

大規模三次元復元モデルの信頼度を用いた動的点群位置合わせ

金田 綾乃^{*1} Jiazheng Chai^{*1} 加藤 卓哉^{*1}

Abstract — 近年, MAST3R のような事前学習済み大規模画像事前学習モデルは, RGB 画像対から高密度 3D 点群と信頼度マップを同時に推定できる点から注目されている. 一方, 古典的な Non-Rigid ICP (NR-ICP) は非剛体形状の位置合わせに広く用いられるが, 初期位置のずれと外れ値に敏感で, 局所最適解に陥りやすい. 本研究では, アニメーション付き 3D シーンを複数視点・複数時刻からレンダリングした時系列の合成データを用いて, MAST3R が出力する点群を NR-ICP の入力として採用し, さらに信頼度を損失重みに利用する有効性を検証する.

1 はじめに

3次元点群の位置合わせはロボティクスやコンピュータビジョンにおける基盤的課題の一つであり, 物体やシーンの形状復元, モーション解析等の応用事例において重要な役割を果たす. 特に剛体変換を仮定した位置合わせで最も広く用いられているのが Iterative Closest Point (ICP) [3] であり, 2つの点群間における最近傍対応と変換推定を交互に繰り返すことで, 点群間の剛体整合を逐次的に最適化する. しかし, ICP は対象が剛体形状を前提とするため, 点群間に伸縮や曲げなどの形状差が存在する時系列データや異なるポーズ間においては収束性と精度が著しく低下するため, 対象点群の非剛体変換を許容する Non-Rigid ICP (NR-ICP) が用いられる.

NR-ICP では各点が自由に変形可能な変換モデルを用いつつ, 全体が滑らかに変形するよう正則化項を課すことで位置合わせを行う.

Amberg ら [1] は, 隣接点間での局所剛性を保つ As-Rigid-As-Possible (ARAP) 正則化を用い, 局所な剛体変形と, 平行移動・回転・曲げを含む大域的な非剛体変形を同時に推定することで, 初期位置や欠損の影響を受けにくいロバストな形状対応を実現した. さらに, Bouaziz ら [4] は, 外れ点の誤差を自動的に小さく評価する誤差関数を導入し, 剛体位置合わせを外れ点に頑健化した.

しかし, 幾何学的類似性に基づいてのみ対応探索する従来手法では, 形状変形や視点差が大きい場合には対応付けの不確かさが増し, 誤対応が生じやすい.

このような対応精度の限界に対し, 近年は, 画像やセンサから得られる点群に対して対応の信頼度 (不確かさ) を付与し, 外れ点除去や損失関数の重みとして活用される [2, 8]. 信頼度に基づいた対応点選択に

よって, ロバスト性が向上する.

さらに近年, 深層学習を用いて画像から直接 3次元情報を推定する手法が注目されている. DUST3R は未知のカメラ姿勢や内部パラメータを持つ複数画像から, Transformer により各ピクセル対応の 3次元点 (PointMap) と信頼度を同一座標系で推定する画期的なモデルであり, 極端な視点変化に対しても高いロバスト性を示した [24]. しかし DUST3R 入力画像ペア間の幾何学的対応を明示的に扱わないため, その復元精度には限界があった. そこで後継の MAST3R [13] では, 従来の幾何学的ヘッドに加えて画像特徴マッチング用の新たなヘッドを導入し, 密な特徴量マッチング損失を組み込むことで対応精度を大幅に向上させている. MAST3R は 3 次元的な視点で画像間マッチングを行うため, LoFTR [22] や SuperGlue [17] といった 2 次元ベースの手法を上回る性能を示し, ゼロショットでの単眼距離推定など複数の 3 次元タスクにも適用可能な汎用性を備えている.

以上の背景を踏まえ, 本研究は MAST3R から得られる高品質な初期点群と, 各点の信頼度を NR-ICP の対応点誤差の重みとして組み込み, その有効性について検証する.

2 関連研究

本節では, 非剛体点群整合に関する代表的枠組みとロバスト化手法を概観し, 学習モデルが出力する信頼度の活用という観点から本研究の位置づけを述べる.

2.1 非剛体 3D レジストレーションと変形モデル

非剛体レジストレーションは, 形状が伸縮や局所変形を含む状況で対応付けと変形場推定を同時に扱う必要があり, 剛体 ICP より難しい課題である. 近年の体系的整理として, Deng らのサーベイが手法群 (変形表現, 最適化, ロバスト性, 学習ベース等) を包括的にまとめている [9].

^{*1}株式会社エクサウィザーズ

古典的枠組み NR-ICP 系では、最近傍対応に基づくデータ項と変形の滑らかさ・局所剛性を担保する正則化項を反復最適化する枠組みが広く用いられる。ARAP (As-Rigid-As-Possible) に基づく局所剛性の維持 [20] や、変形グラフ (embedded deformation) による空間変形表現 [21] は、代表的な設計であり、本研究もこの系譜に従う。Li ら [14] は、対応点と変形場に加えて対応の信頼度 (重み) も同時に推定し、部分重なり領域を扱う枠組みを提示している。

2.2 外れ値・部分重なりへのロバスト化と高速化

外れ値や部分重なりは、最近傍対応に基づく ICP/NR-ICP を局所解へ誘導しやすい。確率的定式化として、点集合の整合を GMM 当てはめとして扱い、コヒーレント (滑らか) な変位場を仮定する Coherent Point Drift (CPD) が知られる [15]。剛体 ICP の文脈でも、部分重なり・外れ値に対してはトリミングに基づく TrICP が提案されており [7]、局所構造の不確かさを確率モデルとして取り込む一般化 ICP (GICP) [18] も知られる。さらに ICP の推定結果の不確かさを共分散として評価する研究もあり [6, 5]、重み付けやロバスト化と親和性が高い。Bouaziz らは、外れ値の影響を抑えるロバストな目的関数設計により ICP を頑健化した [4]。さらに Jung らは、NR-ICP の線形解法を「厳密に解き切らない」単ステップ更新と前処理により加速する枠組みを提案している [12]。学習ベースの対応推定においても、対応集合の整合性や信頼度を用いて外れ値を除去する研究が進んでいる。FCGF は学習特徴に基づく対応付けを行い [8]、PointDSC は対応集合の整合性に基づく外れ値除去により頑健な整合を実現する [2]。

また、近年はロバスト誤差関数と最適化の設計により、外れ値・部分重なりを扱いつつ高速化を図る研究が進んでいる。Yao らは、滑らかなロバスト推定量と MM/準ニュートン型解法により高速な非剛体整合を実現した [25, 26]。

2.3 画像からの点群推定と信頼度 (不確かさ) の活用

近年、画像から密な点群 (PointMap) を推定し、同時に信頼度 (不確かさ) を出力する事前学習モデルが登場している。DUS3R は 2 枚画像から密な PointMap を推定し [24]、後継の MAST3R は 3D に基づく画像マッチングを強化することで対応精度を改善した [13]。本研究は MAST3R の信頼度を NR-ICP のデータ項に統合した場合の効果を検証する。さらに動的・非剛体シーンの再構成では、時刻間で幾何が一貫しない領域が対応付けを不安定にすることが古くから指摘されている。Newcombe ら [16] や Innmann ら [11] は、RGB-D 系列からの非剛体再構成・追跡を行い、時刻間対応

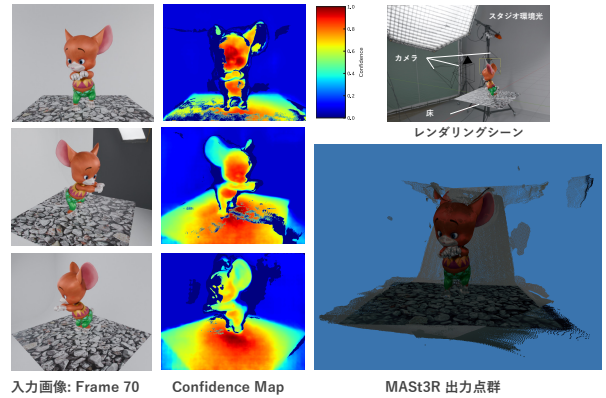


図1 MAST3R パイプラインの可視化例

左から入力マルチビュー画像 (Frame #70)、その入力画像に対応する MAST3R が推定した信頼度マップ、推定した点群に RGB テクスチャを転写した可視化結果。低信頼度は背景や光沢領域に集中しており、高信頼度点が主に被写体表面を構成していることが分かる。

の難しさとロバストな制約設計の重要性を示した。また Slavcheva ら [19] は対応探索に依存しない定式化を提案しており、Gao ら [10] も動的再構成を扱う。

また、VGGT[23] は、1 枚～多数枚 (数百枚規模) の画像から、カメラ内外部・深度・PointMap・3D 点トラックを単発推論するフィードフォワード型の統合モデルである。VGGT は深度や PointMap に対する不確かさ (不確実性) も推定できるため、点群整合における重み付けへの応用可能性もある。一方で、本研究は「MASt3R 点群+信頼度」を NR-ICP に統合した場合の効果検証に焦点を当てるため、次節で述べる理由により MAST3R を採用する。

3 提案手法

本研究では、MASt3R から得られる点群と信頼度マップを活用し、NR-ICP の精度と頑健性を向上させる手法を提案する。

3.1 点群と信頼度マップの出力内容

MASt3R の幾何学ヘッドから出力される点群 (PointMap) は、入力画像上の各ピクセルに対応する 3 次元点の集合である。画像 I_1 に対してはサイズが $H \times W$ の点群 $\mathbf{X}_1 = \{\mathbf{x}_{1(u,v)} \in \mathbb{R}^3 \mid u = 1, \dots, H, v = 1, \dots, W\}$ が得られ、同様に画像 I_2 から \mathbf{X}_2 が出力される。これらの 3 次元点は、モデル内部で選ばれた基準座標系 (通常は画像 I_1 のカメラ座標系) に表現されている。これにより $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ を統合した 3 次元点群を得る。同時に出力される信頼度マップ $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$ は各点 $\mathbf{x}_{1(u,v)}, \mathbf{x}_{2(u,v)}$ に対して推定された信頼度を表すスカラー値である。

信頼度 $C_{i(u,v)} \in [0, 1]$ は、モデルがその対応関係をどの程度確信しているかを示す。例えばテクスチャが

乏しい領域や外れ値の可能性が高い点では低く、特徴が明瞭で対応関係が確実な点では高く出力される傾向がある。

MASt3R の学習時においては、この信頼度に対し回帰損失が課されており、モデル自体が対応点の不確かさを自己教師ありで学習する。そのため、信頼度マップは対応点の品質評価として機能し、後段の最適化において不確実な点の影響を制御する指標となるといえる (図 1)。

3.2 NR-ICP の定式化

NR-ICP では一般に、ソース点群 $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i\}$ とターゲット点群 $\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_j\}$ 間の対応付けに基づいて以下のような損失関数 E を定義する。本研究では、損失関数として重み付き双方向 Chamfer 距離と ARAP (As-Rigid-As-Possible) 正則化の線形結合を用いる。

$$\mathcal{L} = w_{\text{Cham}} \mathcal{L}_{\text{Cham}} + w_{\text{ARAP}} \mathcal{L}_{\text{ARAP}}. \quad (1)$$

3.2.1 重み付き Chamfer 距離

ソース点群 $\mathcal{X} = \{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^N$ とターゲット点群 $\mathcal{Y} = \{\mathbf{y}_j\}_{j=1}^M$ に対し、各点の信頼度を $\hat{w}_i \in [0, 1]$ としたとき、

$$\mathcal{L}_{\text{Cham.}} = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{w}_i d^2(T(\mathbf{x}_i), \mathcal{Y})}{\sum_{i=1}^N \hat{w}_i} + \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d^2(\mathbf{y}_j, T(\mathcal{X})) \quad (2)$$

と定義する。ここで $d^2(\mathbf{p}, \mathcal{Q})$ は最近傍点までの平方ユークリッド距離であり、 $T(\cdot)$ は Embedded Deformation 変形場である。

3.2.2 ARAP 正則化

変形グラフの節点集合とエッジ集合に対し、局所的な剛体変形を維持するための正則化項 $\mathcal{L}_{\text{ARAP}}$ を導入する (詳細は [1] に準ずる)。

3.3 信頼度に基づく重み付け

本研究では、MASt3R が出力する信頼度を NR-ICP の重み \hat{w}_i として活用するために、以下の 3 つのバリエーションを提案・比較する。なお、比較対象として信頼度を用いない従来の NR-ICP ($\hat{w}_i = 1$) を **w/o conf** とする。

(i) 信頼度重みのみ (conf)

MASt3R の生信頼度を正規化した値をそのまま重みとして用いる。

$$\hat{w}_i = \frac{C(\mathbf{u}_i)}{\max_k C(\mathbf{u}_k) + \varepsilon}$$

(ii) Mask + 信頼度重み (mask+conf)

信頼度が低い点は背景やオクルージョン領域である可能性が高いため、閾値 τ 未満の点をマ

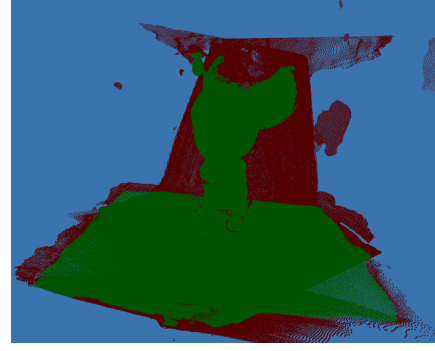


図 2 信頼度マスクの可視化例 ($\tau = 0.3$) 緑は $\text{conf} \geq 0.3$ の高信頼点, 赤は $\text{conf} < 0.3$ の低信頼点を示す。

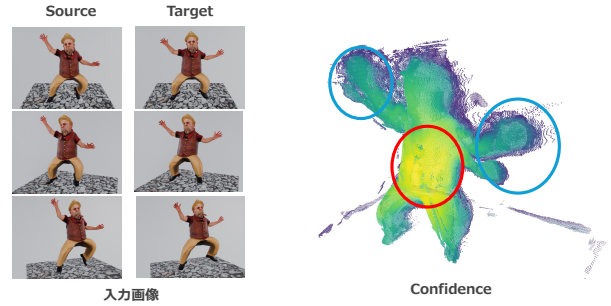


図 3 混合入力における信頼度 (mixed conf) の可視化. 左は入力に用いたソースとターゲットの混合入力画像群. 右図において、静的な胴体は高信頼 (明)、大きく動いた四肢は低信頼 (暗) となっており、動体領域の検出が可能であることを示している。

ク ($\hat{w}_i = 0$) し、残りの点に対して信頼度重みを適用する。図 2 に示すように、低信頼点は主に背景側に分布しており、マスクにより外れ点の寄与を抑制できる。

(iii) Mask + Mixed Conf (mask+mixed conf)

フレーム時刻の異なるターゲット画像群とソース画像群を同一入力として混合して MASt3R に与える手法である。フレーム間で幾何が一貫しにくい領域 (四肢、衣服の揺れ等) では対応が不安定になり、出力される信頼度が相対的に低下する傾向がある。図 3 に、混合入力 (Source+Target) を与えた際の信頼度分布を示す。胴体など時刻間で形状が一貫しやすい領域は高信頼となる一方、腕・脚など大きく変形・移動する領域では信頼度が低下していることが確認できる。この特性を利用し、混合入力から得られる信頼度 \hat{w}_i^{mix} の反転値

$$\hat{w}_i^{\text{inv}} = 1 - \hat{w}_i^{\text{mix}}$$

を動体 (大変形) スコアとして重みに用いる。これにより、静的な領域よりも動的な領域の整合

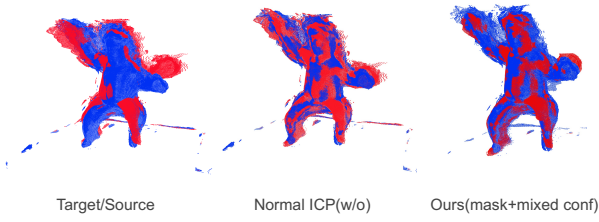


図4 合成データにおける位置合わせ結果の比較（青：ターゲット点群，赤：ソース点群）．左：位置合わせ前の重ね合わせ（Target/Source）．中：信頼度を用いない通常の ICP（w/o）による結果．右：提案手法（mask+mixed conf）による結果．提案手法では混合入力信頼度に基づく重み付けにより外れ点の影響が抑制され，ターゲット／ソースの重なりが改善している

を優先させることを意図する．

以降，式 (2) におけるソース側の重み \hat{w}_i は設定に応じて次のように与える：(i) w/o conf : $\hat{w}_i = 1$ ，(ii) mask+conf : $C_i < \tau$ の点を除外 ($\hat{w}_i = 0$) し，それ以外は信頼度に比例させる，(iii) mask+mixed conf : 混合入力の信頼度 C_i^{mix} に対して同様にマスクを適用し，残りの点では反転重み $1 - C_i^{\text{mix}}$ を用いる．

4 実験設定と結果

提案手法の有効性を検証するため，合成データと実データの両方を用いて評価を行った．

4.1 合成データによる検証

Blender を用いて作成した合成データを用いる．高解像度キャラクターモデルにボーンベース変形を付与し，固定された3視点下でレンダリング画像を生成した（図1）．

得られた各フレーム画像毎に MAST3R を適用し，点群と信頼度を得た．ターゲットは Frame 0 を用い，ソースには Frame 70 の MAST3R 出力点群を用いた．比較手法は，(i) w/o conf，(ii) mask+conf ($\tau = 0.3$)，(iii) mask+mixed conf ($\tau = 0.3$) の3つである．なお，conf は w/o conf と mask+conf の中間的挙動を示したため，本稿では代表的な3条件に絞って比較した．パラメータは $w_{\text{Cham}} = 300$ ， $w_{\text{ARAP}} = 30$ ，反復回数 300 で固定した．

図5に損失の推移を示す．mask+mixed conf（青）は，w/o conf（赤）よりも初期反復から安定した誤差減少を示し，従来の mask+conf（緑）と同等以上の収束性能を確認した．また，可視化結果（図4）においても，ターゲット／ソース間の不一致領域が減少し，特に大きく動いた部位の整合が改善する傾向が見られた．これは，mixed conf が動的な領域を適切に特定し，その領域の整合を重点的に行った結果である

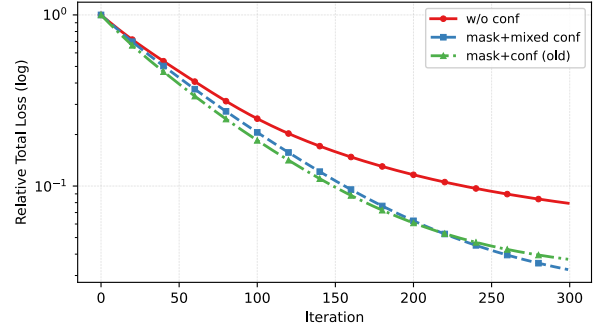


図5 合成データにおける相対総損失の推移．赤：w/o conf，緑：mask+conf，青：mask+mixed conf．Mixed conf を用いた提案手法が安定した収束を示している．

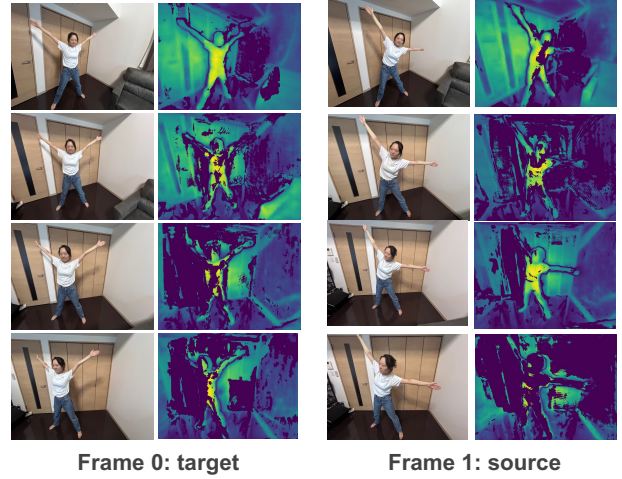


図6 実データ実験における入力画像．

と考えられる．

4.2 実データによる検証

実環境における適用性を検証するため，iPhone 14 を用いて時系列で姿勢を変えた人物を撮影した．図6に示すような姿勢について，異なる2つの時刻（フレーム）においてそれぞれ4枚ずつ違う角度から撮影した画像を用いた．ターゲットをフレーム0，ソースをフレーム1とした．図8に示すように実画像においても，提案手法（mask+mixed conf）は背景ノイズや外れ点の寄与を抑制し，被写体周辺での青赤の重なりが改善していることが確認できる．

5 結論と今後の課題

本研究では，MASt3R が画像ペアから推定する点群と信頼度マップを活用し，非剛体 ICP における対応点の重み付けと外れ値除去を行う手法を提案した．合成データセットを用いた実験により，信頼度に基づく重み付けとマスク処理が NR-ICP の収束速度と最終損失を改善することを示した．さらに，実データを

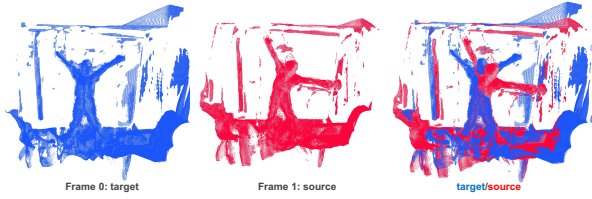


図7 実データ実験における MAST3R 推定点群の可視化. 左: Frame 0 をターゲット点群 (青), 中央: Frame 1 をソース点群 (赤) として用いる. 右: 位置合わせ前の target/source の重ね合わせ (青: target, 赤: source) を示す.

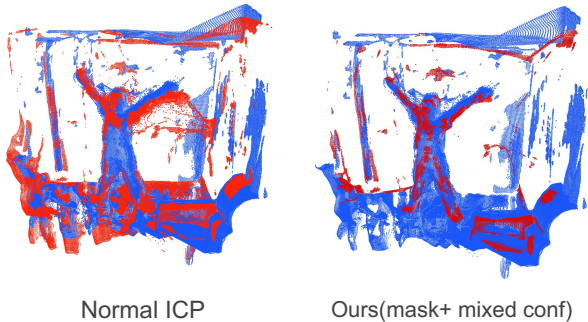


図8 実データにおける位置合わせ結果の比較 (青: ターゲット点群, 赤: ソース点群). 左: 信頼度を用いない通常の ICP (w/o conf). 中央: マスクと信頼度重みを用いた場合 (mask+conf). 右: 提案手法 (mask+mixed conf) による結果. 提案手法では背景ノイズや外れ点の寄与が抑制され, 被写体周辺での青赤の重なりが改善されている

用いた検証において, フレーム間の混合入力から得られる信頼度 (Mixed Conf) を動体スコアとして利用する手法を提案し, 非剛体領域の整合に有効である可能性を示した.

今後は, MAST3R 出力点群への適切な前処理, 実スキャンデータやノイズを含む現実的なデータセットでの適用性評価などを進め, 実用的な非剛体 3D 整合フレームワークとしての汎用性を高めることが望まれる. さらに, 本手法を単眼カメラによる動画入力へ拡張することも重要な課題である. 時系列フレーム間の整合性を活用することで, より簡便な撮影環境下での高精度な非剛体 3D 復元が期待される.

参考文献

- [1] Brian Amberg, Sami Romdhani, and Thomas Vetter. Optimal step nonrigid icp algorithms for surface registration. In *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1–8, 2007.
- [2] Xuyang Bai, Zixin Luo, Lei Zhou, Hongkai Chen, Lei Li, Zeyu Hu, Hongbo Fu, and Chiew-Lan Tai. Pointdsc: Robust point cloud registration using deep spatial consistency. *CoRR*, abs/2103.05465, 2021.
- [3] P.J. Besl and Neil D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256, 1992.
- [4] Sofien Bouaziz, Andrea Tagliasacchi, and Mark Pauly. Sparse iterative closest point. In *Proceedings of the Eleventh Eurographics/ACMSIGGRAPH Symposium on Geometry Processing, SGP '13*, page 113–123, Goslar, DEU, 2013. Eurographics Association.
- [5] Martin Brossard, Silvére Bonnabel, and Axel Barrau. A new approach to 3d ICP covariance estimation. *arXiv preprint*, 2019.
- [6] Andrea Censi. An accurate closed-form estimate of ICP's covariance. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2007.
- [7] D. Chetverikov, D. Svirkov, D. Stepanov, and P. Krsek. The trimmed iterative closest point algorithm. In *International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2002.
- [8] Christopher Choy, Jaesik Park, and Vladlen Koltun. Fully convolutional geometric features. In *ICCV*, 2019.
- [9] Bailin Deng, Yuxin Yao, Roberto M. Dyke, and Juyong Zhang. A survey of non-rigid 3d registration. *Computer Graphics Forum*, 41(2):559–589, 2022.
- [10] Wei Gao and Russ Tedrake. Surfelfarp: Efficient non-volumetric single view dynamic reconstruction. *arXiv preprint*, 2019.
- [11] Matthias Innmann, Michael Zollhöfer, Matthias Nießner, Christian Theobalt, and Marc Stamminger. Volumedeform: Real-time volumetric non-rigid reconstruction. In *ECCV*, 2016.
- [12] Yucheol Jung, Hyomin Kim, Hyejeong Yoon, and Seungyong Lee. Preconditioned single-step transforms for non-rigid icp. *Computer Graphics Forum*, 44(2), 2025.
- [13] Vincent Leroy, Yohann Cabon, and Jerome Revaud. Grounding image matching in 3d with mast3r, 2024.
- [14] Hao Li, Robert W. Sumner, and Mark Pauly. Global correspondence optimization for non-rigid registration of depth scans. *Computer Graphics Forum*, 27(5):1421–1430, 2008.
- [15] Andriy Myronenko and Xubo Song. Point set registration: Coherent point drift. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(12):2262–2275, 2010.
- [16] Richard A. Newcombe, Dieter Fox, and Steven M. Seitz. Dynamicfusion: Reconstruction and tracking of non-rigid scenes in real-time. In *CVPR*, 2015.
- [17] Paul-Edouard Sarlin, Daniel DeTone, Tomasz Malisiewicz, and Andrew Rabinovich. SuperGlue: Learning feature matching with graph neural networks. In *CVPR*, 2020.
- [18] A. Segal, D. Hähnel, and S. Thrun. Generalized-icp. In *Robotics: Science and Systems (RSS)*, 2009.
- [19] Mira Slavcheva, Maximilian Baust, Daniel Cremers, and Slobodan Ilic. Killingfusion: Non-rigid 3d reconstruction without correspondences. In *CVPR*, 2017.
- [20] Olga Sorkine and Marc Alexa. As-rigid-as-possible

- surface modeling. In *Symposium on Geometry Processing*, pages 109–116, 2007.
- [21] Robert W. Sumner, Johannes Schmid, and Mark Pauly. Embedded deformation for shape manipulation. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3):80:1–80:7, 2007.
- [22] Jiaming Sun, Zehong Shen, Yuang Wang, Hujun Bao, and Xiaowei Zhou. LoFTR: Detector-free local feature matching with transformers. *CVPR*, 2021.
- [23] Jianyuan Wang, Minghao Chen, Nikita Karaev, Andrea Vedaldi, Christian Rupprecht, and David Novotny. Vggt: Visual geometry grounded transformer. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2025.
- [24] Shuzhe Wang, Vincent Leroy, Yohann Cabon, Boris Chidlovskii, and Jerome Revaud. Dust3r: Geometric 3d vision made easy. In *CVPR*, 2024.
- [25] Yuxin Yao, Bailin Deng, Weiwei Xu, and Juyong Zhang. Quasi-newton solver for robust non-rigid registration. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020.
- [26] Yuxin Yao, Bailin Deng, Weiwei Xu, and Juyong Zhang. Fast and robust non-rigid registration using accelerated majorization-minimization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(2):1558–1574, 2023.