

38. 屋外作業ロボットの操縦・監視用画像伝送・認識技術の研究開発

○コマツ 永井孝雄
アイデン 橋本綱四郎
サイヴァース 川村英二

1. はじめに

建設機械をラジコンで操縦するユーザニーズは、30年以上前から存在していたが、本格的に屋外作業ロボットとして建設機械をラジコンで遠隔操作する技術が普及したのは平成6年1月年から始まった雲仙普賢岳の大噴火災害の復旧作業（無人化施工）からである。

近年建設機械の電子制御化が進み、遠隔制御されるラジコン建機は、屋外作業ロボットの代表といえる。ロボットの制御分野においては、最近の自立歩行など自律制御技術の目覚ましい進展にもかかわらず、実作業では、人間による操縦・監視は不可欠なものとされている。それは、実用性を考慮すると認識技術や自律制御技術がオペレータ操作に及ばず、ロボットの強力な出力を安全確実に制御するためには、人間による操縦や監視を必要とするからである。そして、最近ではオペレータの安全、作業環境向上の観点から、危険地帯や厳しい作業環境での屋外作業において、遠隔操縦技術の導入が進みつつある。

本研究開発では、更なる遠隔操縦性の改善のため、操縦者があたかも運転席にいるような感覚で操縦出来る、パノラマ映像無線伝送・認識システムを開発した。そしてこれを用いた遠隔操縦による作業効率が、搭乗操作や至近距離でのラジコン操作に比べてどの程度の効率になるのか、実機テストを行い定量的な検証も併せて行なったので以下に報告する。

2. 現状の無人化施工における課題

写真1と2に現在使用されている遠隔操縦・監視用画像伝送システムを示す。車載型のカメラ映像は使用しておらず、地上固定式監視カメラからの映像を頼りに操縦せざるを得ない状況である。このため、操縦熟練者とカメラ設置作業が必要となり、操作の容易化、機動性や作業効率等の見地から、改善の余地がある。これらを改善するには、車載型の高画質で遅延のない画像伝送装置が不可欠であるが、これまで遠隔操縦・監視に特化した映像伝送、認識技術の研究は、あまり行われてこなかったもので、遠隔操縦に適した経済的な映像伝送システムは存在しておらず、現状で手にはいるシステムでは、多くの問題が存在している。関係者にヒヤリングした結果、次の

ように集約される。

- 1) 映像による遠隔作業時の効率が低い。固定カメラによる映像を頼りに操作しているので臨場感に乏しく、移動を伴う作業は特に機動性が悪い。
- 2) 車載可能でフル NTSC 映像品質を、遅延無く無線画像伝送が可能で許認可不要のシステムは国内では手に入らない。
- 3) 同時利用可能な映像伝送チャネル数が3chと少なく、複数台の稼働が困難
- 4) 映像の視野が狭く、操縦するには不十分。特に搭乗席からのカメラ映像は人間に比べ視野が狭く、ズームやパン・チルト補えるが、見たい部分を選ぶのにその操作時間長く、実用に適さない。
- 5) ズームやパン・チルト付きのカメラは壊れやすく耐久性が不十分



写真1 映像を使用した遠隔操作室



写真2 映像を使用した遠隔操作室

3. 開発のねらいと目標

無人化施工において現在ネックになっているのは作業効率が搭乗操作時に比べ低いことである。先端技術研究センタの報告では、100m離れた場所からの遠隔操縦作業の効率が、映像を用いても搭乗時の61%、30m離れた場所からのラジコンでは64%、同じく50mでは56%と、目視では距離が長くなる従って効率が低下する。

車載型新画像伝送システムを開発する一番のねらいは、映像付きラジコン建機の作業効率を80-90%に向上させる事を最終目標とし、システム価格は現状以下で、無線の許認可は不要と、使いやすいシステムを提供出来ることとした。このため各要素別に以下のような目標を設定し開発のねらいとした。

- 1) 10ch以上のチャンネルを確保出来、画像伝送遅延の少ない無線伝送方式を開発
- 2) 広い視野を確保しながら、瞬時に注視したいエリアのズームアップ・パン・チルトを可能にするカメラ操作BOXの開発
- 3) 人間の眼とほぼ同様の視野を可能にする多眼カメラの画像合成技術を適用したマルチカメラBOXを開発
- 4) 以上のユニットをシステム化し、実機比較テストで搭乗作業時の80%以上の効率を目指す。また至近距離でのラジコン作業効率を上回る事を確認し、ねらいが正しかった事を検証する。

4. 各要素技術の課題とその解決方法

事前の調査や実験などを通じ、各構成要素の課題と技術について解析し、技術課題とその解決方法を集約した。

【画像送受信機】

事前にテストを行い許容される画像送受信遅延時間についての評価を行った。遅延時間の水準を変化させながら、被験者の官能評価で許容限界をチェックしたところ、100m秒(0.1秒)が境界であった。そのほか映像の乱れや画質向上も重要な課題であることも判明した。またこれまでの免許不要の2.4GHz帯の無線では、マルチパスによる映像の乱れやちらつきが多く作業者が疲れるため、ほとんどの映像は固定カメラによるものであることも効率を低下させていることがわかった。これらの結果から課題を抽出し、その解決策を次のように策定した。

- マルチパスによる映像の乱れ防止
→地上波デジタル放送と同じOFDM方式の採用
- 多チャンネル、高画質を両立する
→OFDMに多値変調64QAMを組み合わせる事で高速化を行い、30Mbpsを達成事で最大10chチャンネル、640x480pixelを確保する。
- 遅延50~60mSを実現
→圧縮コーデックとしてJPEG2000の採用と誤り訂正回路の工夫

【マルチカメラBOX】

事前評価実験では、3台のカメラを利用して、実際の掘削作業などを行い、その際の作業視野として妥当性があるか否かの検証を行った。その結果、パノラマ視野(広角視野)の必要性およびメリットが改めて確認できた。すなわちパノラマ視野では、パワーショベルの旋回時に周囲の状況を一望に収めることが可能になり、効率的で安全な作業に役立つことが分かった。

その一方で、拡大視野ではバケット内部の内容物(岩石や土砂の質)を確認することが出来、品質の良いズーム映像も有効であることがわかった。更に作業に合わせてスムーズに視点を移動し、あるときはバケットを追尾する形で視点が移動し、あるときは掘削地面の状況を詳細に確認するために視点移動するといったことが、実際の作業に役立つことも分かった。ここでのポイントはパノラマ視野と拡大視野は、それぞれ旋回作業と掘削作業という異なる作業に利用用途が分化しているという点である。すなわちパノラマ視野は、全体を一望する必要がある一方で、視点移動の必要はあまりなく、特定の部分を拡大する必要性もあまりない。これに対し掘削作業視野としての拡大視野は、着目領域が中央(バケットがある方向)に集中しており、バケットの追尾など頻繁な視点移動が必要とされる。更に作業視野の場合、バケットの上下移動範囲が比較的大きいため、実験した垂直視野角90°では必ずしも十分でないことが判明した。

以上を整理すると、作業を支援するためのマルチカメラ画像視野は大きく分けて次の2種類の視野を提供する必要があると判断できる。

① 水平視野（従来パノラマ視野）

- ・ 主に水平方向の全体視野（150° 以上の視野角）を提供する
- ・ 部分的な拡大や、視点の移動は必ずしも必要ない
- ・ 正面方向を中心として左右対称な映像を提供する（建機の正面方向を明確に作業者に伝えるため）

写真3にその例を示す。

② 垂直視野（中央作業視野）

- ・ 作業を行うために、正面方向の拡大視野を提供する
- ・ バケットとカメラは連動して旋回するため左右視野角は通常範囲で良い
- ・ バケットの上下移動範囲が広いと下方向90°、上方向60°程度の視野が必要
- ・ 視野範囲内での視点移動、ズーム拡大&縮小を頻繁に行う可能性があり、ズーム拡大時の画像品質は高いほどよい。
- ・ 写真4にその例を示す。



写真3 水平パノラマ



写真4 垂直パノラマ

この2種類の視野を同時に提供するマルチカメラシステムを実現するには、従来のカメラを水平方向に複数配置する方式では限界がある。またズーム品質を上げる一方で垂直視野を150°程度確保すると、カメラ台数が極端に増加し、システムを複雑にするだけでなく、妥当な価格帯から逸脱する危険性がある。

従来のマルチカメラでは通常の監視カメラで利用している交換可能なレンズ(Cマウント等)を利用しているため、カメラ台数が増えるとレンズの数も増加し、物理的な問題（大きさ、重量）と、コスト的な問題が発生する。

以上の点を整理し、マルチカメラBOXに求められる課題とその解決技術は以下のように集約できる。

- カメラの小型化
理想的なパノラマ画像合成を行うためには、なるべくカメラ間の間隔を狭める必要がある

ため、2cm角以下のサイズが望ましい
カメラ取り付け後の耐振動強度が十分高くなる必要がある

→携帯電話などで利用されている、レンズ一体型のCMOSセンサカメラの採用

● 画像の解像度（画素数）向上

従来のNTSCカメラ（40万画素等）以上の画素数が望ましい

→ズーム時を考慮し、130万画素CMOS採用

- 広い水平視野を確保する一方で、油圧ショベル用には150°の垂直視野を同時に確保する必要がある。魚眼レンズでは見にくく、通常のマルチカメラではコスト、取り付けスペースの観点から大きな困難が発生する。
→超小型マルチカメラを水平・垂直視野用に2系統で使用するにより、8台のカメラによるパノラマ合成を実現する。

- 4台のカメラからビデオ信号のリアルタイム処理を行なう場合、1秒間に48百万画素のデータを入力する必要がある、さらにリアルタイムに合成処理に関わる演算処理を完了する必要

→4台のカメラ画像用にそれぞれに専用メモリバンクを用意し、各メモリバンクは時間分割によるマルチポート化を行なうことにより、見かけ上同時書き込み、同時ランダム読み出しが可能となるハードウェア構成を実現

【映像付遠隔操縦装置】

以上に述べた解決策やパンチルト・ズームなどの操作を瞬時にできるカメラ操作BOXを開発し、これらを組み合わせ、写真5に示すような、車載カメラのみの画像を頼りに遠隔操縦を行う遠隔操縦装置を構成した。また写真6は操縦風景を示す



写真5 遠隔操縦装置

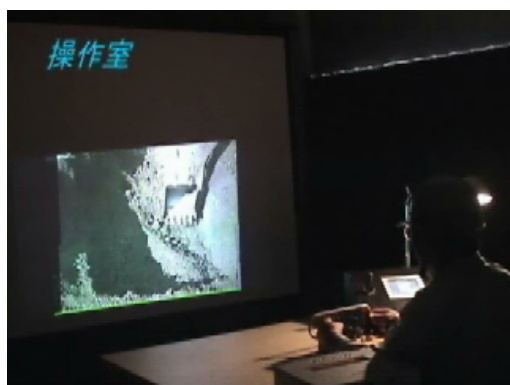


写真6 操縦風景

掘削作業を行うときには垂直画面を主に使用し、旋回作業や走行時には水平画面に瞬時に切り替えられるようにカメラ操作 BOX を開発した。この BOX ではパン・チルト・縮小・拡大など操作も瞬時に出来るようにした。画面はプロジェクタにより 100 インチの大画面や通常の CRT・LCD などの使用が可能とした。このシステムを用いた遠隔操縦と搭乗操作、至近距離での目視遠隔操作により作業性の比較を行った。当初臨場感を最大限にすべく、半球に画像を映し出すことも検討したが、油圧ショベルのように旋回操作時には目が回ってしまい、逆効果であることがわかったので通常のフラット画面を採用した。また立体視については長時間作業の面で問題があり、当初から検討外とした。

表 1 に今回新規開発した画像伝送用送受信機の仕様、表 2 に 8 眼カメラにより画像合成するカメラ BOX の仕様を示す。また図 1 にシステム全体構成を示す。

仕様周波数	2.4GHz
出力	10mW
画質	640×480 画素
変調方式	OFDM
遅延時間	60m 秒
チャンネル数	10 チャンネル
圧縮方式	JPEG2000
伝送レート	30Mbps
フレームレート	毎秒 30 フレーム
到達距離	300m以上 600m以上（リピータ使用時）
外形寸法	221×153×60mm

表 1. 画像伝送無線送受信機の主要仕様

カメラ	CMOS 130 万画素
カメラ数	横長画面用 4 個 縦長画面用 4 個
視野角度	横長画面 150 度×50 度 縦長画面 50 度×150 度
ズーム・パン機能	デジタル式
合成時間	40m 秒
フレームレート	30FPS
画質	合成後 640×480 画素
外形寸法	280×164×318mm

表 2. カメラ BOX 主要仕様

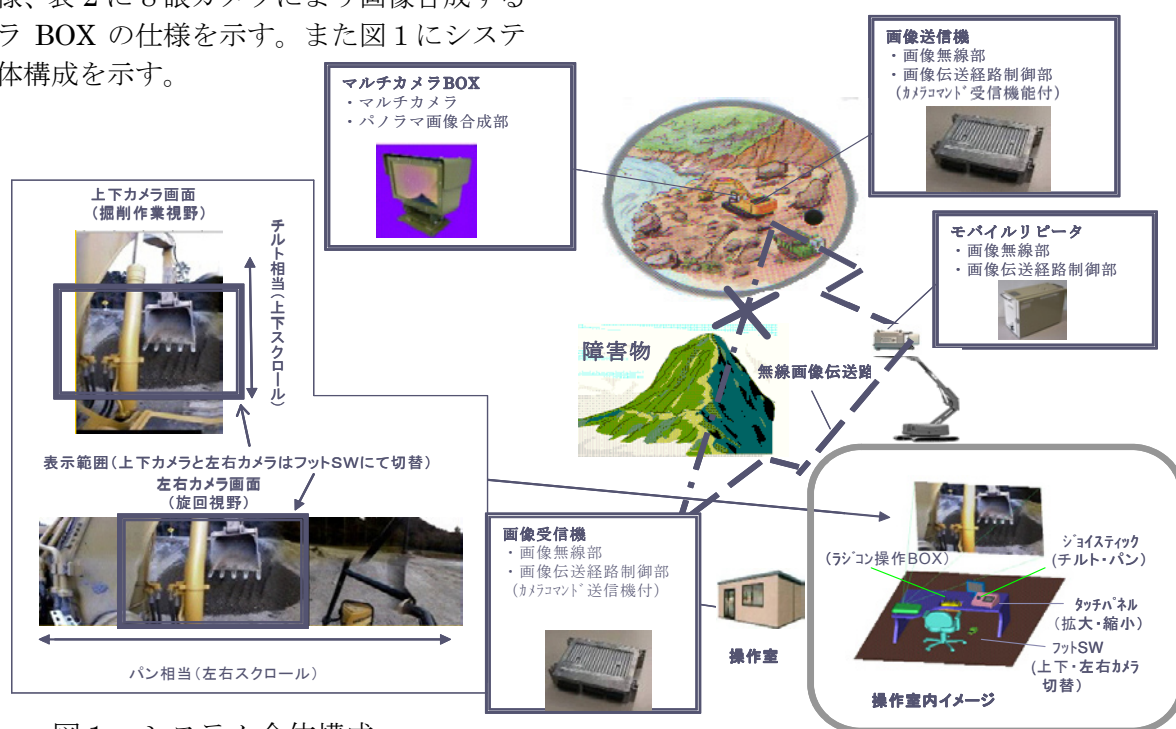


図1 システム全体構成

5. 作業効率向上検証結果

開発したマルチカメラBOXと画像送信機などを弊社の0.8立米クラスのラジコン油圧ショベルに搭載し、搭乗操作時、至近距離での目視遠隔操作、画像のみを見ての遠隔操作で作業量試験などを行い、官能評価による実用性や作業量の計測結果などを比較した。

写真7に本システムを装着したラジコンつき試験機の概観を示す。ラジコン用受信機は430MHz又は1.2GHzを用い、画像送信用2.4GHzとの干渉を避けるようにした。また走行時の車体の振動による画面の振動もほとんど気にならなかった。試験は図2に示す弊社の試験場で実施した。作業量の比較は図4に示すように掘削と排土の連続作業で比較した。比較は搭乗作業時、15m～30mの至近距離での目視ラジコン、そして今回の車載カメラ映像のみによるラジコンの3水準で各6日間行った。実施した土工量試験の比較結果をグラフ1～3に示す。

搭乗操作の作業量を100とした場合、画像のみで作業した場合には82%であった。目視ラジコンでは70%の作業量にとどまった。

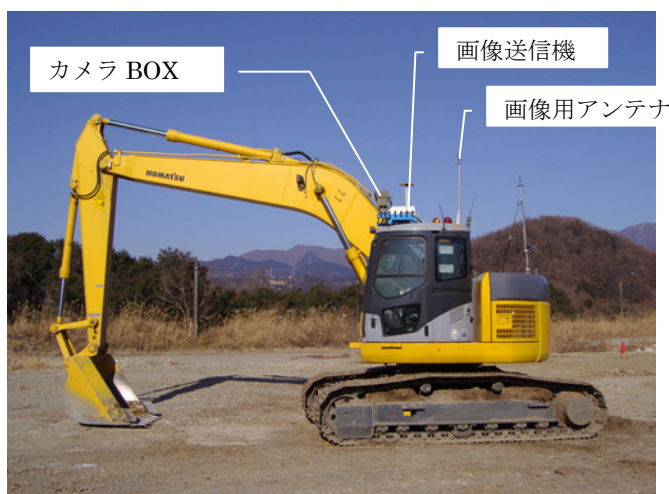


写真7 試験機の外観

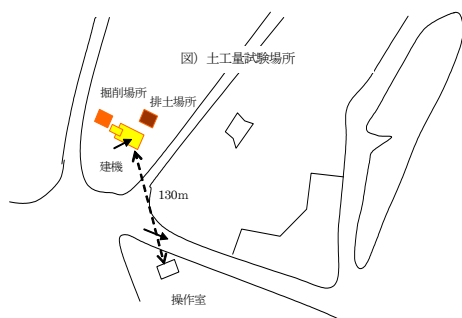
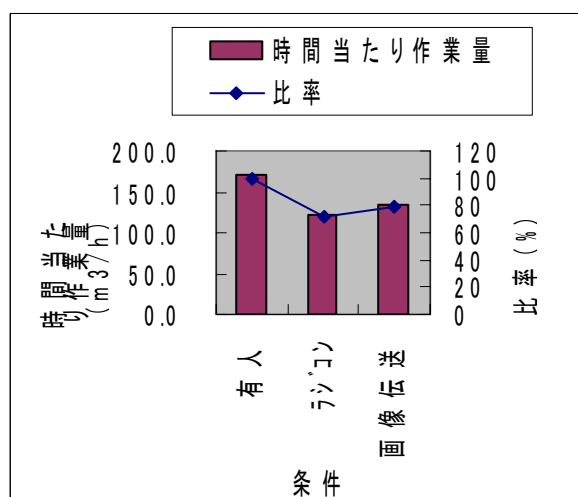


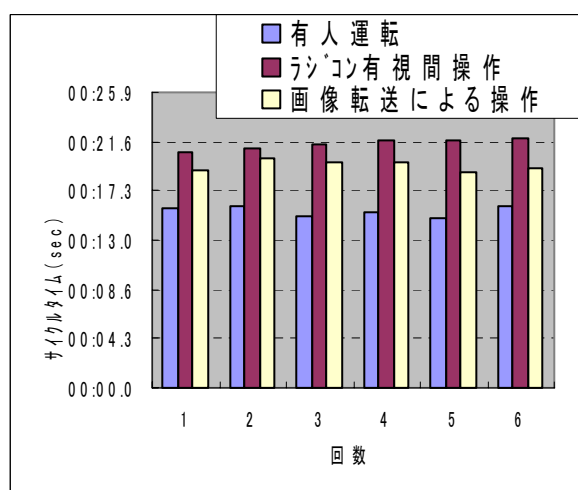
図2 試験場所

冒頭に述べたようにこれまでの映像で遠隔操縦作業する場合は搭乗時に比べ61%といわれているので、今回の新しい映像システムは作業効率の向上が期待できることが確信された。作業量が増加した要因としては、以下のような事実によることが確認された。

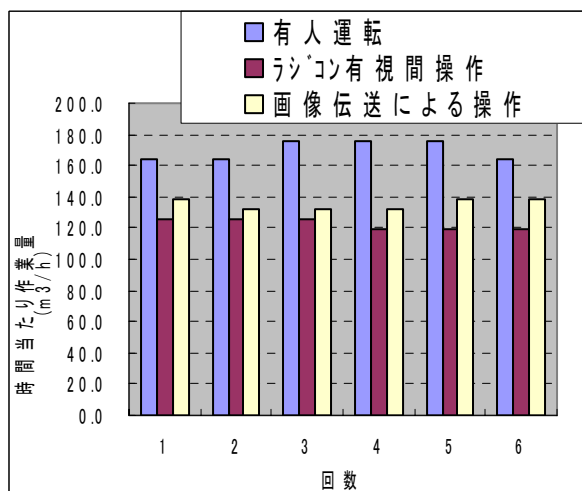
- 目視ラジコンでは掘削時バケットの中が良く見えないので、ブームとアームの動きだけでバケット操作をしなければならないのに対し、画像では確認しながら操作が出来、サイクルタイムとバケット満杯率が良い。
- 旋回操作時排土する場所の確認が目視より画像のほうが確実に容易なため、サイクルタイムが早い。



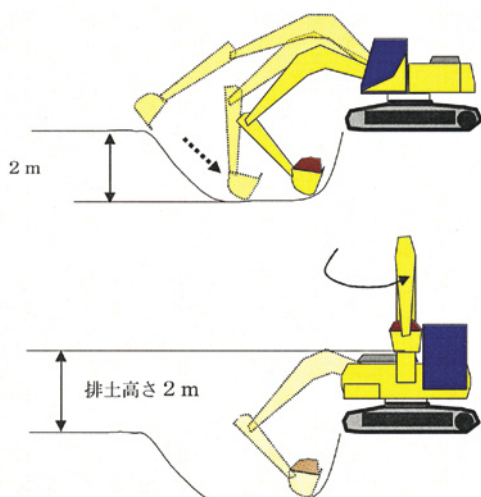
グラフ1 作業量平均値比較(m³/h)



グラフ2 サイクルタイムの比較



グラフ 3 1時間当たり作業量の比較



2 mの深さまで掘削し、2 mの高さまで持ち上げて、90 度回転し排土する作業を繰り返し、土工量を比較した。

図3 比較試験方法



写真8 テスト風景

6. 結論

8個のカメラを効果的に配置し、この映像をほぼリアルタイムで画像合成する車載装置を開発することが出来た。

免許不要な2.4GHz帯で、高品質の映像を、同じ場所で10チャンネル同時に送受信できる、車載型の送受信機を開発した。

搭乗時、目視ラジコン操作時、本システムを使用した映像のみによるラジコン操作時の比較作業試験を実施した。この試験結果より、無人化施工のネックになっていたラジコン作業の効率改善は、運転席からの高品質の映像を付加することにより、効率を10%以上改善できることがわかった。その作業効率改善に必要な映像は、画質がフルNTSCだけでなく、視野角度が水平方向と垂直方向ともに150度以上確保できるパノラマ画像を、遅延100m秒以下のほぼリアルタイムで伝送することが必要である。

7. おわりに

今回の映像装置は完成品ではなく、改善余地がまだまだ数多くある。がデモ車に試乗？（遠隔操縦なので搭乗されませんが）された方々の評判は上々なので、市場に出せる日も近いと感じている。

最後に今回この研究に尽力いただいた中小企業基盤整備機構をはじめ関係者の皆様のご協力・ご尽力に対し感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) OFDM、64QAMについて:Single-and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation
- 2) 佐藤, 城間, 小島, 稲見, 松野 ; 遠隔操作ロボットにおける有効な提示カメラ画像の検証, 第22回日本ロボット学会学術講演会, 3A27, Sep/2004
- 3) T. Svoboda, T. Pajdla, Epipolar Geometry for Central Catadioptric Cameras. International Journal of Computer Vision, 49(1):23-37, August 2002.
- 4) H.-Y. Shum and R. Szeliski. Construction of panoramic mosaics with global and local alignment. International Journal of Computer Vision, 36(2):101-130, February 2000. Erratum published July 2002, 48(2):151-152.