

(11) ジンバル搭載カメラを用いたコンクリート打設のバイブレータの差し込み深さの計測

横田 拓也¹・今井 龍一²・栗原 哲彦³

¹学生会員 東京都市大学大学院 総合理工学研究科建築・都市専攻
(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)
E-mail: g1881646@tcu.ac.jp

²正会員 法政大学准教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科
(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)
E-mail: ryuichi.imai.73@hosei.ac.jp

³正会員 東京都市大学准教授 工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)
E-mail: nkuri@tcu.ac.jp

コンクリート打設は、機器の操作等の手動が主な作業であるため、熟練技能者の経験知に依存している。技能者の高齢化に伴う大量離職が進行していることから、熟練技能者の経験知を計測・収集し、形式知化して後進に継承することが極めて重要である。筆者らは、技能者へのヒアリング等により、締固め作業のバイブレータの差し込み位置・深さ等の振る舞いが経験知に係わることを明らかにしている。そして、差し込み位置の計測手法を考案し、経験知の計測可能性を明らかにしているが、差し込み深さの計測手法の開発は今後の課題である。

本研究は、バイブレータの差し込み深さの計測手法を考案し、ケーススタディにより考案手法の有用性を検証した。その結果、差し込み深さの計測精度が確保されており、実現場においても考案手法を適用できることが分かった。

Key Words: knowledge management, concrete placement, concrete vibrator, image processing

1. はじめに

コンクリート打設は、機器の操作等の手動が主な作業であるため、熟練技能者の経験知を後進に継承していくことは極めて重要である。とくに、施工品質に大きく影響する締固め作業におけるバイブレータの差し込み位置・時間・深さは、熟練技能者の経験知に大きく依存していることが業界内における共通認識となっている。しかし、熟練技能者の高齢化に伴う大量離職が進行していることから¹⁾、技能継承が喫緊の課題である。

課題解決の一方策として、情報通信技術を用いて熟練技能者の経験知を計測・蓄積・形式知化し、後進に継承することが挙げられる。建設業界では、工事現場での作業動線の解析による作業の効率化やウェアラブルセンサを用いた現場作業者の安全管理等の研究開発および実用化が図られている^{2,3)}。具体例として、須長ら⁴⁾は、ウェアラブルカメラを用いて熟練・若手技術者の締固め動作を比較し、熟練技術者が効果的な締固めを実施している

ことを明らかにしている。しかし、熟練技能者の経験知の計測可能性までは明らかにされておらず、バイブレータの位置・時間・深さの計測手法も確立されていない。

そこで、筆者らはコンクリート打設作業における技能継承の基礎技術の開発を最終目標として、様々な計測機器を用いて締固めの模擬動作を計測し、技能者の振る舞いを詳細に計測できることを明らかにしている⁵⁾。また、バイブレータの差し込み位置・時間の計測手法を考案し、模擬現場および実現場での計測により考案手法の有用性を明らかにしている⁶⁾。今後の課題として、バイブレータの差し込み深さの計測手法の開発が挙げられている。

本研究は、バイブレータの差し込み深さの計測手法を考案し、締固めの模擬動作の計測により、考案手法の有用性を検証する。研究方法としては、まず、既存研究での調査結果等を基に、経験知のデータの集計フォーマットを定義する。次に、バイブレータの差し込み深さの計測手法を考案する。そして、ケーススタディにより考案手法の有用性を検証する。

2. 経験知の集計フォーマットの定義

(1) 既存研究での締固め作業の実態調査

本研究では、熟練技能者の経験知を明らかにするため、締固め作業の実態を調査している。既存研究では、コンクリートの施工に関する規程集であるコンクリート標準示方書（施工編）⁷⁾を調査した。その結果、締固め作業に関する基準では、施工の目安幅が大きい基準がみられ、施工品質が技能者の経験則に大きく依存する基準となっていることが明らかとなった⁹⁾。

また、実際の工事現場における技能者の締固め作業を対象として、人の行動を観察・記録するエスノグラフィ調査を実施した。そして、バイブレータの差し込み位置を計測・分析した結果、熟練技能者と経験の浅い技能者とは、差し込み位置・時間等が異なることが明らかとなった。さらに、締固めの作業の役割によっても、バイブレータの差し込み位置・時間・深さ等の振る舞いが異なることを明らかにした⁹⁾。

上記の調査により、既存研究では、締固め作業のバイブレータの差し込み位置・時間・深さを計測対象とし、経験知の計測可能性を明らかにすることとしている。

(2) 経験知のデータの集計フォーマットの定義

本研究では、既存研究で計測対象とした振る舞いに着目し、エスノグラフィ調査での締固め作業の撮影動画の確認・分析および施工関係者・コンクリート打設に関する有識者との意見交換等を実施した。その結果、差し込み位置・時間・深さの振る舞いの項目を具体化・追加する必要があることが明らかとなった。そして、計測したデータを抽出・分析し、形式知化するための経験知のデータの集計フォーマットとして定義した（表-1 参照）。

表-1 より、差し込み ID は、技能者がバイブレータを

表-1 経験知のデータの集計フォーマット

経験知の集計項目		概要
差し込みID		バイブレータの差し込み動作にIDを付与
熟練技能者 or 経験の浅い技能者		経験の浅い技能者か熟練技能者かを記録
差し込み位置	位置座標 (X cm, Y cm)	図面上の差し込み位置の座標
	差し込み位置の間隔 (cm)	差し込み位置の2点間の間隔
	型枠との距離 (cm)	差し込み位置と最も近い型枠との距離
	ホースとの距離 (cm)	コンクリートホースからの最も近い差し込み位置の距離
差し込み時間 (秒)		バイブレータがコンクリート内に差し込まれている時間
差し込み深さ (cm)		足場平面を基準とした深さ（高さ）
引き抜き速度 (cm/秒)		バイブレータをコンクリート中から引き抜く速度
上下動の時間 (秒)		コンクリートにバイブレータを挿入している際のバイブレータの上下動作の時間
上下動の回数 (回)		コンクリートにバイブレータを挿入している際のバイブレータの上下動作の回数

コンクリート中に差し込む動作を検出するごとに加算される ID である。差し込み位置は、現場の特性によらず経験知を抽出可能とするため、規模や条件の異なる現場間で比較可能な相対値とした。また、既存研究の調査結果より、とくに重要な振る舞いである差し込み位置は、差し込み間隔やホース・型枠との距離等に項目を具体化した。さらに、締固め作業の動画の確認の結果、バイブレータを上下に動作させる上下動の動きやバイブレータの引き抜き動作に特徴的であったことから、バイブレータの上下動の回数、時間および引き抜き速度を計測する。

表-1に示した項目は、すべて差し込み位置・時間・深さを計測し、組合せることで算出できる。

3. バイブレータの差し込み深さ計測手法の考案

本稿では、バイブレータの差し込み深さの計測内容を報告する。ここで差し込み深さ（高さ）は、足場平面を基準とし、バイブレータの先端の深さ方向の位置とする。

(1) 考案手法の前提条件

差し込み深さの計測点であるバイブレータの先端部分は、締固めの際にフレッシュコンクリートの中に挿入される。このため、フレッシュコンクリートの中に挿入されていない部分から先端部分の高さを間接的に計測する必要がある。また、バイブレータは大きく振動していることから、バイブレータに直接センサを装着した計測は難しいと考えられる。さらに、経験知を分析して形式知化することを踏まえると、大量の差し込み深さのデータを計測して経験知を蓄積する必要があるため、手動による計測は現実的でない。

これらを前提条件として、本研究では、バイブレータに貼付した目印およびウェアラブルカメラを用いて、画像処理等により差し込み深さを自動的に算出する手法を考案した。

(2) 考案手法の全体像

図-1に考案手法の全体像を示す。計測では、技能者の長靴にジンバル搭載のウェアラブルカメラ（以下、「ジンバルカメラ」とする。）を取り付け、地面と水平にバイブレータを撮影する。また、画像処理の特徴点として、バイブレータに色マーカを貼付する。画像処理では、色相・彩度・明度の3要素の数値の組合せで色を表現するHSV色空間を使用し、各要素の値の範囲により色を抽出する。本手法は、ジンバルカメラによりバイブレータの色マーカを地面と水平に撮影することで、撮影画像の上下中心がカメラの設置高さと同しくなることを利用し、差し込み深さを算出する（図-1参照）。

(3) 考案手法の処理フロー

考案手法の処理フローを図-2に示す。本手法では、ジンバルカメラの動画像、色マーカのサイズ・貼付間隔および長靴下面からのカメラの設置高さ等を入力データとする（図-3参照）。また、各色マーカを認識するように、事前にHSV色空間の各要素の値の範囲を設定する。

考案手法の処理フローとしては、まず、ジンバルカメラの動画像から画像処理によりマスク画像を作成し、色マーカと形状・面積が似ている画素群をラベリング⁸⁾することで、色マーカを特定する。次に、図-4(a)に示すように、特定した色マーカの上端・下端の画像内におけるY座標値を取得し、そのうち画像の上下中央に近い上下2点を抽出する。そして、図-4(b)に示すように、色マーカのサイズ・貼付間隔等を用いて1ピクセル当たりのスケールを算出する。最後に、図-4(b)より、カメラの設置高さ等を用いて差し込み深さを算出する。上記の処理を動画像の各フレームにおいて連続で処理することにより、差し込み深さの時系列データが計測できる。

4. 考案手法の有用性の検証

本研究では、3章の考案手法のケーススタディとして、色マーカを貼付したパイプレータを模したホースを上下させ、色マーカ等の誤認識がない理想的な環境において差し込み深さの計測精度を検証した。また、色マーカの誤認識が発生しやすい屋外で計測を実施し、色マーカの認識状況および差し込み深さの計測状況を確認した。上記2つのケーススタディにより、考案手法の有用性を検証した。

(1) 理想環境での計測精度の検証

a) 実験概要

本研究では、差し込み深さの計測精度を検証するため、色マーカの誤認識等が殆ど発生しない理想環境である屋内において、パイプレータを模したホースを上下に動かし、差し込み深さを計測した。計測には、ジンバルカメラである「DJI OSMO POCKET」を使用した。

実験概要を図-5に示す。計測では、ジンバルカメラを机の上に設置し、パイプレータを模したホースに色マーカを6色貼付した。また、差し込み深さの真値の計測のために標尺を設置し、差し込み深さの真値と計測値とを比較することで、計測精度を検証した。差し込み深さの基準は、ジンバルカメラを設置した机の上とした。差し込み深さの最大値は71cmである。

b) 実験結果

差し込み深さの計測結果を図-6に示す。その結果、全てのフレームにおいて差し込み深さを計測できていた。

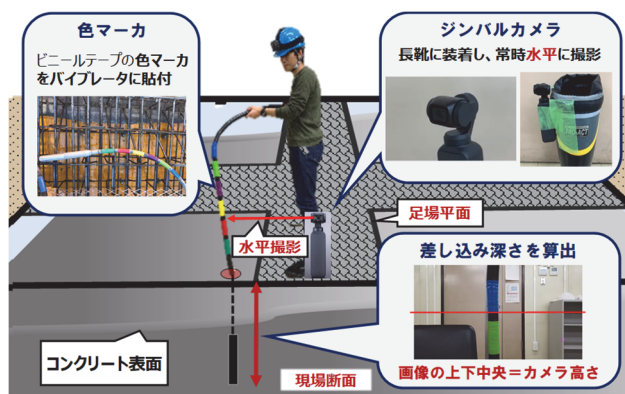


図-1 考案手法の全体像

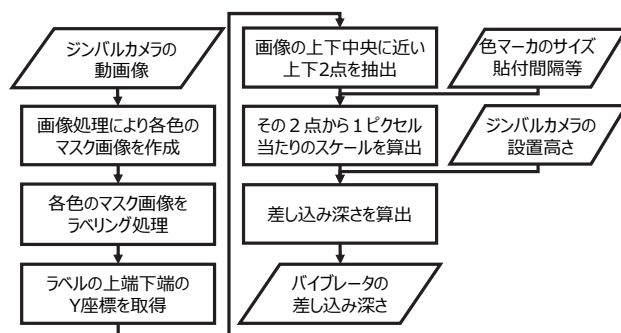
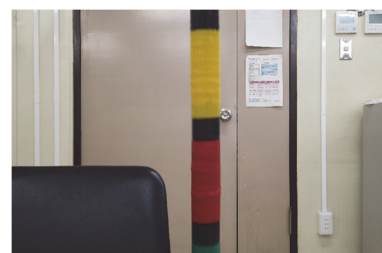
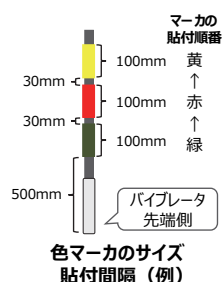
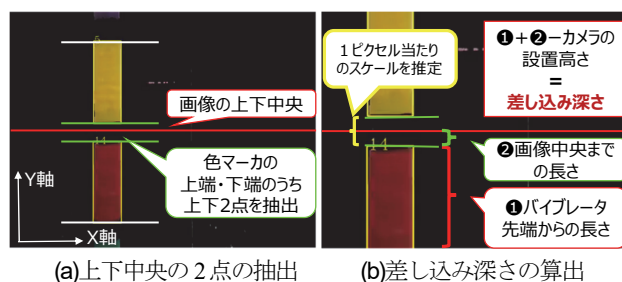


図-2 考案手法の処理フロー



ジンバルカメラの動画像 (例)

図-3 入力データ

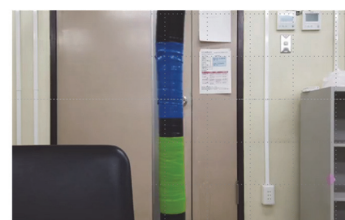


(a) 上下中央の2点の抽出 (b) 差し込み深さの算出

図-4 差し込み深さの算出過程



実験の様子



ジンバルカメラの動画像 (例)

図-5 実験概要およびジンバルカメラの動画像例

差し込み深さの最大値は 71cm 前後となっており、最大値の真値と殆ど同様の値となった。また、差し込み深さの真値と計測値との比較を 5 フレーム分実施した。その結果、誤差は平均で 2.10cm であった。この誤差は、パイプレータを下層のコンクリートに 10cm 程度差し込むという基準より、許容内であると考えられる。以上より、考案手法の有用性を確認できた。

(2) 屋外での色マーカの認識・深さの計測状況の検証

a) 実験概要

本手法は、色マーカの誤認識により、計測誤差が発生する可能性がある。そこで、本研究では、色マーカの誤認識が発生しやすい屋外において締固めの模擬動作を計測し、色マーカの誤認識の影響を検証した。計測は、4.1 節の実験と同様のホースを上下に動かし、台の上に設置したジンバルカメラにより差し込み深さを計測した。

b) 実験結果

図-7 にジンバルカメラの動画画像の画像処理結果、図-8 に屋外での差し込み深さの計測結果を示す。その結果、図-7 より、色マーカ以外の様々な色が認識されているものの、色マーカのみをラベリングできており、誤認識が殆ど発生しないことが確認できた。図-8 より、計測誤差が発生しているものの、差し込み深さの軌跡を計測できていることが確認できた。そのため、計測誤差が発生した箇所のみをフィルタリングできれば、実際の工事現場においても計測が可能であると考えられる。以上より、考案手法の有用性を確認できた。

5. おわりに

本研究は、既存研究での調査結果等を基に、経験知のデータの集計フォーマットを定義した。そして、差し込み深さの計測手法を考案し、ケーススタディにより考案手法の有用性を検証した。その結果、差し込み深さの計測精度が確保されており、かつ誤認識が発生しやすい実現場においても考案手法を適用できることが分かった。

今後の課題として、実際の工事現場において計測を実施し、実現場での考案手法の有用性を検証することが挙げられる。そして、実際の工事現場の熟練技能者を対象に計測を実施し、熟練技能者の経験知の抽出を試行することが挙げられる。

謝辞：本研究の遂行にあたっては、東急建設株式会社の伊藤誠氏、清水建設株式会社の宇野昌利氏、根本浩史氏には貴重なご意見を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

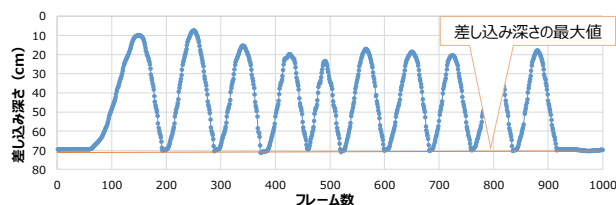


図-6 理想環境での差し込み深さの計測結果

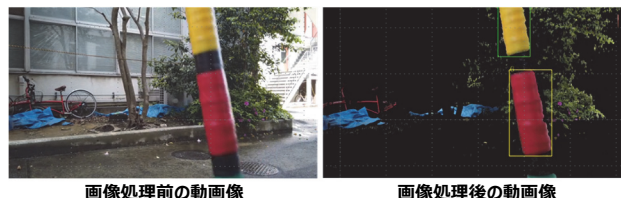


図-7 画像処理結果の一例

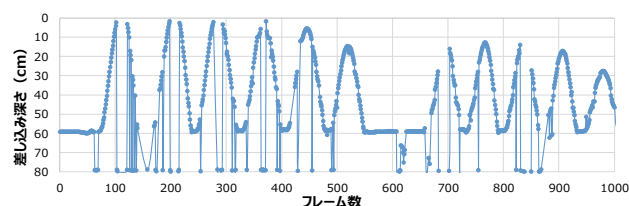


図-8 屋外での差し込み深さの計測結果

参考文献

- 1) 国土交通省：コンクリート生産性向上検討協議会，<<http://www.mlit.go.jp/tec/i-con-concrete.html>>，（入手 2019.6.7）。
- 2) 田村泰史，稲垣孝，桑原茂雄，田中優：土木現場における作業動線解析による作業効率化の研究，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.71，No.4，pp.131-138，2015。
- 3) ITmediaBUILT：生体センサーで現場作業者の安全を管理、大林組がサービス販売へ，<<http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/art-cles/1704/12/news036.html>>，（入手 2019.6.7）。
- 4) 須長真介，辻田陽一郎，二村憲太郎，村上順菜，伊代田岳史：ウェアラブルカメラを用いた熟練・若手技術者のコンクリート締固め技術比較実験，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.70，pp.765-766，2015。
- 5) 横田拓也，今井龍一，栗原哲彦，谷口寿俊，伊藤誠：コンクリート打設作業における経験知計測に関する研究，第 34 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，日本知能情報ファジィ学会，Vol.34，pp.748-749，2018。
- 6) 今井龍一，栗原哲彦，谷口寿俊，伊藤誠，横田拓也：ウェアラブルカメラの動画画像を用いたパイプレータの差し込み位置の計測プログラムの開発，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.74，No.2，pp.I_102-I_112，2018。
- 7) 土木学会 コンクリート委員会：2017 年制定 コンクリート標準示方書（施工編），pp.108-123，丸善出版，2018。
- 8) OpenCV 3.0.0-dev documentation：Structural Analysis and Shape Descriptors，<https://docs.opencv.org/3.0.0/d3/dc0/group_imgproc_shape.html>，（入手 2019.6.7）。