

JCMA 報告

平成24年度 研究開発助成 成果報告(その2)

無人化施工の効率・安全性を高める 映像の注視・解釈支援に関する調査研究

亀崎 允啓・岩田 浩康・菅野 重樹

無人化施工においては、現場環境の状況を適切に把握できるように、複数のカメラ映像が複数のモニタに提示される。計画や操作の判断に不可欠な視覚情報が多彩かつ広範に得られる一方、オペレータの認知情報処理の負荷が肥大することが懸念される。そこで、「どの映像のどの部分をどのように見ればよいか」を支援する枠組みを提案した。拡張現実(Augmented Reality: AR)技術を使い、(a)作業状況に応じた映像の選択のため、重要度や危険度を示す映像フレーム、(b)注目領域の抽出のため、距離感や奥行き感把握アロー、(c)選択・抽出領域の解釈のために、提示色変化や映像の不可視化を行う3つのモジュールを開発した。実験の結果、注視・解釈支援により、作業時間はほぼ一定であるが、誤接触回数が減少すること、アンケートの結果、奥行き感が把握しやすくなり、オペレータの認知負荷が軽減されることが示された。

キーワード：unmanned construction, tele-operation, focusing support, augmented reality

1. はじめに

情報通信技術(ICT)やロボット技術(RT)を導入した無人化施工は、道路啓開や土木作業などの災害対応作業における効率化や高度化を図る中核技術として期待されている¹⁾。さまざまな災害現場において実施実績をあげている²⁾一方、遠隔操作時の操縦環境は、搭乗操作時のものと根本的に異なるため、違和感や不慣れさによって作業効率が低下してしまうことが問題となっている³⁾。この効率低下は、視覚提示内容の不完全性、操作・画像情報の通信遅延、体感・触覚情報の欠落の3つの要素が主な要因であると報告されている⁴⁾。これらの課題に対処すべく、さまざまな技術開発が行われている^{5), 6)}のだが、複雑な環境における対応作業の効率化・高度化を考えた場合、既述の主要課題のうち、操縦の計画や判断の基本情報となる映像情報そのものへの要求が厳しくなると予想される。

現在、オペレータの視覚情報は、重機に搭載された車載カメラやカメラ移動車などに搭載された環境カメラから提供されている。しかしながら、ほとんどの現場において、環境カメラの向きや画角は固定されているため、十分な視覚情報が得られない可能性がある。このとき、カメラの向き・画角を自動的に制御し、作業状況に応じた適応的なカメラ映像を提供できれば、オペレータは、精神的・身体的な負担を減らしつつ、より正確な遠隔操縦が可能になると考えられる。これによって、リスクを伴った操作と過度に慎重な操作の

双方が低減され、高効率化につながると期待される。これまでに、無人化施工の高度化のための基礎研究として、作業状況の識別に基づき環境カメラの向き・画角を自動的に調整する手法を開発している(図-1)⁷⁾。制御手法の詳細は、第3章にて説明する。仮想(Virtual Reality: VR)空間上に模擬された災害現場で無人化重機を操作するVRシミュレータ⁸⁾を開発し、固定(制御なし)、手動制御、半自動制御の3システムで比較評価を行った結果、半自動制御では、固定・手動制御で実現が難しかった作業効率と作業品質の両立が可能

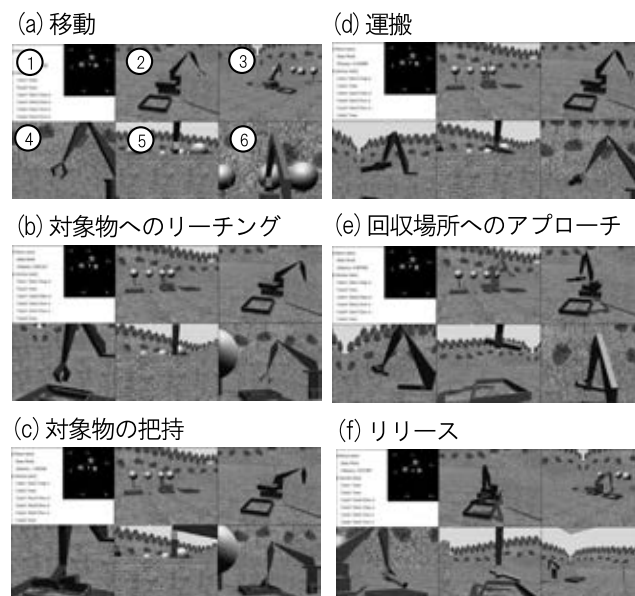
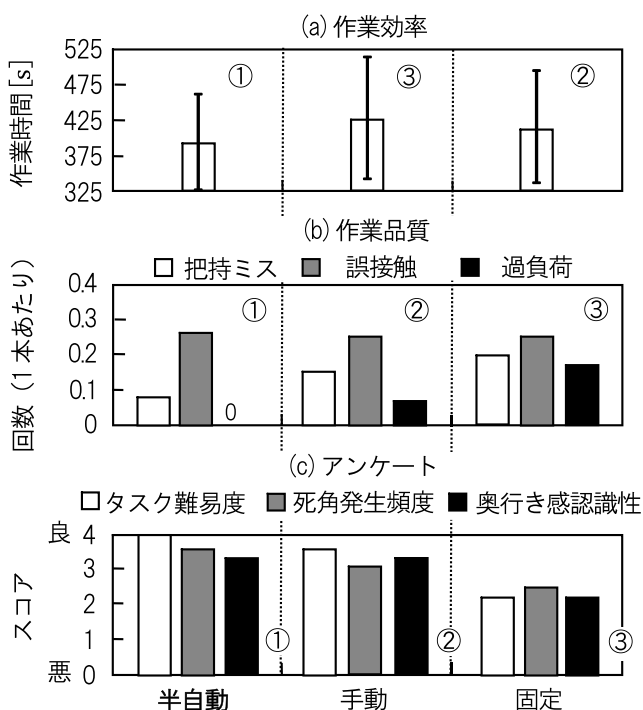


図-1 半自動制御システムにおける作業シーケンス



図ー2 VR シミュレータを用いた検証実験の結果

となること、また、オペレータの主観的な使いやすさが向上することが示唆された（図ー2）。

計画や操作の判断に不可欠な基本情報（視覚情報）が多彩かつ広範に得られるようになった一方で、オペレータの認知情報処理に関する課題が新たに浮かび上がった。時々刻々と変化する状況下において、オペレータが見るべき適切な映像を、多くの映像の中（本システムでは、6つの映像）からオペレータ自身が選んでいくには、長年の作業経験と大きな認知的負荷を要する⁹⁾。そこで、「どのカメラ映像のどの部分をどのように見ればよいか」といった映像の注視・解釈支援について検討する。注目すべきカメラ映像とその領域、さらに、映像の解釈方法をシステム側から積極的に提案できれば、たくさんの映像の中から、状況にあった適切な映像を探し、その映像内容を把握する認知的負担を大幅に減らすことが可能になり、さらなる高効率化が期待される。

2. 注視すべき状況と支援方法に関する分析

本章では、注目すべき状況と注視・解釈支援（どの映像のどの領域をどのように見ればよいのか）のために必要な支援技術について分析する。

(1) 注視状況および注視内容の分析

映像の注視・解釈支援を提供する目的は、認知的負担を低減（維持）させつつ、より効率的で安全な作業を

実現することである。このことから、支援の種類は作業促進と危険回避の2種類に大きく分類できる。作業促進のための映像を作業促進映像、危険回避のための映像を危険回避映像と呼ぶ。注視すべき映像やその解釈内容は、作業内容や現場環境、オペレータの技能によって大きく変わることが予想される¹⁰⁾。ここでは、これらの条件に依存しない共通の注視状況および注視内容について、作業促進・危険回避の観点からそれぞれ分析する。

①作業促進

手先と対象物の接触を伴う把持作業の前後では、必然的に細かく安全な操作が求められるため、操作の難易度が相対的に高くなる。このとき、手先と対象物の位置関係を把握できる映像を注視することが重要となるのだが、この映像においては、効率的かつ安全な把持ができるように、手先と対象物の距離感、特に奥行き感、を掴める情報が重要になる。

②危険回避

マニピュレータのリンク部やカウンターウェイト部が壁や障害物に接触すると、機体の転倒や瓦礫の崩落などの危険な事象が発生してしまうことから、確実に避けなければならない。このとき、接触しそうな機体各部と障害物との位置関係を把握できる映像を注視することが重要になるが、この映像においては、適確に回避行動をとれるように、接触しそうな部位が同定でき、相対距離が定量的に把握できる情報が重要になる。

(2) 拡張現実感を用いた注視・解釈支援

2. (1) 節の分析から導出された注視場面および注視内容をオペレータに提供するのに効果的と考えられる支援方法について分析する。音声を使った注視ガイダンスや触覚を使った危険度呈示などの方法が考えられるが、映像の注視・解釈が支援の目的であることを考慮し、導入がしやすく、整合性がとりやすい、視覚情報を利用した支援方法を検討する。映像の注視・解釈支援には、映像に顕在化されている情報の強調、さらに、映像に潜在している重要な情報の表面化を行い、オペレータに提示することが求められる。これらの意味情報を映像上に表現する方法として拡張現実 (Augmented Reality: AR) 技術を用いる。AR 技術は、人が知覚する現実の情報をデバイスなどの利用により拡張する技術のことで、船舶航行データの可視化¹¹⁾、建設現場における作業支援¹²⁾、ロボット遠隔操縦用インタフェース¹³⁾ などへ応用されている。一方で、無人化施工における視覚提示システムにおいて、AR 技術が搭載されている例はほとんどない。

そこで、本研究では、作業促進および危険回避に効

果的と考えられる映像において、顕在的情報の強化および潜在的情報の表面化を行うためのARを利用した注視・解釈支援システムを開発する。支援システムの効果を高められるように、これまでに開発した環境カメラの半自動制御システムのコンポーネントを調整する（第3章）。その上で、ARを用いた注視・解釈支援システムを開発し（第4章）、VRシミュレータを用いた災害現場での瓦礫撤去作業から、その有用性を評価する（第5章）。

3. 半自動制御システムの再構成

第2章の分析結果を踏まえ、映像の注視・解釈支援システムが効果的にはたらくように、半自動制御システムの要素を再構成する。

(1) 半自動制御システムの詳細

筆者らがこれまでに開発した環境カメラの半自動制御システムについて概説する。カメラの自動制御には、共通の基本モジュールとして定義した「カメラロール」を用いる。一般的な作業フロー（移動、リーチング、アタッチメントを使った作業（把持など）、運搬、リリース）においてオペレータに提供すべき映像を分析した結果から、3つの撮像対象（作業機、マニピュレータ、手先）と4つの撮像モード（追従、ズーム、姿勢、軌道）を案出し、これらの組み合わせにより4つのカメラロール（車体俯瞰追従、手先拡大追従、マニピュレータ姿勢保持、マニピュレータ軌道）を定義した。オペレータには、車体俯瞰追従映像を2つ、手先拡大追従映像とマニピュレータ映像を1つずつ、図一1左上に示す映像位置（順に2, 3, 4, 6）にそれぞれ提示した。これらのカメラロールは、「ロールアサインメントシステム」を用いて環境カメラに自動的に割り当てられる。作業の進行に伴い、障害物位置やカメラの制御限界などから当該カメラが役割を満たせなくなった場合にも、線型計画法を用いたカメラロールの再割り当てを実時間で行うことで、さまざまな状況に対してロバストに映像提供を行うことができる。

(2) カメラロールと表示位置の再調整

第2章における要求機能の分析から、作業促進において、手先の奥行き感情報が重要であること、危険回避において、危険認知映像が重要であることがわかった。これらを踏まえ、カメラロールの再定義とモニタ表示位置の再調整を行った（図一3）。再構成結果を以下に示す。

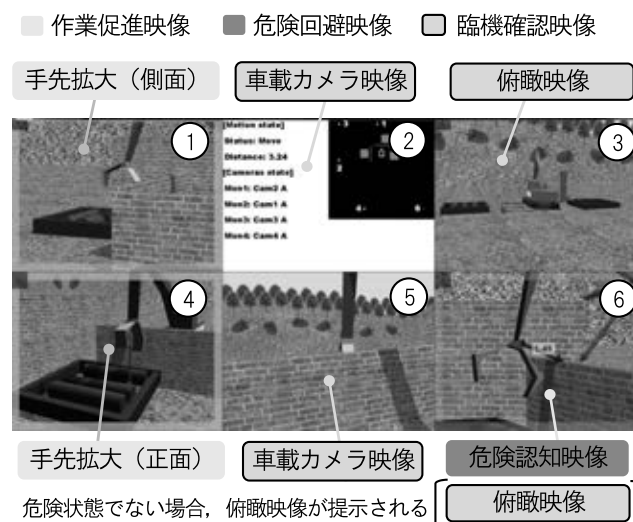
① カメラロール

- ・手先拡大映像. 現システムでは、手先映像とマニピュレータ映像の組み合わせであったが、物体把持動作などを効率的かつ安全に進めるために、水平方向に90度ずれた2つの視点（手先方向に対して正面および側面）からの映像を提示する。
- ・危険認知映像. マニピュレータが環境へ接触する危険性を考慮して、接触の可能性がある部位を含む映像を提供する。最も接触危険性の高い障害物箇所とマニピュレータ部位を結ぶ直線の垂直方向からの映像が提供される。

② 映像の表示位置

- ・手先拡大映像. 2つの映像を同時に見やすくするため、図一3に示す左側の2つ（1・4）に配置する。
- ・危険認知映像. オペレータの目に付きやすい場所として、図一3に示す右下（6）に配置する。

手先の拡大映像が作業促進映像、危険認知映像が危険回避映像、その他の映像は、必要に応じて注視する臨機確認映像となる。注視・解釈支援システムは、図一3に示す映像システムをベースに開発される。



図一3 半自動制御システムの再構成結果

4. 注視・解釈支援システムの開発

第2章の分析と第3章の再構成結果を踏まえ、ARのコンポーネントおよび状況に応じて提供するAR支援について考察し、注視・解釈支援システムを開発する。

(1) 注視・解釈支援のコンポーネント

注視・解釈支援には、「どのカメラ映像のどの部分をどのように見ればよいか」を作業促進・危険回避の観点からオペレータに提供することが必要となる。具体的には、複数の映像（本研究では、4つの環境カメ

ラ映像)の中から、注視すべき1つ以上の映像に意味づけをして注視させること、さらに、選択された画面の中で、注視すべき映像上の1つ以上の領域に意味付けをして、注視させることである。本節では、注視・解釈支援に有用と考えられる4つのARコンポーネントについてそれぞれ説明する(図-4)。

①可変色映像フレーム：映像

作業促進と危険回避という異なる注視映像の意味を容易に理解させるために、安全色彩¹⁴⁾を参考にした色と点滅効果を利用する。作業促進フレームには、安全や進行を表す緑色を用いた(図-4左上部)。作業促進フレームは、奥行き補助が重要になる手先と対象物が近くなったときに、手先拡大追従映像に提示される。危険回避用のフレームには、接触の危険度(ここでは、マニピュレータと障害物間の距離)に応じて、注意喚起、接触警告、回避催促、回避要求の4種類を用意した。注意喚起では黄色、接触警告では赤色のフレームを点灯させた。さらに、危険度の把握と強い注視を要求するため、回避催促では赤色の低周期点滅、

回避要求では赤色の高周期点滅とした(図-4右側)。危険回避フレームは、危険認知映像に提示され、マニピュレータと障害物の距離に応じて、段階的に4つのモードが切り替わる。回避催促フレームが提供される状態では、危険回避映像のみを強く注視させたいため、作業促進フレームを消去する。

②不可視化：映像

接触の危険性が極めて高い状態では、作業の遂行を中断し、接触回避に注力させるべきだと考えられる。そこで、最も危険度の高い回避要求状態では、手先拡大追従映像の可視度を極端に下げ、不可視化を行うことで、危険回避映像への強い注意誘導を行う(図-4左下部)。不可視状態は、不透明に近い黒色でマスクをする。

③奥行き感補助用手先垂直アロー：領域

手先拡大追従映像において、手先と対象物との奥行き関係を掴みやすくするために、手先の先端から地面まで鉛直下向き方向のアローを提示する(図-4左上部)。作業促進フレームの点灯と同時に発生する。アローは、両矢印で、視野が隠れないように半透明の緑色とする。

④接触危険認知用距離アロー：領域

危険認知映像において、マニピュレータと障害物の接触危険性を把握するために、障害物と最も近いマニピュレータ部位とを結ぶアローを提示する(図-4右側)。危険回避フレームの点灯と同時に発生する。アローは、両矢印で、視野が隠れないように半透明とする。注意喚起状態では黄色、接触警告状態では赤色とする。接触警告状態に移移するまでの間、最短距離の短さに応じて黄色から赤へと線形的に変化させる。障害物-部位間の距離感把握アローが数本提示された場合、最も近い部位を特定でき、距離を定量的に把握できれば、具体的な回避判断や計画がたてやすいと考え、最短距離アローの近くに相対距離を数値で表示する。

表-1にAR支援のコンポーネント、注視対象、注視目的、注視効果をまとめる。作業促進支援では、把

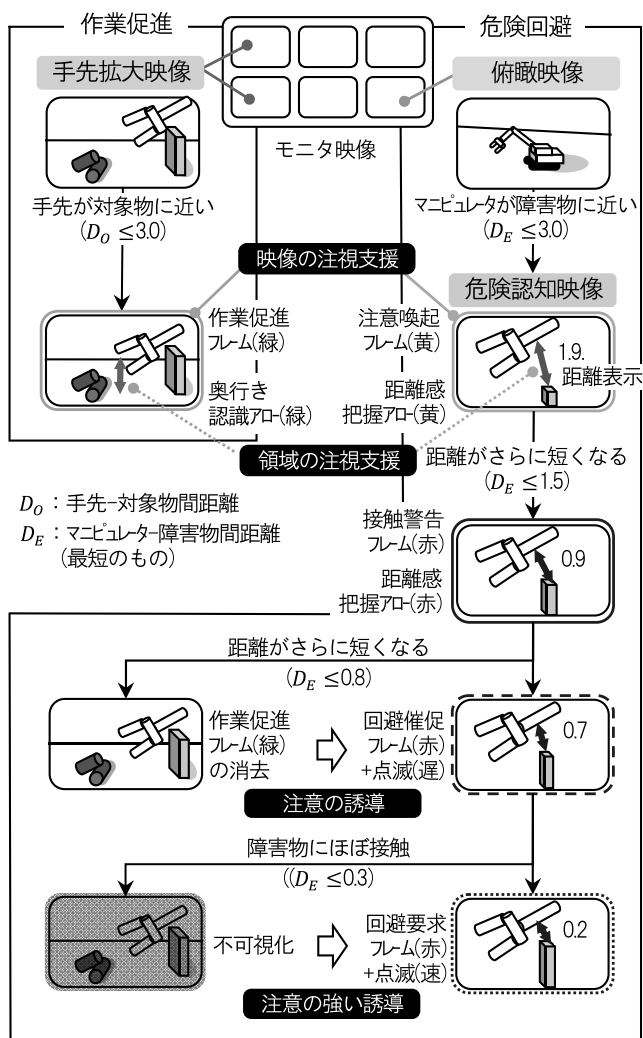


図-4 AR支援のコンポーネント

表-1 AR支援のコンポーネント

	対象	種類	効果
可変色フレーム	映像	作業促進	映像へ注意誘導
-色変化/点滅		危険回避	危険度の理解
不可視化	映像	-	危険認知映像への
-マスク		危険回避	強い誘導
手先垂直アロー	領域	作業促進	手先の奥行き感把握
-半透明		-	
距離把握アロー	領域	-	接触危険部位および
-色変化/数値		危険回避	距離の把握

持・リリース時の効率化・安全化のため、手先部の拡大映像の利用を緑色のフレームにより勧め、奥行き感補助のため手先から緑色の垂直アローが提示される。危険回避支援では、障害物への最接近箇所がアローおよび数値により提供される。危険度に応じて、危険認知映像のフレームが黄色から赤色、赤色の点灯から点滅へ変化する。また、最危険時には、作業促進映像を不可視化することで、強制的に危険回避映像へ注意を誘導する。

(2) 注視・解釈支援システムの実装

4.1 節のシステム設計をベースに、各パラメータおよび条件を設定し、VR シミュレータに実装した。本節では、図—5 に示す作業例を利用して、提供される AR 支援コンポーネントおよび効果について説明する。AR 支援は、作業促進では手先と対象物間の距離 D_o 、危険回避ではマニピュレータと障害物間の距離 D_E に応じて提供される。利用する色情報を表—2 にまとめておく。

①作業促進支援 (図—5 (a))

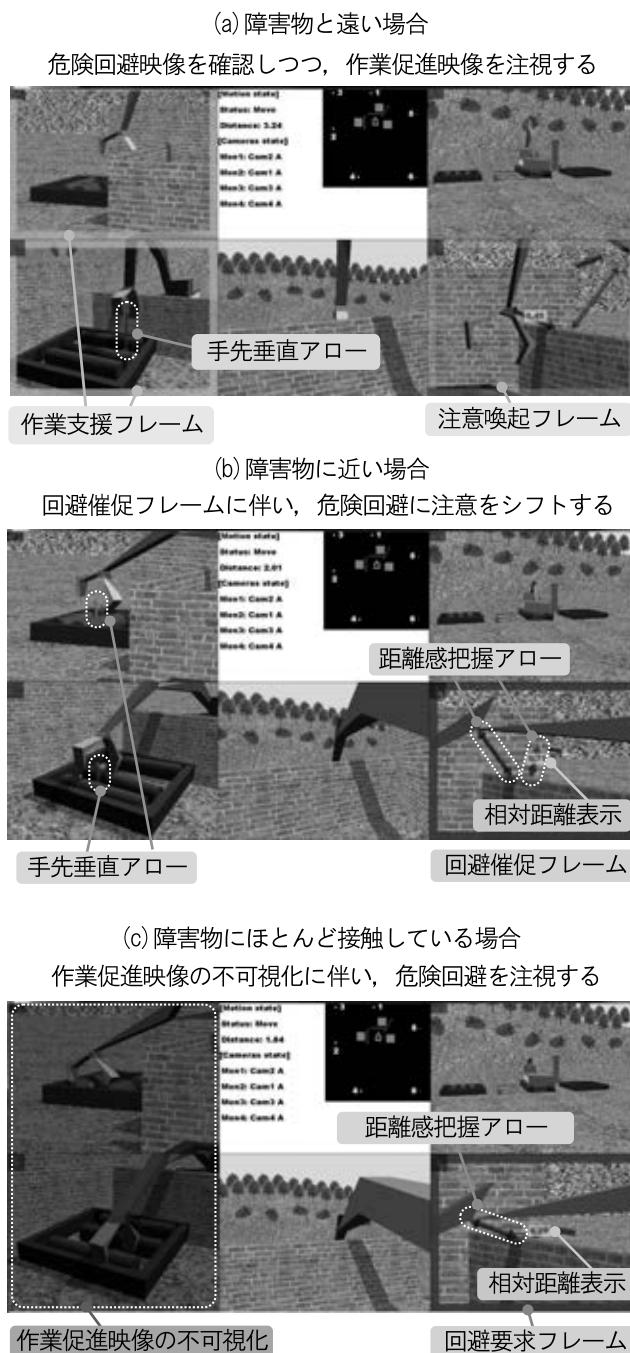
手先と対象物が近いという条件を、 $D_o \leq 3.0$ [m] と設定した。この条件下では、図—5 (a) の右端 2 つの作業促進映像のフレームが緑色になる。また、これと同時に手先から地面へ向けて、半透明緑色の垂直アローが出現する。これにより、物体把持における効率的かつ安全な操作が実現される。

②危険回避支援：注意喚起 (図—5 (a))

危険回避支援が発動されるはじめの条件である注意喚起状態を $D_E \leq 3.0$ [m] と設定した。この条件下では、図—5 (a) の右下のように、俯瞰映像が危険認知映像に変更され、フレームが黄色になる。これと同時に各障害物と最も近いマニピュレータ部位とを結ぶ黄色の距離感把握アローおよび最短アローの近くに距離が表示される。

③危険回避支援：注意喚起～回避催促 (図—5 (b))

さらなる注意が必要となる注意喚起状態の条件を $D_E \leq 1.5$ [m] と設定した。この条件下では、図—5 (b) 右下のように、危険回避映像に赤色のフレームが提示される。3.0 [m] から 1.5 [m] の間は、距離が短くなるにつれて、フレームおよびアローが半透明の黄色から不透明の赤へ変化する。これにより、接触の可能性が高い部位が明らかになり、必要に応じて回避行動に移ることができる。さらに、回避催促状態の条件を $D_E \leq 0.8$ [m] と設定した。この条件下では、赤色のフレームが低周期で点滅し始め、図—5 (b) 左側のように作業促進フレームを消去する。これにより、注



図—5 作業状況に応じた AR 支援の変更

表—2 利用する色情報と AR コンポーネントの関係

色	R/G/B/A (不透明度)	利用するコンポーネント
緑	0/1/0/0.7	作業フレーム / 垂直アロー
黄	0.1/0.9/0/0.8	注意喚起フレーム / 距離アロー
赤	0.1/0.9/0/0.8	接触注意フレーム / 距離アロー
赤点滅 (遅)	$1/0/0/0.9 \times \cos(8t/(d+0.2))$	回避催促フレーム
赤点滅 (速)	$1/0/0/0.9 \times \cos(16t)$	回避要求フレーム
不可視化	0/0/0/0.4	手先拡大追従映像

意の誘導を行う。

④危険回避支援：回避要求（図—5（c））

最も危険な状態である回避要求状態の条件を、 $D_E \leq 0.3$ [m] と設定した。この条件下では、図—5（c）のように左側2つの作業促進映像が黒色のマスクにより不可視化される。また、赤色のフレームの点滅が高周期となる。これにより、強制的に危険回避用モニタを注視するように誘導される。

このように、作業を促進すべき状況や、接触危険の度合いに応じて、オペレータに対するメッセージの種類や強さを変えることで、必要に応じた回避行動を選択させることが可能になると考えられる。なお、今回設定した状態の分類条件は、作業環境や作業内容によって柔軟に設定することが可能である。

5. 評価実験

環境カメラの自動制御システムの利用を前提に、AR支援の有無を比較することにより、開発した注視・解釈支援システムの効果を評価する。

（1）実験条件

① VR シミュレータ

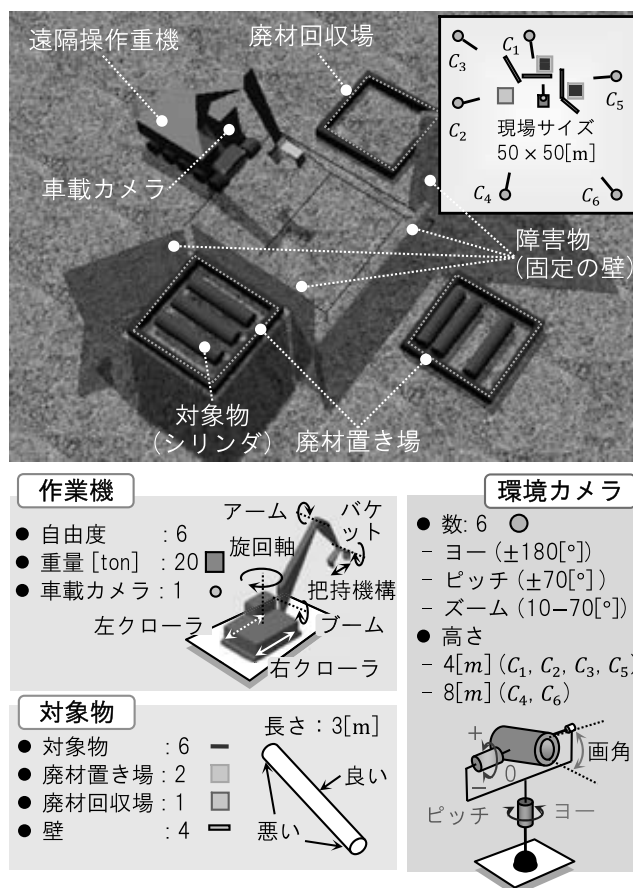
図—6に実験に利用するVRシミュレータ⁸⁾を示す。作業機には、把持機構を備えた解体機を再現し、4本の作業機操作レバー（左右クローラ、上部回転軸、ブーム、アーム、バケット、グラブプル）および4本の環境カメラ操作レバー（ヨー・ピッチ・ズーム）を配置した。さらに、42インチの2次元モニタの表示領域を6分割し、車載カメラ映像、4つの環境カメラ映像、状態提示（作業状況、ロール割り当て状況など）をそれぞれ表示した。描画エンジンとしてOpenGL、物理エンジンとしてOpen Dynamics Engine（ODE）を利用した。これにより、任意の点の位置、速度、力などが計測可能になる。

②実験条件

作業環境、作業機、対象物、環境カメラは、図—7のように設定した。2つの廃材置き場に3つずつ配置された合計6つの廃材円柱棒を1つずつ運搬して廃材回収箱に設置する作業を行う。環境には、車載カメラ映像から廃材が直接見えないように視界を遮る壁を設置した。オペレータには、できる限り早く、環境との過負荷接触を避け、把持時の掴みミスせず、廃材棒の中央を把持し、運搬中に物体を落下させないことを指示した。自動制御システムは、3.（2）節で再定義したカメラロールを利用し、各映像は図—3に示す表



図—6 VR シミュレータ



図—7 実験環境

示位置に提供される。

自動制御システムのみ（注視・解釈支援なし）と自動制御に加えてAR支援を提供したもの（注視・解釈支援あり）において、作業効率（遂行時間）、安全性（誤接触回数）、作業品質（把持位置）を評価項目として計測した。さらに、注視・解釈支援の効果を計測するために、奥行き感の認識性、距離感の認識性、接触への注意、頻繁な視点移動の抑制を項目とした5段階評価を行うアンケートを実験後に実施した。さらに、提供した4つのARコンポーネントそれぞれの有用性および利用優先度においても5段階でアンケートを実施した。6つの廃材棒運搬を1セットとし、支援の有無で2セットずつ行った。試行順序はランダムとした。オペレータは、実機操作経験はないが、シミュレータ操作に慣れた成人男性7名とした。AR支援のみの効果を計るため、自動カメラ制御にも十分慣れたのちに実験を行った。

(2) 実験結果

作業遂行時間、環境との誤接触回数、対象物の把持位置、およびアンケートの結果を示す。

①作業遂行時間

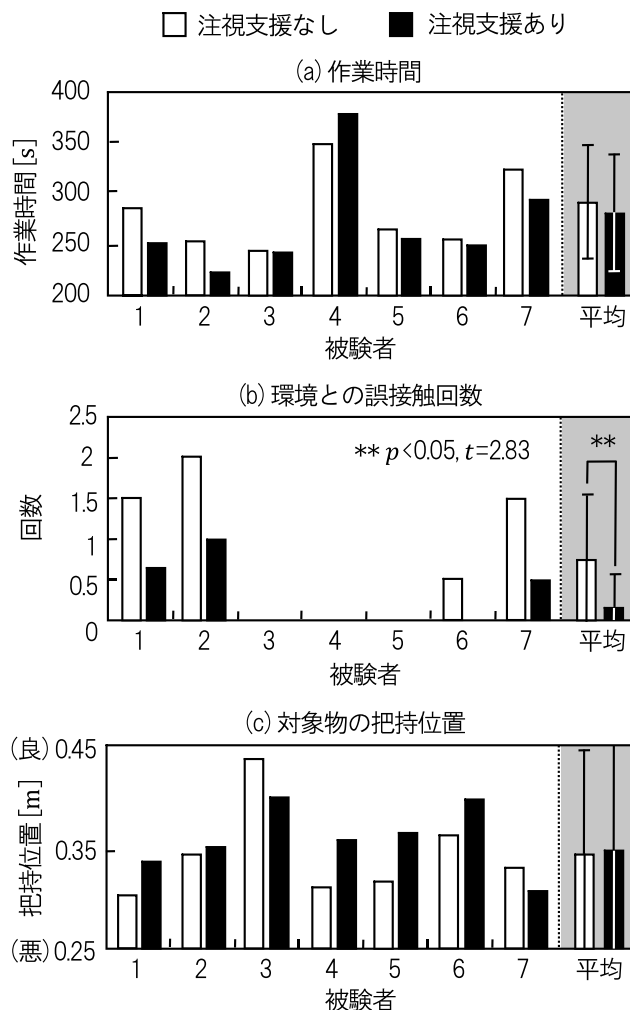
図—8 (a) にオペレータごとの作業時間および平均の作業時間を示す。オペレータ4以外は、注視支援を提供することで作業時間が短縮していることが分かる。これは、後述するが、誤接触回数の減少に伴い、スムーズな作業遂行ができたのではないかと考えられる。オペレータ全員の平均では、注視支援なしでは、282.9秒（標準偏差：49.5秒）、支援ありでは、271.6秒（標準偏差：53.8秒）となった。統計的な有意差は見られなかったが、大まかな傾向としては作業時間が短縮できる可能性が示唆された。

②環境との誤接触回数

図—8 (b) に環境の誤接触回数を示す。すべてのオペレータで、誤接触回数が減っていることが分かる。オペレータ全員の平均では、注視支援なしでは、0.79回（標準偏差：0.89回）、支援ありでは、0.21回（標準偏差：0.58回）となり、統計的な有意差があることが分かった（ $p<0.05$, $t=2.83$ ）。作業促進支援により、把持作業中の環境接触が減少し、危険回避支援により、マニピュレータと障害物との接触が減少したものと考えられる。以上から、注視・解釈支援が、安全性の向上に寄与することが示唆された。

③物体の把持位置

図—8 (c) に対象物の把持位置を示す。改善するオペレータと悪化するオペレータが確認された。垂直アローにより奥行き間が補助されることで、容易に物

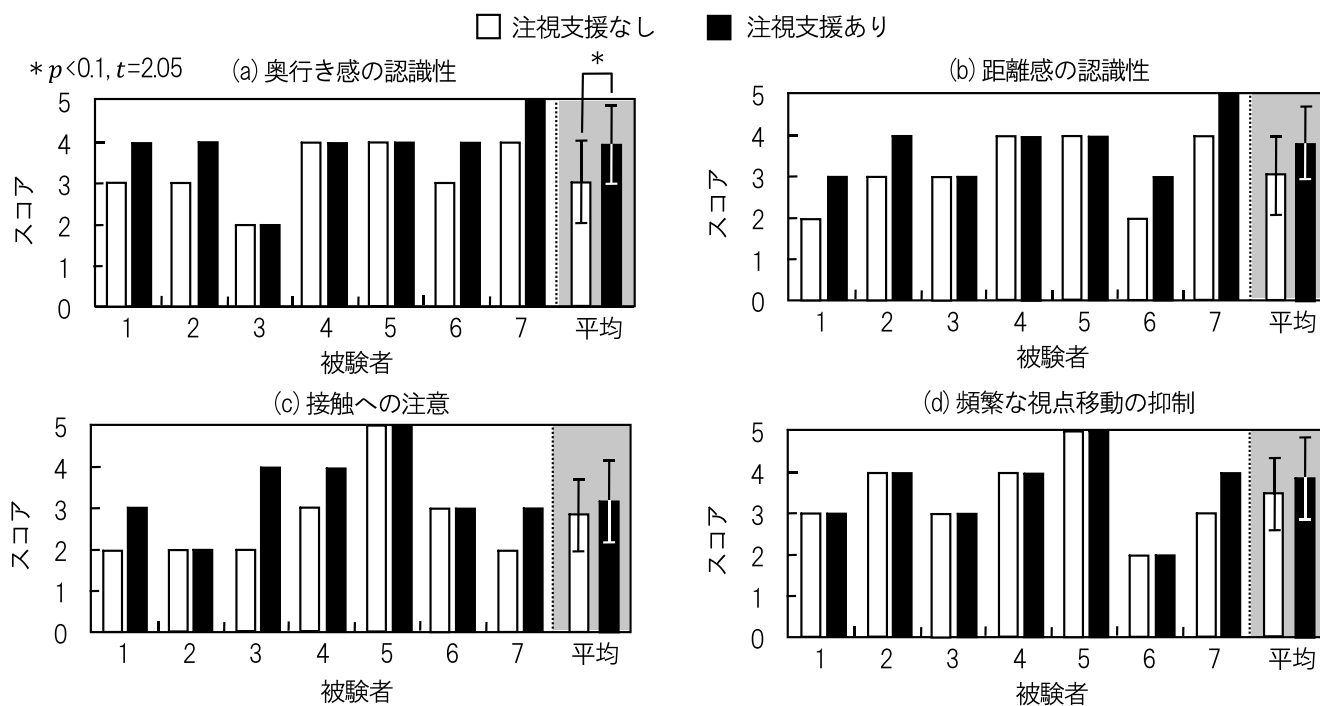


図—8 作業効率・安全性・品質の評価

体を掴めるようになったことから、物体の中央を掴むという条件が疎かになってしまったためと考えられる。オペレータ全員の平均では、注視支援なしでは、0.34 [m]（標準偏差：0.10 [m]）、支援ありでは、0.36 [m]（標準偏差：0.11 [m]）となった。オペレータ個人に合った支援が必要となることが示唆された。

④アンケート結果

図—9 (a) に示す奥行きの認識性では、すべてのオペレータでスコアが改善しているのが分かり、統計的な有意差も確認された（ $p<0.1$, $t=2.05$ ）。図—9 (b) に示す距離感の認識性では、前項と同様にすべてのオペレータでスコアが改善している。これらの結果から、注視支援により、奥行き感や相対的な距離感が掴みやすくなったことが分かる。図—9 (c) に示す接触への注意では、すべてのオペレータでスコアが改善している。図—9 (d) に示す頻繁な視点移動の抑制でも同様に、すべてのオペレータ被験者でスコアが改善している。これらの結果から、接触危険性を回避できる映像への注視を探索的な映像選択をせずに効率よく注



図—9 注視・解釈支援の効果に関する主観的評価

意できたということが分かった。

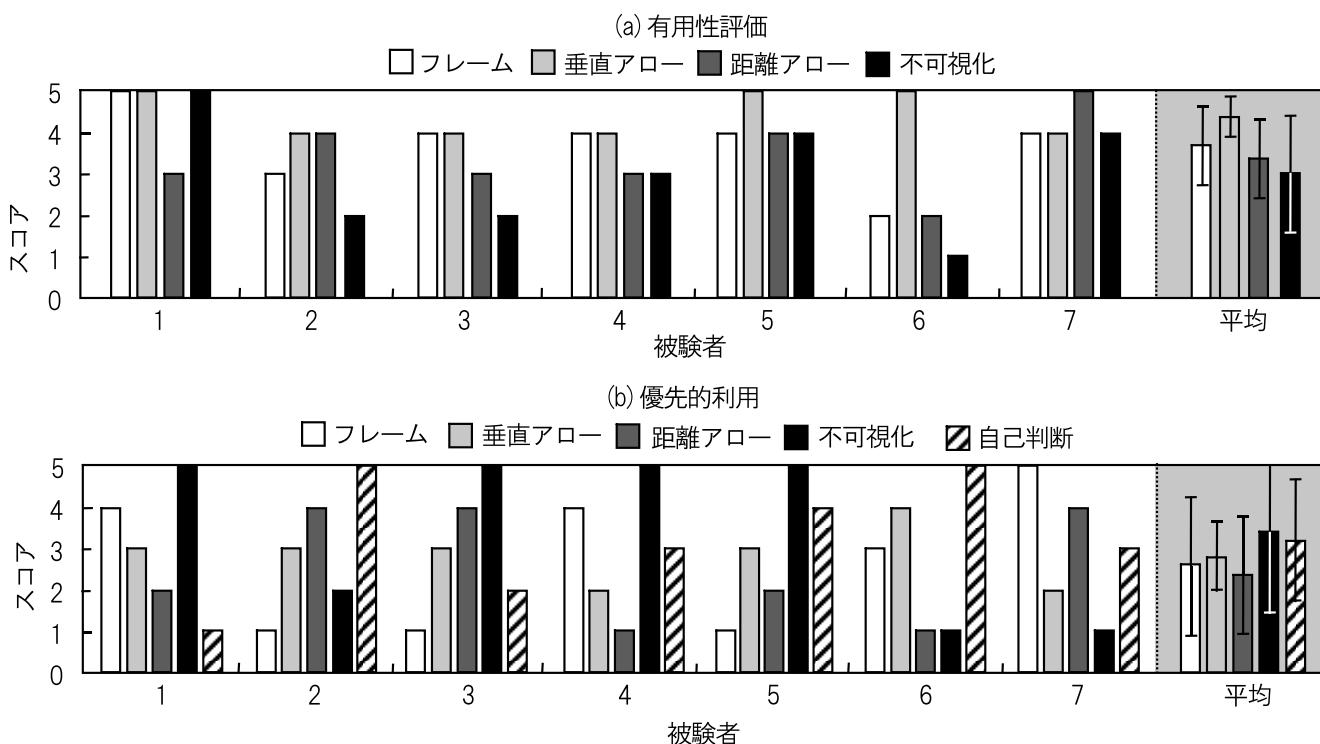
(3) 考察：AR モジュールの有用性・利用優先度評価

本研究で提案した4つの AR モジュールそれぞれの有用性, 利用優先度についてのアンケート結果を示す。

①有用性評価

図—10 (a) に有用性評価に関するアンケート結果

を示す。オペレータ全員の平均をみると、垂直アロー (4.38), 可変色モニタフレーム (3.75), 距離感アロー (3.38), 不可視化 (2.75) の順にスコアが高い。また、オペレータ別に分析すると、やはり、垂直アロー、可変色モニタフレームは、共通してスコアが高いことが分かり、多くのオペレータにとって有用であることが分かった。一方で、不可視化は、オペレータに応じて



図—10 有用性評価・優先的利用

大きくスコアが異なった。このことから、オペレータそれぞれの好みや特性に合った支援方法を考える必要がある。また、垂直アローは、奥行き認識に極めて有効的であることがヒアリングからも分かった。

②利用優先的

図10 (b) に操作決定のために優先的に利用したARコンポーネントに関するアンケート結果を示す。オペレータ全員の平均をみると、不可視化 (3.43)、自己判断 (3.29)、垂直アロー (2.86)、フレーム (2.71)、距離感アロー (2.57) の順にスコアが高い。評価5が最も多かったのが、強制的に視点移動を促す不可視化であったことから、注視をうまく誘導できたことが分かった。オペレータ6では自己判断を優先的に、オペレータ7ではフレームを優先的に、オペレータ1では自己判断をあまり優先的に利用していないこともわかった。このように、オペレータに応じて注視支援そのものへの利用態度が異なる点が明らかになった。前項でも述べたように、今後は、オペレータごとの違いに着目した支援提供が有用になると考えられる。

6. おわりに

環境カメラの自動制御システムにより、計画や操作の判断に不可欠な基本情報 (視覚情報) が多彩かつ広範に得られた。一方で、オペレータの認知情報処理に関する負荷の肥大が懸念される。そこで、「どのカメラ映像のどの部分をどのように見ればよいか」といった映像の注視・解釈支援について検討した。本研究では、映像における顕在化映像の強化と潜在化情報の表面化を行うために、仮想現実 (Augmented Reality: AR) 技術を利用した。

本研究では、使用条件に依存しない基盤的なARコンポーネントとして、可変色フレーム、不可視化、奥行き感補助用手先垂直アロー、接触危険認知用距離アローを提案し、実装した。支援対象 (映像と領域) と支援目的 (作業促進と危険回避) を容易に理解できるように、色や点滅効果などを利用した。また、作業の状況に応じて注意誘導の強さや方法を変えることで、映像や領域へ適切に注意を誘導する仕組みを開発した。VRシミュレータを使った実証実験の結果、注視・解釈支援を提供することで、作業時間を維持しつつ、誤接触回数が大きく減少させられること、アンケートの結果、奥行き間の認識や頻繁な視点移動の減少などが確認され、オペレータの認知負荷が軽減されることが示唆された。以上より、提案した注視・解釈支援システムでは、必要な映像を当該状況に応じて適切に注

視させることで、オペレータの認知的負担を減らしつつ、作業パフォーマンスの向上させられる可能性が示唆された。本システムは、充実が図られる視覚提示情報をフル活用するために必要なヒューマンインタフェース技術であり、無人化施工の高度化に寄与すると考えている。一方で、オペレータを個別に分析した結果、効果の是非およびその大小が分かれることが分かった。また、注視・解釈支援の捉え方も大きく異なることが分かった。今後は、この分析結果をもとに、視覚支援システムのパラメータ調整や個別適応に関する検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、(社)日本建設機械化協会「平成24年度研究開発助成」、JSPS 科研費 (26870656)、文科省グローバルCOEプログラム「グローバルロボットアカデミア」ならびに、早稲田大学理工学研究所の支援を受けて行われました。ここに謝意を表します。

JICMA

《参考文献》

- 1) 大内田聖和, 岩倉淳一, 渡部文人, “普賢岳における無人化施工の現状と課題”, 国土交通省九州地方整備局 九州国土交通研究会, paper no.018, 2010.
- 2) Y. Hiramatsu, T. Aono, and M. Nishio, “Disaster restoration work for the eruption of Mt Usuzan using an unmanned construction system,” *Advanced Robotics*, vol. 16, no. 6, pp. 505-508, 2002.
- 3) S. Nishigaki, K. Saibara, S. Kitahara, H. Iwasaki, K. Yamada, and H. Satoh, “ICT-based work management to support unmanned construction for post-disaster restoration,” in *Proc. Int. Symp. Automation and Robotics in Construction*, pp. 508-513, 2011.
- 4) 山口崇, 吉田正, 石松豊, “遠隔操作におけるマンマシンインターフェイスに関する実態調査”, 土木学会第59回年次学術講演会論文集, pp. 373-384, 2004.
- 5) S. Kitahara and T. Yoshida, “Deployment of construction robots applying the information technology and network system,” in *Proc. International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 19-23, 2006.
- 6) 林宏樹, 田村隆幸, 三鬼尚臣, “無人化施工における通信遅延と通信周期が施工効率に与える影響の分析と改善提案”, 建設の施工企画, pp. 119-124, 2009.
- 7) 亀崎允啓, 岩田浩康, 菅野重樹, “無人化施工における環境カメラのための半自動制御システムの基礎研究”, 建設機械施工, 2月号 (vol. 67, no. 2), pp. 92-100, 2015.
- 8) M. Kamezaki, G.A. Dominguez, J. Yang, H. Iwata, and S. Sugano, “Development of a tele-operation simulator based on virtual reality environment for advanced unmanned construction,” in *Proc. IEEE/SICE Int. Symp. System Integration*, pp. 855-860, 2013.
- 9) D.E. Crundall and G. Underwood, “Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers,” *Ergonomics*, vol. 41, no. 4, pp. 448-458, 1998.
- 10) 平山高嗣, “人間の内部状態を顕在化する視覚的インタラクション”, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報論の学習理論と機械学習, vol. 113, no. 197, pp. 173-180, 2013.
- 11) 岸晃平, 白石陽, “船舶航行データ可視化に向けた船舶トラッキングのための船舶特徴点推定”, 情報処理学会研究報告, 高度交通システム, pp. 1-7, 2014.
- 12) 今井博, “AR技術を用いた現場支援システムの研究-建設業にテレレジスタンスの概念を導入する第一歩として-”, 大成建設技術センター報, vol. 41, pp. 56-1-56-4, 2008.

- 13) 橋本直, 石田明彦, 稲見昌彦, 五十嵐健夫, “TouchMe: 拡張現実感を用いたロボットの遠隔操作手法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会論文集, paper no. 2P1-M04, 2012.
- 14) 日本規格協会, JISZ9101-1995「安全色及び安全標識 - 産業環境及び案内用安全標識のデザイン通則 -」, 1995.

【筆者紹介】

亀崎 允啓 (かめざき みつひろ)
早稲田大学 理工学術院総合研究所 研究院講師

岩田 浩康 (いわた ひろやす)
早稲田大学 創造理工学部 教授

菅野 重樹 (すがの しげき)
早稲田大学 創造理工学部 教授

