

アーム型屋外建機の遠隔操作のための 測距センサを用いた手先映像提示システム

○長野 樹, 藤井 浩光, 橘高 達也, 淵田 正隆 (東京大学),
深瀬 勇太郎, 青木 滋, 鳴海 智博 (清水建設), 山下 淳, 浅間 一 (東京大学)

See-through System Using 3D Laser Range Finder for Remote Controlled Construction Machineries

○ Tatsuki NAGANO, Hiromitsu FUJII, Tatsuya KITAKA, Masataka FUCHIDA (The University of Tokyo),
Yutaro FUKASE, Shigeru AOKI, Tomohiro NARUMI (Shimizu Corporation),
Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : This paper describes a system to see through foreground obstacles for remote controlled machineries. In order to increase the efficiency of remote control, the proposed method uses 3D laser range finder in addition to two RGB cameras, and enables to integrate the camera images. Accordingly, this system can reduce the blind spots in the camera image.

1. 序論

近年、頻発する自然災害への対応において現場へと立ち入る作業員の安全が重要となっている。例えば、1991年の雲仙普賢岳での火砕流被害を契機として、無人化施工技術を使ったロボットによる災害対応技術の開発が盛んに進められている¹⁾。

しかし、無人化施工ではオペレータが遠隔操作を行うため、搭乗操作と比較して現場の状況に関する情報の不足や操作方法の違いによる不慣れから作業効率が低下することが指摘されている²⁾。関川ら³⁾が行った無人化施工の実態調査では、その主な要因として、オペレータの目となるカメラの映像において障害物による隠れが多く、実際に作業対象物を視認可能な領域（作業視野）が狭くなることを挙げている。さらにこの調査では、遠隔操作時のオペレータの注視箇所について、オペレータは、操作のモニターが複数視点で用意されているにもかかわらず、特定のモニターのみを注視していることも指摘している。このことから、カメラの台数を増やして複数映像を提示することよりも、1つの映像中での隠れを低減し作業視野を拡大することが有効であると考えられる。

災害対応における無人化施工による重要な作業の1つとして、屋外でのがれきの撤去作業が挙げられる。がれきの撤去などでは、Fig. 1のような大型のアーム型建機を遠隔操作により用いる。このような建機の遠隔操作では、手先についたグリッパを開閉してがれきを取り除くため、カメラでグリッパの周囲の状況を正確に把握することが効率や安全性の面から非常に重要である。その一方で、グリッパの近くにカメラを設置してしまうと、がれきの破碎によってカメラが破損してしまうことが考えられ、Fig. 1に示すようにグリッパから離れたアーム部にカメラを取り付ける

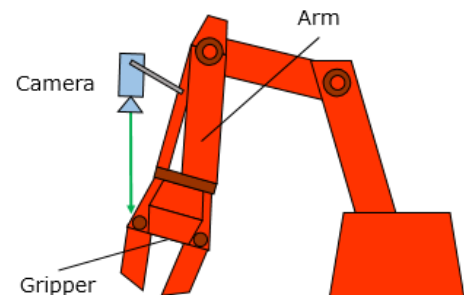


Fig. 1: The example of arm type construction machineries

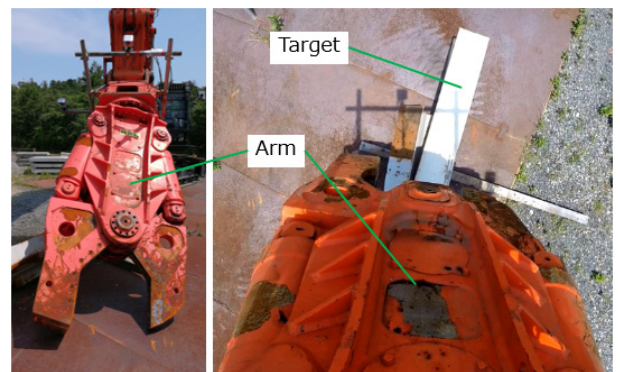


Fig. 2: The image of the arm (left) and the image from the camera attached to the arm (right)

ことが求められる。その場合、カメラの映像中の広い範囲に建機自身のグリッパやアームによる隠れが生じるという問題が起きる。Fig. 2は、映像中央のグリッパががれきを把持する様子、アーム部のカメラから見た映像である。把持対象であるがれきが建機のアームによって遮蔽されていることが確認できる。

隠れの低減や作業視野の拡大のために、複数の映像を統

合して遠隔操作に有効な映像を生成する手法がこれまでに提案されてきた。橘高ら⁴⁾は、RGB-D カメラを使い、半隠消映像と呼ばれる画像中の遮蔽物を透視した映像を生成するシステムを提案した。複数の映像を RGB-D カメラによって 3 次元点群化して合成することにより、任意視点からの映像生成に成功している。しかし、この手法で使用する RGB-D カメラは距離の測定に赤外光を用いているため、太陽光の影響が強い屋外環境で使うことはできない。さらに測定可能距離が短いこともあり、大型の屋外建機に適用することは困難である。

一般的に、屋外で利用可能な測距手段としてレーザ光を用いた Time of Flight 方式のセンサが用いられるが、このセンサではテクスチャを取得することはできない。本研究では、3 次元レーザ測距センサと、テクスチャ取得のための複数台のカメラを用いることで屋外環境に対応することのできる映像提示システムを構築することを目的とする。

2. 提案手法

2.1 測距センサ使用時の課題とアプローチ

本研究では、屋外環境において、環境の 3 次元情報を得るために 3 次元レーザ測距センサを用いる。以下に、測距センサを使用して半隠消映像を生成する際の 2 つの課題と本研究のアプローチを述べる。

- ・ 測距センサの情報とカメラの映像を重畳させて使用するには、カメラと測距センサの座標系の相対的な位置関係を求める必要がある。本研究では、キャリブレーションによりカメラと測距センサの相対的な位置と姿勢に関する 6 自由度のパラメータを求める (2.3 節)。
- ・ レーザを使った測距センサは、前述の RGB-D カメラと比べると取得できる 3 次元点群の密度が疎になるという問題がある。点群の密度が低いと情報の欠損が大きいため、テクスチャを提示するために点群を投影する手法⁴⁾⁵⁾を用いた場合、点と点間の情報を提示することができない。そこで、点群間を補間することで環境情報の欠損を防ぐ必要がある。本研究では、点群のメッシュ化とテクスチャマッピングによる高速な補間手法を提案する (2.4 節)。

2.2 提案手法の概要

まず、システムは、アーム部に取り付けられたカメラ (メインカメラ) とメインカメラの遮蔽領域を補うためのカメラ (補助カメラ)、および測距センサの組からなる

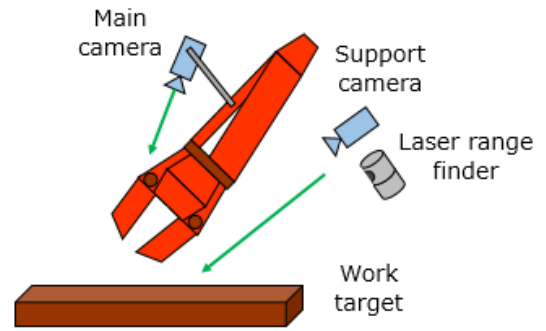


Fig. 3: The diagram of the proposed system

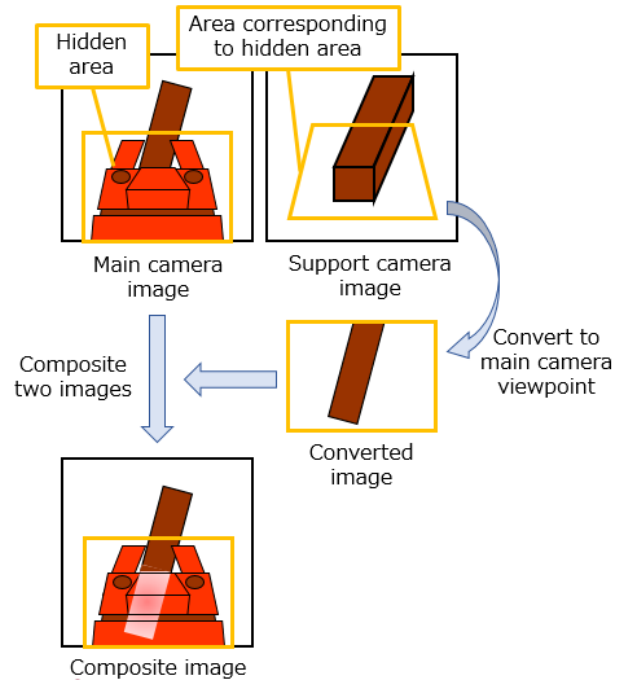


Fig. 4: The flow of the proposed method

(Fig. 3)．補助カメラと測距センサはメインカメラの遮蔽領域を観測できるようにアームを挟んでメインカメラの反対側に配置する。

次に提案手法の流れを以下に示す (Fig. 4)。

- 1) 補助カメラと測距センサにより遮蔽領域の 3 次元情報とテクスチャ情報を取得する。
- 2) 測距センサで得られた 3 次元点群における近傍の 3 点からメッシュを生成し、補助カメラで取得したテクスチャをマッピングする。
- 3) テクスチャ付きメッシュを座標変換によりメインカメラ視点の映像に投影し、メインカメラの映像とアルファブレンディングによって合成する。

以上をリアルタイムで処理することで、アーム部を透視する半隠消映像を生成する。

2.3 キャリブレーション

本研究では, Zhang ら⁶⁾⁷⁾ が提案したキャリブレーション手法を用いてカメラと測距センサの位置関係を求める。

この手法では, Fig. 5 のようにカメラと測距センサが同一のキャリブレーションボード (以下ボードとする) を同時に測定する必要がある, カメラの内部パラメータ, カメラとボードの位置関係は既知とする。また, 測距センサはセンサ中心に設けられたセンサ座標系の鉛直軸に垂直な平面上にあるレーザを必要とする。ここからは, Zhang らが提案した手法の概要を説明する。

ある点の 3 次元座標をカメラ座標系で $\mathbf{P}$, 測距センサ座標系で $\mathbf{P}^f$ とすると以下の関係が成り立つ。

$$\mathbf{P}^f = \Phi \mathbf{P} + \Delta, \quad (1)$$

ここで, Φ が 3 行 3 列の回転行列, Δ が 3 次元の並進ベクトルを表し, カメラと測距センサの互いの位置姿勢を決定する。

また, カメラに対するボードの位置姿勢は既知であり, ボードが存在する平面の法線ベクトルをカメラ座標系で $\mathbf{N}$ と表し, $\mathbf{N}$ の大きさ $\|\mathbf{N}\|$ でカメラとボードの距離を表す。すると, カメラ座標系で座標が $\mathbf{P}$ となるボード上のある点について以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{P} = \|\mathbf{N}\|^2. \quad (2)$$

さらに, (2) 式に (1) 式を代入すると, 次の式を導くことができる。

$$\mathbf{N} \cdot \Phi^{-1}(\mathbf{P}^f - \Delta) = \|\mathbf{N}\|^2. \quad (3)$$

$\mathbf{P}^f$, $\mathbf{N}$ は既知であるので, Φ , Δ に拘束条件を与えることができる。求めたい未知数は位置と姿勢の 6 つであり, 1 つの $\mathbf{P}^f$ と $\mathbf{N}$ の組み合わせで 1 つの式を導き出すことができるため, 最低 6 つの組があればすべての未知数を求めることが可能である。ボードを様々な位置に動かし, 複数の $\mathbf{P}^f$ と $\mathbf{N}$ の組み合わせを得ることで, Levenberg-Marquardt 法による最適化計算により Φ と Δ を推定する。

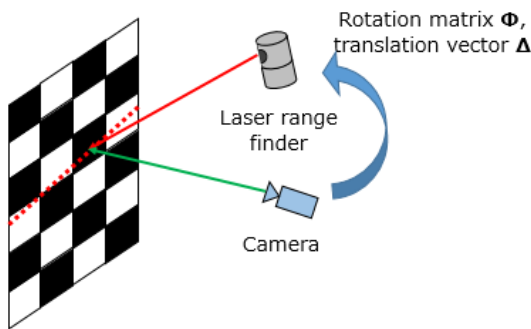


Fig. 5: Calibration environment

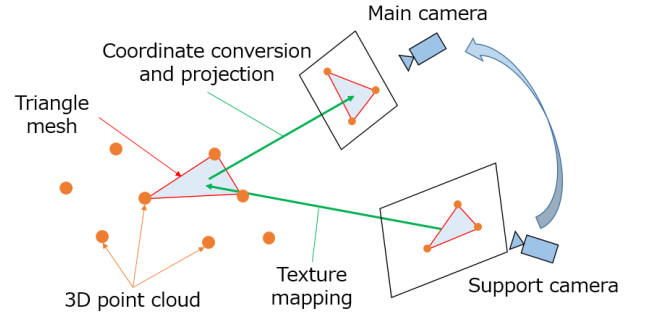


Fig. 6: Texture mapping

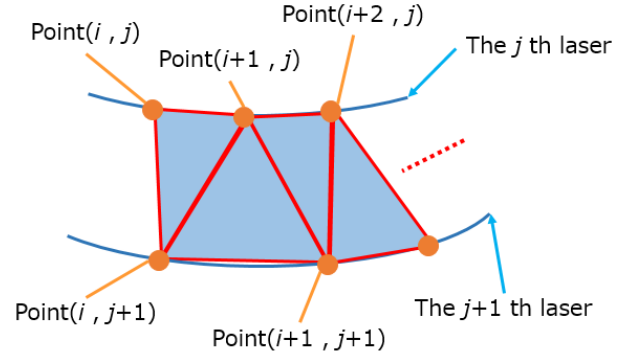


Fig. 7: How to create a mesh

2.4 メッシュの生成

測距センサから得られた疎な点群の間を補間するために, 点群の中から近傍の 3 点を選び, 三角メッシュを生成する。2.3 節で述べた手法により補助カメラと測距センサの位置関係を求めることで, 生成されたメッシュの補助カメラ映像中の画像座標を求めることができる。それによって補助カメラで得られたテクスチャを, 対応するメッシュにマッピングすることが可能となる。さらに補助カメラとメインカメラとの位置関係もキャリブレーションにより求めることで, 補助カメラのテクスチャが貼り付けられたメッシュをメインカメラ視点で見た映像に変換することができる (Fig. 6)。

メッシュの生成方法としては, 全点群の中から近傍点を選び出す手法⁸⁾などが代表的であるが, 一般に計算量が多くなるためリアルタイムでの映像提示が困難である。そこで, 取得した 3 次元点群が測距センサのレーザの走査線上に分かれて並んでいることを利用して, 隣り合う 2 本のレーザからそれぞれ近傍点を選ぶことで, 計算を高速化する。

具体的な手法を説明する。測距センサから得られた点群は, それぞれ j 番目のレーザ上に存在する i 番目の点として識別することができ, (i, j) のように座標で表すことができる。そこで, 以下に示す処理を隣り合う 2 本のレーザで行うことで, レーザ間を埋めつくすようなメッシュを生成する (Fig. 7)。

- 1) 2本のレーザのそれぞれ端にある点 $(1, j)$, $(1, j+1)$ の2点を基準点とする。
- 2) 点 $(2, j)$ を加えた3点で三角メッシュを生成する。
- 3) 基準点を点 $(2, j)$ と点 $(1, j+1)$ に更新する。基準点は、新たに与えた点と同じレーザ上の点を更新することで、常に1つのレーザに1点となる。
- 4) 点 $(2, j+1)$ を与え、メッシュの生成と基準点の更新を行う。同様に交互に端から順番に点を与えて同じ処理を繰り返す。

また、周囲の環境によっては、レーザ光が吸収されるなどして取得できない点が存在する。このときは、メッシュの生成と基準点の更新を行わずに次の点を与えて同様の操作をする。しかし、広い範囲で連続して点群の取得に失敗した場合、大きく引き伸ばされたメッシュが生成されてしまうことがある。これを防ぐために、新たに与えられる点と2つの基準点との距離を測定し、どちらかの点との距離が設定した閾値を超えた場合、新たに基準点を選び直す。

2.5 アルファブレンディングによる映像合成

2.4節で述べた手法により生成されたメインカメラ視点で見た補助カメラ映像と、メインカメラ映像をアルファブレンディングによって合成する。パラメータ α ($0 \leq \alpha \leq 1$) を設定し、メインカメラ映像の不透明度を α 、補助カメラ映像の不透明度を $1 - \alpha$ として合成する。映像合成を行う領域は補助カメラ映像を取得できた範囲のみであり、それ以外の範囲についてはメインカメラ映像を $\alpha = 1$ で出力する。

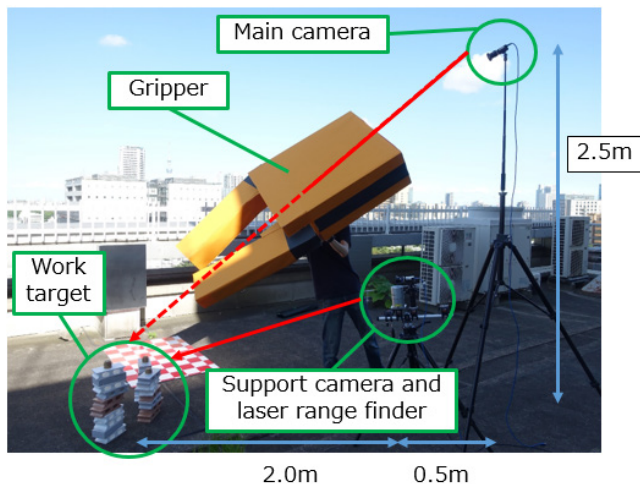


Fig. 8: Experiment environment



Fig. 9: Main camera image (left) and support camera image (right)

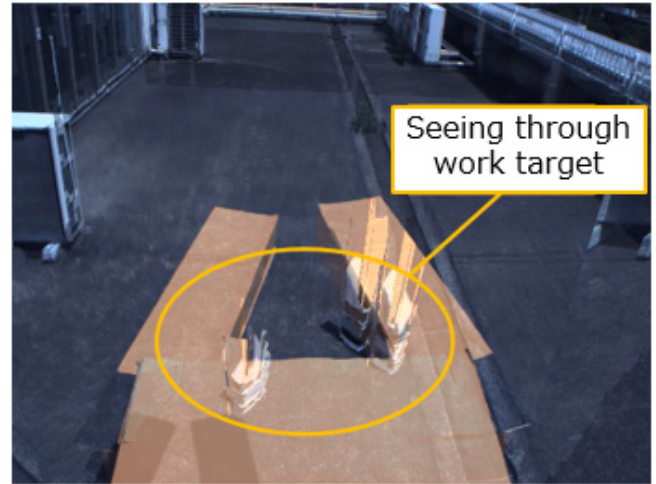


Fig. 10: Composite image through the arm

3. 実験・評価

3.1 実験環境

提案手法により半隠消映像の生成が可能であることを検証するために Fig. 8 に示す屋外環境で実験を行った。本研究で用いた2台のカメラは Point Grey Research 社の Grasshopper3 GS3-U3-41C6C-C を、3次元レーザ測距センサには Velodyne LiDAR 社の HDL-32e を使用した。大型のアーム型建機のアーム部に観測機器を固定することを想定し、メインカメラと、補助カメラと測距センサの組を Fig. 8 のようにそれぞれを上下に約 2m 離して設置して、その間にグリッパの模型を配置した。2つのカメラと測距センサの相対的な位置関係は固定され変わることはない。作業対象物は補助カメラからは見えているが、メインカメラからは見えない位置に配置する (Fig. 9)。

3.2 実験結果

生成した半隠消映像を Fig. 10 に示す。グリッパが半透明になり、元のメインカメラ映像 (Fig. 9) では遮蔽されていた作業対象物を透視できていることが確認できる。また、作業対象物だけでなく、グリッパの影や地面の溝も提

示できており、画像中の細かい部分の把握も可能である。合成映像中でオレンジ色の線となって表れている箇所は、補助カメラと測距センサからも死角となる作業対象物の裏側である。

また、Fig. 11 で示すような環境で位置ずれの定量的な評価を行った。Fig. 11 は、障害物となっていたグリッパを取り去った状態で、映像合成を行ったものである。一辺の長さが既知である格子状の模様の板を置くことで位置ずれを評価すると、映像間で生じていたずれは最大で 40 mm 程度であった。画像の外側ほどずれが大きく、逆に中心近くでは非常に小さかったため、キャリブレーションの誤差の影響よりも画像の歪みによる影響が大きかったものと考えられる。しかし、これはカメラから 3 m 以上離れた位置における位置ずれであり、相対的な誤差は小さく全体的に違和感の少ない合成映像となっている。

本手法による出力映像のフレームレートは約 90 fps であり、遮蔽領域の背景の映像の更新は、更新のためのデータを取得する測距センサの測定スピードと同程度の約 10 fps であった。このフレームレートは、がれきの撤去など今回想定している作業においては問題のない処理速度である。

以上、提案手法により屋外においても障害物を透視する映像の生成を、位置ずれを小さく抑えながらリアルタイムで行うことに成功した。

4. 結論

本研究では、屋外環境における大型のアーム型建機の遠隔操作のために、カメラ映像中の障害物による遮蔽の問題

に対してオンラインで半隠消映像を生成し、遮蔽領域を透視する手法を提案した。この手法によって遠隔操作を行う建機の環境によらずに、障害物による隠れを低減しグリッパ周辺の状況を正確に把握することが可能になった。

今後の課題としては、透視した映像の歪みや抜けの低減のために、メッシュの生成手法を改良することが挙げられる。また、実際に大型建機にカメラと測距センサを搭載し、提案手法を用いて遠隔操作を行うことで、この手法の有用性の定量的な評価を行うことも必要である。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 立石洋二, 植木睦央 “企業からみた福島第一原子力発電所災害への対応-福島第一原子力発電所における無人化施工での瓦礫撤去-” 日本ロボット学会誌, vol. 32, no. 2, pp. 151–153, 2014.
- 2) 茂木正晴, 藤野健一, 油田信一 “無人化施工におけるヒューマンインタフェースの作業効率評価” 日本ロボット学会誌, vol. 33, no. 6, pp. 426–429, 2015.
- 3) 関川健一, 本間政幸: “無人化施工機械の操作性向上の検討” http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h20/pdf/b/b_10hokugi.pdf, 国土交通省 北陸地方整備局, 2006, 閲覧日 2017/06/30.
- 4) 橘高達也, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一 “移動可能な RGB-D センサを用いた任意視点からの遮蔽物透視システム” 精密工学会誌, vol. 83, no. 3, pp. 253–244, 2017.
- 5) 藤井浩光, 杉本和也, 山下淳, 浅間一 “遠隔操作ロボットののための複数の RGB-D センサを用いた半隠消映像のオンライン生成” 精密工学会誌, vol. 81, no. 12, pp. 1185–1192, 2015.
- 6) Qilong Zhang and Robert Pless “Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration)” *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2301–2306, 2004.
- 7) Abdallah Kassir and Thierry Peynot “Reliable automatic camera-laser calibration”, *Proceedings of the 2010 Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2010.
- 8) Zoltan Csaba Marton, Radu Bogdan Rusu and Michael Beetz “On fast surface reconstruction methods for large and noisy point clouds”, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3218–3223, 2009.

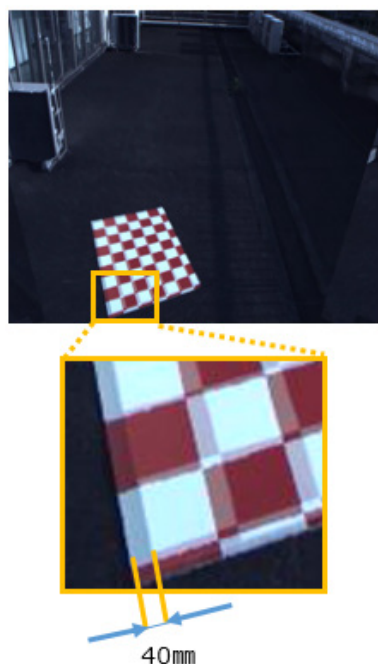


Fig. 11: Evaluation of positional error