

特別報文

双腕建機のための操作者支援システムの開発設計

岩田 浩康・亀崎 允啓・菅野 重樹

分別解体など高度で複雑な作業への適応を目的とする双腕建機では、2つのマニピュレータを一人で同時に操作する必要があることから、操作者に極めて高度な操作スキルが要求されるようになる。そのため、今後、時代のニーズに呼応すべく登場してくる新たな作業機械では、機械側が自律的に状態（作業状態、危険状態）を識別した上で、必要に応じて情動的・物理的な支援を提供するといった、建設機械の知能化が有効になると考えられる。こうした知能化におけるシステムデザインでは、建機による様々な作業の状態をロバストに同定可能な状態識別の設計がキーとなることから、本研究では、建機作業における環境や操作者の多様性に非依存な情報を用いた確定的な状態識別の単位を案出すると共に、これらを実装した操作者支援システムおよび双腕建機シミュレータの開発設計を行った。評価のため、精密作業や双腕協調運搬作業に着目し、双腕建機シミュレータを用いた検証実験を行った。その結果、手先作業部の拡大映像を提供する情動的支援により、タスク遂行時間および物体との誤接触回数が減少すること、ならびに精密操作中に操作ゲインを自動的に切り替える物理的支援により、操作性の向上を図れることが示されたので報告する。

キーワード：準自律支援，基底作業状態，自律識別，操作支援

1. 緒言

近年、建設機械には、資源再利用のための分別解体や災害現場における救助・復旧作業、さらには建築作業など、より高度で複雑な作業への適応が望まれるようになってきている。こうした社会的ニーズの変化に呼応すべく、2つのマニピュレータを有する双腕建機が開発された^{1),2)} (図-1右)。この新たな建設機械では、2本のレバーで2つのマニピュレータを操作することになるため、操作者に極めて高度な操作スキルを要求することとなる。そのデメリットとして、機械操作に手間取ることによる作業の効率や品質の低下を生み出すことに加え、困難な機械操作への傾注によって、危険状態（外部の現場作業員の存在や呼びかけ等）を看過してしまうといった可能性も引き起こす。

これらの問題を解決する一つの手段として、操作者に精神的負荷がかかる緻密な作業における動作パラメータの自動切り替え支援や、機械操作への傾注により看過された危険状態の提示など、機械側が自律的に状態（作業状態、危険状態など）を識別し、情動的・物理的な支援を提供するといった建設機械の知能化が必要になると考えられる。ところが、現存する建設機械の多くは、操作者の操作量に応じた動作を出力する

ことに特化しており、フロントの体勢を検出する角度センサすらほとんど搭載されておらず、自動車や医療器械の分野と比較して知能化への取り組みが遅れているのが現状である。これまでに、クレーンの振れ止め制御^{3)~5)}や掘削機における操作者のスキル解析^{6),7)}など個々の建設機械に対する技術開発は進められているものの、システムの知能化に関する包括的な議論は十分に行われていない。

そこで本研究では、環境・作業情報、レバー操作情報等に基づき、建設機械の作業状態や異常状態を自律的に識別した上で、操作者が望む支援を適切に提供可

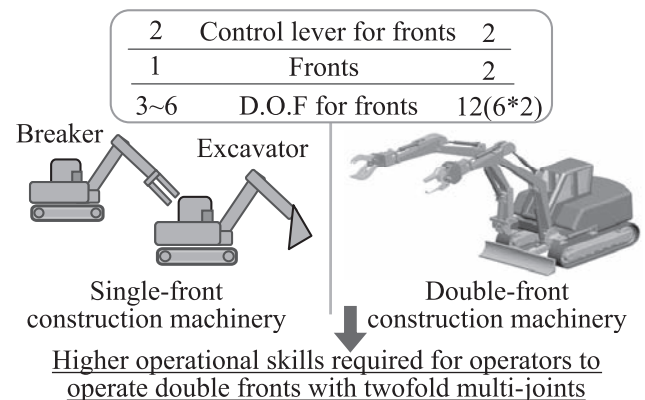


図-1 Greater difficulty in controlling advanced construction machinery.

能な知能化技術を構築することを目的とする。応用として、作業状態が識別されるだけでも、作業効率の低下の原因となる特定の作業状態の抽出や建機作業姿勢の同定等が行えるため、建設機械のリンク長や自由度配置の設計を見直す上でも有用なフィードバック情報が得られると考えられる。

以上を踏まえ、本稿では、現行の建設機械で最も複雑なハードウェア構成を有している双腕建機を対象とし、操作者支援システム設計手法について述べる。なお、本手法は単腕（掘削機、クレーンなど）を含めた建設機械全般への適応も可能である。

2. 建設機械・建設作業現場の分析

本章では、顕在化されている問題点およびニーズについて分析した上で、知能化に向けた問題点および今後想定されるニーズを抽出する。これらの分析結果を踏まえ、有用性の高い支援シーンの具体化を行う。

(1) 根源的な問題点

文献や関係者へのヒアリング等をもとに、現状の建設機械や建設作業現場が抱えている根源的な問題点について分析した。

(a) 建設機械

i) 体格・重量が大きいため、衝突時のリスクが大きい、ii) 油圧系の遅れや慣性力が大きいため、瞬発的な動きが不得手、iii) 死角が多いため、危険領域の視認が難しい、iv) 振動や騒音などが操作者の認知能力を低下させる。

(b) 建設現場

v) 現場作業員との協同作業を行うため、接触の危険が常に存在する（双腕建機の導入が想定される解体作業等ではこの傾向が顕著）、vi) 複雑化する現場において他の建機や作業員に対する安全意識が高まる反面、実作業の効率が低下してしまう。

これらの分析から、操作者には建設機械が持つ特徴的な機械特性に留意しつつ、常に外部の状況を把握して安全作業を行える操作技能や認知能力が求められることが分かる。

(2) 知能化におけるポイント

一般的な知能化システムは、内界・外界状態をセンシングするための情報検出モジュール、取得したデータに基づき作業状態や危険状態を識別する状態識別モジュール、識別した状態をもとに適切な支援を提供する支援モジュールの3つで構成されている。前節の議

論を踏まえ、建機の知能化システムを設計する際のポイントを以下に示す。

(a) 情報検出モジュール

i) 使用環境が劣悪であるため、センサの耐久性やノイズなどが問題となる、ii) 現行の建設機械はセンサ装着が可能な構造を有していないため、取付け方法などに工夫が必要となる。

(b) 状態識別モジュール

i) 作業環境が複雑である（解体作業等ではこの傾向が顕著）、ii) 作業対象や同一対象物の形状・位置などが絶えず変化する、iii) 操作者に応じてスキルレベルや操作方法が異なる。これらの3つの特徴により状態の識別が困難となりやすい。

(c) 支援モジュール

i) 状況や操作者に応じて求められる支援が異なる、ii) 当該機械の機械特性（マニピュレータの慣性、油圧特性など）を考慮した支援が必要である。

このように、建設機械では様々な要因により、状態識別の精度が低下したり、不適切な支援の提供といった問題に直面し得る。特に、誤認識による誤った支援は、極めて危険な状況を生み出し得るため避けなければならない。このことから、建設機械の知能化では、建機特有のロバストな状態識別技術を構築することが不可欠になると考えられる。

(3) 知的支援シーンの具体化

2章(1)および2章(2)の分析結果に基づき、想定ニーズの抽出および要求技術水準に関する検討を行った。ここでは、操作者をはじめ現場作業員や建機自体において支援が有用となり得る具体的な状況を案出した。システム設計に活かすために、総計60を超えるシーンに関して、支援方法をはじめ、認識すべき作業状態、当該状態の識別に要する情報群の具体化を試みた。そ

表-1 Sences where intelligent supports provided (extracted)

シーン	入力データ	状態	支援
分別解体作業	操作レバー角度	精密作業	レバー操作に応じて操作ゲインを調節（減少）し、微操作を簡易化する -パラメータ調節支援
双腕協調運搬作業	手先位置 / 手先負荷	双腕協調運搬作業	把持物体への内力発生を回避するように双手先の位置・姿勢の自動調整を行う -物理的支援
解体作業 / 災害救助	手先位置 / 対象物位置	高遠所作業 / 死角作業	手先を視点とした仮想カメラ映像の提示（近接画像による奥行き感覚の補助） -情報の支援

の一部を表—1に例示する。

3. システムデザイン

前章で述べた点のうち、特に2章(2)の問題点を踏まえ、建機における操作者支援システムの設計を行う。

(1) 支援方式

建機のような操作型作業機における究極の支援形態のあり方に目を向けると、危険作業からの解放や人件費の削減などのメリットを提供し得る完全自律が有効と考えられる。しかし、その適用対象は人間が存在しない広大な田畑の一面の掘削や田植え等のように、諸条件がほぼ既知の単純作業に限られているのが現状である。自動車の運転支援や外科手術支援などの知能化技術が実用化された例を鑑みると、最終判断を人間に委ねることが当面重要であることが分かる。そこで、操作型建機の知能化設計には、機械が自律的に人間の認知や操作に直接的支援の余地を見出した場合でも、視覚・聴覚効果などによる情報の支援や人間の操作補助に留める準自律支援方式を採用することとした。

(2) 状態識別

一般的によく利用される状態認識手法として、リカレントニューラルネットワークや隠れマルコフモデルなどが挙げられる。こうしたツールには、汎用的であり最適化を試みやすいという利点がある一方、所望の出力結果を得るための入力情報の取捨選択、適当な前処理、学習のための膨大なデータ、パラメータ調整などを必要とする。これらの調整を行う理論は未だ体系化されておらず、試行錯誤的な部分が多いのが現状である。全ての作業シーンへの適合を図るにはこれらのツールはある程度有効となるものの、2章(2)で述べたように、建機作業には未知のパラメータが多く、上記の手法をそのまま適用してもロバストな作業識別

を行うことは困難である。

そこで、まず、“操作者のスキルレベルや作業対象・環境に依存しない情報を用いた極めて確定的な状態の基本単位”（基底作業状態）を設定することとした。この基底作業状態を適用することで、前述した建機作業特有のパラメータに非依存となる基礎的・標準的な状態識別が可能になると考えられる。以下では、双腕建機をはじめ全ての建機に汎用的に利用可能な“基底作業状態”に係る設計指針について述べる。

(a) 特徴量

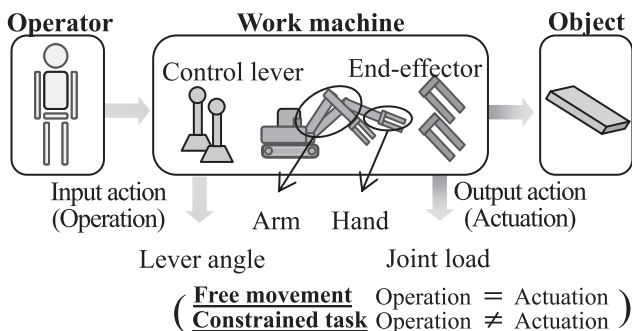
操作型建機による作業をモデリングすると、入力には操作者によるレバーの傾斜操作、出力は機体作業部の動作や環境との相互作用となる(図—2)。これらのデータを用いることで建機の基本的な作業状態は推定できると考えられることから、状態識別のための特徴量として、各操作レバーの傾斜角とフロント各関節に生じる負荷を設定することとした。また、アタッチメント部は環境と接触し物理的作用を与えるのに対し、フロント部は環境と接触せずにアタッチメントの位置決め利用されるという用途の違いから、アタッチメント（以下、ハンド）とフロント（以下、アーム）の2部位から上述の特徴量を抽出することとする。

(b) 量の扱い

作業状態をより詳細に記述するには、センサデータを連続量のまま分析に用いた方がよいと考えられる。しかしながら、作業機の諸元や対象物の大きさ・重さなどに応じて、センサデータに設定する閾値を調整する必要がある、この調整の如何で、識別精度は左右さ

表—2 Primitive Static Status (PSS).

No.	PSS				作業状態 (解体機)
	ハンド 負荷	ハンド 操作	アーム 負荷	アーム 操作	
A	0	0	0	0	無操作無負荷
B	0	0	0	1	リーチング
C	0	0	1	0	支持・保持
D	0	0	1	1	押し付け
E	0	1	0	0	ハンド開閉
F	0	1	0	1	リーチング中ハンド開閉
G	0	1	1	0	ハンドリング中危険外力
H	0	1	1	1	ハンドの外側で物体操作
I	1	0	0	0	地面固定物体の支持・把持
J	1	0	0	1	なし(異常状態)
K	1	0	1	0	空中物体の支持・把持
L	1	0	1	1	運搬・折曲げ・引き剥がし
M	1	1	0	0	地面固定物体の握り・放出
N	1	1	0	1	なし(異常状態)
O	1	1	1	0	空中物体の握り・放出
P	1	1	1	1	空中把持物体の放り投げ



図—2 Relationship among Operator, Work machine and Object.

れてしまう。そこで、上記 (a) で述べた物理量の2値情報の組み合わせに着目することとする。極めて単純な情報を用いることにより、状態の識別結果の写実性は減少するものの、最も根本的な特徴を捉えた単位に構成できると考えられる。

以上をまとめると、ハンドとアームそれぞれに関して、レバー操作の有無およびマニピュレータ負荷の有無の4情報を基底作業状態とする。この静的情報を用いた状態単位を Primitive Static Status (PSS) と呼ぶ。単腕作業機では、 $2^4 = 16$ 通り、双腕作業機では $16 * 16 = 256$ 通りとなる。16個の状態 (A ~ P) それぞれには、具体的な作業タスクを当てはめることが可能である。識別可能な作業状態の例を表-2に示す。例えば、アーム負荷なし、ハンド負荷なし、ハンド操作なし、アーム操作ありの場合は、リーチング状態(0001)と推定可能である。

(3) 操作者支援システムの設計

ここでは、3章(2)で提案した基底作業状態 PSS を用いた状態識別に基づく操作者支援システムの試作を行う。前述の通り、本システムは、情報検出・状態識別・支援の3つのモジュールから構成されている。これらのモジュールの機能を以下で概説する。

(a) 情報検出モジュール

マニピュレータ各自由度の操作レバー角度と関節負荷情報を入力とする。

(b) 状態識別モジュール

256通りのPSSから、リーチング、グラスピング、運搬状態などの基底作業状態を同定する。双腕に適用することで、双腕を用いた運搬状態となった場合には、協調運搬状態と識別できる。その上で、PSS同定結果に操作情報等を組み合わせることで、より高次の状態識別も可能となる。例えば、リーチング状態において、レバー操作情報が“フルスロットル”から“少量一定”へ急激に変化した場合には、“精密作業状態”への移行がなされたと識別できる。

(c) 支援モジュール

ここでは、PSSに基づき識別された作業状態において有用となる情報あるいは物理的支援等を提供する。具体的な要支援状態や支援内容は、表-1に例示した通りである。例えば、前節で述べた精密作業状態や双腕協調運搬状態と同定された場合には、微細操作を容易にするため操作ゲインを半減させる支援を提供する。また、リーチングやグラスピング状態と識別された場合には、奥行き感覚を補助するため、手先作業部の拡大映像を提示するなどの支援が考えられる。

これらの支援の有用性に関しては、次章の実験結果の項目で述べることとする。

4. 検証実験

(1) 双腕建機シミュレータの開発

提案した操作者支援システムの有用性を検証するため、双腕建機シミュレータを新規に開発した。建設機械特有の特徴(操作ゲイン、油圧遅れ、振動、音など)の再現に加え、環境と相互作用することを前提とした建機作業において不可欠となる接触判定機能や慣性力、接着力、摩擦力などの実装を行った。シミュレータの仕様を図-3および図-4に、試作した操作者支援システムの概要を図-5に示す。

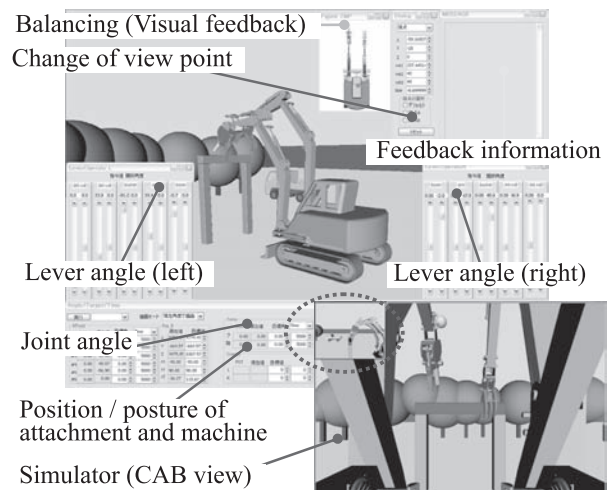


図-3 Graphical display of the developed simulator.

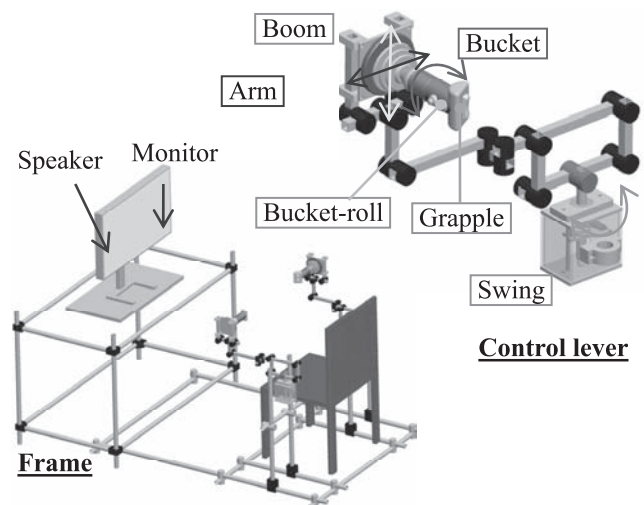


図-4 Experimental setup of the developed simulator.

(2) 実験内容

実験タスクとして、双腕建機の活用が想定される“家

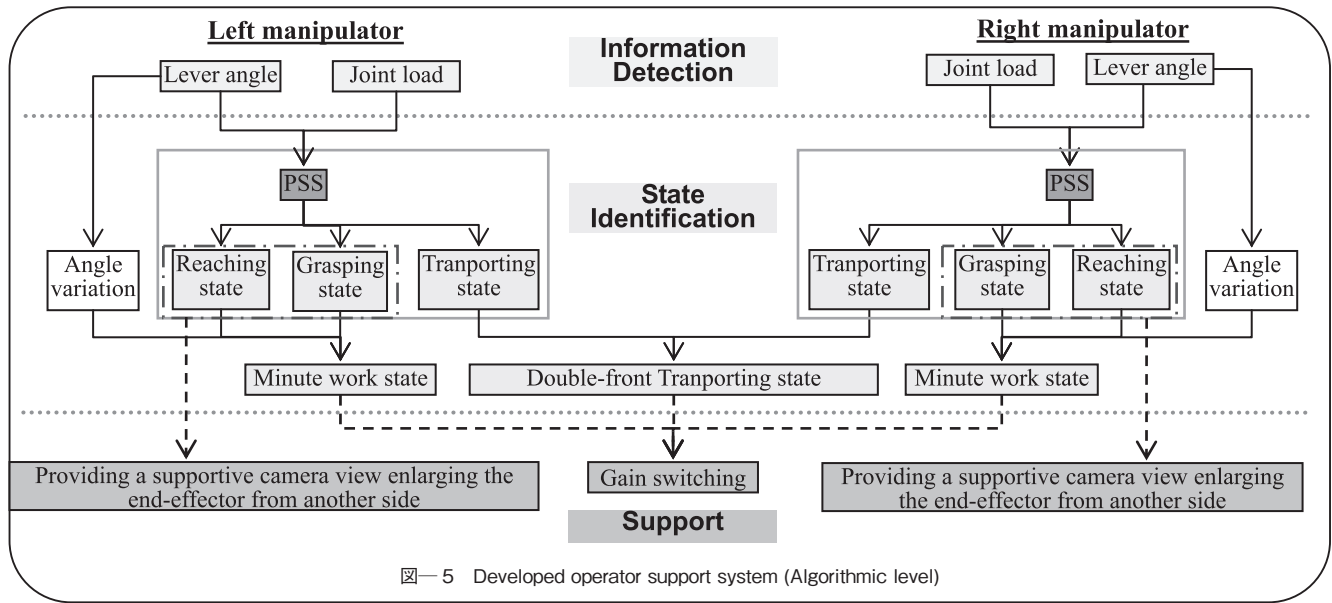


図-5 Developed operator support system (Algorithmic level)

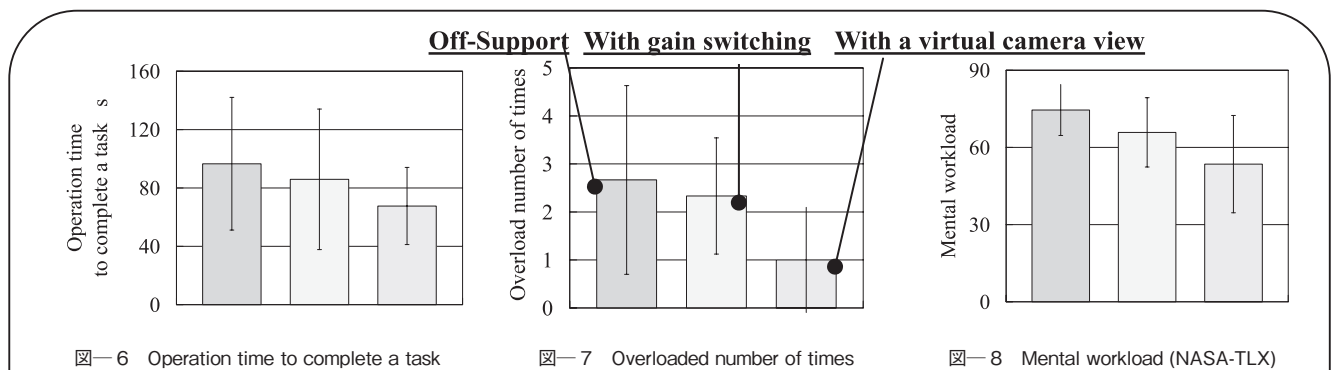
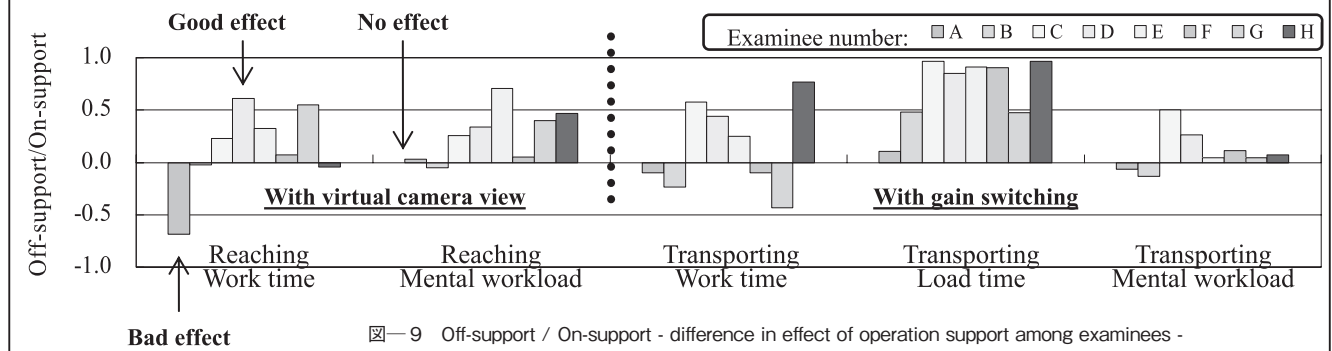


図-6 Operation time to complete a task

図-7 Overloaded number of times

図-8 Mental workload (NASA-TLX)



Bad effect

図-9 Off-support / On-support - difference in effect of operation support among examinees -

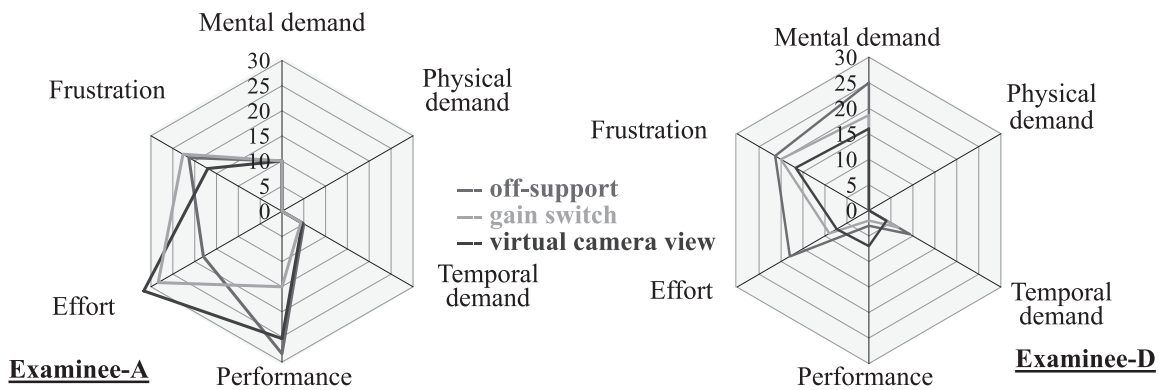





図-10 Mental workload (6 items) - difference in effect of operation support between examinees -

表一3 Operation supports demanded in a work sequence

タスク イメージ	作業シーケンス (作業状態・支援内容)	
1 	2本の柱の上に固定された梁までマニピュレータを伸ばす	
	作業状態	リーチング
2 	梁を双腕で掴む	
	作業状態	グラスピング
3 	双腕で手元に引き寄せる	
	作業状態	把持物体操作
	支援内容	ゲイン切替

屋解体作業”を選定した。表一3に作業シーケンスと各作業状態における支援内容を示す。被験者は、建設機械の操作経験を持たない健康な成人男性8人(20~25歳)とし、実験前に20分間程度の操作訓練を行い、操作方法を覚えてもらった。その上で、システムによる支援(仮想カメラ支援、ゲイン切替支援)2通りと支援なしの計3通りについてそれぞれ1回ずつ実験を行った(実験順序に関してはランダムとした)。

評価のため、3つの実験パターンそれぞれに関して、作業時間(はじめから梁を掴むまで、引き寄せたあと梁を置くまで)、過負荷回数(手先の相対位置が200[mm]以上離れた回数)、過操作回数(梁の近傍での行き過ぎ操作回数)、さらにNASA-TLX(操作者のメンタルワークロードの定量化ツール)の測定を行った。

(3) 実験結果

支援なし、ゲイン切替支援、仮想カメラ支援の3つの条件下における作業時間、過負荷回数、メンタルワークロードを図一6、7、8にそれぞれ示す。

(a) 作業時間

カメラ支援では、平均で30[%]、最大で70[%]の低減効果が得られ、ゲイン切替支援より効果的であることが確認された($p < 0.1$) (図一6)。

(b) 過負荷回数

(a)と同様の傾向で低減が図れた(図一7)。平均で72[%]、最大で6回から0回へ減少した。

(c) メンタルワークロード

(1)と同様の傾向で低減が図れた(図一8)。支援なしとカメラ支援でt検定(両側)を行った結果、 $t = 2.79$ ($p < 0.05$)で有意差が見られた。

被験者全体を見ると、支援システムにより作業パ

フォーマンスが改善され、全ての評価項目でカメラ支援が最も効果的であるという結果が得られた。

5. 考察

支援の有無に応じた個々人の作業パフォーマンスの違いを評価するため、作業時間、過負荷回数、メンタルワークロードの結果を被験者ごとにグラフ化した(図一9)。算出過程の詳細は割愛するが、値が正で大きいほど効果があり、0付近では効果なし、負では逆効果を意味する。それぞれの支援効果について考察する。

(a) 仮想カメラ支援

カメラ支援により、被験者の半数以上のメンタルワークロードが大幅に低減されていることがわかる。これに加えて、作業時間も減少傾向にあることから、操作者への負担を増すことなく、作業パフォーマンスの向上を図れたといえる。これは単純な情動的支援であるが、操作者にとって把握しにくい奥行き感覚が補助され、有効に作用したためと考えられる。なお、被験者A、Bでは正の効果を得られなかったが、今後、状態識別に基づき、カメラの方向制御やズームを自動的に制御することで、有用性の向上が期待される。

(b) ゲイン自動切替支援

過負荷回数に関しては、全ての被験者で減少傾向が認められたが、作業時間とメンタルワークロードに関しては、カメラ支援とは異なり、被験者に応じて効果の正負が分かれた。被験者C、Dのメンタルワークロードはゲイン切替をすることで減少しており(図一9)、特に“努力”の項目で大きな減少が見て取れる(図一10)。一方、被験者A、Bでは、支援を施すことでメンタルワークロードが増加しており、特に“努力”の項目は、1.5倍も増加している(図一10)。アンケートでは、運動特性の変化に違和感がある、マニピュレータ速度の減少に苛立ちを感じた(被験者A)との回答があった。このことから、ゲイン自動切替支援には、操作者のスキルレベルや作業環境、作業内容に応じて、支援タイミングや内容を適切に選ぶ必要があると考えられる。

以上の結果から、操作者支援には、有るか無しかで有用性の判断が可能な支援(手先作業部の拡大映像の提示による情動的支援)と、支援内容のパラメータ設定が極めて重要となる支援(動作ゲインの自動調整支援)が存在することが窺える。前者に関しては有用性が確認されたものの、後者では、被験者ごとに効果に差が認められ、今後改良が必要であることが示された。さらに、全ての状況に対応可能な固定パラメータの組

み合わせや個別対応のための可変パラメータの設定方法等を考慮した状態識別手法の構築も重要になると考えられる。

6. まとめ

本稿では、まず、解体・分別などの複雑な作業が期待される建設機械の知能化のためのシステムデザインについて述べた。その上で、知能化設計のキーとなる作業状態識別の質的向上を図るための工夫として、環境や操作者の多様性に非依存な情報に基づく確定的な状態識別単位の構成法を紹介した。最後に、作業状態の自律識別に基づく操作者支援システムの試作例について概説した上で、筆者らが開発した双腕建機シミュレータにおいて知能化システムによる操作者支援の有用性を検証した。こうした先行開発例を通じて、操作者支援や機体設計の最適化等に应用可能な建設機械の知能化技術の秘めたるポテンシャルを感じ取って頂くと共に、ヒューマンインタフェースの観点から知能化システムの設計に関わる本質的な解決課題（例えば、操作者のスキルレベルに応じた支援タイミング制御の重要性など）に関して、議論を始めて頂くきっかけを提供できていれば幸いである。

7. 謝辞

本研究の一部は、日立建機（株）ならびに、文部科学省科学技術振興調整費 若手研究者の自立的な研究環境整備促進「早稲田高等研究所テニユア・トラックプログラム」、早稲田大学 21 世紀 COE プログラム「超高齢社会における人とロボット技術の共生」の支援を受けて行われました。ここに謝意を表します。

JCMA

《参考文献》

- 1) A. Ishii and K. Tomita, "Total Design of a Double Fronts Work Machine," Proc. of the 2006 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics (Robomec'06), paper no.2A1-B07, May 2006 (in Japanese)
- 2) A.Ishii, "Operation System of a Double-Front Work Machine for

- Simultaneous Operation," Proc. of the 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.539-542, Oct. 2006
- 3) S. Uesugi, M. Anabuki, H. Hirata, "A Study on Anti-sway Control of Rotary Crane," Proc. of the 7th SICE System Integration Division Conference (SI2006), pp.844-845, Dec. 2007 (in Japanese)
- 4) A. Takemoto, K. Yano, T. Miyoshi, K. Terashima, "Operation Assist Control System of Rotary Crane Using Proposed Haptic Joystick as Man-Machine Interface," Proc. of the 2004 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp.533-538, Sep. 2004
- 5) M. Yoneda, F. Arai, T. Fukuda, K. Miyata, T. Naito, "Operational Assistance System for Crane Using Interactive Adaptation Interface - Design of 3D Virtual Crane Simulator for Operation Training -," IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.224-229, 1997
- 6) Y. Sakaida, D. Chugo, K. Kawabata, "The Analysis of Skillful Hydraulic Excavator Operation -Extraction of the Skill for efficient operation-," Proc. of the 7th SICE System Integration Division Conference (SI2006), pp.1283-1284, Dec. 2007 (in Japanese)
- 7) J. Rodriguez, et al., "Operating Experience of Shovel Drives for Mining Applications," IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.705-711, 2004
- 8) M. Kamezaki, H. Iwata, S. Sugano, "Development of an Operation Skill-Training Simulation for Double-Front Construction Machinery," Proc. of the 2007 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics (Robomec' 07), paper no.1P1-M10, May 2007 (in Japanese)
- 9) M. Kamezaki, H. Iwata, S. Sugano, "Research on Intelligent Operated-Work Machines -Design of an Operator Support System and Application to Double-Front Construction Machinery Simulator-," Proc. of the 8th SICE System Integration Division Conference (SI2007), pp.401-402, Dec. 2007 (in Japanese)
- 10) Hitachi Construction Machinery, <http://www.hitachi-c-m.com/>

【筆者紹介】

岩田 浩康 (いわた ひろやす)
早稲田大学
高等研究所
准教授



亀崎 允啓 (かめざき みつひろ)
早稲田大学
創造理工学研究所
客員研究助手



菅野 重樹 (すがの しげき)
早稲田大学
創造理工学部
総合機械工学科
教授

