

追跡型QEMアルゴリズム：メッシュ登録に基づく動的メッシュ簡略化への時間整合性の追加

劉 雲龍 (学生会員) †, 徐 建鋒 (正会員) ††,
河村 圭 (正会員) ††, 渡辺 裕 (正会員) †

概要 3Dマルチメディア技術の進化により、より効果的な3Dビデオストレージと伝送方法の必要性が高まっている。メッシュデシメーション段階における現在の標準化3Dボリュームビデオコーディング手法のほとんどは、まだ限定的である：各簡略化されたフレームにおける幾何学的構造の違いが、最適な圧縮を妨げている。提案するTracked QEM Algorithmは、連続するフレームに渡るメッシュモデルを効果的に追跡し、3Dボリューム映像における動的メッシュのための調整されたソリューションを提供する。

追跡QEMアルゴリズムは、簡略化された結果が、オリジナルのQEMアルゴリズムよりも、連続するフレーム間のトポロジー的一貫性と空間的平滑性が優れていることを保証する。時間的整合性に基づく評価結果から、提案手法が従来のメッシュ簡略化手法よりも優れていることがわかる。類似のトポロジーを持つより滑らかな単純化された結果は、フレーム間の不連続な構造情報を明確にする。3Dビデオ圧縮の新しい前処理アプローチとして、この提案は圧縮率を向上させる可能性がある。

キーワード：マルチメディア技術, ボリュームトリックビデオ, コンピュータグラフィクス, メッシュ簡略化, メッシュ登録, QEMアルゴリズム

1. Introduction

ここ数年、AR/VR(Augmented and Virtual Reality)技術¹⁾が急速に発展している²⁾。これらの先進的なマルチメディア技術の中心である3Dボリュームビデオ³⁾は、3Dオブジェクトやシーンを正確に再現する上で極めて重要であり、大きな注目を集めている⁴⁾。3Dボリューム映像符号化⁵⁾の標準化における現在進行中の動作により、この特定の3D映像フォーマットのストレージと伝送効率を向上させることが決定的に必要である。

2次元映像圧縮⁶⁾と同様に、3次元ボリュームトリック映像符号化は多段階パイプライン⁷⁾に従う。符号化の進捗は、一連の生フレームを入力とし、それらを連続ビットストリームに変換して効率的な記憶と伝送を行うことから始まる⁸⁾。この図に示す赤い部分のように、このパイプラインの本質的な構成要素はメッシュデシメーションであり、入力メッシュの面の数を減らしてデータ量を減少させる。

3D映像の動的メッシュが一連の静的メッシュフレームで構成されていることを考えると、現在の符号化基準⁹⁾は静的メッシュの簡略化手法に依存している。

二次誤差メトリック(QEM)アルゴリズム¹⁰⁾で表現され、これらの方法は個々の静的メッシュフレーム¹¹⁾を効率的に単純化することができる。図2に示すように、簡略化アルゴリズムは、各フレームのメッシュを入力として使用し、対応する簡略化結果を生成する。しかし、フレーム間の連続性があまり考慮されていないため、単純化処理で隣接フレーム間の差が増幅される可能性がある。簡略化されたフレームは、外観やトポロジーが異なる場合があり、これはメッシュデシメーションステップの不整合と呼ぶことができる。

不連続な構造情報はビットストリームフェーズ¹²⁾でより高い符号化コストにつながるため、前処理段階でフレームシーケンスの整合性をできるだけ確保することが、3Dビデオ符号化において不可欠な課題となる。この問題を解決するために、新しいメッシュデシメーション法を提案する。この方法は、参照フレームを導入することで、時間的整合性を追加することを目的としている。

図3に示すように、ダイナミックメッシュが静的メッシュフレームで構成されていることを考慮し、

Received April 4, 2024; Revised May 25, 2024; Accepted May 28, 2024

† Graduate School of Fundamental Science and Engineering,
Waseda University

(3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan)

†† KDDI Research, Inc.

(2-1-15 Ohara, Fujimino-shi, Saitama, 356-8502, Japan)

Tracked QEM Algorithm: Adding Temporal Consistency to Dynamic Mesh Simplification Based on Mesh Registration

Yunlong Liu (student member)[†], Jianfeng Xu (member)^{††}, Kei Kawamura (member)^{††},
Hiroshi Watanabe (fellow)[†]

Abstract The evolution of 3D multi-media technology has spurred the need for more effective 3D video storage and transmission methods. Most of the current standardizing 3D volumetric video coding methods in the mesh decimation stage are still limited: the difference of geometric structure in each simplified frame hinders optimal compression. The proposed Tracked QEM Algorithm effectively tracks mesh models across successive frames, offering a tailored solution for dynamic meshes in 3D volumetric videos.

The Tracked QEM Algorithm ensures that the simplified results have better topological consistency and spatial smoothness between consecutive frames than the original QEM algorithm. The evaluation results based on temporal consistency show that the proposed approach is superior to the conventional mesh simplification. The smoother simplified results with similar topology delineate the discontinuous structural information between frames. As a novel pre-processing approach to 3D video compression, this proposal has the potential to improve the compression rate.

Key words: Multi-media Technology, Volumetric Video, Computer Graphic, Mesh Simplification, Mesh Registration, QEM Algorithm

1. Introduction

Over the past few years, Augmented and Virtual Reality (AR/VR) technologies¹⁾ developed rapidly²⁾. Central to these advanced multi-media technologies, 3D volumetric video³⁾ is pivotal in accurately recreating 3D objects and scenes, gaining significant attention⁴⁾. With the ongoing actions in standardizing 3D volumetric video coding⁵⁾, there is a critical need to enhance storage and transmission efficiency for this particular 3D video format.

Similar to 2D video compression⁶⁾, 3D volumetric video encoding follows a multi-step pipeline⁷⁾, a concise summary can be depicted in Fig.1. The encoding progress begins by taking a series of raw frames as input, transforming them into a continuous bitstream for efficient storage and transmission⁸⁾. As the red part shown in this figure, an essential component of this pipeline is mesh decimation, which reduces the num-

ber of faces in the input mesh to diminish the amount of data. Given that dynamic meshes in 3D videos consist of a series of static mesh frames, current encoding standards⁹⁾ rely on static mesh simplification methods.

Represented by the Quadratic Error Metric (QEM) algorithm¹⁰⁾, these methods can efficiently simplify the individual static mesh frame¹¹⁾. As shown in Fig.2, the simplification algorithm uses the mesh of each frame as an input to generate corresponding simplified results. However, due to less consideration of the inter-frame continuity, the difference between adjacent frames may be amplified in the simplification process. The simplified frames may differ in appearance and topology, which can be called inconsistency of the mesh decimation step.

Since the discontinuous structural information will lead to higher encoding expenses in bitstream phase¹²⁾, ensuring the consistency of frame sequences as much as possible in pre-processing stages becomes an essential issue in 3D video coding. A novel mesh decimation method is proposed to solve this problem. This method aims to add temporal consistency via the introduction of a reference frame.

As shown in Fig.3, considering the dynamic mesh consists of static mesh frames, the proposed Tracked

Received April 4, 2024; Revised May 25, 2024; Accepted May 28, 2024

[†] Graduate School of Fundamental Science and Engineering,
Waseda University
(3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan)

^{††} KDDI Research, Inc.
(2-1-15 Ohara, Fujimino-shi, Saitama, 356-8502, Japan)

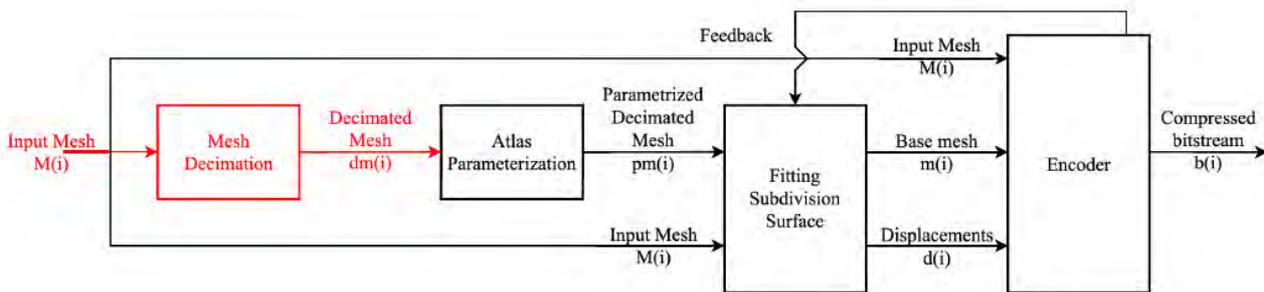


図1 3Dボリューム映像のための典型的なエンコーダパイプライン

提案するTracked QEMアルゴリズムは、動的メッシュ単純化において時間的整合性を飛躍的に高めるために、前のフレームから登録された¹³⁾メッシュモデルを追跡する。

- 3Dボリューム映像のダイナミックメッシュに適した追跡型QEMアルゴリズムを提案する。

- フレーム間の折りたたみコスト関数と最適戦略を再設計し、QEMアルゴリズムが参照入力を扱えるようにする。

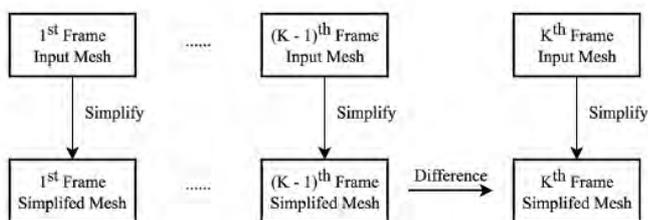


Fig. 2 個々のフレームに対する3Dビデオ符号化における現在のメッシュデシメーション

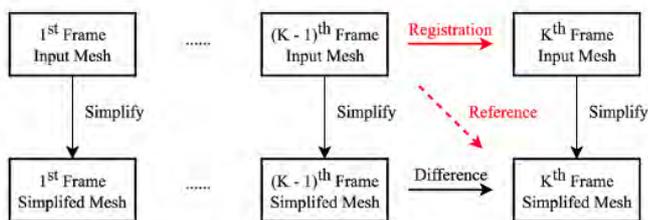


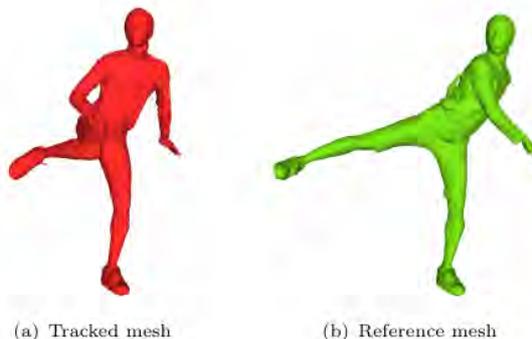
Fig. 3 Proposed dynamic mesh simplification with inter-frame tracking

また、提案するTracked QEM Algorithmと従来のオリジナルQEM Algorithmの動的メッシュデシメーションタスクの有効性を比較する実験も行っている。この結果から、本提案は従来のアプローチの時間的整合性を大幅に改善することが明らかになった。3Dビデオコーディングの前処理として、より滑らかでコヒーレントな3Dフレームシーケンスを準備することで、入力メッシュの一貫したトポロジーを維持することができる。このメリットは、Tracked QEM Algorithm が将来的に関連する 3D ボリュームビデオ圧縮の研究を前進させる可能性を示している。本論文で提案する手法の主な貢献は以下の通りである：

- メッシュ簡略化タスクにおいて、時間的整合性を考慮する可能性を探るため、3Dメッシュレジストレーションを革新的に導入。

2. Related work

2.1 メッシュ登録



(a) Tracked mesh

(b) Reference mesh



(c) 剛体レジストレーション

(d) 非剛体レジストレーション

図4 剛体レジストレーションと非剛体レジストレーション

本論文の主な研究は、メッシュ登録の原理を革新的に統合した新しいメッシュ簡略化手法の提案である。メッシュレジストレーションは、コンピュータビジョンとコンピュータグラフィックスにおける特定の3Dレジストレーションであり、典型的な座標系¹³⁾への明確な3Dモデルの追跡と位置合わせに焦点を当てた有益なタスクである。

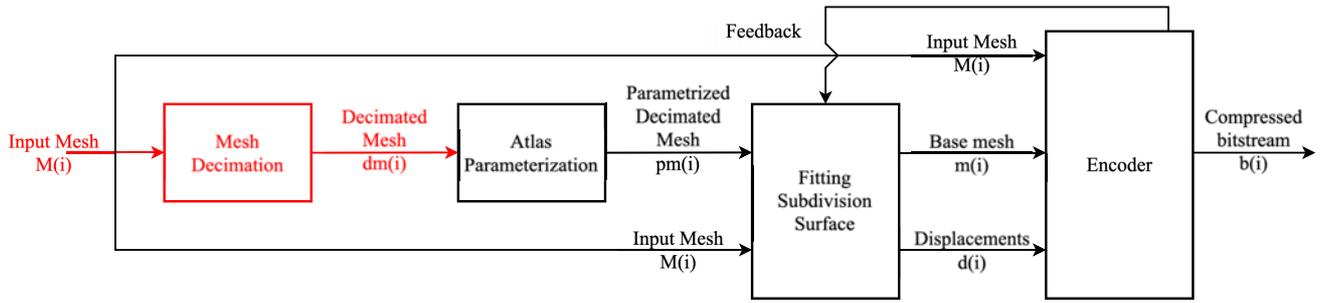


Fig. 1 A typical encoder pipeline for 3D Volumetric video

QEM algorithm tracks registered¹³⁾ mesh model from the previous frame to drastically boost the temporal consistency in dynamic mesh simplification.

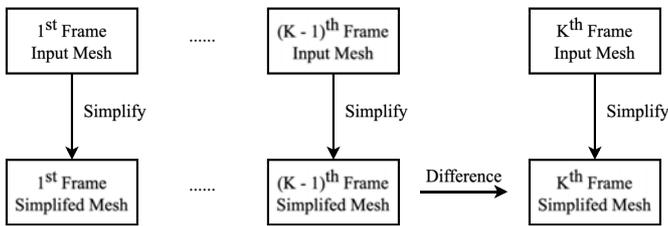


Fig. 2 Current mesh decimation in 3D video coding on individual frames

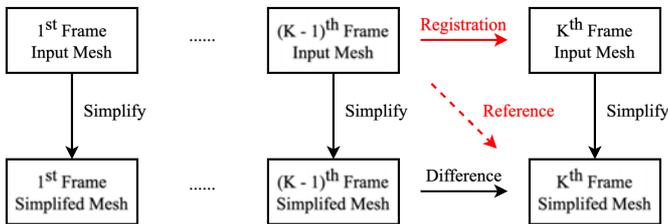


Fig. 3 Proposed dynamic mesh simplification with inter-frame tracking

Experiments are also carried out to compare the effectiveness in dynamic mesh decimation task between the proposed Tracked QEM Algorithm and previous Original QEM Algorithm. The result reveals that the proposal significantly improves the temporal consistency of the traditional approach. As a pre-processing step of 3D video coding, preparing a smoother, more coherent 3D frame sequence helps maintain the consistent topology of input meshes. This merit shows the potential of the Tracked QEM Algorithm to advance the related 3D volumetric video compression research in the future.

The main contributions of the proposed method in this paper are as follows:

- Innovatively introduces 3D mesh registration to explore the possibility of considering temporal consistency in mesh simplification tasks.

- Proposes a Tracked QEM Algorithm suitable for dynamic mesh in 3D volumetric video.

- Redesigns inter-framed collapsed cost function and optimal strategy, enabling QEM Algorithm to handle reference input.

2. Related work

2.1 Mesh Registration



(a) Tracked mesh

(b) Reference mesh



(c) Rigid registration

(d) Non-Rigid registration

Fig. 4 Rigid & Non-Rigid Registration

The main work in this paper is a proposal of a novel mesh simplification method that innovatively integrates the principles of mesh registration. Mesh registration is a specific 3D registration in computer vision and computer graphics, which is a beneficial task that focuses on tracking and aligning distinct 3D models into a typical coordinate system¹³⁾. The registration has evolved

登録は、ばらつきや歪みを考慮した剛体アプローチから非剛体アプローチへと進化してきた¹⁴⁾。図4に示すように、メッシュレジストレーションは剛体レジストレーションと非剛体レジストレーションに分けられる。

剛体登録: Rigid Registrationは、ユークリッド変換¹⁵⁾を適用することで、2つの3D画像を整列させるが、多くの関連研究も様々な3D画像フォーマットで進歩している¹⁶⁾。剛体メッシュ登録は点群からの点集合マッチング¹⁷⁻¹⁹⁾のアプローチから発展したもので、代表的な手法²¹⁻²⁴⁾と多くのバリエーション²⁵⁾は反復最接近点(ICP)²⁶⁾である。式(1)に示すように、ICPは対応する各点ペア p_i^c と p_i^r に対して、2つの点集合 $P^c = \{p_i^c : N_c\}$ と $P^r = \{p_i^r : N_r\}$ の間の距離関数を構成する。 N_r を3次元センサからの固有ノイズ Ω_{ij} で構成し、最小二乗法によりアフィン変換行列 T の最小値を反復して最適な変換行列 T^* ²⁷⁾を得る:

$$T^* = \arg \min_T \sum_c (p_i^c - T \oplus p_i^r)^T \Omega_{ij} (p_i^c - T \oplus p_i^r) \quad (1)$$

非剛体登録: 非剛体登録の文脈では、剛体運動の単純さを凌駕する変換の多面的な性質を考慮することが不可欠である²⁸⁾。修正ICPアルゴリズム³⁰⁻³²⁾から着想を得た埋め込み変形²⁹⁾が代表的なアプローチ³³⁾である。式(2)で述べたように、剛体レジストレーションと同様に、初期の方法は、アフィン R_j を持つ複数の変換 X_j から変換点集合 $G = g_j \quad g_{1:N}$ を持つ変形場 X を生成し、 t_j 行列を変位させることを目的としていた。各ターゲット点 \hat{v}_i と変換元 v_i の関係は、 w_j で重み付けされた複数の近傍変換 X_j で記述できる。

$$\hat{v}_i = \sum_{j=1}^m w_j (v_i) [R_j (v_i - g_j) + g_j + t_j], \quad (2)$$

$$X_j = (R_j, t_j), \quad X_j \in X$$

一般性と使いやすさを考慮すると、ロバストな反復最適化ベースの手法³⁴⁻³⁷⁾は、上流や下流のタスクとの組み合わせに適している。提案手法に統合されたアプローチはFast-RNRR³⁸⁾であり、式(3)の3つのサブ項目を通してコスト関数 $E(X)$ から最適な目標 X^* を構築した。(3):整列項目 $E_{align}(X)$ は整列 \hat{v}_i と入力 $u_{\rho(i)}$ 間の偏差にペナルティを与える、

正則化項目 $E_{reg}(X)$ は重み α による変形 D_{ij} のオーバーフィッティングを避ける、回転項目 $E_{rot}(X)$ は偏差 A_i を射影変換 $\text{proj}_R(A_i)$ に近づける、重み β 。

$$X^* = \min_X E_{align}(X) + \alpha E_{reg}(X) + \beta E_{rot}(X),$$

$$E_{align}(X) = \sum_{i=1}^n \psi_{\nu_\alpha} (\|\hat{v}_i - u_{\rho(i)}\|),$$

$$E_{reg}(X) = \sum_{i=1}^r \sum_{p_j \in \mathcal{N}(p_i)} \psi_{\nu_\alpha} (\|D_{ij}\|), \quad (3)$$

$$E_{rot}(X) = \sum_{i=1}^r \|A_i - \text{proj}_R(A_i)\|_F^2,$$

$$\psi_\nu(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2\nu^2}\right)$$

この方式では、最適化の滑らかさを確保するために、ウェルシュ関数 $\psi_\nu(-)$ ³⁹⁾を導入している。FastRNRRはMMとL-BFGSを組み合わせた準ニュートンソルバーを用いて最適化効率を向上させ、事前データや学習なしで収束速度が速い。

2.2 メッシュの簡略化

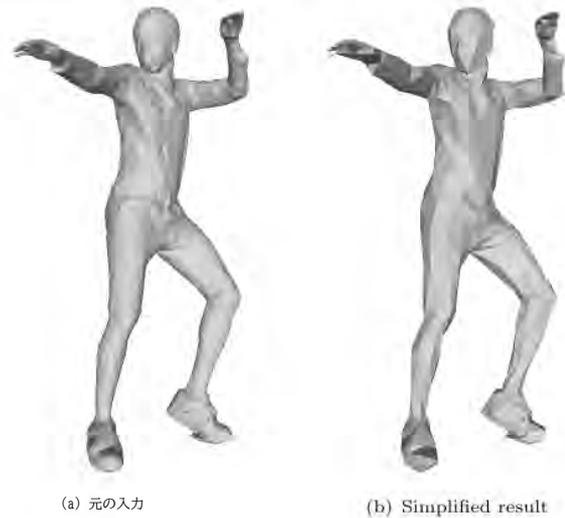


Fig. 5 典型的なメッシュ簡略化の入力と出力の可視化ケース

関連研究のもう1つの部分は、基本知識としてのメッシュ簡略化技術を中心に構成されており、提案で使用されるQEMアルゴリズムの文脈化に役立つ。メッシュの簡略化は、3Dコンピュータグラフィックス処理における重要な研究方向である。図5に示すように、メッシュモデル⁴⁰⁾の頂点、辺、面の数を減らす手順である。

from rigid to non-rigid approaches that account for variations and distortions¹⁴). As shown in Fig.4, mesh registration can be divided into rigid and non-rigid registration.

Rigid Registration: Rigid Registration aligns two 3D image by applying an Euclidean transformations¹⁵, many related research has also made progress in various 3D image formats¹⁶). The rigid mesh registration evolved from approaches for point set matching¹⁷⁻¹⁹ from point cloud²⁰), the representative methods²¹⁻²⁴ with many variants²⁵) is Iterative Closest Point (ICP)²⁶). As shown in Eq.(1), for each corresponding point pair p_i^c and p_j^r , ICP constructs the distance function between two point sets $\mathcal{P}^c = \{p_{1:N^c}^c\}$ and $\mathcal{P}^r = \{p_{1:N^r}^r\}$ with the inherent noise Ω_{ij} from 3D sensor, then iterates the minimum value of affine transformation matrix T via least square method to get the most suitable transformation matrix \mathbf{T}^* ²⁷):

$$\mathbf{T}^* = \arg \min_{\mathbf{T}} \sum_c (p_i^c - \mathbf{T} \oplus p_j^r)^T \Omega_{ij} (p_i^c - \mathbf{T} \oplus p_j^r) \quad (1)$$

Non-Rigid Registration: In the context of non-rigid registration, it is imperative to account for the multifaceted nature of transformations that surpass the simplicity of rigid body movements²⁸). Embedded deformation²⁹) inspired from modified ICP algorithm³⁰⁻³²) is a representative approach³³). As stated in Eq.(2), Like rigid registration, the early methods, aimed to generate the deformation field \mathbf{X} with a transformation point set $\mathbf{G} = \{\mathbf{g}_j | \mathbf{g}_{1:N^x}\}$ from several transformation \mathbf{X}_j with affine \mathbf{R}_j and displace \mathbf{t}_j matrices. The relationship between each target point $\hat{\mathbf{v}}_i$ and transformed source \mathbf{v}_i can be described by several neighbour transform \mathbf{X}_j weighted by w_j .

$$\hat{\mathbf{v}}_i = \sum_{j=1}^m w_j (\mathbf{v}_i) [\mathbf{R}_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{g}_j) + \mathbf{g}_j + \mathbf{t}_j], \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_j = (\mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j), \mathbf{X}_j \in \mathbf{X}$$

Considering generality and usability, the robust iterative optimization-based methods³⁴⁻³⁷) are more suitable for combining with upstream or downstream tasks. The approach integrated into proposed method is the Fast-RNRR³⁸), which constructed the optimal target \mathbf{X}^* from cost function $E(\mathbf{X})$ through three sub-items in Eq.(3): alignment item $E_{\text{align}}(\mathbf{X})$ to penalizes the deviation between aligned $\hat{\mathbf{v}}_i$ and input $\mathbf{u}_{\rho(i)}$, regularization

item $E_{\text{reg}}(\mathbf{X})$ to avoid the over-fitting of deformation \mathbf{D}_{ij} with weight α , and rotation item $E_{\text{rot}}(\mathbf{X})$ to make the deviation \mathbf{A}_i close to a projection transformation $\text{proj}_{\mathcal{R}}(\mathbf{A}_i)$ weighted by β .

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^* &= \min_{\mathbf{X}} E_{\text{align}}(\mathbf{X}) + \alpha E_{\text{reg}}(\mathbf{X}) + \beta E_{\text{rot}}(\mathbf{X}), \\ E_{\text{align}}(\mathbf{X}) &= \sum_{i=1}^n \psi_{\nu_a} (\|\hat{\mathbf{v}}_i - \mathbf{u}_{\rho(i)}\|), \\ E_{\text{reg}}(\mathbf{X}) &= \sum_{i=1}^r \sum_{\mathbf{p}_j \in \mathcal{N}(\mathbf{p}_i)} \psi_{\nu_r} (\|\mathbf{D}_{ij}\|), \\ E_{\text{rot}}(\mathbf{X}) &= \sum_{i=1}^r \|\mathbf{A}_i - \text{proj}_{\mathcal{R}}(\mathbf{A}_i)\|_F^2, \\ \psi_{\nu}(x) &= 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2\nu^2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

This scheme introduces the Welsch function $\psi_{\nu}(\cdot)$ ³⁹) to ensure the smoothness of the optimization. Fast-RNRR uses the Quasi-Newton solver combining MM and L-BFGS to improve optimization efficiency, which has rapid convergence speed without prior data or training.

2.2 Mesh Simplification



(a) Original input (b) Simplified result
Fig. 5 A visualized case for input and output of typical mesh simplification

The other part of the related work is structured around mesh simplification techniques as the basic knowledge, which helps to contextualize the QEM algorithm used in the proposal. Mesh Simplification is a crucial research direction in 3D computer graphics processing. As shown in Fig.5, it is a procedure to reduce the number of vertices, edges, and faces

一方、元のモデルの外観とトポロジー構造は、何度も試みても保持します⁴¹⁾。これらの研究⁴²⁾は1990年代に登場し、3Dモデル⁴⁷⁾の異なる詳細度(LOD)を自動的に生成することを目的としている。

初期の手法では、幾何学的誤差⁴⁸⁻⁵¹⁾に着目し、簡略化後も元の外観を保持するようにした。プログレッシブメッシュ⁵³⁾のような反復削減法⁵²⁾は広く研究されており、モデルの漸進的な洗練や簡略化が可能である⁵⁴⁻⁵⁶⁾。近年、並列計算⁵⁷⁻⁵⁹⁾や機械学習⁶⁰⁻⁶²⁾などの高度な計算技術を活用することで、より効率的で正確な簡略化結果を得る傾向にある。上記の多くのアプローチの中で、QEMアルゴリズムはメッシュの簡略化のためによく使われる手法であり、本稿の提案にインスピレーションを与えた。マイケル・ガーランドとポール・S・ヘクバートは1997年にこの種を導入し¹⁰⁾、その後数年で多くの可変種を導き出した⁴⁸⁻⁵⁰⁾⁶³⁾。

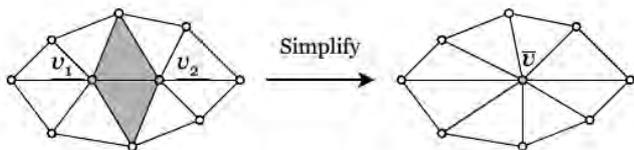


図6 QEMアルゴリズムにおける典型的なエッジ崩壊ステップ

図6に示すように、高品質なモデル簡略化処理により、QEMアルゴリズムは2次誤差を最小化し、頂点ペアを効率的に選択・マージする。このマージ手順はエッジ崩壊とも呼ばれる。QEMアルゴリズムはユークリッド距離を用いて崩壊コストを測定する。具体的には、ターゲット位置 v からマージされる頂点ペア (v_1, v_2) までの全ての隣接平面 $p \in \text{plane}(v_i)$ の二乗距離の和を求める：

$$\bar{v} = \arg \min_v \sum_{p \in \text{plane}(v_1) \cup \text{plane}(v_2)} \text{distance}(v, p)^2 \quad (4)$$

任意の頂点ペア $(v_1, v_2) \rightarrow v$ の合体 (v_1, v_2) に対して、対象場所 $v = [v_x, v_y, v_z, 1]$ における二次誤差 $\Delta(v) = v^T Q v$ は、対称 4×4 行列 Q による幾何学的近似として定義できる：

$$\begin{aligned} \Delta(\bar{v}) &= \Delta([v_x, v_y, v_z, 1]^T) = \sum_{p \in \text{planes}(\bar{v})} (p^T \bar{v})^2 \\ &= \sum_{p \in \text{planes}(\bar{v})} \bar{v}^T (pp^T) \bar{v} \\ &= \bar{v}^T \left(\sum_{p \in \text{planes}(\bar{v})} K_p \right) \bar{v} \\ &= \bar{v}^T Q \bar{v} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)によれば、この誤差 $\Delta(v)$ は2次関数であるため、最適位置 v を求めることは線形問題に変換される：2次行列 Q を正定値行列とすると、位置 v の極値 v は、 $\partial x = \partial y = \partial z = 0$ のとき、偏微分によって求めることができる：

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 提案手法

3Dボリュームビデオの特徴は、本論文のアプローチに影響を与えた：隣接するフレーム間のこのような動きを条件としてアルゴリズムが考えることができる場合、このメッシュ簡略化アルゴリズムは、従来の既存の方法よりも動的メッシュに有利である。図7に示すように、この動的な動きを追跡するために、メッシュレジストレーションにより前のフレームを参照として導入できるTracked QEM Algorithmを提案する。

現在のポリュメトリックビデオ符号化規格⁵⁾で使用されているオリジナルのQEMアルゴリズムと比較して、提案する追跡QEMアルゴリズムは主に3つの場所から改善されている：単純化のための参照を生成するためのメッシュ登録の導入、エッジ崩壊コスト関数のためのフレーム間トラッキングの追加、2次誤差行列が不可逆的な場合の最適探索戦略の改善。

これらの修正により、簡略化されたメッシュの構造が前のフレームと時間的に整合性を保ち、隣接するフレーム間の運動や変形に起因する幾何学的構造との違いが大きすぎることを避けることができる。本章の次の部分は、この提案アプローチにおけるこれら3つの主要なイノベーションポイントを包括的に説明する。

3.1 前フレーム参照

As discussed in Section 1, the dynamic mesh in 3D volumetric videos is similar to a frame sequence in 2D

in a mesh model⁴⁰). Meanwhile, retain the original model's appearance and topological structure with numerous attempts⁴¹). These researches⁴²) emerged in the 1990s⁴³⁻⁴⁶), which aims to automatically generate different Levels of Detail (LOD) for 3D models⁴⁷).

Early methods focused on the geometric error⁴⁸⁻⁵¹), ensuring retaining the original appearance after simplification. Iterative reduction methods⁵²), such as Progressive Meshes⁵³), were widely studied, allowing for gradual refinement or simplification of the model⁵⁴⁻⁵⁶). In recent years, the trend has shifted towards leveraging advanced computational techniques, such as Parallel Computing⁵⁷⁻⁵⁹) and Machine Learning⁶⁰⁻⁶²), to achieve more efficient and accurate simplification results.

Among the many approaches mentioned above, the QEM algorithm is a commonly used method for mesh simplification, which inspired the proposal in this paper. Michael Garland and Paul S. Heckbert introduced it in 1997¹⁰), then derived many variable species in the following several years⁴⁸⁻⁵⁰)⁶³).

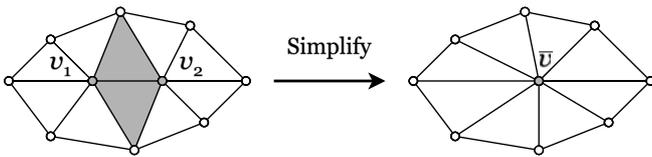


Fig. 6 A typical edge collapse step in QEM Algorithm

As shown in Fig.6, with high-quality model simplification processing, the QEM algorithm minimizes the quadratic error to select and merge vertex pairs efficiently. This merging procedure can also be called edge collapse. QEM algorithm uses Euclidean distance to measure the collapse cost. Specifically, the sum of the squared distances of all neighboring planes $p \in \text{plane}(v_i)$ from the target position \bar{v} to the vertex pair (v_1, v_2) being merged:

$$\bar{v} = \arg \min_v \sum_{p \in \text{plane}(v_1) \cup \text{plane}(v_2)} \text{distance}(v, p)^2 \quad (4)$$

For the merger $(v_1, v_2) \rightarrow \bar{v}$ of any given vertex pair (v_1, v_2) , the quadratic error $\Delta(\bar{v}) = \bar{\mathbf{v}}^\top \mathbf{Q} \bar{\mathbf{v}}$ in target place $\bar{\mathbf{v}} = [v_x, v_y, v_z, 1]^\top$ can be defined as an geometric approximation via a symmetric 4×4 matrix \mathbf{Q} :

$$\begin{aligned} \Delta(\bar{v}) &= \Delta([v_x, v_y, v_z, 1]^\top) = \sum_{p \in \text{planes}(\bar{v})} (\mathbf{p}^\top \bar{\mathbf{v}})^2 \\ &= \sum_{p \in \text{planes}(\bar{v})} \bar{\mathbf{v}}^\top (\mathbf{p} \mathbf{p}^\top) \bar{\mathbf{v}} \\ &= \bar{\mathbf{v}}^\top \left(\sum_{p \in \text{planes}(\bar{v})} \mathbf{K}_p \right) \bar{\mathbf{v}} \\ &= \bar{\mathbf{v}}^\top \mathbf{Q} \bar{\mathbf{v}} \end{aligned} \quad (5)$$

According Eq.(5), since this error $\Delta(\bar{v})$ is a quadratic function, finding the optimal position \bar{v} is transformed into a linear problem: Assuming the quadratic matrix \mathbf{Q} is a positive definite matrix, the extreme value \bar{v} of position \bar{v} can be find by partial derivative when $\partial\Delta/\partial x = \partial\Delta/\partial y = \partial\Delta/\partial z = 0$:

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. Proposed Method

The characteristic of 3D volumetric video inspired the approach in this paper: If an algorithm can consider such movement between adjacent frames as conditions, then this mesh simplification algorithm is more advantageous for dynamic mesh than the traditional existing method. As shown in Fig.7, the Tracked QEM Algorithm is proposed to track this dynamic movement, which can introduce the previous frame as a reference via mesh registration.

Compared with the original QEM algorithm used in current volumetric video coding standard⁵), the proposed Tracked QEM Algorithm is mainly improved from three places: introduced mesh registration to generate the reference for simplification; added inter-frame tracking for edge collapse cost function; and improved optimal search strategy when the quadratic error matrix is irreversible.

These modifications ensure that the structure of the simplified mesh has temporal consistency with the previous frame to avoid geometric structures that are too different from those caused by motion and deformation between adjacent frames. The following part of this chapter will comprehensively describe these three main innovation points in this proposed approach.

3.1 Previous frame reference

As discussed in Section 1, the dynamic mesh in 3D volumetric videos is similar to a frame sequence in 2D

ビデオ、これも静的なメッシュフレームで構成されている。図8に示す例のように、一定の時間間隔 Δt ⁶⁴⁾でキャプチャされたこれらの静的メッシュフレームは、このシーケンスにおける特定のk番目のフレームは、従来のコンピュータグラフィックスにおける静的メッシュ $mesh^{(k)}$ と見なすこともできる。特定の期間 $(k-1)\Delta t \sim k\Delta t$ における被写体の動きは、現在のフレームメッシュ $mesh^{(k)}$ と前のフレームメッシュ $mesh^{(k-1)}$ の差分によって記録される。

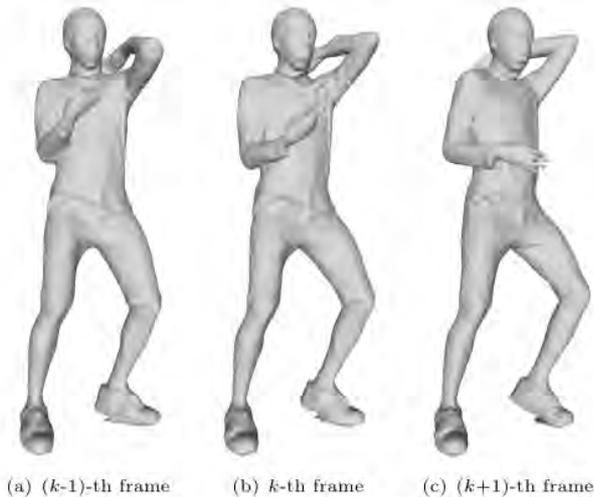


Fig. 8 3Dポリウム映像断片のダイナミックメッシュからのフレームシーケンス

簡略化した結果を隣接する2つのフレーム間のこれらの違いを活用するために、Tracked QEMは簡略化プロセスの参考として前のフレームの情報を導入した。しかし、被写体の動きを含むフレーム間情報のため、静的メッシュの幾何学的構造において、2つのフレームの間に有意な対応関係はない。このため、メッシュレジストレーションを導入した。

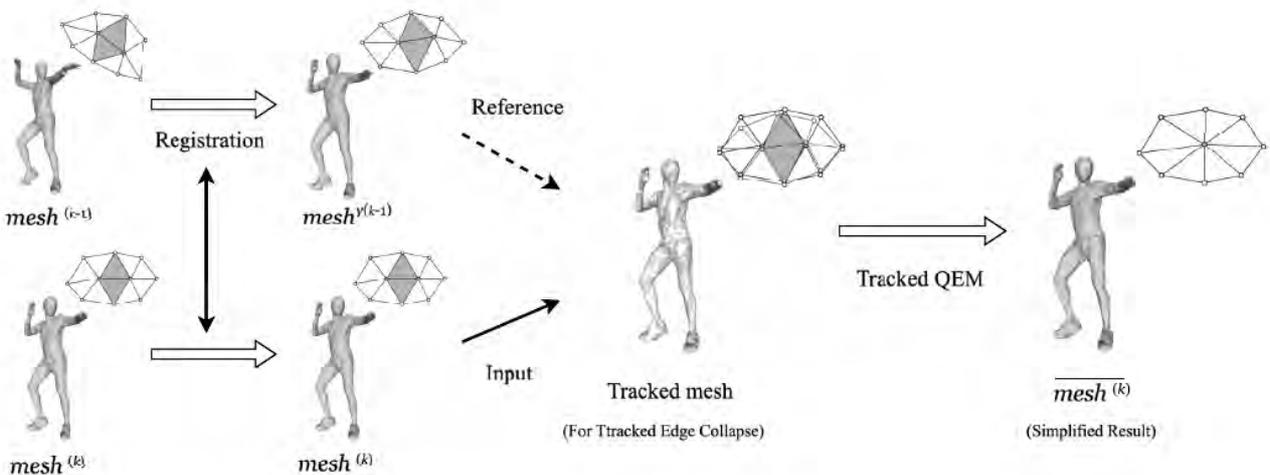


図7 提案するTracked QEM Algorithmのフローチャート(前フレームからの追跡参照を含む)

このフレーム間の関連付けを追跡する。

3Dポリウム映像は、ポリウム空間内の姿勢変化のニュアンスに焦点を当てているが、発生する可能性のあるキャラクタの位置の変位を考慮することも同様に重要である⁶⁵⁾。この変位と変形は、剛体変換と非剛体変換の組み合わせ¹⁴⁾とみなすことができ、体積環境内で人間の動きをキャプチャし、再現することの複雑さを強調している。

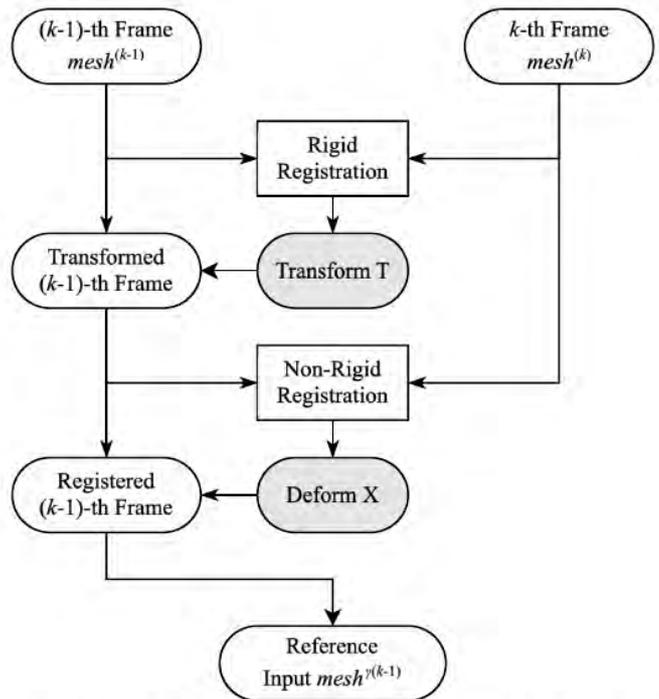


Fig. 9 Mesh registration for reference input to align the (k-1)-th frame

図9に示すフローチャートのように、提案手法では剛体レジストレーションと非剛体レジストレーションを同時に使用する。

video, which also consists of static mesh frames. As the example shown in Fig.8, these static mesh frames captured with a constant time interval Δt^{64} , specific k -th frame in this sequence can also be viewed as a static mesh $mesh^{(k)}$ in traditional computer graph. the subject movement in a specific period $(k - 1)\Delta t \sim k\Delta t$ will be recorded by difference between current frame $mesh^{(k)}$ and previous frame $mesh^{(k-1)}$.

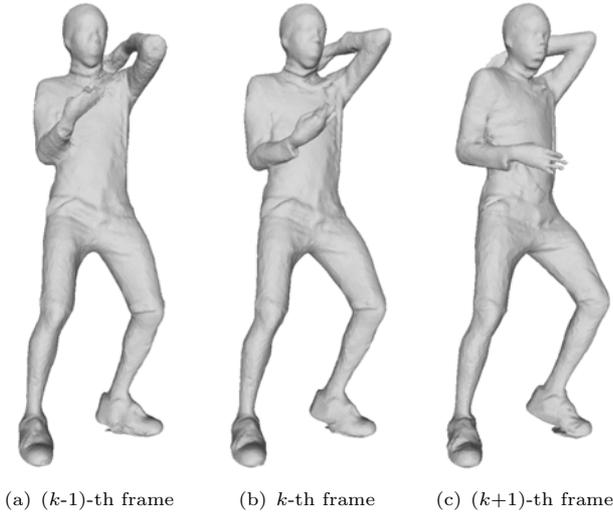


Fig. 8 A frame sequence from dynamic mesh in 3D volumetric video fragment

In order to make the simplified results leverage these differences between two adjacent frames, Tracked QEM introduced the information of the previous frame as a reference in the simplification process. However, due to the inter-frame information, including subject movement, there is no significant correspondence between the two frames in the geometric structure of the static mesh. For this reason, mesh registration was introduced

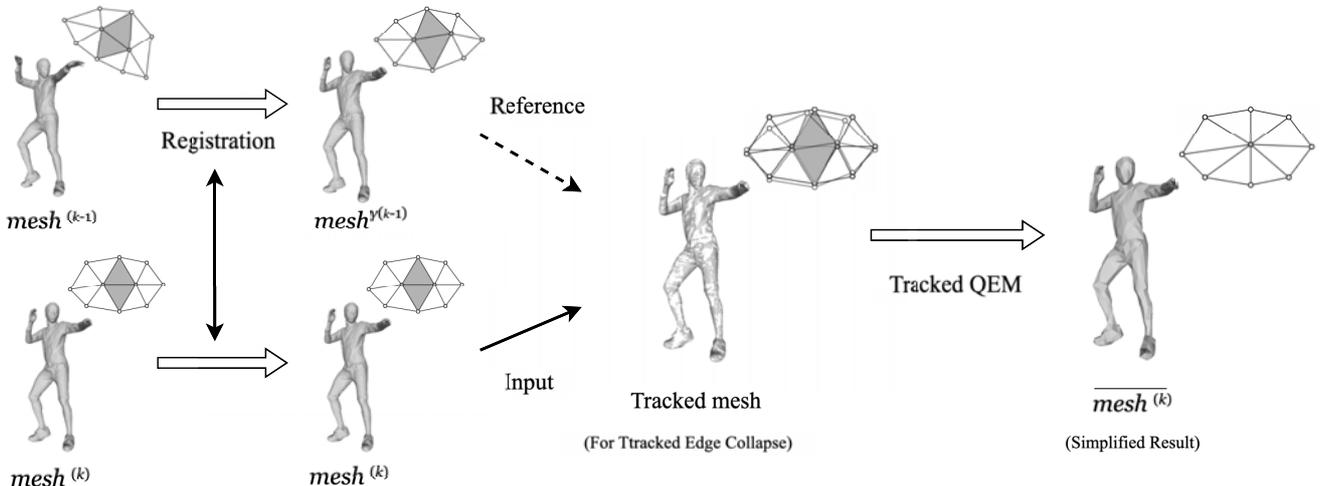


Fig. 7 Flowchart of proposed Tracked QEM Algorithm, including tracked reference from previous frame

to track this inter-frame association.

While the 3D volumetric video focuses on the nuances of posture alterations within the volumetric space, it is equally crucial to consider the displacing of the character’s position that may occur⁶⁵. This displacement and deformation can be regarded as a combination of rigid and non-rigid transformation¹⁴, which underscores the complexity of capturing and replicating human motion within volumetric environments.

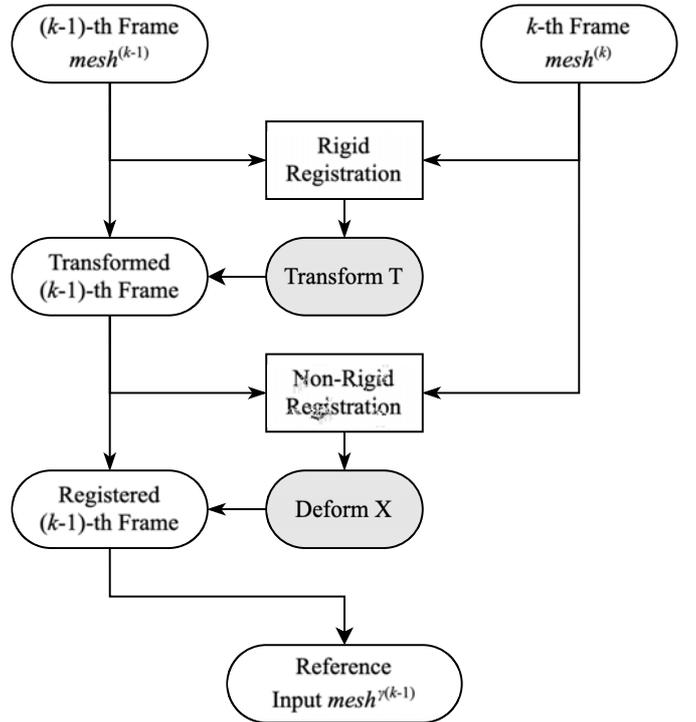


Fig. 9 Mesh registration for reference input to align the (k-1)-th frame

As the flowchart shown in Fig.9, rigid and non-rigid registration is used in the proposed method simultane-

複雑な人間の動きを追跡するために¹³⁾。登録メッシュ $\gamma^{(k-1)}$ は、以前のメッシュ $\gamma^{(k-1)}$ から $\gamma^{(-)}$ を登録することで得ることができ、追跡エッジ崩壊における現在のメッシュ $\gamma^{(k)}$ の基準として用いることができる:

1. 剛体レジストレーション: 剛体レジストレーションは、後続の処理における変位によって引き起こされる可能性のある困難を排除するために、入力を整列させることを目的とする。ここで採用したアルゴリズムは、ナイーブ反復最密点(ICP)²⁶⁾である。前のメッシュ $\gamma^{(k-1)}$ を現在のメッシュ $\gamma^{(k)}$ と整列するように移動させ、剛体変換を行う。式(1)の最適化目標 Γ^* を、対応する点対 $\gamma^{(k-1)}$ 変換 P_{ij} を最小化する以下の式(7)の特定の形式 $T^{\gamma^{(k-1)}}$ に変更する。結果は、その後の非剛体レジストレーション処理の入力として渡される。

$$\begin{aligned} T^{\gamma^{(k-1)}} &= \arg \min_T \sum_c \left(P_{ij}^{\gamma^{(k-1)}} \right)^T \Omega_{ij} \left(P_{ij}^{\gamma^{(k-1)}} \right), \\ P_{ij}^{\gamma^{(k-1)}} &= P_i^{(k)} - T \oplus P_j^{(k-1)} \end{aligned} \quad (7)$$

2. 非剛体レジストレーション: 剛体アライメント後に非剛体変形が修正される。非剛体変形は潜在的に不均質であり、局所的な領域でのみ発生する可能性がある。そこで、許容できる対応関係を得るために、反復に基づくFast-RNRR³⁸⁾を選択した。この準ニュートンのソルバーにより、式(2)の変形場 X^* は2層の反復で解くことができる。提案手法では、アフィン $R \ \gamma_j$ と変位 $t \ \gamma_j$ 変換は、式(8)の式により $X^{\gamma^{(k-1)}}$ と記述できる。

$$\begin{aligned} X^{\gamma^{(k-1)}} &= \min_X E_{\text{align}}(X) + \alpha E_{\text{reg}}(X) + \beta E_{\text{rot}}(X), \\ X^{\gamma^{(k-1)}} &= \{ X_j \mid X_j = (R_j^{\gamma}, t_j^{\gamma}) \} \end{aligned} \quad (8)$$

図9に示すフローチャートと一致し、剛体変換 $T^{\gamma^{(k-1)}}$ (-)と非剛体変形 $X^{\gamma^{(k-1)}}$ (-)が得られれば、剛体変形 $X^{\gamma^{(k-1)}}$ (-)が得られる。式(2)の定義を組み合わせると、登録された参照メッシュ $\gamma^{(k-1)}$ は変換行列 $T^{\gamma^{(k-1)}}$ と変形場 $X^{\gamma^{(k-1)}}$ で表すことができる:

$$\begin{aligned} mesh^{\gamma^{(k-1)}} &= \gamma_{\text{reg}(k)} \left(mesh^{(k-1)} \right) \\ &= X^{\gamma^{(k-1)}} \left(T^{\gamma^{(k-1)}} \left(mesh^{(k-1)} \right) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

メッシュ登録はトラッキングを確立することを目的とする。 $mesh^{(k-1)}$ と $mesh^{(k)}$ の間の幾何学的実体の対応は、このフレーム間トラッキングを得ることができる。現在のフレームメッシュ $\gamma^{(k)}$ の基準として、追跡メッシュ $\gamma^{(k-1)}$ の関連頂点も最適化目標 $v^{(k)}$ に導入する必要がある。最適化目標を”現在のメッシュの外観への影響を最小化する”から”前と現在のメッシュへの影響を最小化する”に変更する。

3. 2 追跡された崩壊コスト関数

この名の通り、Tracked QEMはオリジナルのQEMアルゴリズムをベースに、Trackingに関連するいくつかの新機能を追加したものである。現在の k 番目のフレームメッシュ $\gamma^{(k)}$ 上でエッジが折りたたまれ、特定のエッジ e 上の2つの端点 v_1 と v_2 を縮約して1つの点 v に折りたたむ元のQEMを考える。式(4)と同じ意味で、エッジ崩壊関数は、現在のメッシュ表面から面(v_1)と面(v_2)に隣接する崩壊頂点 v_1, v_2 のみを考慮する。

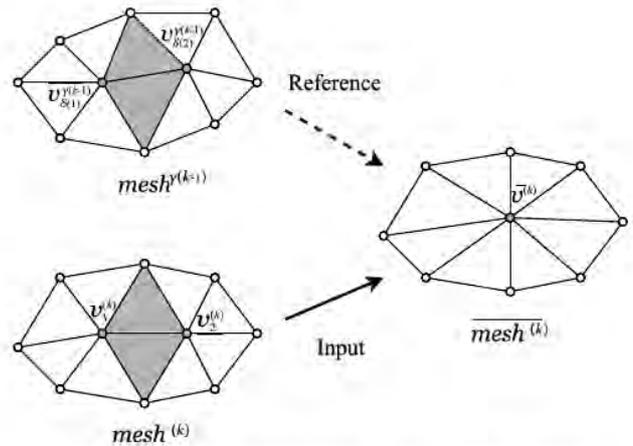


Fig. 10 Tracked Quadric Error Metrics (QEM) Algorithm

フレーム間情報が考慮されていないため、元のQEMでは簡略化された結果に時間的整合性が欠けていた可能性がある。幸いなことに、メッシュレジストレーションの導入により、2フレーム間のトラッキングが再確立された。Tracked QEM Algorithmは、Fig. 6に示すように、この対応関係を利用するために、提案された設計を示すように、崩壊コスト関数を再設計した。

計算の利便性を考慮すると、登録結果メッシュ $\gamma^{(k-1)}$ と現在のモデルメッシュ $\gamma^{(k)}$ の類似度を考慮する必要がある⁴⁰⁾。つまり、エッジ $e^{(k)}$ の崩壊を計算するとき、ターゲット $v^{(k)}$ に導入されたトラッキン

ously to track complex human motion¹³). The registered $mesh^{\gamma(k-1)}$ can be obtained by registration $\gamma(\cdot)$ from previous $mesh^{(k-1)}$, which can be used as a reference of current $mesh^{(k)}$ in tracked edge collapse:

1. **Rigid registration:** Rigid registration aims to align inputs to eliminate the possible difficulties caused by displacement in the subsequent processing. The algorithm employed here is the naive Iterative Closest-Point (ICP)²⁶). The previous $mesh^{(k-1)}$ will be moved to align with the current $mesh^{(k)}$ to fetch rigid transformation. The optimization target \mathbf{T}^* in Eq.(1) is changed into the specific format $\mathbf{T}^{\gamma(k-1)}$ in Eq.(7) below, which minimum the corresponding point pair transformation $\mathbf{P}_{ij}^{\gamma(k-1)}$. The result will be passed as input for the subsequent non-rigid registration processing.

$$\mathbf{T}^{\gamma(k-1)} = \arg \min_{\mathbf{T}} \sum_c \left(\mathbf{P}_{ij}^{\gamma(k-1)} \right)^T \Omega_{ij} \left(\mathbf{P}_{ij}^{\gamma(k-1)} \right), \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{ij}^{\gamma(k-1)} = \mathbf{p}_i^{(k)} - \mathbf{T} \oplus \mathbf{p}_j^{(k-1)}$$

2. **Non-rigid registration:** non-rigid deformations will be corrected after rigid alignment. Non-rigid deformations can potentially be in-homogeneous and may occur only in a local region. Therefore, the Fast-RNRR³⁸) based on iteration was selected to obtain acceptable correspondence. Through this Quasi-Newton's solver, the deformation field \mathbf{X}^* in Eq.(2) will be able to be solved by a two-layer iteration. In the proposed method, the affine \mathbf{R}_j^γ and displace \mathbf{t}_j^γ transformation can be described as $\mathbf{X}^{\gamma(k-1)}$ by the formula in Eq.(8).

$$\mathbf{X}^{\gamma(k-1)} = \min_{\mathbf{X}} E_{\text{align}}(\mathbf{X}) + \alpha E_{\text{reg}}(\mathbf{X}) + \beta E_{\text{rot}}(\mathbf{X}), \quad (8)$$

$$\mathbf{X}^{\gamma(k-1)} = \left\{ \mathbf{X}_j^\gamma \mid \mathbf{X}_j^\gamma = (\mathbf{R}_j^\gamma, \mathbf{t}_j^\gamma) \right\}$$

Consistent with the flowchart shown in Fig.9, once the rigid transformation $\mathbf{T}^{\gamma(k-1)}(\cdot)$ and non-rigid deformation $\mathbf{X}^{\gamma(k-1)}(\cdot)$ has been obtained. Combine the definition from Eq.(2), the registered reference $mesh^{\gamma(k-1)}$ can then be expressed by the transformation matrix $\mathbf{T}^{\gamma(k-1)}$ and the deformation field $\mathbf{X}^{\gamma(k-1)}$:

$$mesh^{\gamma(k-1)} = \gamma_{\text{reg}(k)} \left(mesh^{(k-1)} \right) \quad (9)$$

$$= \mathbf{X}^{\gamma(k-1)} \left(\mathbf{T}^{\gamma(k-1)} \left(mesh^{(k-1)} \right) \right)$$

Mesh registration aims to establish tracking. The correspondence of geometric entities between $mesh^{(k-1)}$ and $mesh^{(k)}$ can obtain this inter-frame tracking. As the reference of current frame $mesh^{(k)}$, related vertices in tracked $mesh^{\gamma(k-1)}$ also need to be introduced into the optimization target $\overline{v^{(k)}}$. It changes the optimization goal from "minimize the effect on current mesh appearance" to "minimize the effect on the previous and current mesh."

3.2 Tracked collapse cost function

As implied by the name, Tracked QEM is based on the original QEM algorithm and has added some new features related to tracking. Consider an edge collapsing on the current k -th frame $mesh^{(k)}$, original QEM contracting two endpoints v_1 and v_2 on a specific edge e to be collapsed into a single point \bar{v} . With the same meaning as in Eq.(4), the edge collapse function only considers the faces plane(v_1) and plane(v_2) adjacent collapsed vertices v_1, v_2 from current mesh surface.

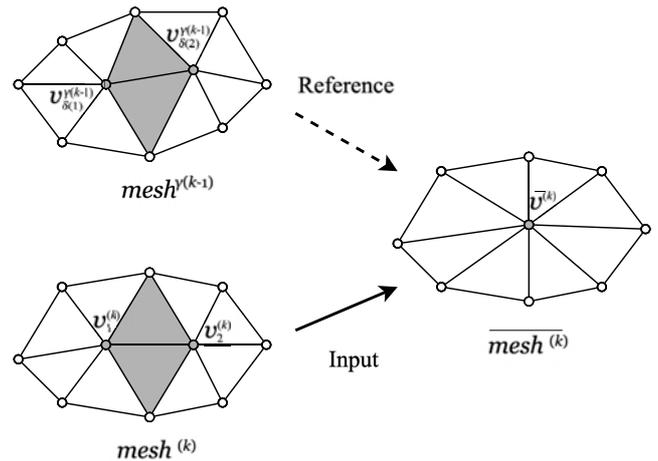


Fig. 10 Tracked Quadric Error Metrics (QEM) Algorithm

Since the inter-frame information was not considered, the original QEM may have led to a lack of temporal consistency in the simplified results. Fortunately, due to the introduction of mesh registration, tracking between two frames was re-established. The Tracked QEM Algorithm redesigned the collapse cost function to utilize this correspondence, as described in Fig.6, above Fig.10 illustrates the proposed design.

Considering the convenience in computing, the similarity between the registration results $mesh^{\gamma(k-1)}$ and the current model $mesh^{(k)}$ should be considered⁴⁰. Which means that when calculating the collapses of edge $e^{(k)}$, optimized items of introduced tracking

メッシュ $v^{(k-1)}$ の最適化項目は、メッシュ (k) と同様の形式を持つべきである。

辺 $e^{(k)}$ の2つの頂点 $v_1^{(k)}$ と $v_2^{(k)}$ を除き、追跡メッシュ $v^{(k-1)}$ からそれらに近い頂点も考慮する。次に、式(5)の最適化目標 v は $v^{(k)}$ に変化し、位置は隣接する三角形平面 $p \in \text{plane}(v_i)$ との距離が最小となる。ただし、メッシュ (k) のマージされた $v_1^{(k)}$ と $v_2^{(k)}$ 以外は、 $v_i^{(k)}$ を中心とするある近傍 $\delta(i)$ のメッシュ $v^{(k-1)}$ からの閉頂点 $V_{\delta(i)}^{v^{(k-1)}}$ も考慮する必要がある：

$$\begin{aligned} \overline{v^{(k)}} = \arg \min_v \sum_{p \in \text{plane}(v_i)} \text{distance}(v, p)^2, \\ v_i \in \{v_1^{(k)}, v_2^{(k)}\} \cup V_{\delta(1)}^{\gamma(k-1)} \cup V_{\delta(2)}^{\gamma(k-1)} \end{aligned} \quad (10)$$

2つのフレーム間の対応する大まかな関係は、メッシュレジストレーションによって確立されている。mesh $v^{(k-1)}$ とmesh (k) の位置も同じ空間座標に揃える。したがって、近傍 $\delta(i)$ の $\gamma(k-1)$ 頂点 $V_{\delta(i)}$ は、メッシュ $\{\delta(i)\}^{\gamma(k-1)}$ から、メッシュ $v^{(k-1)}$ 内の特定の中心 $v_i^{(k)}$ に対して、K-最近傍(K-NN)アルゴリズムによって効率的に構築できる。各近傍領域は特定の探索半径 $e^{(k)}$ を持ち、これは辺の長さ $e^{(k)} = |v_1^{(k)} - v_2^{(k)}|$ を意味する：

$$\begin{aligned} V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} = \left\{ v_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} \mid \|v_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} - v_i^{(k)}\| < \|e^{(k)}\| \right\}, \\ v_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} \in \text{mesh}^{\gamma(k-1)}, v_i^{(k)} \in \text{mesh}^{(k)} \end{aligned} \quad (11)$$

式(5)のQEM行列によれば、与えられた辺の崩壊 $(v_1, v_2) \rightarrow v$ に対して、崩壊頂点 v と周囲の平面 $p \in \text{plane}(v_i)$ ~ 平

面 (v_2) との和距離 $\Delta(v) = v \cdot Qv$ は、 Q_1 と Q_2 の和で表すことができる。同様に、ある k 番目のフレームメッシュ (k) で追跡された2次誤差行列 $Q^{(k)}$ を求めることができる：

$$\begin{aligned} Q^{(k)} &= Q_{\text{track}(1)}^{(k)} + Q_{\text{track}(2)}^{(k)} \\ &= Q_1^{(k)} + Q_{\delta(1)}^{\gamma(k-1)} + Q_2^{(k)} + Q_{\delta(2)}^{\gamma(k-1)} \end{aligned} \quad (12)$$

上式は、隣接するver $\gamma(k-1)$ trices collection $V_{\delta(i)}$ によって構成される追加の2次行列 $\text{ma} \gamma(k-1)$ trices $Q_{\delta(i)}$ を導入した：

$$Q_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} = \sum_{v \in V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}} Q_v^{\gamma(k-1)} \quad (13)$$

つまり、近傍点を探査する場合、探索の最大半径は辺の長さ $e^{(k)}$ に限定される、すなわち、 $\text{length}(e^{(k)}) = |v_1^{(k)} - v_2^{(k)}|$ となる。この制限的な戦略は、過剰なトラッキングポイントを導入することを回避し、その結果、2つのフレーム間のメッシュデータの重みの不均衡をもたらす。図11に近傍頂点集合 $V_{\delta(1)}^{v^{(k-1)}}$ と $V_{\delta(2)}^{v^{(k-1)}}$ の構築過程を示す。

3.3 近似最適探索戦略

もう一つの改良点は、近似最適崩壊位置の探索戦略である。元のQEMアルゴリズムでは、最適点 v の位置は2次行列 Q の性質に関係し、これは追跡QEMにおける $Q^{(k)}$ でもある。式(5)より、任意の平面 p の式が $ax + by + cz + d = 0$ であるとすると、式(12)のある頂点 $v_i^{(k)}$ の2次行列 $Q_{\text{track}(i)}^{(k)}$ は式(14)の形式で表すことができる。

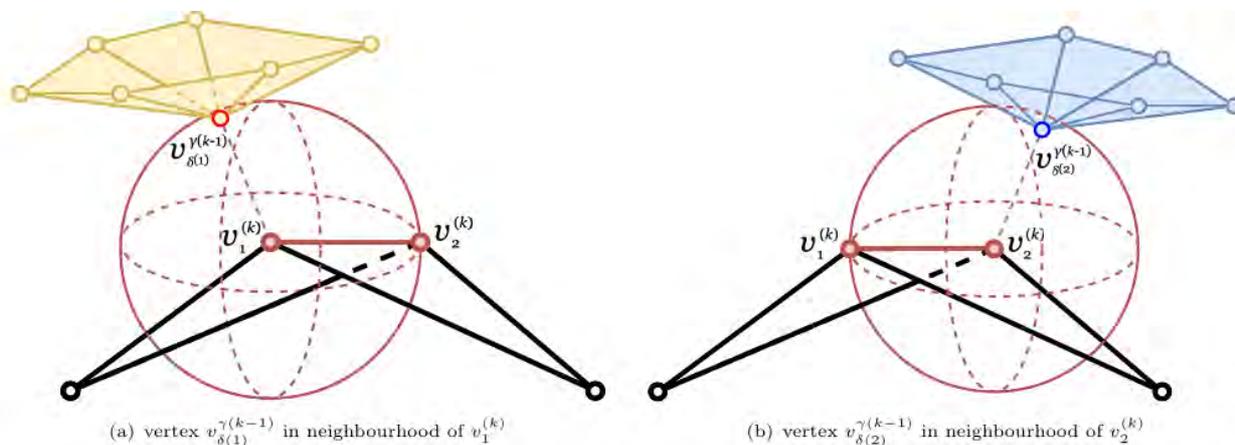


Fig. 11 Nearest Point Search for Edge in Tracked QEM Based on K-NN Algorithm

$mesh^{\gamma(k-1)}$ in the target $\overline{v^{(k)}}$ should have similar format with $mesh^{(k)}$.

Except for the two vertices $v_1^{(k)}$ and $v_2^{(k)}$ of edge $e^{(k)}$, vertices near to them from tracked $mesh^{\gamma(k-1)}$ will also be considered. Then the optimization target \bar{v} from Eq.(5) changes to $\overline{v^{(k)}}$, where the position has a minimum distance to the adjacent triangle planes $p \in \text{plane}(v_i)$. But except merged $v_1^{(k)}$ and $v_2^{(k)}$ in $mesh^{(k)}$, closed vertices $V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}$ from $mesh^{\gamma(k-1)}$ in a certain neighbourhood $\delta(i)$ centered around $v_i^{(k)}$ also should be considered:

$$\begin{aligned} \overline{v^{(k)}} &= \arg \min_v \sum_{p \in \text{plane}(v_i)} \text{distance}(v, p)^2, \\ v_i &\in \{v_1^{(k)}, v_2^{(k)}\} \cup V_{\delta(1)}^{\gamma(k-1)} \cup V_{\delta(2)}^{\gamma(k-1)} \end{aligned} \quad (10)$$

The corresponding rough relationship between the two frames has been established through the mesh registration. The position of $mesh^{\gamma(k-1)}$ and $mesh^{(k)}$ are also aligned into the same space coordinates. Hence the vertices $v_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}$ in the neighbourhood $\delta(i)$ constructed collection $V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}$ from $mesh^{\gamma(k-1)}$ for a specific centre $v_i^{(k)}$ in $mesh^{(k)}$ can be efficiently built through the K-Nearest Neighbor (K-NN) algorithm. Each neighborhood have a specific search radius $\|e^{(k)}\|$, which means the length of edge $e^{(k)} = (v_1^{(k)}, v_2^{(k)})$:

$$\begin{aligned} V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} &= \left\{ v_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} \mid \|v_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} - v_i^{(k)}\| < \|e^{(k)}\| \right\}, \\ v_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} &\in mesh^{\gamma(k-1)}, v_i^{(k)} \in mesh^{(k)} \end{aligned} \quad (11)$$

According to the QEM matrix in Eq.(5), for the given edge collapse $(v_1, v_2) \rightarrow \bar{v}$, the sum distance $\Delta(v) = \mathbf{v}^\top \mathbf{Q} \mathbf{v}$ between collapsed vertex \bar{v} and surrounding

planes $p \in \text{plane}(v_1) \cup \text{plane}(v_2)$ can be represent by sum of \mathbf{Q}_1 and \mathbf{Q}_2 . Similarly, the tracked quadric error matrix $\mathbf{Q}^{(k)}$ with certain k -th frame $mesh^{(k)}$ can be obtained:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{(k)} &= \mathbf{Q}_{\text{track}(1)}^{(k)} + \mathbf{Q}_{\text{track}(2)}^{(k)} \\ &= \mathbf{Q}_1^{(k)} + \mathbf{Q}_{\delta(1)}^{\gamma(k-1)} + \mathbf{Q}_2^{(k)} + \mathbf{Q}_{\delta(2)}^{\gamma(k-1)} \end{aligned} \quad (12)$$

The above formula introduced additional quadric matrices $\mathbf{Q}_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}$, which constructed by the neighbour vertices collection $V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}$:

$$\mathbf{Q}_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} = \sum_{v \in V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}} \mathbf{Q}_v^{\gamma(k-1)} \quad (13)$$

It means that when searching for nearby points, the maximum radius of the search will be limited to the side length of $e^{(k)}$, namely $\text{length}(e^{(k)}) = \sqrt{(v_1^{(k)} - v_2^{(k)})^2}$. This restrictive strategy avoids introducing excessive tracking points, resulting in an imbalance in the weight of mesh data between the two frames. The Fig.11 shows the construction process of the neighbour vertices set $V_{\delta(1)}^{\gamma(k-1)}$ and $V_{\delta(2)}^{\gamma(k-1)}$.

3.3 Approximate optimal search strategy

Another improvement is the search strategy for the approximate optimal collapse position. In the original QEM algorithm, the location of the optimal point \bar{v} is related to the nature of the quadratic matrix \mathbf{Q} , which is also the $\mathbf{Q}^{(k)}$ in tracked QEM. According to Eq.(5), suppose the expression of any plane p is $ax + by + cz + d = 0$, the quadratic matrix $\mathbf{Q}_{\text{track}(i)}^{(k)}$ of certain vertex $v_i^{(k)}$ in Eq.(12) can be denoted as the format in Eq.(14).

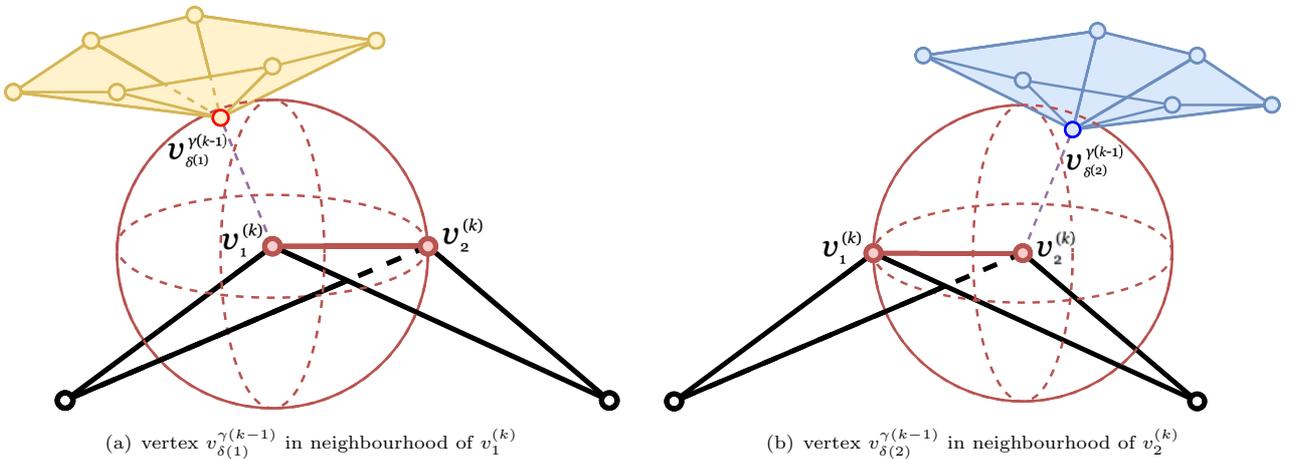


Fig. 11 Nearest Point Search for Edge in Tracked QEM Based on K-NN Algorithm

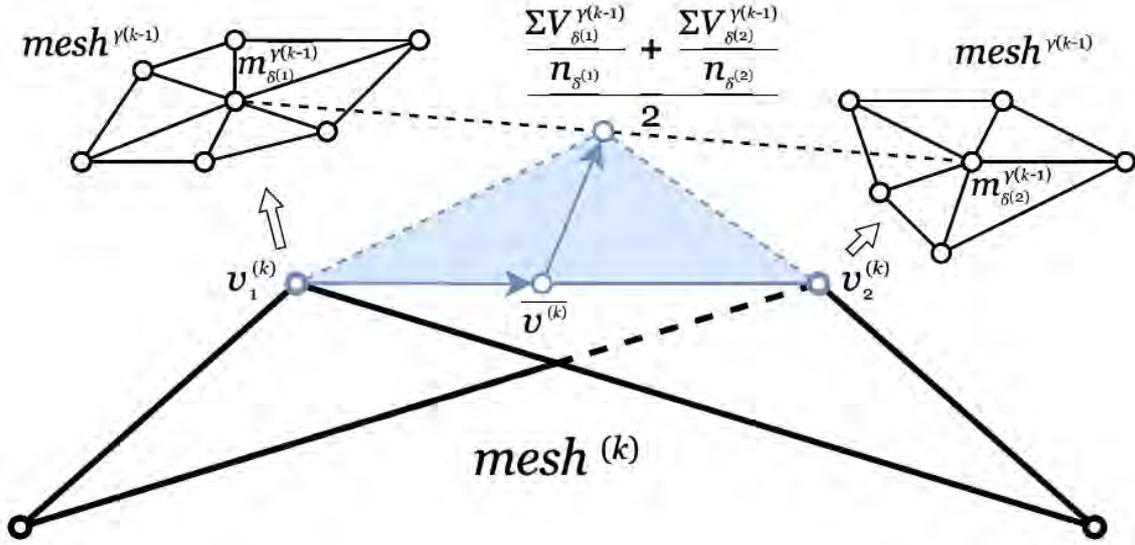


図12 三角形表面上の近似解探索

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{track}(i)}^{(k)} &= Q_i^{(k)} + Q_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} \\
 &= \sum_{v \in V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} \cup \{v_i^{(k)}\}} \sum_{p \in \text{plane}(v)} \mathbf{K}_p \\
 &= \sum_p \begin{bmatrix} a_p^2 & a_p b_p & a_p c_p & a_p d_p \\ a_p b_p & b_p^2 & b_p c_p & b_p d_p \\ a_p c_p & b_p c_p & c_p^2 & c_p d_p \\ a_p d_p & b_p d_p & c_p d_p & d_p^2 \end{bmatrix} \quad (14) \\
 &= \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ q_{14} & q_{24} & q_{34} & q_{44} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

元のQEMと同様に、式(6)によれば、最適化された $v^{(k)}$ は式(15)の逆行列で解くことができ、式(12)で示される行列 $Q^{(k)}$ を通して、式(14)の $Q_{\text{track}(i)}^{(k)}$ で計算される要素値を得ることができる。ただし、二次誤差行列 Q が不可逆である場合は、近似的に最適解を求めるために探索方法を指定する必要がある。

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

現実には、行列 Q はほとんどの場合可逆であるため、単純な探索戦略で済む。元のQEMアルゴリズムは、中点位置 $(v_1 + v_2)/2$ を選択するか、エッジ e に沿って再帰的二値探索を実行する。

しかし、式(14)によれば、追跡QEMにおける近傍1頂点 $v_{\delta(i)}$ を考慮すると、 $Q_{\text{track}(i)}^{(k)}$ が不可逆である確率が高くなる。このため、簡略化されたモデルの出現の質を保証するために、より正確な探索戦略を設計する必要がある。元のQEMでは、探索領域はエッジ $e^{(k)}$ 上で定義されるセグメントであり、これも元のメッシュ表面に制限される。追跡QEMアルゴリズムでは、参照フレームメッシュ $\gamma^{(k-1)}$ を導入するため、メッシュ $^{(k)}$ 表面での解の可能性は制限されなくなる。図12に示すように、提案する探索戦略は解空間を大幅に拡大する。

最適化された頂点の空間における候補位置は、3次元空間において三角形平面に展開されている。本提案では、新しい探索方向は、追跡された近傍 $\gamma^{(k-1)}$ $\gamma^{(k-1)}$ 頂点集合 $V_{\delta(1)}$ と $V_{\delta(2)}$ の重心 m_{δ} によって傾向づけられる $ex \gamma^{(k-1)}$ である：

$$m_{\delta}^{\gamma(k-1)} = \frac{\sum V_{\delta(1)}^{\gamma(k-1)} / n_{\delta(1)} + \sum V_{\delta(2)}^{\gamma(k-1)} / n_{\delta(2)}}{2} \quad (16)$$

過度の計算費用を避けるため、最適な探索は2つの段階に分けられる。最初のステージは、オリジナルのQEMアルゴリズムで一様である。アルゴリズムは、セグメント $(v_1^{(k)}, v_2^{(k)})$ の探索のみを行い、第1ステージの最適化結果 $v_{1st}^{(k)}$ を求める。sec(k) $\gamma^{(k-1)}$ ondステージはセグメント (v_{1st}, m_{δ}) の探索である。したがって、最終的な $v^{(k)}$ を得るまでの全進歩は、2つの線分に対する段階的探索で考えることができる：

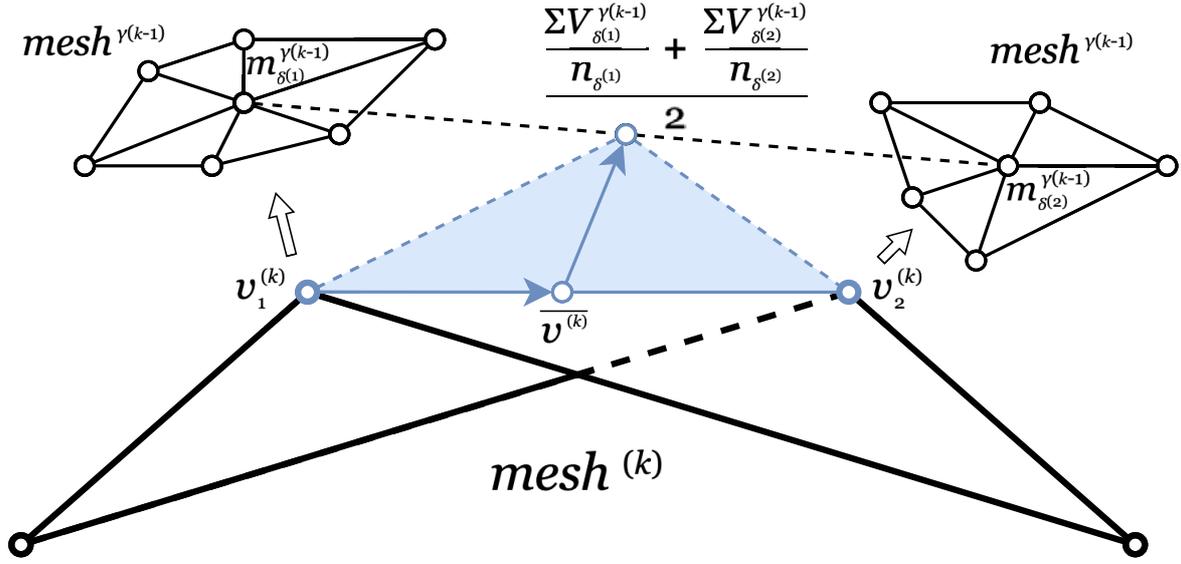


Fig. 12 Approximate solution search on the triangular surface

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Q}_{\text{track}(i)}^{(k)} &= \mathbf{Q}_i^{(k)} + \mathbf{Q}_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} \\
 &= \sum_{v \in V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)} \cup \{v_i^{(k)}\}} \sum_{p \in \text{plane}(v)} \mathbf{K}_p \\
 &= \sum_p \begin{bmatrix} a_p^2 & a_p b_p & a_p c_p & a_p d_p \\ a_p b_p & b_p^2 & b_p c_p & b_p d_p \\ a_p c_p & b_p c_p & c_p^2 & c_p d_p \\ a_p d_p & b_p d_p & c_p d_p & d_p^2 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ q_{14} & q_{24} & q_{34} & q_{44} \end{bmatrix} \quad (14)
 \end{aligned}$$

As same as the original QEM, according to Eq.(6), the optimized $\bar{v}^{(k)}$ can be solved by the inverse matrix in the form of Eq.(15), which can get the element value through the matrix $\mathbf{Q}^{(k)}$ stated in Eq.(12) calculate by $\mathbf{Q}_{\text{track}(i)}^{(k)}$ in Eq.(14). However, if the quadric error matrix \mathbf{Q} is irreversible, it is necessary to specify the search method to find approximately optimal solutions.

$$\bar{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

In reality, only a simple search strategy is needed since the matrix \mathbf{Q} is invertible in most cases. The original QEM algorithm chooses the midpoint position $(v_1 + v_2)/2$ or executes the recursive binary search along

the edge e . But according to Eq.(14), accounted neighbour vertices $V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}$ in tracked QEM increases the probability that the $\mathbf{Q}_{\text{track}(i)}^{(k)}$ is irreversible. For this reason, more precise search strategies must be designed to ensure the quality of the appearance of the simplified model.

In the original QEM, the search area is the segment defined on edge $e^{(k)}$, which is also restricted on an original mesh surface. Since in the tracked QEM algorithm, the introduction of reference frame $\text{mesh}^{\gamma(k-1)}$, possible solution should not be limited at the $\text{mesh}^{(k)}$ surface anymore. As shown in Fig.12, the proposed search strategy significantly expands the solution space.

The candidate position in the space of the optimized vertex has been expanded into a triangular plane in 3D space. In this proposal, the new search direction is extended by the barycenter $m_{\delta}^{\gamma(k-1)}$ of tracked neighbour vertices set $V_{\delta(1)}^{\gamma(k-1)}$ and $V_{\delta(2)}^{\gamma(k-1)}$, which defined by the endpoint $v_1^{(k)}$, $v_2^{(k)}$ in current edge $e^{(k)}$:

$$m_{\delta}^{\gamma(k-1)} = \frac{\sum V_{\delta(1)}^{\gamma(k-1)}}{n_{\delta(1)}} + \frac{\sum V_{\delta(2)}^{\gamma(k-1)}}{n_{\delta(2)}} \quad (16)$$

In order to avoid excessive computing expenses, the optimal search will be split into two stages. The first stage is uniform with the original QEM algorithm. Algorithm only proceed search on segment $(v_1^{(k)}, v_2^{(k)})$ to find the optimized result $\bar{v}_{\text{1st}}^{(k)}$ of 1st stage. The second stage is the search on the segment $(\bar{v}_{\text{1st}}^{(k)}, m_{\delta}^{\gamma(k-1)})$. Therefore, the entire progress to get the final $\bar{v}^{(k)}$ can be considered in staged search on the two line segments:

$$\left(v_1^{(k)}, v_2^{(k)}\right) \text{ and } \left(\overline{v_{1st}^{(k)}}, m_8^{\gamma(k-1)}\right).$$

アルゴリズム1 反復に基づく二値探索

セグメント(v_1, v_2)のバイナリサーチが必要。

を確保する: 最小のコストで近似

初期化. 反復回数 $c \leftarrow 0$

$m \leftarrow \text{middle}(v_1, v_2)$

while $c < C_{max}$ **do**

if $\text{cost}(m) < \min(\text{cost}(v_1), \text{cost}(v_2))$ **then**

$m_1 \leftarrow \text{middle}(v_1, m)$

$m_2 \leftarrow \text{middle}(m, v_2)$

if $\text{cost}(m_1) < \text{cost}(m_2)$ **then**

$v_2 \leftarrow m_1, m \leftarrow m_1$

else

$v_1 \leftarrow m, m \leftarrow m_2$

end if

end if

 Update: $\bar{c} \leftarrow \min(\text{cost}(v_1), \text{cost}(v_2), \text{cost}(m))$

end while

を確保する: 最小のコストで近似

アルゴリズム1で説明したように、両ステージの探索は、性能を考慮した反復ベースのバイナリ探索を使用する。アルゴリズムは、まず探索線分の中点 m を選択し、コストを計算する。終点が両側より小さければ、2つの新しい線分を現在の間接で割った上に、新しい中間点 m_1 と m_2 が2つ取られる。中点がより無視できるコストを持つセグメントが、次の反復のために選択される。この項目で選択される最大反復回数は4回である。反復回数が1回しかない場合、アルゴリズムは (k) (k) $\gamma(k-1)$ に劣化し、三角形の中心点 v_1, v_2, m_8 を近似解として使おうとすることは注目に値する。

4. Experiment

4.1 データと指標

実験パートでは、提案するTracked QEMをオリジナルQEMアルゴリズムと比較し、動的メッシュデシメーションタスクの品質と効率を評価した。両アルゴリズムとも、比較の客観性を確保するために、同じデータと評価条件を使用する。入力として、いくつかの短い3Dボリュームビデオフレームシーケンスがインターセプトされる。ビデオは合計150フレームで、人間の動きを記録した。合計5つのフレームシーケンスがカットされた。各シーケンスには5つのフレームが含まれる。各フレームは約20,000個の有効頂点、4万個の三角形、6万個の辺を持つ。

トラッキングQEMアルゴリズムは、常に前の $(k-1)$ 番目のフレームを各簡略化された k 番目のフレームの追加参照として必要とするため、各グループは4つの実験を行った。

このアルゴリズムは、1stフレームを除いた2ndフレームから5thフレームまでメッシュを簡略化する。同じ理由で、評価には各簡略化された k 番目のフレームと登録された $(k-1)$ 番目のフレームとの間の誤差も含まれる。簡略化された結果は可視化され、時間整合性の性能を分析するために評価される。

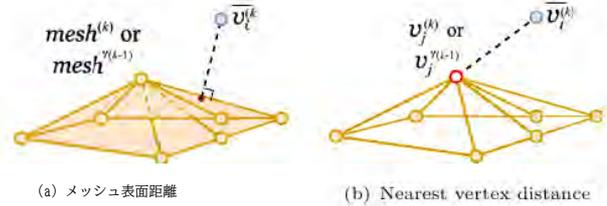


図 13 距離測定に基づく指標

誤差の評価指標は、3Dビデオ圧縮⁶⁶⁾における動的メッシュデシメーションタスクのフレーム間整合性を測定するために設計されている。図13に示すように、Cloud-MeshとCloud-Cloud distance⁶⁷⁾に触発され、メッシュ表面距離と最近接頂点距離を主な指標として使用した:

1. メッシュ表面距離: 単純化メッシュ (k) の各頂点 $v_i^{(k)}$ から、比較した元のメッシュ (k) または参照メッシュ $\gamma(k-1)$ の表面上の任意の点までの最短距離。これは、外観の類似性を測定するために使用できる。値が小さいほど、結果が入力に近いことを意味する。
2. 最近接頂点距離: 簡略化メッシュ (k) の各頂点 $v_i^{(k)}$ から、最も近い頂点 v_j または v_j に応答する $\text{cor}(k) \gamma(k-1)$ までの最短距離。幾何学的トポロジーの一貫性を評価するために使用できる。値が小さいほど、入力に近似していることを意味する。

4.2 視覚化された結果

図14は、Tracked QEMアルゴリズムによる結果を可視化したものである。視覚的な効果が良好な典型的な簡略化されたフレームを選択し、視覚化した。図14. (a)と図14. (b)は現在のフレーム入力メッシュ (k) と前のフレーム参照メッシュ $(k-1)$ である。図14. (c)から、現在の k 番目のフレームからの入力メッシュ (k) と $(k-1)$ 番目のフレームから追跡されたメッシュ $\gamma(k-1)$ は、外観が高度に重なっていることが容易にわかる。しかし、2つのフレーム間の局所的な詳細と幾何学的なトポロジーの乖離は、登録結果のいくつかの領域において、依然として微妙な差異をもたらす。従来のメッシュデシメーション処理では、この違いが簡略化されたフレームシーケンスの一貫性に影響する。この結論は、登録された参照メッシュ $\gamma(k-1)$ をTracked QEMに導入すべき理由である。

$$\left(v_1^{(k)}, v_2^{(k)}\right) \text{ and } \left(\overline{v_{1st}^{(k)}}, m_\delta^{\gamma(k-1)}\right).$$

Algorithm 1 Iteration-based binary search

Require: binary search on segment (v_1, v_2)
Ensure: Approximate \bar{v} with smallest cost

 Initialization: Iteration count $c \leftarrow 0$
 $m \leftarrow \text{middle}(v_1, v_2)$
while $c < C_{max}$ **do**
if $\text{cost}(m) < \min(\text{cost}(v_1), \text{cost}(v_2))$ **then**
 $m_1 \leftarrow \text{middle}(v_1, m)$
 $m_2 \leftarrow \text{middle}(m, v_2)$
if $\text{cost}(m_1) < \text{cost}(m_2)$ **then**
 $v_2 \leftarrow m, m \leftarrow m_1$
else
 $v_1 \leftarrow m, m \leftarrow m_2$
end if
end if

 Update: $\bar{v} \leftarrow \min(\text{cost}(v_1), \text{cost}(v_2), \text{cost}(m))$
end while
Ensure: Approximate \bar{v} with smallest cost

As described in Algorithm 1, the search for both stages uses an iteration-based binary search for performance considerations. The algorithm will first select the middle point m of the search line segment to calculate the cost. If the endpoints are less than both sides, two new middle points m_1 and m_2 will be taken on the two new line segments divided by the current middle point. The segment with the middle point with a more negligible cost will be selected for the next iteration. The maximum number of iterations selected in this item is 4. It is worth noting that when the number of iterations is only 1, the algorithm will be degraded to try to use the centre point of triangle $v_1^{(k)}, v_2^{(k)}, m_\delta^{\gamma(k-1)}$ as the approximate solution.

4. Experiment

4.1 Data and Metrics

In the experiment part, the proposed Tracked QEM was compared with the Original QEM algorithm to evaluate the quality and efficiency of the dynamic mesh decimation task. Both algorithms use the same data and conditions for evaluation to ensure the objectivity of the comparison. A few short 3D volumetric video frame sequences are intercepted as the input. The video totalled 150 frames and recorded a human movement. A total of five frame sequences were cut. Each sequence contains five frames. Each frame has about 20,000 valid vertices, 40,000 triangles, and 60,000 edges.

Due to the tracking QEM algorithm always requiring the previous $(k-1)$ -th frame as the additional reference for each simplified k -th frame, each group conducted four experiments. The algorithm will simplify the mesh

from the 2-nd to the 5-th frame, without the 1-st frame. For the same reason, the evaluation will also include the error between each simplified k -th frame and the registered $(k-1)$ -th frame. Simplified results will be visualized and evaluated to analyze the performance of time consistency.

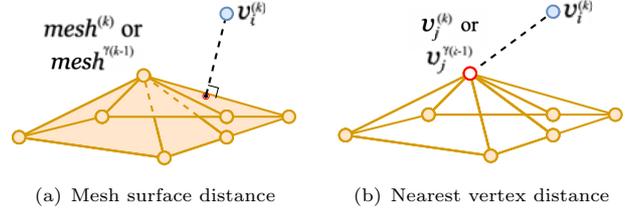


Fig. 13 Indicators based on distance measurement

The evaluation metric of error is designed to measure the inter-frame consistency of the dynamic mesh decimation task in 3D video compression⁶⁶. Inspired by Cloud-Mesh and Cloud-Cloud distance⁶⁷, as shown in Fig.13, mesh surface distance and nearest vertex distance were used as main metrics:

1. Mesh surface distance: The shortest distance from each vertex $\overline{v_i^{(k)}}$ in simplified $\overline{mesh^{(k)}}$ to any point on surface of compared original $mesh^{(k)}$ or referenced $mesh^{\gamma(k-1)}$. Which can be used to measure appearance similarity. The smaller value means the result is closer to the input.

2. Nearest vertex distance: The shortest distance from each vertex $\overline{v_i^{(k)}}$ in simplified $\overline{mesh^{(k)}}$ to the corresponding nearest vertex $v_j^{(k)}$ or $v_j^{\gamma(k-1)}$. Which can be used to evaluate the consistency of geometric topology. The smaller value means more approximate to the input.

4.2 Visualized result

Fig.14 shows the visualized results from the Tracked QEM algorithm. A typical simplified frame with good visual effects was selected and visualized. Fig.14.(a) and Fig.14.(b) is the current frame input $mesh^{(k)}$ and previous frame reference $mesh^{(k-1)}$. It is easy to see from Fig.14.(c) that aligned the input $mesh^{(k)}$ from the current k -th frame and tracked $mesh^{\gamma(k-1)}$ from $(k-1)$ -th frame have a high degree of overlapping in appearance. However, the divergence of local details and geometric topology between the two frames still leads to subtle differences in some areas in the registered result. In traditional mesh decimate processing, this difference will affect the consistency of the simplified frame sequence. This conclusion is why the registered reference $mesh^{\gamma(k-1)}$ should be introduced to Tracked QEM.



図14 Tracked QEM Algorithmによる入力と簡略化結果の可視化

追跡QEMアルゴリズムでは、2つの入力メッシュ $\gamma^{(k-1)}$ とメッシュ $^{(k)}$ の空間情報の両方が適度に活用される。これらの非常に類似した追跡表面情報は、式(10)の良い参照 $\gamma^{(k-1)}$ 部分 $V_{\sigma(i)}$ として使うことができる。図10に示すように、メッシュ $\gamma^{(k-1)}$ とメッシュ $^{(k)}$ の間に簡略化した結果の新しい頂点が生成されるため、図14.(d)に示すメッシュ $^{(k)}$ の結果を1フレームからフレーム間に変換することになる。図14.(e)を見ると、アライメント結果を最終的な簡略化結果に重ね合わせると、両フレームの出現が

メッシュはほとんどの領域で良好に保持された。

同じフレームグループからの追加の可視化結果は、2つの入力メッシュを別々に単純化した結果と比較することで、この結論を支持している。図15.(a)と図15.(b)にそれぞれメッシュ $\gamma^{(k-1)}$ とメッシュ $^{(k)}$ を用いた簡略化した結果メッシュ(k)を重ね合わせると、両者が重なる領域はほぼ同じになる。可視化された結果は、提案手法が、2つのフレーム間で追跡対象の姿勢が劇的に変化しても、簡略化された結果が幾何学的構造上でより良い時間的一貫性と空間的平滑化を持つことを保証できることを示している。この結果は、Tracked QEM アルゴリズムにおける期待値および次の比較実験の結果と一致する。

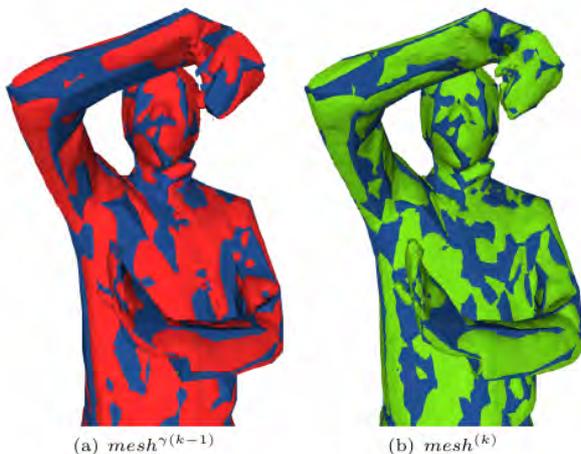


Fig. 15 2フレーム間の入力の比較と簡略化した結果

4. 3 比較実験

視覚化された結果における直感的な感覚と一致して、参照フレームを導入することで、簡略化された結果は、従来のデシメーション法よりも、2つの入力メッシュ $\gamma^{(k-1)}$ とメッシュ $^{(k)}$ の平均に数値的に近くなる。これは、前述のメッシュ表面距離とニアレスト頂点距離の確率的比較によって承認できる。

簡略化された結果にはまだ数百から数千の頂点があることを考慮すると、2つの距離の測定は統計的指標を用いて要約する必要がある。

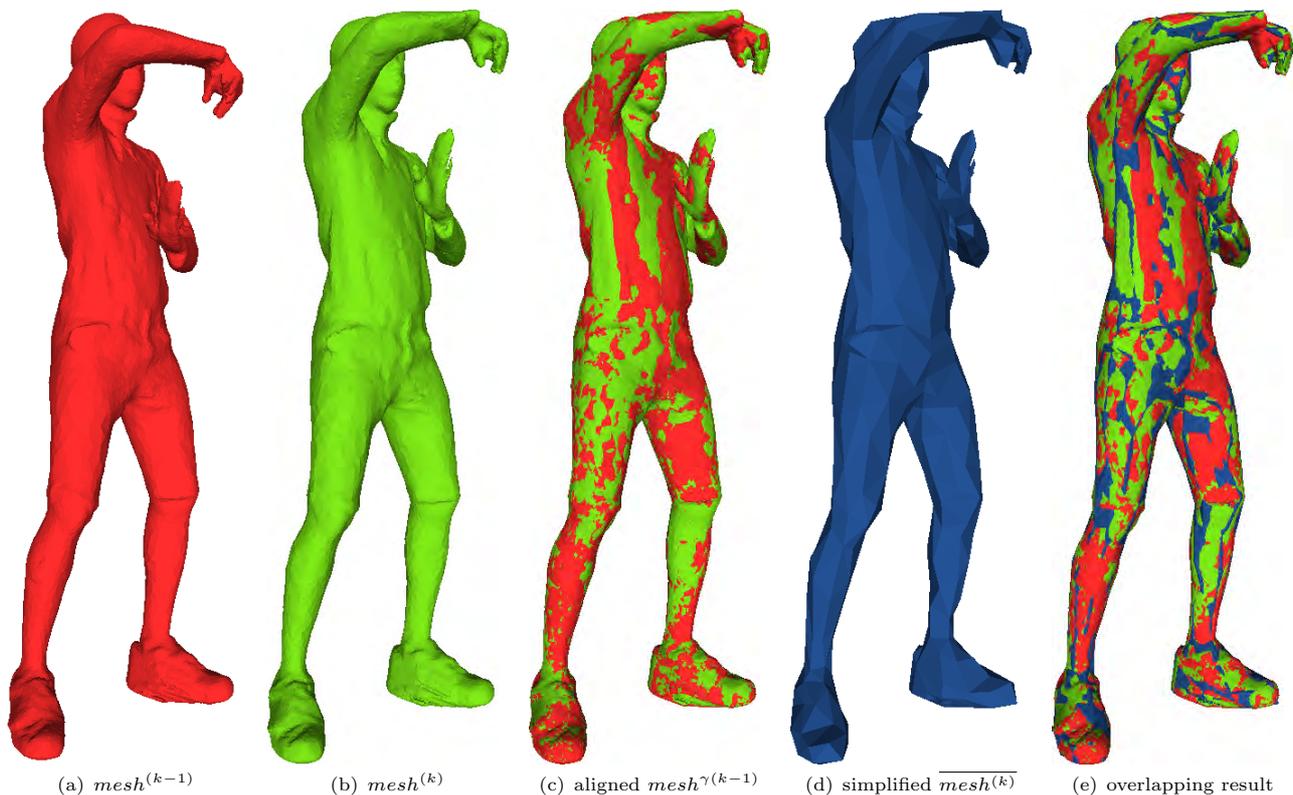


Fig. 14 Visualized inputs & simplification result from Tracked QEM Algorithm

In the Tracked QEM Algorithm, both the spatial information in two input $mesh^{\gamma(k-1)}$ and $mesh^{(k)}$ will be leveraged moderately. These highly similar tracked surface information can be used as a good reference part $V_{\delta(i)}^{\gamma(k-1)}$ in Eq.(10). As shown in Fig.10, the new vertices in simplified result will be generated between $mesh^{\gamma(k-1)}$ and $mesh^{(k)}$, which means convert the result $\overline{mesh^{(k)}}$ shown in Fig.14.(d) from single frame to the inter-frame. It can be observed in Fig.14.(e) that if the alignment results are to be superimposed on the final simplified results, the appearance of both frame

mesh was retained well in most regions.

The additional visualized results from the same frame group support this conclusion by comparing the two input meshes with the simplified results separately. As shown in Fig.15.(a) and Fig.15.(b), respectively superimposed with the simplified results $\overline{mesh^{(k)}}$ using $mesh^{\gamma(k-1)}$ and $mesh^{(k)}$, the areas where they overlap are almost identical. The visualized result shows that the proposed method can also ensure that the simplified results have better temporal consistency and spatial smoothing on geometric structure, even if the movement dramatically changes the attitude of the tracked object between two frames. This result is consistent with the expectations in the Tracked QEM algorithm and the results from the next Comparative experiment.

4.3 Comparative experiment

Consistent with the intuitive feelings in visualized results, introducing the reference frame will make the simplified result also numerically closer to the average of two input $mesh^{\gamma(k-1)}$ and $mesh^{(k)}$ than the traditional decimation method, which can be approved by the stochastic comparison on Mesh surface distance and Nearest vertex distance mentioned before.

Considering the simplified result still has several hundreds or thousands of vertices, the measurement of two distances needs to be summarized using statisti-

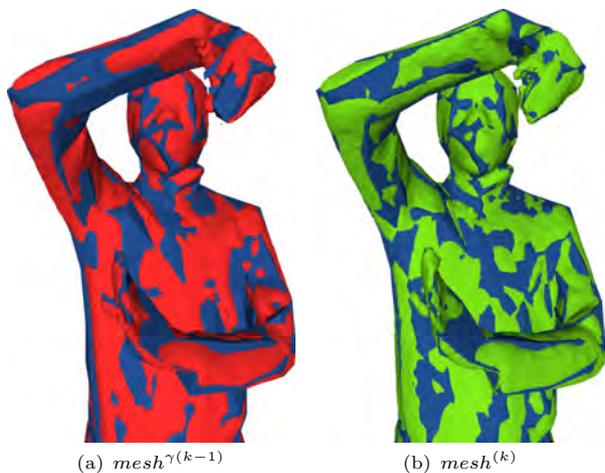


Fig. 15 Comparison of inputs between two frames with simplified results

本研究では、アルゴリズムの性能を定量化するために、平均、平均、分散、標準偏差、平均二乗誤差、二乗平均平方根誤差の5つの指標を選択した。これらの指標は、誤差距離の分布を特徴付けるために使用される。距離の値が小さいほど良いので、統計の値が小さいほど良い結果も得られる。

Table 1 Best result of mesh surface distance

Algorithm	Mesh	Statistical indicator				
		Ave	Var	STD	MSE	RMSE
Orig QEM	(k-1)-th	82.73	6143	78.37	56.97	7.547
	k-th	46.23	2129	46.14	21.48	4.635
Track QEM	(k-1)-th	52.36	2448	49.47	22.42	4.734
	k-th	45.80	1975	44.44	20.41	4.518

分散を除いて有効な数字を4つ保持する。

表2 最近接頂点距離の最良結果

Algorithm	Mesh	統計的指標				
		Ave	Var	STD	MSE	RMSE
Orig QEM	(k-1)-th	178.2	28798	169.7	122.4	11.06
	k-th	139.0	22320	149.4	117.3	10.82
Track QEM	(k-1)-th	144.7	24211	155.6	125.2	11.19
	k-th	134.8	20793	144.2	113.4	10.64

分散を除いて有効な数字を4つ保持する。

表1および表2の結果は、Tracked QEMアルゴリズムとOriginal QEMアルゴリズムについて別々にテストデータで得られる最良の結果である。表1より、Tracked QEMはすべての指標において、より良い表面距離の結果を達成していることがわかる。この結果は、ギャップが大きい限り、Tracked QEMは、最良のケースにおいて元のQEMを失うことなく、現在のフレームメッシュ $\gamma^{(k)}$ の簡略化を達成できるだけでなく、前のフレームメッシュ $\gamma^{(k-1)}$ からの参照情報をより良く扱うことができることを示している。表2の結果によると、Tracked QEMは、最も細かい状況でも、より近い頂点距離を得ることができる。興味深いことに、オリジナルQEMの結果には(k-1)番目のフレームからの情報は含まれていないが、距離分布はトラッキングQEMよりも優れている。Tracked QEMの結果は平均と分散が優れていることを考慮すると、この差は妥当なものとして扱われるべきである。その理由は、QEMアルゴリズムが隣接する曲面までの距離のみを考慮し、最も近い頂点の距離が最適化目的の一部ではなかったからである。

次に、すべての有効な実験結果の平均から得られる平均性能である。実験結果の平均値を表3、表4に示す。評価指標の値では最良の結果が得られているが、2つのQEM手法の平均性能は、実際の適用シナリオにおける実際の状況に近いものである。

表3および表4のデータから、Tracked QEMとOriginal QEMは、現在のk番目のフレームにおいて、メッシュ表面距離と最近接頂点距離の両方で同様の性能を持つことがわかる。平均値の指標でも、Tracked QEMアルゴリズムは若干の劣化を生じる。

Table 3 Average value of mesh surface distance

Algorithm	Mesh	Statistical indicator				
		Ave	Var	STD	MSE	RMSE
Orig QEM	(k-1)-th	101.4	18424	135.7	95.34	9.764
	k-th	57.84	4578	67.66	48.40	6.957
Track QEM	(k-1)-th	64.26	4246	65.16	55.25	7.433
	k-th	60.96	4122	64.20	52.52	7.247

分散を除いて有効な数字を4つ保持する。

Table 4 最近接頂点距離の平均値

Algorithm	Mesh	統計的指標				
		Ave	Var	STD	MSE	RMSE
Orig QEM	(k-1)-th	222.4	55731	236.0	220.5	14.85
	k-th	174.5	33238	182.3	176.3	13.27
Track QEM	(k-1)-th	187.5	37425	193.4	167.7	12.95
	k-th	185.0	35124	187.4	165.9	12.88

分散を除いて有効な数字を4つ保持する。

とはいえ、前の(k-1)番目のフレームでの追跡QEMの2つの距離がうまく最適化され、現在のk番目のフレームと同様の統計指標を達成できることは容易に理解できる。この結果は、2つのフレーム間のトポロジー構造が大きく変化した場合、Tracked QEMはこの変化をよく捉え、動的メッシュデシメーションタスクにおいて従来のQEMよりも優れた時間的整合性を達成することができることを示している。

4.4 Analysis and discussion

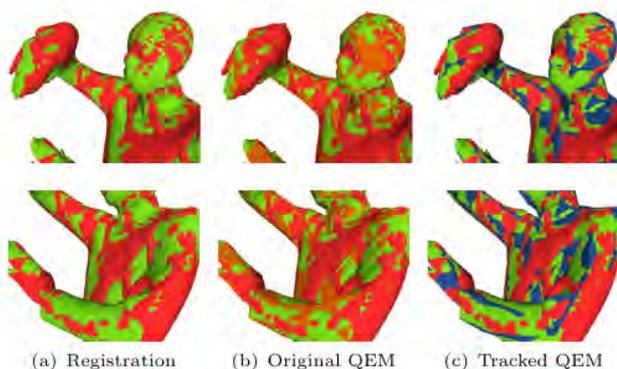


Fig. 16 Comparison with Traditional QEM Algorithm

簡略化した結果メッシュ $\gamma^{(k-1)}$ を現在のフレームメッシュ $\gamma^{(k)}$ のように正確な座標に揃えると、図16.(a)に示すように、2つのメッシュの表面は高度に一致し、局所的な交差が生じるはずである。したがって、簡略化された結果メッシュ(k)は、重なり合った新しい表面に対して、より見栄えが良くなるはずである。

cal metrics. Five metrics were chosen to quantify algorithm performance in this study: average, Mean, Variance, Standard Deviation, Mean Square Error, and Root Mean Square Error. These metrics are used to characterize the distribution of error distances. Since smaller distance values are usually better, smaller statistical values also mean better results.

Table 1 Best result of mesh surface distance

Algorithm	Mesh	Statistical indicator				
		Ave	Var	STD	MSE	RMSE
Orig QEM	($k-1$)-th	82.73	6143	78.37	56.97	7.547
	k -th	46.23	2129	46.14	21.48	4.635
Track QEM	($k-1$)-th	52.36	2448	49.47	22.42	4.734
	k -th	45.80	1975	44.44	20.41	4.518

Retain 4 valid digits except variance.

Table 2 Best result of nearest vertex distance

Algorithm	Mesh	Statistical indicator				
		Ave	Var	STD	MSE	RMSE
Orig QEM	($k-1$)-th	178.2	28798	169.7	122.4	11.06
	k -th	139.0	22320	149.4	117.3	10.82
Track QEM	($k-1$)-th	144.7	24211	155.6	125.2	11.19
	k -th	134.8	20793	144.2	113.4	10.64

Retain 4 valid digits except variance.

The results in Table.1 and Table.2 are the best results that can be obtained on test data separately for the Tracked and Original QEM algorithm. Table.1 shows that the Tracked QEM achieved better surface distance results in all indicators. This result indicates that unless the gap is not large, the Tracked QEM not only can the simplification of the current frame $mesh^{(k)}$ be achieved without losing the original QEM in the best case, but it can also handle the reference information from previous frame $mesh^{\gamma(k-1)}$ better.

According to the result in Table.2, Tracked QEM can also get the closer vertex distance in the finest of circumstances. Interestingly, although the results of the Original QEM do not include the information from ($k-1$)-th frame, the distance distribution is better than the Tracked QEM. Considering that the results of Tracked QEM do have a better mean and variance, this difference should be treated as reasonable. The reason is that the QEM algorithm only considers the distance to the neighbouring surfaces, and the nearest vertex distance was not part of the optimization objective.

Then is the average performance, which comes from the average of all effective experimental results. The average value of the experimental results is shown in Table.3 and Table.4. Although the best result is better in the value of evaluation metrics, the average performance of the two QEM methods is closer to the real situation in the actual application scenario.

The data in Table.3 and Table.4 shows that Tracked QEM and Original QEM have similar performance at the current k -th frame both on the mesh surface distance and nearest vertex distance. Even on the indicator of mean value, the Tracked QEM algorithm produces a slight degradation.

Table 3 Average value of mesh surface distance

Algorithm	Mesh	Statistical indicator				
		Ave	Var	STD	MSE	RMSE
Orig QEM	($k-1$)-th	101.4	18424	135.7	95.34	9.764
	k -th	57.84	4578	67.66	48.40	6.957
Track QEM	($k-1$)-th	64.26	4246	65.16	55.25	7.433
	k -th	60.96	4122	64.20	52.52	7.247

Retain 4 valid digits except variance.

Table 4 Average value of nearest vertex distance

Algorithm	Mesh	Statistical indicator				
		Ave	Var	STD	MSE	RMSE
Orig QEM	($k-1$)-th	222.4	55731	236.0	220.5	14.85
	k -th	174.5	33238	182.3	176.3	13.27
Track QEM	($k-1$)-th	187.5	37425	193.4	167.7	12.95
	k -th	185.0	35124	187.4	165.9	12.88

Retain 4 valid digits except variance.

Nevertheless, it is easy to see that the two distances of the Tracked QEM at the previous ($k-1$)-th frame are optimized well, which can even achieve similar statistic indicators to the current k -th frame. This result shows that when the topology structure between the two frames changes considerably, the Tracked QEM can capture this change well to achieve better temporal consistency than the traditional QEM in the dynamic Mesh decimation task.

4.4 Analysis and discussion

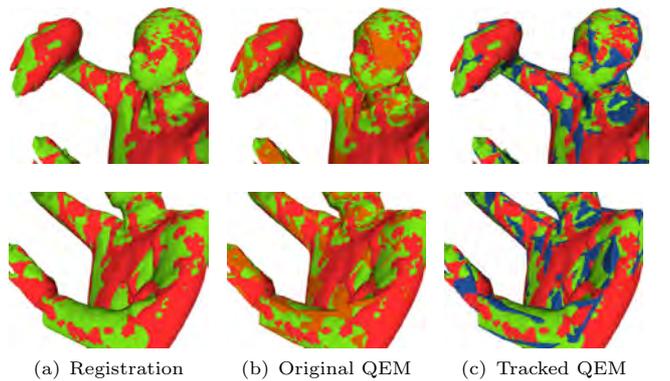


Fig. 16 Comparison with Traditional QEM Algorithm

If the simplified result $mesh^{\gamma(k-1)}$ is aligned to the exact coordinates as the current frame $mesh^{(k)}$, the surfaces of two meshes should be highly coincident and produce some local crossings, as shown in Fig.16.(a). Accordingly, the simplified result $\overline{mesh}^{(k)}$ should be more flattering in appearance to the new overlapped surfaces

after alignment.

比較実験の可視化は、統計的指標からの結論も裏付けることができ、追跡QEMによる結果(図16. (c)の青いメッシュ)は、元のQEM(図16. (b)のオレンジのメッシュ)よりも外観が似ている。追跡されたQEMの結果は、キャラクターの顔や手のひらのような細かいディテールによく適合していることが明らかになった。

別の観点からは、比較実験の結果、ほとんどの場合、Tracked QEMアルゴリズムは、現在のk番目のフレームの簡略化された性能を有意に改善しないことが示された。しかし、このアルゴリズムの利点はフレーム間の時間的整合性であり、比較結果はこの意見を証明するものである。

参照を導入することで、Tracked QEMは、登録された前のフレームメッシュ $V^{(k-1)}$ から現在のフレームメッシュ $V^{(k)}$ に近いレベルまで簡略化した結果を圧縮することができ、簡略化したメッシュ $V^{(k)}$ が元のQEMと同程度の精度を同時に持つことを保証し、Tracked QEMが現在のフレームの簡略化に影響を与えず、動的メッシュデシメーションの時間整合性を大幅に改善できることを証明した。

3Dボリュームビデオ圧縮の場合、メッシュデシメーションはエンコーダパイプライン全体の第一段階である。後続のエンコーダがビデオをより良く圧縮できるように、ビデオ内の冗長な情報を削減することを目的としている。トラックQEMの単純化結果は、時間的整合性を著しく改善する。簡略化されたメッシュシーケンスをより連続的にすることで、このような冗長性を明確にし、エンコーダパイプラインの後続ステップで3Dボリュームビデオをより良く圧縮するのに役立つ。

5. Conclusion

本論文では、連続フレーム間の時間的整合性を改善するために、前のフレームからの追加入力を参照として使用できる、特殊なTracked QEM Algorithmを提案した。この探索では、従来のメッシュ簡略化アルゴリズムを動的メッシュデシメーションタスクに拡張する可能性について議論し、3Dボリュームビデオエンコーディングの前処理におけるメッシュデシメーションのための調整されたソリューションを提供し、連続するフレーム間の差をシームレスに埋める。

最も革新的な点は、3Dメッシュレジストレーションの適用であり、これにより、連続するフレームを横断するメッシュモデルの追跡が容易になり、

それによって、簡略化プロセスの時間的一貫性が確保される。この改善により、再設計された崩壊コスト関数と近似最適探索戦略は、簡略化されたメッシュシーケンスの滑らかさを保証する。

実験結果は、追跡されたQEMが時間的一貫性を維持する上で優れた性能を発揮することを強調していることを示している。登録された前のフレームまでの誤差距離は、現在のフレームに近い近似値に縮小される。本研究は、前処理段階における3Dビデオ圧縮率を向上させる可能性を示した。今後の研究では、この方法を標準的な3Dビデオコーディングパイプラインに統合し、圧縮率への影響をさらに評価し、その後の研究を刺激することが期待される。

本研究は、総務省(MIC)より助成を受けた(助成番号:JPJ000595)。

References

- 1) C. Ziker, B. Truman, H. Dodds : "Cross reality (XR): Challenges and opportunities across the spectrum", Innovative learning environments in STEM higher education: Opportunities, challenges, and looking forward, pp.55-77 (2021)
- 2) J. Xiong, E.-L. Hsiang, Z. He, T. Zhan, S.-T. Wu : "Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives", Light: Science & Applications, 10,1, pp.216 (2021)
- 3) O. Schreer, I. Feldmann, S. Renault, M. Zepp, M. Worchel, P. Eisert, P. Kauff : "Capture and 3D video processing of volumetric video", 2019 IEEE International conference on image processing (ICIP), pp.4310-4314 (2019)
- 4) M. Xu, C. Li, S. Zhang, P. Le Callet : "State-of-the-Art in 360° Video/Image Processing: Perception, Assessment and Compression", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 14,1, pp.5-26 (2020)
- 5) M. Wien, J.M. Boyce, T. Stockhammer, W.-H. Peng : "Standardization status of immersive video coding", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 9,1, pp.5-17. (2019)
- 6) T. Sikora : "MPEG digital video-coding standards", IEEE signal processing magazine, 14,5, pp.82-100 (1997)
- 7) J.M. Boyce, R. Doré, A. Dziembowski, J.

after alignment.

Visualization of the comparative experiment can also support conclusions from statistical indicators, result by tracked QEM (Blue mesh in Fig.16.(c)) have a more similar appearance than the original QEM (Orange mesh in Fig.16.(b)). It was evident that the tracked QEM's result is better fitted with finer details like the character's face and palm.

From another perspective, the comparative experiment results show that in most cases, the Tracked QEM algorithm does not significantly improve the simplified performance of the current k -th frame. However, the algorithm's advantage is the temporal consistency between frames; the comparative results prove this opinion.

By introducing reference, Tracked QEM can compress the simplified results from the distance from the registered previous frame $mesh^{\gamma(k-1)}$ to the level similar to the current frame $mesh^{(k)}$, and ensure the simplified $\overline{mesh^{(k)}}$ still have the similar accuracy to the original QEM simultaneously, which proved that the Tracked QEM can significantly improve the time consistency of dynamic mesh decimation without affecting the simplification of the current frame.

For 3D volumetric video compression, mesh decimation is the first stage of the whole encoder pipeline. It aims to reduce the redundant information in the video so that subsequent encoders can compress the video better. The simplification result of track QEM remarkably improves temporal consistency. It makes the simplified mesh sequence more continuous to delineate such redundancies, which helps compress the 3D volumetric video better in the subsequent steps of the encoder pipeline.

5. Conclusion

In this paper, a specialized Tracked QEM Algorithm was proposed, which can use an additional input as a reference from the previous frame to improve temporal consistency between continuous frames. This exploration discussed the potential to extend the conventional mesh simplification algorithm to the dynamic mesh decimation task, offering a tailored solution for mesh decimation in the pre-processing of 3D volumetric video encoding, which seamlessly bridges the difference between consecutive frames.

The most innovative aspect is the application of 3D mesh registration, which facilitates the tracking of mesh models across successive frames, thereby ensuring the

temporal consistency of the simplification process. Due to this improvement, the redesigned collapse cost function and the approximate optimal search strategy guarantee the smoothness of simplified mesh sequences.

The experimental results show that tracked QEM emphasizes its excellent performance in maintaining temporal consistency. The error distance to the registered previous frame is reduced to a close approximation to the current frame. This study demonstrated the potential to improve 3D video compression rates at the pre-processing stage. In future work, the method is expected to be integrated into the standard 3D video coding pipeline to evaluate its impact on compression rates further and inspire subsequent research.

Acknowledgment This work was supported by Ministry of Internal Affairs and Communications (MIC) of Japan (Grant no. JPJ000595).

References

- 1) C. Ziker, B. Truman, H. Dodds : "Cross reality (XR): Challenges and opportunities across the spectrum", Innovative learning environments in STEM higher education: Opportunities, challenges, and looking forward, pp.55-77 (2021)
- 2) J. Xiong, E.-L. Hsiang, Z. He, T. Zhan, S.-T. Wu : "Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives", Light: Science & Applications, 10,1, pp.216 (2021)
- 3) O. Schreer, I. Feldmann, S. Renault, M. Zepp, M. Worchel, P. Eisert, P. Kauff : "Capture and 3D video processing of volumetric video", 2019 IEEE International conference on image processing (ICIP), pp.4310-4314 (2019)
- 4) M. Xu, C. Li, S. Zhang, P. Le Callet : "State-of-the-Art in 360° Video/Image Processing: Perception, Assessment and Compression", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 14,1, pp.5-26 (2020)
- 5) M. Wien, J.M. Boyce, T. Stockhammer, W.-H. Peng : "Standardization status of immersive video coding", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 9,1, pp.5-17 (2019)
- 6) T. Sikora : "MPEG digital video-coding standards", IEEE signal processing magazine, 14,5, pp.82-100 (1997)
- 7) J.M. Boyce, R. Doré, A. Dziembowski, J.

- フルロー、J・ユング、B・クロン、B・サラヒー、V・K・M.Vadakital, L. Yu : "MP EG没入型ビデオ符号化規格", IEEE, 109, 9, pp.1521-1536 (2021)
- 8) K. Mammou, J. Kim, A.M.Tourapis, D. Podborski, D. Flynn : "ビデオと細分化に基づくメッシュコーディング", 2022 第10回視覚情報処理ワークショップ(EUVIP), pp.1-6 (2022)
- 9) Y. Choi, J.-B. Jeong, S. Lee, E.-S. Ryu : "Overview of the Video-based Dynamic Mesh Coding (V-DMC) Standard Work", 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), pp.578-581 (2022)
- 10) M. Garland, P.S. Heckbert : "Surface simplification using quadric error metrics", Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.209-216 (1997)
- 11) A. Maglo, G. Lavoué, F. Dupont, C. Hudelot : "3d mesh compression: Survey, comparisons, and emerging trends", ACM Computing Surveys (CSUR), 47,3, pp.1-41 (2015)
- 12) I. Viola, P. Cesar : "Chapter 15 - Volumetric video streaming: Current approaches and implementations", Immersive Video Technologies, Academic Press, pp.425-443 (2023)
- 13) Y. "3D粗いレジストレーション手法に関する定性的レビュー", ACM Computing Surveys (CSUR), 47,3, pp.1-36 (2015)
- 14) G. K.L. タム, Z.-Q. チェン, Y.-K. ライ, F.C. ラングバイン, Y. リュー, D. マーシャル, R.R.Martin, X.-F. Sun, P.L. Rosin : "Registration of 3D Point Clouds and Meshes: (2013)M. ロドリゲス, R. フィッシャー, Y. リュー: "はじめに: レンジ画像のレジストレーションとフュージョンに関する特集", コンピュータビジョンと画像理解, 87, pp.1-7 (2002)
- 15) J. Salvi, C. Matabosch, D. Fofi, J. Forest : "精度評価を伴う最近のレンジ画像登録手法のレビュー", 画像と視覚コンピューティング, 25, 5, pp.578-596 (2007)
- 16) R. Sandhu, S. Dambreville, A. Tannenbaum : "確率的ダイナミクスを持つ2Dおよび3D点集合のレジストレーションのための粒子フィルタリング", 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1-8 (2008)
- 17) D. Aiger, N.J. Mitra, D. Cohen-Or : "ロバストなペアワイズサーフェスレジストレーションのための4点一致集合", ACM SIGGRAPH 2008 論文, pp.1-10 (2008)
- 18) A. Myronenko, X. Song : "Point set registration: Coherent point drift", IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 32,12, pp.2262-2275 (2010)
- 19) B. Bellekens, V. Spruyt, R. Berkvens, M. Weyn : "A survey of rigid 3d point cloud registration algorithms", AMBIENT 2014: the Fourth International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies, August 24-28, 2014, Rome, Italy, pp.8-13 (2014)
- 20) D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov, P. Krsek : "The trimmed iterative closest point algorithm", 2002 International Conference on Pattern Recognition, 3, pp.545-548 (2002)
- 21) D. Chetverikov, D. Stepanov, P. Krsek : "Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm", Image and vision computing, 23,3, pp.299-309 (2005)
- 22) S. Bouaziz, A. Tagliasacchi, M. Pauly : "Sparse iterative closest point", Computer graphics forum, 32,5, pp.113-123 (2013)
- 23) J. Zhang, Y. Yao, B. Deng : "Fast and robust iterative closest point", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 44,7, pp.3450-3466 (2021)
- 24) S. Rusinkiewicz, M. Levoy : "Efficient variants of the ICP algorithm", Proceedings third international conference on 3-D digital imaging and modeling, pp.145-152 (2001)
- 25) P.J. Besl, N.D. McKay : "Method for registration of 3-D shapes", Sensor fusion IV: control paradigms and data structures, 1611, pp.586-606 (1992)
- 26) J. Serafin, G. Grisetti : "NIPC: Dense normal based point cloud registration", 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.742-749 (2015)
- 27) O. van Kaick, H. Zhang, G. Hamarneh, D. Cohen-Or : "A Survey on Shape Correspondence", Computer Graphics Forum, 30,6, pp.1681-1707 (2011)
- 28) R.W. Sumner, J. Schmid, M. Pauly : "Embedded deformation for shape manipulation", ACM

- Fleureau, J. Jung, B. Kroon, B. Salahieh, V.K.M. Vadakital, L. Yu : “MPEG immersive video coding standard”, *Proceedings of the IEEE*, 109,9, pp.1521-1536 (2021)
- 8) K. Mammou, J. Kim, A.M. Tourapis, D. Podborski, D. Flynn : “Video and Subdivision based Mesh Coding”, *2022 10th European Workshop on Visual Information Processing (EUVIP)*, pp.1-6 (2022)
- 9) Y. Choi, J.-B. Jeong, S. Lee, E.-S. Ryu : “Overview of the Video-based Dynamic Mesh Coding (V-DMC) Standard Work”, *2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp.578-581 (2022)
- 10) M. Garland, P.S. Heckbert : “Surface simplification using quadric error metrics”, *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.209-216 (1997)
- 11) A. Maglo, G. Lavoué, F. Dupont, C. Hudelot : “3d mesh compression: Survey, comparisons, and emerging trends”, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47,3, pp.1-41 (2015)
- 12) I. Viola, P. Cesar : “Chapter 15 - Volumetric video streaming: Current approaches and implementations”, *Immersive Video Technologies*, Academic Press, pp.425-443 (2023)
- 13) Y. Diez, F. Roure, X. Lladó, J. Salvi : “A qualitative review on 3D coarse registration methods”, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47,3, pp.1-36 (2015)
- 14) G.K.L. Tam, Z.-Q. Cheng, Y.-K. Lai, F.C. Langbein, Y. Liu, D. Marshall, R.R. Martin, X.-F. Sun, P.L. Rosin : “Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Non-rigid”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19,7, pp.1199-1217 (2013)
- 15) M. Rodrigues, R. Fisher, Y. Liu : “Introduction: Special issue on registration and fusion of range images”, *Computer Vision and Image Understanding*, 87, pp.1-7 (2002)
- 16) J. Salvi, C. Matabosch, D. Fofi, J. Forest : “A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation”, *Image and Vision computing*, 25,5, pp.578-596 (2007)
- 17) R. Sandhu, S. Dambreville, A. Tannenbaum : “Particle filtering for registration of 2D and 3D point sets with stochastic dynamics”, *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1-8 (2008)
- 18) D. Aiger, N.J. Mitra, D. Cohen-Or : “4-points congruent sets for robust pairwise surface registration”, *ACM SIGGRAPH 2008 papers*, pp.1-10 (2008)
- 19) A. Myronenko, X. Song : “Point set registration: Coherent point drift”, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32,12, pp.2262-2275 (2010)
- 20) B. Bellekens, V. Spruyt, R. Berkvens, M. Weyn : “A survey of rigid 3d point cloud registration algorithms”, *AMBIENT 2014: the Fourth International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*, August 24-28, 2014, Rome, Italy, pp.8-13 (2014)
- 21) D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov, P. Krsek : “The trimmed iterative closest point algorithm”, *2002 International Conference on Pattern Recognition*, 3, pp.545-548 (2002)
- 22) D. Chetverikov, D. Stepanov, P. Krsek : “Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm”, *Image and vision computing*, 23,3, pp.299-309 (2005)
- 23) S. Bouaziz, A. Tagliasacchi, M. Pauly : “Sparse iterative closest point”, *Computer graphics forum*, 32,5, pp.113-123 (2013)
- 24) J. Zhang, Y. Yao, B. Deng : “Fast and robust iterative closest point”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44,7, pp.3450-3466 (2021)
- 25) S. Rusinkiewicz, M. Levoy : “Efficient variants of the ICP algorithm”, *Proceedings third international conference on 3-D digital imaging and modeling*, pp.145-152 (2001)
- 26) P.J. Besl, N.D. McKay : “Method for registration of 3-D shapes”, *Sensor fusion IV: control paradigms and data structures*, 1611, pp.586-606 (1992)
- 27) J. Serafin, G. Grisetti : “NICP: Dense normal based point cloud registration”, *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.742-749 (2015)
- 28) O. van Kaick, H. Zhang, G. Hamarneh, D. Cohen-Or : “A Survey on Shape Correspondence”, *Computer Graphics Forum*, 30,6, pp.1681-1707 (2011)
- 29) R.W. Sumner, J. Schmid, M. Pauly : “Embedded deformation for shape manipulation”, *ACM*

- SIGGRAPH 2007 論文, pp.80-es (2007) H . ポトマン, Q.-X. Huang, Y.-L. Yang, S .-M. Hu : "Geometry and convergence a nalysis of algorithms for registratio n of 3D shapes", International Journa l of Computer Vision, 67, pp.277296 (2006) B. Amberg, S. Romdhani, T. Vett er : "Optimal step nonrigid ICP algor ithms for surface registration", 2007 IEEE conference on computer vision a nd pattern recognition, pp.ion, pp.17 4-181 (2012) S. Monji-Azad, J. Hesser , N. Löw : "非剛体変換と学習ベースの3 D点群登録手法のレビュー", ISPRS Journ al of Photogrammetry and Remote Sensi ng, 196, pp.58-72 (2023) H. Chui, A. Rangarajan : "非剛体レジストレーショ ンのための新しい点マッチングアルゴリ ズム", コンピュータビジョンと画像理解 , 89,2-3, pp.114141 (2003) N. Gelfand , N. J. ミトラ, L. J. ギバス, H. ポトマン: 「ロバストなグローバル登録」, Sym- posium on geometry processing, 2,3, pp.5 (2005)
- 30) B. Jian, B.C. Vemuri : "A robust algorithm for point set registration using mixture of Gaussians", Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1, 2, pp.1246-1251 (2005)
- 31) J. Ma, W. Qiu, J. Zhao, Y. Ma, A.L. Yuille, Z. Tu : "Robust L_2E estimation of transformation for non-rigid registration", IEEE Transactions on Signal Processing, 63,5, pp.1115-1129 (2015)
- 32) Y. Yao, B. Deng, W. Xu, J. Zhang : "Quasi-Newton solver for robust non-rigid registra- tion", Proceedings of the IEEE/CVF confer- ence on computer vision and pattern recognition, pp.7600-7609 (2020)
- 33) P.W. Holland, R.E. Welsch : "Robust regres- sion using iteratively reweighted least-squares", Communications in Statistics-theory and Meth- ods, 6,9, pp.813-827 (1977)
- 34) D.P. Luebke : "A developer's survey of polygo- nal simplification algorithms", IEEE Computer Graphics and Applications, 21,3, pp.24-35 (2001)
- 35) M.-E. Algorri, F. Schmitt : "Mesh Simplifica- tion", Computer Graphics Forum, 15,3, pp.77-86 (1996)
- 42) J.O. Talton : "A short survey of mesh simplifica- tion algorithms", University of Illinois at Urbana- Champaign (2004)
- 43) W.J. Schroeder, J.A. Zarge, W.E. Lorensen : "Decimation of triangle meshes", Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.65-70 (1992)
- 44) P. Lindstrom, D. Koller, W. Ribarsky, L.F. Hodges, N. Faust, G.A. Turner : "Real-time, con- tinuous level of detail rendering of height fields", Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.109-118 (1996)
- 45) R. Ronfard, J. Rossignac : "Full-range approx- imation of triangulated polyhedra.", Computer graphics forum, 15,3, pp.67-76 (1996)
- 46) W.J. Schroeder : "A topology modifying pro- gressive decimation algorithm", Proceedings. Vi- sualization'97 (Cat. No. 97CB36155), pp.205-212 (1997)
- 47) S.J. Kim, W.K. Jeong, C.H. Kim : "LOD gener- ation with discrete curvature error metric", Pro- ceedings of Korea Israel Bi-National Conference, pp.97-104 (1999)
- 48) R. Klein, G. Liebich, W. Straßer : "Mesh reduc- tion with error control", Proceedings of Seventh Annual IEEE Visualization'96, pp.311-318 (1996)
- 49) P.S. Heckbert, M. Garland : "Optimal trian- gulation and quadric-based surface simplifica- tion", Computational Geometry, 14,1-3, pp.49-65 (1999)
- 50) S.-J. Kim, C.-H. Kim, D. Levin : "Surface simpli- fication using a discrete curvature norm", Com- puters & Graphics, 26,5, pp.657-663 (2002)
- 51) M. Garland, Y. Zhou : "Quadric-based simplifi- cation in any dimension", ACM Transactions on Graphics (TOG), 24,2, pp.209-239 (2005)
- 52) H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDon- ald, W. Stuetzle : "Mesh optimization", Proceed- ings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.19-26 (1993)
- 53) H. Hoppe : "Progressive meshes", Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graph- ics and Interactive Techniques, pp.99-108 (1996)
- 54) H. Hoppe : "View-dependent refinement of pro- gressive meshes", Proceedings of the 24th annual

- SIGGRAPH 2007 Papers, pp.80–es (2007)
- 30) H. Pottmann, Q.-X. Huang, Y.-L. Yang, S.-M. Hu : “Geometry and convergence analysis of algorithms for registration of 3D shapes”, *International Journal of Computer Vision*, 67, pp.277-296 (2006)
 - 31) B. Amberg, S. Romdhani, T. Vetter : “Optimal step nonrigid ICP algorithms for surface registration”, *2007 IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp.1-8 (2007)
 - 32) H. Hontani, T. Matsuno, Y. Sawada : “Robust nonrigid ICP using outlier-sparsity regularization”, *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.174-181 (2012)
 - 33) S. Monji-Azad, J. Hesser, N. Löw : “A review of non-rigid transformations and learning-based 3D point cloud registration methods”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 196, pp.58-72 (2023)
 - 34) H. Chui, A. Rangarajan : “A new point matching algorithm for non-rigid registration”, *Computer Vision and Image Understanding*, 89,2-3, pp.114-141 (2003)
 - 35) N. Gelfand, N.J. Mitra, L.J. Guibas, H. Pottmann : “Robust global registration”, *Symposium on geometry processing*, 2,3, pp.5 (2005)
 - 36) B. Jian, B.C. Vemuri : “A robust algorithm for point set registration using mixture of Gaussians”, *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV’05) Volume 1, 2*, pp.1246-1251 (2005)
 - 37) J. Ma, W. Qiu, J. Zhao, Y. Ma, A.L. Yuille, Z. Tu : “Robust L_2E estimation of transformation for non-rigid registration”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63,5, pp.1115-1129 (2015)
 - 38) Y. Yao, B. Deng, W. Xu, J. Zhang : “Quasi-newton solver for robust non-rigid registration”, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, pp.7600-7609 (2020)
 - 39) P.W. Holland, R.E. Welsch : “Robust regression using iteratively reweighted least-squares”, *Communications in Statistics-theory and Methods*, 6,9, pp.813-827 (1977)
 - 40) D.P. Luebke : “A developer’s survey of polygonal simplification algorithms”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21,3, pp.24-35 (2001)
 - 41) M.-E. Algorri, F. Schmitt : “Mesh Simplification”, *Computer Graphics Forum*, 15,3, pp.77-86 (1996)
 - 42) J.O. Talton : “A short survey of mesh simplification algorithms”, *University of Illinois at Urbana-Champaign* (2004)
 - 43) W.J. Schroeder, J.A. Zarge, W.E. Lorensen : “Decimation of triangle meshes”, *Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.65-70 (1992)
 - 44) P. Lindstrom, D. Koller, W. Ribarsky, L.F. Hodges, N. Faust, G.A. Turner : “Real-time, continuous level of detail rendering of height fields”, *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp.109-118 (1996)
 - 45) R. Ronfard, J. Rossignac : “Full-range approximation of triangulated polyhedra.”, *Computer graphics forum*, 15,3, pp.67-76 (1996)
 - 46) W.J. Schroeder : “A topology modifying progressive decimation algorithm”, *Proceedings. Visualization’97 (Cat. No. 97CB36155)*, pp.205-212 (1997)
 - 47) S.J. Kim, W.K. Jeong, C.H. Kim : “LOD generation with discrete curvature error metric”, *Proceedings of Korea Israel Bi-National Conference*, pp.97-104 (1999)
 - 48) R. Klein, G. Liebich, W. Straßer : “Mesh reduction with error control”, *Proceedings of Seventh Annual IEEE Visualization’96*, pp.311-318 (1996)
 - 49) P.S. Heckbert, M. Garland : “Optimal triangulation and quadric-based surface simplification”, *Computational Geometry*, 14,1-3, pp.49-65 (1999)
 - 50) S.-J. Kim, C.-H. Kim, D. Levin : “Surface simplification using a discrete curvature norm”, *Computers & Graphics*, 26,5, pp.657-663 (2002)
 - 51) M. Garland, Y. Zhou : “Quadric-based simplification in any dimension”, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24,2, pp.209-239 (2005)
 - 52) H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, W. Stuetzle : “Mesh optimization”, *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp.19–26 (1993)
 - 53) H. Hoppe : “Progressive meshes”, *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp.99–108 (1996)
 - 54) H. Hoppe : “View-dependent refinement of progressive meshes”, *Proceedings of the 24th annual*

- conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.189-198 (1997)
- 55) A. Khodakovsky, P. Schröder, W. Sweldens : “Progressive geometry compression”, Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.271-278 (2000)
- 56) P. Alliez, M. Desbrun : “Progressive compression for lossless transmission of triangle meshes”, Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.195-202 (2001)
- 57) C. DeCoro, N. Tatarchuk : “Real-time mesh simplification using the GPU”, Proceedings of the 2007 symposium on Interactive 3D graphics and games, pp.161-166 (2007)
- 58) A. Papageorgiou, N. Platis : “Triangular mesh simplification on the GPU”, The Visual Computer, 31, pp.235-244 (2015)
- 59) H. Lee, M.-H. Kyung : “Parallel mesh simplification using embedded tree collapsing”, The Visual Computer, 32,6-8, pp.967-976 (2016)
- 60) Y. Liang, F. He, X. Zeng : “3D mesh simplification with feature preservation based on whale optimization algorithm and differential evolution”, Integrated Computer-Aided Engineering, 27,4, pp.417-435 (2020)
- 61) R.A. Potamias, G. Bouritsas, S. Zafeiriou : “Revisiting point cloud simplification: A learnable feature preserving approach”, Computer Vision—ECCV 2022: 17th European Conference, Tel Aviv, Israel, October 23–27, 2022, Proceedings, Part II, pp.586-603 (2022)
- 62) R.A. Potamias, S. Ploumpis, S. Zafeiriou : “Neural mesh simplification”, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.18583-18592 (2022)
- 63) H. Hoppe : “New quadric metric for simplifying meshes with appearance attributes”, Proceedings Visualization’99 (Cat. No. 99CB37067), pp.59-510 (1999)
- 64) T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, S. Nobuhara : “Real-time 3D shape reconstruction, dynamic 3D mesh deformation, and high fidelity visualization for 3D video”, Computer Vision and Image Understanding, 96,3, pp.393-434 (2004)
- 65) G. Pavlakos, J. Malik, A. Kanazawa : “Human mesh recovery from multiple shots”, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1485-1495 (2022)
- 66) Y. Liu, J. Xu, K. Kawamura, H. Watanabe : “Measure The Difference between Frames: Reconsidering The Evaluation Method in Dynamic Mesh Simplification”, 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.372-375 (2023)
- 67) A. Guezlec : “Meshsweeper: dynamic point-to-polygonal mesh distance and applications”, IEEE Transactions on visualization and computer graphics, 7,1, pp.47-61 (2001)



劉雲龍 B.E.を取得。2019年に南京郵電大学から学位を取得し、M.E.を取得した。は、2022年に早稲田大学からそれぞれ現在、早稲田大学大学院基礎科学研究所で博士号取得を目指している。主な研究テーマはコンピュータサイエンスと通信工学。

ディープラーニング、コンピュータビジョン、マルチメディア技術に関する研究に従事。本論文は、3Dビデオ処理に関連する試みである。



徐建鋒 理学士号を取得。(2001年と2004年にそれぞれ中国清華大学から博士号(優等)と修士号(優等)を取得し、博士号を取得した。2007年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。株式会社KDDIリサーチに勤務。2007年より現職、現在は先進視覚通信研究所のコア研究員。研究テーマは、動的メッシュ符号化技術と標準化、コンピュータグラフィックスとコンピュータビジョン、およびディープラーニング技術。電子情報通信学会およびITE会員。



河村 圭は、BE、MSc、PhDを取得した。2004年、2005年、2013年に早稲田大学大学院情報通信学研究所で博士号を取得。2010年にKDDIに入社。JCT-VC、JVET、MPEG-3DGHのHEVC、VVC、V-DMC標準の開発に携わる。現在、株式会社KDDIリサーチでビデオおよびダイナミックメッシュコーディングシステムの研究開発に従事。研究テーマは、画像・映像処理、映像・動的メッシュ符号化、マルチメディア配信など。2020年からITU-T研究グループ9の質問の報告者。IEEE、電子情報通信学会、ITE会員。



渡辺 裕(B.E., M.E.)1980年、1982年、1985年にそれぞれ北海道大学で工学博士号を取得。1985年に日本電信電話株式会社(NTT)に入社し、NTTヒューマンインターフェースラボで画像・映像符号化システムの研究開発に従事。2000年までNTTサイバースペース研究所に勤務。また、JTC 1u/SC 29の下でJPEG、MPEG規格の開発に携わる。

現在、早稲田大学基礎科学工学部通信・コンピュータ工学科教授。研究テーマは、物体認識、ディープラーニング、画像処理、ビデオコーディング、マルチメディア配信など。IEEE、電子情報通信学会、ITE、情報処理学会、IEEEJ会員。

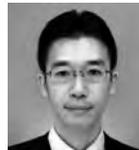
- conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.189-198 (1997)
- 55) A. Khodakovsky, P. Schröder, W. Sweldens : “Progressive geometry compression”, Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.271-278 (2000)
- 56) P. Alliez, M. Desbrun : “Progressive compression for lossless transmission of triangle meshes”, Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.195-202 (2001)
- 57) C. DeCoro, N. Tatarchuk : “Real-time mesh simplification using the GPU”, Proceedings of the 2007 symposium on Interactive 3D graphics and games, pp.161-166 (2007)
- 58) A. Papageorgiou, N. Platis : “Triangular mesh simplification on the GPU”, The Visual Computer, 31, pp.235-244 (2015)
- 59) H. Lee, M.-H. Kyung : “Parallel mesh simplification using embedded tree collapsing”, The Visual Computer, 32,6-8, pp.967-976 (2016)
- 60) Y. Liang, F. He, X. Zeng : “3D mesh simplification with feature preservation based on whale optimization algorithm and differential evolution”, Integrated Computer-Aided Engineering, 27,4, pp.417-435 (2020)
- 61) R.A. Potamias, G. Bouritsas, S. Zafeiriou : “Revisiting point cloud simplification: A learnable feature preserving approach”, Computer Vision–ECCV 2022: 17th European Conference, Tel Aviv, Israel, October 23–27, 2022, Proceedings, Part II, pp.586-603 (2022)
- 62) R.A. Potamias, S. Ploumpis, S. Zafeiriou : “Neural mesh simplification”, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.18583-18592 (2022)
- 63) H. Hoppe : “New quadric metric for simplifying meshes with appearance attributes”, Proceedings Visualization’99 (Cat. No. 99CB37067), pp.59-510 (1999)
- 64) T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, S. Nobuhara : “Real-time 3D shape reconstruction, dynamic 3D mesh deformation, and high fidelity visualization for 3D video”, Computer Vision and Image Understanding, 96,3, pp.393-434 (2004)
- 65) G. Pavlakos, J. Malik, A. Kanazawa : “Human mesh recovery from multiple shots”, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1485-1495 (2022)
- 66) Y. Liu, J. Xu, K. Kawamura, H. Watanabe : “Measure The Difference between Frames: Reconsidering The Evaluation Method in Dynamic Mesh Simplification”, 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.372-375 (2023)
- 67) A. Guezlec : “Meshsweeper: dynamic point-to-polygonal mesh distance and applications”, IEEE Transactions on visualization and computer graphics, 7,1, pp.47-61 (2001)



Yunlong Liu Yunlong Liu received the B.E. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2019, and got the M.E. from Waseda University in 2022 respectively. Now he is pursuing his Ph.D. degree at Graduate school of Fundamental Science and Engineering, Waseda University. His major is Computer Science and Communications Engineering. He is mainly concerned with research in directions related to Deep Learning, Computer Vision, and Multi-media Technology. This paper is an attempt related to 3D video processing.



Jianfeng Xu Jianfeng Xu received the B.S. (with honor) and the M.S. degrees from Tsinghua University, China, in 2001 and 2004 respectively, and the Ph.D. degree from the University of Tokyo, Japan, in 2007. He has worked at KDDI Research, Inc. since 2007 and is now a Core Researcher in the Advanced Visual Communication Laboratory. His research interests include dynamic mesh coding technologies and standardization, computer graphics and computer vision, as well as deep learning technologies. He is a member of IEICE and ITE.



Kei Kawamura Kei Kawamura received his B.E., M.Sc., and Ph.D. degrees in Global Information and Telecommunication Studies from Waseda University, Japan, in 2004, 2005, and 2013, respectively. He joined KDDI in 2010. He has been involved with developing HEVC, VVC, and V-DMC standards under JCT-VC, JVET, and MPEG-3DGH. He is currently engaged in the research and development of a video and dynamic mesh coding system at KDDI Research, Inc. His research interests include image and video processing, video and dynamic mesh coding, and multimedia distribution. He is a rapporteur of Question 1 of ITU-T Study Group 9 from 2020. He is a member of IEEE, IEICE, and ITE.



Hiroshi Watanabe received B.E., M.E. and Ph.D. degrees in Engineering from Hokkaido University in 1980, 1982, and 1985, respectively. He joined Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT) in 1985, and was engaged in research and development of image and video coding systems at NTT Human Interface Labs. and NTT Cyber Space Labs. until 2000. He has also been involved with the development of JPEG, MPEG standards under JTC 1/SC 29. He is currently a professor at the Department of Communications and Computer Engineering, School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University. His research interests include object recognition, deep learning, image processing, video coding, and multimedia distribution. He is a member of IEEE, IEICE, ITE, IPSJ, and IEEEJ.