

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

亀崎 允啓・岩田 浩康・菅野 重樹

複雑作業への適応を目的とした無人化施工における環境カメラの自動制御手法の基礎検討として、カメラに持たせるカメラロールを状況ごとに選定し、それらを適切なカメラに割り当てる方法を開発した。カメラロールをより汎用的に定義するため、撮像対象と撮像モードの組み合わせによるものとし、本研究では、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モードを定義した。次に、障害物やカメラの可動角限界などを考慮した線型計画法を利用し、カメラロールを環境カメラに割り当てるロールアサインメント手法を開発した。仮想現実シミュレータを用いた瓦礫撤去作業を、固定カメラ、手動制御、半自動制御を比較して行った結果、半自動制御では、作業効率・作業品質ともに改善されること、アンケート結果から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。

キーワード：unmanned construction, tele-operation, environmental camera, autonomous control

1. はじめに

油圧ショベルをはじめとする建設機械には、より安全で効率的な災害対応作業への適応が期待されている¹⁾。通常の建設機械では、キャブにオペレータが搭乗して操縦（以下、搭乗操作）を行うのだが、災害現場では、二次災害などの危険性が存在することから、遠隔操作技術を導入した無人化施工（遠隔操作）が利用されている^{2), 3)}。遠隔操作により物理的な安全が確保される一方、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⁴⁾。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⁵⁾。これらの課題に対処すべく、通信周期や遅延が操作に与える影響の調査⁶⁾、3D映像や拡張現実感を使った視覚提示システム⁷⁾、力覚フィードバックシステム⁸⁾など、さまざまな技術開発が行われている。

複雑な災害環境における災害対応作業の効率化を考えた場合、既述の3つの主要課題のうち、遠隔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、建設機械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得ることができる。大規模な作業現場の一部では、環境カメラの向きや画角を調整するためのカメラ操作専用オペレータが導入されることがあるが、多くの現場においては、環境カメラの向き・画角は固定されているのが現状である。

心的回転や視点取得を含む空間認知能力は、遠隔操作を行うオペレータにとって極めて重要な能力であり⁹⁾、オペレータによって差異があることが分かっている¹⁰⁾。国際宇宙ステーションにおいて船外ロボットアームを遠隔操作するオペレータには、当該作業の遂行に効率的と考えられるカメラを選択する技能も要求される¹¹⁾。このように、要求される視覚情報の質は、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。現無人化施工システムにおけるカメラ映像の有用性は、アンケートによって是非が分かれているが、既述した使用条件の多様性に起因していると考えられる⁵⁾。

カメラの向きや画角を自動的に制御し、作業の状況に応じた適応的なカメラ映像を提供することができれば、オペレータは、精神的および身体的な負担を減らしつつ、より正確な遠隔操作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。そこで本研究では、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する。評価実験は、仮想（VR：Virtual Reality）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シミュレータを用いて行う。

2. 環境カメラの制御モジュール：カメラロール

環境カメラの設置位置や個数によらず、共通かつ簡

易的に実装できるように、自動制御の基本モジュールとなるカメラロール R を定義する。

(1) カメラの向き・画角の調整が必要となる状況

第1章で既述のように、作業状況に応じて求められる映像が変わると考えられるため、作業状況を車体移動（クローラ操作）とマニピュレータ作業（上部旋回体を含めた腕部操作）に大きく分割した。さらに、建設機械を使った作業の共通シーケンスを参考に、マニピュレータ作業をリーチング、アタッチメントを使った作業（以下、把持とする）、運搬、リリースの4つの状況に分割した。それぞれの状況において必要な映像を分析した結果、以下のことが分かった。車体移動時には、進行方向の路面状況や作業現場における自己位置や障害物情報が必要になる。リーチング時には、マニピュレータと周辺的环境情報が有用になる。把持時には、手先が対象物に近くなることから、対象物と手先間の詳細な位置関係が必要になる。この情報は、リリース時にも同様に有用になると考えられる。運搬時には、慎重かつ安全な操作が求められるため、移動方向の詳細な情報を事前に知ることが重要になる。

(2) カメラロールの定義

自動制御の基本モジュールとなるカメラロールを任意に定義できるように、構成要素である撮像対象 O と撮像モード M に分割する。2. (1) 節の状況分析に基づき、最も基本的と考えられる撮像対象および撮像モードを定義した上で、これらに基づき、カメラロール R を定義する。

(a) 撮像対象

カメラの画角中心に捉える対象のことである。撮像対象の定義には、パラメータとなる撮像中心および撮像範囲の決定が必要となる。2.1 節の分析から、3つの撮像対象を定義した（図-1）。

- ・作業機 O_1 。撮像中心は、上部旋回軸中心、撮像範囲は、作業機全体とした。
- ・マニピュレータ O_2 。撮像中心は、マニピュレータの幾何中心、撮像範囲は、マニピュレータ全体とした。
- ・グラップル O_3 。撮像中心は、グラップルの形状中心、撮像範囲は、グラップル全体とした。

(b) 撮像モード

撮像対象に対する映像制御方法のことである。本研究では、基本的なカメラ制御パラメータであるピッチ・ヨー軸および画角を調整する（カメラ自身の位置調整に関しては考慮しないが、今後扱う予定である）。2. (1)

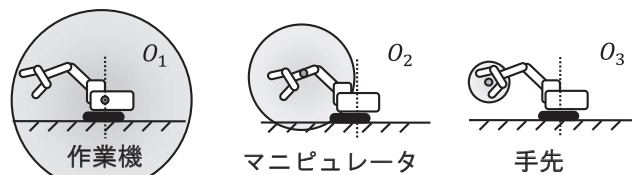
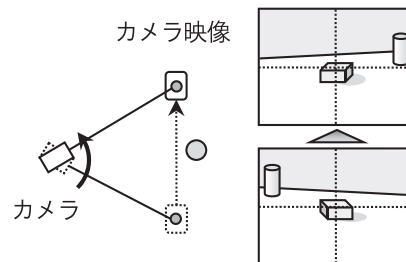


図-1 撮像対象

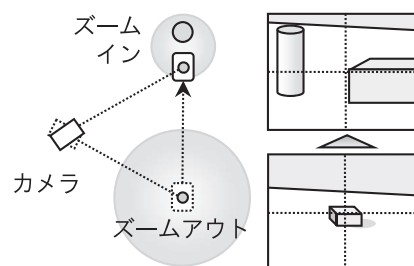
(a) 追従 M_1

撮像範囲が保持されるように撮像対象をトラッキングする



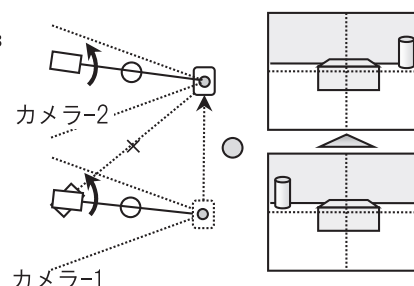
(b) 画角調整 M_2

作業状況に応じて適応的なズーム率の調整を行う



(c) 姿勢保持 M_3

撮像対象に対して垂直方向からの映像を提供する



(d) 軌道 M_4

撮像対象の動作方向に撮像中心をオフセットさせる

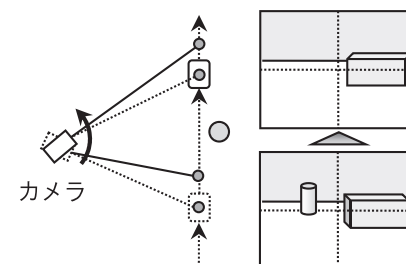


図-2 撮像モード

節の分析から、4つの撮像モードを定義した（図-2）。

- ・追従モード M_1 。撮像対象の状況を常にモニタリングできるように、カメラの向きを調整する。
- ・画角調整モード M_2 。俯瞰映像や詳細映像を状況に応じて提供するため、画角を調整する。
- ・姿勢保持モード M_3 。奥行き感の補助のため、撮像対象と直角になるようにカメラの向きを調整する。
- ・軌道モード M_4 。効果的な操作計画のため、撮像中

心を撮像対象の移動方向へオフセットさせる。

(c) カメラロール

前項で定義した撮像対象と撮像モードを組み合わせでカメラロールを定義する。本研究では、最も基本的

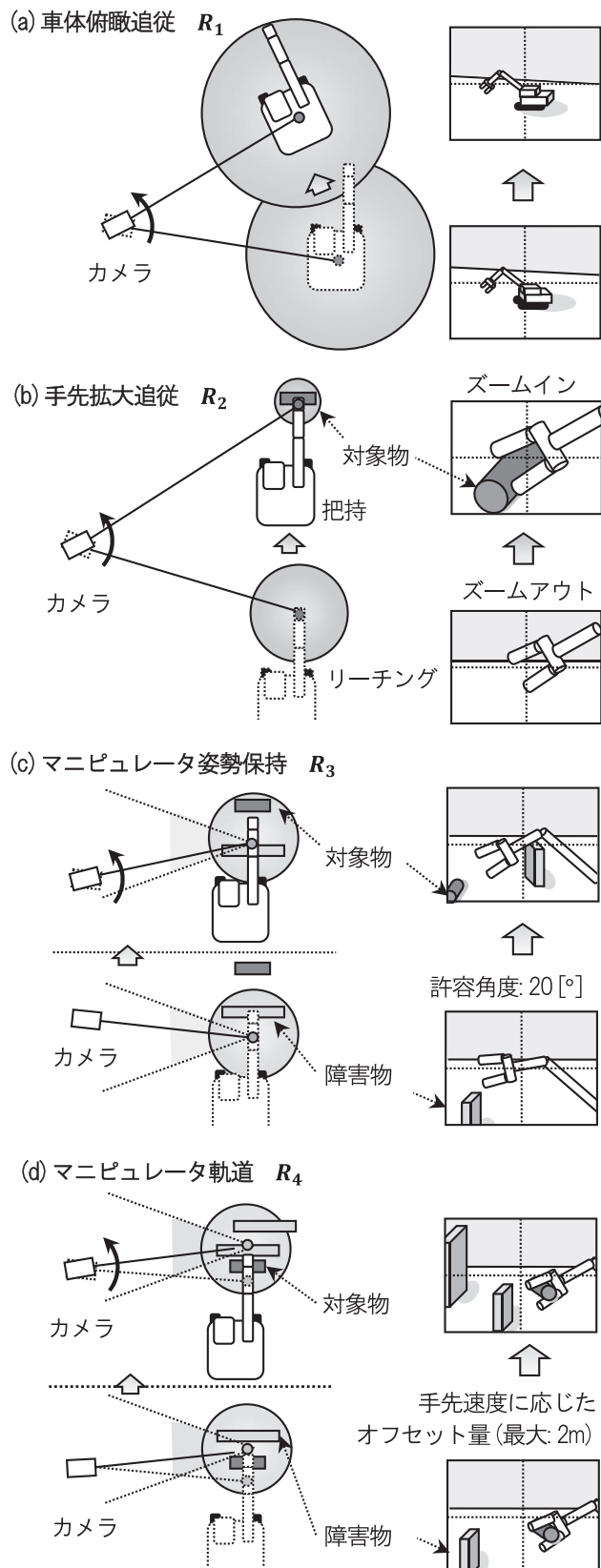


図-3 カメラロール

な構成と考えられる4つのカメラロールを定義した(図-3)。

- ・車体俯瞰追従 R_1 ($O_1/M_1, M_2$). 作業機全体を俯瞰映像で追跡する最も基本的な映像である。これにより、近くの物体や地面状況、他車体の接近を把握できるようになる。
- ・手先拡大追従 R_2 ($O_3/M_1, M_2$). 識別された作業状況に応じて画角を調整しながら手先を追従する。環境との接触時(把持など)における安全かつ効率的な作業が可能になる。作業状況と画角(撮像範囲)の関係性は、視認性を調査したプレ実験に基づき、図-4右側のように設定した。

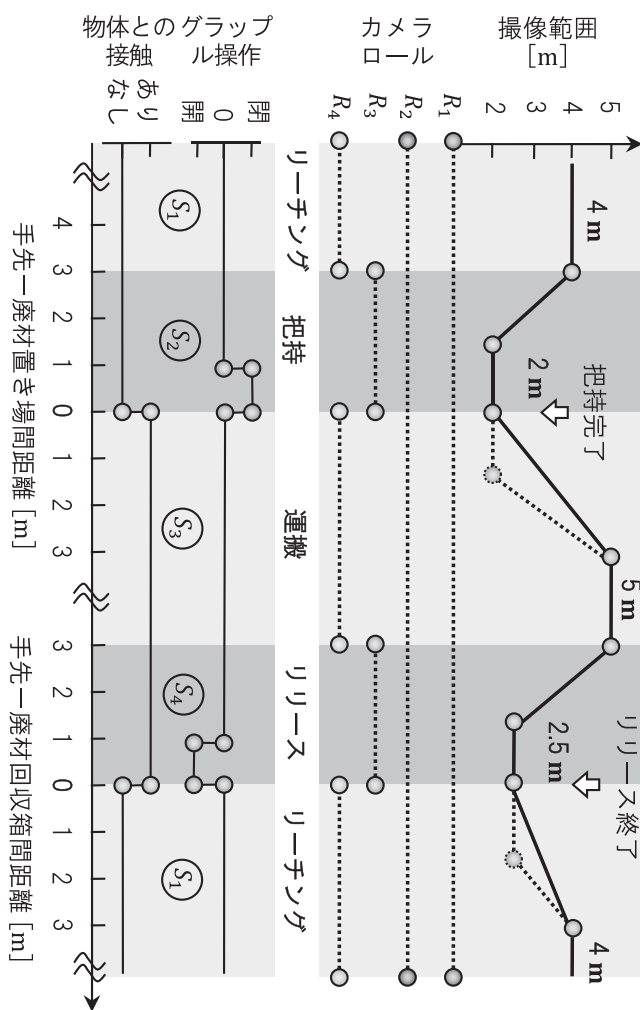


図-4 作業状況識別・カメラロール・撮像範囲

- ・マニピュレータ姿勢保持 R_3 ($O_2/M_1, M_3$). マニピュレータの長手方向と直角になるカメラを利用して、マニピュレータの奥行き情報を提供する。環境との予期せぬ接触を低減できる。直角という条件は、現実的に厳しいため、本実験では、 $\pm 20^\circ$ の許容角度を設けた。
- ・マニピュレータ軌道 R_4 ($O_2/M_1, M_3, M_4$). マニピュ

レータ姿勢保持 R_3 を行いつつ、手先の移動方向に画角中心をオフセットさせる。進入する環境の映像情報を事前に視認できるため、安全かつ効率的な操作ができる。オフセット量は、最大速度にて 2 [m] とし、手先速度に比例して線形補間させる。

以上に定義した撮像範囲と撮像モード、カメラロールは、共通的かつ基本的なものであるが、用途に応じて任意に追加することが可能である。

(3) 作業状況識別と利用されるカメラロール

上記のカメラロール群は、作業状況に応じて利用される。筆者らは、これまでに建設機械に特化した作業状態識別手法を開発している¹²⁾。これをベースに作業状況識別手法を開発した。建機作業の性質上、対象物が置かれている場所と対象物を回収する場所は、必ず定義できることから、廃材置き場・廃材回収箱の位置を特徴量として利用する。本研究では、2. (1) 節の分析を踏まえ、5つの作業状況に分類した(図—4 左側)。

- ・車体移動 S_0 . リーチング状態において、クローラ操作のみがある状態。
- ・リーチング S_1 . 手先と廃材置き場間の距離が 3 [m] より大きく、対象物との接触がない状態。
- ・把持 S_2 . 手先と廃材置き場間の距離が 3 [m] より小さく、対象物との接触がない状態。グラップルの閉操作により把持が完了すると S_3 に遷移する。
- ・運搬 S_3 . 手先と廃材回収箱間の距離が 3 [m] より大きく、対象物との接触がある状態。
- ・リリース S_4 . 手先と廃材回収箱間の距離が 3 [m] より小さく、対象物との接触がある状態。グラップルの開操作により解放が完了すると S_1 に遷移する。

状況分類のための近接条件 (3 [m]) は、本実験環境における探索的実験により決定した。利用するカメラロール、撮像範囲、および作業状況の関係性を図—4 右側に示す。危険状況を確認できる俯瞰映像は常に監視が必要なため、 R_1 は作業状況によらず提供し続ける。さらに、環境と物理的に接触する手先の情報は、安全性と効率を大きく左右すると考え、 R_2 も常に提供する。 R_3 は主に障害物回避に利用するため、把持とリリース時、 R_4 は主に空間認知に利用するために、リーチングと運搬時に利用する。 R_2 における撮像範囲は、 $S_0 \cdot S_1$ では 4 [m]、 S_2 では 2 [m]、 S_3 では 5 [m]、 S_4 では 2.5 [m] とし、各状況間で線形補間を行った(図—4 右側)。これらのパラメータも同様に探索的実験から十分な視認性が得られるように設定した。作業状況識別やカメラロールの定義に利用するパラメータの効果は、実験の章にて考察する。

(4) 実環境への実装に必要な技術

本節では、カメラロールと作業状況識別を実環境に実装するにあたり必要となる技術について触れておく。まず、環境における対象物、障害物、回収箱などの位置を取得する技術が重要になる。そのためには、取得された映像から、地面、対象物、障害物などの意味に応じた領域にカテゴリ化する技術が必要となる。現在、このようなシステムは実装されていないが、GPS データや 3 次元マッピング技術、物体認識や画像のセグメント化技術を利用することで取得できると考えている。また、カメラをより安定的かつ効率的に制御し、振動やオプティカルフローなどを補償する技術が必要である。現存の映像安定化技術や画像処理技術を利用する予定である。関節の可動角やズーム限界などを考慮した制御手法も必要となる。本実験環境では、VR シミュレータを用いるため、以上に示す情報は取得できるものとして扱っている。

3. ロールアサインメントシステムの開発

カメラロール R を環境カメラ C に実時間で割り当てていくロールアサインメントシステムを開発する。

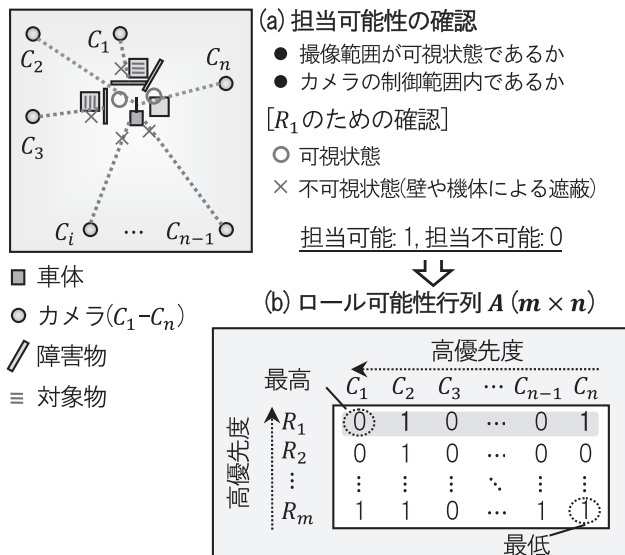
(1) カメラロールの担当可能性チェック

はじめに、当該カメラにおけるカメラロールの担当可能性をチェックする。図—5 (a) に環境カメラの配置図例を示す。カメラと撮像対象の間に障害物がなく、当該カメラロール特有の動作がカメラパラメータの制御限界下で実現できれば、担当可能となる。前者では、撮像中心とカメラのレンズ中心とを結ぶ線分上における障害物の有無を確認する。後者では、既知のカメラ制御限界値を用いた数値シミュレーションにより確認する。カメラロールが m 個、環境カメラ数が n 個の場合 ($0 < m \leq n$)、 $m \times n$ のロール可能性行列 A が式 (1) で与えられる。

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix}, \quad A_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (1)$$

担当が可能であれば 1、不可能であれば 0 となる。例えば、 $A_{11} = 0$ では、 C_1 は R_1 を担当できない、 $A_{23} = 1$ では、 C_3 は R_2 を担当できる、という意味になる。

割り当てを適切に行うには、優先度の設定が必要となる。カメラロールの優先度を考えると、高いズーム率を有する詳細映像は、作業を効率的かつ効果的に進める上で重要になる一方、ズーム率の低い俯瞰映像は、



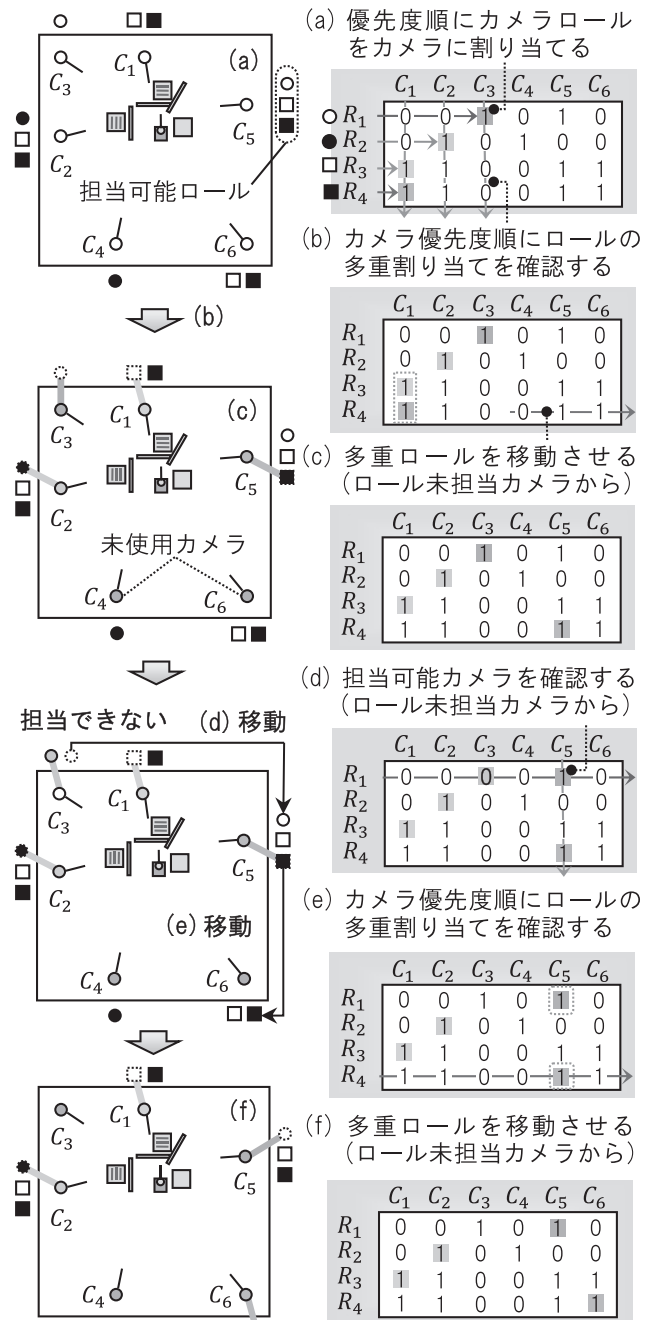
情報の緊急性が低いことから、ズーム率は、優先度の設定に効果的と考えられる。しかしながら、優先度は、用途や環境に応じて適応的に設定すべきである(4. (1) 節にて設定する)。ここでは、割り当ての簡易化のために、行および列を優先度順に配置する(図一 5 (b))。最上行ロールと最左列カメラは最も高い優先度をもつこととなる。

(2) ロールアサインメントルール

アサインメントシステムは 3. (1) 節で作成したロール可能性行列を基に、カメラロール R をカメラ C に割り当てる。割り当てルールを図一 6 に例示しながら説明する。

(a) 基本ルール

優先度の高いカメラロールから順に、担当可能なカメラの確認を行う。カメラロールは、その中で最も優先度の高いカメラに仮割り当てされる(図一 6 (a))。同様にして残りのカメラロールも優先度順にカメラに仮割り当てしていく。次に、多重割り当て(1つのカメラに複数のロールが割り当てられている状態)をカメラの優先度順に確認していく。多重割り当てがない場合、当該時刻のロールアサインメントは完了となる。多重割り当てがある場合は、以下の手順で他のカメラに再割り当てする(図一 6 (b))。重複したロールのうち優先度の低いロールについて、ロール未担当カメラへの移行可能性を確認する。候補カメラがない場合、当該ロールより優先度の低いロールを担当しているカメラへの移行可能性を確認する。この手順により、映像の切り替え頻度を低減させることができる。同様にして、他の多重割り当てを優先度順に確認し、必要に



応じて移行させる。このプロセスを通じて、 m 個すべてのカメラロール(R_1-R_m)が、 n 個の環境カメラ(C_1-C_n)のうち m 個に割り当てられる(図一 6 (c))。カメラロールを担当できるカメラが見つからない場合は、現担当カメラを継続して利用する。

(b) リアサインメントルール

作業が進むにつれて、カメラ・作業機・障害物の位置関係は変化していく。当該カメラが、割り当てられたロールを担当できなくなった場合、そのロールは、全体のバランスを考慮しながら他のカメラに移行させる必要がある。この場合、まず、ロール未担当カメラ

の中から、担当可能なカメラを探索する。候補カメラがない場合、ロール担当済カメラの中から候補を探す。割り当てようとしているカメラロールの優先度が、候補カメラが担当しているカメラロールより高い場合、ロールの移行が成立する。これによって移動を余儀なくされた旧カメラロールは、上記と同じプロセスで別のカメラに移行される（図—6 (d) (e)）。移行不可能な候補カメラが見つからない場合、割り当てようとしているカメラロールより優先度の高いロールを有するカメラが探索されることになる。以上のロール移行を反復的に行うことで、図—6 (f) のようなリアサインメントが可能となる。

(c) 線型計画法を用いた実装

上記のアルゴリズムの実装には、実用性の高い線型計画法¹³⁾を利用した。目的関数は式 (2) で得られる。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} \cdot X_{ij} = m. \quad (2)$$

ここで、 m はロールの個数、 A は、ロール可能性行列である。 X はロール割り当て行列（0：割り当てなし、1：割り当てあり）であり、式 (3) で得られる。

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}, X_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (3)$$

各ロールは1つのカメラに割り当てられること、各カメラには、2つ以上のカメラロールが割り当てることがないことから、式 (4) に示す拘束条件を設ける。

$$\begin{cases} A_{11}X_{11} + A_{12}X_{12} + \cdots + A_{1n}X_{1n} = 1 \\ A_{21}X_{21} + A_{22}X_{22} + \cdots + A_{2n}X_{2n} = 1 \\ \vdots \\ A_{m1}X_{m1} + A_{m2}X_{m2} + \cdots + A_{mn}X_{mn} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

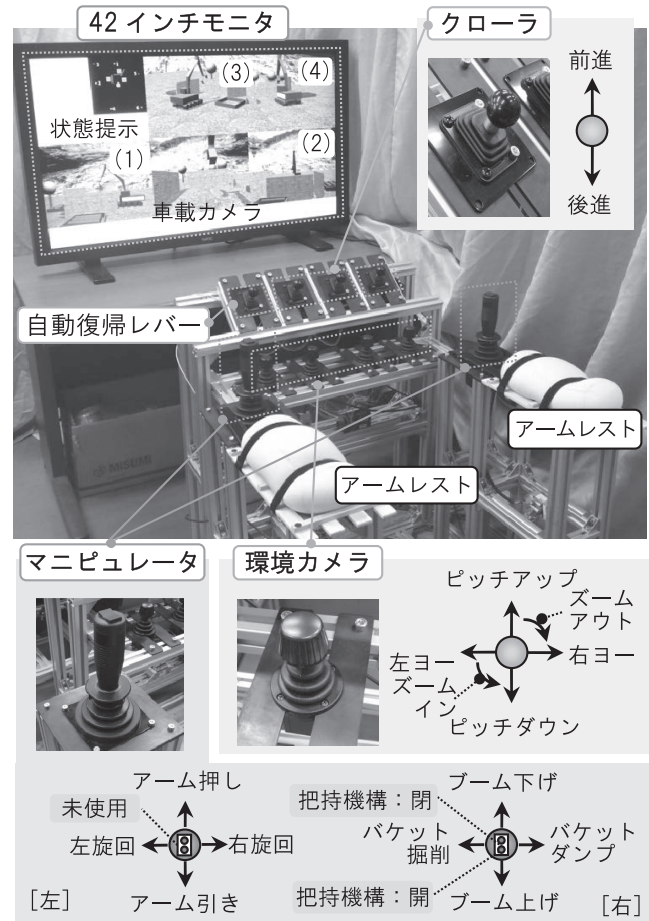
$$\begin{cases} A_{11}X_{11} + A_{21}X_{21} + \cdots + A_{m1}X_{m1} \leq 1 \\ A_{12}X_{12} + A_{22}X_{22} + \cdots + A_{m2}X_{m2} \leq 1 \\ \vdots \\ A_{1n}X_{1n} + A_{2n}X_{2n} + \cdots + A_{mn}X_{mn} \leq 1 \end{cases}$$

提案するアサインメントシステムは極めて簡易的なルールに基づいているが、全体的なバランスを考慮したロバストなアサインメントが実時間で可能になる。

4. 評価実験

瓦礫の運搬作業を実験タスクとして、環境カメラの半自動制御システムの評価を行った。実験は、筆者らが開発したVRシミュレータ¹⁴⁾を用いて行った（図—7）。

(1) ロールアサインメントのためのパラメータ設定
マニピュレータ姿勢保持 R_3 および軌道 R_4 は、作



図—7 VRシミュレータ

業状況の変化に伴い順次利用されることから、割り当ての簡易化のため、 R_{3-4} という1つのロールとして再定義する。また、死角を効果的に削減するため、車体俯瞰追従 R_1 をカメラの向きが直角になるような2つのカメラに割り当てる。そこで、 R_{1A} および R_{1B} という2つのロールに分割する。カメラロールの優先度を考えると、 R_2 および R_{3-4} は、 R_1 と比べて条件が厳しいこと、物体把持は環境接触を伴う高難易度の操作であることから、 R_2 の優先度は最高に、 R_1 は最低とした。以上より、優先度の高さを R_2 、 R_{3-4} 、 R_{1A} 、 R_{1B} の順に設定した。

環境カメラ用のモニタ数は、カメラ／モニタシステムの複雑性とオペレータの認知限界の双方を考慮して決定する必要がある。本研究では、カメラロールと同数のモニタを設置した。また、より適切な映像選択の可能性をもたせるために、環境カメラ数をモニタ数よりも多い6個 (C_1-C_6) とした。カメラの優先順位は、簡単のためカメラの番号順 (1→6) とした。

(2) 実験環境および実験条件

(a) VRシミュレータ

図—7に実験に利用するVRシミュレータを示す。

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。また、自動制御時にカメラを手動操作した場合、自動制御に戻すための自動制御復帰レバーを2本用意した。2本の上下方向が、4つの環境カメラ映像にそれぞれ対応している。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。VR環境は、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。

(b) 実験条件

作業環境、作業機、対象物、環境カメラは、図-8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、把持時の掴みミスをせず、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。

半自動制御システム（オペレータの手動操作介入を受容した自動制御システム）の有用性を評価するために、固定カメラ（制御なし）、オペレータによる手動制御を含めた3システムにおいて、作業効率（遂行時間）、安全性（過負荷回数、把持失敗回数、物体落下回数）、作業品質（把持位置）を評価項目として計測した。さらに、主観的な使いやすさを計測するために、タスクの難易度、死角の出現頻度、奥行き感の認識容易性を項目として4段階評価を行うアンケートを実験後に実施した。6つの廃材棒運搬を1セットとし、3システムで4セットずつ行った。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は十分に慣れた成人男性4名とした。

(c) システムの詳細設定

固定と手動制御（初期位置）における環境カメラは、図-7左上部に示すモニタ番号1から4において、 C_3 、 C_2 、 C_5 、 C_4 の映像をそれぞれ提示した。そのときのピッチ角度は、 -4 、 -3 、 -16 、 -0.8 [°]、画角は、 40 、 30 、 38 、 31 [°]、ヨー角度は、図-8右側中央に示す線分の角度にそれぞれ設定した。これらのパラメータは、車載カメラの映像を強化するためのプレ実験から探索的に設定した。自動制御では、モニタ1から4の順に R_2 、 R_{3-4} 、 R_{1A} 、 R_{1B} の映像をそれぞれ提示した。

(3) 実験結果

3つのシステムにおける時間効率、安全性、作業品質、主観的な使いやすさの評価結果を表-1に示す。半自動制御システムにおけるタスクイメージを図-9に示す。

表-1 実験結果

平均（全操作者）	半自動	手動	固定
(a) 作業効率			
● 作業時間 [s]	395.1	427.7	414.3
(b) 安全性（セットあたりの回数）			
● 把持の失敗	0.5	0.94	1.17
● 物体の落下	0.06	0.25	0.19
● 物体への過負荷	0	0.06	1.19
(c) 質（良い: 0↔悪い: 2）			
● 把持位置のスコア	0.55	0.54	0.95
(d) 主観的な使いやすさ（良い: 1↔悪い: 4）			
● タスクの難しさ	1.25	1.75	2.75
● 死角の発生頻度	1.75	2.25	2.5
● 奥行き間認知の難しさ	2	2	2.75

■: ベスト ■: ワースト

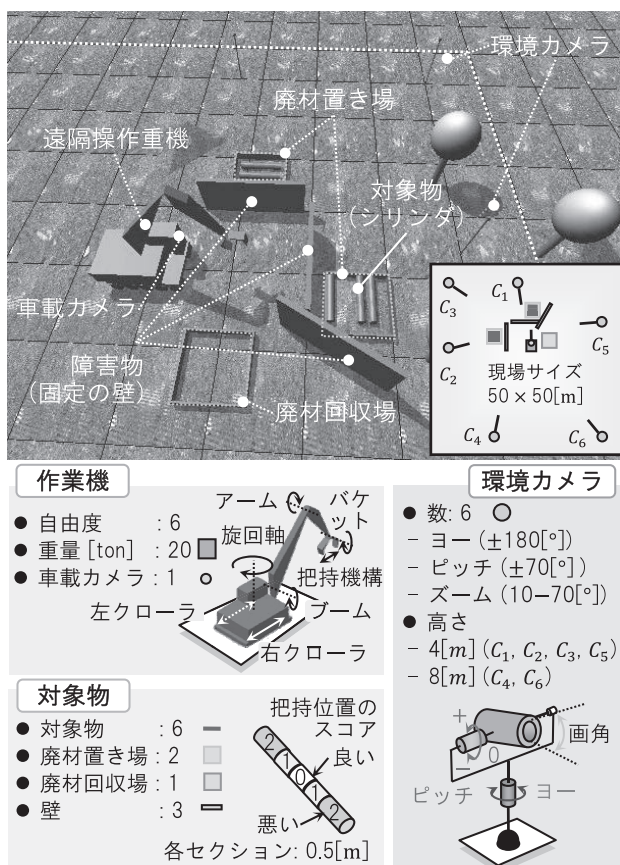
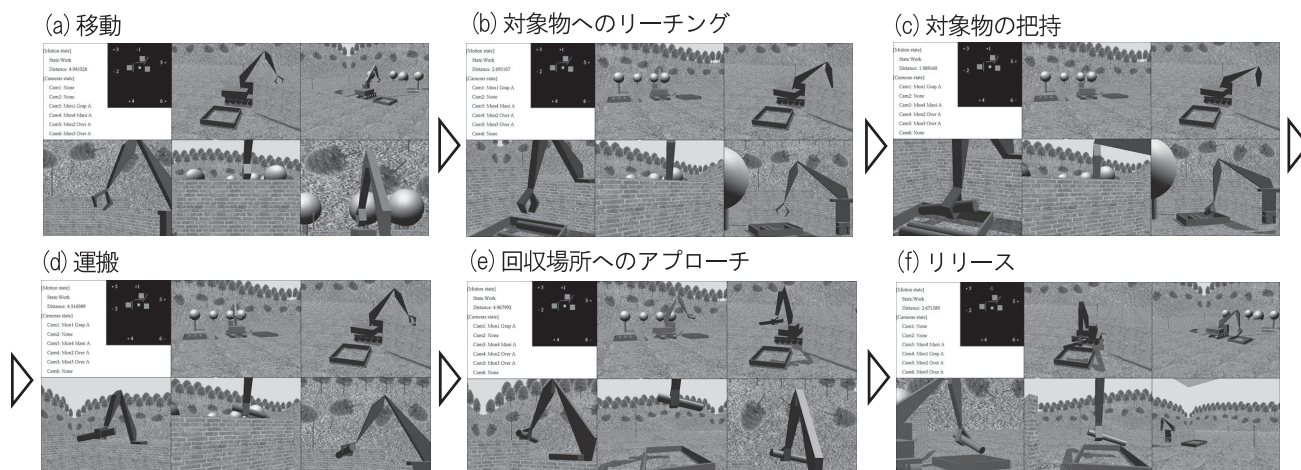


図-8 実験環境



図—9 半自動制御システムにおける作業シーケンス

(a) 時間効率

各セットの平均タスク時間を表—1 (a) に示す。半自動制御では作業時間が減少している一方、手動制御では固定と比べて作業時間が増加していることが分かる。これは、手動によるカメラ制御では、カメラを操縦する時間が必要となることに起因すると考えられる。半自動制御では、カメラ操縦に費やす時間分を削減するだけでなく、固定カメラに比べより効率的な作業が可能となった。

(b) 安全性

1セットあたりの把持失敗回数、運搬時の把持物体の落下回数、誤接触時の過負荷回数を表—1 (b) に示す。自動制御では、3指標それぞれが、他の2システムより少なくなっていることがわかる。物体落下の原因について観察した結果、固定では、物体の端を掴んでしまったこと、手動制御では、適切に物体中心を掴んでいるものの、運搬時に上部旋回体を過剰な速度で回転させてしまったことに起因していることが分かった。これは、運搬に伴って変えるべき映像の視点が固定になってしまっていた（機械操作中には同時にカメラ操作ができない）ために、物体の把持状態やその安定性を十分に確認できなかったと予想される。半自動制御での視点は、機体の移動に伴い自動的に追従することから、固定や手動制御に比べて、誤操作を大幅に低下させることができたと考えられる。

(c) 作業品質

対象物の把持位置を評価するためのスコアを設定した（図—8 下部中央）。中心から両側に0.25 [m] の範囲をスコア0、その両端から0.5 [m] の範囲をスコア1、残りの0.75 [m] をスコア2とした。表—1 (c) に把持位置評価スコアの結果を示す。物体の中心部を掴むとき、スコアは0、棒の端を掴むと2となる。可

動カメラ（手動制御および半自動制御）を使った方法では、同じ程度の低いスコアが得られた。一方、固定の場合では、可動カメラの場合と比べ約2倍のスコアとなっている。オペレータが望む映像を提供することで、廃材棒の中心を把持できたことから、作業品質向上への寄与が示唆された。

(d) 主観的使いやすさ

表—1 (d) にスコアリングの結果を示す。数値が小さいほど使いやすいことを示している。すべての指標において、固定よりも手動制御のほうが良いスコアとなったことから、カメラを可動化するだけでも使いやすさが向上することが確認された。さらに、可動化カメラを半自動的に制御することで、死角の発生を効果的に抑え、タスクの主観的難易度が低下することが分かった。これらの結果は、3つの指標の平均値（3.58（半自動）、3.25（手動）、2.33（固定））からも分かる。以上より、半自動制御を行うことで、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。

5. おわりに

現場環境や作業内容、オペレータの技能によって映像情報の性質が変わってくることを考慮し、適応的な映像を提供するために環境カメラの半自動制御手法を開発した。共通的な作業シーケンスにおいて、オペレータに提供すべき映像を分析した結果、3つの撮像対象（作業機、マニピュレータ、手先）4つの撮像モード（追従、ズーム、姿勢、軌道）を案出した。撮像対象と撮像モードの組み合わせにより定義される自動制御の基本モジュールとして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。次に、これらのカメラロー

ルを適切にカメラに割り当てるため、ロールアサインメントシステムを開発した。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い場合にも、線型計画法を用いたカメラロールの再割り当てを行うことで、さまざまな状況に対してロバストな映像提供を行うことができる。制御対象のカメラは車載カメラ1台と環境カメラ6台とし、VRシミュレータを用いた瓦礫撤去作業を模した評価実験を行った。固定(制御なし)、手動制御、半自動制御、の3システムにおける作業効率、作業品質、および主観的な使いやすさを評価した結果、半自動制御では、固定や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となること、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。以上の実験結果から、提案した半自動制御システムは、見えないがゆえの無駄な動き直しや過度に慎重な動き、疲労などの低減に寄与し、遠隔重機作業におけるオペレータの視覚情報の強化を担う有力なツールの1つになることが期待される。

今後は、実環境での実証実験を行うとともに、実験的に定義した各種パラメータの調整方法の検討を行う予定である。また、手動操作を受容する半自動制御としたにも関わらず、手動操作回数が少なかったことから、半自動制御の有用性について再検討を行う。

謝 辞

本研究の一部は、(社)日本建設機械化協会「平成23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。

JCM A

《参考文献》

- 1) 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.
- 2) 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.

- 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) T. Xinxiang, Z. Dingxuan, H. Yamada, and N. Tao, "Haptic interaction in tele-operation control system of construction robot based on virtual reality," in *Proc. Int. Conf. Mechatronics and Automation*, pp. 78-83, 2009.
- 5) 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.
- 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) 古屋弘, 栗生暢雄, 清水千春, "次世代無人化施工技術の開発-3D映像及び体感装置を用いた遠隔操作-", 第13回建設ロボットシンポジウム論文集, pp. 109-116, 2012.
- 8) D.B. Kaber, Y. Lee, M. Clamann, and Y.S. Lee, "Investigating human performance in a virtual reality haptic simulator as influenced by fidelity and system latency," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, vol. 42, no. 6, pp. 1562-1566, 2012.
- 9) T. Fukuda, S. Yamamoto, T. Kaga, and F. Arai, "A preliminary study on cooperative visual support by mobile camera for mobile robot teleoperation," in *Proc. 26th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 46-51, 2000.
- 10) S.P. Lajoie, "Individual differences in spatial ability: developing technologies to increase strategy awareness and skills," *Educational Psychologist*, vol. 38, no. 2, pp. 115-125, 2003.
- 11) A.M. Liu, C.M. Oman, R. Galvan, and A. Natapoff, "Predicting space telerobotic operator training performance from human spatial ability assessment," *Acta Astronautica*, vol. 92, no. 1, pp. 38-47, 2012.
- 12) 岩田浩康, 亀崎允啓, 菅野重樹, "双腕建機のための操作者支援システムの開発設計", 建設の施工企画, 12月号 (Vol. 706), pp. 60-66, 2008.
- 13) T. Ibaraki and S. Muroga, "Adaptive linear classifier by linear programming," *IEEE Trans. Syst. Sci. and Cybernetics*, vol. 6, no. 1, pp. 53-62, 1970.
- 14) M. Kamezaki, J. Yang, H. Iwata, and S. Sugano, "A basic framework of virtual reality simulator for advancing disaster response work using tele-operated work machines," *J. Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 4, pp. 486-495, 2014.

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