

[研究助成 (C)]

重機の遠隔操作の高効率化を目指した外部カメラ配置の導出と 拡張現実技術を用いた視覚支援

Derivation of the External Camera Placement and Development of Augmented Reality
Visual Support System for High Efficiency Teleoperation of Heavy Machines

2187005



研究代表者

早稲田大学大学院
創造理工学研究科

博士後期課程

佐藤 隆 哉

[研究の目的]

日本は災害大国として知られており、東日本大震災や熊本地震などの未曾有の災害が発生している。災害現場での作業は、2次災害の危険があるため、建設機械等を用いた重機の遠隔操作が採用される。その遠隔操作の問題点として、平時に用いられる搭乗操作と比較すると、作業効率が半分以下まで低下することがあげられる。そのため、先行研究ではドローンや画像処理を用いて任意の第三者視点からの映像を提供する研究がなされている。しかし、どのような視点から提供すべきかといった最適・好適配置に関しては検討がなされていない。また、我々の研究グループでは、高効率な遠隔操作を実現するため作業前に環境情報を提供する映像提示手法を構築し、操作者が容易に移動経路や把持方略などのプランニングを行えるようになった。しかし、そのプランニングを作業中に忘却してしまい、作業効率が低下することがあった。

上記より、本報告書では以下の2つを研究目的として研究を行った。

1. 外部カメラの最適・好適配置の導出
2. プランニングリマインダの開発

[研究の内容, 成果]

〈研究1：外部カメラの最適・好適配置の導出〉

先行研究において、広視野かつ3Dの車載映像を提供したものがあがるが、そのような場合でも把持や配置等の奥行感が必要な手先作業時には外部カメラが必要であることが明らかとなっている。そのため、本研究では、奥行感が必要な手先作業に着目し、外部カメラの最適・好適配置をスケールモデルおよび実機を用いて導出した。

(1) 仮説

外部カメラの最適・好適配置を導出するにあたり、その仮説を人間工学の知見を基に立てた。ヒトには、物体を最も認知しやすい映像である典型的景観が存在する。この典型的景観の特徴として、①オクルージョンが最も少ないこと、②その許容範囲は $\pm 30^\circ$ であること、③物体の大きさによる影響は小さいこと、が知られている。そのため、手先作業時における最適配置は、典型的景観の特徴①から、パン角が 90° 、チルト角が 90° の映像、好適配置は典型的景観の特徴②から、パン角が $90^\circ \pm 30^\circ$ 、チルト角が $90^\circ \pm 30^\circ$ となる映像となると仮説を立てた。なお、ズーム率に関しては典型的景観の特徴③より本研究では対象外とした。

(2) スケールモデルを用いた導出

研究初期段階では、実機を用いた繰り返し実

験は、安全面および経済面から現実的ではないため、小型のスケールモデルを作成し、それを用いてカメラ配置を変更し、最適・好適配置を導出した。

・実験方法

パン角・チルト角それぞれにおける最適・好適配置を導出するため、チルト角を固定しパン角を変更した実験 A と、パン角を固定しチルト角を変更した実験 B を行った。タスクは、どちらの実験においても移動し、物体を把持し、運搬し、最後に配置するものとした(図1)。その際、操作者は車載映像と、把持時における外部カメラ、配置時における外部カメラを見ながら作業を行った(図2)。

・実験結果

実験 A より、把持におけるパン角の最適配置は 90° 、その許容範囲である好適配置は $90^\circ \pm 30^\circ$ となった。配置におけるパン角の最適

値は 90° 、その許容範囲である好適配置は $30^\circ \sim 135^\circ$ となった。その理由としては、正確な位置決めをせずに配置をしたことが考えられる。実験 B より、把持・配置におけるチルト角の最適配置は 60° 、その許容範囲である好適配置は $60^\circ \pm 30^\circ$ となった。その理由として、チルト角が 60° の時の映像は配置場所が3次的に把握できることがあげられる。

(3) 実機を用いた導出

現場に適応するためには実機での導出が必須であるため、実機を用いた実験を行った。

・実験方法

土木研究所より提案されている重機の遠隔操作におけるモデルタスクを参考に設定した。図3に示すように掘削および配置の作業をカメラ配置を変更しながら行った(図4)。なお、操作者は車載映像と外部カメラからの映像を見ながら実験を行った。初心者および熟練者を被験者として実験を行った。

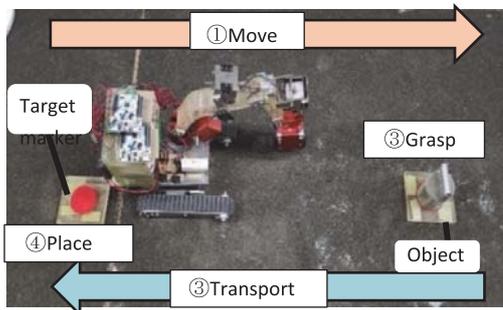


Fig. 1 Experimental task (scale model)

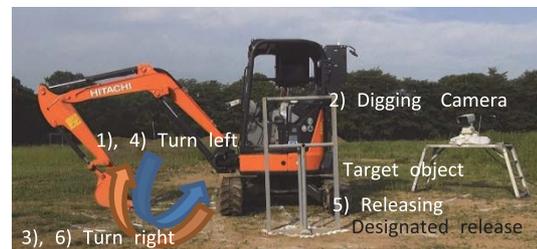


Fig. 3 Experimental task (actual machine)

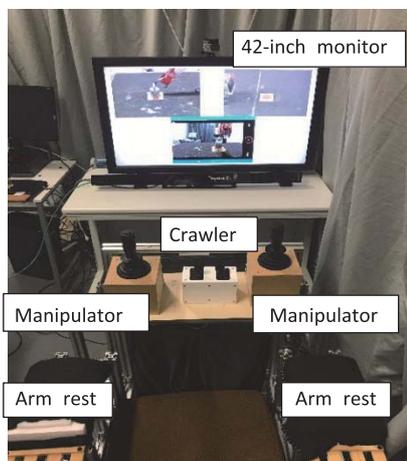


Fig. 2 Interface

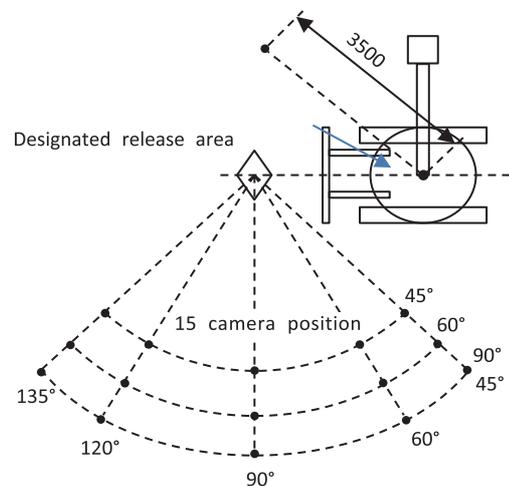


Fig. 4 Camera conditions of the experiment

・実験結果 (初心者)

掘削時におけるパン角の最適配置は 60° 、好適配置は $45^\circ\sim 90^\circ$ となった。その理由として、パン角が 60° の時の映像は配置場所が3次元的に把握できることがあげられる。また、 90° より大きいパン角では、バケットの先端がオクルージョンにより視認できないため、上記の好適配置になったと考えられる。配置時におけるパン角の最適配置は 45° 、その許容範囲である好適配置は $45^\circ\sim 135^\circ$ となった。その理由としてどのパン角においてもオクルージョンにより配置場所が視認できなかったことがあげられる。また、掘削・配置時におけるチルト角の最適配置は 60° 、また $45^\circ\sim 90^\circ$ であれば作業効率に大きな影響がないことがわかった。

・実験結果 (熟練者)

掘削時におけるパン角の最適配置は 90° 、好適配置は $60^\circ\sim 90^\circ$ となった。初心者と最適配置が異なるが、その理由として、初心者は1つの映像から3次元的に把握可能なパン角が 60° の時が最適となったが、熟練者では奥行方向以外の情報は車載映像から取得できるため、より奥行方向がわかりやすい 90° が最適配置となったことがあげられる。配置時におけるパン角の最適配置は 45° 、その許容範囲である好適配置は $45^\circ\sim 135^\circ$ と初心者と同一結果となった。また、掘削時におけるチルト角は初心者と同様の結果(最適配置は 60° 、また $45^\circ\sim 90^\circ$ であれば作業効率に大きな影響がない)となることがわかった。配置時におけるチルト角の最適配置は 90° 、好適配置は $60^\circ\sim 90^\circ$ となった。この理由として、初心者は十分に配置場所と対象物の位置関係を把握せずに作業を行っていたが、熟練者は作業により精度を求めるため、その位置関係がわかりやすい 90° の映像が最適配置となったことが考えられる。

〈研究2：プランニングリマインダの開発〉

先行研究において、移動経路を拡張現実(AR: Augmented Reality)を用いて提示する

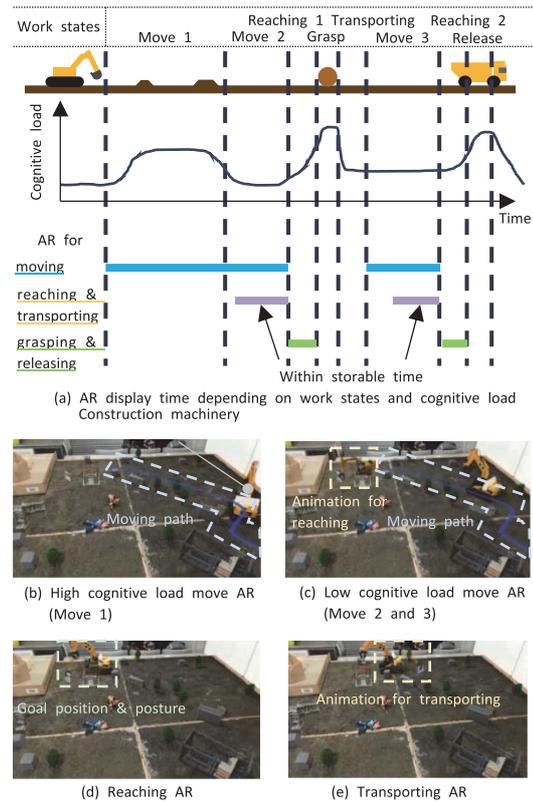


Fig. 5 Developed AR reminder system

ナビゲーションシステム等は開発されている。しかし、これらのナビゲーションシステムは1つの作業状態のみにしか対応していない。重機の遠隔操作では、対象物まで移動し、リーチングを行い、対象物を把持し、運搬し、配置するという作業を連続的に行う必要がある。そのため、連続的な作業状態の変化に対応可能なリマインダ手法が必要である。さらに、認知負荷が高いと特定の映像のみに着目し、他の映像を無視してしまう Cognitive Tunneling といった現象が発生する。よって、低認知負荷でリマインドする必要がある。以上より、(1) 連続的な作業状態の変化に対応可能、かつ (2) 低認知負荷なりマインドが可能なプランニングリマインダを開発した(図5)。

(1) 連続的な作業状態の変化への対応

作業状態により必要な情報が異なるため、その情報を AR で表示する。

- ・移動：移動の目的は対象物付近まで行くことであるため、移動経路が重要となる。よって、

移動経路を表示する。

- ・リーチング・運搬：リーチングと運搬の目的は手先を対象物もしくは配置位置付近までもっていくことである。そのため、どちらにおいても腕の動きが重要となる。したがって、手先動作を表示する。
- ・把持・配置：把持と配置の目的は対象物を掴むもしくは放すことである。そのため、どちらにおいても現在の手先位置と把持時もしくは配置時の最終的な手先位置との関係が重要となる。以上より、最終的な手先位置を表示する。

(2) 低認知負荷なリマインド

ヒトの認知可能な時間には限界があり、また高認知負荷では記憶が困難であるため、操作者が記憶可能な時間内かつ低認知負荷である時にARを提示する。

・実験

スケールモデル上の1本の棒を掴んで指定された場所まで運搬する実験を、16名の被験者に対して行った。操作者は車載映像1つと外部カメラからの映像2つを見ながら、遠隔操作を行った。AR群(8名)には提案するリマインド手法を適応し、コントロール群にはAR提示を行わなかった。

・実験結果

移動とリーディング・運搬時、作業全体の作業時間が有意に低減できることが、また、移動時と作業全体の認知負荷を有意に低減できることがそれぞれわかった。また、誤接触回数も有意に低減できることがわかった。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、1. 手先作業時における外部カメラの最適・好適配置を導出し、2. 低認知負荷なプランニングリマインド手法を構築した。1. で導出した最適・好適配置を基に無人化施工の現場で外部カメラを配置すれば作業効率を向上可能であることが示唆された。また、2.

で構築したプランニングリマインド手法により、低認知負荷かつ高効率な作業を実現可能であることが示唆された。今後は、1. では手先作業時以外における外部カメラの最適・好適配置を導出し、2. では、熟練者や実機での実験を行っていく予定である。

[成果の発表, 論文等]

〈論文誌〉

- ・佐藤隆哉, 亀崎允啓, 山田充, 橋本毅, 菅野重樹, 岩田浩康, “無人化施工の掘削・リリース作業における側面カメラの最適および好適配置の実験的導出”, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 876, pp. 1-12, 2019.

DOI: 10.1299/transjsme.19-00066

〈査読付き国際会議〉

- ・Ryuya Sato, Mitsuhiro Kamezaki, Satoshi Niuchi, Shigeki Sugano, and Hiroyasu Iwata, “Derivation of an Optimum and Allowable Range of Pan and Tilt Angles in External Sideway Views for Grasping and Placing Tasks in Unmanned Construction Based on Human Object Recognition,” 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII 2019), pp. 776-781, 2019, Paris, France. (口頭)
- ・Ryuya Sato, Mitsuhiro Kamezaki, Mitsuru Yamada, Takeshi Hashimoto, Shigeki Sugano, and Hiroyasu Iwata, “Experimental Investigation of Optimum and Allowable Range of Side Views for Teleoperated Digging and Release Works by Using Actual Construction Machinery,” 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII 2019), pp. 788-793, 2019, Paris, France. (口頭)

〈査読あり国内会議〉

- ・佐藤隆哉, 亀崎允啓, 山田充, 橋本毅, 菅野重樹, 岩田浩康, “重機の遠隔操作性向上のためのマルチカメラ最適配置に関する研究 —— 第二報 掘削・配置作業におけるパン・チルト角が及ぼす作業効率への影響の実験的検証 ——”, 第24回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 14-17, 2019年, 富山. (口頭)
- ・佐藤隆哉, 亀崎允啓, 山田充, 橋本毅, 菅野重樹, 岩田浩康, “無人化施工における奥行感の把握が必要な手先作業時における外部カメラの最適・好適配置の実験的導出”, 第19回建設ロボットシンポジウム論文集 (SCR2019), paper no. O3-01, 2019年, 福岡. (口頭)

〈査読なし国内会議〉

- ・佐藤隆哉, 亀崎允啓, 山下雄輝, 菅野重樹, 岩田浩

康, “重機の遠隔操作における作業状態の変化に適
応可能な拡張現実技術を用いた低認知負荷リマイン
ド手法の構築”, 日本機械学会ロボティクス・メカ
トロニクス講演会 2019 論文集 (Robomec'19),
paper no. 1P2-D07, 2019 年, 広島. (ポスター)
・佐藤隆哉, 亀崎允啓, 山田充, 橋本毅, 菅野重樹,

岩田浩康, “重機の遠隔操作性向上のためのマルチ
カメラ最適配置に関する研究 —— 第三報 搭乗操
作熟練者における掘削・配置作業でのパン・チルト
角が及ぼす作業効率への影響の実験的検証 ——”,
第 37 回日本ロボット学会学術講演会, paper no.
2A1-05, 2019 年, 東京. (口頭)