

ミリ波レーダ・モーションキャプチャカメラを 組み合わせたリアルタイム吹付け出来形計測 「吹付けナビゲーション」

四塚勝久¹・白井隆裕²・石川巧³・日比康貴⁴・水谷和彦⁵

¹エフティーエス株式会社 開発営業部 部長 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町8-1-7F)
E-mail:yotsu@fts-ltd.jp

²清水建設株式会社 地下空間統括部 トンネル技術グループ (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)
taka.shirai@shimz.co.jp

³戸田建設株式会社 土木技術営業部 技術5課 課長代理 (〒104-0031 東京都中央区京橋1-7-1)
takumi.ishikawa@toda.co.jp

⁴西松建設株式会社 技術研究所 土木技術グループ (東京都港区虎ノ門二丁目2番1号-21F)
yasutaka_hibi@nishimatsu.co.jp

⁵前田建設工業株式会社 土木技術部 グループ長 (〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2)
mizutani.k@jcity.maeda.co.jp

国土交通省は「i-Construction2.0」による建設工事の生産性向上を推進し、厚生労働省は山岳トンネル工事の安全性向上と粉じん対策を求め、遠隔化・自動化施工技術の導入を促進している。エフティーエス株式会社は、ミリ波レーダとモーションキャプチャカメラを組み合わせたリアルタイム吹付け出来形計測システム「吹付けナビゲーション」を搭載した「ヘラクレス-Navigator」を完成させ、トンネル建設工事の生産性向上と安全性向上に貢献する。

Key Words: リアルタイム, 吹付け厚さ, 吹付けナビ, モーションキャプチャカメラ, 出来形計測

1. はじめに

山岳トンネル工事におけるコンクリート吹付け作業は、切羽直下での作業を伴うため、肌落ちや粉じんによる重大災害のリスクが高い。このような状況を踏まえ、厚生労働省は「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」および「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」を策定・改正し、切羽立入を不要とする遠隔化・自動化技術の導入を求めている。また、国土交通省が推進する i-Construction 2.0 においても、建設現場のオートメーション化による生産性・安全性の向上および省人化を重要な課題として捉えている。このような背景から、本稿では、施工管理のオートメーション化に資するリアルタイム吹付け厚さ計測技術である「コンクリート吹付けナビゲーションシステム」開発の全体像および今後の展望について報告する。

2. リアルタイム吹付け厚さ計測の課題

リアルタイムに吹付け厚さを把握するためには、①コンクリート吹付け中におけるノズルと吹付面との距離計測、②センサー表面に堆積するコンクリートの除去、③吹付けロボットの剛性および制御精度、④正確な吹付けノズル位置の計測、⑤ベースマシン位置の計測が必要となる。最大の課題は、吹付け厚さの計測において粉じんの影響を受けず、高精度な計測が可能なセンサー技術の確立である。そこで、光学系距離センサーと比較して環境依存の影響が小さく、粉じんに対する透過性が高い特長を有するセンサーに

着目した。また、吹付け厚さをリアルタイムに計測するため、吹付けノズル部にセンサーを搭載することに着目した。しかし、装置重量の増加による吹付けロボットの稼働性能低下を抑制すること、および作業中に発生するたわみ量に対してリアルタイムに補正を行うことが課題であった。

3. 開発技術の概要

① コンクリート吹付け中における吹付けノズルと吹付面との距離計測

吹付け中の粉じんが発生するノズル周辺での距離計測を可能にする技術として、粉じんの影響を受けづらいミリ波レーダの優位性確認を行った。従来型吹付けロボットのノズル周辺にミリ波レーダ 6 基を取り付け、計測対象を法面とし、コンクリート吹付け時にリアルタイム距離計測試験を行った（図 1）。従来のレーザー測距計を用いた計測方式は、粉じんによる散乱や遮へいの影響を受けやすく、粉じん量が多くなると距離計測が断続的または計測不能となる。一方、ミリ波レーダは粉じんの影響を受けず、吹付け中においても安定した距離データを継続的に取得することを確認した（図 2）。



図 1. ミリ波レーダによる吹付け時の距離計測

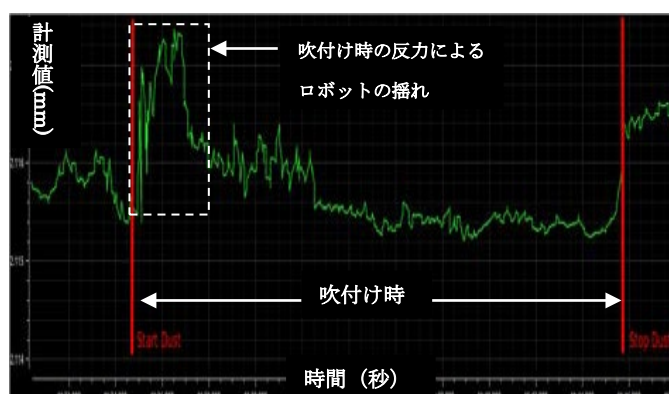


図 2. 粉じん発生時のミリ波レーダによる計測データ

② ミリ波レーダ表面に堆積するコンクリートの除去

吹付け作業中には、リバウンドがノズル部に跳ね返る。ミリ波レーダ前面に防護カバーを設置しない場合、図 3 に示すように吹付けコンクリートが前面に堆積し、計測の継続が困難となる。そこで、ミリ波レーダ前面にミリ波に対する透過性を有する樹脂製の防護カバーを設置した（図 4）。本防護カバーは回転機構を有しており、吹付け中に発生するリバウンドコンクリートの付着を抑制するとともに、樹脂板表面に水を噴射して洗浄する構造とした。これにより、吹付け環境下においてもミリ波レーダによる距離計測を安定的に行えることを確認した。



図 3. 対策前のミリ波レーダ表面



図 4. 対策後のミリ波レーダ表面

③ 吹付けロボットの剛性，制御技術

吹付け作業の将来的な自動化を見据え，新たに3段式6軸構成の高剛性フレームを骨格とし，油圧速度調整弁を採用してPLC制御が可能な吹付けロボット（図5）を開発した．本ロボットは，各関節に角度計測センサーを，油圧シリンダー内部に伸縮センサーを組み込む構成とし，ミリ波レーダを搭載したノズル位置の座標をリアルタイムに算出できる構造となっている．関節およびシリンダー内にセンサーを内蔵することで，吹付け環境下におけるセンサートラブルの低減を図っている．これにより，吹付け中に発生するロボットアームのノズル位置を高精度かつ遅延なく制御することが可能となった．

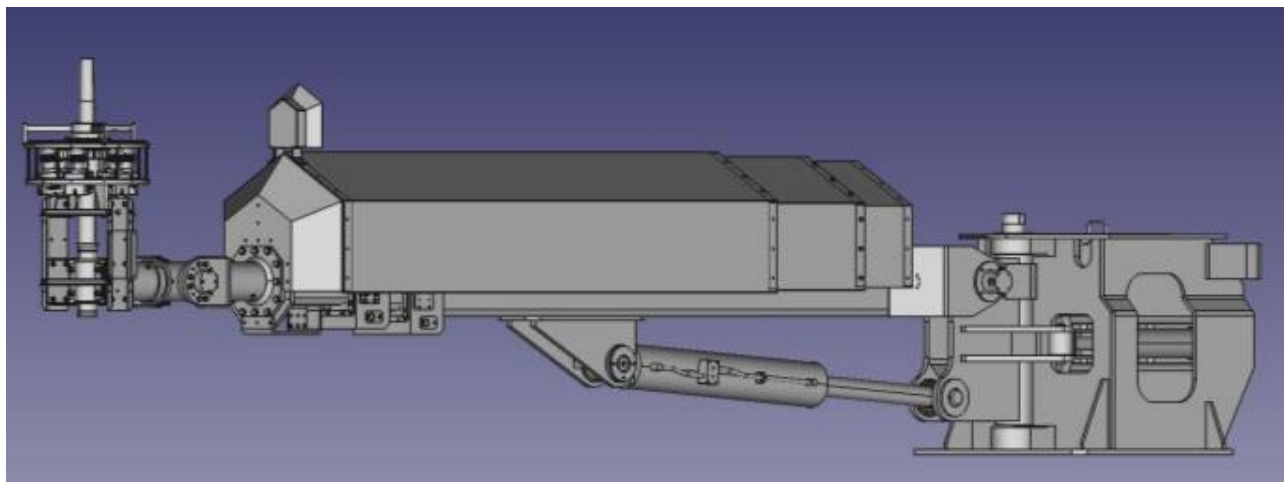


図5. 3段式6軸構成の高剛性フレーム，油圧速度調整弁を有したPLC制御吹付けロボット

④ 正確な吹付けノズル位置の計測

吹付けロボットノズル位置の補正に関して，たわみは吹付け時のロボット姿勢に応じて変化するため，補正量を一定値として扱うことは困難である．そこで，姿勢に応じたノズル位置の補正をリアルタイムに高精度で追従する手法として，モーションキャプチャカメラ（図6）を導入した．トンネル全断面を対象とする吹付け環境に対応するため，計測用カメラには赤外線帯域カメラを採用し，複数台によるステレオ配置を最適化するとともに，ノズル部に設置したLEDマーカを計測することで，ノズル位置の計測精度向上を図った．カメラ用マーカについては，ビーズ反射材が塗布された従来型の円形マーカでは吹付け途中でマーカを見失ったのに対し，自発光LEDタイプのマーカ（4つのLEDを装備し，常時3点以上から中心位置を算出）は，吹付け終了時までマーカを見失うことがなかった．

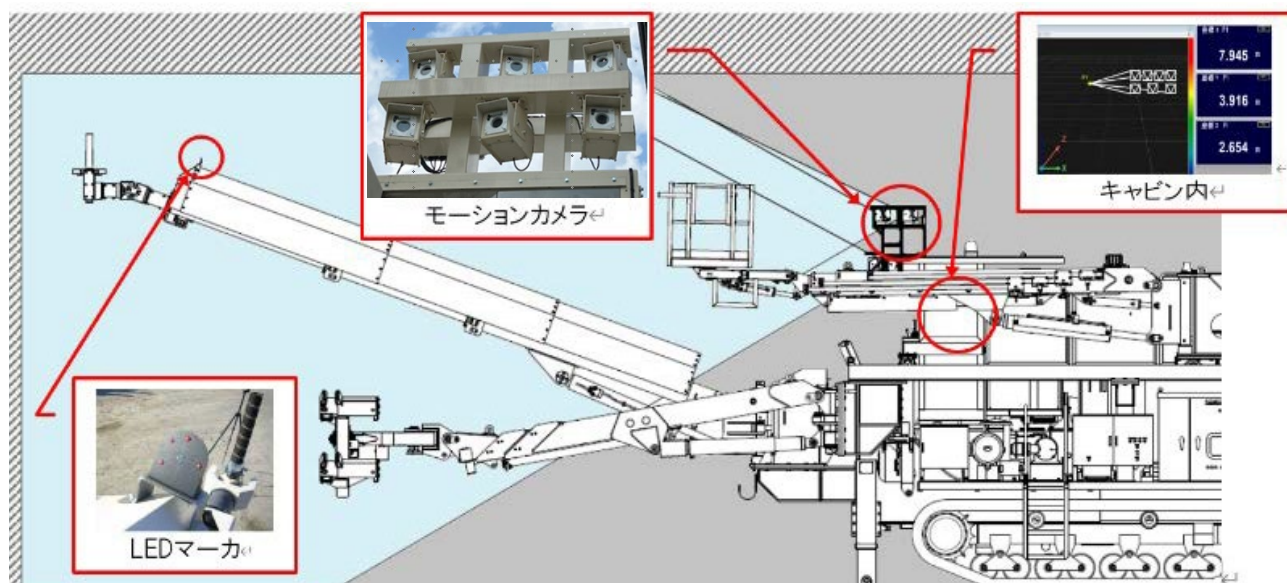


図6. モーションキャプチャカメラとLEDマーカの配置

⑤ ベースマシン位置計測

ベースマシンの位置計測には、実績のある既存位置計測技術を適用した。これらのロボット内部センサー情報、モーションキャプチャによるノズル位置情報、およびベースマシンの位置計測結果を統合することで、ノズル先端前方に位置する吹付面の三次元座標を高精度に把握可能なシステム構成とした。

4. リアルタイム吹付け厚さ計測の表示

リアルタイムに吹付け厚さを表示する本システム（図7）は、吹付け前後の計測結果に基づく実吹付け厚さの表示に加え、出来形断面に対する過不足を可視化することができる。画面表示は3D表示および2D表示に対応しており、鳥瞰図やノズル位置からの視点など、吹付けオペレータの好みに応じて切り替えが可能である。出来形条件や凡例値、凡例色については、現場条件に合わせて任意に設定することができる。

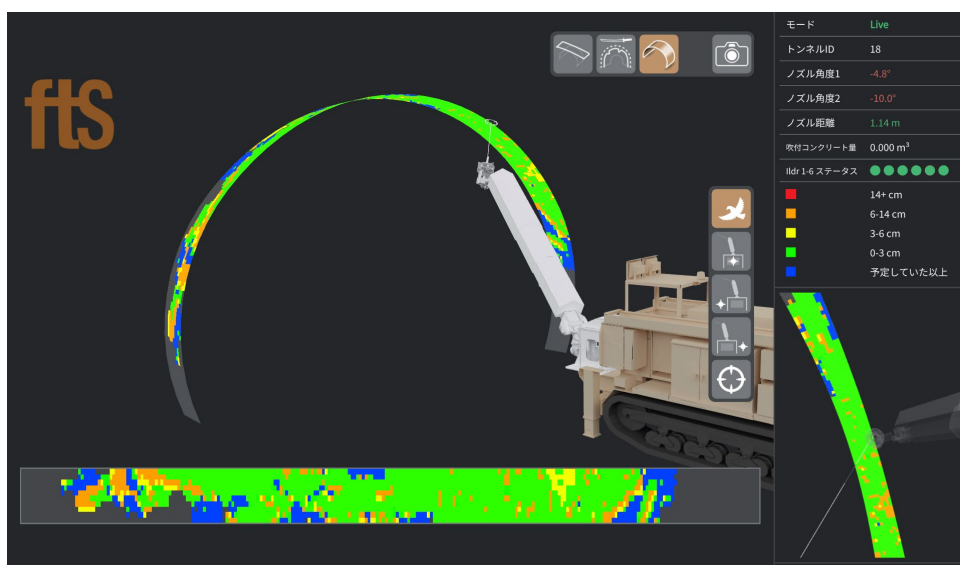


図7. リアルタイム吹付け厚さ表示

5. まとめ、展望

本開発を通じて、施工管理のオートメーション化に向けた吹付け厚さリアルタイム計測技術を確立した。本技術は、既開発の吹付け自動化技術「ヘラクレス・Auto」との融合も可能で、リバウンド量の少ないノズルワーク、吹付け過不足箇所への誘導、高品質な吹付けコンクリート施工、吹付けオペレータの省力化等の効果も実証済みである。エフティーエス株式会社は、最適な吹付けオートメーション化を追求するとともに、トンネル建設工事における生産性向上と安全性向上、作業環境の改善にも貢献していく所存である。

6. 謝辞

本開発は、清水建設株式会社、戸田建設株式会社、西松建設株式会社、前田建設工業株式会社の皆様から技術的なご支援や実証現場の提供等、多大なるご協力により成功した。ここに謹んで感謝の意を表する。

引用参考文献

- 1) 清水建設株式会社 小島英郷ほか：山岳トンネル吹付けロボットのリアルタイム厚さ測定システムの開発，土木学会 第76回年次講演会，2021.
- 2) 西松建設株式会社 山下雅之ほか：山岳トンネルコンクリート吹付けの遠隔操作システムの開発，土木学会 第77回年次講演会，2022.
- 3) 前田建設工業株式会社 水谷和彦ほか：山岳トンネルにおけるコンクリート吹付けナビゲーションシステムの開発，土木学会 第78回年次講演会，2023.