

自走式墨出しロボットシステム

大本 絵 利 井 上 文 宏
土 井 暁

Marking System applying Automated Robot for Construction Site

Eri Ohmoto Fumihiko Inoue
Satoru Doi

Abstract

This paper describes the development of a high-accuracy position marking system using an automated robot and survey system. During the construction process of foundation work, the initial marking of the base floor is very important for setting up and building the construction materials to exact specifications. However, human error by marking workers has often been reported. This problem not only reduces confidence in the construction but also decreases work efficiency. To realize high-accuracy marking and reduce human errors, an automated marking system was developed; It uses a marking robot and two survey instruments. For the marking robot, the marking device is installed at the robot center, and the error between the marking point and the stamp marker point can be modified precisely. This marking system can be used to execute high-accuracy marking. The marking process is operated automatically to realize, high-efficiency and high-accuracy foundation marking.

概 要

建築現場の墨出し作業や確認作業を省力化すると共に、ヒューマンエラーを低減させることを目的とし、高精度位置計測が可能な自走式墨出しロボットシステムを開発した。本システムは、墨出し点をマーキングする自走式墨出しロボット、ロボットを誘導するレーザ・レンジ・ファインダ、墨出し位置を計測するトータルステーションから構成され、作業員が1人で墨出しできる半自動化のシステムとなっている。ロボットの移動台車には4輪対面型のオムニホイール台車を採用することで全方位走行を実現した。また、墨出し機構は4自由度の高精度移動テーブルとマーキングスタンプから構成され、正確なマーキングが可能である。製作したロボットを用いて複数の現場で検証実験を行った結果、既存墨出し点との誤差は2mm以内であることが確認できた。

1. はじめに

今日、測量システムの高度化に伴い、建築工事における各工程の墨出しや計測作業には、自動化されたトランシットや光波距離の方法を使用するトータルステーション(T.S.)などの高度な測定機器が使用され、計測時間の大幅な短縮、数mm以内の精度確保が実現するなど作業の効率化が図られている。また、広域な敷地や周囲に遮蔽のない空間では全地球測位航法衛星システム(GNSS)による測量も適用されつつある。しかしながら、こうした高度な測量機器は精度が高い反面、作業には複数の作業員が必要であること、ヒューマンエラーによって誤った墨出しを行うこともあり、作業の信頼や品質の欠陥だけでなく作業効率や時間のロスを引き起こすことも考えられる。これまでに床や壁面等に自動で墨出しを行う機器は開発されておらず、特に墨出しができ、かつ直接墨出し点を自動でマーキングするシステムは開発されていない。現場からは、簡易でかつ自動で墨出しができるシステムの開発が強く要望されている。

上述した墨出し作業の改善を行うため、著者らは墨出し位置を自動計測し、マーキングを行うシステムを開発した。本システムは、自走式墨出しロボット、墨出しロボットを誘導するレーザ・レンジ・ファインダ(LRF)、墨出しロボットの位置を正確に計測するトータルステーション(T.S.)および、各機器の制御装置から構成される。

本報告では、開発した墨出しロボットの機構や性能、システムを用いた現場での稼働実験について報告する。

2. マーキングシステムの概要

2.1 マーキングシステムの原理

マーキングシステムの原理をFig. 1に、システムのフローをFig. 2に示す。

- 1) 墨出しロボットはまず、LRFの誘導によって目標のマーキング位置を含む目標領域に移動する。しかし、その到達位置は、LRFの精度や床面の状態に影響されることから、設計図面上の墨出し位置とは正確に一致しない。

3. 墨出しロボットの構成

墨出しロボットは、大きくマーキング機構と移動台車機構の2つからなる。Photo 2に墨出しロボットの外観を示す。

3.1 マーキング機構

マーキング機構はテーブル上に設置されたX, Y, Zの3軸のスライダで構成され、目標座標点への修正移動はZ軸周りに回転するテーブルの回転および、X, Y軸のスライダ移動で行われる。通常、Fig. 3に示すように移動テーブル本体を固定すると、移動可能範囲が狭くなるが、移動テーブルのZ軸方向に回転軸を付加することで、同機構でも、マーキング可能範囲を広くとることを可能とした。この機構には常に印字が鮮明となるように自動反転スタンプを採用している。また、マーキングスタンプイメージをFig. 4 (b) に示す。スタンプ形状は、Fig. 4 (c) に示すように2重環とクロスバーを結合した形状とし、外直径40mm、内直径20mmとした。これをZ軸最下部に設置し、マーキングを行う。

マーキング機構の制御システムにはコントローラ(安川電機:MP2310)を使用し、内部に3つのモジュールを組み込んだ。各機能は、回転テーブルを移動させるステッピングモータに送るパルスを生感させるパルス発生モジュール(PO-01)、外部操作器との接続を行うI/O接点を有する外部入出力モジュール(LIO-06)、パソコンからのプログラム開発、T.S.からの位置情報入力等に使用する通信モジュール(218IF-01)である。これらを用いて、各軸を移動させる手動操作、原点復帰やマーキング自動操作から構成されるプログラムを開発した。各軸のアクチュエータ仕様をTable 3に示す。

Table 3 アクチュエータ仕様
Specification of Actuator

| 軸 | 仕様 |
|-------------------------|---|
| X/Y/Z軸 電動 アクチュエータ | ボールねじタイプ センサ：NPN3個 移動範囲：120mm 最小分解長：0.001mm F社製 |
| R軸 アクチュエータ | ロータリーモジュール 減速比：4.5 センサ：NPN3個 移動範囲：0～360deg 最小分解角：0.01deg F社製 |
| モータ | ステッピングモータ モータドライバ DC24V S社製 |

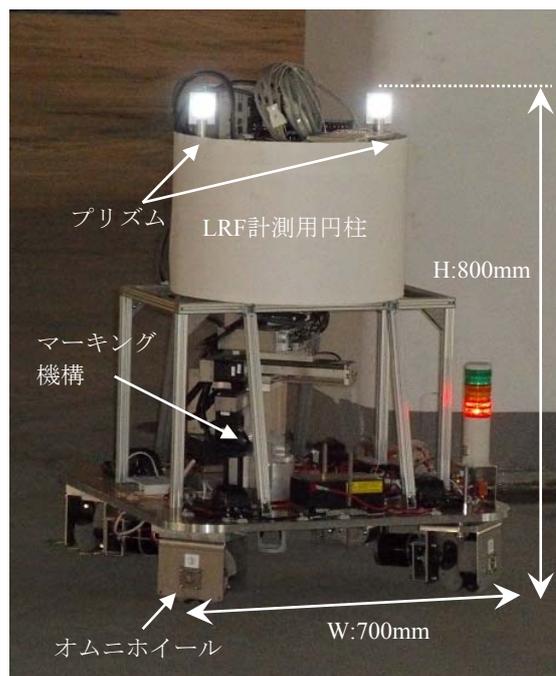


Photo 2 墨出しロボットの外観
View of Automated Robot

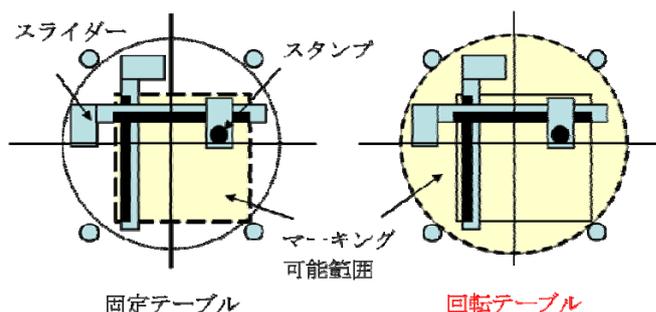
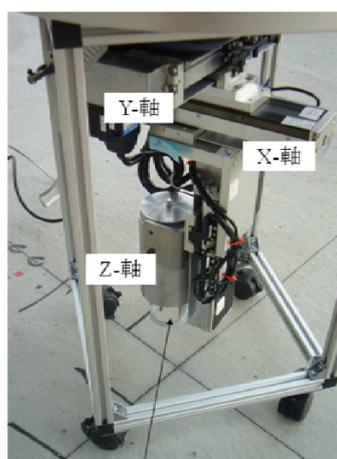


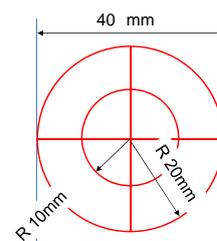
Fig. 3 固定テーブルと回転テーブルのマーキング範囲の違い
Difference of Marking Space by Rotation Table



自動反転型スタンプ
(a) マーキング機構



(b) スタンプ写真



(c) スタンプ形状

Fig. 4 マーキング機構の構成
Composition of Marking Device

3.2 マーキングアルゴリズム

墨出しロボットは目標領域に移動したのち、まず、上部にある2つのプリズム位置 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) をT.S.を用いて計測する。2つのプリズムは墨出しロボットの中心から対称に同距離離れた位置に設置されているため、測定結果より、中心座標 (x_0, y_0) が、また、余弦定理より、目標位置 (x_a, y_a) と墨出しロボットの関係を求めることができる (Fig. 5 (a))。以下に、各関係式を示す。

$$a = \sqrt{(x_2 - x_a)^2 + (y_2 - y_a)^2} \quad (1)$$

$$b = \sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2} \quad (2)$$

$$c = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} / 2 \quad (3)$$

$$\cos\theta_1 = (b^2 + c^2 - a^2) / 2bc \quad (4)$$

$$\tan\theta_2 = (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2) \quad (5)$$

$$y_3 = \tan\theta_2(x_a - x_1) + y_1 \quad (6)$$

次に、式(5)より求めた θ_2 を用い、目標位置 (x_a, y_a) を墨出しロボットの相対座標 (X_a, Y_a) に座標変換すると、次式で表すことができる (Fig. 5 (b))。

$$\begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

最後に、墨出しロボットの相対座標 (X_a, Y_a) は、 y_a と y_3 の大小、 $\cos\theta_1$ より、①～④の象限に分類される。分類された各象限に合わせ、マーキングテーブルを $90[\text{deg}]$ ずつ $\theta_3[\text{deg}]$ 回転させ、象限内の座標 (X_s, Y_s) に修正し、マーキングを行う (Fig. 5 (c))。

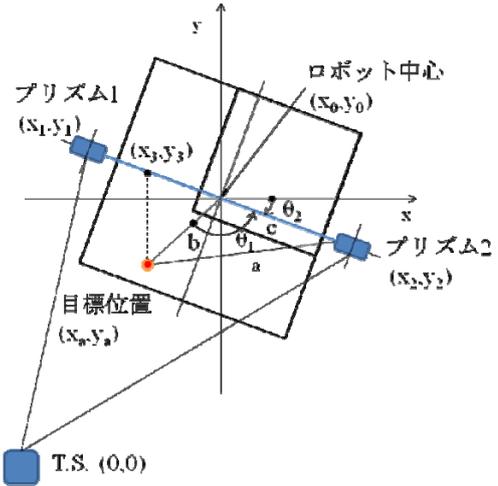
式(8)に最終修正座標変換式を、Table 4に目標位置の絶対座標と相対座標への変換値を示す。

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \end{pmatrix} \quad (8)$$

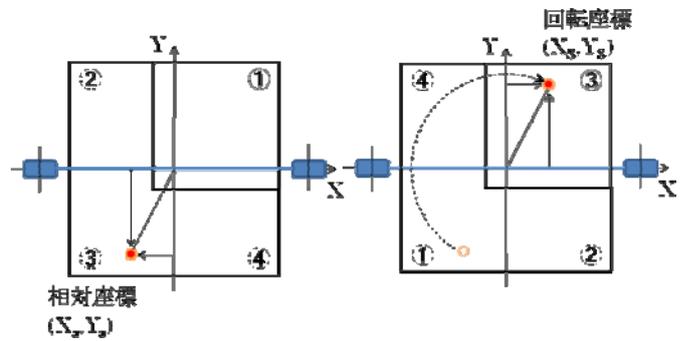
3.3 移動台車機構

3.3.1 オムニホイール 墨出しロボットには、滑らかな動きや回転を実現するために全方位移動台車を採用している。台車には4つのオムニホイールが配置されている。オムニホイールは、円周上に3つのバレルを120度ごとに配置した機構を持つ車輪2個を60度ずつずらし、組み合わせたものとなっている (Photo 3 (a))。

モータからオムニホイールに駆動力が伝達されると軸上のホイールが回転して路面に力を伝達し、前後に移動する。また、ホイールの円周上に配置されたフリーの機構を有するバレルの回転により、左右への移動も可能となる。これらのオムニホイールの各回転方向を制御することにより、通常車輪にはない、定位置回転や前後左右多方向への動きを実現した。



(a) T.S. から見た目標位置 (絶対座標)



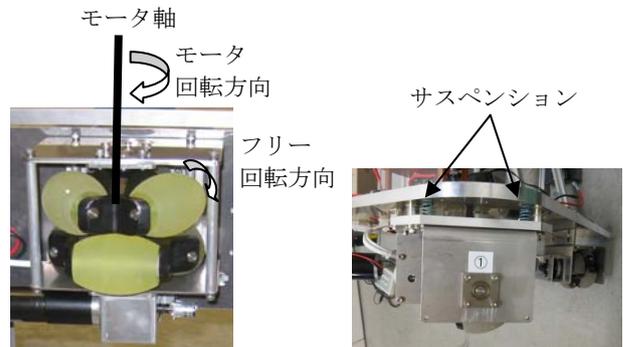
(b) 墨出しロボットから見た目標位置 (相対座標)

(c) マーキングテーブル回転後の目標位置 (回転座標)

Fig. 5 墨出しロボット位置と目標位置の関係 Relation of Automated Robot and Target Position

Table 4 目標位置の相対座標への変換 Transformations to Relative Coordinate of Target Position

| $y_a - y_3$ | $\cos\theta_1$ | Area | θ_3 | X_s | Y_s |
|-------------|----------------|------|------------|--------|--------|
| + | + | ① | 0 | X_a | Y_a |
| + | - | ② | 90 | Y_a | $-X_a$ |
| - | - | ③ | 180 | $-X_a$ | $-Y_a$ |
| - | + | ④ | 270 | $-Y_a$ | X_a |



(a) オムニホイール

(b) サスペンション

Photo 3 オムニホイール機構 Omni-Wheel Mechanism

3.3.2 オムニホイール特性実験 通常、移動台車の機構には、3輪駆動と4輪駆動がある。3輪駆動の場合、全車輪が接地するため空転することなく走行が可能である。それに対し、4輪駆動では、路面の平滑度などの面で、全ての車輪が接地しない可能性があり、走行の安定性が確保できない場合がある。しかし本墨出しロボットのマーキング機構の形状や重心の安定性を考慮し、4輪駆動を採用した。そこで、4輪のうち、隣接した2輪の車体とホイール間にサスペンションを搭載し(Photo 3 (b)), 走行の安定性を向上することを目指した。

サスペンションによる効果を確認するため、サスペンション付きホイール位置の違いによる直進性能を調べた。なお、墨出しロボットの直進移動速度は毎分20mとし、移動距離は、エンコーダからフィードバックしたモータ回転数を、ホイール回転数に換算することにより制御を行った。また、墨出しロボットの位置把握にはLRFを用いて、約2secおきに位置データを取得した。Fig. 6上部に示す①～⑥のように各サスペンションの配置において3回ずつ直進移動を行い、Y軸方向に直進した際のX軸方向へのずれを計測した。その結果をFig. 6に示す。それぞれの直進移動距離(Y軸方向)に対するX軸方向誤差率の最大値はTable 5のようになる。結果より、③、④、⑥の誤差率がかなり小さいことから、進行方向側にサスペンションがあることで、直進性能が優れることが分かる。しかし、③、④の場合は駆動するホイールが左右の2個のみであり、前後輪ともにフリーとなるため操舵性が不安定になることが予想される。そこで本墨出しロボットには⑥のサスペンション付きホイール配置の移動台車を採用した。

4. マーキング稼働実験

構築したマーキング機構の精度を確認するために、屋内実験スペースの実際のコンクリート床面において、追尾型T.S.を用いたマーキング実験を行った。本実験手順として

- 1) 墨出しロボットを目標範囲内に設置
- 2) T.S.による墨出しロボット位置測定
- 3) マーキング位置修正

を繰り返し、計4点について目標位置およびマーキング位置の計測を行った。実験の様子をPhoto 4に示す。T.S.の設置位置および、各マーキング座標とその位置、マーキング位置の計測結果をFig. 7に示す。誤差は全て4mm以内に収まったが、A, Bに比べC, Dの方が目標位置に対するマーキング位置の誤差が大きくなっていることが分かる。

これらの結果より、y軸に沿って近くに排水用のグレーチングがあることから原点に向かう方向に勾配がある可能性が大きいのではないかと考えられた。

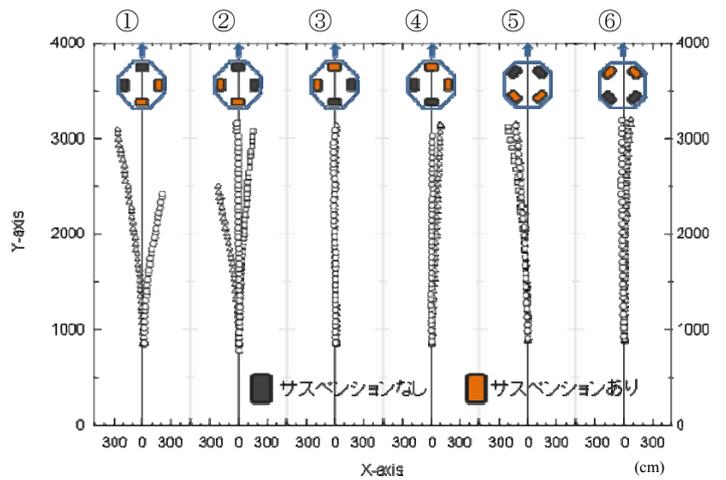


Fig. 6 オムニホイールの配置と直進性能
Layout of Omni-Wheel and Straight Performance

Table 5 直進移動距離に対する誤差率
Error rate of Straight Performance

| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ |
|--------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 誤差率(%) | 12.2 | 13.7 | 1.1 | 3.9 | 9.4 | 3.0 |



Photo 4 マーキング実験の様子
View of Marking Experiment

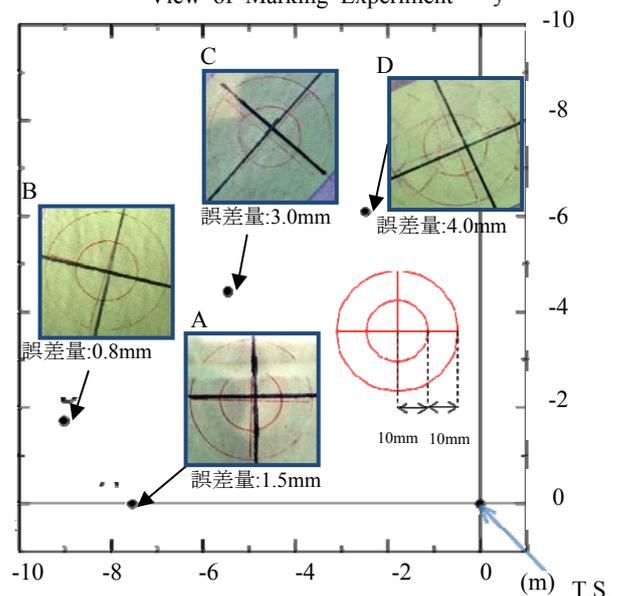


Fig. 7 マーキング実験位置および結果
Result of Marking Experiment

以上の結果より、Fig. 8のような傾斜を想定し、その傾斜における誤差を検討した。床面に角度 α の傾きがある時、プリズムから床面までの距離を Z_0 とすると、目標座標とマーキング位置の誤差は $Z_0 \sin \alpha$ で表すことができる。

この誤差の影響を調べるため、簡易な水平面とx軸方向およびy軸方向の傾斜面をそれぞれ作り、実験を行った。傾斜角は約1/100とした。その結果をFig. 9に示す。水平面(Fig. 9 (a))ではx方向、y方向ともに誤差がほぼ3mm以内におさまっているが、傾斜面(Fig. 9 (b), (c))では傾斜方向に7~9mm程度のずれが生じていた。墨出しロボット本体のプリズムから床までの距離は約800mmであるため、

$$Z_0 \sin \alpha = 800 \times (1/100) = 8$$

より、理論値ともほぼ整合性が取れていることが確認でき、傾斜のマーキング誤差への影響はかなり大きいといえる。

実際の建設物においてコンクリート打設後の床面においては完全な水平面となっていることは少ないことや、水勾配があることから傾斜を考慮することが重要であると考えられる。そこで、この誤差を低減するために、

- 1) プリズム位置を低くする
- 2) 傾斜を検知し、修正値を計算する

という2案を検討した。本開発では、ロボットの構成上、後者が有効であると考え、2軸の傾斜センサを搭載、傾斜による誤差を修正するシステムとした。傾斜センサ仕様をTable 6に示す。

5. 現場適用実験

5.1 A・B現場における実験

開発した墨出しロボットシステムを実際の建設現場へ適用し、実験を行った。本実験では、あらかじめ、墨出し工により墨出しされた位置にマーキングを行い、墨出し位置の確認を行った(photo 5, 6)。

初期段階の墨出しロボットでは、A現場において、ラフな精度で墨出しロボットを手動移動により設置して、墨出し位置にマーキングを行い、既存墨出し点の確認を行った。また、B現場内の倉庫において、LRFにより現場マップをモニタしながらオムニホイール台車を墨出し点近傍に移動させ、間仕切り壁の墨出し位置を確認する実験を実施した。

これらの実験により、マーキング機構のエラー確認、システム一連のフローを確認することができた。

Table 6 傾斜センサ仕様
Specification of Inclination Sensor

| | |
|--------|--------------------|
| 機種タイプ | X/Y2軸(Sherborne社製) |
| 計測可能範囲 | ±30deg |
| 出力信号 | アナログ |
| 電源電圧 | DC 6.5~18V |
| 計測精度 | ±1mmrad |

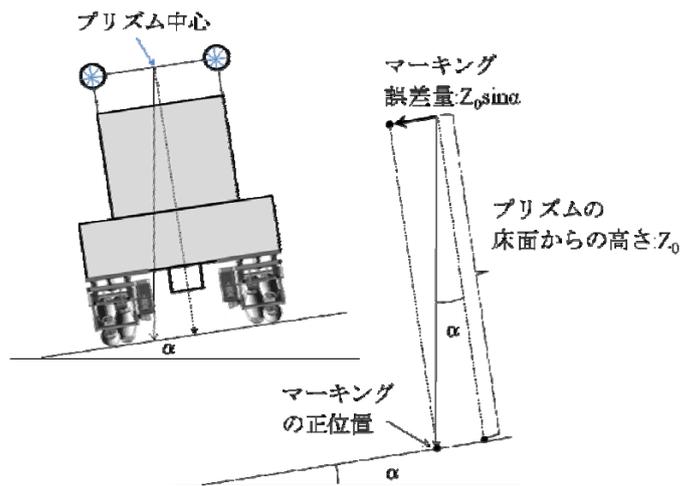


Fig. 8 ロボットと床面傾斜の位置関係
Relation of Floor Inclination and Robot Location

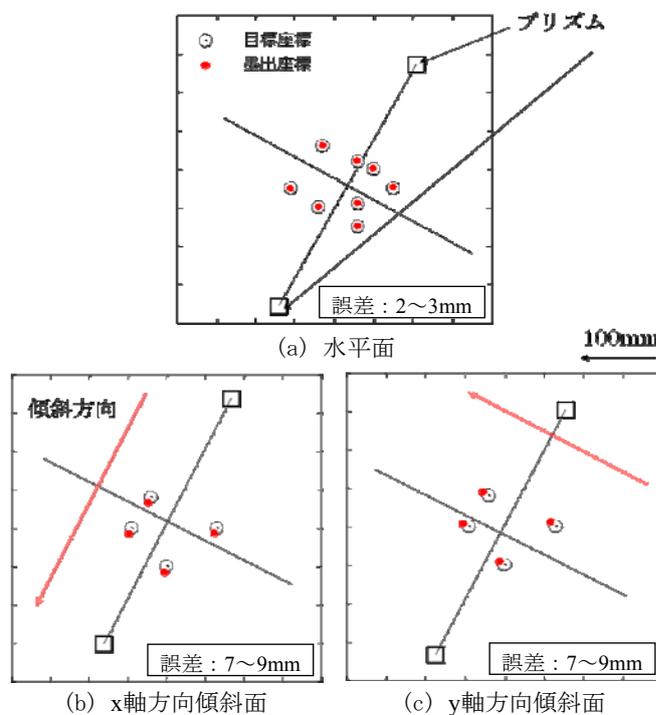


Fig. 9 傾斜がマーキング誤差へ与える影響
Influence of Floor Inclination on Marking Error



Photo 5 現場における実験状況 (A現場)
Evaluation of System Performance on Construction Site A

5.2 C現場における実験

3現場目において、墨出しロボットのマーキング精度の確認および現場実験による評価を行った(Photo 7)。

まず、プログラム内容とその挙動、回転中心点、プリズム座標、回転角度精度(0.01deg.)、X-Y軸移動距離および精度(0.01mm)について確認を行った。続いて、2台のT.S.の計測値とスケールとの比較を行った結果、T.S.間の距離10~20m範囲で、2mm程度の計測誤差があり、この誤差は、T.S.の許容範囲であることを確認した。なお、墨出しロボットが目標領域に到達してから墨出し位置へのスタンプが完了するまでの時間は約2分であった。

これらのシステム等の確認後、15m×15m程度の店舗内(店舗仕上げ作成前)間仕切りの既存墨位置の4点について、確認実験を実施した。その結果を、Fig. 10に示す。既存墨位置とマーキング点との差は、約2mm以内となり、T.S.の誤差がマーキング位置に影響することを確認し、この精度範囲内では、正確にマーキングできることが実証された。

5.3 現場職員へのヒアリング

適用実験を実施した現場において本システムに関するヒアリングを行った結果を以下に示す。

- 1) 実務で必要な精度を十分満足している。
- 2) 図面情報に対して、墨位置がマーキングされていれば墨出しラインは作業員が実施すれば作業が迅速に進む。墨出しロボット作業の貢献を期待したい。
- 3) 墨出しラインも自動化したい。
- 4) 墨位置やラインの用途区別(色分け等)があるとよい。
- 5) ロボットを他の用途(設備の位置計測、移動環境計測、他)にも使用したい。
- 6) 現場で使用して、レベルアップを図るべきである。
- 7) オムニホイールの移動機構を他場面に活用したい。

今後は、これらの意見を踏まえ、改良・改善を行い、さらに多くの現場への展開を目指したい。

6. まとめ

従来、作業員が2人以上で実施してきた建築現場での墨出し作業やその確認作業を省力化し、高精度な位置計測やヒューマンエラーを低減させることを目的として、墨出しロボット位置を自動計測し、目標の墨出し位置にマーキングを行う自走式墨出しロボットシステムの開発を行った。

本開発では、墨出しロボットを用いたシステムのコンセプトを考案し、ロボットの設計・製作および制御プログラムの作成、マーキングの検証実験、建設現場における適用実験を行った。

その結果、作業員1人での作業が可能となり、システムの精度は既存の計測機器と同程度で、現場への適用が可能なレベルのマーキング精度であることが確認された。



Photo 6 現場における実験状況(B現場)
Evaluation of System Performance on Construction Site B



Photo 7 現場における実験状況(C現場)
Evaluation of System Performance on Construction Site C

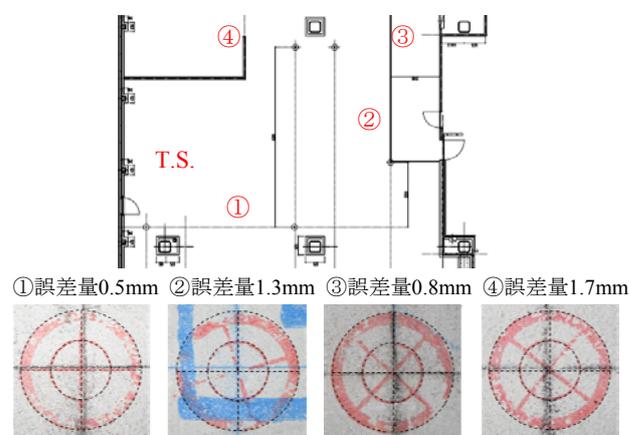


Fig. 10 マーキング実験結果
Result of Marking Experiment

参考文献

- 1) Inoue.F, et al. : Development of High Accuracy Position Marking System Applying Mark Robot in Construction Site, Proceeding of 50th SICE Annual Conference 2011, pp.2413-2417, (2011)
- 2) 井上, 他, レーザ・レンジ・ファインダを用いた杭芯の位置計測システムの開発, 大林組技術研究所報, No.74, (2010)
- 3) 大本, 他, 建設現場における高精度位置マーキングシステムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2012, p56, (2012)