

四足歩行ロボットによる施工管理の自動化と遠隔化

株式会社竹中工務店

戸田 武

錦古里 洋介

宮口 幹太

株式会社竹中土木

倉知 星人

千葉 力

1. はじめに

建設業界では労働者の急速な高齢化と若年層の減少が深刻化しており、今後更に労働者数が減少することが見込まれている。また、2019年に施行された改正労働基準法に基づく時間外労働の上限規制が2024年から建設業においても適用開始となり、大幅な人手不足が懸念されている[1]。そのため、業務の効率化や省人化、無人化を進め生産性を向上させる必要があり、その一端を担う要素としてロボット技術が挙げられる。

これまで建設業においても様々なロボット技術が提案され導入が進んでいるが、その多くは搬送用あるいは作業用ロボットであり、施工管理業務をターゲットとしたロボットの導入事例は少ない。一方で近年、走破性・カスタマイズ性の高い汎用四足歩行ロボットが相次いで発表され注目を集めており、その一用途として施工管理業務への活用も期待されている。施工管理は業務処理が多岐にわたり煩雑である点や、エレベータ等のインフラが整備されていない現場内で突発的な事項を含めたフレキシブルな対応を求められる点から、これまでロボットによる業務効率化が進んでこなかったと考えられるが、先に挙げたような特徴を持つロボットであれば、その活用次第で負担の大きな現場への移動を軽減できる可能性がある。このような背景から、当社では2018年より四足歩行ロボットによる施工管理業務の自動化と遠隔化を目的とし、適用可能性の検証を含め研究を行ってきた。

本稿では、当該研究において実際の建設現場にて行った検証から得られた知見と課題を報告する。

2. 四足歩行ロボット

本研究では図1に示す四足歩行ロボットを使用し検証を行った。表1に主要スペックを示す。このロボットは標準で階段・不整地の歩行機能や障害物回避機能、自律移動機能を有する点が特徴である。更に、様々な搭載機器に対応可能なI/Oインターフェイスを備え、ユーザが独自のソフトウェア開発を行うためのSDK (Software Development Kit) がオープンソースで提供されるなど、カスタマイズ性の高さも特徴である。以下このロボットが備える主要機能を概説する。

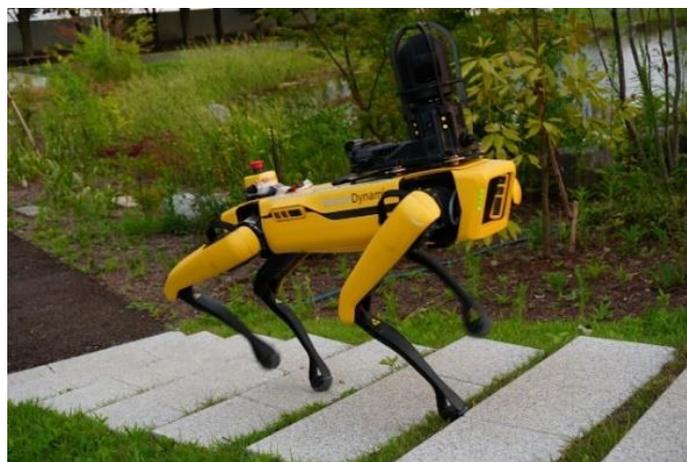


図1 ロボット外観

表 1 ロボット主要スペック

重量	32.5 kg (バッテリー含)
サイズ (L x W x H)	1100 x 500 x 610 mm (オプションなし標準歩行時)
バッテリー容量	605 Wh
稼働時間	1.5 h
最大積載重量	14 kg
最大歩行速度	1.6 m/s
許容段差高	300 mm
登坂性能	+/- 30 deg.
通信	Ethernet / Wi-Fi 2.4 GHz
センサ	赤外線ステレオデプスカメラ: ~4 m, 5 セット 360 deg. RGB カメラ (オプション) PTZ カメラ (オプション): 最大 30 倍光学ズーム 3D LiDAR (オプション): ~100 m

2.1 階段・不整地歩行機能

脚型の移動ロボットは、車輪型やクローラ型のものとは比べ走破性に勝る点が最大の特徴である。このロボットも 4 脚 12 自由度の脚移動機構を活かし、様々な不整地の走破が可能である。段差高としては、表 1 にも示したように 300mm の高さまでは乗り越えて歩行が可能である。階段についても、米国の建築基準法に準拠した階段 (7 inch rise/10-11 inch run) は歩行可能であり、踏面がグレーチング材のものや蹴込板のないオープン階段にも対応する。階段の歩行時には、歩行モードと呼ばれるロボットの内部ステータスを通常歩行用から階段歩行用に切り替える必要がある。また、30 度までの斜面を歩行することも可能である。

2.2 障害物回避機能

このロボットは、本体周囲に備えた 5 台の赤外線ステレオデプスカメラを用いて常に周囲 360 度の 3 次元形状を計測しており、この情報を用いて障害物回避を行う。深度としては最大 4m 程度の範囲を取得可能で、障害物に対して最大 500mm の距離を取り移動する。300mm 以下の高さの物については乗り越えて歩行可能と判断し回避動作は行わない。また、ガラス等の透明な物体や幅約 30mm 以下の物体などの判定は難しく回避することができない。更に障害物が動体の場合、その移動先を推定する処理は行われなため、回避することができない。このような障害物が存在する環境で利用するためには、回避機能の拡張や環境側での仕組みづくりなどが必要となる。例えば透明なガラス壁面環境であっても、幅 30mm 以上のテープを貼るだけで衝突を避けることができる。

2.3 自律移動機能

このロボットはティーチングプレイバック方式の自律移動機能を有する。事前に手動操縦によりロボットを実際に移動させることで経路設定およびマッピングを行い、その後同じルート上を自律移動することが可能となる。マッピングには基本的には 2.2 節でも示したデプスカメラを用いるが、更に最大 100m 程度まで深度情報を取得できる 3D LiDAR を搭載することでマッピング範囲を拡張できる。また、マッピング時に特定のポイントで写真撮影を含むアクションを設定することができ、例えば定点撮影のように使用することができる。

3. 建設現場における四足歩行ロボットの適用可能性検証

四足歩行ロボットの現場での活用にあたり、まずはその適用可能性を確認すべく走破性能および自律移動性能、遠隔操縦環境に関して基礎検証を行った。

3.1 走破性能検証

建設現場においては移動ロボットにとって悪条件となる様々な環境が想定され、そのような環境にどこまで耐えるかはロボットの移動範囲やアプリケーションを設計する上で非常に重要である。そこで様々な環境を想定し、ロボットの走破性能を検証した。

まず想定される環境として、仮設のものを含む階段が挙げられる。垂直移動手段としては現場内に設置された仮設エレベータや本設エレベータの使用も考えられるが、エレベータ類は作業員の移動や資材の搬送への使用優先度が高く、施工管理用途のロボットは階段移動できる方が望ましい。2.1 節で示したようにこのロボットは階段歩行に対応しており、実際の日本国内の建設現場の階段においても問題なく歩行可能なことを確認した(図 2 左)。同様に蹴込板のない仮設階段でも歩行検証を行い、走破可能であった。但し、安全管理の観点からヒューマンエラーや突発的不具合を含めた事故で万が一落下する可能性を考慮すると、事故が起きても被害を最小限にする対策が必要である。対策としては、音や光を使い周囲へロボットが歩行中であることを周知する仕組みを作製することや、ロボット周辺での行動ルールを設計し周知徹底することが挙げられる。

また、特に土木工事現場では土を締め固めた法面を歩行する状況が想定される。そこで、ロボットの登坂性能の限界である傾き 30 度程度の盛土法面歩行を行った(図 2 右)。ここではバックホウのバケットで締め固めた法面環境を使用した。結果としては脚先の滑りは見られるものの転倒することなく歩行することができた。当然表面の状態や摩擦によっては走破不可能なケースも存在すると考えられるが、基準となるケースとして有用な知見を得ることができた。

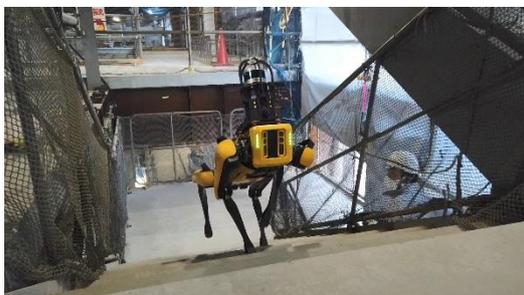


図 2 階段歩行と法面歩行

更に、足元が不安定な状況での走破性能を確認する検証も行った。図 3 に資機材を用いて悪路を再現し行った検証の様子を示す。結果としてこのような不安定な足元状況でも転倒することなく歩行可能なことを確認でき、アプリケーション設計に向けた貴重な材料を得られた。

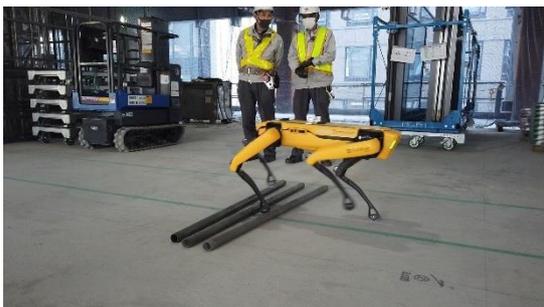


図 3 資機材上の歩行

3.2 自律移動性能検証

移動ロボットの制御方法は、人手による操縦か自律移動かの 2 つに大別される。建設現場においては定期巡回のような業務として自律移動の使用が期待されている。

建設現場では屋外含めた様々な移動環境が想定されるため、複数の異なる環境で自律移動機能の性能検証を行った。結果としてはいずれの検証でも自律移動を達成することができたが、周囲に壁面のある比較的狭い環境ではデプスカメラのみを使用した自律移動が可能であった一方、屋外環境や壁面のない比較的疎な環境においてはデプスカメラのみでは自己位置をロストし、LiDAR を併用することで自律移動が可能となった。屋外環境においては太陽光の影響も考えられるが、様々な環境で汎用的に使用していくには LiDAR 併用を前提にするべきとの結論に至った。図 4 に LiDAR を使用した自律移動検証でロボットが生成したマップを 2 つ示す。屋外を含む全長約 700m の経路(図 4 左)や、階段やスロープを含む立体的な経路(図 4 右)でも自律移動を達成した。

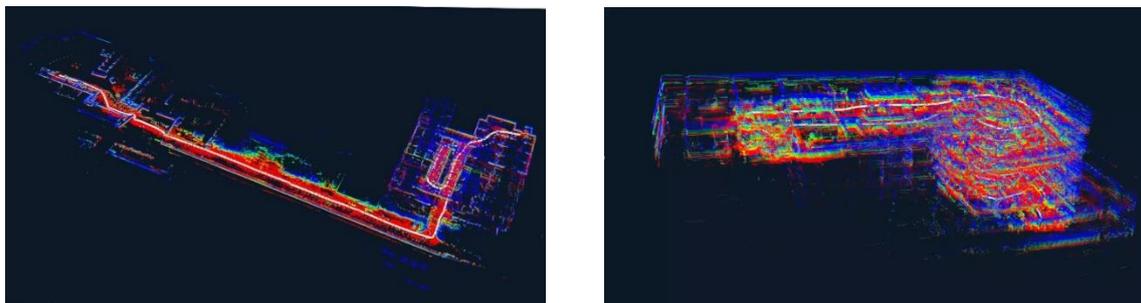


図 4 自律移動マップ

また、建設現場においては施工作业が進むと移動環境が変化していく点が大きな特徴である。図 5 に示した環境においては、マップ生成時にはロボットの経路左側にある壁面が存在しなかったが、壁面施工後も同じマップでの自律移動が可能であった。この結果は今後ロボットの移動経路設計をする上で非常に重要な材料である。

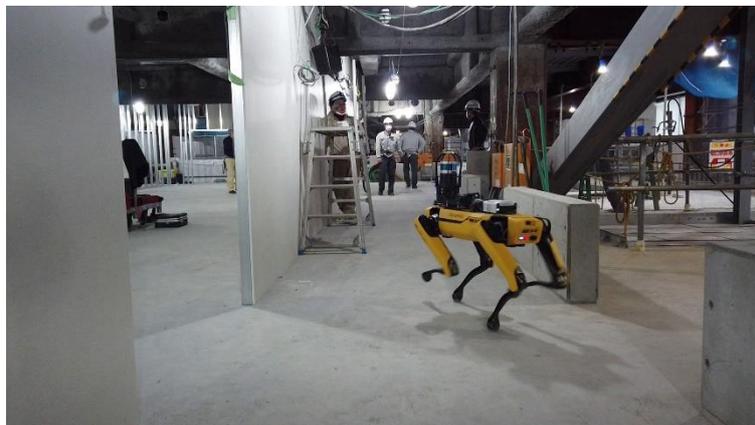


図 5 自律移動環境が変化した例

3.3 遠隔操縦環境の検証

建設現場においては通常有線のネットワークインフラが整備されておらず遠隔地との通信は携帯回線を用いるのが一般的である。そこでロボットに携帯回線機器を搭載し、LTE 回線を用いた遠隔操縦環境を構築して検証を行った。

図 6 左に示すようなコントローラー画面を見ながらの遠隔操縦を複数の人に試行してもらい、実際にロボットを移動させることが可能なことを確認した。操縦者とロボットとの距離としては最大で約 40km 離れた状況での遠隔操縦を達成した。この結果から、建設現場内の事務所からロボットを遠隔操縦するというユースケースだけでなく、管轄事業所のような遠方から現場内を遠隔巡回する、といったユースケースも考えられる。一方で図 6 左のようにロボットの一人称視点の映像だと周囲との距離感を掴みづらいため不安が大きく、図 6 右に示すような三人称視点の映像を見ながらの方が容易に操縦できるとの意見が多かった。今後こういった利用者の声も反映して開発を進めていく。

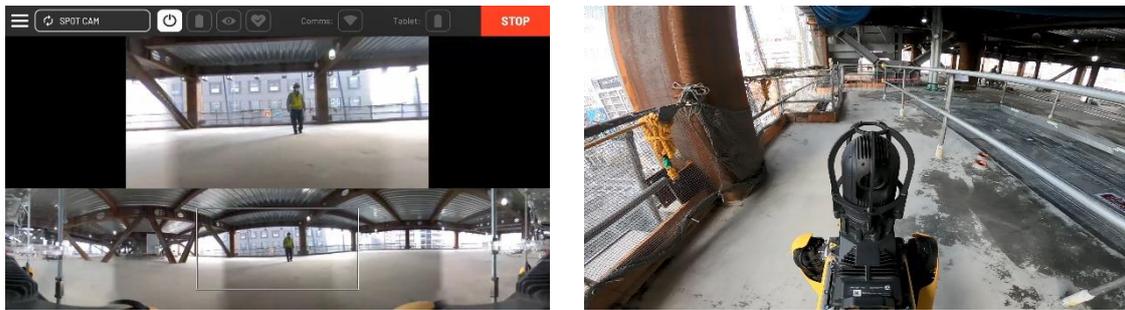


図 6 遠隔操縦時の視点

4. 施工管理業務の自動化と遠隔化に関する検証

1 章で述べたように施工管理業務は多岐にわたる。当社ではまず施工管理業務の経験がある社員を対象にしたワークショップを複数回開催し、その結果をもとにロボットを用いた業務改善ソリューションの優先付けを行い研究開発につなげている。優先度の高い事項として、施工記録の自動化および目視点検・管理の遠隔化、コミュニケーションの遠隔化が挙げられる。これらはいずれも現場員が巡回し人手で行っている業務である。ここではこの 3 つの業務に関して、ロボットによる効率化の検証状況を報告する。

4.1 施工記録の自動化

施工主への報告や進捗管理に利用するために現場の施工状況を写真撮影したものを施工記録とする。この業務をロボットによる定点撮影で自動化できると大きく業務効率が改善する。そこで 2.3 節で述べた自律移動マップ生成時の撮影ポイント設定を行い、ロボットに搭載した全天球撮影カメラを用いて自律移動経路上で定点画像を撮影できる巡回業務をできるようにした。今現在は操作者がタブレット等を用いて巡回開始を指示し、巡回後取得した画像をウェブサービスにアップロードするようにしている。完全自動での定期巡回やデータアップロードをできるような仕組み作りが今後必要になる。

4.2 目視点検・管理の遠隔化

ここでは進捗管理や品質管理のために施工箇所を目視にて点検・管理する、あるいは人手で撮影を行い記録する業務を扱う。特に 4.1 節の定点撮影画像では確認できないような細部や、定期点検でなく一時的に確認したいような箇所を対象とし、この業務を 3.3 節で述べた遠隔操縦環境を用いて遠隔地から行うことができるようにする。点検事項によっては図 6 左のような単焦点レンズの映像ではロボットを視認対象までかなり近づけなければ確認することが難しく、表 1 に示した光学ズーム可能な PTZ (パンチルトズーム) カメラを用いて効率的に点検作業を行えるようにした。実際に現場で点検業務をしている例を図 7 に示す。ここではハイテンションボルトのナット回転法による施工時のマーキングを視認し、品質上問題なく施工できていることを確認している。PTZ カメラを使用することでこういった比較的細かな箇所であっても高精細な画像で視認できることを確認した。

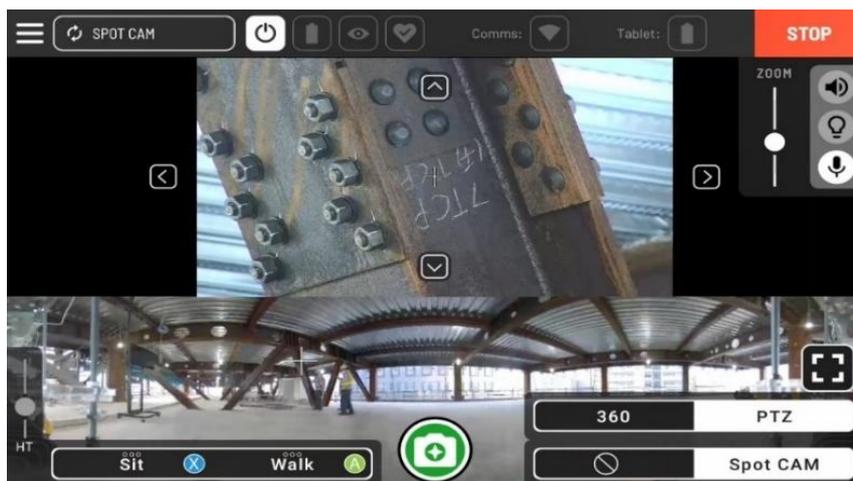


図 7 PTZ カメラによる点検業務

4.3 コミュニケーションの遠隔化

現場内の相手に対して説明や指示をするのにあたり、図面や指示内容を明確に相手に伝える方法が必要である。そこでロボットにタブレットやヘッドセット、プロジェクタを搭載したコミュニケーション機能を開発した。図 8 に開発したコミュニケーション機能と使用の様子を示す。タブレット画面には遠隔地にいる操縦者を表示し、プロジェクタでは図面等を壁面や床面に投影できるようにした。複数の現場にてこの機能の検証を実施し、実際の利用者からも有用であるとの意見が得られた。今後は特に UI・UX 面を洗練させ改善していく。



図 8 コミュニケーションの遠隔化

5. おわりに

本稿では、四足歩行ロボットを用いた施工管理業務の効率化に向け、建設現場内で行った走破性能および自律移動性能、遠隔操縦環境に関する基礎検証結果を報告し、更に施工記録の自動化および目視点検・管理の遠隔化、コミュニケーションの遠隔化といった実業務向けアプリケーションの検証状況を報告した。

今後は、業務向けアプリケーションのユーザビリティを改善すると共に、取り扱う業務の種類を拡大することで業務効率化効果の向上を図る。更に、実運用に向けては業務機能開発だけでなく、安全面安心面の仕組みを検討・試行し、運用体制の設計を具体化していくことも必要となる。

【参考文献】

- 1) 平林剛:建設業界の現状とこれまでの取組, 交通政策審議会海事分科会第11回基本政策部会, 2020