原著論文

3次元地図生成と地物認識によるクレーン操縦支援のための可視化システムに関する研究[†]

窪田 諭^{*1}・田中 成典^{*2}・中村 健二^{*3}・山本 雄平^{*4}・中原 匡哉^{*5}・中畑 光貴^{*5}・
多田野 有司^{*6}・世俵 秀樹^{*6}・野口 真児^{*6}・小阪 孝幸^{*6}・石川 巖^{*6}・西本 昌司^{*6}

クレーンの作業現場では、操縦者が吊荷とその周辺の地物の大きさ、高さや位置関係を正確に把握することが重要である。既存研究では、クレーンの操縦支援のため、ジブの先端にカメラ、レーザスキャナとIMUを設置し、吊荷上空からの吊荷やその周辺の地物の大きさと高さを映像上に可視化する技術を提案した。ただし、この技術には、地表面に複数の地物が存在する場合に地表面を地物として誤認識する課題、傾斜のある施工現場において小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題と、クレーンが稼働する範囲にある吊荷とその周辺以外の地物や地表面を認識できない課題があった。そこで、本研究では、これらの課題を解決するために、ジブの先端に設置したカメラ、レーザスキャナ、IMUと新たにクレーンのジブの先端と旋回中心に設置したGNSSを用いて、クレーンの稼働範囲の3次元地図を生成し、クレーン周辺の地物の高さや大きさを表示して操縦者を支援する可視化システムを開発し、実験により評価した。

キーワード：クレーン、操縦支援、レーザスキャナ、点群データ、クラスタリング、3次元地図

1. はじめに

国土交通省は、i-Constructionを代表とした情報化施策[1]を推進している。この施策では、ブルドーザ[2]、油圧式ショベルカー[3]やクレーン[4]などの建設機械を対象に操作支援や自動制御を目的としたICT（Information and Communication Technology）対応が進められている。特に、クレーンに関しては、クレーンのフックにカメラを設置し、吊荷とその周辺（以下、吊荷領域）の映像をリアルタイムに伝送することにより、操縦者を支援する技術[4]が開発されている。しかし、この技術[4]では、鉄骨柱や梁などの地物や吊荷の正確な高さを把握できない課題がある。また、吊荷や地物の色と地表面の色が同色の場合に吊荷や地物と地表面との境界線が曖昧となるため、それらを認識できず、クレーン操縦者の安全確認の負担となる

課題がある。そこで、既存研究[5]では、カメラ、ラインスキャン方式の3次元レーザスキャナ（以下、レーザスキャナ）及びIMU（Inertial Measurement Unit）を用いて、吊荷領域の吊荷及び地物の高さや大きさを可視化する技術を提案した。ただし、この技術は、整地された平地の現場でクレーンが作業することを前提としていた。そのため、地表面に複数の地物が存在する場合に地表面を地物として誤認識する課題と、傾斜のある施工現場において、小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題が残った。また、吊荷領域の吊荷や地物のみを対象とした技術であるため、吊荷領域を含むクレーンが稼働する範囲全体（以下、作業領域）において、接触する可能性がある地物の有無を事前に把握できず、クレーンのブームが移動する時に移動先を目視で確認する必要がある。そのため、クレーン周辺の安全確認において、操縦者の負担軽減の効果が限定的であった。

そこで、本研究では、クレーンの操縦を支援するために、作業領域の3次元地図を生成し、地表面に傾斜のある施工現場においても適確に地物を認識する可視化システムを開発する。本論では、まず、2章にて既存研究[5]の課題を整理し、その課題を解消する既存手法を調査する。次に、3章にて既存研究[5]の課題を解消する技術を開発し、4章にてその技術を用いたクレーンの操縦者を支援するための作業領域の可視化システムを提案する。そして、5章にて、本システムの有用性を確認するための評価実験を行い、6章にて、研究を総括するとともに今後の展望を述べる。

2. 本研究の対象

2.1 既存研究の概要と課題

本研究で対象とするクレーンの部位を図1に示す。クレーン操縦者は、フックの先端に吊荷が固定された後、フックの真下に作業者がいないことを確認し、ゆっくりと吊上げを行う。吊上げを停止した時に吊荷の安定を確認するため、吊荷とその

[†] Research Concerning Visualization System for Crane Operation with Producing Three-Dimensional Map and Recognizing Features
Satoshi KUBOTA, Shigenori TANAKA, Kenji NAKAMURA,
Yuhei YAMAMOTO, Masaya NAKAHARA, Koki NAKAHATA,
Yuji TADANO, Hideki YODAWARA, Shinji NOGUCHI,
Takayuki KOSAKA, Iwao ISHIKAWA, and Shoji NISHIMOTO

*1 関西大学環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University
*2 関西大学総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University
*3 大阪経済大学情報社会学部
Faculty of Information Technology and Social Sciences,
Osaka University of Economics
*4 大阪工業大学情報科学部
Faculty of Information Science and Technology,
Osaka Institute of Technology
*5 関西大学大学院総合情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kansai University
*6 株式会社タダノ
Tadano Ltd.

法は、計測データに対して、オブジェクトを構成する候補面をランダムに設定し、候補面の近傍点の数が最も多い候補面を採用する。これを繰り返して、地表面や地物を構成する3次元の面情報を取得する。この手法は、地表面や地物上面が平坦な場合は正しく認識できるが、部分的に傾斜がある地表面や傾斜がある地物の場合、傾斜部を地表面や同一地物として正しく認識できない。最下点抽出法を用いた手法は、一定範囲内にある点群データの最低標高点を地表面の計測点と仮定し、それ以外を地物として認識する。この手法は、地表面を適切に抽出できるが、地表面に傾斜や凹凸がある場合に、傾斜面の一部や凹凸部分を地表面として認識できない。これらの調査の結果より、一点目の課題を解消するためには、新たな技術開発が必要であると考えられる。

次に、「傾斜のある施工現場において小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題」を解消するためには、地表面全体の高さに依らない地表面推定手法を検討する必要がある。その既存手法として、微分フィルタを利用した手法 [8, 9]、グラフカットを用いた手法 [10] と領域拡張法を用いた手法 [11–15] が提案されている。微分フィルタを用いた手法は、画像中のある画素とその隣接する画素との明度差が大きい箇所を物体の境界線として推測する。グラフカットを用いた手法は、各画素に対してその画素と近傍画素との明度差を重みとして付与し、重みが最小となるように前景画像と背景画像を分離する。これらの手法は、地表面や地物ごとに色が異なる場合には地表面や地物を正しく認識できるが、黒いアスファルト床と白いコンクリート床がある現場や、複雑な色彩を持つ地物がある現場には適用できない。領域拡張法を用いた手法は、点群データの近傍点同士を同一地物や地表面の構成点として認識し、地表面や地物ごとの3次元情報を抽出する。この手法は、傾斜面を地表面として認識できるが、図3の利用場面1のように地表面を分断する地物がある場合に、地表面を地物として誤認識する。そのため、一点目の課題を解消する新たな技術と領域拡張法 [11–15] とを組み合わせて二点目の課題を解消する。

そして、「作業領域にある地物や地表面を認識できない課題」を解消するためには、異なる位置や角度で複数回に渡って計測された点群データを解析し、広範囲の3次元データを生成する手法が必要である。その既存手法として、SLAMを用いる手法 [16] と、GNSSとIMUを用いる手法 [17] がある。SLAMを用いる手法は、点群データ内の特徴点を用いて、異なる時間に計測された点群データ同士の相対的な位置や傾きのズレを推定し、補正する。そして、補正した点群データを重畳して広範囲を計測した点群データを生成する。この手法は特徴点となる静的な地物のみが存在する現場であれば適用できる。しかし、クレーンに適用する場合、レーザスキャナの計測範囲内で常に吊荷やワイヤが移動し続けるため、点群データ同士の相対的な位置や傾きのズレを正確に推定できない。GNSSとIMUを用いる手法は、GNSSとIMUにより計測したレーザスキャナの位置と傾きを用いて、点群データの座標系を平面直角座標系に剛体変換し、重畳して計測対象全体の点群データを生成する。この手法は、クレーンの作業現場のように、上空が開けた環境であれば、高精度にレーザスキャナの位置を計測するため、計測

対象全体の点群データを生成できる。そのため、この手法を適用することにより、三点目の課題を解消できる。

以下、三点の課題に対して、新たな提案と前述の手法を駆使しながら、クレーン操縦支援のための可視化システムを開発することを目指す。

3. 3次元地図生成と地物認識によるクレーン操縦支援のための可視化システムの提案

本章では、第2章で論じた3つの課題を解決する作業領域の可視化システムを提案する。

3.1 システムの設計方針

「地表面に複数の地物が存在する場合に地表面を地物として誤認識する課題」に対しては、推定した地物の候補とその近傍にある地表面との高さを比較し、高さが閾値内の場合は地物の候補を地表面と認識する。

「傾斜のある施工現場において小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題」に対しては、既存手法 [11–15] を参考に、推定した地表面上の点と隣接する近傍点との標高差が小さい場合に、その近傍点を地表面と推定する。これにより、傾斜面や小段を地表面と認識し、小段上からの吊荷の高さを算出する。

「作業領域にある地物や地表面を認識できない課題」に対しては、作業領域全体の密な3次元情報を一回の計測では計測できないため、既存手法 [17] を参考に、複数回に渡って計測された点群データを取得した後、補正しながら重畳する。これにより、当該位置から計測できなかった作業領域の地物の大きさや高さを可視化する。ただし、作業時間が長くなるほど膨大な量の点群データが蓄積されることを考慮する必要がある。また、クレーンのジブ先端は常に移動するため、異なる位置や向きから計測した点群データ同士を重ね合わせる必要がある。前者については、一定範囲に含まれる点群データの代表点を算出し、代表点のみを用いて可視化してデータ量を削減する。後者については、既存システム [5] の機器構成と設置位置に加えて、ジブの先端と旋回中心にGNSS (Global Navigation Satellite System) を設置して対応する。これにより、ブームを基線としたGNSSコンパスを構成し、レーザスキャナの位置と向きを計測する。

本研究では、これらの三つの課題を解決する作業領域の可視化システムを提案する。そして、既存システムの吊荷領域の可視化による操縦者の作業支援から、実現場で利用可能な作業領域の可視化による支援へ移行することを目指す。

3.2 提案システムの概要

提案システムの処理フローを図4に示す。提案システムは、点群データ補正機能、3次元地図生成機能、クラスタリング機能及び作業領域可視化機能で構成される。点群データ補正機能は、点群データの傾き、位置と向きを補正するため、レーザスキャナ、IMUとGNSSコンパスにより同一時刻に計測されたデータを取得する。そして、取得した姿勢角、位置情報と向きを用いて点群データの座標系を平面直角座標系に剛体変換し、

図4 処理の流れ

補正済の点群データとして出力する。これにより、異なる位置から計測した点群データ同士を重ね合わせ、「作業領域にある地物や地表面を認識できない課題」を解決する。

3次元地図生成機能は、作業領域の地表面、地物と吊荷を可視化するため、異なる時期や位置で取得した補正済の点群データ同士を重ね合わせる。そして、リアルタイム性を損なわないように作業領域の3次元情報を保持して可視化するため、重ね合わせた点群データ全体を一定の幅のグリッドで分割し、データ量を削減する。そのグリッドごとに点群データから面を生成し、作業領域の3次元地図として出力する。

クラスタリング機能は、まず、地表面の点群データとそれ以外の点群データを分類するため、補正済みの点群データ全体を一定の大きさのグリッドに分割し、それを代表する点を算出する。次に、代表点の標高値を輝度値と見立て、代表点に対してラベリング処理を行う。最後に、最も多く付与されたラベルを地表面として、それら以外のラベルを地物や吊荷の候補として代表点を出力する。ただし、地物の代表点の標高値が近傍にある地表面の代表点の標高値と同程度である場合は、この代表点を周辺地物により分断された地表面の代表点と断定し、それぞれを分離する。本機能は「傾斜のある施工現場において小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題」と「地表面に複数の地物が存在する場合に地表面を地物として誤認識する課題」を解決する。

作業領域可視化機能は、地表面、吊荷と地物に分類した点群データを用いて、吊荷領域の吊荷と地物の大きさ及び高さ情報をカメラ映像上に重畳して表示する。また、作業領域の地表面、吊荷と地物の3次元的な位置関係を3次元地図として可視

化する。本機能は、「作業領域にある地物や地表面を認識できない課題」を解決し、クレーン操縦者の作業領域の状況の把握を支援する。

3.3 入力データとパラメータの要件

本研究では、図4に示す機能を実現するため、レーザスキャナの計測軸、IMUの計測軸とジブの先端と旋回中心に設置したGNSS間を結ぶ直線が一致していること、画像上の地物をレーザスキャナが計測していること、そして点群データとIMUの計測時刻がGNSS衛星による原子時計の時刻（以下、GNSS時刻）となっていることの三点を入力データの要件とする。

本研究におけるレーザスキャナとカメラの設置位置を図5に示す。この時、本システムで用いるパラメータは、「レーザスキャナとカメラとの間隔の大きさ」、「レーザスキャナとGNSSとの間隔の大きさ」、「同一領域とする標高差の閾値」、「グリッドの幅の閾値」、「吊荷の指定範囲の位置」と「吊荷の縦幅の長さ」の6つとする。

レーザスキャナとカメラとの間隔の大きさには、奥行方向と垂直方向に対するレーザスキャナの計測中心位置とカメラの焦点位置との間隔を設定する。ただし、奥行方向に対しては、設置位置が一致するように設置するため、奥行方向に対する間隔は設定しないものとする。本システムでは、このレーザスキャナとカメラとの間隔の大きさ及びカメラの水平と垂直の画角を用いて、画面上でのレーザスキャナの位置を算出する。レーザスキャナによる計測点の画像上での位置 x は、図5より式(1)にて求められる。

$$x = \frac{\maxPixel \cdot (vGap - d)}{2 \cdot (h - hGap) \cdot \tan(\angle)} \quad (1)$$

レーザスキャナとGNSSとの間隔の大きさは、3次元地図生成機能のために設定する値である。同一領域とする標高差の閾値は、クラスタリング機能にて、地物や地表面の領域を推定する時に用いる値である。3次元情報を取得可能な機器で平面を正面から計測する時に測定誤差が発生するため、平面を計測した点が同一平面上に存在せず、複数の平面が発生する。そのため、本システムでは、同一領域とする標高差の閾値として計測機器の測定精度を設定する。グリッドの幅の閾値は、3次元地図生成機能にて、点群データを一定の大きさのグリッドで分割するための値である。3次元地図を可視化する時、ジブの先端の高度が高い場合や地物の数が少ない場合はグリッドの幅の閾値を小さく、高度が低い場合や地物の数が多い場合は大きく設定して可視化結果の可視性を調整する。そのため、グリッドの幅の閾値は、現場の状況や地物の大きさに合わせて設定する必要がある。吊荷の指定範囲の位置は、クラスタリング機能にて吊荷の位置を取得するために任意で設定する値である。吊荷の縦幅の長さについては、図2のように、機器の設置位置から吊荷の側面や下部（図中A）を計測できないため、操縦者が吊荷の縦幅の長さを実測し、システムに入力する。

(注)レーザスキャナの計測軸を示す。水平:X軸 垂直:Y軸 奥行:Z軸

○	:カメラの焦点
●	:レーザスキャナの計測中心
■	:レーザスキャナによる計測位置
h	:垂直方向の座標値(m)
$vGap$	:奥行方向の設置位置のずれ(m)
$angle$	:カメラの垂直画角(rad)
x	:画像上での垂直方向における位置(px)
$maxPixel$	:画像の垂直方向における最大画素数(px)
$hGap$	:垂直方向の設置位置のずれ(m)
d	:奥行方向の座標値(m)

px単位は下線あり, rad, m単位は下線無しで表記

図5 レーザスキャナとカメラの設置位置

4. 3次元地図生成と地物認識による可視化システムの詳細

4.1 点群データ補正機能

本機能は、レーザスキャナの点群データ、IMUの姿勢角データとGNSSの位置情報の時刻同期処理、及び姿勢角と位置情報を用いた点群データの剛体変換処理により構成される。

4.1.1 時刻同期処理

本処理では、既存システム[5]の時刻同期処理を参考に、レー

図6 3次元地図の生成イメージ

ザスキャナ、IMUとGNSSによる計測データ同士をGNSS時刻にて同期する。そして、時刻同期済の点データ、姿勢角と位置情報の組み合わせを同期済みの計測データとして出力する。

4.1.2 剛体変換処理

本処理では、時刻同期済みの計測データを用いて、傾き、位置と向きを補正した点群データを出力する。まず、同期済みの計測データから、点データ、姿勢角と位置情報の組み合わせを取得する。次に、取得した姿勢角を用いて、点データの座標系を平面直角座標系に剛体変換し、傾き、位置と向きを補正した点群データを出力する。

4.2 3次元地図生成機能

本機能は、補正済みの点群データを一定間隔のグリッドに分割するためのグリッド生成処理と3次元地図更新処理により構成される。

4.2.1 グリッド生成処理

本処理では、補正済みの点群データを一定の大きさのグリッドで分割し、それぞれを代表する点を算出する。まず、補正済みの点群データを全て重ね合わせる。次に、重ね合わせた点群データを一定の大きさのグリッドで分割する。そして、分割したグリッドごとに点群データの標高値の平均を算出する。最後に、グリッドの重心位置と算出した平均の標高値とを持つ点を代表点として出力する。

4.2.2 3次元地図更新処理

本処理では、グリッドごとの代表点を用いて、直前に生成した3次元地図全体を更新する。まず、現在の計測データと直前に生成した3次元地図から代表点を取得する。次に、同一グリッド内に複数の代表点が存在する場合は、直前に生成した3次元地図の代表点を現在の計測データの代表点により更新する。最後に、更新後の代表点を重心点としたグリッドを生成し、図6に示す3次元地図として出力する。本処理により、計測範囲外の作業領域で地物や他建機の移動があった場合であっても、それらの位置を再度計測することにより常に最新の現場の状況を取得できる。

図7 ラベリング処理

4.3 クラスタリング機能

本機能は、3次元地図を用いて吊荷、同一の地表面と地物の領域ごとに一意の番号（以下、ラベル）を付与するためのラベリング処理、吊荷、地表面と地物ごとにラベルを分類するための同一領域推定処理、及び地物領域推定処理により構成される。

4.3.1 ラベリング処理

本処理では、ラスタスキャンを用いたラベリング手法 [18] を参考にして、同一領域ごとにラベルを付与する。まず、3次元地図からグリッドの標高値を輝度値とする疑似画像を生成する。グリッド分割した3次元地図を図7(a)に示す。この時、疑似画像では、画素ごとに標高値を有効桁数小数第1位の浮動小数で管理するものとする。次に、図7(b)に示すように左上から画像を走査し、ラベル①~⑥（図中(c)）を付与する。この時、注目画素とその左上、上、右上、左にある画素との輝度値の差が、同一領域とする標高差の閾値以下であれば同一のラベルとして注目画素のラベルに付与し、閾値より大きい場合は、新たなラベルを付与する。ただし、図7(c)に示すように標高差が小さい画素が近傍に複数存在する場合は、番号が最も小さいラベル③を付与する。そして、図7(d)に示すように画像全体を再走査し、注目画素の近傍に輝度値の差が同一領域とする

図8 フックやワイヤが含まれる場合

標高差以下でかつ、注目画素と異なるラベル⑤が付与されている場合は、注目画素のラベル③で上書きする。最後に、標高値が近いグリッドの集合ごとに同一のラベルを付与した3次元地図を出力する。本処理において、隣り合う代表点間で標高差を比較し、同一地物あるいは地表面の領域として認識することにより、「緩やかな傾斜を含む地表面の領域を認識し、「傾斜のある施工現場において小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題」を解決する。

4.3.2 同一領域推定処理

本処理では、同一のラベルを付与した3次元地図の中から、吊荷、地表面とそれら以外の領域を示すラベルを推定する。まず、既存研究 [5] と同様に操縦者が手動で入力した吊荷の指定範囲内にあるグリッドを全て取得する。次に、グリッドから最も標高値の低いグリッドのラベルを取得し、吊荷のラベルとする。これは、図8に示すように、取得したグリッドの中に吊荷と吊荷より高い位置にあるフックやワイヤを構成するグリッドが含まれているためである。そして、同一ラベルが付与されたグリッド群の中で、グリッド群の面積が最大となるラベルを地表面のラベルとする。これは、施工現場では地表面の領域が最も広いためである。最後に、吊荷、地表面とそれら以外を示すラベルを出力する。

4.3.3 地物領域推定処理

本処理では、吊荷、地表面とそれら以外を示すラベルを用いて、地物ごとの領域を推定する。まず、図9(a)に示すように吊荷と地表面以外を示すラベル④と⑥のグリッドを取得し、その最近傍にある地表面を示すグリッドのラベル①を取得する。次に、図9(b)に示すように、ラベルごとにグリッドの標高値の平均値を算出する。そして、異なるラベル間の平均値の差が同一領域とする標高差の閾値以下である場合は、図9(c)に示すように吊荷と地表面以外を示すラベル⑥を地表面のラベル①に変更し、閾値より大きい場合は、地物のラベル⑥として再分類する。最後に、吊荷、地表面と地物のそれぞれに分類した3次元地図を出力する。本処理において、地物によって周辺の地表面から分断された地表面を地表面として認識し、「地表面に複数の地物が存在する場合に地表面を地物として誤認識する課題」を解決する。

図9 地物領域推定処理

4.4 作業領域可視化機能

本機能は、吊荷領域の吊荷及び地物の高さおよび大きさの情報をカメラ映像上に重畳して可視化するための領域可視化処理と、作業領域の吊荷、地表面と地物の3次元空間における位置関係を3次元地図として可視化するための3次元地図可視化処理により構成される。

4.4.1 領域可視化処理

本処理では、吊荷、地表面と地物のそれぞれにラベルを付与した3次元地図を用いて、吊荷と地物ごとに大きさと高さを映像上に可視化する。まず、GNSSコンパスの計測データを用いて、レーザスキャナの位置と向きを決定する。次に、吊荷や地物を示すグリッドの代表点の画像上における位置 x を式(1)にて算出する。そして、それぞれの画面上における代表点を内包する外形図形を算出し、カメラ画像上に表示する。最後に、外形図形上に地表面からの吊荷と地物の高さを表示する。なお、外形線の描画色は吊荷と地物の高さが高いほど濃い青色、低いほど薄い青色で表示し、高さの有効桁数は小数第1位とする。

4.4.2 3次元地図可視化処理

本処理では、吊荷、地表面と地物ごとに分類された作業領域の3次元地図を用いて、それぞれの3次元空間における位置関係と大きさを可視化する。まず、吊荷、地表面と地物の代表点の位置と高さを取得する。次に、代表点を重心とするグリッドを生成する。この時、グリッドの一辺の幅はグリッドの幅の閾値とする。そして、吊荷、地表面と地物ごとに表示色を変えて3次元空間に3次元地図として可視化する。本処理により、作

図10 実験計画

業領域の吊荷、地表面と地物間の位置関係の把握を支援し、「作業領域にある地物や地表面を認識できない課題」を解決する。

5. 評価実験

5.1 実験計画

本章では、提案システムの有用性を確認するために、図10に示す実験計画に従って2種類の評価実験を行う。図10は、評価実験の検証項目を明確にするため、機能と実験との対応を示す。実験1では、クラスタリング機能により生成した3次元地図と目視で作成した正解データとを比較する。そして、クラスタリング機能により傾斜のある地表面や地物及び複数の地物が配置された地表面を認識できることを確認する。実験2では、作業領域可視化機能により可視化した作業領域の地物ごとの高さ算出精度を評価する。高さの最確値は、地上設置型レーザスキャナにより計測した点群データとする。実験では、既存研究[5]で選定した機器を用い、レーザスキャナとしてVelodyne社のVLP-16を、IMUとして東京航空計器社のGNASモーションセンサを、WebカメラとしてLogicool社のC920rを用いる。これらを図11に示すジブの先端の計測ユニットに固定し、計測した。本研究で新規に用いるGNSSとして、iシステムリサーチ社のu-blox M8P with SOIを用いる。本実験では、GNSSをジブの先端と旋回中心に設置した。レーザスキャナの仕様を表1に、IMUの仕様を表2に、GNSSの仕様を表3に示す。また、クレーンの作業領域内には、建設現場の障害物と見立てる段ボール、建材と仮設の傾斜面を設置し、各実験の評

図 11 計測ユニットと GNSS

表 1 レーザスキャナの仕様

製品名	VLP-16
センサタイプ	16個のレーザ
測定範囲	水平360 全方位 / 垂直30
照射間隔	水平 : 0.1° ~ 0.4° 垂直 : 0.2°
測定距離	約100m (1m~100m)
測定間隔	5~20Hz
測定点数	約300,000点 / 秒
計測精度	±0.03m (1σ@25m)
GNSS	GPSタイム・シンクロナイズ機能

評価対象とする。本実験の環境を図 12 に示す。

5.2 実験 1. クラスタリング精度の評価

5.2.1 実験内容

本実験では、実現場を想定した実験を行うため、図 13 に示すクレーンの静止、旋回及び吊荷の上げ下ろしの操作中に計測を行う。評価対象は、計測データから得られた 3 次元地図上の地表面と地物とする。正解データは、目視で地表面と地物とを分類した結果とする。本実験では、評価対象と正解データとを比較して、提案システムによる地物と地表面の認識精度を評価する。そして、地物認識精度の評価結果から「傾斜のある施工現場において小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題」に対する有用性を検証する。そして、地表面認識精度の評価結果から「地表面に複数の地物が存在する場合に地表面を地物として誤認識する課題」に対する有用性を検証する。また、本実験では、提案システムのクラスタリング機能（以下、提案手法）、既存の RANSAC を用いた手法と最下点抽出法を用いた手法との地表面の認識精度を比較するとともに、提案手法と既存手法の隣点との標高差を輝度値の差として見立てたラスタスキャンを用いたラベリング手法 [18] との地物の認識精度を比較する。各認識精度の評価は、適合率、再現率とこれらの調和平均である F 値により行う。ただし、吊荷に関しては、手動で入力した吊荷の位置にあるラベルを吊荷のラベルとするため、評価は実施しない。また、同一領域とする標高差の閾値として、使用するレーザスキャナの精度 ± 0.03 m, GNSS の精度

表 2 IMU の仕様

製品名		GNAS モーションセンサ
検出範囲	Roll	-180.00 ~ 179.99°
	Pitch	±90°
	Yaw	0.00 ~ 359.99°
精度	Roll, Pitch	±0.2°
	Yaw	—

表 3 GNSS の仕様

製品名	u-blox M8P with SOI
測定間隔	5Hz
計測精度	±0.02m
測位方法	RTK 測位
GNSS	BeiDou, GLONASS, GPS / QZSS

± 0.02 m を合算した 0.10 m を、グリッドの幅の閾値として全体の幅が最も小さい建材の幅に合わせて 0.25 m を設定した。

5.2.2 実験結果と考察

正解データと提案手法により分類した 3 次元地図の出力結果の一例を図 14 に、地表面と地物の認識精度の比較結果を表 4 に示す。まず、図 14 の出力結果を確認すると、提案手法により大半の地表面と地物を正しく認識できることが分かる。ただし、図 12 の右にある背の低い台や図 12 の右上にある幅の狭い型枠を地表面として誤認識する箇所が見られた。前者は、台の上面を計測した点と周辺の地表面との標高差が同一領域とする標高差の閾値以下になったためである。後者では、分割した 3 次元地図上のグリッド内に型枠上面よりも地表面を計測した点が多く混在する。この時、グリッド内の標高値を平均すると、実際の型枠の標高値よりもグリッドの代表点の標高値が低くなる。そのため、型枠と地表面との標高差が同一領域とする標高差の閾値以下となり、型枠を地表面と誤認識したと考えられる。そのため、今後は、背の低い地物や横幅の狭い地物を認識する手法の検討が必要である。

次に、表 4 の地表面を認識対象とした適合率、再現率と F 値を確認すると、全項目において提案手法が既存手法よりも高いことが分かる。これは、最下点抽出法や RANSAC を用いた手法の場合に、平坦部と傾斜部がある地表面の一部を地物として誤認識するためである。このことから、提案手法により「傾斜のある施工現場において小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題」を解決できた。一方で、表 4 の地物を認識対象とした再現率に着目すると、提案手法と既存手法との間に大きな差は見られない。適合率に着目すると、提案手法は 0.897、既存手法は 0.613 となり、提案手法により地物認識精度が改善した。これは、ラスタスキャンを用いた既存手法の場合に、地物によって分断された地表面を地物として誤認識するためである。このことから、提案手法により「地表面に複数の地物が存在する場合に地表面を地物として誤認識する課題」を解決できた。本実験では、設置した地物全体の大きさに合わせてグリッドの幅の閾値を 0.25 m で固定したため、今後、様々な建材や地物が設置された施工現場で最適値を検証する必要がある。

図 12 本実験の環境

図 13 クレーンの動作

図 14 出力結果例

表 4 地表面と地物の認識精度の比較結果

認識対象	手法	認識精度			誤認識した面の数	正しく認識した面の数
		適合率	再現率	F値		
地表面	提案手法	0.997	0.985	0.985	4	1,473
	RANSAC	0.840	0.726	0.779	207	1,086
	最下点抽出法	0.695	0.575	0.629	378	860
地物	提案手法	0.897	0.970	0.932	26	226
	ラスタスキャン	0.613	0.957	0.747	141	223

5.3 実験 2. 高さ算出精度の評価

5.3.1 実験内容

本実験では、作業領域の段ボールの高さとその最確値を比較し、提案システムによる高さ算出精度を評価する。本実験により、「作業領域にある地物や地表面を認識できない課題」に対する提案システムの有用性を検証する。地上設置型レーザスキャナには、FARO 社製の Focus 3D X-330（以下、FARO）を用いる。FARO の計測精度は ± 0.002 m であり、VLP-16 よりも計測精度が高いことから、最確値を算出するために利用した。本実験では、実験 1 の計測中に算出した図 15 に示す段ボール①～⑥の高さを最確値と比較する。最確値の段ボールの高さは、最確値の点群データの中でも段ボール上面を計測した点群データと周辺の地表面の標高値の平均値の差とする。クラスタリング機能により算出する段ボールの高さは、有効桁数を小数第 2 位として評価する。

図 15 評価対象の段ボール

5.3.2 実験結果と考察

段ボールの高さの出力結果の一例を図 16 に、評価結果を表 5 に示す。表 5 より、標準偏差及び最確値と平均値との差は、

図 16 出力結果例

表 5 段ボールの高さの評価結果

段ボール	段ボールの高さ (m)					
	最大値	最小値	平均値	標準偏差	高さの最確値	最確値と平均値との差
①	0.43	0.36	0.40	0.02	0.40	0.00
②	0.85	0.74	0.80	0.03	0.76	0.04
③	0.47	0.36	0.41	0.04	0.39	0.02
④	0.55	0.40	0.43	0.02	0.45	0.02
⑤	0.54	0.46	0.49	0.03	0.45	0.01
⑥	0.52	0.44	0.48	0.02	0.45	0.03

ともに最大で 0.04 m であり、本実験で使用した VLP-16 の計測精度が 0.03 m、u-blox M8P with SOI の計測精度が 0.02 m であることを考慮すると、機器の計測精度の範囲内で段ボールの高さを取得できたことが分かる。本実験結果から、提案システムにより作業領域の地物や地表面の高さを機器の計測精度内で認識できることが分かったため、「作業領域にある地物や地表面を認識できない課題」を解決できた。一方、最大値と最小値に着目すると、平均値との差が大きい箇所が見られる。これは、クレーンが旋回し始めた瞬間や停止した瞬間に、ジブ先端の揺れが非常に大きくなり、段ボールの高さ算出結果に大きなズレが発生するためである。そのため、ジブの先端に設置した IMU の計測値を用いて激しい揺れを検出し、ズレを含む低精度な点群データを除去する手法の検討が必要である。

また、本システムの実用性を確認するため、共著者であるクレーン設計・開発技術者により評価を行った。評価結果を表 6 に示す。表 6 より、本研究にて提案した 3 次元地図による地物の大きさ、位置と高さの算出及び可視化方法に高い評価を得られた。一部の評価項目により、「背の低い地物や幅の狭い地物を地表面として誤認識する課題」と「クレーンが旋回し始めた瞬間や停止した瞬間にジブの揺れが大きくなり、地物の高さにズレが発生する課題」の二つの課題が明らかとなった。そのため、今後はシステムを改良し、これらの課題を解決する手法を検討する。また、追加機能に関する要望も得られたため、これについても開発する。

6. おわりに

本研究では、クレーンの操縦を支援するために、クレーンのジブに設置したレーザスキャナ、IMU と GNSS コンパスを用いて、ジブ下部の吊荷領域だけでなく、クレーンの稼働範囲である作業領域の 3 次元地図を生成する技術を開発した。そし

表 6 クレーン設計・開発技術者による評価結果

評価項目	コメント
吊荷の認識	・3次元地図上で吊荷の位置と高さを可視化できおり、操縦者にとって理解しやすい
地物の認識	・カメラ映像上に表示する地物の位置と大きさを示す枠が既存研究の成果より安定して表示され、分かりやすい ・3次元地図上で地物の大きさ、位置と高さを可視化できおり、操縦者にとって理解しやすい ・カメラ映像上にて、背の低い地物や幅の狭い地物に対して枠の表示が安定せず、地表面として誤認識することがある
地表面の認識	・カメラ映像上で傾斜面を地表面として認識できているため、傾斜面上の地物の位置を把握しやすい
高さ表示	・既存の研究の成果より安定かつ、正確に高さを表示できている ・クレーンが旋回し始めた瞬間や停止した瞬間にジブの揺れが大きくなり、地物の高さにズレが生じることがあるため改良してほしい
新たな要求	・吊荷領域内の動体を認識する機能を追加してほしい ・吊荷の位置を自動で追尾する機能を追加してほしい ・吊荷の奥行、幅、高さの情報を自動で取得し、地表面や地物との接触を事前に警告する機能を追加してほしい

て、地物と地表面の認識機能により、吊荷領域の地物や吊荷の大きさ及びそれらの高さを Web カメラの画像上に可視化し、3 次元空間上における地物と吊荷の位置関係を可視化するシステムを開発した。これにより、既存研究 [5] の課題であった「地表面に複数の地物が存在する場合に地表面を地物として誤認識する課題」、「傾斜のある施工現場において小段の高さが実際の高さよりも低く表示される課題」と「作業領域にある地物や地表面を認識できない課題」を解決した。本システムの有用性を評価するため、地表面と地物の認識精度と、高さ算出精度の評価実験の 2 種類の実験を行い、システムから生成される各データの精度を検証した。その結果、地表面と地物の認識精度は既存手法より高く、また、地物の高さ算出精度は機器の計測精度より高い結果となり、本システムの有用性を確認した。

本研究では、3 次元地図のグリッドの幅や同一領域とする標高差を現場に設置する地物の大きさや計測機器の測定精度に合わせて設定した。ただし、特定の条件下での計測結果による評価のみを実施したため、今後、様々な条件下の実現場で取得された点群データを用いて、本システムのリアルタイム性を損なわないように最適なパラメータ値を設定し、現場の条件下に依らないシステムの検証を実施する予定である。また、背の低い地物や幅の狭い地物を地表面として誤認識する課題とクレーンが旋回し始めた瞬間や停止した瞬間にジブの揺れが大きくなり、地物の高さにズレが発生する課題が残った。前者については、画像の色情報から地物の有無を判断し、その地物の位置を計測した点群データを細分化して 3 次元地図を生成することにより、地物認識精度の高精度化を図る。後者については、IMU の計測値を用いて低精度な点群データを除去するシステムに改良する予定である。本研究の応用として、3 次元地図を用いてリアルタイムに作業領域内の動体を検知し、可視化または自動制御を行い、クレーン操縦者やその周囲の作業員の安全性を向

上するシステムに発展させる予定である。

参 考 文 献

- [1] 国土交通省, i-Construction~建設現場の生産性革命~: <http://www.mlit.go.jp/common/001126452.pdf> [accessed Dec. 4, 2018]
- [2] 林和彦, 嶋田健二郎, 石橋永至, 岡本研二, 米沢保人: “D61EXi/PXi-23 の開発 作業機自動制御ブルドーザ,” *Komatsu Technical Report*, Vol.59, No.166, pp. 9-16, 2013.
- [3] 島野佑基, 上義樹, 下風研一郎: “PC210LCi-10/PC200i-10 の開発 マシンコントロール油圧ショベル,” *Komatsu Technical Report*, Vol.60, No.167, pp. 2-7, 2014.
- [4] 国土交通省, スマートクレーン稼働: <http://www.cbr.mlit.go.jp/kensetsu-ict/@scrap-data/25/12/25-12-11kensetsu-kougyou/25-12-11kensetsu-kougyou03.pdf> [accessed Nov. 11, 2018]
- [5] 窪田諭, 田中成典, 中村健二, 山本雄平, 中原匡哉, 多田野有司, 世俣秀樹, 野口真児, 小阪孝幸, 石川巖, 西本昌司: “クレーン操縦者のための吊荷領域可視化システムの開発,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J101-D, No.1, pp. 154-171, 2018.
- [6] M. Heracles, B. Bolder, and C. Goerick: “Fast Detection of Arbitrary Planner Surfaces from Unreliable 3D Data,” *RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5717-5724, 2009.
- [7] B. Petzold, P. Reiss, and W. Stossel: “Laser Scanning-Surveying and Mapping Agencies are Using a New Technique for the Derivation of Digital Terrain Models,” *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.54, No.1, pp. 95-104, 1999.
- [8] ResearchGate, History and Definition of the so-called “Sobel Operator,” more appropriately named the Sobel-Feldman Operator: https://www.researchgate.net/publication/239398674_An_Isotropic_3x3_Image_Gradient_Operator [accessed Dec. 4, 2018]
- [9] J. Canny: “A Computational Approach to Edge Detection,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.PAMI-8, No.8, pp. 679-698, 1986.
- [10] C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake: “GrabCut — Interactive Foreground Extraction using Iterated Graph Cuts,” *ACM Transactions on Graphics*, pp. 309-314, 2004.
- [11] G. Forlani and C. Nardinocchi: “Adaptive Filtering of Aerial Laser Scanning Data. International Archives of Photogrammetry,” *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.36, No.3/W52, pp. 130-135, 2007.
- [12] J. Deschaud and F. Goulette: “A Fast and Accurate Plane Detection Algorithm for Large Noisy Point Clouds Using Filtered Normals and Voxel Growing,” *Fourth Int. Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, 2010.
- [13] H. Masaharu and H. Hasegawa: “Three-dimensional City Modeling from Laser Scanner Data by Extracting Building Polygons using Segmentation Method,” *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.33, No.3, pp. 556-562, 2000.
- [14] G. Sithole and G. Vosselman: “Filtering of Airborne Laser Scanner Data Based on Segmented Point Clouds,” *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.36, No.3/W19, pp. 66-71, 2005.
- [15] M. Belgiu, I. Tomljenovic, T. Lampoltshammer, T. Blaschke, and B. Hofle: “Ontology-based Classification of Building Types Detected from Airborne Laser Scanning Data,” *Remote Sensing*, Vol.6, No.2, pp. 1347-1366, 2014.
- [16] L. Rongbing, L. Jianyu, Z. Ling, and H. Yijun: “LIDAR/MEMS IMU Integrated Navigation (SLAM) Method for a Small UAV in Indoor Environments,” *In Inertial Sensors and Systems Symposium 2014*, Vol.1, No.1 pp. 1-15, 2014.
- [17] C. Torresan, A. Berton, F. Caroteruno, U. Chiavetta, F. Miglietta, A. Zaldei, and B. Gioli: “Development and Performance Assessment of a Low-Cost UAV Laser Scanner System,” *Remote Sensing*, Vol.10, No.1094, pp. 1-17, 2018.

[18] 村上伸一: 3次元画像処理入門, 東京電機大学出版局, 2010.

(2019年1月18日 受付)

(2019年3月1日 採録)

[問い合わせ先]

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

関西大学環境都市工学部

窪田 諭

TEL: 06-6368-1629

E-mail: skubota@kansai-u.ac.jp

— 著 者 紹 介 —

くぼた りょ
窪田 諭 [正会員]

1975 年生。2000 年関西大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了。博士(工学)。現在、関西大学環境都市工学部都市システム工学科教授。

2016 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞。

たなか せいし
田中 成典 [正会員]

1963 年生。1988 年関西大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了。博士(工学)。現在、関西大学総合情報学部教授及び関西大学先端科学技術推進機構社会空間情報科学研究センター長。

2016 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞。

なかもら けんじ
中村 健二 [正会員]

1981 年生。2009 年関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程修了。博士(情報学)。現在、大阪経済大学情報社会学部教授。

2016 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞。

やまもと ゆうへい
山本 雄平 [正会員]

1986 年生。2015 年関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程修了。博士(情報学)。2015 年関西大学先端科学技術推進機構特別任命助教, 2018 年同特別任命准教授, 2019 年から大阪工業大学情報科学部特任講師。Web マイニング, 自然言語処理, スポーツ情報学に関連する研究に従事。

なかほら まさや
中原 匡哉 [学生会員]

1992 年生。2018 年関西大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士課程前期課程修了。現在、関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程在学中。システム設計等の研究開発に従事。2014 年から(株)関西総合情報研究所で活動。

なかばた こうき
中畑 光貴 [非会員]

1995年生。2019年関西大学総合情報学部総合情報学科卒業。現在、関西大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士課程前期課程在学中。画像、点群データ処理等の研究開発に従事。2017年から（株）関西総合情報研究所で活動。

こさか たかゆき
小阪 孝幸 [非会員]

1995年筑波大学第三学群基礎工学類卒業。1997年筑波大学理工学研究科修了。同年、（株）タダノ入社。2013年東京理科大学大学院イノベーション研究科修了。入社以来、クレーン実験業務、技術企画業務に従事。現在、技術研究所技術企画ユニット・ユニットマネージャー。

ただの ゆうじ
多田野 有司 [非会員]

1983年東京工業大学工学部機械工学科卒業。1983年（株）日立製作所に入社。知識工学に関する研究開発業務に従事。1985年より研究開発用試験設備の設計開発業務に従事。1998年（株）タダノに入社。高所作業車の設計開発業務に従事。現在、執行役員・技術研究部門担当。

いしかわ いわお
石川 巖 [非会員]

1991年芝浦工業大学電気工学科卒業。同年、（株）タダノ入社。移動式クレーン車等の新機能の研究開発に従事。現在、技術研究所知覚創造ユニット・アシスタントマネージャー。

よだわら ひでき
世俣 秀樹 [非会員]

1980年岡山大学工学部機械工学科卒業。1982年同大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年、（株）タダノ入社。開発部門配属、構造物設計、解析業務。その後、機種開発に従事。現在、技監・開発部門LE技術部長。

にしもと しょうじ
西本 昌司 [非会員]

1992年筑波大学第三学群基礎工学類卒業。同年、（株）タダノ入社。クレーン、高所作業車の電子制御システム設計に従事。現在、技術研究所主幹。

のぐち しんじ
野口 真児 [非会員]

1986年神戸商船大学卒業。同年、カヤバ工業（株）入社。基盤技術研究所にてアクティブ制御装置の研究開発に従事。1992年（株）タダノ入社。開発部にて高所作業車/移動式クレーンの制御システム開発。1998年徳島大学大学院修了、博士（工学）。2014年より技術研究所で移動式クレーン等の技術研究に従事。現在、技術研究所所長。

Research Concerning Visualization System for Crane Operation with Producing Three-Dimensional Map and Recognizing Features

by

Satoshi KUBOTA, Shigenori TANAKA, Kenji NAKAMURA, Yuhei YAMAMOTO, Masaya NAKAHARA, Koki NAKAHATA, Yuji TADANO, Hideki YODAWARA, Shinji NOGUCHI, Takayuki KOSAKA, Iwao ISHIKAWA, and Shoji NISHIMOTO

Abstract:

In the construction sites using crane, it is important for the crane operator to correctly grasp the sizes of the suspended load and its surrounding features, their heights and positional relationship. For supporting those works, the authors have developed the system to visualize the sizes and heights of the suspended load and its surrounding features on an image from over the suspended load, by installing a camera, a laser scanner and an inertial measurement unit on the tip of a jib. However, this system had three problems. Firstly, it was impossible to correctly recognize part of the features and ground surface when there were multiple features. Secondly, it was impossible to judge part of the slope as the ground surface when there was a slope on the ground surface within the site. Finally, it was impossible to recognize the features and the ground surface located outside the range of the crane operation. In this study, in order to solve these problems, the system is redeveloped for assisting the operator using a camera, a laser scanner and an inertial measurement unit installed on the tip of a jib, and global navigation satellite systems newly installed on the tip of a jib and the rotary center of a crane. And then, this system can generate a three-dimensional map of the operating range of the crane and display the heights and sizes of features around the crane. Finally, we evaluate in terms of usefulness and reliability through experiments.

Keywords: crane, operator assistance, laser scanner, point cloud data, clustering, three-dimensional map

Contact Address: **Satoshi KUBOTA**

Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University
3-3-35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564-8680, Japan
TEL: +81-6-6368-1629
E-mail: skubota@kansai-u.ac.jp