

## 1. はじめに

我が国においては、建設業就業者数不足が深刻な問題となっている。2023 年の建設業就業者数は、ピーク時の 1997 年と比べ、約 7 割にまで減少している<sup>1)</sup>。また、2024 年 4 月から適用された時間外労働時間の上限規制にも直面しており、これらが相まって建設施工における生産性向上が喫緊の課題となっている。建築における施工作业は、主に躯体の構築、部材や設備機器の取付けといった主作業と、墨出し、部材・資材の運搬、廃材処理、清掃といった主作業の準備や後処理に相当する付帯作業に分類できる。主作業は、高度な熟練技能を必要とするものが多く、自動化へのハードルが高い。一方で、付帯作業は主作業に比べると自動化への技術的課題が少ないと考え、筆者らは付帯作業を自動化し、主作業へ充てる時間を多くすることでの生産性向上を目指している。墨出し作業は、図面を基に部材の取付け位置や情報を床に記していく作業であり、建築施工において様々な工種に必要不可欠な作業である。大規模建物の建築となると、墨出し箇所は膨大な数となるが、現在は人手によって行われており、効率化・自動化による生産性向上の効果が大きいと考え、墨出し作業を自動化するロボットシステムの開発を行った。

開発した本システムは、市場展開を円滑に進めるため、多くのフィールドロボットの導入実績があるロボットメーカーおよび全国規模で建設機器のレンタル事業を行っているレンタル会社と共同で開発を行ってきた。数十に及ぶ現場で PoC (Proof Of Concept) を実施し、2023 年 12 月よりレンタル利用を開始している。本稿では、システムの概要や運用フロー、開発機の実証実験から市場展開での取組み内容の詳細を報告する。

## 2. システム概要

開発したシステムは、図 1 に示すように三次元レーザ測量機と墨出しロボットより構成される。現場への輸送や現場内での移動を容易にできることを重視し、小型で軽量の機体とした。表 1 に主な仕様を示す。

三次元レーザ測量機は、任意の方向に測距レーザを照射し、測距対象物までの距離を計測することができるため、墨出しロボットの精密位置計測に利用する。また、本測量機は自動追尾型トータルステーションのように、計測用プリズムターゲットを追尾する機能は有していないが、その分安価である。建築現場での普及に際して、想定される利用者は各施工会社であり、安価で利用できることは重要な要素と考え採用した。そのために、プリズムターゲットなしでも高精度で墨出し可能な方法(特許第 7115684 号)を考案し、本システムに適用している。一方、墨出しロボットは、キャスター付独立 2 輪駆動



(a)三次元レーザ測量機 (b)墨出しロボット

図 1 墨出しロボットシステム構成

表 1 墨出しロボットの主な仕様

項目	仕様
サイズ	670(L) × 530(W) × 385(H)mm
重量	約 22kg
バッテリー	リチウムイオンバッテリー300Wh
駆動時間	約 6 時間(満充電 3 時間)
描画方式	ペンプロッタ方式



図2 ペンプロッタ



図3 利用イメージ



型の移動台車プラットフォームに、図2に示すような床面に線や文字を描画するためのペンプロッタを備えている。駆動原理等の詳細は、文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

### 3. システム運用フロー

本システムの利用イメージは図3のとおりであり、図面作成者による事務所作業フェーズと現場オペレータによる現場作業フェーズに分類できる。事務所作業フェーズでは、CADデータから墨出しロボット用作業データ(以下、墨出し図という)に変換する。現場作業フェーズにおいて、墨出しロボットに墨出し図を読み込ませて、初期設定を行った後、墨出し作業を行う。

墨出し技能工による従来の墨出し作業では、CADで作成した平面詳細図等の図面を紙出力し、記載されている様々な情報から、施工する上で必要な情報を取捨選択して作業を行う。一方、ロボットは自身で取捨選択ができないため、ユーザが墨出し図を作成する際に取捨選択をした上で作成する必要がある。この作業はロボット活用に伴い、新たに発生してしまう作業であり、市場展開において重要な要素であると考えた。そこで、この作業手間を軽減するために、墨出し図作成アプリの開発を行った。

本アプリは、Webベースのアプリで開発した。Webアプリは、ユーザへの配布が容易、ユーザの端末環境への依存度が小さい、アップデートが容易などのメリットがあり、レンタル品として不特定多数の人が利用する本システムとの親和性が高い。

図4にwebアプリによる墨出し図作成フローを示す。ユーザは、建設ロボットプラットフォーム<sup>3)</sup>にログインし、本アプリを利用する。建設ロボットプラットフォームは、作業所で働くロボットをクラウド上で一括管理するために当社で開発を進めているwebシステムであり、当社の開発したロボットだけでなく、他社開発品の活用も進められている(図5)。墨出し図の作成手順を下記に示す。

#### (1) 図面データのアップロード

ログイン後、CADデータ(dxf, dwgファイル)を建設ロボットプラットフォームにアップロードする。

#### (2) 墨出し図の編集

アップロードしたCADデータを選択すると、墨出し図作成アプリが起動される。墨出し図の編集では、大きく分けて①基準位置②墨出し対象③障害

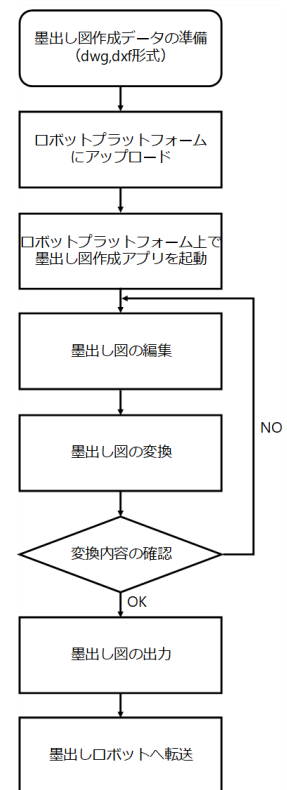


図4 墨出し図作成フロー



図5 建設ロボットプラットフォーム

物の3つの設定が必要となる。

#### ① 基準位置

アプリ上で通り芯(基準点)を設定する。基準点は、墨出し図と現場の位置合わせを行うために必須の情報である。通り芯とは、柱や壁の中心を通る線であり、図面を描く際に水平方向の基準となる線である。建設現場では、通り芯を各階の床に書き出しており、従来の墨出し作業においても通り芯を基準に行っている。そのため、本システムでも基準点を設定するために、通り芯の設定を行う。

#### ② 墨出し対象

墨出し対象の設定を行う。直線、ポリライン、スプライン、円、楕円、円弧、楕円弧、テキストが墨出し可能となっている。

#### ③ 障害物

作業範囲内で柱や開口といった、墨出しロボットが移動する範囲を制限する障害物設定も本アプリ上で設定できる。障害物を設定しておくことで、ロボットが現場で作業を実施する際、障害物を回避しながら作業を行うことができる。

#### (3)墨出し図変換

建築現場の墨出しにおいて、長い線を墨出しするケースも多い。一方、ロボットが有するペンプロッタの寸法制約上、描画範囲は 200mm×200mm 程度に限られる。加えて、ロボットは描画精度を向上させるために、描画位置に到達する度に停止し、描画を行う。そのため、直線のままで描画することが困難である。また、直線の墨出し部には、真っ直ぐな部材が取り付けられるため、始点と終点の位置の正確さが求められる。そこで本アプリでは、選択した墨出し対象線を、変換時に墨出しロボットが描画できる長さへ自動的に分割する。結果として、直線は破線に変換される。変換前後の線分を図6に示す。

以上のように、平面詳細図等の CAD データを用いて墨出し図を作成することができる。本アプリでは表示画層の選択ができるため、墨出し対象のある画層のみを表示すると容易に対象物選択が可能だが、墨出しすべき情報とそうでない情報が同一画層内に混在していると、それらを選別する手間がかかる。そこで、墨出しロボットを使うことを想定した画層設定としておくことで、この手間を削減することができるため、そのような画層設定を推奨している。

変換した墨出し図は、USB メモリにて墨出しロボットへ読み込ませることができる。今後は、建設ロボットプラットフォームを活用して墨出し図のロボットへの転送やユーザへのエラー通知などの利便性拡大機能の検討を行っている。



(a)変換前



(b)変換後

図6 墨出し図変換例

また、本システムは上述のように、CADデータ(dxf, dwg ファイル)を用いて墨出し図を作成するが、将来的には BIM (Building Information Modeling) データを用いた動作環境を構想している。ただし、BIM データは任意の位置で平面切り出しが可能であり、dxf, dwg ファイルとして保存することが可能である。現在でも平面切り出したデータであれば、BIM データの活用は可能である。

## 4. 市場適用

### 4.1 試作機による実証実験

試作段階では、表2に示すように16現場においてPoCを実施し、精度と作業効率の検証を行った。

精度については、既存の墨出しロボットシステム<sup>4)</sup>と同等程度であることを確認し、実際に墨出し作業を行う施工業者からも実用的な水準に達しているとの評価を得た。建設用途以外の PoC も実施し、良好な結果を得られていることから、適用領域は建設業に限らないと考えられる。

作業効率については、「同じ作業範囲を墨出し技能工が作業した場合の工数(人日)とロボットが作業した場合の工数(台日)の比率」として定義した。結果は墨出しの内容によって変わり、等間隔で印をつけていくような墨出しの場合だと、技能工の3分の1程度の作業効率であったが、墨出し位置が不規則であったり円弧上であったりするような複雑な場合は、技能工の3~4倍程度の作業効率となることがわかった。等間隔の墨出しでは、印をつける度に図面を詳細に確認する必要がなく、技能工の方が速やかに墨出し作業を実施することができる。一方、複雑な墨出しの場合は、印をつける度に図面を詳細に確認して位置を確認する必要があるが、本ロボットでは墨出しの複雑さによって図面を確認する作業時間を必要としない。そのため、複雑な墨出しほど、技能工と比較して相対的に作業効率が高くなるといえる。なお、表2中の「-」と表記している箇所は、データを取得できなかったため、作業効率を算出できていない。

ただし、ロボットによる作業効率の低い墨出し作業においても、本システムは手離れがよいため、ロボット稼働中に技能工は別の作業をしたり、通常は作業を行わない夜間等の時間にロボットを稼働させたりすることで、技能工が主作業に充てる時間を増やすことができる。このことから、各施工会社が本システムを利用することで、計画時よりも早く作業を進めることができ、全体として工期短縮へと繋がる。工期が短縮されることで、建築現場で排出されるCO<sub>2</sub>を削減することができ、結果として環境負荷の低減へと繋がるといえる。

#### 4.2 商用試作機による実証実験および試適用

試作機における PoC 実施後、ロボットメーカーおよびレンタル会社と共同で商用機の開発を実施した。商用機開発にあたって、当初の開発コンセプトである小型で軽量であることは維持し、性能や機能も保持しつつ、製造コストを下げる検討を行いながら量産できる製造体制を構築した。また、レンタル商品は不特定多数の人が使うため、操作が容易であることが望ましい。加えて、利用者の使い方や保管方法が常に適切である保証がないため、堅牢性が高いほうがより良いとされている。これらを踏まえ、機体の材質など設計を見直し、商用試作機を製作した。建設業界では、施工ロボットや IoT アプリ等の開発と利用に関わるロボティクス・トランスフォーメーションを図るための建設 RX コンソーシアム<sup>5)</sup>が設立されている。本コンソーシアム内に、墨出しロボット分科会が存在し、弊社も共同開発をしているレンタル会社とともに参画している。分科会参画企業に対する積極的な情報発信やロボットの適用検討を実施した結果、表3に示すように更に22現場で

表2 墨出しロボット試作機試行一覧

建物種別	墨出し種別	精度	作業効率
事務所	OAフロア	2mm	約1/3
事務所	OAフロア	3mm	-
事務所	OAフロア、設備機器	1mm	-
事務所	間仕切り壁、OAフロア	4mm	-
事務所	間仕切り壁	2mm	-
事務所	間仕切り壁	3mm	-
工場	間仕切り壁	2mm	-
工場	間仕切り壁	3mm	-
教育機関	間仕切り壁	2mm	-
医療施設	間仕切り壁、開口補強	-	-
事務所	タイルカーペット	2mm	-
商業施設	躯体	5mm	-
娯楽施設	躯体	3mm	同等
工場	AGV用床面QRコード	2mm	約2倍
工場	半導体製造装置設置位置	-	約4倍
倉庫	自動倉庫ラック	1mm	約3倍

表3 墨出しロボット商用試作機試行一覧

建物種別	墨出し種別
揚水場	床版
事務所	設備
物流倉庫	機械
物流倉庫	間仕切り壁
教育機関	グラウンド
物流倉庫	間仕切り壁、設備
工場	間仕切り壁
工場	間仕切り壁
物流倉庫	機械
事務所	間仕切り壁
事務所	什器
事務所	間仕切り壁
工場	間仕切り壁
宿泊施設	間仕切り壁
物流倉庫	機械
工場	機械
事務所	間仕切り壁
教育機関	仮設足場
医療施設	間仕切り壁、設備
事務所	間仕切り壁
仮設建物	間仕切り壁
仮設建物	間仕切り壁

商用試作機を用いた実証実験および試適用を実施することができ、利用者の生の声を得ることができた。その一部を表 4 に示す。これらの課題は、商用機において改良済み、もしくは改良検討中である。

表 4 利用後ヒアリング結果

要望
墨出し完了時間が表示より2倍～3倍掛かる。
墨出動作中にWi-Fi通信が切れる。3D Distoからレーザーが出てこない。
途中で非常停止した場合、アラーム音や遠隔でも分かるようにメール等で教えて欲しい。
精度に関しては申し分なく今後の改良に期待をしたい。
障害物接触時に自動復旧機能が備わっていたら嬉しい。
3D DistoとSUMIDASの接続が出来ない事があるので途中で切れないで欲しい
タッチパネル画面のタッチ反応が悪く使いづらいので良い方法があれば教えて欲しい。
USBメモリ以外でのデータ挿入があれば良い。
ファイルの読み込み図面が薄くて見難い
ファイルのデータ量が多くなる（図面範囲が広い？）とタッチパネルの動作が重くなって使いづらい
タッチパネルに表示されている図面の向きを反転できる機能が欲しい。
3D Distoでマーカ―の中心点を読み込む時レーザー光が大きき動き過ぎて微調整が難しい。
基準点を計測する際、タブレットが無いのでマーカ―設置位置とロボットを行ったり来たりするのが面倒さらに軽量化されると現場内の運搬が楽になる

### 4.3 商用機の市場展開

表 4 に挙げた課題を含む、商用試作機の実証実験の結果をふまえ、商用機の開発を行った。開発した商用機は 2023 年 12 月より、レンタル会社にて利用できる状態となっている。初期導入として 10 台をレンタル会社で保有しており、全国で利用できる体制を整えている。試作機の利用者からも商用展開を期待する声は多くあったため、既に複数の建築現場で利用されており、多くの問合せも受けている。使用後は、改良のために利用者へのヒアリングを行い、ソフトウェアのアップデートを実施している。今後もソフトウェアだけでなく、ハードウェアのアップデートも併せて実施していく予定である。

国内では、商用展開されているものとして、日立チャネルソリューションズ株式会社製の墨出しロボット<sup>6)</sup>が存在している。同ロボットは、特に設備工事での利用が多く進んでいる。また、商用展開はされていないが、鹿島建設株式会社製の墨出しロボット<sup>7)</sup>も開発されている。これらは建設 RX コンソーシアムを通して、参画企業へ各社情報共有をしており、業界への普及展開を目指している。

墨出しロボットは国内だけでなく、海外でも開発されているものがある。<sup>8)、9)</sup>本システムも海外市場からの問合せがあり、海外展開を見込んでいる。そのため、本システムおよび墨出し図作成アプリは英語での操作が可能となっている。海外展開に関しては、ロボットメーカーが中心となって市場調査やデモ対応を行っている。文献 8)、9) など、欧米では既に海外製の墨出しロボットが存在しているため、特にアジア圏での展開を中心に検討しており、展示会などにも精力的に出展している。(図 7)



図 7 海外展示会出展状況

## 5. まとめ

本稿では、建設業における生産性向上を目的として開発した、墨出し作業を自動化する墨出しロボットシステムについて詳述した。本システムは、建設業の生産性向上に寄与し、労働力不足や労働時間規制への対応策として期待されるが、一方で市場展開は始まったばかりであり、今後さらに普及させていくことが重要である。そのために、利用者からのフィードバックを集め、利便性向上を目的とするさらなる機能拡張の開発を進めており、ユーザ目線により使いやすいシステムとする改善を行うことで、利用者がリピータとなることや使用している現場で目にした人が利用したいと思えるものとなることを目指している。

本システムを活用することで、従来二人で行っていた作業を一人で行うことができ、ヒトやモノの移動

を削減することができる。また、本システムは、CAD データを基に自動で墨出しを行うので、図面の読み違いによる手戻り作業を削減することができる。手戻り作業が発生すると、他の職種や主作業との調整のため、余計な重機の稼働が発生してしまうが、このような作業の削減も見込める。

本システムは、手離れがよく夜間でも使用できることが大きな特徴であり、技能工が日中に主作業へ充てる時間を多くとることができる。普及を促進し、様々な職種で利用する事により、全体工期を短縮することができる。工期の短縮は、現場稼働に必要な電力を削減することができるため、結果として環境負荷を低減することが期待できる。

## 謝辞

本システムの開発は、株式会社未来機械および株式会社レンタルのニッケンとの共同開発によるものです。多大なる協力をいただきました両社に感謝の意を表します。

## 【参考文献】

- 1) 日本建設業連合会：建設業デジタルハンドブック 4. 建設労働，  
<https://www.nikkenren.com/publication/handbook/chart6-4/index.html>, 2024/8/1 閲覧
- 2) 鶴田、宮口、藤井：自走式墨出しロボットのための高効率な作業計画法, 日本ロボット学会誌, 39 巻, 1 号, p.87-91, 2021
- 3) 株式会社竹中工務店：BIM データを活用し、ロボットの操作・監視・管理を効率化するプラットフォーム,  
<https://www.takenaka.co.jp/solution/shinseisan/platform/>, 2024/8/5 閲覧
- 4) F. Inoue and E. Omoto: “Development of high accuracy position marking system in construction site applying automated mark robot”, Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference 2012, pp. 819-823. Akita, Japan.
- 5) 建設 RX コンソーシアム：<https://rxconso-com.dw365-ssl.jp/index.html>, 2024/8/5 閲覧
- 6) 日立チャネルソリューションズ株式会社：建設業界向け製品 業界初墨出しロボット, <https://service.hitachi-ch.co.jp/construction/sumirobo>, 2024/8/23 閲覧
- 7) 鹿島建設株式会社：プレスリリース 墨出しを全自動かつ高精度に行う「ロボプリン®」を開発 生産性を約 2 倍向上,  
<https://www.kajima.co.jp/news/press/202309/26a1-j.htm>, 2024/8/23 閲覧
- 8) HP SitePrint : Robotic Layout Solution, <https://www.hp.com/us-en/printers/site-print/layout-robot.html>, 2024/8/23 閲覧
- 9) Dusty Robotics：<https://www.dustyrobotics.com/fieldprinter>, 2024/8/23 閲覧