

油圧ショベルの遠隔操作のための CG 重畳表示システム

谷 本 貴 頌・吉 灘 裕

近年は災害現場等での無人化施工の需要が増しているが、無人化施工で用いられる遠隔操作では遠近感の把握が難しく、作業効率の低下が問題であった。従来は複数視点のカメラ映像を用いていたが、複数のディスプレイで距離を確認しながらの作業となるために効率の低下を招いていた。そこで操作者視点の映像に歯先人工影と地形モデルのグリッドをCGで重畳表示することで、地表面上でのバケット歯先と掘削地点との距離を二次元映像上で視認可能とした。遠隔操作プラットフォームを用いた位置合わせ評価実験を行った結果、位置合わせ作業における誤差が低減することを示した。

キーワード：無人化施工、遠隔操作、油圧ショベル、数値地形モデル、拡張現実

1. はじめに

近年、危険な災害現場や町から遠く離れた鉱山での無人化施工の必要性が増してきている。無人化施工の方式としては設計図面に沿って建設機械を自動制御する方式¹⁾と、人が遠隔地から遠隔操作で制御する方式²⁾が存在するが、作業対象の土砂や礫の混合具合や土の質などの予測が難しい状況では、完全な自動制御による作業は現実的ではない。一方、遠隔操作による作業では、搭乗操作と比較して作業効率が大幅に低下するという問題を抱える²⁾。

従来の遠隔操作では複数の視点から作業対象を撮像し、複数ディスプレイで作業状況を確認しながらの作業であった。しかし、表示される映像は二次元映像であるために遠近感の把握は難しい。作業対象と歯先との距離を確認するために各視点のカメラ映像を交互に見ながらの作業となるため、作業時間の増加に繋がる³⁾。

三次元情報を提示して遠隔操作を支援する研究も進められてきた。藤吉ら⁴⁾や川本ら⁵⁾は距離画像センサやステレオカメラを用いて、周囲地形を三次元点群として表示した。しかし、カメラ映像の解像度や色などの情報はないために、カメラ映像と三次元点群の画面の両方を見なければならず効率の低下を招く。また、各作業毎に三次元点群を見る最適な視線方向が異なるため、視点の移動をする必要も出てくる。複数視点映像を利用して遠隔操作を行わせた場合でも、一つの視点のみで作業を行う方が効率の向上に寄与することが知られている⁶⁾。

そこで本研究では、操作者視点の二次元映像のみで

も遠近感の把握を容易にすることを目的とし、操作者視点映像への地形モデルCG重畳表示システムを構築した。周囲の地形情報は距離画像センサを用いて取得し、地形モデルを生成した。地形を水平面で格子状に分割し、各格子点で高さ情報を持った数値地形モデル(DTM)でデータを保持することで、データ量の軽量化と処理の高速化を実現した。操作者視点座標に地形モデルを表示し、水平面で等間隔な格子を地表面に投影することで、地形の凹凸を二次元映像で表現した。さらに作業対象位置とバケット歯先位置の相対的な位置関係を二次元上で視認しやすくするために、バケット歯先座標から地表鉛直下の位置に人工的な影を重畳表示した。これにより、作業対象の位置とバケット歯先位置の地表面上での距離が二次元映像上で視認可能となった。また、篠原ら⁷⁾の開発した実機特性を付与した遠隔操作評価プラットフォームを利用することで、作業効率の評価実験を行った。

2. 遠隔操作評価プラットフォーム

遠隔操作の作業効率評価において、実機で実験をすることは望ましいが、実験場や車両整備などの実験条件を揃えることが難しい。そこで、篠原ら⁷⁾の開発した模型を用いた遠隔操作評価プラットフォームに周囲地形を計測する距離画像センサを追加してシステムを構成した。システムの構成を図1に示す。

本研究では、操作対象として1/12縮尺の油圧ショベル模型の模型プラットフォームを使用した。模型の

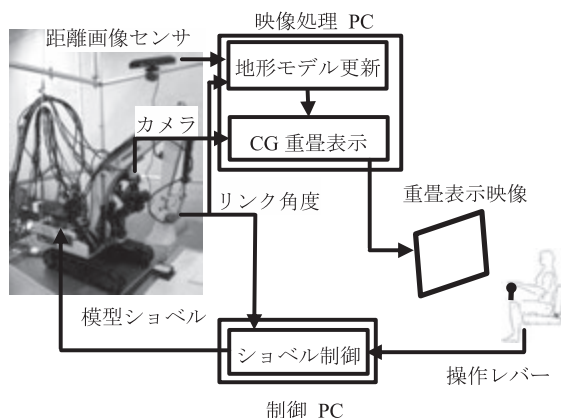


図-1 システム概要

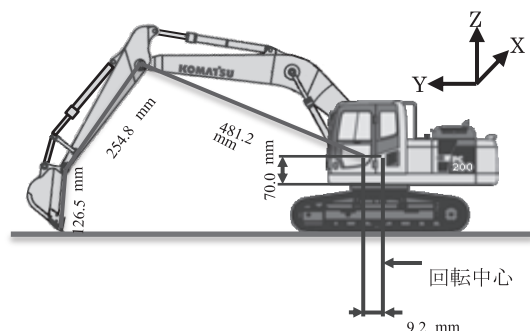


図-2 模型ショベル寸法図

座標系, 各リンク長を図-2に示す。この模型は市販の油圧式ラジコンショベルをベースとしており, 模型の制御特性を実機の制御特性に近づけるため, 実機のダイナミクスモデルを構築し, 模型のダイナミクスモデルへ導入することで実機相当の運動特性が付与されている⁷⁾。模型制御PCと映像処理PCは別であるため, 模型の各関節角度をTCP/IP通信により映像処理PCへ送信し, 地形CG重畳表示に使用した。

遠隔操作で表示する操作者視点映像のための撮像装置にはPointGrey社のFlea3を利用し, 模型の操縦席付近に装着した。解像度 1920×1080 pixelでフレームレート60 fpsで撮像を行った。得られた映像は地形モデルCGを重畳表示し, 55インチディスプレイ(東芝社REGZA55EX3)で表示した。ディスプレイと操作者との距離は1.7 mとした。

地形情報取得のための距離画像センサにはMicrosoft社のKinectを用い, 図-1で示すようにショベル模型上方の実験フレームに固定した。実機における使用を考えた場合は模型本体への取り付けが望ましいが, 模型で作業する領域の多くがKinectから近すぎるために測定範囲外となるため, 模型外部に設置した。実機においてもカメラ車等を使用して外部から映像を取得し, 遠隔操作を行うこともあるため, 本研究では模型外部の実験フレームへの設置とした。

3. 地形モデル生成

地形情報の表示のために, 距離画像センサから周囲地形の距離情報を取得し, 世界座標上で地形モデルの生成を行った。本研究では座標空間は3つあり, 地形モデルや車両の情報を扱う世界座標, 距離画像センサの距離画像センサ座標, 操作者視点の操作者視点座標である。本研究で用いたカラーカメラおよび距離画像センサはどちらもカラー画像を撮像できるため, 距離画像センサ座標と操作者視点座標との変換行列 R_{do} , T_{do} は, OpenCV⁸⁾のキャリブレーションを用いて計算できる。ただし, カラーカメラと距離画像センサの距離や設置角度が大きく異なるため, キャリブレーションの位置精度に問題があった。そのため, カメラ間の位置計測を行い調整を行った。操作者視点位置はカラーカメラ設置位置であるため, カメラ位置と姿勢を計測し, 操作者視点座標と世界座標との変換行列 R_{go} , T_{go} を設定した。周囲の地形情報は距離画像センサ座標で計測されるため, 世界座標への変換行列 R_{dg} , T_{dg} は式(1)で算出した。

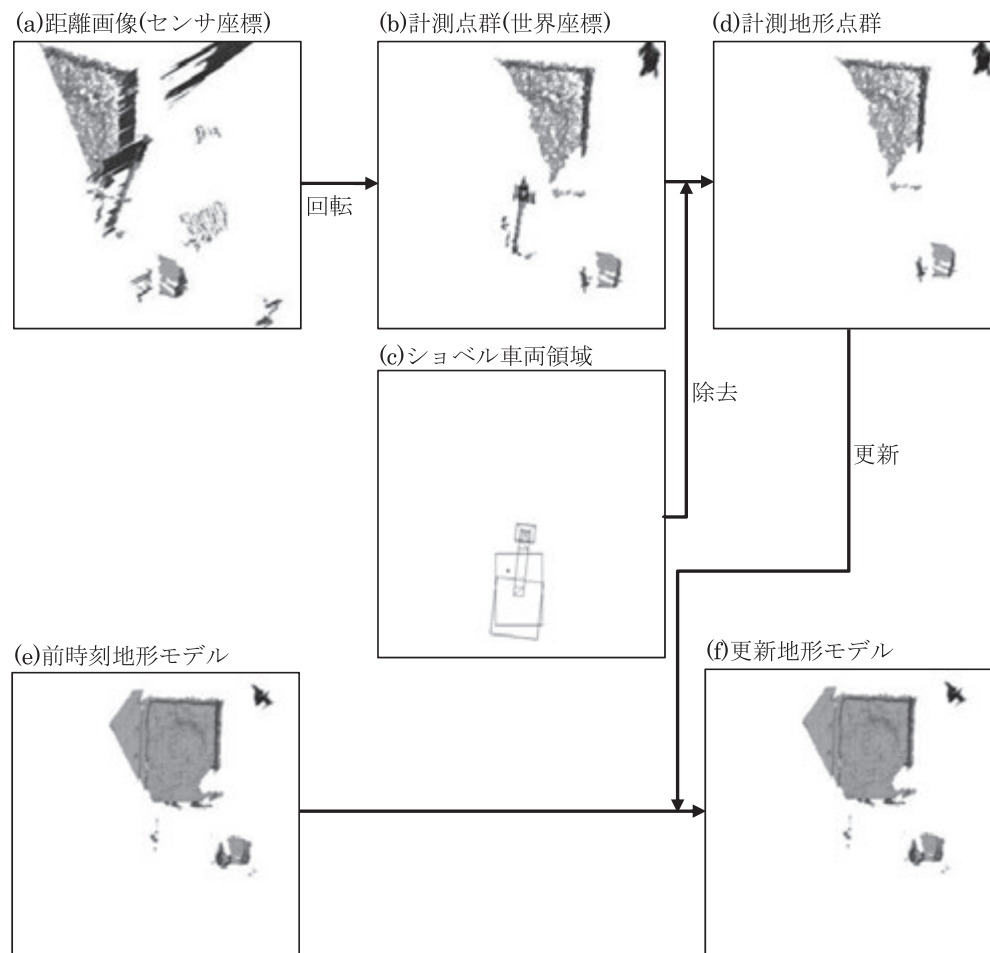
$$\begin{aligned} R_{dg} &= R_{go}^T R_{do} \\ T_{dg} &= R_{go}^T (T_{do} - T_{go}) \end{aligned} \quad (1)$$

距離画像センサで計測した図-3(a)の距離情報を上記変換行列で世界座標に変換した結果を図-3(b)に示す。得られた座標データ群は車両も含んでいるため, その領域を除去して地形情報とした。車両の各リンク領域を直方体 L_i で近似し, 制御PCから得られた模型リンク角度と模型のモデル情報を基に車両領域を計算した。世界座標上で計算された車両領域を図-3(c)に, 計測領域から車両領域を除去した地形更新領域を図-3(d)に示す。

地形は作業による変化があるため, ベイズ推定を用いたモデルの更新を行った。距離画像センサから得られる地形モデルは誤差を含むため, 観測された座標のZ方向について正規分布を仮定し, DTM上の高さ情報もZ方向についても正規分布を仮定し, ベイズ推定により更新を行った。

$$p(m_t | z_t) = p(z_t | m_{t-1}) p(m_{t-1})' \quad (2)$$

ここで $p(z_t | m_{t-1})$ は距離画像センサで観測した z_t における条件付き確率, $p(m_{t-1})'$ がDTMの事前確率, $p(m_t | z_t)$ が事後確率とした。この時に最も確率が高くなるZ値をDTMの高さ情報とし, 正規分布を仮定した事後確率を設定した。距離画像センサにより観測される条件付き確率の分布は, Z方向のみの



図—3 地形モデル更新プロセス

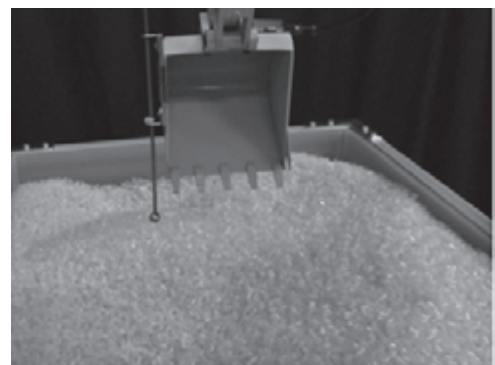
正規分布として中央値の確率を 0.5 とした。また、作業による地形の変化に対応するため、次時刻の事前確率に前時刻の事後確率をそのまま使うのではなく、中央値の確率を低減させることで新たな観測値の影響を強くした。地形更新領域から事後確率を計算し、上記により得られた更新後の地形モデルを図—3 (f) に示す。

上記で計算された地形情報を数値地形モデル(DTM)で保存した。鉱山などの周囲に人工物がない作業環境の場合は、二次元格子点に高さ情報だけを持ったDTMで十分に地形が表現でき、地表面メッシュの計算量削減や最近傍点探索が不要になるためである。地形モデルは格子間隔を 5 mm とし、XY 方向に ±1280 mm の範囲の情報を保持することで、模型作業範囲内を概ねカバーする地形モデルを生成した。

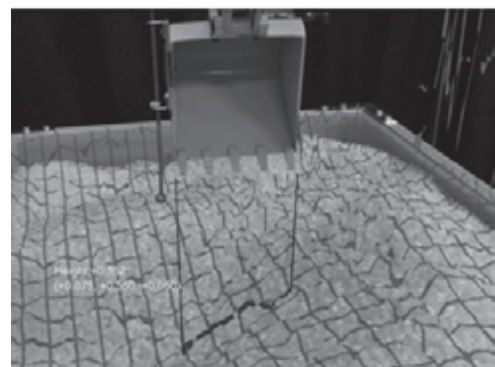
4. 地形 CG 重畳表示

操作者視点映像がカメラ映像そのままであると、二次元映像であるためにバケット先端から作業地点までの高さや距離等の情報が得られない(図—4 (a))。

(a)通常カメラ映像



(b)CG重畳表示映像



図—4 地形モデル重畳表示例

そこで、地形モデルから地表面の等間隔グリッド、およびバケット歯先の人工影を生成することで、地表面上でのバケット歯先位置と作業地点との距離を二次元映像上で確認可能にした。

地表面のグリッド描画のためには地表面メッシュ情報が必要となるが、地形モデルがDTMで構成されているため、地表面メッシュは隣接格子点で構成される。地表面のメッシュ情報は隣接格子点で固定であるため、地形の更新情報は地形モデルの座標情報だけでよく、ディスプレイへの描画時にOpenGL上で各描画点の座標がメッシュの座標情報から自動的に補間される。補間された座標が地形グリッドの描画間隔から閾値以内にある場合に地形グリッドの描画を行った。地形の凹凸や車両領域によりグリッド線の遮蔽が起るため、Zバッファを利用して遮蔽部分は描画対象から除去した。本研究では描画グリッド間隔をDTMの格子間隔と同じ5mmとしたが、作業位置までの距離によって見やすい描画グリッド間隔が変わる可能性があるため、地形グリッドのON、OFFや描画グリッド間隔を変更できるようにした。

バケット歯先の人工影はバケット歯先の位置が二次元上で視認できることが求められるため、バケット歯先から鉛直下の地表面に人工影の描画を行った。自然の影は照明源と物体との延長線上に生成されるが、照明位置により状況が変化するため、完全な位置指標にはならない。人工影の描画には照明光と地表面との衝突点探索は行う必要がなく、本研究では遠隔操作時のモデルの角度、モデル情報から得られるバケット位置のxy座標に該当するDTM上の座標に直接描画が可能となる。

作業地点と投影されたバケット歯先人工影とが地表面の画素間の距離として視認できるため、等間隔な描画グリッドと比較することで、グリッドの数や歪みなどから作業地点までの距離の視認が二次元映像上であっても容易になる。地形グリッドを青線、バケット歯先人工影を赤線で操作者視点に重畳表示した結果を図-4(b)に示す。

5. 作業効率評価実験

本研究のシステムを用いて、図-5に示す位置合わせ機材を用いた位置合わせ評価実験を行った。制御特性や作業の種類を考慮すれば、実機による掘削排土作業での効率評価が望ましいが、遠近感が乏しいことによる作業性の低下が原因であれば、簡易な位置合わせ作業でも作業時間や精度に差が生じると考えられ

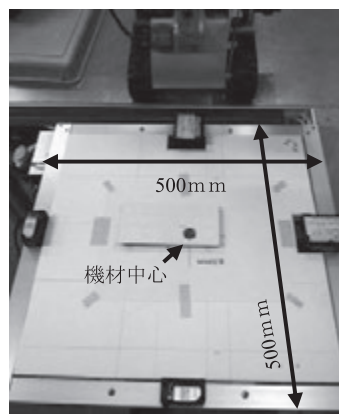


図-5 位置合わせ評価機材

る。そこで本研究では、操作者視点映像上で重畳表示の有無を変え、位置合わせ操作の作業時間、操作精度を評価した。

(1) 実験方法

評価実験は位置合わせ機材上の中心部を目標地点として、作業時間および位置合わせ誤差を評価した。位置精度を正確に評価するために、図-4に示すようにバケット歯先左側に金属球のついた棒を装着し、金属球を目標地点に下ろす作業とした。金属球のy軸位置はレーザー変位計（Keyence社製IG-208）を用いて計測した。

実験の手順は以下の操作で行った。

- ①開始地点に歯先先端部（金属球）を移動
- ②合図と共に目標地点上空まで金属球を移動（y軸のみ操作）
- ③目標地点上空に到達したと操作者が判断した時に目標地点へ金属球を降下（z軸のみ操作）
- ④移動開始から金属球の降下完了までの作業時間、金属球の位置精度を評価

作業開始地点は目標地点からy軸に+170mm、z軸に+10、20、30、40mmの位置に設定した。yz平面での実験概要図を図-6に示す。上記の作業を被験者1名が各高さで10回試行し、重畳表示の有無で比較を行った。

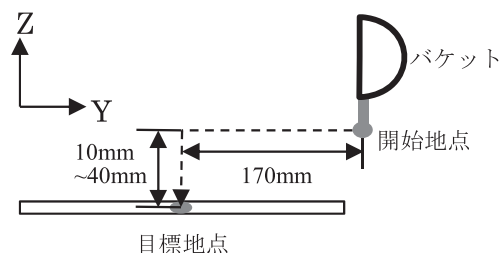


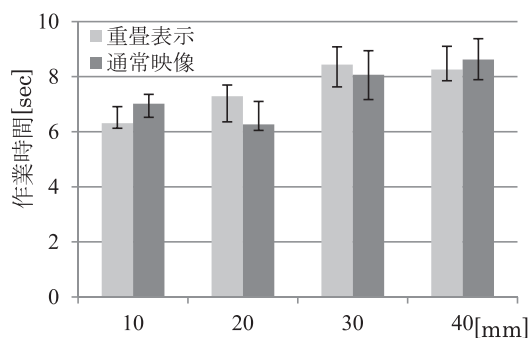
図-6 実験手順図

二次元映像上での遠隔操作の問題は遠近感の不足であることから、本実験では模型の旋回操作は行わず、yz平面上での操作だけに限定して評価を行った。本実験では実験用に目標地点を赤丸で強調しているため、目標地点付近でyz両軸の操作ができると目標地点が車両先端部により遮蔽されることで遠近感がなくとも位置合わせできてしまう問題がある。そのため、目標地点上空までの移動と降下を分けることにより、目標点の近傍での操作による遮蔽の影響を少なくした。実機の場合でも200～300mm程の高さから地面に降下させる場合は、本実験と同程度の高さでの作業となる。

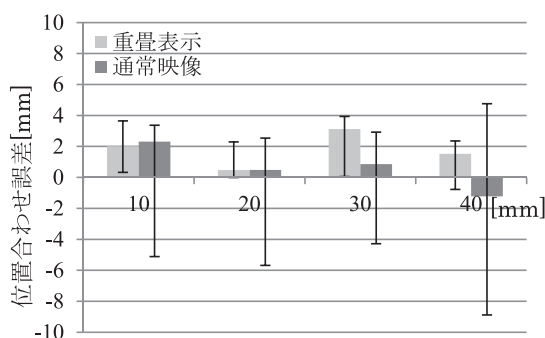
また被験者は実機の操作未経験者であるため、実機の操作パターンに慣れていなかった。そのため、非熟練者であっても表示方式の違いによる評価が行いやすい操作方式が求められ、篠原ら⁷⁾が用いた座標軸とレバー軸が1対1対応になったベクトル操作方式を用いた。

(2) 実験結果

実験結果の作業時間を図一7に、位置合わせ誤差を図一8に示す。グラフは各高さの実験における作業時間、誤差の中央値を示し、エラーバーは四分位数である。図一7からわかるとおり、操作開始地点が高くなれば、移動時間が増えるために作業時間は増加した。重畳表示がある場合はない場合と比較して平均



図一7 作業時間



図一8 位置合わせ誤差

103.3%であり、重畳表示の有無による作業時間の差は見られなかった。しかし、位置合わせ誤差については重畳表示を用いた場合に誤差の四分位範囲が平均43.4%に低減した。したがって、操作者視点の二次元映像のみであっても、バケット歯先の人工影と地形グリッドを重畳表示することで、従来の課題であった遠近感の不足を補うことができ、位置の調整が容易になるため、作業効率の向上が見込めると考えられる。

本実験では非熟練者を被験者として実験したが、藤野ら²⁾の報告によれば熟練に関わらず対象物操作時の距離確認に時間を要している。そのため、重畳表示による距離情報の支援があれば、操作の習熟に関わらず作業効率の向上が期待できると考えた。ただし、熟練者の場合は歯先の幅情報と比較して空間把握を行っているとの報告もあるため、今後の課題として実機上での作業効率評価実験があげられる。

6. おわりに

近年、危険な災害現場や鉱山等で建設機械の無人化施工が求められている。しかし無人化施工に用いられる遠隔操作では搭乗操作に比べて効率が低下することが知られており、特に二次元映像上では遠近感の把握が難しいという点があげられていた。従来は複数視点映像や両眼立体視を用いていたが、操作対象の距離を複数視点で確認すると作業時間が増加し、両眼立体視では長時間の作業では疲労が激しくなるという欠点があった。そこで本研究では、操作者視点映像にバケット歯先の人工影と地形モデルのグリッドを重畳表示することで遠近感の把握を容易にすることを提案した。

地形モデル生成のために遠隔操作評価プラットフォームに距離画像センサを用いることで、地形の三次元情報を取得した。距離画像センサから得られた距離情報を世界座標へ変換し、車両領域を除去し、DTM上に地形情報を保存することで、地形モデルを作成した。

二次元映像上での遠近感の把握のために地形モデルから地表面の等間隔グリッド、およびバケット歯先の人工影を操作者視点映像に重畳表示した。これにより地表面上での歯先位置と作業対象地点との距離が二次元映像上でも可能になった。

遠隔操作評価プラットフォームと位置合わせ評価機材を用いて評価実験を行った結果、作業時間に関しては重畳表示の有無による違いは見られなかったが、位置合わせ誤差に関しては重畳表示を用いることで誤差の四分位範囲が約43.4%に低減する結果が得られた。

今後の課題として、カメラキャリブレーションの高精度化、他の表示方式と比較した位置精度評価実験、実機実験や遠隔操作の遅延による影響の評価などがあげられる。

J C M A

《参考文献》

- 1) 山元弘, 茂木正晴, 大槻崇, 柳沢雄二, 野末見, 山口崇, 油田信一, “動作計画と制御に3次元情報を用いた自律油圧ショベルプロトタイプの開発”, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.8, pp.488-497, 2012.
- 2) 藤野健一, 茂木正晴, 西山章彦, 橋本毅, “無人化施行におけるオペレータの熟達に関する研究”, 第13回建設ロボットシンポジウム, 2012.
- 3) A. Nishiyama, M. Moteki, K. Fujino and T. Hashimoto, “Research on the comparison of operator viewpoints between manned and remote control operation in unmanned construction systems,” Proc. the 30th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC), pp. 772-780, 2013.
- 4) 藤吉卓也, “無人化施工におけるリアルタイム3Dスキャナーの活用”, 建設機械, Vol.50, No.11, pp.21-27, 2014.
- 5) 川本駿, 皿田滋, 小谷内範穂, 坪内孝司, “ステレオビジョンと複合現実感を用いた建設遠隔操作のための作業環境呈示手法の提案とその模擬環境および実環境への適用”, 第13回建設ロボットシンポジウム, pp. 275-282, 2012.

- 6) 関川健一, 本間政幸, “無人化施工機械の操作性向上の検討”, Technical report, 北陸技術事務所, 2006.
- 7) 篠原啓, 吉瀬裕, 倉鋪圭太, 深野亮, “建設機械遠隔操作の研究—建設機械模型システムの開発と画像提示方法の評価—”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, IP1-L04, 2014.
- 8) OpenCV official website.: www.opencv.org.

[筆者紹介]

谷本 貴頌 (たにもと たかのぶ)
大阪大学大学院 工学研究科
特任助教



吉瀬 裕 (よしなだ ひろし)
大阪大学大学院 工学研究科
特任教授



「建設機械施工ハンドブック」改訂4版

建設機械及び施工の基礎知識、最新の技術動向、排出ガス規制・地球温暖化とその対応、情報化施工などを、最新情報も織り込み収録。

建設機械を用いた施工現場における監理・主任技術者、監督、世話役、オペレータなどの現場技術者、建設機械メーカー、輸入商社、リース・レンタル業、サービス業などの建設機械技術者や、大学・高等専門学校・高等学校において建設機械と施工法を勉強する学生などに必携です。

建設機械施工技術の修得、また1・2級建設機械施工技士などの国家資格取得のためにも大変有効です。

[構成]

1. 概要
2. 土木工学一般
3. 建設機械一般

4. 安全対策・環境保全
5. 関係法令
6. トラクタ系機械
7. ショベル系機械
8. 運搬機械
9. 基礎工事機械
10. モータグレーダ
11. 締固め機械
12. 舗装機械

●A4判/825ページ

●定 価

一般: 6,480円 (本体6,000円)

会員: 5,502円 (本体5,095円)

※送料は一般・会員とも沖縄県以外は600円、沖縄県1,050円

●発刊 平成23年4月20日

一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>