

力触覚を利用した自動火薬装填システムの自律操作について

(株)大林組 正会員 ○渡辺 淳, 久下 敦
 正会員 西浦 秀明, 谷口 信博
 慶應義塾大学 正会員 堀越 萌, 野崎 貴裕
 小谷 惟清, 斉藤 佑貴

1. 目的

近年、土木分野においてもデジタルトランスフォーメーション (DX) が推進され、様々な工種で自動化、遠隔化が進んでいる。特に山岳トンネルの重大災害は多くが切羽で発生していることから、厚生労働省の「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」¹⁾や日本建設業連合会の「トンネル切羽範囲内立入作業における安全対策指針」²⁾が発表されている。これにより、切羽天端から45度範囲内での立ち入らない支保工建込、ロックボルト打設など山岳トンネルの自動化、遠隔化の開発が進んでいる。一方で火薬装填作業や結線作業は、火薬という鋭敏なものを扱うため、装填作業の機械化は現状進んでいない。このため、簡易な設備の追加による落石防護・監視の強化や、2m程度切羽から離れて施工できる遠隔装填などによる安全対策をすることで、切羽に立ち入り作業しているが、いざ落石が起きた場合、被災する可能性がある。本研究では、「切羽へ立ち入らずに無人で装薬すること」を目的とした装填システムの開発に取り組んでいる。鋭敏な火薬を取り扱うためにも、装填作業の機械化には、従来の人が手で行う繊細な力加減が必要となる。そこで、力触覚伝送技術 (以下、リアルハプティクス) を活用し、器用で柔軟な装填システムの実現を目標としている。本報文では、自動装填システムと自動装填システムの自律操作について述べる。

2. 自動装填システムの概要および課題

本システムは、「切羽への立ち入りを必要としない自律的な装薬」とすることで、安全及び作業性を確保するものである。ジャンボや高所作業車等の移動式大型機械の先端に、装填ロボット (以下、装填RB) や結線ロボット (以下、結線RB) を搭載するものである本システムの概要を図-1に、装填RBの概要を図-2に、従来技術と本技術の比較を表-1に示す。大型重機により装填RBを孔の近くに移動した後に、図-3に示すよう

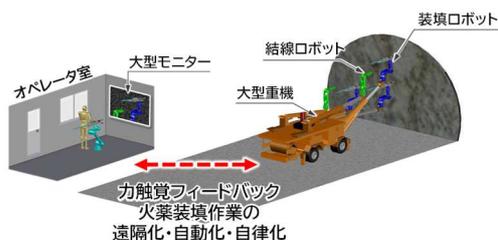


図-1 自動・自律装填システム概要

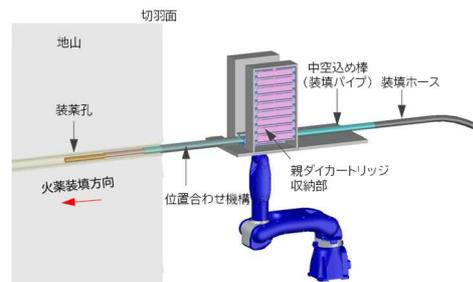


表-1 従来技術と本技術の比較

	従来	切羽とロボットが近づいた状態の本システム		
		遠隔操作	自動操作	自律操作
対象爆薬	含水爆薬、ANFO爆薬、バルクエマルジョン等のゲル状爆薬			
対象雷管	電気雷管、電子雷管、導火管付き雷管、無線雷管			
施工位置	切羽直下 (0~2m)	切羽から10m以上		
装填	人がコメ棒で親ダイ、増しダイ、アンコ押し込み装薬 機械装填機の先に親ダイを入れて、装薬孔先端まで押し込んだ後に、エア等で増しダイ、アンコを装薬	リアルハプティクス技術を活用した装薬RBを遠隔で人がリモコン操作	遠隔操作で行ったデータを再現することで、リモコン操作なく自動装填	孔の角度や大きさ等の形状の変化に対応した自律操作
結線	人が脚線を割き、一本一本ねじり 導火管付き雷管の場合、束ねてパンチコネクターで結線	リアルハプティクス技術を活用した結線RBを遠隔で人がリモコン操作し脚線をつかんだ後に自動結線	遠隔操作で行ったデータを再現することで、リモコン操作なく自動結線	脚線の自動判別による自律操作
施工性	人の視覚、触覚で作業	視覚をカメラで、触覚をリアルハプティクスで遠隔での作業	遠隔操作の再現による自動装填・結線	形状の変化などは自律的な対応をし、自律的に装填・結線

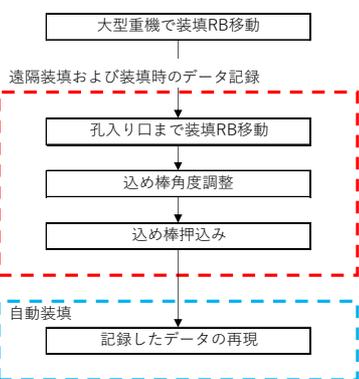


図-3 遠隔装填・自動装填フロー

キーワード 火薬, 遠隔装填, 自動装填, リアルハプティクス, 力触覚

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 TEL 03-5769-1319

に遠隔装填，自動装填するものである。装填 RB や結線 RB はリアルハプティクス技術により遠隔操作時に，ロボットの触った触覚をオペレータ側にもリアルタイムに伝送する技術を搭載している。筆者ら³⁾は，力触覚を利用した自動装填システムに関する要素試験について報告している。写真-1 に示す要素試験で，①力触覚をリアルタイムに伝送したことで装薬孔への遠隔装填，②遠隔操作の再現した自動装填に成功している。ここでの自動化は遠隔操作の再現であるため，装薬孔ごとに遠隔操作を行い，学習する必要があった。従来，山岳トンネルの火薬装填で用いられる装薬孔は，地山状況により，位置や角度と様々な条件で行われるため，すべての装薬孔が一樣ではない。このため，装薬孔の位置や角度を分析し，自律的に装填 RB を移動し火薬の装填を行うことが課題となる。一般的な発破パターンを図-4 に示す。



写真-1 要素試験

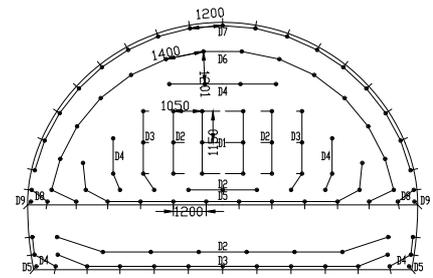


図-4 発破パターン(例)

3. 自律操作への課題および解決策

装填 RB の自律操作にあたり，孔位置や孔と装填 RB との角度を検知して自律的に移動することが課題となる。自律的な位置調整や角度調整を行った後に記録した孔へ装填動作を再現することで，自律的な装填が可能となる。孔位置検知，位置調整⁴⁾や角度調整⁵⁾の解決策について述べる。

①孔位置検知

孔位置検知には，ステレオカメラや LiDAR を装填 RB に搭載し，計測機器からの深度情報を使うことで孔の位置を判断する。得られた深度情報から閾値を設け二値化(白黒)することで，孔および孔の中心を検知する。装填 RB に搭載したステレオカメラの状況を写真-2 に，ステレオカメラによる深度情報，深度情報から得られた孔，孔の中心の抽出を図-5 に示す。

装填 RB に搭載したステレオカメラから孔までの距離毎に孔の見え方を確認した。図-6 に示すように，40 cm から 100 cm まで孔検知および中心位置の確認ができた。また，孔を精度良く見分けるため，孔とカメラの適切な距離は 40 から 60 cm となった。



写真-2 ステレオカメラ搭載装填 RB

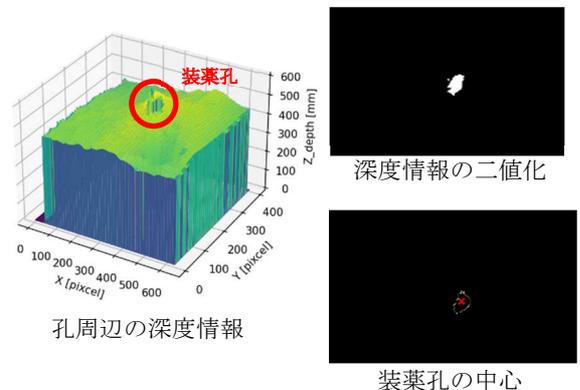


図-5 深度情報から得られた装薬孔

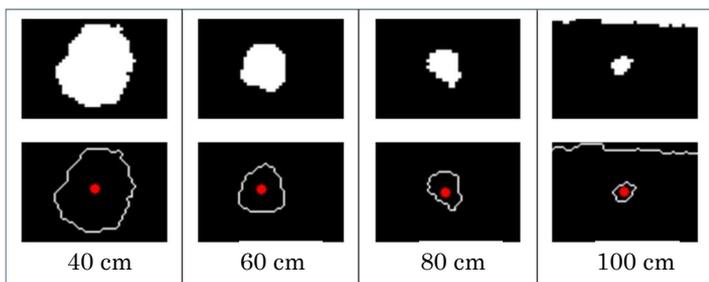


図-6 ステレオカメラと孔までの距離による見え方

②位置調整

位置検知した孔の中心位置および深度情報から、計測機器から孔の中心および入り口までの距離がわかる。装填RBのロボットアームを演算した距離分移動させることで、自律的に孔の入り口まで装填RBを移動することができる。

③角度調整

深度情報を二値化した過程に、検知した孔の輪郭に外接する楕円を抽出する。孔に外接する楕円を図-7に示す。孔を正面から見た場合と、角度をつけて孔を見た場合とで、楕円の面積の変化や楕円の長軸と短軸の比（以下、縦横比）が変化する。面積の場合、図-8に示すように、正面から見た場合と角度をつけた場合で、正面から見た場合の面積が最大となる。縦横比の場合、図-9に示すように、正面から見た場合が最も真円に近づく。楕円の面積が最大になる、もしくは、真円に近づく、装填RBと孔が正対することになる。

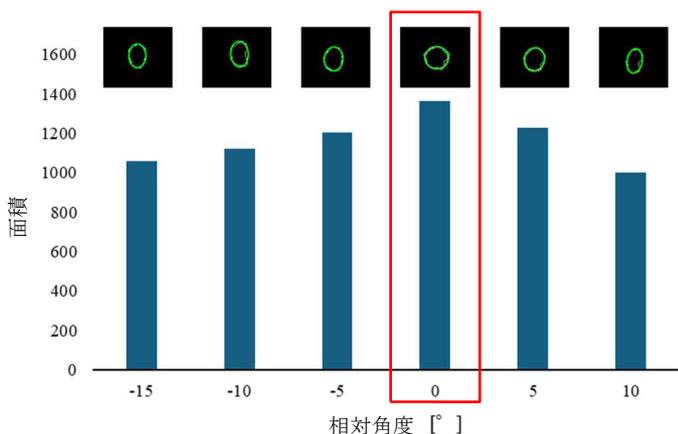


図-8 相対角度と楕円の面積の関係



装薬孔の中心 外接する楕円
図-7 孔に外接する楕円の抽出



図-9 カメラとの距離による孔の見え方

4. 自動装填システムおよび自律操作

上記の解決策を用いて、孔検知、孔までの装填RBの移動、向き調整を自律的に行う。自律操作のフローを図-10に示す。初期データと同じ孔で行う自動装填の手順は、①遠隔操作で装薬（初期データを記録）、②記録したデータを再現することで自動装填となる。初期データと異なる孔で行う自律操作の手順は、①正面からの遠隔操作で装薬（初期データを記録）、②カメラで次の孔位置および角度検知、③検知した角度に装填RB 込め棒の向きを自律的に角度調整、④検知した孔位置へ自律的に装填RBを移動、⑤初期データの再現により、孔まで自律的に移動し、装填するものである。

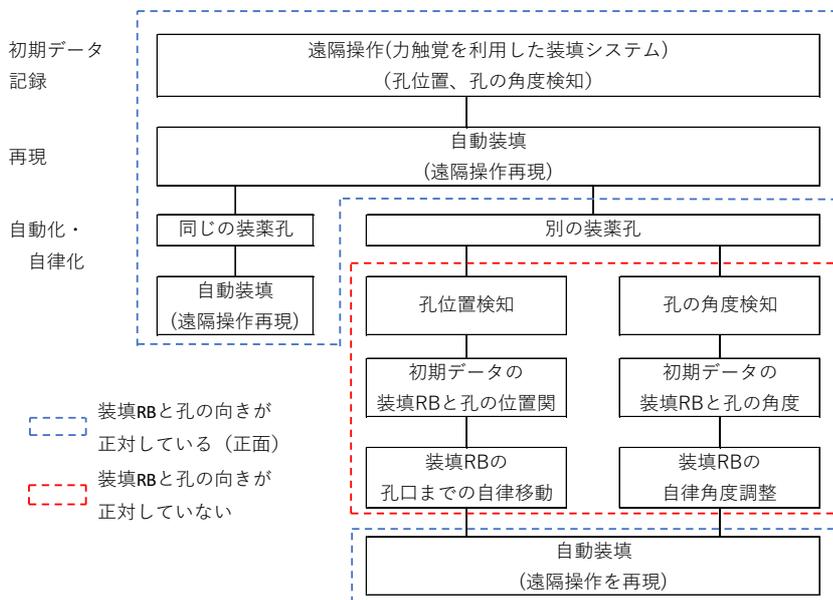
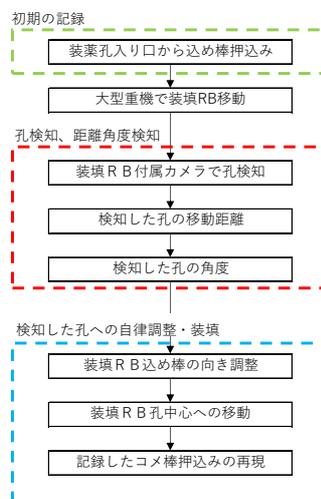


図-10 自律操作のフロー



大型重機に搭載した場合のフロー

5. 要素試験

要素試験をするにあたり、写真-3 に示すように装填 RB を高所作業車に搭載している。要素試験では、遠隔装填、遠隔操作の再現である自動装填、さらに自動装填システムの自律化を行った。

(1) 遠隔装填・自動装填

高所作業車に装填システムを搭載して、遠隔装填試験、自動装填試験を行った。既往の報告と同様に大型重機に搭載していても、遠隔時の操作性にも問題なく、以下のことが確認できた。

- ・室内外での遠隔装填が可能であった（200m の遠隔操作）。
- ・触覚のリアルタイムな伝達により、切羽にぶつかったかどうか、装薬孔と接しているかどうか、遠隔地で判断でき、孔に正対しながら入れることができた
- ・触覚のリアルタイムな伝達により、火薬を安全に装填ができた。過度な負荷を感じた際は、緊急停止をするため、暴発の危険性がなくなる。
- ・遠隔操作で記録した孔への再現での装薬も可能であった。

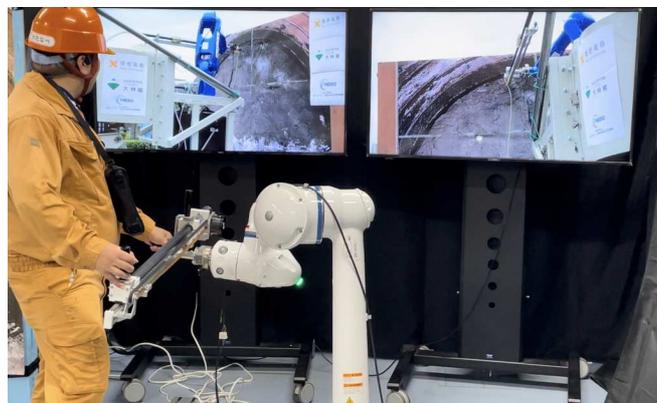
(2) 自動装填システムの自律化

自律化の手順は①高所作業車で装填 RB を孔の近くへ設置（切羽から 50 cm 程度）、②ステレオカメラで孔検知、③孔角度・孔中心位置へ移動、④込め棒押込みの再現である。この手順で行った結果、自律操作により装填することができ、以下のことが確認できた。

- ・孔の近くまで装填 RB を移動した後は、ボタン一つで装填まで可能であった。
- ・カメラでの孔検知で自律的に移動した方が、装填 RB を早く動かすことができた。
- ・人の判断無しで、火薬装填作業が可能となる。



切羽側



操作室側（遠隔装填時）

写真-3 要素試験

6. まとめ

リアルハプティクス技術を用いた自動装填システムを大型重機に搭載したことにより、室内試験と同様に遠隔装填、遠隔装填の再現である自動装填ができた。大型重機で装填 RB を孔の近くへ移動した後は、カメラで孔を検知し、検知した孔への装填 RB の移動や孔への向き調整を自律的に行い、最後に記録した火薬の押し込み動作の再現をことで、人が操作することなく、装填が可能になる。これにより、火薬装填作業時の肌落ち災害リスクの低減、1 孔ずつ人が判断して装填することが不要となるため、省力化に寄与する。

7. 今後の展望

本技術は、現状、模擬火薬や模擬切羽で切羽に立ち入らない自動装填、自動装填の自律化の実験である。今後は、ジャンボなどの大型重機への搭載、実切羽や実火薬での装填試験を行い、実現場で適用できるように進めていきたい。

謝辞: この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP20004) の結果得られたものです。

参考文献

- 1) 厚生労働省：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，2018.1.18
<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html>, (参照 2024.8.1) .
- 2) 日本建設業連合会：トンネル切羽範囲内立入作業における安全対策指針
<https://www.nikkenren.com/publication/fl.php?fi=1260&f=20220518tunnel.pdf>, (参照 2024.8.1) .
- 3) 渡辺淳ほか：力触覚を利用した自動自律装填・結線システムの開発，第 33 回トンネル工学研究発表会，報告 I -20, 2023.
- 4) 渡辺淳ほか：力触覚を利用した自動装填システムの自律化について (その 1)，土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，VI-1014, 2024.
- 5) 堀越萌ほか：力触覚を利用した自動装填システムの自律化について (その 2)，土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，VI-1015, 2024.