

物体検出とプロジェクションマッピングを利用した レーザー墨出し支援システムの開発

Development of Laser Marking Support System Using Object Detection and Projection Mapping

○北野 信吾*1, 園田 真吾*1
Shingo KITANO*1, Shingo SONODA*1

*1 株式会社 竹中工務店
Takenaka Corporation

キーワード：プロジェクションマッピング；物体検出；墨出し；機械学習
Keywords: projection mapping; object detection; marking; machine learning.

1. はじめに

建設現場における墨出し作業は、設備機器を取り付けるといった主作業の前段階として、作業面に位置を記録する重要な作業である。そのため墨出し作業では施工精度が求められるとともに、主作業の施工時間を確保するための施工スピードも求められる。

近年ではレーザーポインターを使用した墨出しシステム¹⁾（以下、墨出しシステム）を用いることで墨出し精度と施工スピードを高める手法が行われている。また、プロジェクションマッピングを用いて作業面に図面を投影し、作業を効率化する技術も報告されている²⁾³⁾。

墨出しシステムは精度が高いが、レーザーポインターによる「点」での表示となるため、1点ごとに墨出し作業を行う必要がある。一方、プロジェクションマッピングでは、図面データをプロジェクターで投影することで、「面」として表示することができ、連続した墨出し作業を行うことができる。しかし、精度良く投影するためには、プロジェクターの高度な姿勢制御や映像調整が必要となり、投影までの事前準備に時間がかかるといった課題もある。

そこで、筆者らは、墨出し精度の高い墨出しシステムと墨出し位置を面として表示できるプロジェクションマッピングの特徴を活かし、より簡易に墨出し作業を効率化できるシステム（以下、本システム）を開発した。本報では開発したシステムの概要及び開発内容、建設現場での試行と今後の展開について述べる。

2. 開発したシステムの概要

2.1. システムの構成

本システムは、Web カメラ、PC、プロジェクターで構成される（図1）。これらを1ユニットとして、墨出しシステムと組み合わせて利用する。

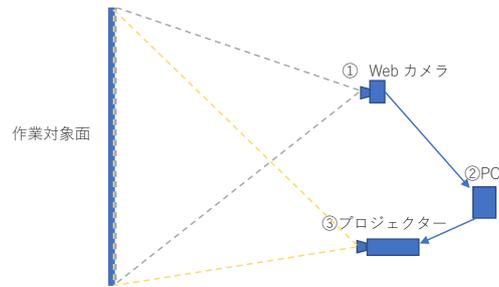


図1 システムの構成

2.2. システムの目指す姿

墨出し作業を行う職人においては、必要な墨出しポイントの正確な位置さえ分かれば良いため、プロジェクションマッピングでは必ずしも図面情報全てを表示させる必要はない。本システムでは、墨出しシステムによってレーザー照射した箇所にプロジェクションマッピングでポイントをプロットし、図形を残す仕組みとした。墨出しシステム単体では1か所照射するごとに墨出しを行う必要があるが、本システムではレーザーが指し示した個所を複数表示させることができるため、連続した墨出し作業が可能となる（図2）。複数点を連続でプロットした後にとまとめて墨出しを行う、または、墨出し不要での直接作業を可能とする。

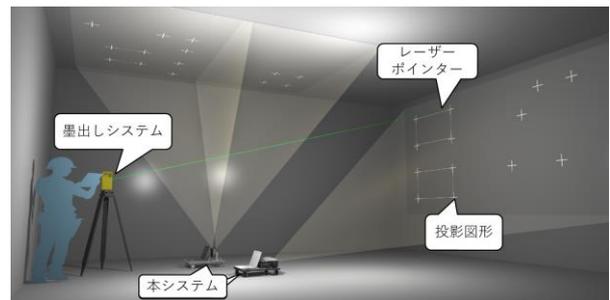


図2 本システムの利用イメージ

2.3. システムの開発方針

2.3.1. 天井及び垂直面への対応

墨出しシステムは空間内の任意の個所をレーザーで正確に指し示すことができるものであるため、天井や壁、柱などの垂直面にも使用できる。特に天井面においては、従来の墨出し作業では、一旦床面に墨出しを行い、墨出し器を用いて天井面にレーザー光を振り上げ、立ち馬等を使って天井面に墨をプロットするという手順が必要であった。本システムは、これらの手順を省略して直接天井面に墨出しができるためメリットが大きいと考えられる。

2.3.2. 位置合わせのためのキャリブレーション省略

位置座標を取り扱うシステムでは、機器設置時または初回起動時に位置を合わせるためのキャリブレーション作業が必要となることが多いが、現場での作業が増えると、ユーザーの負担が増加し、効率化の妨げとなる。作業開始前に必要な作業を極力排除するために、本システムは設置後のキャリブレーション作業不要で利用可能とした。キャリブレーションは墨出しシステムの通常操作として行う。

2.3.3. 安価な機材構成

本システムは、市販されている機材を組み合わせて安価に構成可能である。比較的高価な墨出しシステム1台に対して、本システムを複数台使用することで、墨出しシステムの稼働率を上げつつ、総コストの削減が可能となる。

2.3.4. 多様なプロジェクター・カメラへの対応

プロジェクターは様々なメーカー、価格帯、方式のものを選択可能とし、特定の機種に限定しないものとする。プロジェクターについては、床、壁、天井等の作業対象や、多様な作業環境に対応するために様々なタイプのものを選択可能とした。例えば、床や壁に対しては超単焦点のものを用いることで近い距離での大画面の投影を行い、プロジェクターから投影面まである程度距離が確保できる天井に対しては、小型で短焦点のものを用いるといった使い分けが可能となる。カメラについても同様で、利用環境、必要な精度や画角等に合わせて、一般的な USB ウェブカメラを選択可能とした。

2.3.5. 墨出しシステムによる精度の担保

墨出し作業は本来高精度の専用機材を使用しているものであり、市販されている安価な機材を組み合わせた本システム自体でそれらを代替するような高精度を実現することは困難である。本システムは精度が担保されている墨出しシステムの作業を効率化するものであり、プログラムでの精度向上が業務適用への課題とならないようにした。

2.3.6. 複数機種の墨出しシステムに対応

複数のメーカーのレーザー墨出し機に対応できるものとし、メーカーや機種に依存するレーザー墨出し機の SDK (ソフトウェア開発キット) を利用した個別制御や通信を行わないものとする。また、機種によってレーザーの色が異なるので、赤、緑のレーザーに対応する。

3. プログラムの開発

3.1. プログラムの基本機能

本システムのプログラムは下記の処理から成る (図3)。

1. 作業対象をカメラで撮影しておく、また、作業対象は黒い画面を投影する。
2. 作業対象にレーザー墨出し機のレーザーが照射されると、カメラで検知、レーザーが静止するとその場所を墨出し位置として判定。
3. 検知した墨出し位置にプロジェクターで「+」印を表示する。

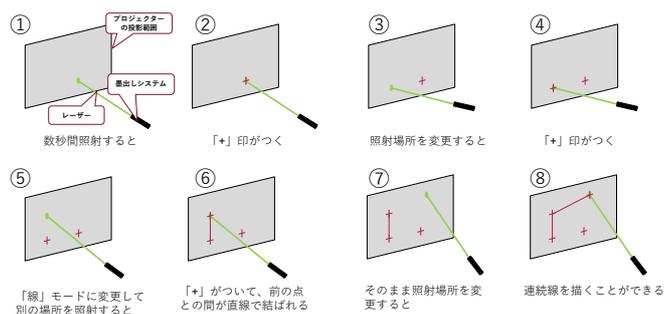


図3 開発システムの基本機能

本システムは作業対象をプロジェクター、カメラに正対した平面に限定していない。また、プロジェクターのレンズ位置とカメラのレンズ位置が異なっている。そのため、カメラでレーザーポインターを検知した位置にプロジェクションで「+」印を表示するには、カメラの画像で検出したレーザー光の XY 位置と、プロジェクターで「+」印を投影する映像上の XY 位置を合致させる必要がある。3D センサーや特殊な制御装置を用いずに、安価な機器を用いて、高度なキャリブレーション不要で利用可能とするため、プロジェクションで表示した正方形の重心とレーザー光の重心を一致させるための収束計算を2次元の画像処理で行なっている (図4)。

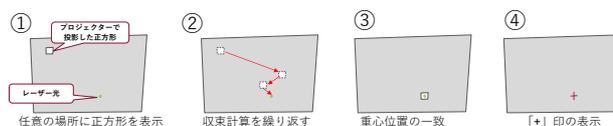


図4 収束計算による「+」印の表示処理

3.2. 物体検出機能の開発

レーザー光の検出及びレーザー光位置に「+」印を重ねるためにプロジェクターで投影した正方形を検出する手段として、物体検出を行なっている。本システムにおいては、物体検出によってレーザー光位置に図形を収束する成功率の目標を90%とした。プロジェクターで投影する正方形は、表示タイミング、図形の形状、大きさを制御できるので、背景差分処理によって比較的容易に検出可能であるのに対し、レーザー光は照射される図形が小さく、表示のタイミングも不定であり、検出率の向上が本システムにおける課題となる。

3.3. テスト用データの生成

Web カメラによるレーザー光位置の検出のために、テスト用のデータを Web カメラにて撮影した。表 1 に示す全 17 のパターンについてそれぞれ 3～6 枚撮影し、テストデータとして使用した。今回は緑色レーザー 6 8 枚、赤色レーザー 5 9 枚を撮影した。

表 1 テスト用データのバリエーション

項目	バリエーション	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
レーザーの角度	垂直	○																
	やや斜め		○															
	もっと斜め			○														
カメラの角度	垂直	○	○															
	やや斜め			○														
	もっと斜め				○													
カメラの距離	1m	○	○	○	○													
	2m					○												
	3m						○											
レーザーの反射	反射なし	○	○	○	○	○	○											
	反射あり							○										
レーザー照射先(壁白等)の色	グレー	○	○	○	○	○	○											
	黒							○										
	緑								○									
	赤									○								
レーザー照射先の形状	平坦	○	○	○	○	○	○											
	曲面							○										
室内照明	有	○	○	○	○	○	○											
	無							○										
照射対象	壁	○	○	○	○	○	○											
	床							○										

3.4. 誤差の評価

検出座標の誤差の評価として正解座標とのピクセル距離を算出し、カメラと被写体との距離、画角から 1 ピクセルの距離を計算し、実際の誤差を評価した (図 5)。

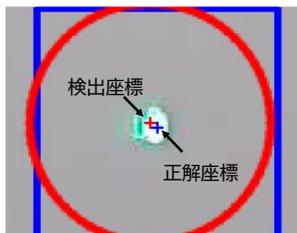


図 5 誤差の評価

3.5. レーザー光の検出処理

はじめに、OpenCV による色成分の抽出と二値化を用いて抽出を行なった (図 6)。その結果、検出の成功率は緑色レーザーで約 75%、赤色レーザーでは約 50% となった。検出失敗の原因としては、レーザーと色味が似ていて光沢のある物があるケース、蛍光灯などレーザーと明るさが似ている物があるケースにおける誤検出が多く (図 7)、この問題をフィルター処理だけで解決するのは困難なため、機械学習による物体検出を行うこととした。物体検出には YOLO V4 (以下、YOLO) を利用した。



図 6 当初のレーザー検出処理



図 7 誤検出の例

3.6. YOLO によるレーザー位置検出の学習について

YOLO によるレーザー光検出のための学習用データには、テスト用に撮影した写真を用いた。緑色レーザー、赤色レーザーから、17 ある撮影パターン 1 枚を評価データとして、それ以外を学習用データとして学習及び評価を行った (表 2)。

表 2 学習用データと評価用データ

	緑色レーザー	赤色レーザー
学習用データ	5 1	4 2
評価用データ	1 7	1 7
計	6 8	5 9

これら学習により、評価データにおいて OpenCV による色成分の抽出と二値化処理で発生していた誤検出がなくなり、レーザー光を 5 mm 以下の精度で 100% 検出できるようになった。

3.7. 位置検出について

YOLO によって高確率でレーザー光の検出が可能となり、誤検出も防止できるようになったが、誤差 1mm 以下となる枚数は変わらず、「+」印をつける位置が数 mm ずれて表示することがわかった (図 8)。YOLO が検出したエリアの中心を検出位置としていたが、レーザー光のハレーションにより形が変形していたのが原因であった。そこで、大まかな位置検出までを YOLO で行うこととし、レーザーを検出した部分を切り出し、最終的なレーザー光の中心を割り出す処理については、当初利用していた OpenCV を用いた画像処理による重心取得に変更した。



図 8 YOLO と加増処理による検出位置の違い

3.8. 収束計算用図形の検出について

収束計算ではプロジェクターにて正方形を表示し、Web カメラでその位置を検出、正方形の重心とレーザー光の重心が一致するまで計算を繰り返している。検出には YOLO

は用いずに OpenCV による二値化を使用した。部屋の明るさや投影対象の材質によって検出率が下がることがあるので、図形二値化の閾値は手動で変更可能とした。

3.9. 墨出し位置の手動補正

本システムにおいては収束計算の成功率の目標を 90% 以上としており、検出や収束計算の失敗を見込んで運用可能なソフト設計としている。位置がずれていた場合は表示された「+」印をテンキー操作で移動可能とし、レーザー光と目視で位置合わせができるようにした(図9)。本機能により、収束計算に失敗した場合でも墨出し作業自体は続行可能となる。

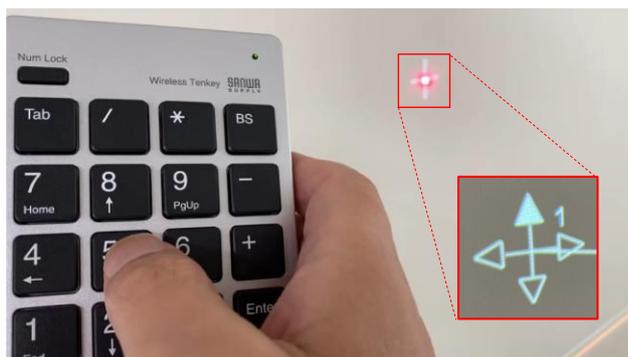


図9 目視による位置補正

4. 動作検証

建設現場にて、本システムを用いて墨出しシステムのレーザーの位置認識と収束計算ができるかの動作検証を行った。PC、Web カメラ、プロジェクターはそれぞれ1台利用、プロジェクターと Web カメラは三脚に取り付け、自由に方向を変えられるようにし、天井スラブ、壁、柱に向けてられるようにした。

天井スラブは、検証開始時点で既に様々なマーカ跡が残り、ケーブル類の施工が先行して行われていた。その中でプロジェクションマッピングを実施したところ、問題なく収束計算ができるケースもあったが、作業対象面によっては収束計算に失敗するケースもあった(図10)。失敗の原因は色が近いマーカ跡をレーザーと誤認識したためであった。



図10 現場動作検証の様子と天井面での表示の様子

壁や柱等の垂直面を対象とした場合、作業対象面は無地に近く、実験環境と同様に高確率で収束計算ができ、1点あたりの収束計算にかかる時間は約3秒と、作業効率の向上が期待できる結果となった(図11)。



図11 柱への表示の様子

検証を通じて、作業場所の明るさや施工状況によってはそれが物体検出の障害となり、収束計算ができないケースがあることがわかった。様々な場面や墨出し対象において最適な機材構成やソフトウェアのパラメータ設定を見つける必要がある。

5. まとめ

機械学習による物体検出とプロジェクションマッピングを活用して墨出し作業の効率化を図るシステムを開発した。本システムを用いることにより、床、壁、柱、天井面に対して作業に必要な情報を正確な位置に表示可能となり、墨出し作業の効率化が期待できる。今後は現場での試行を繰り返し、改良を加えることで、システムとしての完成度を高めていく予定である。

[参考文献]

- 1) ニコン・トリンブル, 建築設備墨出しシステム RPT600, https://www.nikon-trimble.co.jp/products/product_detail.html?tid=40(アクセス日 2023.8.7)
- 2) 加藤崇、清水学：プロジェクションマッピング技術を用いた墨出し技術の開発 その1 システム概念計画と基礎検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、p953-954.2022
- 3) 清水学、加藤崇、木村博巳：プロジェクションマッピング技術を用いた墨出し技術の開発 その2 自動補正技術の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、p955-956.2022