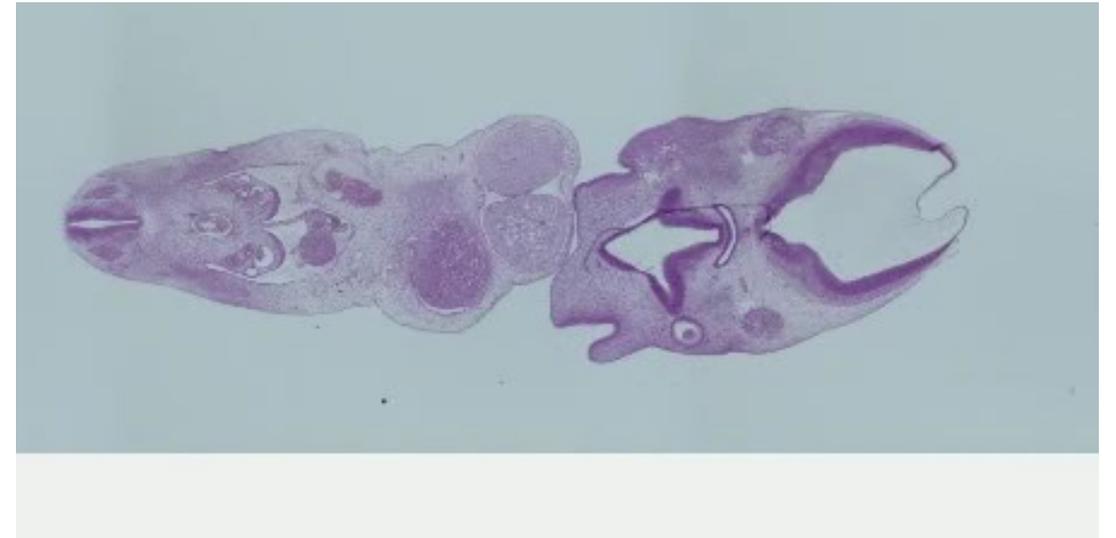
- 幾何変換の指数・対数写像, およびその微分は自前で実装
- 残りは**自動微分**の機構を利用

[PyTorch Autograd Engine](#)



実際の連続切片に対応するグラフ

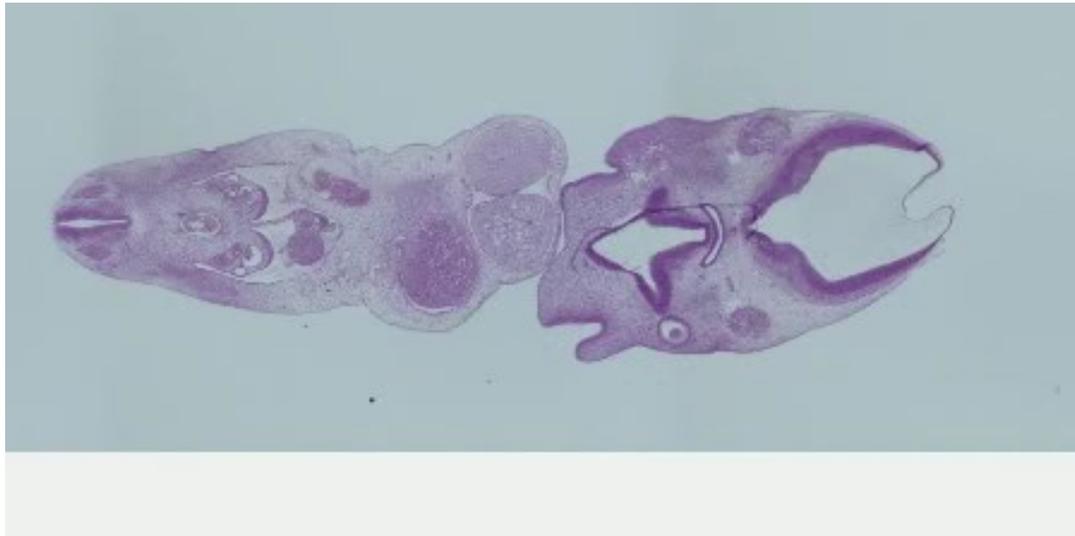
- 切片枚数: 190
- 近傍 5切片と位置合わせ
- 構築されたグラフ
 - 10,098 節点
 - 99,652 枝
 - 画像間枝: 89,554
 - 画像内枝: 10,098
 - 4,897,625 閉路



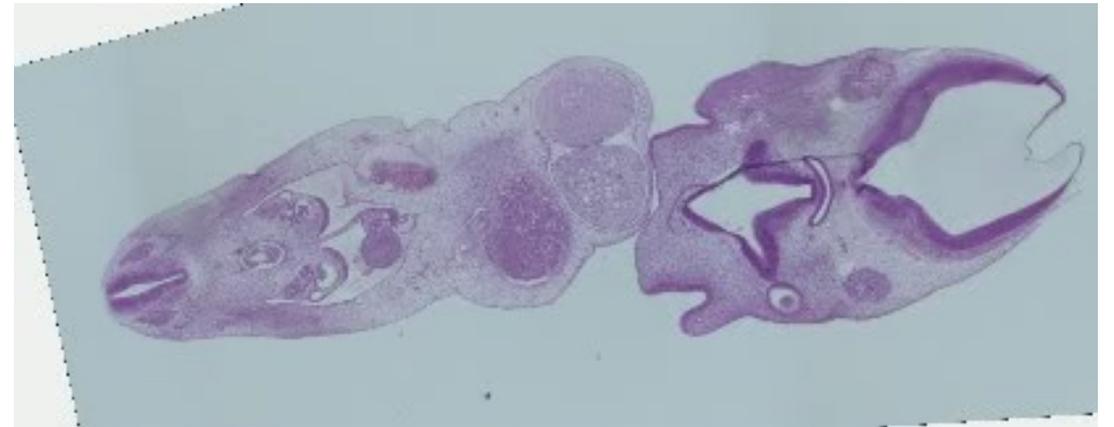


位置合わせ結果の定性評価

Input

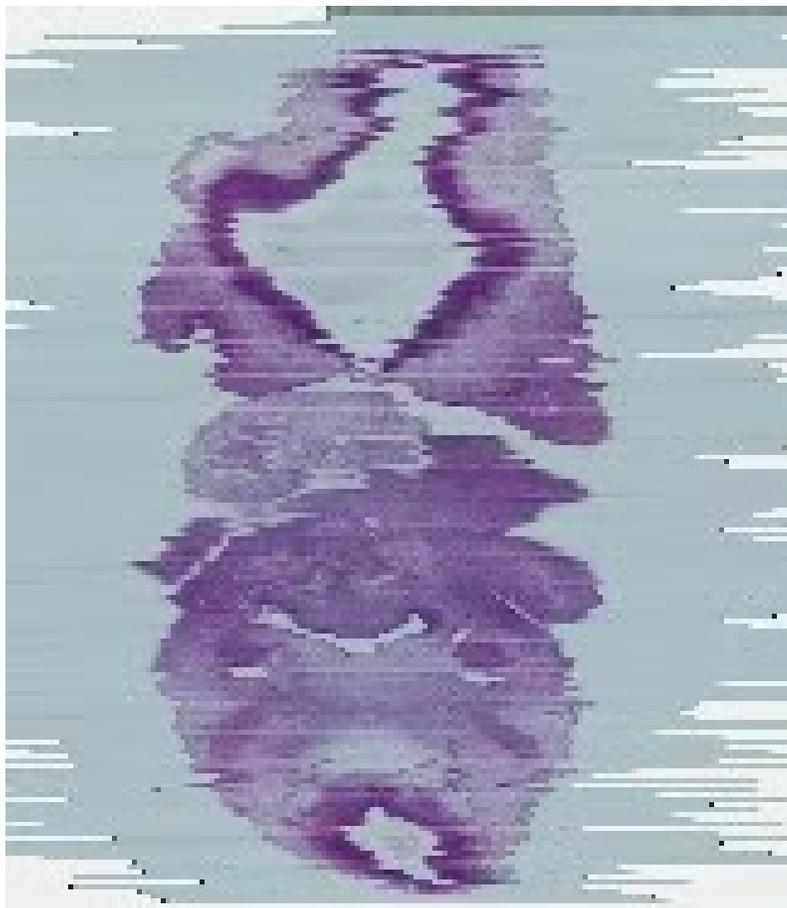


Output





定性評価：積層結果の横断面像



まとめ: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

目的: 連続組織切片からの3次元再構成

1標本から数百枚以上の切片・切片には物理的歪みが発生

課題: 逐次的位置合わせでは, **変形が蓄積**

提案: **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
- **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**, 整合性の取れる位置合わせを実現

