

◇技術紹介 Technical Report

# 配筋自動検査システムの開発 Development of Automatic Reinforcement Inspection System

中村 允哉 Masaya Nakamura  
中林 拓馬 Takuma Nakabayashi  
上田 航平 Kohei Ueda  
池田 雄一 Yuichi Ikeda

## 1. はじめに

鉄筋工事において、鉄筋が設計通りに組み立てられているかを確認する配筋検査は、施工管理者の重要な業務の一つである。この検査は、設計図書をはじめとする様々な情報を参照して実施する。施工管理者はすべての構造部材を確認する必要があるため、配筋検査に膨大な時間を要している。しかし、人員不足や働き方改革による残業時間の短縮要請等の労務状況から、配筋検査の自動化は不可欠であり、高い計測精度を有する配筋検査の自動化システムの開発が急務となっている。

そこで、大林組では2018年に米国 SRI International 社と連携して、ステレオカメラの撮影画像を利用し、鉄筋径や鉄筋間隔を自動で計測する配筋自動検査システム (PoC 版) を開発した。PoC 版では、撮影画像から点群データを生成し、鉄筋の位置、間隔および径の推定に利用した。その後、継続して開発したプロトタイプシステム (以下、本システム) では、新たに AI を用いて鉄筋径を自動推定することで精度向上を図った。また、実運用を意識して推定結果の誤りを手動で修正できる設計とした。本報では、システムの概要と複数の現場で実施した検証実験の結果について紹介する。

## 2. システムの構成と処理フロー

### 2.1 システム構成

本システムの全体構成を Fig.1 に示す。大別すると、検査パッケージ、計算用サーバー、Web アプリから構成される。本システムでは、鉄筋径や鉄筋間隔などを算出するためにステレオ画像から点群データを生成した。点群データの処理および深層学習を用いた AI 推定は計算負荷が非常に高い。タブレット端末では実用的な時間内で処理することが難しいため、別途計算用サーバーを用意し、データを転送して処理した。撮影開始や結果の確認など、ユーザーが行うすべての操作はタブレット端末上の Web アプリにて行える。

検査パッケージを Fig.2 に示す。検査パッケージは、計測用のメインのステレオカメラ 1 セット (2 基) と、点群データ取得処理補助用のカメラ 1 基の他、暗所撮影用の LED 照明により構成される。

### 2.2 処理フロー

本システムの処理フローを Fig.3 に示す。まず、ユー

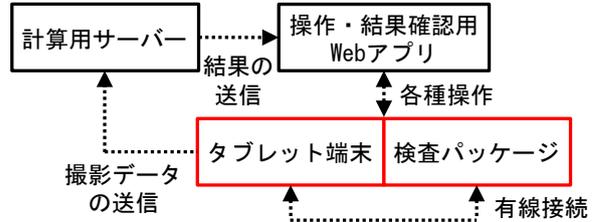


Fig. 1 システムの構成  
System Configuration



Fig. 2 検査パッケージ  
Inspection Package

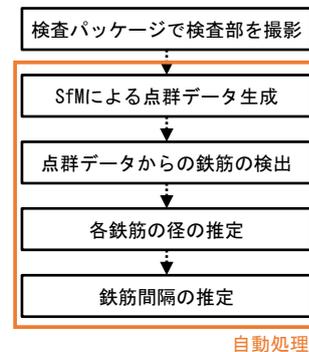


Fig. 3 システムの処理フロー  
System Processing Flow

ザーがステレオカメラで検査対象部を動画撮影する。次に、動画撮影したステレオ画像を利用して Structure from Motion (SfM) により配筋の点群データを生成する。本システムで生成された点群データの例を Fig.4 に示す。生成された点群データは一つのまとまったデータであるため、計測対象となる各鉄筋を個別に検出する処理を行う。この処理により鉄筋一本ごとの点群データが取得できる。

鉄筋径の推定には、各鉄筋を表す点群データの形状から径を推定する手法のほか、深層学習を利用した着眼点の異なる2つのAI推定モデルを用いた。各推定モデルによる処理では、推定結果と同時にどの程度信頼できる結果であるか(信頼度)を算出できる。この信頼度に加え、2つのAI推定モデルの推定結果が一致するか否かによって最終的な推定結果、および推定に対する確度を出力するフローとした。この後、鉄筋間隔の推定処理は、先に得られた径の推定結果と点群データを用いて行う。

### 3. 各計測機能

#### 3.1 鉄筋径・鉄筋間隔の計測機能

本システムでは、まず、Fig.5に示すWebアプリからBIMデータ上の検査対象部材を選択する。次に、検査パッケージで動画撮影することで、先述したFig.3の処理にて鉄筋径・鉄筋間隔を自動的に計測できる。計測結果例をFig.6に示す。同図では縦方向に配列された各鉄筋の鉄筋径と鉄筋間隔が同時に表示されているのがわかる。2.2で示した通り、鉄筋径は複数のAI推定モデルによって推定される。Webアプリ上ではこれらの推定結果が一致しているかに応じて具体的に以下のルールによって色付けして表示した。

- ・青：各推定モデルによる推定結果が一致し、信頼度も閾値以上
- ・橙：各推定モデルによる推定結果が一致したが、信頼度は閾値以下
- ・赤：各推定モデルによる推定結果が一致せず、一方のAIの結果を採用
- ・紫：AIが鉄筋径を推定できず、点群データからの推定結果を採用

この機能により、ユーザーは本システムが出力した鉄筋径の推定結果を採用するか判断できる。例えば、推定結果が青以外の場合には、コンベックス等による実測をするといったルールを設けると効果的である。

#### 3.2 かぶり厚さの計測機能

かぶり厚さの計測では、型枠などから取得された点群データと、点群データから特定された各鉄筋の情報を利用した。かぶり厚さの計測結果の一例をFig.7に示す。本機能を利用するには、鉄筋径、鉄筋間隔の計測処理が実行された後、Webアプリ上でかぶり厚さの計測機能を実行する。型枠の面などを指定することで、指定された面

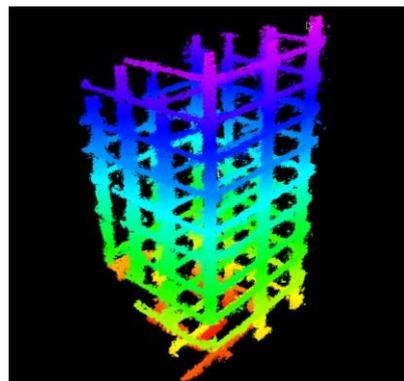


Fig. 4 システムで取得した点群データ例(高さで着色)  
Example of Point Cloud Acquired by the System

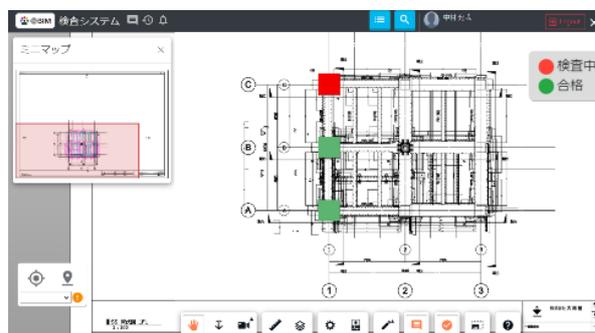


Fig. 5 BIMデータ上の検査対象部材の選択画面  
Screen for Selecting Parts to be Inspected on BIM Data

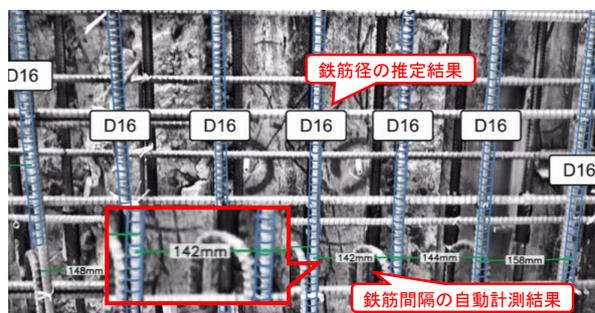


Fig. 6 鉄筋径・鉄筋間隔の計測結果例  
Example of Measurement Results for Diameter and Pitch

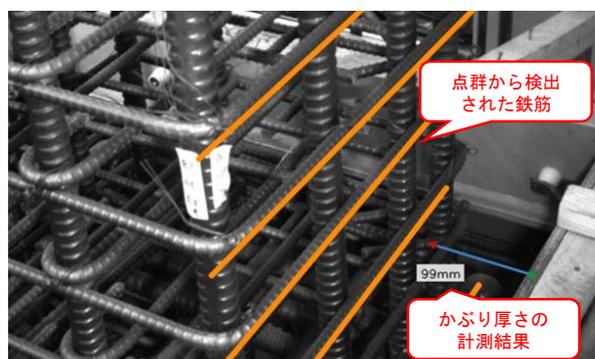


Fig. 7 かぶり厚さの計測結果の一例  
Example of Measurement Results for Cover Thickness

に最も近い鉄筋が自動選択され、かぶり厚さが計測できる。前述の通り、計測には点群データを利用していることから、撮影方向には依存せず、画像の奥行方向にもかぶり厚さを計測することができる。

#### 4. システムの精度検証実験

##### 4.1 実験概要

Table 1 に示す4つの工事現場において、本システムで鉄筋間隔および鉄筋径の計測を行った。計測対象は基礎配筋のうち、基礎梁・柱・壁とし、100箇所以上の部材(N ≥ 100)を計測した。

鉄筋間隔の計測状況を Fig.8 に示す。同図に示す通り、各部材を対象に動画を撮影し、システムにより計測値を出力した後、コンベックス等による実測値と比較した。計測は撮影方向奥側にある表層以外の鉄筋も対象とし、かつ、日照状況(日向/日陰)に関わらず実施した。なお、計測誤差については、国土交通省が定めた「デジタルデータを活用した鉄筋出来形計測の実施要領(案)」<sup>1)</sup>を参考に、以下の式にて評価した。

$$P_A, P_B = D / (n - 1) \quad (4-1)$$

$$\varepsilon = (P_A - P_B) / \varphi \quad (4-2)$$

ここで、 $P_A$  : システムによる計測値 (mm)

$P_B$  : コンベックス等による実測値 (mm)

$D$  : n 本間の鉄筋間隔の合計寸法 (mm)

$n$  : 鉄筋本数 (本)

$\varepsilon$  : 計測誤差 (%)

$\varphi$  : 対象の鉄筋径 (mm)

鉄筋径の検証では、Fig.9 に示すように各部材を対象に動画を撮影し、構造図やロールマークに示された鉄筋径と比較して正誤を判定した。鉄筋間隔の計測と同様、撮影方向奥側の表層以外の鉄筋も対象とし、かつ、日照状況(日向/日陰)とともに撮影条件を記録した。

##### 4.2 鉄筋間隔の計測結果

コンベックスを用いた鉄筋間隔の実測値に対するシステムの計測誤差の度数分布をFig.10に示す。なお、同図の計測誤差は式(4-2)に示したように、誤差値を鉄筋径で除した相対値であり、先の要領(案)では±30%以内を目安としている。同図から、本システムの結果はすべてが±25%の範囲に入り、先の要領(案)の目安に対してより高い計測精度であった。また、同図より本システムの計測誤差はマイナス方向に生じる頻度がやや高く、システムの計測値が実測値よりもやや低い値を示す傾向であることがわかった。

Table 1 対象とした工事現場の概要  
Overview of Target Construction Site

工事現場	用途	計測対象	計測した鉄筋
A	オフィスビル	柱壁	D13, D16, D19, D22, D35, D38, D41
B	商業施設	基礎梁	D13, D19, D22, D25
C	工場	柱基礎梁	D13, D16, D22, D29
D	データセンター	基礎梁	D35

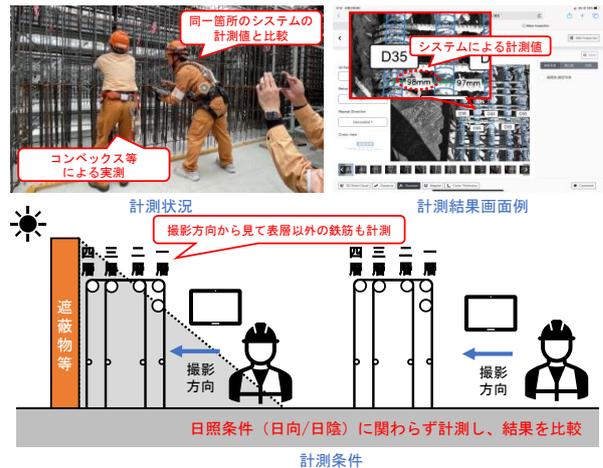


Fig. 8 鉄筋間隔の計測状況  
Measurement Status of Reinforcing Bar Pitch



Fig. 9 鉄筋径の計測状況  
Measurement Status of Reinforcing Bar Diameter

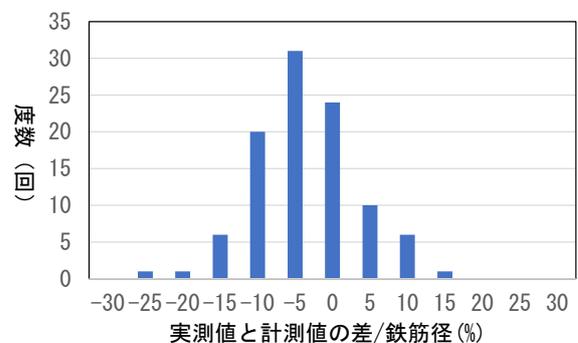


Fig. 10 鉄筋間隔の計測誤差(相対値)の度数分布  
Frequency Distribution of Measurement Error (Relative Value) of Reinforcing Bar Pitch

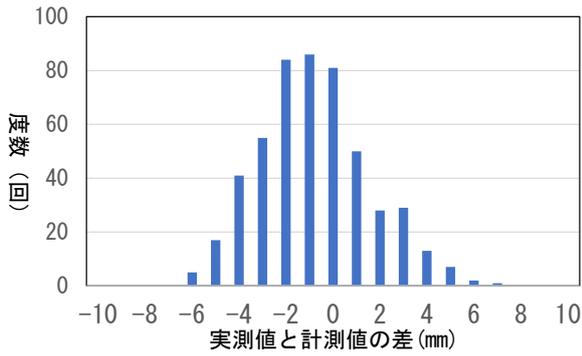


Fig. 11 鉄筋間隔の計測誤差の度数分布

Frequency Distribution of Measurement Error of Reinforcing Bar Pitch

Table 2 撮影状況別の鉄筋間隔の計測誤差  
Measurement Error of Reinforcing Bar Pitch Depending on Shooting Conditions

	撮影回数	計測箇所	誤差±5mm超の回数	誤差±5mm以内の割合	計測誤差(計測値と実測値の差: mm)ごとの頻度(回)														
					-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
全体	100	499	8	98.4%	0	5	17	41	55	84	86	81	50	28	29	13	7	2	1
表層のみ	75 [19]	381	5	98.7%	0	3	16	34	39	65	68	63	33	25	22	8	3	1	1
2層目以降	25 [11]	118	3	97.5%	0	2	1	7	16	19	18	18	17	3	7	5	4	1	0
日射のみ	70 (14)	364	4	98.9%	0	3	12	28	40	60	63	54	32	18	18	10	3	1	0
日影のみ	30 (11)	135	3	97.8%	0	1	3	11	13	21	20	20	16	10	11	3	4	1	1

※撮影回数内、□は日影での撮影回数、○は2層目以降の撮影回数を示す

個々の鉄筋間隔の計測誤差値(計測値-実測値)の度数分布をFig.11に示す。同図より、実測値に対するシステムの計測誤差の絶対値は最大で7mmであった。また、計測誤差が±5mm以内に入った割合は98.6%となり、およそ2σのデータが±5mm以内であることが示された。

動画撮影を行った日照状況や撮影距離の変化(表層/2層目以降)による比較をTable 2に示す。同表より、撮影条件によらず同程度の計測精度を示しており、日照状況による影響や多段配筋に対する影響は小さかった。なお、日射がより強く反射する環境(例えば、デッキスラブ上の床配筋)などでは未検証であるため、今後、検証を行う予定である。

### 4.3 鉄筋径の計測結果

鉄筋径別の計測本数と正答率をFig.12に示す。同図より、計測対象の配筋で使用されていた鉄筋径に偏りがあったため、各径の計測本数にばらつきはあったが、正答率は最高100%、最低78%、全体では94%であった。なお、正答率が比較的低い径においては、AIの学習量が不

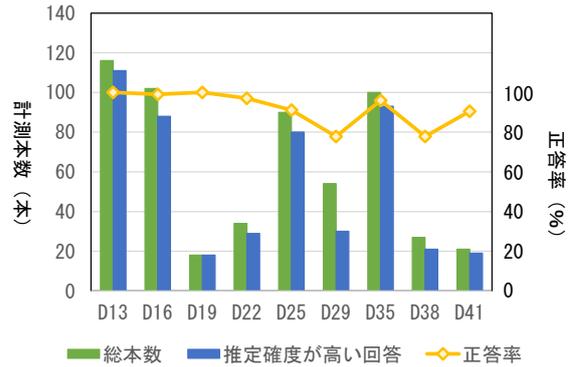


Fig. 12 鉄筋径別の計測本数と正答率

Number of Measurements and Correct Answer Rate by Reinforcing Bar Diameter

Table 3 AIによる推定精度の分布  
Distribution of Estimated Accuracy by AI

	AIによる推定精度		全体
	青(高い)	青以外(低い)	
回答の割合	91.5%	8.5%	100.0%
正答率	98.6%	45.8%	94.0%

足していると考えられることから、追加の学習により正答率の向上が期待できる。

AIによる推定精度の分布をTable 3に示す。3.1節で述べたAIによる鉄筋径の推定精度の内、青(推定精度が高い)として回答した割合は91.5%であった。その際の正答率は98.6%であり、推定精度の信頼性が示された。

## 5. おわりに

本報では、点群データ、AIおよびBIMデータを活用した配筋自動検査システムのプロトタイプについて紹介した。結果として、鉄筋径・鉄筋間隔ともに高い計測精度であることが示された。また、検査時の日照状況や多段配筋の影響はほとんどなく、どの条件下においても同等の結果が得られた。

今後はより様々な環境・条件での実証実験を行い、実用化を目指していく予定である。

### 参考文献

- 1) 大臣官房技術調査課, “デジタルデータを活用した鉄筋出来形計測の実施要領(案)”, 国土交通省, 2023.7, <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001619475.pdf>, (参照 2024-05-22)