

(36) 栈橋の維持管理を支援するテクスチャ付き 3D 簡略モデルの自動構築手法の拡張

溝口 知広¹・家村 享明²・藏重 裕俊²・水野 剣一³・谷口 修³

¹ 非会員 日本大学 工学部情報工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

E-mail: mizoguchi.tomohiro@nihon-u.ac.jp

² 非会員 株式会社計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部 (〒732-0029 広島県広島市東区
福田 1 丁目 665-1) E-mail: iemura@krcnet.co.jp, kurashige@krcnet.co.jp

³ 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail: kenichi.mizuno@mail.penta-ocean.co.jp, osamu.taniguchi@mail.penta-ocean.co.jp

カメラを搭載した栈橋調査向けの無線操作ボートが利用されるようになり、技術者が構造物の下部に進入することなく、遠隔操作にて取得した画像に基づき調査が可能となった。本研究ではこれまでに、この画像から 3D 高密度モデルを構築し、これを部材別に分割するとともに構成面ごとのオルソ画像を作成することで、維持管理に有効なテクスチャ付き 3D 簡略モデル構築手法を提案してきた。本報告ではこの手法を拡張し、栈橋を構成する各部材やそれらの配置に関する設計と機能上の一般的なルールを考慮した新たな手法を提案する。これにより、既提案法では抽出が困難であった形状クラスの杭頭や、処理の対象外としていたハンチ部のモデル化を可能とし、さらには各部材への部材ラベル自動割り当ても可能とする。様々な実験よりその有効性を検証する。

Key Words: pier, maintenance, SfM/MVS, textured 3D simplified model, CIM

1. はじめに

老朽化の進む港湾構造物の調査のため、カメラを搭載した無線操作ボートが使用されるようになり、栈橋下部の画像を遠隔操作にて取得可能となった。これにより、専門技術を有する点検者が構造物の下部に進入することなく、取得した画像に基づき点検、調査が可能となった¹⁾。撮影した画像からは、技術者による損傷度合いの判定のみでなく、SfM/MVS 処理にて構造物の 3D モデルを構築することもできるため、点検画像と 3D モデルとを対応付けて管理することが有効な手段として定着しつつある²⁾。

一般的に損傷度合いは、スラブ、梁、杭頭、ハンチ等の部材ごとに行われるため、SfM モデルからこれらの部材を自動抽出できることが望ましい。また各部材を構成する平面領域ごとに高解像のオルソ画像を作成し、この画像上でひび割れ等の劣化診断を行い、3D モデルと併せて管理できることが望まれる。

著者らはこれらの実現を目的とし、栈橋 SfM モデルの部材別分解に基づくテクスチャ付き 3D 簡略モデル構築手法を提案してきた³⁾。この手法では、比較的劣化の軽

微な梁や杭頭の側面点群を手掛かりとし、これを平面投影し、投影面上での直線検出と直線同士の接続から領域分割を行い、各領域を鉛直方向へスウィープすることで栈橋の 3D 簡略モデルを構築した。また構築したモデルの領域境界点を利用し、構成面ごとにオルソ画像を自動作成し、これを 3D モデルへマッピングすることでテクスチャ付きモデルを構築した。しかしながらこの手法では、断面形状が八角の杭頭ブロックのように、部材側面の領域面積が小さい場合には投影面に点が十分に存在せず、直線検出が行えないため、モデルが構築できないという問題があった。またハンチ領域の抽出とモデル化までは行えておらず、さらに各領域に対し、スラブ、梁、杭頭、ハンチといった部材ラベルを直接的には割り当てできていなかった。

そこで本報告では、既提案法³⁾を拡張した新たな 3D テクスチャ付き簡略モデル構築手法を提案する。提案手法では、栈橋を構成する各部材の形状や配置に関する設計・機能上の一般的なルールを考慮し、高密度 SfM モデルからの部材抽出、部材ラベルの割り当て、及び 3D モデリングが可能な手法を提案することにより上記の問題を解決し、より幅広い形状クラスの栈橋からのモデル構

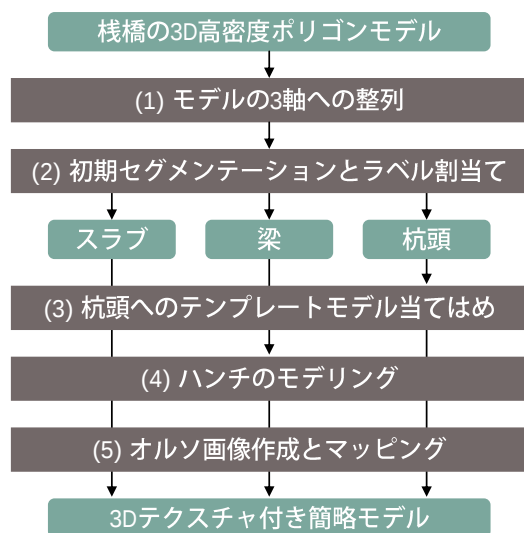


図-1 提案手法の概要

築を実現する。

2. 提案手法

提案手法は図-1 のフローに示す通り、5 つのステップから構成される。まず法線ベクトルのガウシアンマッピングやモデル中の直線検出に基づき、モデルを3軸に整列させる。次にモデル中の水平向き点群を平面投影し、投影面上での直線検出より初期セグメンテーションによる領域分割を行うとともに、各領域への部材ラベル（スラブ、梁、杭頭）の割り当てを行う。その後、杭頭領域に対してはテンプレートモデルの当てはめを行い、梁領域に対してはハンチのモデリングを行う。最後に、各部材を構成する平面領域ごとにオルソ画像を作成し、これを構築したモデルへマッピングすることで3Dテクスチャ付き簡略モデルを構築する。これらのステップの中で、RANSACに基づく平面や直線の検出を多用する。RANSACとはノイズに対してロバストに平面や直線等のモデルを算出可能な統計的手法であり、本研究対象のように複数の部材が混在する栈橋には都合がよい。以下に各ステップの詳細を述べる。

(1) モデルの3軸への整列

まず前報⁴⁾と同様に、モデルの各点の法線ベクトルのガウシアンマッピングに基づき、鉛直下向き方向を求め、これが z 方向に一致するようにモデルを整列させる。次に、法線ベクトルが水平方向を向く点を閾値処理にて抽出する。また抽出された水平向き点群のみを xy 平面に投影し、投影平面上でのRANSACにより最も多くの点が分布する直線を求め、これが x 軸に一致するようにモデルを

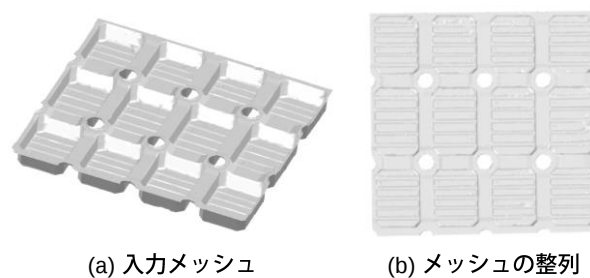
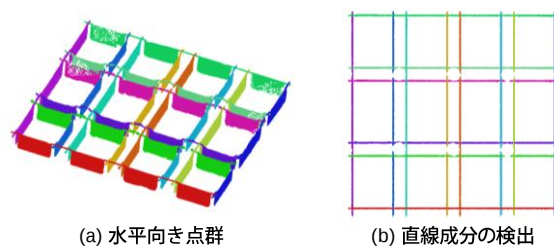
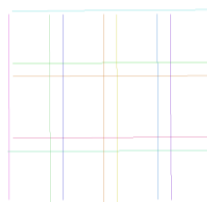


図-2 モデルの整列

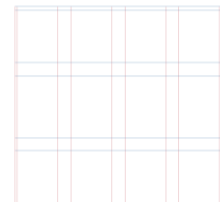


(a) 水平向き点群

(b) 直線成分の検出



(c) 直線当てはめ



(d) 直線の延長による領域分割



■：スラブ、■：梁、■：杭頭

(e) 初期セグメンテーション(左：2D, 右：3D)

図-3 初期セグメンテーションとモデリング

回転させ整列させる。これにより梁や杭頭が x 軸、 y 軸に対して整列され、後の部材抽出やモデリング処理が行いやすくなる。整列後のメッシュを図-2に示す。

(2) 初期セグメンテーションとラベル割り当て

次に、先のステップと同様に xy 平面に投影した水平向き点群(図-3(a))を対象とし、初期セグメンテーションを行う。ここで水平向き点群の大半は梁の側面領域の点に相当する。梁は直交する2方向に整列するように配置されることから、側面の点は平面上では x 、 y 方向に平行な直線上に分布する。そこでこれらをRANSACに基づき網羅的に抽出し、それぞれに直線を最小二乗法にて当てはめる(図-3(b, c))。さらにこれらの直線を延長し、4本の線分で囲まれる領域を1つとする初期セグメンテ

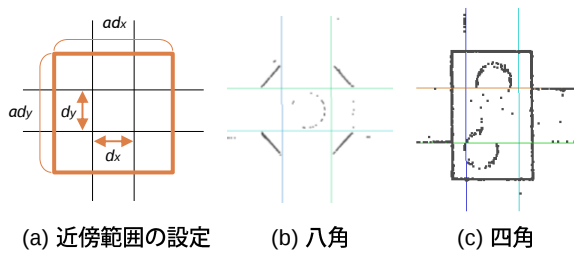


図-4 杭頭領域近傍の点群の例

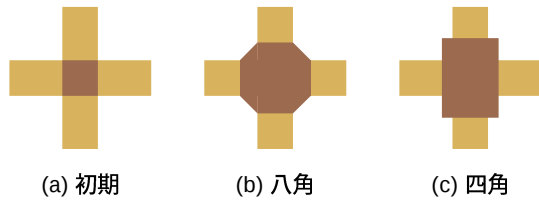


図-5 杭頭のモデリング

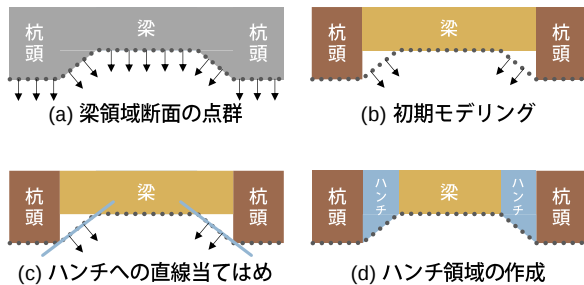


図-6 ハンチのモデリング

ーションを行う（図-3(d, e)）。ここで各領域に対し、水平/垂直領域サイズを計算しておく。また各領域に含まれる鉛直下向き点群に対し RANSAC による平面検出を行い、各領域の高さを算出することで 3D モデルを構築する。ここで平面は z 方向に平行になるよう制約を課す。最後に、各領域サイズに対する閾値処理から、各領域をスラブ、梁、杭頭の 3 クラスに分類する（図-3(e)）。本手法では簡単に、両辺の長さがいずれも閾値 th 以上の場合はスラブ、いずれも閾値以下の場合は杭頭、それ以外は梁と分類した。閾値は実験より $th=3.0m$ と設定することで、良好な結果が得られている。

(3) 杭頭へのテンプレートモデル当てはめ

先のステップで杭頭に分類された領域に対して、テンプレートモデルの当てはめによるモデリングを行う。本研究では広く使用される四角と八角の 2 種類を対象とした。まず初めに、領域中心から一定範囲内にある水平向き点群を抽出する。ここで範囲は、図-4 に示すように、水平、垂直方向とも、杭頭領域サイズ d_x , d_y を利用し、その a 倍に設定した。実験より $a=3.0$ とした。抽出した点群に対し、RANSAC を用いた直線当てはめよりテン

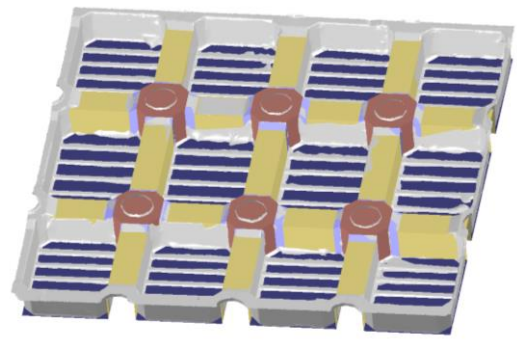


図-8 構築した簡略モデルと入力モデルとの比較

プレートモデルの当てはめを行う。四角の場合は、 x 軸、 y 軸に平行な直線を 2 本ずつ算出し、直線同士の交点を求めることで図-5(b)のように矩形領域を作成する。八角の場合は、傾きが $45deg$ 、及び $-45deg$ の直線をそれぞれ 2 本ずつ算出し、初期領域境界を定める 4 本の直線との交点を求め、図-5(c)のように八角形を作成した。

(4) ハンチのモデリング

ハンチが含まれる場合、図-6 に示すように、梁の断面形状を評価しハンチ領域を作成する。そのためまず、梁のうちの杭頭近辺にあり、法線ベクトルと鉛直下向き方向との角度が一定以上の点を抽出する。これに対して直線を当てはめることで断面形状を作成する。その後、梁の幅に合わせ奥行きを計算しハンチ領域を作成できる。

(5) オルソ画像作成とマッピング

前報⁴⁾と同様にして、作成したモデルの各面ごとに OpenGL のオフスクリーンレンダリング機能を用い、オルソ画像を作成し、これを簡略モデルへマッピングする。

3. 実験結果

本章では、提案手法による実験結果について述べる。実験には栈橋全体の SfM による 3D メッシュモデルから一部を切り取った、図-2(a)に示すメッシュを使用している。三角形数は約 180 万である。

図-7 には構築した簡略モデルの例を示す。既提案法ではモデル化が困難であった、断面形状が八角の杭頭やハンチ部も含め、部材ごとのモデルが適切に構築できていることが確認できる。また各部材ごとに適切にラベルが割り当てられていることも確認できる。図-8 には入力モデルとの重ね合わせたものを示す。見た目には両者が概ね整列されていることから、高精度にモデル構築できていることも確認できる。簡略モデルは 189 個の領域から構成されており、スラブを除いて大半が四角形である。それゆえ表示に必要な三角形数は 400 個程度となり、入

力モデルのおよそ 1/4,500 程度まで削減できていることが確認された。また図-9 にはテクスチャ付きモデルの構築例を示す。生成されるテクスチャ間に目立ったつなぎ目などは見られず、視覚的に高品質なモデルが構築できた。

現状の課題として、外周部のモデル化が行えていないことが挙げられる。SfM/MVS による画像からの 3D 再構成処理において、再構成される SfM モデルの品質が内部と比べ著しく低下するため、処理の対象外としている。別の課題として、杭頭形状の自動分類が行えていないことが挙げられる。現状はユーザが目視で四角または八角を指定している。実際には 1 つの栈橋であっても、その他の形状も含め複数種類が混在することもあるため、機械学習を利用した自動分類手法の開発が必要となる。

4. おわりに

本報告では、栈橋の維持管理の支援のため、高密度ポリゴンモデルからの部材認識、3D モデル構築、及びオ

ルソ画像自動作成に基づき、テクスチャ付き簡略モデルを自動構築可能な手法を新たに提案し、その有効性を検証した。今後は様々な栈橋を対象とした実験を行い、提案手法の定量的な性能検証を進める。

参考文献

- 1) 水野剣一, 酒井貴洋, 小笠原哲也, 杉本英樹, 杉山昇: ラジコンボートを用いた栈橋下面部の点検・診断システムの開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), No.73/V-2, pp.432-437, 2017.
- 2) 三浦博之, 山本貴春, 木村信太: 無人船舶を用いた栈橋上部工コンクリート下面の効率的な評価手法の検討, 先端測量技術, Vol.109, pp.64-74, 2017.
- 3) 清水智弘, 吉川眞, 瀧浪秀元, 御崎哲一, 高橋康将, 中山忠雅, 内田修, 近藤健一: 3D モデルを用いた橋梁維持管理システムの開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.69, No.2, pp.I_45-I_53, 2013.
- 4) 溝口知広, 家村享明, 藏重裕俊, 水野剣一, 谷口修: 栈橋の維持管理を支援するテクスチャ付き 3D 簡略モデルの自動構築手法, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.75, No.2, pp.I_87-I_93, 2019.

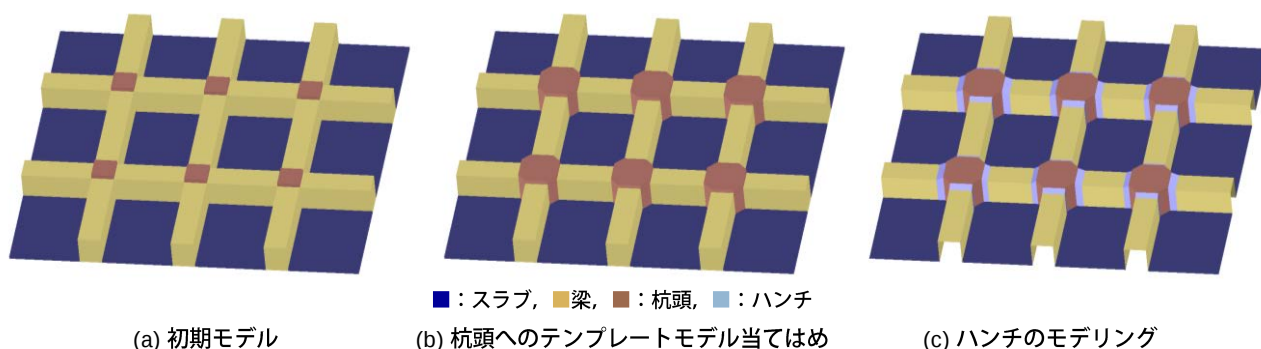


図-7 簡略モデルの構築手順

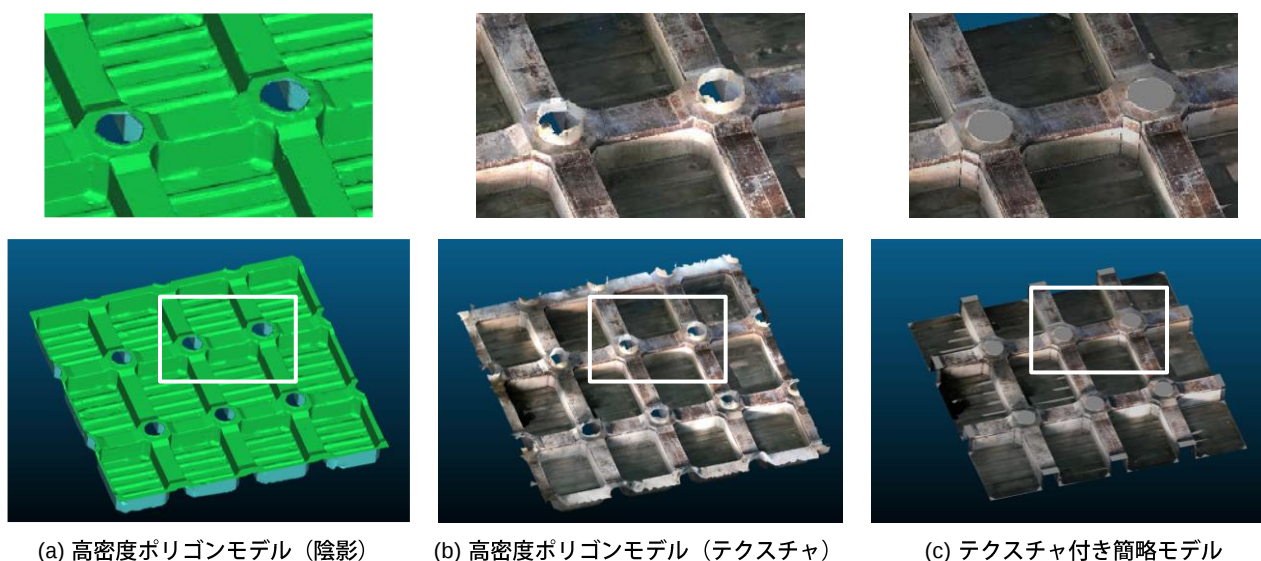


図-9 構築したテクスチャ付き簡略モデル