

令和元年6月18日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06180

研究課題名(和文) 遠隔操作型建設機械の画像取得・提示法の研究

研究課題名(英文) Research on image acquisition and presentation method of teleoperated construction machine

研究代表者

山田 宏尚 (Yamada, Hironao)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：80240034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：従来の建設機械の遠隔操作システムでは、作業者に十分な視覚補助を与えることが難しい場合が少なくなかった。そこで本研究では、ドローンを最適な視点に移動させ映像の提示を行うシステムを建設機械の遠隔操作システムに実装した。そして被験者に対して本システムを用いて建機による特定の作業を実施させ、作業精度、作業効率、精神的負荷、アンケートを用いた官能検査の観点より、本システムの有効性を検証した。

また、土木工事現場における建設機械と作業員との接触事故を防止するシステムとして、ドローンとMRを活用した危険警告システムを開発し、評価実験により最適な警告手法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ドローンの視界に生じる死角の回避を目的として、オペレータによるドローンの追加操作を行う視点微調整機能を開発した。評価実験の結果、本機能の有効性が示された。また、建設機械による接触事故防止を目的として、ドローンとMRを活用した危険警告システムを開発し、評価実験により最適な警告方法を検討した。本成果により、従来用いられてきた大型で高コストなカメラ車を安価なドローンで代替することで、遠隔操作型建設機械システムの簡素化がはかれ、大幅なコストダウンが可能となり、遠隔操作システムの導入ハードルを下げることができることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In the conventional remote control system for construction machines, it was difficult to provide workers with sufficient visual aid. Therefore, we implemented a system for moving the drone to the optimal viewpoint and presenting the image to the remote control system for construction machinery. The subjects were asked to carry out specific tasks using this system. The effectiveness of this system was verified by sensory evaluation using work accuracy, work efficiency, mental load, and questionnaire.

In addition, we examined a system to prevent contact accident between construction machine and workers at civil engineering work site. We developed a hazard warning system using drone and MR, and examined the optimal warning method by evaluation experiment.

研究分野：機械工学

キーワード：遠隔操作 建設機械 画像取得・提示法 ドローン 人間機械システム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地震や火山，原子力発電所における災害復旧等で利用される遠隔操作ロボットでは，建設機械（パワーショベル等）が多用される．建設機械の遠隔操作現場では，一般にカメラ車と呼ばれるカメラを設置した移動車を用意し，遠隔オペレータが操作しやすい映像が得られる位置に手動で移動させながら作業現場を撮影して提示しておりコストと手間がかかっている．広い作業視野範囲を得るために建機に設置した複数台の魚眼レンズカメラの画像を合成して俯瞰映像を提示して作業改善につなげる試みもあるが，カメラは建機に装着されており，避けがたい死角が生じることや，必ずしも作業現場の詳細な状況を確認することはできない．また，作業者の頭の動きに連動する移動式カメラを用いて運動視差を提示するシステムでも，作業状況により死角が生じる問題は依然として解決されていない．一方，ドローンは近年の性能向上により安定性・制御性・画像の解像度の向上が著しく安価で調達でき，バッテリー容量やカメラ性能は今後も向上することが期待されているが，遠隔操作のための画像中継にはまだ十分に使われていない．

### 2. 研究の目的

地震や火山，原子力発電所における災害復旧等で利用される遠隔操作ロボットでは，建設機械（パワーショベル等）が多用される．これらの遠隔操作の操作者に提示する画像取得においては，一般にコストと操作に手間がかかる移動式カメラ車が主に用いられている．本研究では，近年低コストで高精度な映像を安定して撮影可能となったドローン（マルチコプター型）を用いた建設ロボットの遠隔操作システムを提案し，建機の内部情報を利用したドローンによるカメラ映像の最適自動提示法および歩行者・作業者を自動検出し，接触事故を防止するための新規画像処理システムに関する研究を行う．

### 3. 研究の方法

建設機械の遠隔操作を想定し，建設機械のフォークグラブ位置や駆動力から作業の状態を自動的に判断し，ドローンを最適な視点に移動させ映像の提示を行うための検討を行った．また，オペレータの視線方向および頭部の移動方向に応じてドローンの位置を移動させ，運動視差の提示を行うシステムを構築した．さらに，ドローンの視界に生じる死角の回避を目的とし，操作者がドローンの追加操作による視点の微調整を行う「視点微調整機能」を開発し，システムに実装した．そして，本機能を用いた評価実験により，本機能の有効性の検証と最適な操作手法の検討を行った．本研究で提案したシステムを Fig.1 に示す．

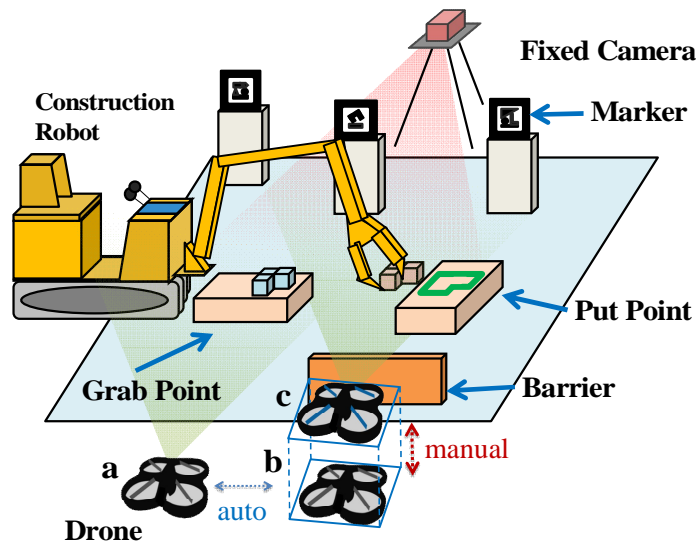


Fig.1 Work field

操作者は 固定カメラの映像に加え， ドローンに搭載されたカメラによる映像を頼りにブロックの運搬作業を行う．ドローンは自動で移動し，ブロック把持の際は，視点 a の，設置の際は視点 b の映像を提示する．視点 b には遮蔽物が存在し，必要な視覚情報が十分に得られない．そこで，設置の際に操作者はドローンの追加操作を手動で行い視点の微調整をし，死角が生じない視点 c からの映像を得ることができる．また，この操作により運動視差を提示することも可能となる．操作者への負担を避けるため，追加操作は単純な上下方向に対して一定速度で移動するよう操作を行う．

本研究では以下の 3 通りのドローンの操作手法を提案した．概要図を Fig.2 に示す．

- A) ジョイスティック (JS) のスライドボタンによる操作
- B) 3 軸角度センサを用いて計測した操作者の頭の傾きによる操作
- C) 音声認識を用いた操作

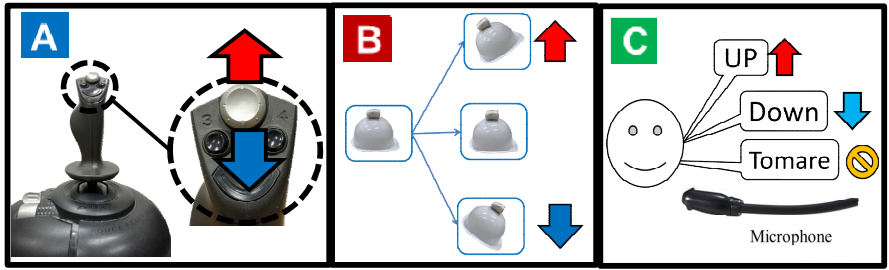


Fig.2 Operation method

操作手法 A(スライドボタン)は、スライドボタンを図中の赤矢印方向へ操作すると上方向へ、青矢印方向へ操作すると下方向へ、ドローンが移動する。操作手法 B(頭の傾き)では、操作者は3軸角度センサを取り付けたヘルメットを装着する。誤操作防止のために操作はJSのトリガーボタンを押している間のみ有効となる。JSのトリガーボタンを押した後に上方向を向くと上方向へ、下方向を向くと下方向へ、ドローンが移動する。操作手法 C(音声認識)は、操作者が予め指定された命令文をマイクへ発声する。音声認識結果が[アップ]の場合は上方向へ、[ダウン]の場合は下方向へドローンが移動し続け、[止まれ]と認識されると停止する。

まず、本機能の有効性の検証のため予備実験を行った。本機能を用いる場合と用いない場合の2通りで Fig.3 に示すようにL字ブロックの枠内への運搬作業を行い、作業精度(ブロックと枠の位置関係から定義した作業得点みより評価)、作業時間、NASA-TLX3)を用いた精神的負担により評価した。その結果、本機能を用いることで作業時間は増加するが、作業精度の向上及び精神的負担の軽減に有効であることが確認できた。本実験では、最適な操作手法の検討を目的とし、提案した3通りの操作手法を用いて、予備実験と同様の作業を行った。被験者は4名で、予備実験の評価指標に加えドローンの追加操作時間、アンケートにより評価した。

一方、ドローンとMR (Mixed Reality) を活用した危険警告システムでは、建設機械と作業員に予め位置姿勢を特定するためのマーカを取り付けている環境を想定し、ドローンの位置姿勢計測および、建設機械と作業員の認識の位置計測に ARTToolKit を用いることにより実現した。

ドローンは建設機械に取り付けられたマーカから得られた位置姿勢情報に基づき、建設機械とその周辺領域を監視できる位置にホバリングする。作業員が Fig. 4 に示した警告範囲内に侵入すると、作業員に取り付けたマーカ b 上に警告レベルに応じた色の AR オブジェクトが表示される。建設機械操作者は装着している HoloLens のディスプレイ上に表示されるドローンのカメラで撮影した映像を確認することで警告を認識することができる。警告レベルは3段階に分かれており、危険度が大きい領域ほど警告のレベルも大きくなる。

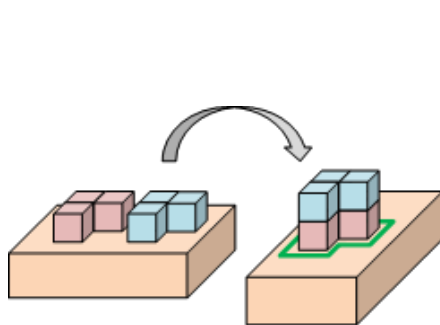


Fig.3 Details of work

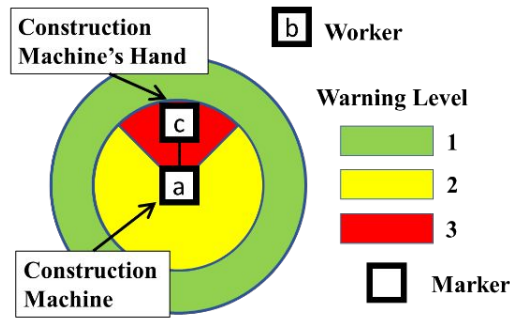


Fig.4 Warning System

#### 4. 研究成果

Fig.5 に、ドローンによる視点微調整機能の評価実験における全被験者による作業得点の平均を示す。図より操作手法 A,B,C 間で作業得点に大差がないことが確認できる。これはどの操作手法を用いても、ドローンの追加操作による視点の微調整の結果として取得できる視覚情報に大差がないためだと考える。

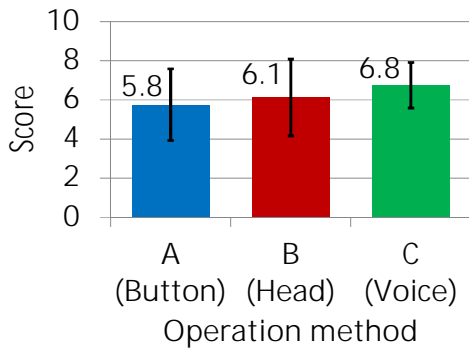


Fig.5 Average of score

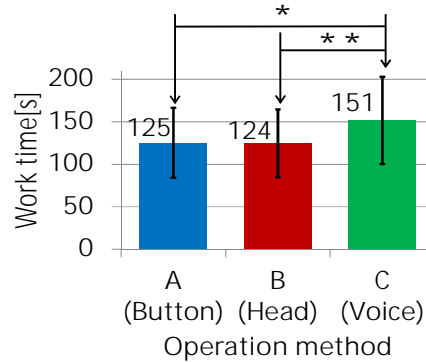


Fig.6 Average of work time

Fig.6 に作業時間を平均した結果を示す．図より操作手法 C(音声認識)は A(スライドボタン),B(頭の傾き)と比較して作業時間が長く，A,B間には大差がないことが確認できる．t検定により，操作手法 A,C間で有意水準 5%の，B,C間で 1%の有意差が確認された．これは操作手法 C(音声認識)が A(スライドボタン),B(頭の傾き)と比較してオペレータの意志を操作に反映するまでの時間が長いこと，稀に誤認識が生じることが原因だと考える．Fig.7 に NASA-TLX による WWL 得点を平均した結果を示す．図より操作手法 A,B,C間で WWL 得点に大差がないことが確認できた．これにより，操作手法による精神的負担への影響は小さいと言える．しかし，身体的要求では操作手法 B(頭の傾き)が，知覚的要求では C(音声認識)が他の指標と比較して大きくなるのが分かった．

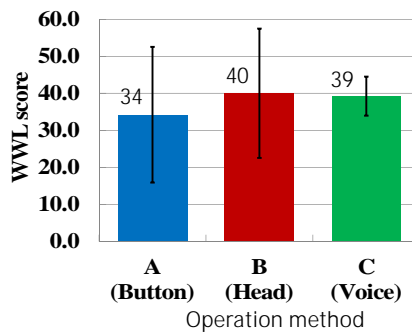


Fig.7 Average of WWL score

次に，歩行者・作業者を自動検出し，接触事故を防止するために開発した手法の検証結果について述べる．評価実験では以下の 4 つの警告手法を，警告に対する反応時間と NASA-TLX による精神的負担により評価した．

- A) AR オブジェクトの色の変化のみ
- B) AR オブジェクトと映像の余白の色変化
- C) AR オブジェクトの色変化と警告音
- D) AR オブジェクトと映像の余白の色変化，警告音

反応時間の平均と NASA-TLX の WWL 得点の平均を Fig. 8 と Fig. 9 に示す．これらの結果より，D の警告方法で反応時間が最も短く，精神的負担も少ないことがわかる．

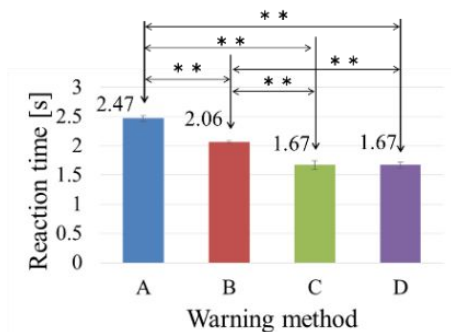


Fig. 8 Average of Reaction Time

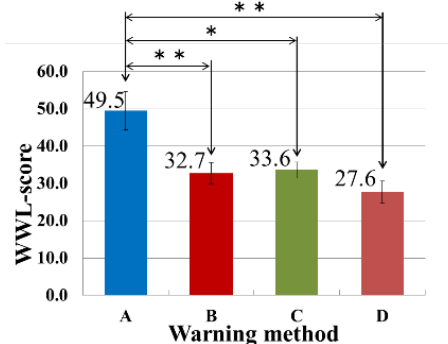


Fig. 9 Average of WWL-score

以上により、ドローンの視界に生じる死角の回避を目的として、オペレータによるドローンの追加操作を行う「視点微調整機能」を開発し評価実験を行った結果、本機能が有効であり、JSのスライドボタンによる操作手法が最適であると確認できた。また、建設機械による接触事故防止を目的として、ドローンとMRを活用した危険警告システムを開発し、評価実験により最適な警告方法を検討した。従来用いられてきた大型で高コストなカメラ車を安価なドローンで代替することで、遠隔操作型建設機械の簡素化がはかられ、大幅なコストダウンが可能となり、遠隔操作システムの導入ハードルを下げるができることが期待できる。

なお、今後の展望として2台のドローンを用いて、画像を合成して広い周辺視野と作業領域近傍の詳細な画像を同時に操作者に提示するシステムについてさらに検討を行う。また、危険警告システムでは人間の視覚特性に基づく監視カメラシステムの手法に機械学習を組み合わせることで、人物検出技術のさらなる改善を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計1件)

Teleoperated Construction Robot Using Visual Support with Drones, Hironao Yamada, Naoyuki Bando, Katsutoshi Ootsubo, and Yuji Hattori, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 30, No. 3, pp.406-415, 2018.

### 〔学会発表〕(計4件)

白木星矢, 大坪克俊, 川村拓也, 山田宏尚, ドローンを用いた遠隔操作建設ロボットの視覚補助に関する研究, 機械学会東海支部第68期講演会, CD-ROM, 2019年

立花大輝, 三輪真由, 大坪克俊, 川村拓也, 山田宏尚, ドローンを用いた建設ロボットの遠隔操作に関する研究, 機械学会東海支部第67期講演会, CD-ROM, 2018年

H. Yamada, K. Kakehi, K. Ootsubo, T. Kawamura, Construction Robot Using Visual Support with Drones, Proceedings of 2017 the International Conference on Advances in Construction Machinery and Vehicle Engineering, Qinhuangdao China, pp.358-362, 2017.

成田燎平, 大坪克俊, 川村拓也, 山田宏尚, 建設機械による接触事故防止に関する研究, 機械学会東海支部第66期講演会, CD-ROM, 2016年