

小断面トンネル機械の遠隔操作における 距離計カメラの導入

坂西孝仁・宮川克己・手塚仁

建設機械を操作室でカメラ映像による遠隔操作する際、問題になる点の一つに、映像の距離感欠如がある。この解決策として建設機械周囲に多数の映像用カメラの配置、GNSS等のガイダンスシステムを使用した補助システムの導入等が考えられる。今回開発を進めている小断面トンネル作業機械の遠隔操作ではこの距離感を得るために、距離計カメラを使用して距離を色で表示するシステムを開発した。このシステムにより操作作業者は少ない映像でも、直感的に距離感の補填が可能になり操作性、安全性の向上につながった。本稿では今回開発した距離計カメラを使用したシステムの内容、視認性、安全性向上の結果について報告する。

キーワード：小断面トンネル機械、積込み機、遠隔操作、距離感改善、距離計カメラ

1. はじめに

近年FIT（電力固定価格買取制度）等によりレール工法によるNATM小断面トンネル工事が、電力事業者を中心に増加している。これに合わせて当社では小断面トンネル機械の新規開発を進めているが、坑内作業における施工環境はレール工法で断面も小さく、切羽、機械と作業員の距離は必然的に近接となり危険性が高いので、何らかの安全対策が必要と考えられた。そこで遠隔操作を基本に小断面トンネル機械システム開発を進めて安全性の確保を図りたいと考えた。

2. 遠隔操作の問題点とその対策

まず遠隔操作についての問題点について述べる。

(1) 遠隔操作の現状

日本での遠隔操作技術は緊急対策工事を中心に導入が進み、雲仙普賢岳床固工工事や阿蘇大橋地区法面対策工事における建設機械の遠隔操作が有名である。そのシステムは以下の通りである。

- ①建設機械車載カメラと、現場に遠隔操作用に複数台設置されたカメラの映像を、操作室において映像モニターを目視しながら遠隔操作をする（図-1）。
- ②映像、操作のデータ伝送は無線、有線LAN、光ファイバーケーブル等のデジタル伝送システムを使用しているが、映像データ量に合わせたシステム構

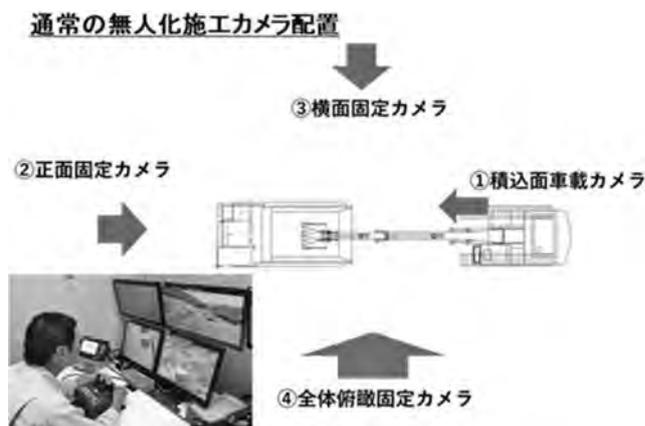


図-1 遠隔操作のカメラ配置状況

成となる。

- ③GNSSマシンガイダンスシステム等の補助システムを使用して、映像のみでは実現できない精度を実現している。

(2) トンネル施工で導入した場合の問題点

この遠隔操作システムをトンネル作業機械に導入した場合、以下の問題の発生が考えられる。

(a) モニター映像による遠隔操作の距離感の欠如

前述したがカメラ映像における最大の問題点は距離感である。2次元映像カメラを使用した通常の遠隔操作では距離感の把握は難しく、通常は車両本体車載カメラに加えて周囲の固定カメラを、横方向から現在位置を把握して作業する方法がとられる。写真-1のように左下の車両搭載画像に左右上の映像や右下の全



写真一 1 モニター使用の遠隔操作状況

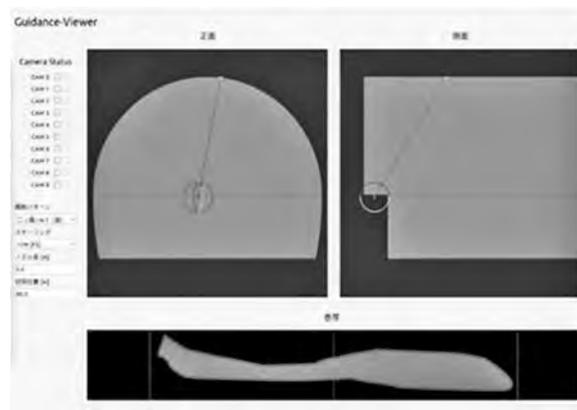
体俯瞰映像を見ながら自己位置を確認して、距離感を担保している。この場合モニター映像の切り替えや、ズームアップをする場面もあり、これらの操作を専任で実施するにはカメラオペレータの配置が必要になる。これより操作以外の設備や人員が大きなものになるのが現状である。またトンネルの遠隔操作となれば、発破作業や空間の狭さの制約より複数方向からのカメラ設置自体が難しく、車載カメラが主体となり距離感の担保が難しい。小断面トンネルになれば更にカメラ設置の制約を受ける。この点が今回の開発の焦点になった問題である。

(b) デジタル伝送システムの遅延

Webカメラも含めたデジタル伝送システムはアドレス管理で多くの機器データの伝送が可能であるが、映像データの伝送量は1映像1-3 Mbpsと大きく、カメラ内でデジタルエンコードし、ディスプレイ表示前にアナログにデコードするのでハイビジョンHD720P規格の伝送をした場合、エンコード、デコードの遅延が200-300 ms程度発生する。これに加えて伝送システムの伝送量の問題もある。遠隔操作の際、映像データは大きく遅延するのに対して、操作データの遅延は数10 msと小さく、この差が微妙な操作になると視覚が操作に追従しないので、操作作業者の認識以上に機械動作が大きくなる。この遅延解消対策の一つとして、操作の自動化が有効であり、現在当社が研究中のトンネル吹付遠隔操作技術開発の中でも、メイン操作であるノズル回転の自動化を実施して効果をあげている。また通信システムの改善としては大容量低遅延のローカル5G導入が考えられるが、機器の普及が十分でなくまだ研究段階である。

(c) ジャイロセンサー、GNSS等の使用できない環境

無人化施工におけるガイダンスシステムは、映像データを補完する技術として大変有効であるが、トンネル内ではGNSSや9軸ジャイロセンサー等が使用



図一 2 自動遠隔操作吹付ガイダンスシステム

できない環境である。従ってこれを補完する場合は、機体センサーで測定機器位置を相対的に把握して、機体位置をTS等で計測して絶対位置を特定する方法が基本となる。当社の吹付機械ではこの方法とマルチステレオカメラを併用した吹付位置測定ガイダンスシステムを開発中である(図一2)。

3. 小断面トンネル積込み機械における遠隔操作システムの開発

(1) 小断面トンネル機械開発の基本方針

今回の小断面トンネル機械開発方針は以下のとおりであった。

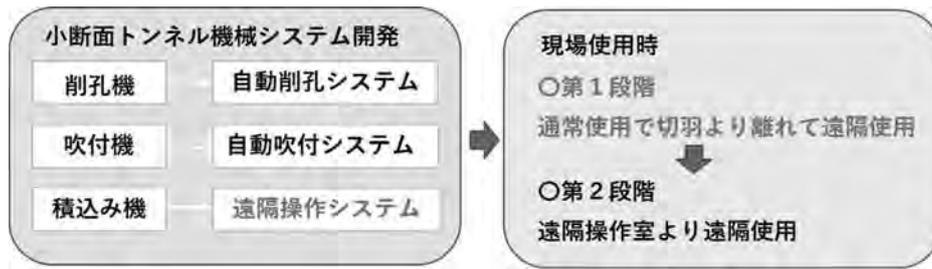
機械開発としては削孔機、吹付機はロボットによる自動作業機能を搭載し、遠隔操作の場合はこの自動システムを遠隔操作する方式にした。ただし積込み機の自動運転システム導入は未だ課題が多いため、遠隔操作が可能な仕様で開発を進めた。

導入方法は第1段階として最初の導入現場では、操作作業員が切羽で従来の使用位置より後方の安全な位置から機械を遠隔操作使用して問題がないことを確認する。次に問題点の改良を進めた上、操作室で遠隔操作の環境を整えて第2段階への移行を考えた(図一3)。

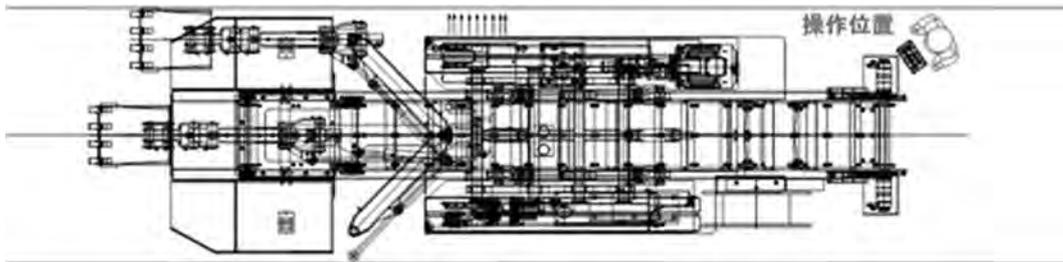
(2) 積込み機の遠隔操作システムの問題点

この中で積込み機の開発が先行したが、最終的に操作室からの遠隔操作を考慮してリモコンによる操作システムを採用した。また能力UPにより車体が大型になり、第1段階でも切羽から少し離れた機械後方で操作する(図一4)ので、前方の積込状況が確認し辛く、映像による遠隔操作になるが、どのようにするか問題となった。基本的には機械前方に車載カメラを取り付け、操作位置付近に映像モニターを設置する。

今回は操作する場所が機械直近であるので映像使用



図一三 小断面トンネル機械開発ステップ



図一四 積込み機械平面図

した場合も遅延の問題はないが、機器配置から考えるとカメラを多数取り付けることは前述したとおり難しく、スペースも十分ではない。またガイダンスシステム導入はGNSSや9軸ジャイロセンサーの使用が難しく、機械後方で操作する場合は現実的ではない。今後の操作室における操作も考慮すると、このような状況でどのようにして映像により距離感の担保する方法があるか、検討する必要があった。

4. 距離カメラを使用した色による距離可視化の実験

遠隔操作を前提に距離感を担保する方法を数案検討し、予備実験を実施して有効性を確認した。

(1) 距離計カメラシステムの選定

- ①高精細映像の使用(4K)による距離認識
- ②俯瞰カメラの使用した上空視点による距離認識
- ③距離計カメラを使用した色による距離認識

以上のとおり数案を文献等より検討した結果、①高精細映像の使用でも距離感の担保は十分ではない。②俯瞰カメラ映像は移動の際に周囲の状況の把握は容易であるが、操作作業員視線でないので操作性向上にはつながらない。この中で③距離計カメラを使用した色による距離認識は遠隔操作として実用化されていないが、操作作業員が直感的に状況判断できるので有効ではないかという結論になった。

(2) システム構成と予備実験

距離計カメラを使用した色認識システムの有効性を確認するために、開発機と同等能力の機械に距離計カメラと色認識が可能なシステムを搭載し、現場で視認実験を実施した。

- ①実験場所 国道103号線青ぶな山トンネル避難坑工事
- ②実験内容 積み込み作業における距離計カメラを使用した距離の色認識映像による操作作業員の視認感覚実験
- ③使用機材 ITDLab製ステレオカメラISC-100XC(100万画素 有効画角:83°)
ノートPC CF-SZ5(Windows10)
レーザー距離計BOSCH製(GLM500)
照度計TRUSCO製(TLX-204)
- ④搭載機械 積み込み機シャフローダKL-15(コトブキ技研)
- ⑤機器取付 図一五のとおり操作席前方にカメラ表示システムを設置
- ⑥色の設定 図一六のとおり色を40cm間隔で設定
- ⑦予備実験

本距離計ステレオカメラの映像は白黒出力である。一眼は映像表示用、もう一眼は計測用のカメラとなっており、映像出力は距離を色で表す視差映像、白黒生映像と視差映像を合成した合成映像の出力が可能であったので、操作作業員に確認して一番見やすい合成映像を採用した。違いは図一七を参照。

ステレオカメラ取付位置（前方から）



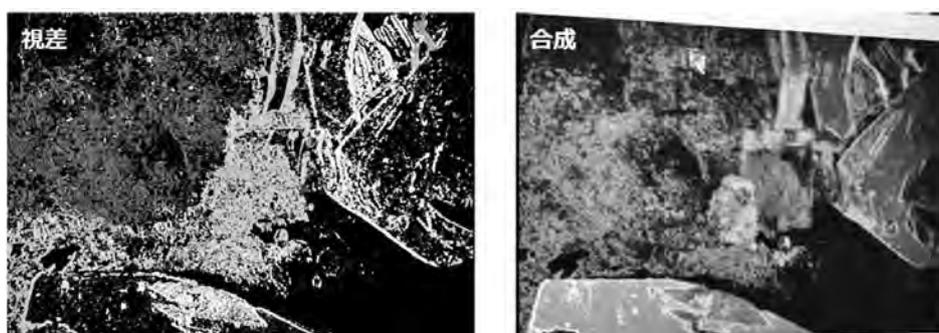
ステレオカメラ取付位置（後方から）



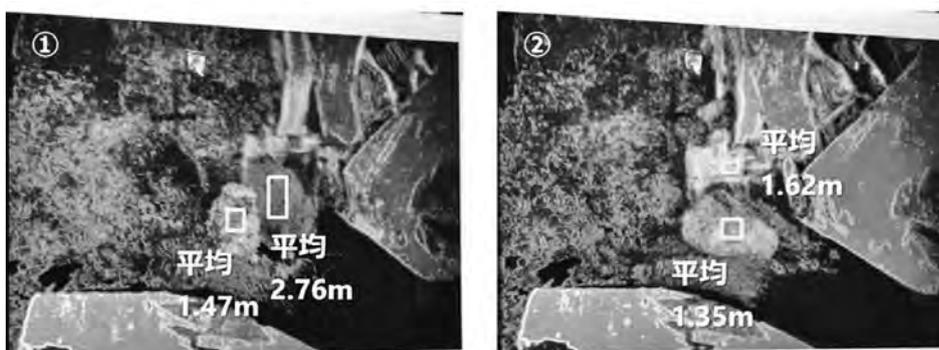
図一五 距離計カメラによる実験機器設置状況図

無色	: ~0.70m
赤	: 0.71m~1.10m
橙	: 1.11m~1.50m
黄	: 1.51m~1.90m
黄緑	: 1.91m~2.30m
緑	: 2.31m~2.70m
青	: 2.71m~3.10m
紫	: 3.11m~3.50m
無色	: 3.51m~

図一六 距離計カメラと表示色



図一七 距離計カメラと表示画面（左：視差映像 右：合成映像）



図一八 視差実験状況（①シーン1 ②シーン2）

(3) 実験と解析結果

(a) 実験方法

以下の条件で実験を実施した。

○積込みバケットと積込み部付近が視認できるようにカメラを設置。

○最初、操作作業者は目視で積込み作業。

○次に操作作業者は、ノートPCのモニターに表示されている合成画面を見ながら1分程度作業を続け、この動作を3回繰り返す。

(b) 操作作業者のモニター結果

操作作業者からの意見は以下のとおりであった。

○色の認識による位置確認は大変容易で使いやすい。

い。

○あまり色が多くなくていい。

○積込みブレード部の境界で段差があるので、ここで色が変わると作業がしやすい。

(c) 映像分析結果

①シーン1、②シーン2共に両方ショベルと岩石が接しているように見えるが、ステレオカメラで測距をするとシーン1は1m以上離れ、シーン2では10~40cm程度の近距離にあることが判った。また合成画像の色を見比べると、シーン2のバケットは岩石に近い黄色に着色され、より近い位置関係にあることが分かる（図一八）。



図-9 遠近距離可視化システム画面 (左: 操作用表示画面 右: カメラ本体)

(4) 実験のまとめ

実験結果より距離計カメラを使用した色による距離表示は、直感的かつ容易に視覚アシストが可能であると認識できた。ただ表示色に関しては掘削範囲の限界距離、積込みブレード境界等のポイントになる距離で色分けし、色を少なくする方が認識しやすかった。

この実験結果を反映させたシステムを実機に合わせ開発を進めた。

5. 距離カメラを使用した遠近距離可視化システムの開発

今回の積込み機用のシステム開発では左右積込ブレード境界部の認識のため、左右2か所に距離計カメラを設置したが、画面は左右均等に表示すると画面認識に迷いが出ることがわかり、今回は左側カメラ映像を中心に全体表示をし、右側カメラ映像は右側境界部を中心に映像補完をする合成画面とした(図-9)。

またカメラ位置、角度入力によって積込みブレードの位置を平行に色表示できるように、微調整が可能なカスタム設定ができるようにした。今回は積込みブレード面エリア、積込み可能エリア、それ以外のエリアと色分けにより、直感的にどこまで積込みが可能か認識できて、少ないカメラ視点で距離感の担保が可能になったと考える。これにより操作作業者は切羽より離れた位置からの作業も、容易に可能となり安全性の向上にも寄与するであろう。

6. おわりに

今回完成した遠近距離可視化システムは小断面トンネル積込み機に搭載するが、現場使用で視認性の検証

を加えて、ブラッシュアップを図っていきたいと考えている。特に遠隔操作の積込作業において本技術は有効であるが、実映像との違いの違和感をいかに低減するかが今後の課題だと思う。

この距離計カメラを使用した技術は、車の自動運転に採用されて最近は一般的になっているが、今回は距離別色表示機能を使用して遠隔操作における視認性の向上や安全性向上に活用した。

今後はこの技術開発で活用した内容を基に、色を使用して危険区域等を明示、進入防止警報の発出等、更に安全対応技術として展開を考えている。

JICMA

【参考文献】

- ・建設機械の遠隔操作技術 向上に関する 共同研究報告書 平成 28 年 12 月
国立研究開発法人土木研究所 国立研究開発法人情報通信研究機構

【筆者紹介】



坂西 孝仁 (さかにし こうじ)
株熊谷組
土木事業本部 機材部
担当部長



宮川 克己 (みやがわ かつみ)
株熊谷組
土木事業本部 機材部
部長



手塚 仁 (てづか ひとし)
株熊谷組
土木事業本部 トンネル技術部
部長