

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

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

老朽化が進む栈橋上部工下面の効率的な調査のため、カメラを搭載した無線操作式ボートが利用されている。これにより撮影した画像群に対する SfM/MVS 処理により、3D 高密度モデルも取得可能となった。本論文では、3D モデルの点検業務の様々なプロセスでの有効活用のため、テクスチャ付き 3D 簡略モデルへと自動変換する手法の開発を目的とする。簡略モデルとは、構造物を構成するスラブ、梁、杭頭といった各部材の平面領域を高精度抽出し、平面同士を接続することで得られる 3D モデルである。また領域ごとにその境界線を利用して高解像度オルソ画像も作成し、これを簡略モデルにマップする。これによりオルソ画像上でひび割れ等の劣化を検出し、これを簡略モデルと合わせて管理することも可能となる。様々な実験よりその有効性を検証する。

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

1. 緒 論

国内の港湾構造物の多くで老朽化が進んでおり、これを効率的かつ効果的に維持管理・更新することの重要性が指摘されている^{1,2)}。この目的のため、カメラを搭載した無線操作式ボートが利用されており、専門技術者が立ち入らずとも栈橋上部工下面の調査が可能となった。また撮影した画像群に対する SfM/MVS 処理により、GPS などによる撮影位置が取得できない場合でも、構造物の 3D 高密度モデルが取得できる。しかしながら生成される 3D モデルは、一般的には数百万から数千万の要素からなる高密度ポリゴンモデルであり、モデルの取扱いが難しく、業務非効率化の一因となっている。

栈橋の維持管理プロセスでは、部材毎に損傷度合いを判定するため、SfM/MVS にて生成したモデルから部材端点や部材交点を自動抽出し、モデルを床版、梁、杭頭といった部材毎に分割する必要がある。また、CIM への適用を考えた場合、密なモデルをより軽量な簡略モデルへ変換することが望まれる。さらに、各部材を構成する平面領域ごとに高解像度オルソ画像を作成し、この画像上

でコンクリートのひび割れや剥落等の劣化を診断できることが望まれる。

これらの機能が実現できれば、部材ごとの劣化度診断が行えるだけでなく、その結果を 3D モデルと合わせて管理することも可能となる。また構築されるモデルが軽量であることから、モデルをクラウド上で管理し、過去の点検結果をタブレット端末で現地で確認することも可能となる³⁾。また 3D モデルの利用により、現状の 2D 展開図にまとめた点検結果と比べ、視覚的に分かりやすく関係者間で共有しやすいといった利点もある。

しかしながら現状では、このようなデータ処理はすべてオペレータによる対話処理に頼らざるを得ず、高密度モデルの領域境界を目視で確認しながら 1 つずつ選択しなければならぬなど、膨大な時間を要している。

そこで本研究では、この高密度ポリゴンモデルからテクスチャ付き 3D 簡略モデルを自動構築する手法を提案する。ここで簡略モデルとは、部材を構成する平面領域を近似する平面同士を接続して得られる 3D モデルである。提案手法では、高密度ポリゴンを鉛直方向を向く平面に投影し、この投影平面上で部材間境界を定義する線分を領域成長法にて抽出し、これらを接続することで各

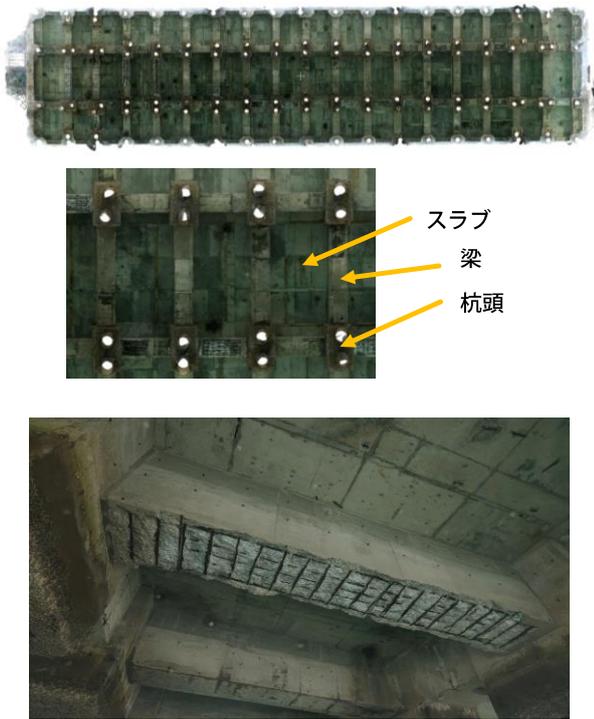


図-1 栈橋上部工下面の構造とコンクリート剥落の例

部材領域を特定する。最後に、各領域を平面の法線方向へ押し出すことで 3D モデルを構築する。また領域境界線を利用し、領域ごとに高解像度オルソ画像をオフスクリーンレンダリングにて自動作成し、これを簡略モデルにマッピングすることで、テクスチャ付きモデルを得る。オルソ画像はモニタサイズ以上のものを出力でき、ひび割れ検出にも十分な解像度を持つ。

損傷評価を行う上ではポリゴンモデルのままでも利用可能である。しかしながら、発注者が求める成果品である点検台帳にまとめるには、2次元の展開図を作成し、部材ごとに評価する必要がある。本研究で提案する簡略 3D モデルでは、モデルの各面が部材ごとに対応して分類され、その後の点検台帳への評価にスムーズに受け渡せるメリットがある。

2. 関連研究

計測点群の部材ごとの分解や 3D モデリングに関しては、様々な分野で研究がなされている。土木分野では、例えば Hidaka ら⁴⁾の例がある。この手法では、点群上の局所形状特徴の算出とその類似度評価に基づき、構造物中に繰り返し出現する類似形状部品を抽出し、各部品にポリゴンモデルを当てはめることでプロダクトモデルを構築している。しかしながらこの手法では、部材を構成する平面領域の抽出やオルソ画像の作成は目的としていない。Lu ら⁵⁾の研究では、道路橋のレーザ計測点群を対象とし、点群を一定距離間隔でスライスして得られる局

所的な形状評価に基づき、橋脚、床版、桁といった主要部材ごとに分割する手法を提案している。しかしながらこの手法では、本研究で対象とする栈橋下面の梁や杭頭といった各部材を構成する平面の抽出までは行えない。

Nan ら⁶⁾の研究では、ビル等の平面で構成される物体を対象とし、計測ノイズやデータ欠損を多く含む低品質点群から 3D モデルを構築する手法を提案している。ここではまず RANSAC 法にて点群中に存在する複数の平面を抽出し、平面同士の交差を検出することで平面を細分割し、得られる大量の平面を候補として抽出する。その後、平面への点群当てはめ精度や構築されるモデルの詳細度等を考慮し、候補群から点群を近似する最適な平面の組み合わせを抽出することで 3D モデルを構築する。この手法では、低品質点群からも安定に 3D モデルが構築できるといった利点があるが、大量の候補平面からの最適な組み合わせ探索処理の計算コストが高く、本研究で扱う数百個の平面で構成される栈橋に対しては計算効率の観点から適用が難しい。Li ら⁷⁾の研究では、UAV にて撮影した建物の画像群から SfM/MVS 処理にて構築した 3D 点群を対象とし、平面集合からなる 3D モデルを構築している。この手法ではまず、建物点群を地面を基準とする高さ画像へと変換する。次に、画像中の建物輪郭線を抽出し、これをダグラス・ポーカー法にて線分近似する。最後に、線分で囲まれる領域を対応する高さまで押し出すことで 3D モデルを構築する。この手法では、高さ画像に基づく 2.5D 処理の導入により、低品質点群からも安定に 3D モデルが構築可能である。しかしながらモデル構築処理はピクセル単位で行われており、建物輪郭線の抽出精度はピクセルサイズに依存してしまい、モデル構築精度には課題が残る。

清水ら⁸⁾の研究では、橋梁の 3D モデルを作成し、これに点検用の写真を対応付けて管理する方法を提案している。しかしながらこの 3D モデルと写真の対応付けは、写真中の部材端点や部材交点をすべてオペレータが 1 つずつ指示することで行われている。これを栈橋上部工へ応用することを考えると、写真の撮影位置が得られていないことや、部材数が多いことから、膨大な時間を要してしまう。

3. 開発手法の概要

(1) 栈橋の形状特徴

栈橋上部工下面は、図-1に示すように、スラブ、梁、杭頭といった部材がおおよそ規則的に配置された構造となっている。栈橋の形状特徴として、以下の4点が挙げられる。

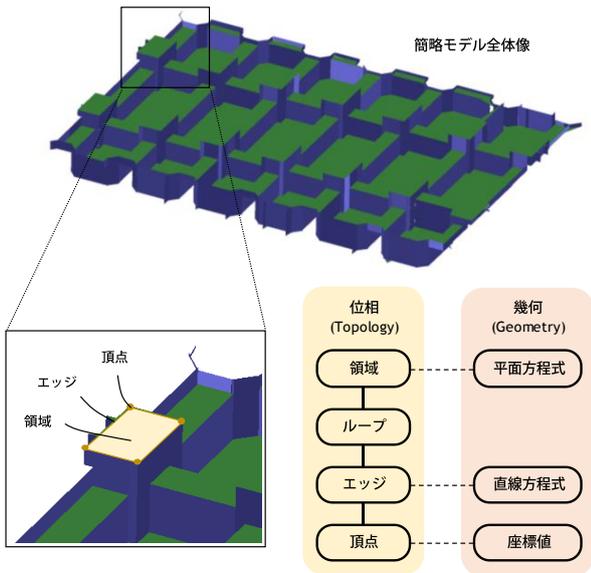


図-2 構築する 3D 簡略モデルの概要

- ・ 水平方向には大きな広がりがあるが、鉛直方向の奥行きは小さい。
- ・ 形状は平面のみで構成される。
- ・ 構造物中には互いに直交する支配的な 3 軸が存在し、構成平面のほとんどはこれらのいずれかに平行に配置されている。
- ・ 図-1 に示すように、鉛直下向きの領域では、コンクリートが大きく剥落した箇所が多く、表面凹凸が大きい。一方で水平向きの領域では、劣化の度合いは軽微で、表面凹凸は小さい。

(2) 簡略モデル構築手法の基本的なアイデア

本研究では上記の特徴を考慮し、栈橋に特化した 3D 簡略モデル構築手法を提案する。入力は SfM/MVS にて生成したテクスチャ付き高密度ポリゴンモデルとする。

提案手法の独自性は、3次元モデルを平面投影し、この投影面上での部材間境界である直線検出と押し出し処理に基づき 3D モデルを構築するフレームワークにある。具体的にはまず、入力モデル中の支配的な 3 軸の認識と鉛直下向き平面への投影に基づき、高さ画像を作成する。次に、法線ベクトルがおおよそ水平方向を向く三角形を平面投影する。この投影平面上での領域成長法により、スラブ、梁、杭頭といった領域とその境界線を高精度抽出する。また得られた境界線同士を接続し、領域境界を定義するループを作成する。さらに、領域とその境界線に対応する領域の高さまで押し出すことで平面集合からなる 3D 簡略モデルを構築する。最後に、高密度ポリゴンと作成した簡略モデルをもとにして、OpenGL のオフスクリーンレンダリング機能を使用し、全ての領域のオルソ画像を自動作成する。

提案手法では、構造物の一部が大きく剥落しデータ中

の表面凹凸が大きなデータに対しても、表面劣化が軽微な箇所の三角形のみを利用する。さらにこれを平面投影し、投影平面上での直線検出と押し出し処理によりモデル構築を行うことで、従来の 3 次元計測メッシュ上から平面を含む曲面を直接抽出する領域成長法⁹⁾と比べ、モデル構築処理を効率化できるだけでなく、劣化の影響を受けにくく入力ポリゴンを密に近似する高品質モデルが安定に構築可能である。さらに、オフスクリーンレンダリングにおいて、スクリーンの視点となるカメラ位置や方向等はすべて自動で設定可能としたことで、従来の写真測量や CG のように市販ソフトを使って一面ずつオルソ画像を作成する手間が省略できる。

(3) 構築するテクスチャ付き 3D 簡略モデルの概要

本手法で構築する 3D 簡略モデルは、図-2 のような一般的な CAD モデルと同等の位相と幾何からなるデータ構造を持つ 3D モデルである。また各領域はその境界に沿った高解像オルソ画像を持つ。作成したモデルは目的に応じて様々な形式へと変換可能である。本手法では、最終的には obj ファイルとして出力するようにしている。

4. 簡略モデル構築手法

開発した 3D 簡略モデル構築手法は、以下の 3 ステップから構成される。

(1) モデルの座標変換と高さ画像の作成

構造物中の支配的な 3 軸を、三角形法線ベクトルのガウシアンマッピングと RANSAC 法にて検出し、点群を整理させる座標変換を行う。次に点群を高さ画像へ変換する。ここでは鉛直上向き(+z)方向を高さ方向とした。各点を xy 平面へ投影し、平面をピクセル分割し、各ピクセル内の複数点の平均高さを求める。ピクセルサイズは約 10cm×10cm とした。作成した画像を図-3(a)に示す。ここで高さが最大値をとるセルを赤で、最小値をとるセルを緑とし、グラデーションで表示した。

(2) エッジと頂点の検出

a) 領域境界候補ピクセルの抽出

ポリゴンモデルの三角形のうち、その法線ベクトルがおおよそ水平方向を向くものだけを閾値処理にて抽出する。ここで閾値は 20.0 deg とした。その後、抽出された三角形重心の xy 平面への投影から、高さ画像と同様にバイナリ画像を作成する。図-3(b)に作成した画像の例を示す。ここでこれらのピクセルを領域境界候補ピクセルとし、図中では白で示す。

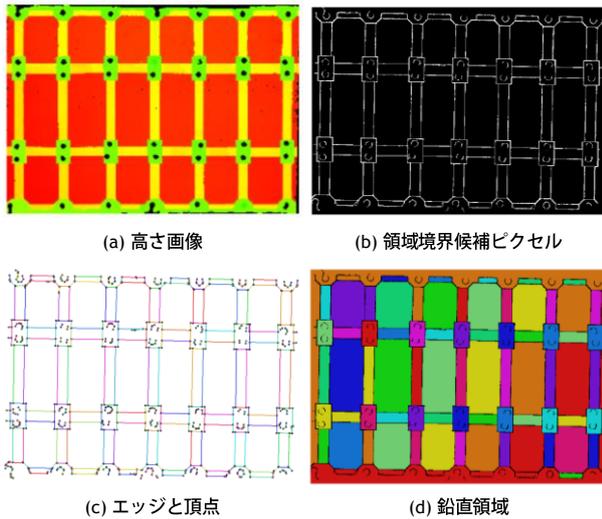


図-3 提案する簡略モデル構築手法の概要

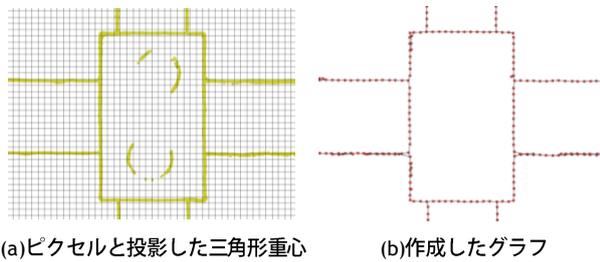


図-4 グラフの作成

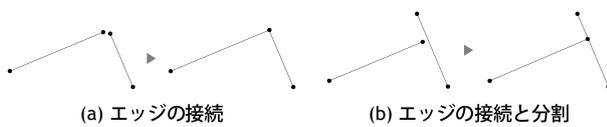


図-5 エッジの接続

b) 領域成長法によるエッジと頂点の抽出

次に、図-4(a)に示すように、各領域境界候補ピクセル内の三角形重心から、その重心を求めこれを各ピクセルの代表点とする。また図-4(b)のように、これらを接続したグラフを作成する。ただし、例えば杭頭部の円弧上に分布する代表点など、連結要素数が少ないものは除外している。

このグラフを対象に領域成長法にて直線状に分布する連結代表点集合を1つとするセグメンテーションを行い、これにフィットする直線を最小二乗法にて算出する。ここでは少ない数の連結代表点集合からなる初期領域から処理を開始し、領域への直線当てはめと、領域への近傍点追加を繰り返し行うことで、領域を反復的に拡大する。近傍点追加の条件は、点と直線との距離が閾値以下であることとした。閾値は様々な実験より10cmに設定した。この処理をいずれの領域にも割り当てられない代表点が存在しなくなるまで繰り返す。結果として、複数のエッジとその両端点である頂点が作成される。

図-3(c)に作成したエッジと頂点の例を示す。ここでは

エッジごとに色分けし、両端点に黒で頂点を表示した。

c) エッジの接続

上記の処理でエッジは不連続であるため、図-5に示すように、2パターンに分けて接続処理を行った。

- ・両端点に近い距離にある場合 (図-5(a))

異なる2直線の端点同士が閾値以下の距離にある場合、それぞれを延長し交点を求め、これを新たな共通頂点とするようエッジを接続する。閾値は30cmとした。

- ・端点が直線と近い距離にある場合 (図-5(b))

2直線のうち、一方の端点が他方の直線と閾値以下の距離にある場合、端点が直線上に乗るように頂点座標を更新し、エッジを接続する。また他方の直線を、これを新たな端点として2分割する。ここでも閾値は30cmとした。

(3) 領域の作成

a) 鉛直領域の作成

次に、鉛直向き領域を作成する。そのため、前節で作成したエッジが通過する画像中のピクセルを抽出しておく。ここではこれを領域境界ピクセルと呼ぶ。次に、連結する非領域境界ピクセル集合を1つとするクラスタリングを行い、それぞれを鉛直領域とする。また領域ごとに、高さ画像の該当ピクセルの平均高さを求め、領域にフィットする平面方程式を算出する。図-3(d)に作成した鉛直領域の例を示す。ここでは領域ごとに色分けして表示している。また図-3(d)では、端部を除いた部分において、部材毎に領域分けが可能となっていることが分かる。また作成した領域ごとに、その周囲のエッジ集合を探索し、これをループとする。

b) 水平領域の作成

次に、各エッジを鉛直方向に押し出すことで水平向き領域を作成する。そのためまず、各エッジから、それに隣接する2つの鉛直領域を探索する。本手法では、エッジごとに、エッジが通過する各ピクセルから2近傍以内にある領域ピクセル数を数え、上位2つを隣接領域とした。その後、各エッジをそれに隣接2領域の平均高さまでそれぞれ押し出すことで、長方形の水平領域を作成する。この処理で新たにエッジ3つが作成され、元のエッジと合わせてループを作成するとともに、平面方程式も計算する。

5. オルソ画像の作成とモデルへのマッピング

次に、SiMMVSにて作成した高密度ポリゴンモデルと、4章の手順で作成した簡略モデルを元に、全ての領域のオルソ画像を作成する。ここでは3Dコンピュータ

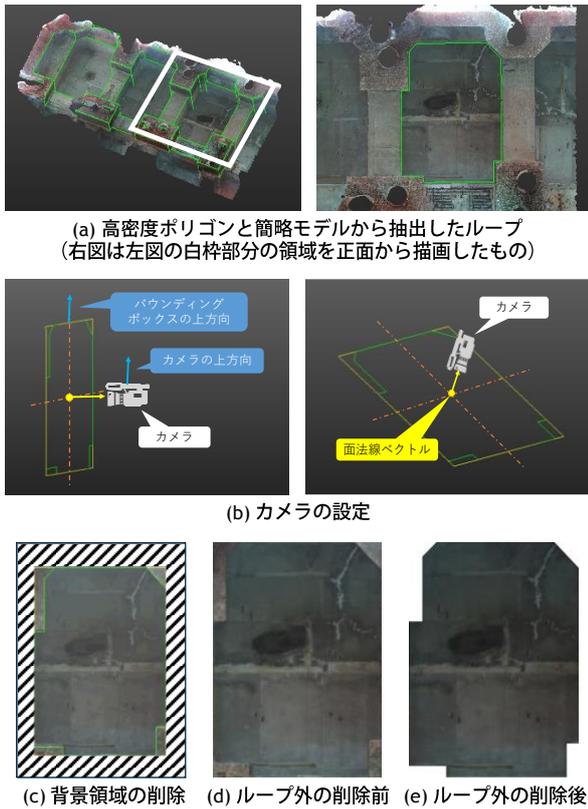


図-6 オルソ画像の作成

グラフィックスライブラリである OpenGL のオフスクリーンレンダリング機能を用いる。本手法では、作成した 3D 簡略モデルの各面に対するスクリーンの視点となる計算機内での仮想的なカメラの位置・方向等を自動設定しレンダリングできるため、オルソ画像を効率的に生成できる。以下に詳細な手順を述べる。

(1) 入力データ

本手法への入力データは、高密度ポリゴンモデルと、作成した簡略モデルの各領域のループのエッジが接続されるコーナー点である。図-6(a)に例を示す。ここでは簡略モデルにエッジを緑色で重ねて表示している。

(2) 処理手順

本節ではデータ処理手順を示す。以下に1つの領域に対する手順を示す。この一連の処理を読み込んだすべての領域に対し適用することで、全体モデルを構築する。

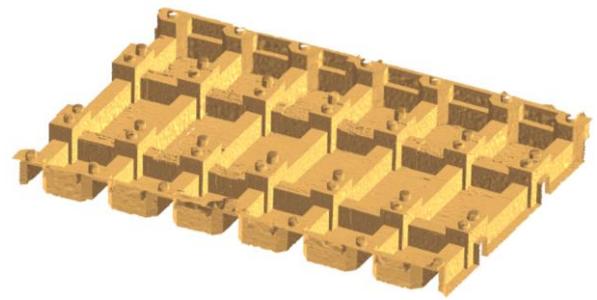
a) バウンディングボックスの構築

面の法線ベクトル \mathbf{n} と同じ法線を持つ平面上に、多角形を囲むバウンディングボックスを構築する。

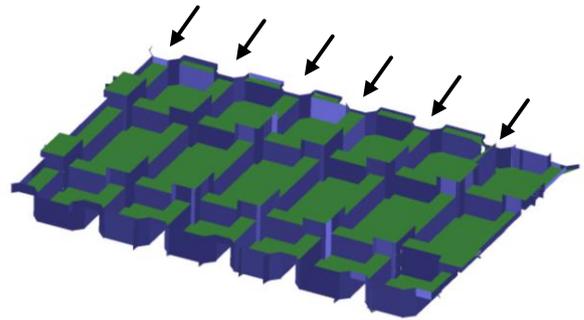
b) カメラの移動と回転

OpenGL 内部でカメラ位置・姿勢を次のように設定する。例を図-6(b)に示す。ここでバウンディングボックスの中心を \mathbf{c} とする。

- ・ カメラ位置： $\mathbf{c} + \mathbf{n}$



(a) 入力ポリゴンモデル



(b) 簡略モデル
(緑：鉛直領域, 青：水平領域)



(c) 重ね合わせ

図-7 構築した簡略モデルの例

- ・ カメラ姿勢： $-\mathbf{n}$
- ・ カメラ回転：カメラの上方向とバウンディングボックスの上方向が一致するように回転させる

c) カメラ視体積の設定

レンダリングを行う範囲をカメラ座標系にて設定する。視体積の幅、高さはバウンディングボックスの幅と高さを指定し、奥行きは-2mから0.5m程度とする。

d) レンダリングの実行

OpenGL でレンダリングを実行し、グラフィックスを描画する。描画した結果はモニターへ出力せずに画像ファイルとして保存する。

e) 不要な領域の削除

生成される画像はバウンディングボックスの範囲も描画されるため、ループの外側の領域を削除する。例を図-6(c),(d),(e)に示す。図-6(c)ではバウンディングボックスを黄色で、ループを緑で示している。図-6(d)にはバウ

ンディングボックスの範囲が描画されており、図-6(e)ではループの内側のみが描画され、外側が適切に削除され黒で描画されていることが確認できる。

6. 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。本手法では、図-1の栈橋全体モデルから一部を切り取ったものを使用している。これは商用のSfMソフトウェアにて、およそ2,000枚の画像から作成したものである。

図-7に構築した簡略モデルの例を示す。図-7(a)、図-7(b)には入力ポリゴンと構築した簡略モデルを示す。図-7(c)にはこれらを重ねて表示した結果を示す。視覚的には2つのモデルが密に整列されていることから、高精度にモデル構築が行えていることが分かる。本手法では3Dモデルから部材端点や部材交点を算出し、該当箇所の写真を投影してモデルを作成している。そのため、仮に端点や交点位置がずれたとしても劣化部分の位置やサイズは変わらない。これを考慮すると、数センチ程度のずれは許容でき、図-7に示す結果はこれを十分に満たしていると考えられる。

図-8には作成したテクスチャ付きモデルの例を示す。図-8(a)には入力の高密度ポリゴンモデルを陰影付けして表示したものを、図-8(b)にはテクスチャ表示したものを、図-8(c)には作成したテクスチャ付き簡略モデルを示す。入力は約255万三角形からなるポリゴンモデルである。このモデルからは627個の水平領域と110個の鉛直領域が生成された。目視で確認する限りにおいては、表面積の大きな領域では1つの領域と思われる部分ごとに領域が作成できており、概ね良好な結果が得られている。水平領域はすべて長方形のため、2つの三角形で表現できる。一方、鉛直領域は形状が多角形となるため、最大で10個程度の三角形で表現することになる。このように三角形分割を行うことで、簡略モデルの三角形数は入力モデルの1,000分の1程度まで大幅に削減できている。またテクスチャ同士の境界においても目立った不連続は見られず、高品質なモデルができています。オルソ画像サイズに関しては、表面積の大きなスラブでは最大でおよそ9,600×5,200ピクセルであった。計算時間はCore i7 3.40GHzのCPUで、簡略モデル構築に約1分、オルソ画像作成に約3分であり、非常に効率がよい。

ただし、図-7(b)において、矢印で示す構造物の端部では、図-3(d)にも示すように、一部の杭頭では適切な領域分割が行えておらず、複数の杭頭とその周辺が接続され1つの領域として抽出されており、それゆえ簡略モデル

が構築できていない箇所がある。これを解決するため、抽出が容易な内部の杭頭や梁の配置規則から、端部の杭頭位置を推定しながらモデル構築を行う手法を検討する。

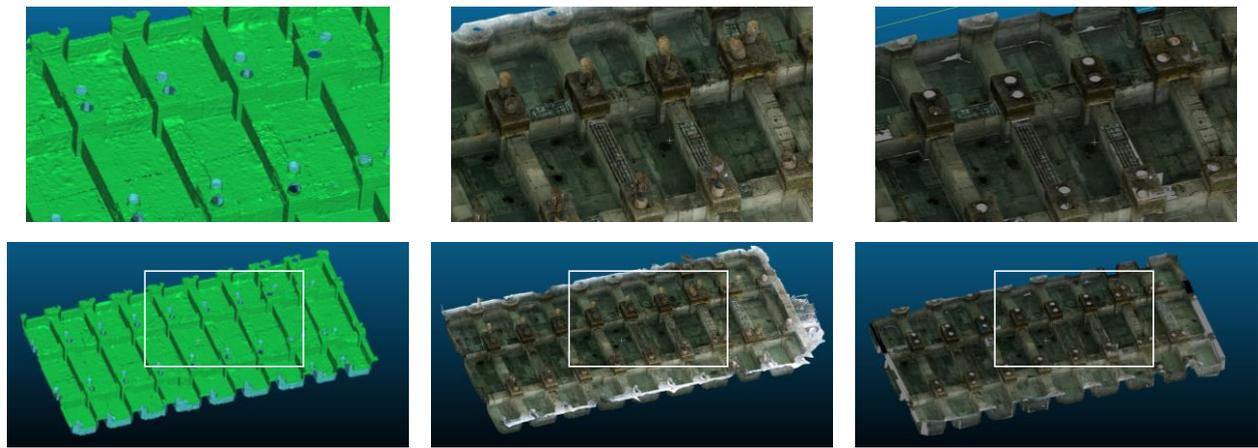
7. 結 論

本報告では、栈橋の維持管理支援を目的とし、構造物のSfM/MVSによる高密度3Dポリゴンモデルをテクスチャ付き簡略モデルへと変換する手法を提案し、その有効性を評価した。今後は、提案手法で作成したモデル品質についての定量評価を行う。また現状では処理の対象としていないハンチ部のモデル化手法の開発を行う。

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, 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) 石田仁, 矢吹信喜: WebGLの土木構造物の維持管理への応用, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 71, No. 2, II_58-II_65, 2015.
- 4) Hidaka, N., Michikawa, T., Yabuki, N., Fukuda, T., and Motamedi, A.: Creating Product Models from Point Cloud of Civil Structures based on Geometric Similarity, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Science*, XL-4/W5, pp.137-141, 2015.
- 5) Lu, R., Brilakis, I., and Middleton, C. R.: Detection of Key Component of Existing Bridges in Point Cloud Datasets, *Proc. 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, pp.794-801, 2018.
- 6) Nan, L. and Wonka, P.: PolyFit: Polygonal Surface Reconstruction from Point Clouds, *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2372-2380, 2017.
- 7) Li, M., Nan, L., Smith, N., and Wonka, P.: Reconstructing building mass models from UAV images, *Computers & Graphics*, Vol. 54, pp.84-93, 2016.
- 8) 清水智弘, 吉川真, 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, I_45-I_53, 2013.
- 9) 溝口知広, 伊達宏昭, 金井理: Region Growing/Mergingを用いた効率的なメッシュセグメンテーション, 精密工学会誌, Vol. 74, No. 7, 2008.

(Received October 25, 2019)



(a)高密度ポリゴンモデル(陰影表示)

(b)高密度ポリゴンモデル(テクスチャ表示)

(c)テクスチャ付き簡略3Dモデル

図-8 構築したテクスチャ付き 3D 簡略モデル

AUTOMATIC CREATION OF 3D TEXTURED SIMPLIFIED MODEL FOR SUPPORTING PIER MAINTENANCE

Tomohiro MIZOGUCHI, Takaaki IEMURA, Hirotohi KURASHIGE,
Kenichi MIZUNO and Osamu TANIGUCHI

For efficient and effective maintenance of aging piers, the camera-mounted radio controlled boat was developed. This enabled the acquisition of 3D dense polygonal model with rich texture of the undersurface of the upper part of the pier by SfM/MVS process to multiple images. In this paper, for the effective use of 3D model in various stages of maintainanc process, we propose the method for automatically converting it to the textured simplified model. To create the simplified model, our method first extracts planar surfaces accurately each of which represents the surface portions of the constituting parts, such as slab, beam, and pile top. It also creates high resolution ortho images of each planar region along its boundaries, which can be mapped to their corresponding regions of the simplified model. Cracks and flakings can be detected on the ortho images, and the images can be stored with the model altogether. We demonstrate the effectiveness of the proposed method through various experiments.