

20. 配筋自動判定システムの開発

株式会社大林組

○ 池田 雄一
坂上 肇
浜田 耕史

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の主要構造部材である鉄筋に関する施工ミスや検査ミスが後を絶たない。その結果、発注者から配筋検査体制の強化が求められ、施工者側は配筋検査の全箇所全数記録化などで対応している。しかし、部位（柱、梁、スラブ、壁ほか）や場所、方向、階によって配筋はすべて異なるため、配筋検査の全箇所全数記録化は多くの手間が掛かる。そこで、配筋検査の報告書作成や配筋写真の整理などの業務を効率良く行うため、配筋検査を支援するシステムが開発された。その結果、配筋検査の業務効率は大幅に向上し、記録ミスなどを低減できた¹⁾。

さらに、配筋状態（鉄筋本数、径、ピッチなど）を自動計測および判定できるシステムを開発した。本システムは、市販のデジタルカメラで撮影した配筋写真に画像処理技術を適用すると配筋状態を自動的に計測および判定できる。

本報では、開発したシステムの内容、建築現場での検証実験について報告する。

2. 現状の配筋検査の課題

建築工事の配筋検査時に撮影される配筋写真の一例を図-1に示す。同図は2方向の柱筋を1方向から撮影した配筋写真である。検査対象の主筋とせん断補強筋を径ごとに異なる色のカラーチューブで巻き、配筋ピッチを確認しやすくするため検測用ロッドやリボンロッドをセットして、検査場所や配筋要領を書き込んだ黒板を含めて配筋写真を撮影している。通常、柱1本あたり1～2枚、梁1本あたり3枚（端部2枚、中央1枚）、スラブや壁は代表的な箇所を1枚、開口補強や端部定着部などの特別な箇所は各1枚撮影する。検査終了後、事務所へ戻り、膨大な数量の配筋写真を検査箇所ごとに振り分け、写真帳にまとめて監理者へ提出する。プロジェクトごとに提出書類や配筋写真の内容に差異はあるが、配筋検査は多くの手間を要する管理業務である。躯体工事期間中の管理業務の比率を工種別にヒアリング調査し

た結果、鉄筋工事に関する業務が約1/4を占めていたという報告もあり、その内訳の半分以上が品質管理業務だった。

全箇所全数記録の配筋検査は、検査箇所が非常に多く、配筋要領が場所ごとにすべて異なる。その結果、万が一の確率で起こる可能性のある施工ミスの見落としや検査場所そのものを間違えるといったヒューマンエラーが生じる可能性を秘めている。

3. 配筋自動判定システムの基本設計

3.1 開発コンセプト

配筋検査時に鉄筋工事の施工ミスを実際に検出し、検査精度を大幅に向上させるため、配筋状態を正確に計測し、合否を判定できるシステムの開発に着手した。開発コンセプトを以下に示す。

- ①現状の配筋検査スタイルの踏襲・維持
- ②ハンズフリーとなるシンプルな機器構成
- ③鉄筋径を正確に判別するミリ単位の精度
- ④計測結果がその場でわかるリアルタイム性

3.2 計測手法の選定

計測用機器として、現状の配筋検査で利用しているデジタルカメラの他、カメラレンズを2つ持つステレオカメラと製造業で利用されている小型の3次元スキャナーの諸性能を比較検証した。



図-1 配筋検査写真例

比較結果を表-1 に示す。

ステレオカメラは、左右の画像の視差から奥行き方向を含めた3次元情報を得ることができ、自動車の衝突防止機能を含む運転支援システム等に組み込まれている。撮影面内の計測精度は画素数（解像度）に依存し、奥行き方向の計測精度はカメラレンズ間距離（基線長）に依存する。最近、図-2 左に示すような小型ステレオカメラが市販されているが、基線長は100mm以下と短いため、奥行き精度はセンチ単位以上となってしまう。ミリ単位の精度を要求するとステレオカメラの基線長は2mを超え、装置が大型化して工事現場内で携帯するには非現実的な大きさとなる。

図-2 右に示す3次元スキャナーは、製造業のリバーエンジニアリング向けに開発されたハンディ式である²⁾。3次元スキャナーでは、得られた3次元点群データから鉄筋のみを抽出し、各種計測作業が事務所での後処理となること、赤外線を使用するタイプであると屋外で安定して使用できないこと、配筋検査用の写真を別に撮影しなければならないことなどの理由から、運用は困難であると判断した。以上の結果、携帯性・計測精度・リアルタイム性などを重視して計測用機器にデジタルカメラを選定した。

3.3 課題の抽出

デジタルカメラによる配筋検査写真に対して画像処理技術を適用して寸法を計測する場合、以下の課題を解決する必要があった。

- ①屋外環境下での画像処理技術の適用
 - ②鉄筋径の実測結果からの径の特定方法
 - ③確実に鉄筋のみを抽出するための補助策
- (1) 屋外環境下での画像処理技術の適用

画像処理技術は、製造業における工場内の生産ラインに設置する視覚センサーとして利用が進展してきた。屋内では、高速にコンベア上を移動する部品を瞬時に判別できる。屋外での利用については、道路のセンターラインの把握、車のナンバー認識といった平面的で定型的なものに限られている。立体的な形状を有する異形鉄筋を屋外で精密に計測するには多くの課題があった。

- (2) 鉄筋径の実測結果からの径の特定方法

異形鉄筋では配筋された鉄筋の向きによって、画像処理の計測結果が異なる。異形鉄筋の中で最も主流である竹ふし鉄筋の正面写真を図-3 に示す。同図(a)のようにリブが左右端にある状態（以下、リブがち）と同図(b)のようにリブが左右端以外にある状態（以下、ふしがち）では、同じ径の鉄筋でも計測結果が大きく異なる。上記から鉄筋の向きによって、径を正しく特定できない可能性がある。また、竹ふし鉄筋の次に利用が多いねじふし鉄筋の形状を図-4 に示す。同図から、二方向のねじ部をカットした楕円形状をしている

ことがわかる。したがって、ねじふし鉄筋も撮影する方向によって大きく断面形状が異なるため、径を正しく特定できない可能性がある。

4. 画像処理による計測と課題の解決

4.1 画像処理による鉄筋の計測

画像処理を適用した計測は、対象（鉄筋）の抽出と抽出された対象の面積や長さの計測の大きく2つの内容に分かれる。計測対象の抽出には、通常、各画素の輝度値に応じた2値化が利用される。計測対象の面積や長さの計測では、写真の画素数をカウントし、実空間上の寸法に変換する。画像処理による計測概要を図-5 に示す。

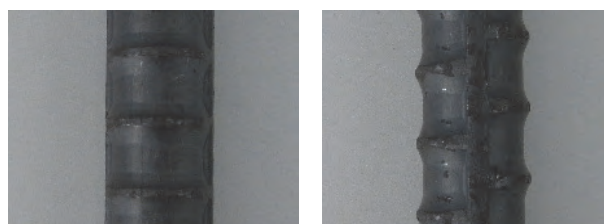
デジタルカメラは単眼であり、奥行き方向の距離情報が得られないため、径の自明な丸形マーカを利用してカメラからの距離を算出した。丸形マーカはデジタルカメラと正対しなくと

表-1 計測手法の比較結果

	デジタルカメラ	ステレオカメラ	3次元スキャナー
コスト	◎	◎～△	◎～×
大きさ・携帯性	◎	◎～△	○or△
簡便性	◎	◎～△	○or△
計測精度	◎or○	◎～△	○or△
リアルタイム性	◎	○	△
3次元モデル化	△	○	◎
総合評価	◎	○	△



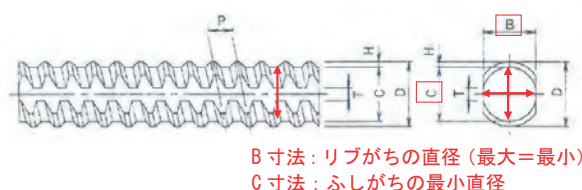
図-2 ステレオカメラと3次元スキャナー



(a) リブがち

(b) ふしがち

図-3 竹ふし鉄筋の向きによる径の違い



B寸法：リブがちの直径（最大＝最小）
C寸法：ふしがちの最小直径

図-4 ねじふし鉄筋の形状

も、画像上で見掛けの最大径（楕円の長径）を算出できる。配筋写真から計測対象の鉄筋のみを確実に抽出するため、鉄筋背後に白色帯状の背景をセットした。マーカーを背景上に2個セットすると、デジタルカメラマーカー間（ L_1 、 L_2 ）とマーカーマーカー間（ L_3 ）を3辺とする三角形から、デジタルカメラ位置に対する鉄筋位置の3次元座標が求められる。鉄筋径はデジタルカメラとの距離およびマーカーとの大きさの比から、ピッチは隣同士の鉄筋の位置座標値から、それぞれ求められる。

4.2 屋外での画像処理による鉄筋抽出

屋外環境下でも鉄筋を正確に抽出するために、各種の鉄筋抽出アルゴリズムについて検証した結果を図-6に示す。まず、設定した小領域内で算出された相対的な閾値で入力画像iを2値化する手法（局所2値化）によって抽出を試みたが、同図iiのように影を鉄筋と誤認識した。そこで、影の影響を低減するため、ストロボ撮影をしたところ、同図iiiのような2値化画像を得た。そこで、輝度値がほぼ一定の領域に分割し、その領域ごとに3つの領域（背景、影、鉄筋）に区分するアルゴリズムを考案し、検証した。その結果、同図ivのように鉄筋（赤色部分）と影を明確に区分することができた。この画像処理アルゴリズムをシステムに実装した。

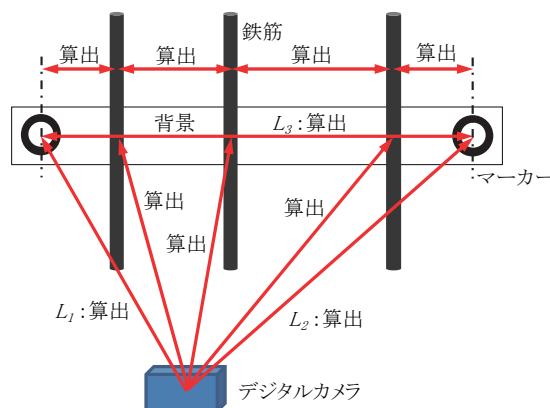
4.3 鉄筋径の補正

撮影場所と撮影対象の配筋の位置関係から、斜めからの撮影を余儀なくされるケースがある。また、撮影対象の幅が広い場合、端部の鉄筋は必然的に斜めからの撮影と同等の撮影角度になる。この場合、図-7のように背景への投影幅が本来の鉄筋径より拡大される。この現象は、端部の鉄筋において顕著であり、特に太径鉄筋では、まれに鉄筋径を誤判定するケースが生じた。そこで、斜めに撮影された鉄筋に対して、正面からの撮影と同様の計測値となるような補正を行った。

4.4 鉄筋径判定手法の考案

竹ふし鉄筋では、各径のすべての向きで実測した鉄筋径の範囲と画像処理で算出した鉄筋径の軸方向分布における最大値（以下、最大直径）とを比較して、鉄筋径を特定する手法を考案した。ただし、実測した鉄筋径の範囲は、上位と下位の径で重複する領域（以下、重複領域）が生じるため、鉄筋径の軸方向分布における最小値（以下、最小直径）を算出し、最大直径との差分（＝ふしの高さ）を計算した。差分がふしの高さと同じ場合は、ふしがちと判断して上位の径と特定する。等しくない場合は、下位の径と特定する。なお、各鉄筋径の実測値は鉄筋メーカー3社製の鉄筋から、ふしの高さの範囲はJIS G 3112:2010（鉄筋コンクリート用棒鋼）から得た。

近年、柱・梁の主筋（特に太径）を中心に機械式継手が採用され、それに伴いねじふし鉄筋の利用が増えてきた。ねじふし鉄筋は竹ふし鉄筋と形状がまったく異なり、竹ふし鉄筋の鉄筋径判定フローではその径を特定できない。ねじふし鉄筋の断面の特徴に着目し、最小直径から径を判定する専用のフローを考案した。鉄筋メーカー3社製のねじふし鉄筋を実測したところ、各径の実測値の範囲は重複しないことがわかった。本フローにより一意にねじふし鉄筋の径が特定可能である。



- ・マーカー径 M_r mmは既知
- ・マーカーの画像上での最大径は M_p pixel
- ・マーカーまでの距離 L_1 mm、計測対象の鉄筋までの距離 L_t mm
- ・計測対象の画像上の鉄筋径 T_p pixel
- ・実際の鉄筋径 $T_r = T_p \times M_r \times L_t / (M_p \times L_1)$

図-5 画像処理の計測概要

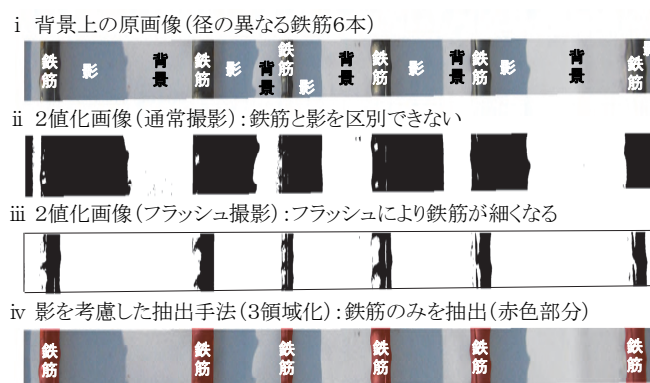


図-6 鉄筋を抽出する画像処理手法の比較

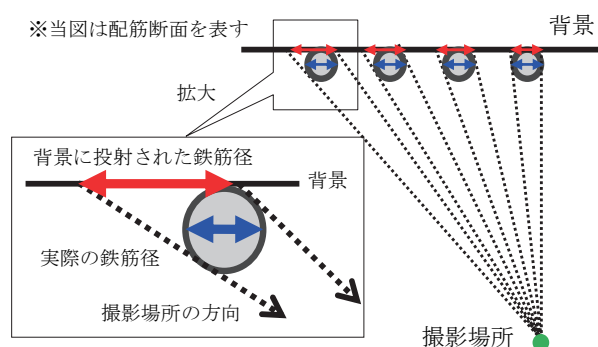


図-7 端部の鉄筋径の補正概念

5. システム開発と現場検証実験

5.1 システムの概要

(1) システムの機器構成

機器構成を図-8 に示す。鉄筋を計測するには画像処理プログラムを実行するパソコン（以下、PC）が必要である。工事現場での使用に耐えうる堅牢・防水型のPCを選択し、肩掛けや首掛けを可能にし、ハンズフリーが可能なスタイルとした。デジタルカメラで撮影した画像は、無線LAN機能内蔵型メモリーカードを利用してPCへ自動転送する。その後、画像処理プログラムを実行して鉄筋を計測し、鉄筋径を特定して判定結果をPC画面に表示する。

(2) システム画面

システム画面を図-9 に示す。工事現場で使用することを考慮して、ペンまたは指だけですべての操作ができるように設計した。システム利用の流れは、まず、マーカーと背景を検査対象の鉄筋背後にセットし、配筋写真を撮影する。PCへ自動転送された撮影画像を選択し、撮影場所を入力する。計測前に設計情報を入力すると、計測結果を自動判定する。計測結果として、縦筋と横筋の鉄筋本数、径、ピッチがそれぞれ得られるが、表示が不要な情報（例えば、主筋のピッチ）は個別に非表示にできる。最後に、計測結果が表示された配筋写真の画像をPCに保存する。

(3) 背景器具の開発

試作時の背景は、アクリル板で製作し、その裏面に磁石を貼付して鉄筋と固定した。鉄筋の背後に挿入しやすくするため、300～400mmの長さに分割した。この背景を利用して各種実験を行っていたところ、磁力で付着した鉄粉等によって背景が汚れる、または、鉄筋との固定を阻害する場合があった。この結果、背景をセットする時間が長引く、背景が真っ直ぐにセットできない、という不具合が生じた。そこで、磁力のみに頼らない鉄筋への固定方法を検討し、端部の固定具とロール状の背景を組み合わせた背景器具を開発した。開発した背景器具を図-10 に示す。ロール状の背景には、耐久性・耐水性・防汚性の優れた材料を選定した。なお、端部の固定具は、100～200mmの配筋ピッチに適応し、鉄筋へ確実に固定できる。

5.2 屋内検証実験

まず、システムの精度確認を目的として、日射や影の影響のない屋内で検証実験を行った。建築工事で通常使用されるD10～D41を対象鉄筋とした。鉄筋の向きは、リブがち、ふしがち、および、これらの遷移状態とした。これら3つの向きの判定結果を図-11 に示す。同図の上段はリブがち、中段はふしがち、下段はリブがちからふしがちの遷移状態の判定結果である。径の判定結果は、鉄筋の向きによらず正確であった。

配筋写真(マーカーと背景をセット)



図-8 システムの機器構成

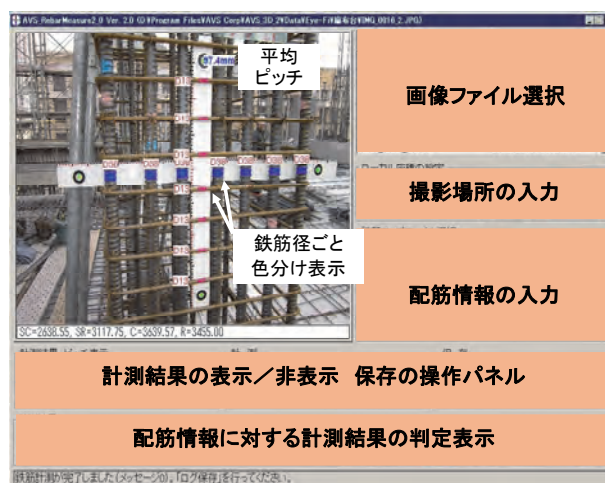


図-9 システム画面例



図-10 背景器具

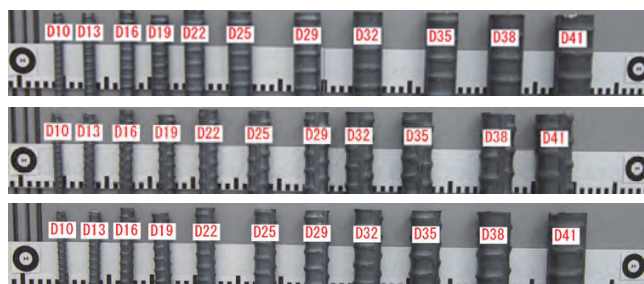


図-11 屋内実験における判定結果

5.3 現場検証実験

システムの適用効果を確認するため現場検証実験を行った。本検証実験は、民間中層板状集合住宅、民間高層タワー型集合住宅、公共病院施設および民間学校施設の計4現場で実施した。

(1) 柱筋

柱筋への適用状況を図-12 および図-13 に示す。まず、図-12 の撮影対象は、主筋：5-D29（竹ふし鉄筋）、補強筋：D13@100 であった。同図では、補強筋のピッチをすべて表示した。主筋は多少発錆していたが、径の判定には影響なく、正確にD29と判定できた。次に、図-13 の撮影対象は、主筋：5-D29（ねじふし鉄筋）、補強筋：D13@100 であった。同図では、補強筋のピッチは平均値のみを表示した。また、撮影場所の背後の制約により、斜め方向から撮影したが、鉄筋径の補正機能によって、正確に配筋状態を判定できた。

(2) 壁筋およびスラブ筋

まず、壁筋への適用状況を図-14 に示す。同図の撮影対象は、主方向：D13@200、直行方向：D10D13@200 であった。また、補強筋のピッチをすべて表示した。太陽高度の低い冬季の撮影であったが、撮影方向を調整し、太陽光を撮影範囲から

外すことで配筋状態を正確に判定できた。次に、スラブ筋への適用状況を図-15 に示す。同図の撮影対象は、主方向：D13@200、直行方向：D10@200 であった。補強筋のピッチは平均値のみを表示した。撮影対象に製造間もない鉄筋が含まれており、日射によって鉄筋が金属面のように強く全体が輝くように白っぽく見えたが、正確に配筋状態を判定できた。

5.4 検証結果に対する考察および評価

検証実験の結果から、検査時間、判定結果の正答率、黒板の簡素化について考察・評価した。

(1) 検査時間

従来の配筋検査では、対象の鉄筋にカラーチューブやカラー磁石を本数分取付け、配筋ピッチをわかりやすくするため、検査ロッドを配筋に固定した。さらに、黒板へ必要事項を記入し、配筋の邪魔にならない見やすい箇所に置く必要があった。一方、本システムを適用した検査では、黒板への記入やセットは共通作業となるが、システムが鉄筋と認識した部分を自動的に着色するため、カラーチューブを取付ける作業が省略できる。背景には検査ロッドの代わりに目盛を印刷したため、背景とマーカーをセットすれば、検査ロッド



図-12 柱筋への適用



図-14 壁筋への適用



図-13 柱筋への適用

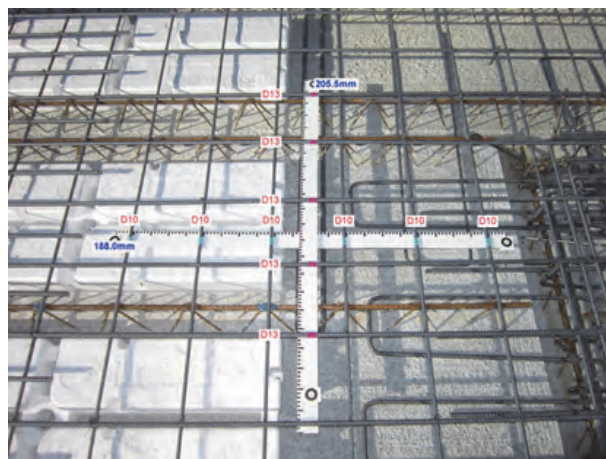


図-15 スラブ筋への適用

のセットを省略できるため、背景とマーカーのセットは負担にならない。検証実験の結果から、従来のカラーチューブを巻く場合と比較すると、1箇所あたりの検査時間を30%以上短縮できることを確認した。検査時に持回る道具類として、従来の検査では必須の検査ロッドが不要になるため、道具類をよりコンパクトにまとめられ、検査手間を大きく軽減できることが明らかになった。

(2) 撮影時の配慮と判定結果の正答率

配筋写真に太陽光が入ると画像処理機能が乱される場合があるため、太陽光が入らないよう撮影方向を調節する必要がある。撮影方向が斜めになっても、鉄筋径を補正する機能を付加したため、判定結果には影響しない。また、雨天時の実験結果より、水滴が付着して鉄筋の色合いが多少変化しても、画像処理結果には影響しないことを確認した。これらのことから、判定結果の正答率は天候の影響を受けず、95%以上の正答率を得ることができた。今後、正答できなかった場合の詳細原因の追究とその場合の検査フロー（鉄筋径の確認を追加など）を確立する予定である。

(3) 黒板の簡素化

民間工事の配筋検査における共通の課題として、黒板の省略、または、簡素化の要求がある。民間工事では、監理者の承認が得られれば、黒板の省略や簡素化が可能である。簡素化の一手法として期待されている電子黒板機能と共存させることでさらに検査効率が向上することが見込まれるため、早急に対応する予定である。

6. まとめ

本報では、画像処理技術を応用した配筋自動判定システムを開発し、工事現場で検証実験を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 撮影画像の輝度に応じて3領域に区分する鉄筋抽出アルゴリズムによって、影の影響を受けずに鉄筋のみを抽出できた
- 2) 竹ふし鉄筋では最大直径とふしの高さから径を特定する手法、ねじふし鉄筋では最小直径から径を特定する手法を考案し、システムへ実装した
- 3) システムが認識した鉄筋を着色することで、配筋検査前に行うカラーチューブやカラー磁石の取付けを省略でき、検査時間は約30%以上短縮できることを確認した
- 4) 検証実験では、柱筋、壁筋、スラブ筋にシステムを適用し、判定結果の正答率は95%以上であった

今後、社内既存システム（配筋検査支援システム、工事黒板カメラ）へ組み込み、実用化を推進する。さらに、デジタルカメラによる撮影画像を利用して高い精度で計測できる技術の他分野への展開も進めていく予定である。

参考文献

- 1) 金子智弥他：全数検査記録に対応した配筋検査支援システム，大林組技術研究所報，No.74，2010年
- 2) <http://www.datadesign.co.jp/artec3d/>
- 3) 池田雄一・坂上肇・浜田耕史：配筋自動判定システムの開発，建設物価，No.1121，pp.18～21，2012年