

37. 四足歩行ロボットによる現場管理業務の 遠隔化・自動化に関する研究

(株)竹中工務店 技術研究所 ○錦古里 洋介
戸田 武
(株)竹中土木 技術・生産本部 千葉 力

1. はじめに

1.1 背景

建築・土木業界は、投資額と建設就業者の推移(図-1)が示す通り、近年、投資額は顕著に増加するも、就業者数は微減している。高齢者が占める割合も微増しており、就労状況は依然厳しいといえる。一方で WLB 向上や残業時間低減が強く求められており、その解決策として、デジタル技術やロボット技術の導入が各所で盛んに進められている。

1.2 目的

現場管理には、「現地現物現時」という言葉がある。これはしかるべきタイミングで現地に赴き、現物を前にして管理することが肝要であることを言い表しているが、往復が頻繁になるなど移動時間が大きな負担になっている。そこで、現場管理に伴う移動時間の縮減を目的にロボットの導入を試みた。本論文では、前述の目的に適したロボットを選定し、

- ・ロボットの遠隔操縦と自律移動機能
- ・現場管理業務を遂行するためのテレプレゼンス機能

について、実現場での活用を想定したときの確認事項を抽出し、検証した結果を報告する。

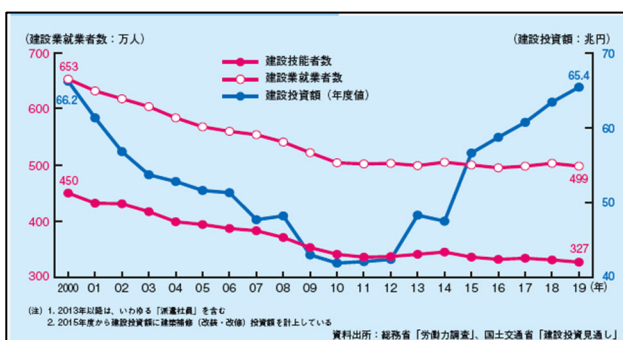


図-1 投資額と建設就業者の推移¹⁾

2. 四足歩行ロボットによる現場管理業務の遠隔化と自動化

2.1 現場管理業務の選定

移動時間縮減に直結する現場管理業務を調査し

たところ、汎用性および導入効果の観点から以下を実現性・有用性が高い業務と想定した。

(1) 現地確認や意思疎通を伴う管理業務

現地現物現時で行う業務には、主に現地を目視確認すること、現地にいる同僚や協力会社社員とコミュニケーションを取るものの頻度が高い。これを自席にいたまま遠隔で実施できれば、時間削減に直結すると考えた。

(2) 進捗管理業務

現場の進捗管理は通常目視確認で行うが、自動で撮影した写真を活用して進捗管理を行う方法も考えられる。写真を後日活用できるという副次効果も期待できる。ただし本件についての検証実験結果は本報告の対象外とさせていただく。

2.2 現場管理業務に適したロボット

前述した現場管理業務をロボットで対応するためには、現場の階段・段差や状況変化などに対応できる、高度な走破性能を持つロボットが必要となる。我々は数あるロボットから、特に階段の走破性能を重視し四足歩行ロボットを導入した。



写真-1 四足歩行ロボット「Spot」外観

(1) 四足歩行ロボットの仕様

四足歩行ロボットは、Boston Dynamics 社(アメリカ、以下 BD 社という)製の「Spot」を採用した。「Spot」は、高い走破性能と障害物回避能力を有しており、かつ背面にユーザーが任意の機能を付加できる設計になっているため、我々の構想にきわめ

て近いロボットといえた。外観を写真-1 に、主要諸元を表-1 に示す。

表-1 四足歩行ロボット「Spot」の主要諸元

項 目	仕 様
自重	32.5 kg (バッテリー含む)
寸法	全長 1,100 mm 全幅 500 mm 全高 840 mm (立位時：背中レベルまで)
平均作動時間	1.5 H (ペイロードなし)
積載荷重	約14 kg
最高歩行速度	1.6 m/s
最大乗り越え可能段差	300 mm
最大登坂角度	±30 deg
オプション (標準の一例)	自律移動時 標準オプション + LiDARを使用 遠隔操縦時 標準オプション + INSPECTIONを使用
ソフトウェア	バージョン 1.1.4 ~ 2.3.2 (実験当時)

(2) 遠隔操縦機能と自律移動機能

「Spot」は2種類の方法で動かすことができる。ひとつは、操作者がコントローラを持ち、離れた場所から操縦する方法で、これを「遠隔操縦」機能と呼称する。インターネット回線を通信手段として用いることで、遥か遠く離れたところからの操縦も可能になる。他方は開始時に指示をするのみで、以後は「Spot」が自律的に歩行する方法で、これを「自律移動」機能と呼称する。これらはBD社の開発範囲であり、将来の実運用のために、建築・土木現場においても十分に性能を発揮できるかを検証することが、今回の実験目的となる。

(3) テレプレゼンス機能

現場管理業務を遠隔化メニューとして、「テレプレゼンス」機能のロボットへの実装を考える。「テレプレゼンス」とは、遠隔地にいながらまるで現地にいるかのように感じられる技術の総称である。今回においては、没入感ではなく現地との情報交信を不足なくできることが重視される。今回報告する技術を、「テレプレゼンス」機能と呼称する。

3. 確認事項の抽出と検証実験

前述した各機能の現場での検証実験にあたり、個々の確認事項を抽出する。

3.1 遠隔操縦機能の確認事項

ロボットを建築・土木現場で利活用するための環境や制約条件に特に規定はない。そのため、想定される懸念事項を実現場にて再現し、成否を確認する必要がある。確認事項の抽出結果を表-2 に示す。なお、確認項目の多くは、走破性能に関する事項であり、これは自律移動にも直結する。

3.2 自律移動機能の確認事項

「Spot」に搭載されている自律移動機能は、ティーチングプレイバック方式である。自律移動(プレイバック)の際、ロボットは事前のマッピングデータと現状を重ね合わせて自己位置を把握するが、

認識範囲が広いほど、特徴的であるほど成功しやすい。土木現場の開けた外部空間、建築現場での無柱空間などでも自律移動が成功するかは、様々な現場を歩かせてみないとわからない。表-3 に自律移動機能の確認事項を示す。

表-2 遠隔操縦機能の確認事項

確認対象	概要	確認事項
通常移動	本設階段 (特別避難階段)	踊り場のある折返し鉄骨階段
	仮設の階段 (ステップ)	段差部に乗り移るための数段の階段
	盛土で生成した法面	バックホウのバケットで締め固めた程度の法面
不安定不陸	床面上の不安定な状態	コンクリート床面上に単管を固定せずに配置
	不整地の通行路	土木現場での一般的な通路
操作感	操縦性や視認性	遠隔操作をロボットを目視できない状態で行う 操作者が安心して操作できるか、 周囲の視認性がよいか、

表-3 自律移動機能の確認事項

確認対象	概 要	確認事項
周辺環境	屋外環境	太陽光や日影などの影響
	空間	スパン20m程度の建築現場
		半径50m超の広範な土木現場
周囲の変化	事前ティーチング時点との相違	工事進捗に伴う壁の追加
		通路上の予期せぬ障害物

3.3 テレプレゼンス機能と確認事項

「テレプレゼンス」は、人間の視覚・聴覚・発話機能を備えることが最低限必要である。また図面や指示を明確に相手に伝える方法があるとよいと考えた。表-4 に我々が必要と考える機能および実験での確認事項を示す。

表-4 テレプレゼンス機能と確認事項

機 能	概 要	確認事項
会話 図示 説明	特定の相手との顔を見ながら会話	遠隔会議システム 作業所環境の中で十分に対話が成立するか、 (遅延の有無、聞き取りやすさ)
	図面や資料などを操作者側から明示	プロジェクターにて壁や床などの平面に投影 作業所環境の中で相手が十分認識できるか、 (輝度や解像度)
	特定の相手とのやりとりを開始するための呼びかけ	マイク・スピーカー 作業所環境の中で、特定の相手が呼びかけられていることに気づくか (出力の大きさ)
周囲の確認 (視覚聴覚)	現地で確認したいところを詳細に見る	高精細カメラ (パン・チルト・ズーム機能付き) 施工管理するレベルで対象物を視認できるか
	歩行時に周辺の状況を視認、また操作者に向けた合図を認識	歩行補助・周辺視認用カメラ 作業所環境の中で十分に視認できるか
	周辺の作業音や、呼び止められている声を聴く	マイク 作業所環境の中で発生音を認識できるか

4 検証実験と結果

4.1 実験実施現場

3.1~3.3 に示す確認事項を現場実験にて評価した、実験実施現場の概要と実施時期を表-5 に示す。な

お、表-1 に示す自律移動用オプションは、実験 A・B では使用せず、本体の赤外線を使用したデプスカメラのみ、実験 C~E にて+LiDAR を採用した。

表-5 実験実施現場一覧

	用途	規模	延床面積・延長	実施時期
実験A	複合型商業施設 (福岡県)	地下 - 地上 9 階 塔屋 -	約20,000m ²	2020年2月
実験B	道路 (神奈川県)	切り盛り土 約 2,210千m ²	約2,000m (延長)	2020年8月 (1 回目)
実験C	物流施設 (神奈川県)	地下 - 地上 6 階 塔屋 -	約300,000m ²	2020年10月
実験D	事務所ビル (大阪府)	地下 1 階 地上 21階 塔屋 2 階	約30,000m ²	2020年11月
実験E	道路 (神奈川県)	切り盛り土 約 2,210千m ²	約2,000m (延長)	2021年3月 (2 回目)

4.2 遠隔操縦実験と結果

(1) 通常移動，不安定・不陸か所の通行

実際に各現場に設営されている設備を用い表-2 に示す項目を確認した。実験状況を写真-2 に示す。



写真-2 走破性能の実験状況

(2) 操作感

「Spot」を直接視認できない場所から操作を行うことで、実運用時の操作感を実験した。実施状況を写真-3 に示す。

(3) 遠隔操縦機能の実験結果

いずれの実験においても「Spot」の仕様範囲内に限っているが、特に実験 C 以降において、安定した良好な結果を得た。これは「Spot」の歩行に関するソフトウェアが大幅に更新されたことが主因だが、十分な性能は実用化に向けての大きな安心材料となった。また、各実験では多くの被験者にも操作していただいたが、操作が直感的であることもあり全員が問題なく操作できた。一方、コントローラの画面越しに見るロボット周辺の視認性には不安を覚えるものもいた。特にロボット自体が障害物回避行動したときが顕著であった。たとえ不慣れな操作者でも安心して使用できるような操作画面の改善を考えていく必要がある。

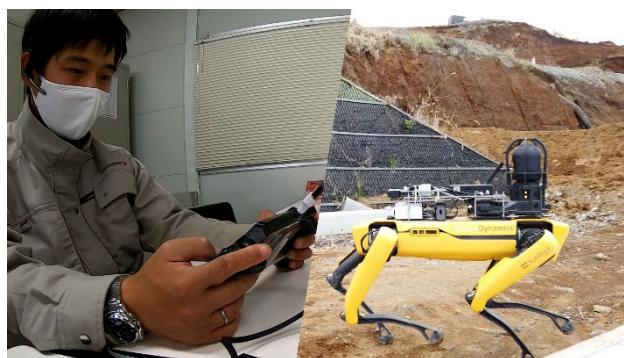


写真-3 遠隔操縦時の操作感実験

4.3 自律移動実験と結果

(1) 周辺環境

自律移動における周辺環境側の課題は、搭載機器の性能と自己位置認識処理のアルゴリズムに依存している。そこで相当規模の空間で、無事に自律移動を完遂できるかの実験を行った。表-6 に各現場での実験概要を示す。デプスカメラのみか LiDAR 使用かは、4.1 記載による。

表-6 自律移動の実験概要

実験	周辺状況 フロア数	走行距離	備 考
実験A	幅3mの廊下中心 1フロアのみ	約60 m	
実験B	屋外の資材置き場 半径50m以上の開けた空間	約150 m	
実験C	片側に壁のある屋外通路 スパン15m程度の既存施設 4フロア	約700 m	フロア間移動はスロープ
実験D	スパン20mの新築建物内部 4フロア	約500 m	フロア間移動は階段およびスロープ
実験E (実験Bと同一)	屋外の資材置き場 半径50m以上の開けた空間	約150 m	

(2) 周囲の変化

ティーチング時とプレイバック時の周囲の差異が大きいとロボットは自己位置を見失ってしまう。そこで実験 D では区画壁工事の進捗が著しいか所を選定し、自律移動実験を行った。自律移動時の状況を写真-4 に示す。

(3) 自律移動機能の実験結果

デプスカメラのみを使用していた実験では、仕上がりが進みロボットの近くに特徴点が多くみられる実験 A でこそ成功したが、実験 B では失敗に終わった。赤外線とデプスカメラでは日照の影響・視認距離不足から、広範な建築・土木現場での活用は困難であることが分かった。

一方実験 C 以後は屋内外問わず、広範な空間でも長距離の自律移動を無事に完遂できた。デプスカメラに比べ、レーザー光は長距離に適応し、日射の影響にも強いためと考えられる。実験 D で行った周囲の変化へも適応できたことから、相当量の

変化にも対応できることが分かった。LiDAR 使用の場合、遠方もマッピング対象となるため、重ね合わせに成功しやすいと考えられる。



写真-4 自律移動時の環境変化

4.4 テレプレゼンス機能の実験結果

(1) 会話・図示説明の機能

テレプレゼンス機能は独自に開発実装を進めることとした。検証用としてタブレット端末と通話機構および、プロジェクターのみを搭載して実験を行った。写真-5 に実施状況を示す。

(2) 周囲の確認

現場管理業務において目標物を高精細に視認できることは重要である。これには表-1 に示す標準オプション+INSPECTION に搭載された、PTZ (パン・チルト・ズーム) カメラを用いた。写真-6 に鉄骨のハイテンションボルト締込み後のマーキングのズレをチェックする業務を想定したときの、操作者から見えているモニターの画像を示す。



写真-5 テレプレゼンス機能の実験

(3) テレプレゼンス機能の実験結果

実験 C・D にて、使用感を広く体験してもらったところ両者ともに良好な意見が得られた。ただし、屋内用のマイク・スピーカでは現場の喧噪にかき消されてしまい、正確なコミュニケーションは難しい。これはヘッドセットと併用することで解決した。プロジェクターを用いた資料投影は屋内では十分認識でき、多くの期待が寄せられた。

PTZ カメラによる現場管理は、目視確認としては十分精細であった。一方、人間の様に体を動かして、見えないか所をのぞき込むといった動作はで

きないため、すべての目視が可能ではないことも改めて感じた。今後、今回の知見を導入した開発モデルを製作実装し、機能検証と短中期間程度の PoC を行う計画としている。

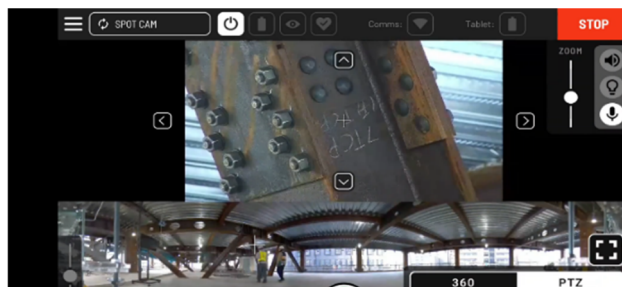


写真-6 操作者から見えているモニター画面

5. 実験結果まとめと期待される効果

5.1 実験結果のまとめ

4 章に示す一連の実験によって、建築・土木現場を対象とした遠隔操縦、自律移動機能と現場管理業務の将来の実運用に向けて、良好な結果を得ることができた。一方、ロボットを日常的に使用するには、専門技術者が適時サポートする体制が必要であるとの結論を改めて得た。

5.2 期待される効果

一連の実験を通じ、四足歩行ロボットの導入による現場管理業務時間の削減量を期待される効果として試算したところ、現場管理業務の内 25% 程度を削減できる見込みとなった。これは業務全体の 10% 程度の削減に相当する。

6. おわりに

四足歩行ロボットを用いた現場管理業務の遠隔化・自動化について、遠隔操縦・自律移動・テレプレゼンス機能のそれぞれについての検証実験を行い、多くの知見と新たな課題を得ることができた。今後も背面に搭載させる業務機能の開発改善と実現場での実験を繰返し、実運用に耐えられるレベルを目指す。また、削減効果を最大化するために、ロボット運用体制構想を具体化していく。

また、2020 年からは同じ目的を持つ鹿島建設(株)と竹中グループ 2 社との 3 社共同研究²⁾を開始している。本報告に示す知見をより詳細に共有し、実用化の加速を図る。

最後に、現場実験にあたり現場のスペースと時間を貸していただいた関係各位、建築主の皆様には誌面を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 一社日本建設連合会：建設業ハンドブック2020, pp.18, 2020年
- 2) 竹中工務店ホームページ： <https://www.takenaka.co.jp/news/2020/12/01/index.html>, 2020年