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

清水建設（株）正会員○小島英郷　戸田建設（株）　正会員　関根一郎
西松建設（株）正会員　山本　悟　前田建設工業（株）正会員　水谷和彦
エフティーエス（株）　非会員　四塚勝久

１．はじめに

山岳トンネル施工においては，厚生労働省より平成 30 年改正された「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ン」がある. また，令和 2 年に発布された「ずい道等建設工事における粉塵対策に関するガイドライン」があり，コンクリート吹付け作業での本質的な対策として，遠隔吹付技術の導入を検討することとの指針が掲げられており，山岳トンネルの切羽作業に様々な安全管理が求められている.

２．遠隔吹付技術の課題

吹付け作業の遠隔化には，吹付け厚さのリアルタイム把握，一体型吹付け機の無線・無人制御が必要となる. これに対して，主に①コンクリート吹付け中の吹付けノズルと吹付面の距離計測，②吹付けノズル位置の検出，③ベースマシン位置の検出，④吹付けロボットの剛性の向上，⑤吹付ロボットの電子制御技術が必要となる.

吹付け作業中，リアルタイムに厚さ計測が可能なセンサーの機能には，粉塵の影響を受けることなく精度よく計測出来る技術が必要であり，自動車衝突防止などで使用されているミリ波レーダ技術に着目した. ミリ波レーダは，光学系距離センサーと比較すると，環境照度の影響が小さく雨・霧に対する透過性が高い特長を持っている [1]. ミリ波レーダは，吹付け厚さをより精度よく計測するために吹付けノズル周辺に搭載することとしたが，ミリ波レーダ装置分の重量が増えること，稼働性能を低下させない範囲でロボットアームの機械的なたわみ量を抑えること，都度発生する機械的なたわみ量にリアルタイム補正をかけることが必要となった.

３．開発技術の概要

吹付け厚さ計測に，76GHz 帯のミリ波レーダ（精度 1 ㎜以下）を検討し，吹付けコンクリートの付着を防ぐ樹脂製ハードカバーでの防塵・防水モデルとした. 吹付面までの測距装置として，ノズル周囲に等間隔で 6 個のミリ波レーダを配置，相互の電波が誤干渉しないようにリレー照射も検討した.

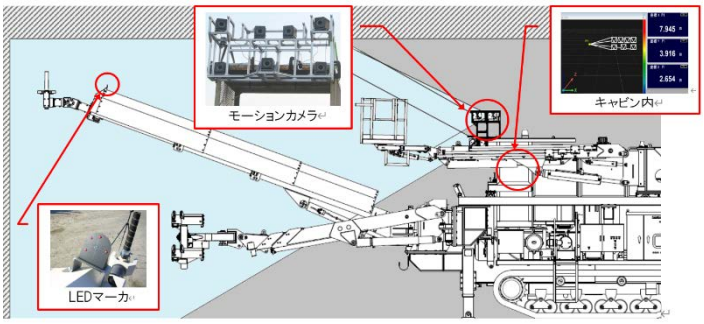

図-1　モーションカメラと LED マーカの位置

吹付けロボット部は，将来の全自動ロボット化も見据えて，新規に 6 軸タイプの高剛性電子制御ロボットを開発した. 新型ロボットは，各関節への角度センサーと，特別に設計した油圧シリンダー内に伸縮計を配置し，作業環境下でのセンサートラブルを未然に防ぐ措置を考案採用している. また，油圧弁には速度調整弁を採用し PLC 制御によるプログラム稼働を可能としている. 吹付け稼働中は，機械たわみ量誤差をリアルタイムでキャンセルしながらノズル位置を精度よく捕捉し，遅延なく制御することが可能となった.

アーム内蔵のセンサーとロボットアームのたわみ量によるノズル位置の誤差は，吹付け中のロボット姿勢により変わり，補正値は常に一定値とならない. 高精度にリアルタイムでノズル位置を追尾測定できる方法として，モーションキャプチャカメラを導入した. トンネル全断面をカバーする吹付け環境下での捕捉カメラは，赤外線帯域のカメラを採用し，よりステレオ的な配置検討を重ねて精度確保を図った. ベースマシンの位置計測技術は，削岩用ドリルジャンボ等に採用される既存技術を導入し，これら全ての測量・計測値を統合してノズル先端の先にある吹付面の座標を測定把握する仕様とした.

キーワード　ミリ波レーダ，モーションキャプチャカメラ，吹付けロボット，坑内 Wi-Fi
連絡先　〒104-8370　東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設株式会社　地下空間統括部　ＴＥＬ03-3561-3891

© Japan Society of Civil Engineers

４．これまでの検証

①ミリ波レーダの検証実験（**写真-1**）：ミリ波レーダの優位性を確認するため，法面にコンクリート吹付けを行い，ノズル位置から吹付け面までの距離をリアルタイムに測定した（**図-2**）．ミリ波レーダは，吹付け粉塵の発生環境下でも安定した距離値を取得したのに対し，レーザー測距計は粉塵が一定以上発生すると，計測不能となった．

②新型吹付けロボットの開発：従来の関節数 8 軸型に対して，2 軸減らした関節数 6 軸のロボットを新たに開発した．ロボットアーム自体の剛性を高めて，吹付け時のアームの揺れを無くしている．また，モーションキャプチャカメラのマーカの視認性も考えて，スライドアームは廃止した．

③モーションキャプチャカメラによるノズル位置計測：吹付面測定の精度確保の為，ノズル位置の測定精度を目標 10mm 以下とした．既存の吹付機械にモーションキャプチャカメラを搭載し，ノズル部にマーカを設置，吹付け中のマーカ追尾機能を確認した．ビーズ反射材が塗布された従来型の円形マーカは，吹付け途中でマーカを見失ったが，自発光 LED タイプのマーカ（4 つの LED を装備し，常時 3 点以上より中心位置を算出）は，吹付け終了時まで見失う事が無かった．

モーションキャプチャカメラは，精度と領域確保のため 7 台の配置とした．トンネル作業環境における防塵・防水対策として，専用カバーを製作し IP55 クラスを確保した（**写真-2**）．

④ミリ波レーダシステムユニット，吹付けロボット，モーションキャプチャカメラ，ベースマシン位置計測システムをすべて統合実装し，実トンネル現場での掘削作業サイクルに組み込んで実証実験を行った（**写真-3**）．切羽に移動した一体型吹付機は，アウトリガーを張ると同時に坑内トータルステーションによりベースマシン測位を開始．同時にベースマシン位置情報を受けたモーションキャプチャカメラはノズル位置の座標を算出，ノズル位置の座標とミリ波レーダの距離データを統合し，吹付け箇所の座標値計測を行った（**図-3**）．

写真-1　ミリ波レーダ検証試験

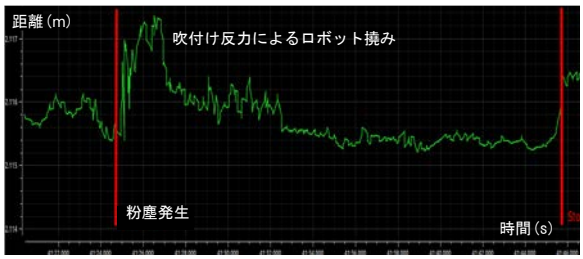

図-2　ミリ波レーダ測定値

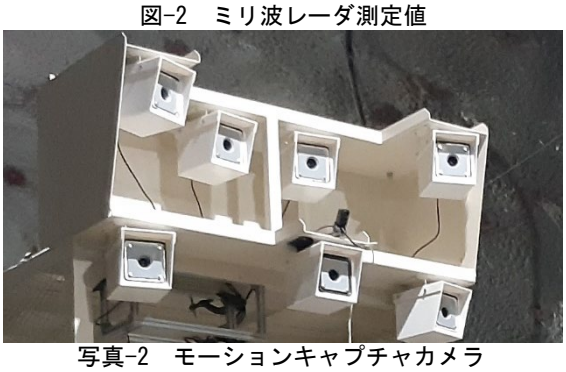

写真-2　モーションキャプチャカメラ

写真-3　吹付試験状況

図-3　吹付け箇所の測定表示画面

５．おわりに

本システムのコア技術である，吹付けコンクリートのリアルタイム厚さ測定の検証は，海外の開発パートナーも坑内 Wi-Fi 網を利活用したオンラインで参画し検証した．吹付け厚さ状況の描画ソフトウエアには課題も残ったが，今後，高速演算と誤差精度の改善向上を進めるとともに，無線化による遠隔操作，および，シーケンシャルプログラムによる完全自動ロボット化に向けた開発を着実に進めてゆく．

参考文献

1)小川，夏目：車載ミリ波レーダの開発：通信ソサイエティマガジン NO.47 冬号 2018 電子情報通信学会

© Japan Society of Civil Engineers