

無人化施工における Cognitive Tunneling を防止可能な視覚提示手法の構築に関する研究

早稲田大学 教授 岩田 浩康

概要：

無人化施工の問題点として視覚情報の欠落により作業効率が搭乗操作の半分以下になることがあげられる。そのため、従来ではドローンや画像処理を用いて視覚情報を追加する手法が研究されてきた。しかし、情報を追加すると特定の映像のみに注意が集中する Cognitive Tunneling に操作者が陥ってしまう。そのため、本助成では Cognitive Tunneling を防止し、重機の作業状態に応じて適切な映像に操作者の注意を誘導可能な手法構築を目的とする。Cognitive Tunneling は映像間の情報統合の容易さを表す Visual Momentum が低いこと、ヒトの注意の払いやすさを表す Visual Saliency が高い映像のみに注意が集中することから発生する。よって、Visual Momentum は同じランドマークを異なる映像で提示すると向上可能なため、作業状態ごとに有用なランドマークを各映像に内包した。また、ヒトは有効視野内において振動する物体には注意を払いやすいことから、外部カメラの映像を有効視野内に提示し、作業状態が切り替わる時にはその映像を振動させた。提案手法の有用性を確認するため、油圧ショベル実機において実験を行ったところ、一部の操作者において作業効率の向上までには至らなかったものの、提案インタフェースを適用することで、作業状態に応じた適切な映像に視線を誘導できる可能性が示唆された。

キーワード：無人化施工, Cognitive Tunneling, Visual Momentum, Visual Saliency, 視覚支援

1. はじめに

人が立ち入るには危険な災害現場において、重機を遠隔操作して災害復旧作業を行う無人化施工技術の需要が高まっている。無人化施工では、操作者は現場に設置されたカメラなどの限られた情報をもとに、複雑な現場の状況を認知しなければならず、操作者は高い認知負荷下での作業が求められ、作業効率が搭乗操作と比較して 50%以下となっている¹⁾。この問題を解決するために、従来研究では限られた情報の量を増やすという観点から他視点カメラや重機搭載センサの種類を追加し、操作者にマルチディスプレイ提示をするといった手法が行われてきた²⁾。これによって操作者は多彩な情報を取得できる一方で、その中から作業状態に応じて適切な情報の選択・統合をして作業を行わなければならなくなった。これにより操作者の認知負荷増加・作業効率低下を招いている。操作者には、高認知負荷下において認知的視野狭窄 (Cognitive Tunneling) が発生していると考えられ³⁾、従来のマルチディスプレイ提示手法では適切な情報選択が困難になっている。そこで、本研究では、操作者の認知的視野狭窄を低減させ、効率的な情報選択を支援する新たなビジュアルインタフェースの構築を行った。

2. ビジュアルインタフェース設計論

(1) 設計方針

認知的視野狭窄が発生する原因は、大きく 2 つに分けられる。1 つ目の原因としては、複数の画面に提示された情報間の視線遷移のしやすさを表す Visual Momentum が低く、情報統合が困難になっている点が挙げられる⁴⁾。これにより操作者は 1 つの画面から得られる情報のみから作業を行おうとし、他の情報に全く注意がいかなくなってしまう。2 つ目は、視覚顕著性である Visual Saliency が高い情報に操作者の注意が固定され他の情報を全く見ないことが挙げられる。特に遠隔操作者は主観情報に注意が固定される傾向があるため⁵⁾、操作者の注意を主観情報から解放する情報提示手法が求められる。

以上から、ビジュアルインタフェースの設計方針として、Visual Momentum を高める情報抽出・提示手法と操作者の注意を誘導させる情報提示手法の 2 つの案出を設定した。上記設計方針を達成するために①作業状態に応じた客観情報の選択提示手法、②環境カメラ映像の最適視点位置の導出、③ヒトの視野特性を考慮した情報提示手法の 3 つを詳細設計としてビジュアルインタフェース構築を行った。

(2) 作業状態に応じた客観情報の選択提示

Visual Momentum を高めるためには操作者に提示した情報が、現在の作業内容と関連していることが求められる⁹⁾。本研究では作業内容と提示情報の関連性として、操作者が作業の手掛かりとして認知すべきランドマークと情報が内包しているランドマークの一致度合が高くなるような映像選択の手法を考案した。作業状態に応じて、操作者が認知したいランドマークは異なると考えられ、それぞれの作業状態における認知すべきランドマークを Virtual Reality 環境における遠隔操作実験⁹⁾及び雲仙普賢岳での現地調査から分析し、そのランドマークを内包している環境カメラ映像のみを操作者に選択提示する手法を案出した。

(3) 環境カメラ映像の最適視点位置の導出

操作者が最も効率的に作業現場の環境と建機の位置関係を把握し、作業効率が向上する環境カメラ映像の視点位置を実験的に導出した⁷⁾。具体的には、特に高精度な作業を要求される、把持・配置作業における作業時間を、カメラの位置を変化させながら比較することで最も作業効率が高くなる環境カメラの位置を導出した。実験の結果、把持対象物を極とする極座標系を取ったとき、パン角最適値は $\phi=90^\circ$ であり、チルト角の最適値は $\theta=60^\circ$ であることが導出された。また好適範囲として、 $\phi=60^\circ\sim 120^\circ$ 、 $\theta=60^\circ\sim 90^\circ$ の範囲であれば作業効率に大きな影響を与えることはないことが示唆された。

(4) ヒトの視野特性を考慮した情報提示手法

上記までに案出した手法により決定した提示情報を、操作者が効率よく参照可能にするために、ヒトの情報受容特性を考慮して、客観情報の有効視野内提示・全情報の安定注視野内提示を実現する単一ディスプレイ提示を行った。また、主観情報に固定されがちな操作者の注意を解放するために、客観情報を選択提示する際には、客観情報の画面を約 5Hz で振動させて操作者の注視移動を促した⁸⁾。開発したビジュアルインタフェースの概要を図-1 に示す。

3. 実験

提案する映像提示手法の有効性を検証するため、土木研究所の建設機械屋外実験場において油圧ショベル実機 (Hitachi ZAXIS 35U, 図-2) を用いて実験を行った。

(1) 実験条件

実験タスクは、土木研究所が提案しているモデルタスクを参考に設定した⁹⁾。具体的には、図-3 に示すように敷き鉄板の外から出発し、正面の模擬土嚢を把持して車体を約 90 度旋回し配置する。そして、パイロンのコースに沿って移動し、正面の 2 つ目の模擬土嚢を把持し、車体を約 90 度旋回し配置する。最後に、ここまでの作業を逆手順で行いながら初期位置まで移動して、1 回分のタ

スクが終了となる。

被験者は、搭乗操作の熟練者 4 名を対象とした。実験フローとしては、まず習熟タスクを複数回行い、十分操作を習熟した後、従来のマルチディスプレイに複数の映像を提示する手法(図-4)で 3 回、開発した新しいビジュアルインタフェースで 3 回、上記のタスクを行った。なお、新しいビジュアルインタフェースでは、カメラスイッチャーが実機の作業状態を判断し、映像を切り替えた。また、同じ条件でタスクを繰り返すことによる慣れの影響を除外するため、図-5 に示すように実験を行う順番を 2 人ずつ、2 パターンに分けた。



図-1 開発したビジュアルインタフェースの概要



図-2 Hitachi ZAXIS 35U

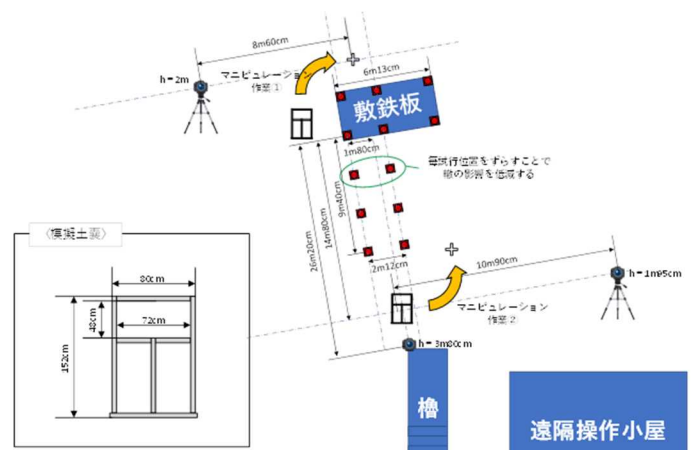


図-3 実験環境



図-4 マルチディスプレイ

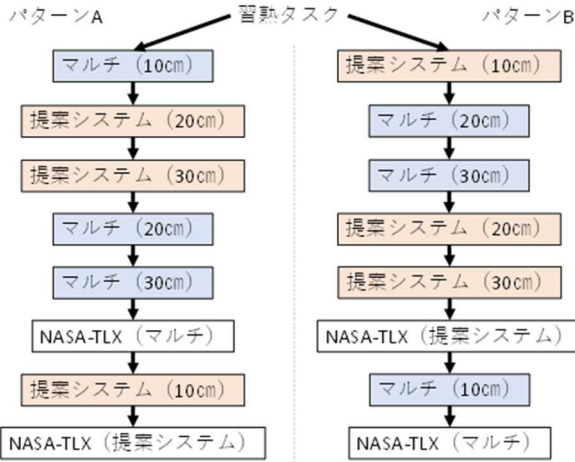


図-5 実験フロー

実験では、作業効率を評価する指標として、作業時間、配置誤差、誤接触回数を、視線の誘導を効果的に行っているか確認するために視線を計測した。

ここで、配置誤差とは、配置先マーカと実際に配置された模擬土嚢の中心位置のずれである。マーカと模擬土嚢の中心間の距離のみを測定し、回転角度は考慮しない。誤接触回数とは、移動コースを形成するパイロンと建機の接触回数である。

(2) 実験に関する結果・考察

a) 作業時間

図-6 に全体と各作業状態の作業時間を示す。Wilcoxon の符号付順位和検定を用いた結果、全体の作業時間、移動時間、運搬時間と配置時間において有意差は確認できなかった。また、把持時間においては有意差が確認されたが、開発したビジュアルインタフェースより、むしろ従来のマルチディスプレイの方が把持時間を低減させられる可能性が示唆された。

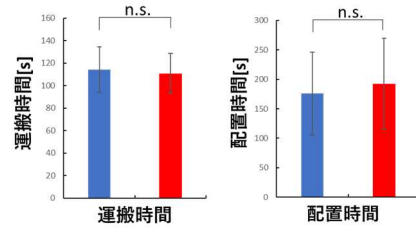
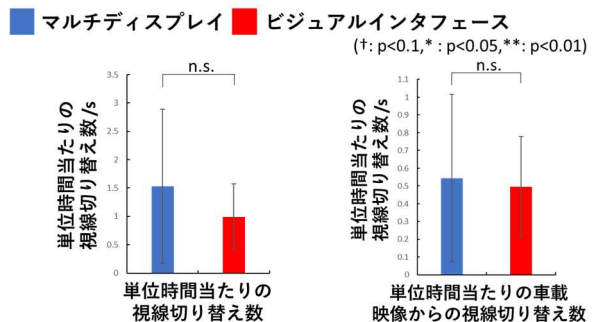
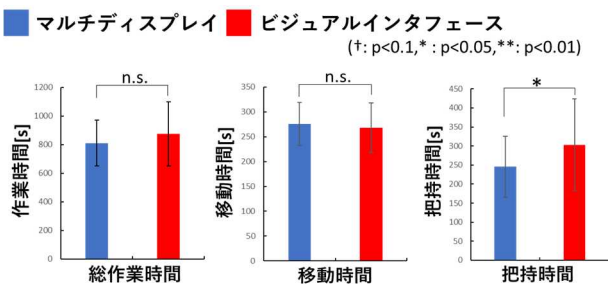


図-6 作業時間

作業時間が低減できなかったことについて考察する。本実験において、従来のマルチディスプレイ提示手法では映像を切り替えることがなく、常に画角が変わらない4つの映像を被験者に提示している。このため、全ての映像が常時視界に入っている状況下で作業をする中で、注視をしていない映像に対して潜在的に理解が深まってゆくことが考えられ、映像間で視線を移動する際に映像を理解するための時間を要さない。一方で、提案するビジュアルインタフェースでは作業状態に応じて映像を切り替えるため、映像を切り替える度に、映像の理解に時間を割く必要がある。この「映像を理解する時間」を必要とする点が、作業時間の短縮に繋がらなかった要因なのではないかと考えられる。

b) 視線

図-7 に視線の結果を示す。1つの映像を1.5秒以上注視している割合から Visual Momentum を、1秒間に注視映像を車載映像から外部カメラ映像に切り替えた回数から Visual Saliency を、1秒間の注視映像切り替え回数から Cognitive Tunneling をそれぞれ評価する。Wilcoxon の符号付順位和検定を用いた結果、1.5秒以上同じ映像を見ている割合、注視映像を車載映像から切り替える回数と注視映像の切り替える回数において有意差は確認できなかった。



らなかった可能性が考えられる。これが、作業時間が低減しなかった要因と考えられる。

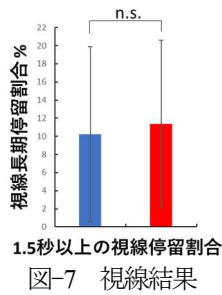


図-7 視線結果

スケールモデルを用いた実験では、各評価指標において、有意に向上する傾向が示唆されていたが、実機実験においてそのような傾向は見られなかった。この点に関して考察する。スケールモデルを用いた実験においては、作業状態に応じて適切な映像を選択する時間を低減させることによる作業効率への影響を検証するため、マルチディスプレイ提示手法で 9 つの映像を被験者に提示していた。しかし、本実験では、より実際の無人化施工の現場に環境を近づけるため、提示映像を 4 種類まで減らしている。これにより、映像間の情報統合が容易であるため、提案するビジュアルインタフェースの効果がスケールモデルを用いた実験の結果ほど顕著に見られなかったと考えられる。また、スケールモデルを用いた実験の被験者は実機の操作が未経験である一方で、本実験の被験者は搭乗操作の熟練者であるため、作業状態に応じて見るべき映像を選択する能力に長けていると考えられる。以上より、各評価指標において有意差が確認できなかった可能性がある。

次に、被験者の認知特性及び行動、習熟のメカニズムがそれぞれ違うという観点から個人差を整理すると、図-8 のように提案するビジュアルインタフェースに適合する操作者が確認できた。被験者 B と被験者 D において、注視映像を車載映像から切り替える回数と注視映像の切り替える回数が有意に増加する。これにより、提案手法を用いると Visual Saliency の高い車載映像から低い外部カメラ映像に注意を誘導でき、Cognitive Tunneling を低減可能なことが示唆された。

一方、被験者 B と被験者 D において 1.5 秒以上同じ映像を見ている割合に有意差は見られなかった(図-8)。上記のように従来のマルチディスプレイ提示手法では常に画角が変わらない 4 つ映像を提示しているため、映像の理解に要する時間が提案インタフェースと比較して低減される可能性が高い。つまり、提示する映像数が 4 種類と少ない場合には、提案インタフェースを用いることにより、映像を選択する時間を低減することはできるものの、切り替えのたびに映像を理解する時間を要し、後者がより作業効率に与える影響の比重が大きく、視線の誘導にはある程度成功しているものの、Visual Momentum の向上までには至

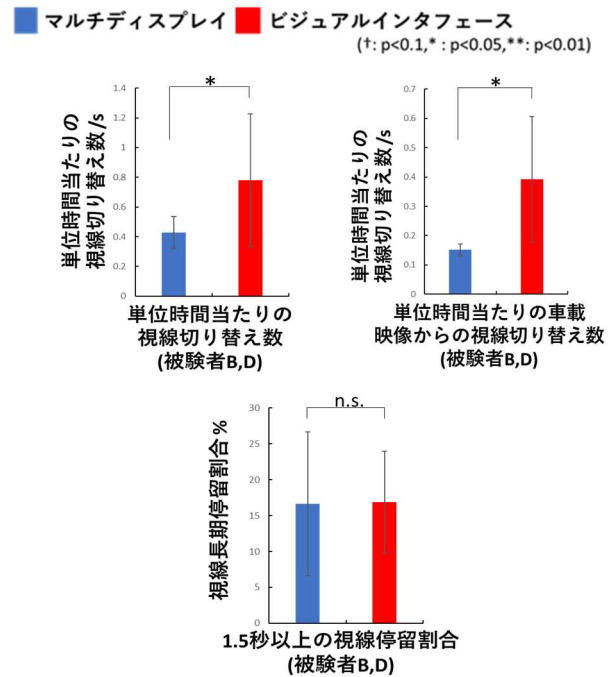


図-8 被験者 B,D における視線結果

c) 配置誤差と誤接触回数

図-9 に配置誤差と誤接触回数の結果を示す。Wilcoxon の符号付順位和検定を用いた結果、配置誤差と誤接触回数において有意差が確認できなかった。

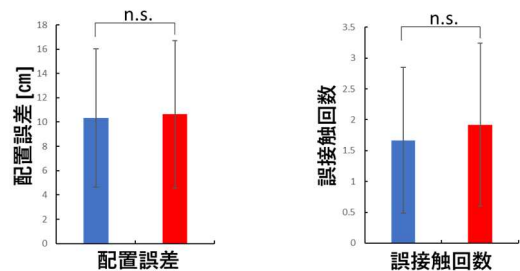


図-9 配置誤差と誤接触回数結果

提案するビジュアルインタフェースにより配置誤差と誤接触回数が低減できなかったことについて考察する。図-10 のように、本実験において従来のマルチディスプレイ提示手法で提供する映像の画角と、提案するビジュアルインタフェースが提供する映像の画角と同じである。そのため、配置誤差や誤接触回数の成績が向上するとすれば、見るべき映像の選択を、提案手法によって適切に補助できている場合である。しかし、本実験においてはスケールモデルにおける実験と違い、被験者が見るべき映像を選択する能力を既に高レベルで持っている可能性が高い点、提示映像の種類が大幅に減っているため、映像の選択が容易である点などを総合すると、配置誤差や誤接触回数への影響は

表れにくい可能性が高く、結果は妥当であると考えられる。



図-10 従来手法と提案手法の比較

4. まとめ

本研究では、無人化施工の高効率化のため、Cognitive Tunneling を低減可能な視覚提示手法を構築した。

Cognitive Tunneling の要因は低い Visual Momentum と Visual Saliency の高い映像のみに注意を払うことである。したがって、各映像に同じランドマークを内包し、Visual Momentum の向上を目指した。また、有効視野内に Visual Saliency の低い外部カメラ映像を振動提示することにより、Visual Saliency の高い車載映像からの注意の誘導を促した。実機を用いた実験の結果、一部の操作者で、視線の誘導に成功している結果が得られたものの、作業効率の向上には至らなかった。作業効率向上につながらなかった要因としては、提案インターフェースの特徴である、映像の切り替えによって、新しく表示された環境カメラ映像に対する理解に時間を割く必要があるためだと考えられる。

この結果から、視線を作業状態に応じた映像に視線を誘導できたとしても、その映像の理解を補助することができなければ、本質的な課題解決にはならないことが分かる。

そのため今後は、映像を切り替えるもしくは、新しく表出させる際に、空間的に離散的である映像の理解を補助できるシステムを導入することによって、作業効率の向上を目指す。

参考文献

- 1) 茂木正晴, 藤野健一, 西山章彦, "無人化施工と有人施工における作業性の比較実験報告—無人化施工技術の作業効率向上に向けた一考察—", 建設施工と建設機械シンポジウム, pp.39-42, 2013.
- 2) 古屋弘, 栗生暢雄, 清水千春, "3D 画像と体感操縦

を用いた「次世代無人化施工システム」, 大林組技術研究所報 No.76, 2012.

- 3) G. Dirkin, "Cognitive tunneling: Use of visual information under stress," *Perceptual and Motor Skills*, vol. 56, pp. 191-198, 1983.
- 4) Jessie Y.C. Chen, Ellen C. Haas and Michael J. Barnes, "Human Performance Issues and User Interface Design for Teleoperated Robots," *Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 37, No. 6, pp. 1231-1245, 2007.
- 5) Lisa C. Thomas and Christopher D. Wickens, "Visual Displays and Cognitive Tunneling: Frames of Reference Effects on Spatial Judgments and Change Detection," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 45, No. 4, pp. 336-340, 2001.
- 6) Junjie Yang, Mitsuhiro Kamezaki, Hiroyasu Iwata and Shigeki Sugano, "Analysis of Effective Environmental-Camera Images Using Virtual Environment for Advanced Unmanned Construction," *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 664-669, 2014.
- 7) 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. 1-11, 2019.
- 8) 志村恵, 鈴木浩之, 下村義弘, 勝浦哲夫, "注視中における周辺視野内での視覚的振動運動刺激に対する知覚特性", *日本生理人類学会誌*, Vol. 20, No. 2, pp. 95-102, 2015.
- 9) 茂木正晴, 油田信一, 藤野健一, 油圧ショベルの遠隔操作による作業の効率評価のためのモデルタスクの提案, *建設機械施工論文*, Vol.66, No.8 (2014), pp.71-79