

## 第23回 国土技術開発賞 入賞

# リアルタイム自動配筋検査システム

## 現場で簡単撮影，瞬時に帳票作成が可能な配筋検査技術

〔受賞者〕 清水建設株式会社／シャープ株式会社

〔本稿執筆者〕 清水建設株式会社 吉武 謙二， 藤井 彰

シャープ株式会社 有田 真一

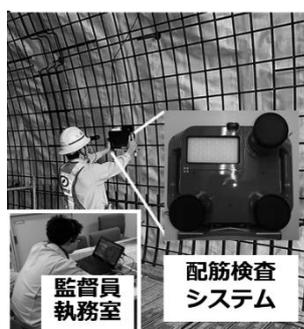
以下に，第23回 国土技術開発賞で入賞した「リアルタイム自動配筋検査システム」を紹介します。

### 1. はじめに

配筋検査は，検査帳票作成や検査用具準備，自主検査および段階確認など複数人で多くの時間を要するため，検査の精度維持と省人化・省力化の両立が長年の課題であった（写真－1）。課題解決のため，従来，配筋検査に関する開発が進められているが<sup>1)~3)</sup>，計測精度，計測時間やシステムの大きさ・重量などの使い勝手の要因から実用化には至っていなかったため，3眼カメラを用いた配筋システムを開発した<sup>4)</sup>。

本技術は，国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」<sup>5)</sup>に2度採択され，両者でA（試行は十分な成果があり，技術の導入効果や社会実装の実現性について高く評価できる）と評価された。

令和元年度の試行現場である妙高大橋架替下部その4工事や川崎港臨港道路東扇島水江町線主橋梁部（MP5・6）橋梁下部工事では，自主検査に適用した。さらに，令和元年度の追加公募の試行現場である東根川橋上部工工事では，本システムが規格値（案）<sup>6)</sup>を判定可能な精度を有することが認められ，発注者監督員の段階確認に全ての工種を通じて国内で初めて適用された（写真－2）。新思惟大橋上部工工事では，半年以上にわたり日常的に使用し躯体完成に至った。



写真－1 配筋検査比較（左：システム利用した遠隔現場，右：従来）



写真－2 検査状況（東根川橋上部工工事）

長期使用を通じて配筋検査システムの課題や要望を抽出し、かぶり計測、改ざん検知などの機能改善や、検査結果の配筋図への関連付けなどのGUI関連、電子検尺ロッド表示、スパーサー数算定などの機能拡張を実施した。また、近年積極的に取り組まれている遠隔臨場<sup>7)</sup>と配筋検査システムを組み合わせた場合の機器構成の簡易化も図った。

本稿では、システムの原理と機能、計測精度、妙高大橋下部工事と新思惟大橋上部工事を例として、橋梁の上下部工事における生産性、さらに新型コロナウイルス感染症対策を含む安全性に及ぼす効果について記す。

## 2. 配筋検査システムの原理と機能

撮影モデルを図-1に示す。平行配置された2台のカメラで同一の被写体を撮影した場合、画像内における被写体の位置が異なる。このずれ量を視差  $D$  (m) と呼び、カメラ間距離である基線長  $b$  (m) と、被写体の距離  $Z$  (m) と、カメラの焦点距離  $f$  (m) には式 (1) の関係があり、点  $P$

$(X, Y, Z)$  が画像上の点  $p(x, y)$ ,  $p'(x', y')$  として撮影される。2つのカメラの焦点距離  $f$  は共通であるため、式 (1) のように撮影された画像から視差  $D$  を算出することで、3次元座標を算出することができる。視差は2台のカメラの画像を用いたステレオマッチングにより算定する。この原理を応用し、写真-3のように3つのカメラで同時撮影し、鉄筋の輪郭および位置を検出することで、鉄筋径、間隔、本数が算定可能となる(写真-4, 5)。

$$D = f \frac{b}{Z} \quad (1)$$

システムの簡略化のため、縦横3眼だけではなく、写真-6のようにカメラ数を低減させた横2眼、縦2眼の検討を実施した結果、基線方向に対して平行方向の鉄筋、横2眼では横鉄筋、縦2眼では縦鉄筋の未検出などの精度低下が生じた。2眼システムで3眼システムと同様の計測精度を得るためには、検査対象の配筋を1回撮影した後に、90度回転して同じ鉄筋を再撮影することが考えられるが、各撮影画像の鉄筋同定処理が必要となるなど作業手間がかかるため3眼カメラを選定した。

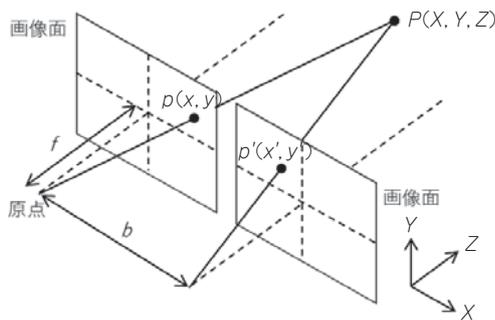


図-1 ステレオカメラの撮影モデル

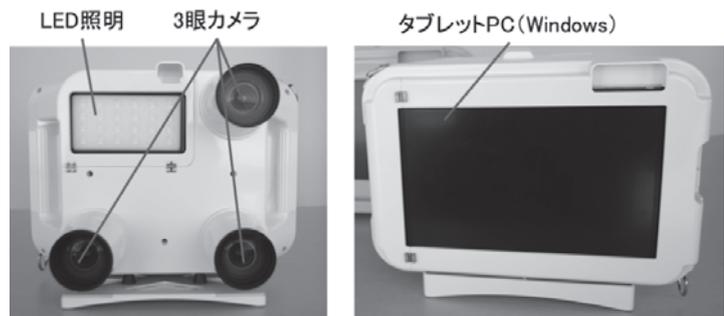


写真-3 システム外観

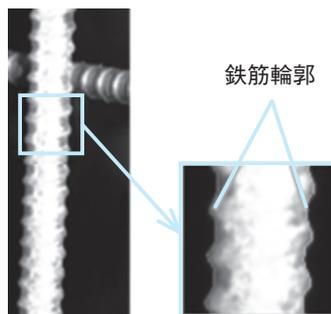


写真-4 鉄筋輪郭状況

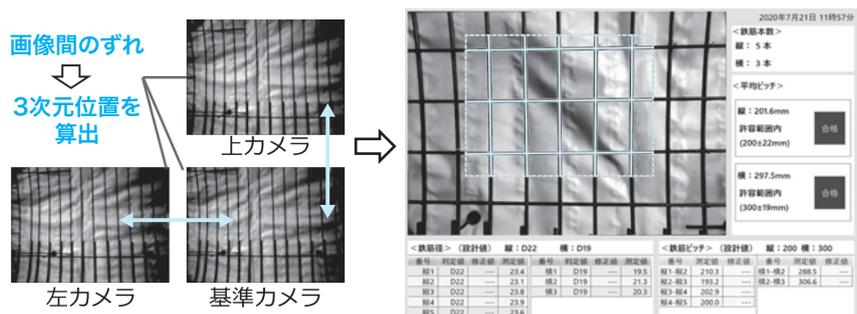


写真-5 3枚の撮影画像と検査結果の例

配筋検査システムは、3つのカメラとタブレットPCの他に、暗所での撮影を可能とするLED照明を備えている。カメラは足場など近距離からの撮影のため、広角レンズを有するものとした。システムは、現場での足場昇降を考慮し、肩幅より狭い横幅300mm程度で、重量は3kg程度である。撮影距離は配筋面に対して1.3m程度とし、45度以内の角度であれば正対する必要はない。撮影距離1.3mの場合の計測範囲は、約1.1m四方である。撮影ソフトを起動後、カメラを稼働させた状態において3時間20分程度動作する。長時間使用する場合、モバイルバッテリーを交換することで対応可能である。画像処理はタブレットPCで行っているため、インターネット

ト環境のない場所でも使用することが可能である。

システムでは、図-2のように検査現場ごとに関連する図面データを登録することができ、配筋検査位置をタブレット画面で図中のA、Bのように指定でき、撮影データは検査位置と関連付けて保存される。足場からの撮影時に支障となるブレースやセパレータなどの鉄筋以外の異物は自動で除去できる(写真-7)。自動除去できない段取り鉄筋などはタブレット上で選択することで除去できる。また、写真-8のように計測結果への3次元位置情報を考慮した電子検尺ロッドの重畳や電子黒板表示も可能である。計測結果確認画面も含め、タブレット画面の操作により拡大・縮小も可能である。

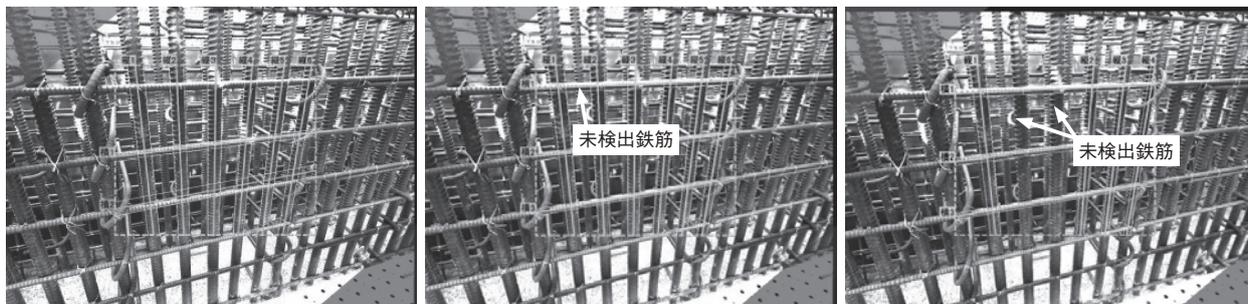


写真-6 カメラ配置を変更した検討結果 (左：縦横3眼，中央：横2眼，右：縦2眼)

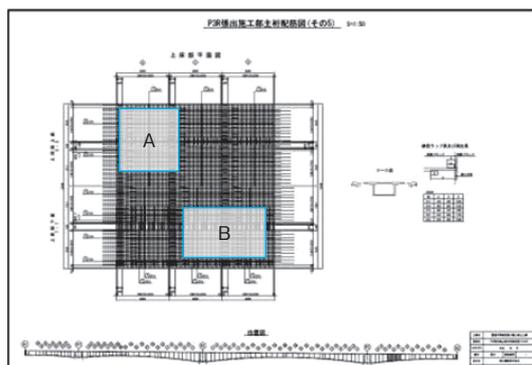


図-2 検査位置指定の例

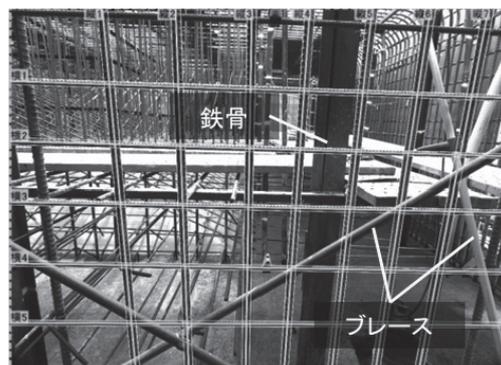


写真-7 鉄骨やブレースの除去状況

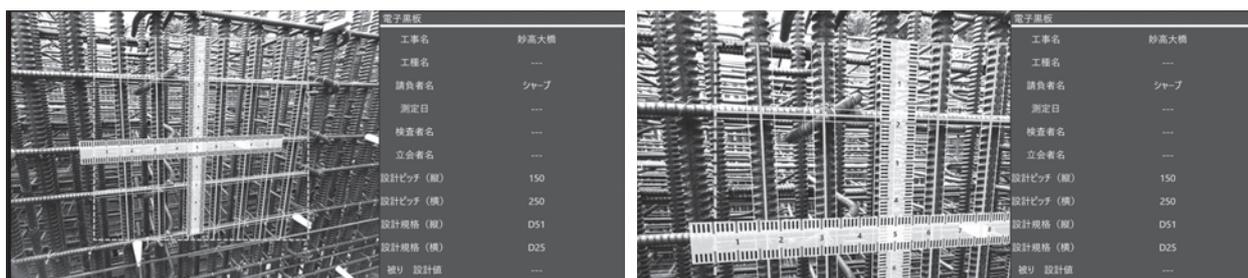


写真-8 電子検尺ロッドと電子黒板表示状況 (左：通常画面，右：拡大画面)



写真-9 重ね継手長計測の表示例

写真-9のように、重ね継手長など画像内の任意の2点間距離が計測できる。また、写真-10のように、型枠平面と鉄筋との垂直距離を計測することで、かぶりを計測できる。タブレットPC画面をタップすることで、せん断補強筋、スペーサー、結束線の位置や数も算定可能である（写真-11）。

広範囲の検査が必要な場合は、写真-12のように複数枚の画像間における鉄筋の特徴点を対応

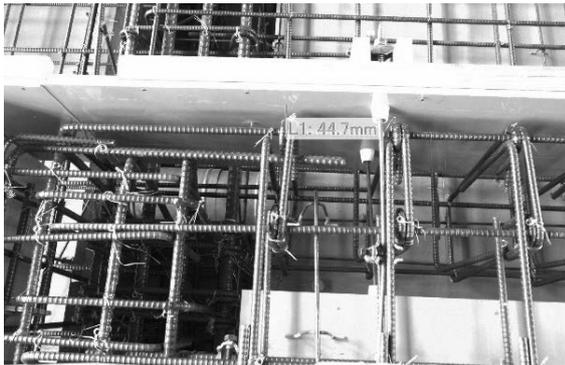


写真-10 かぶり計測の表示例

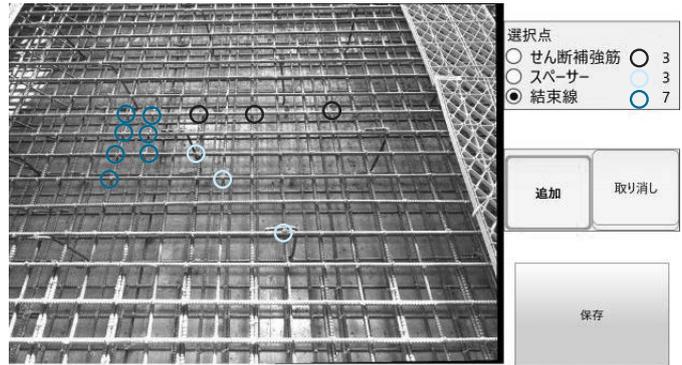


写真-11 部材カウントの表示例

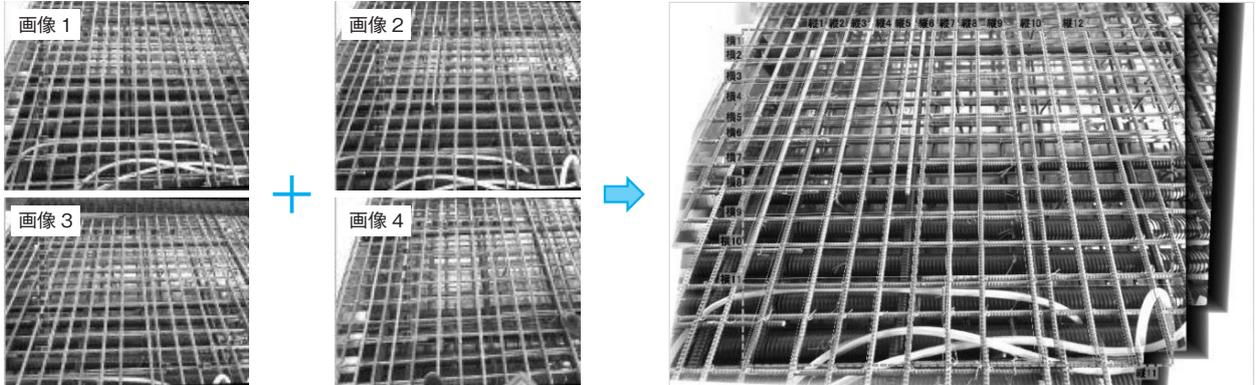


写真-12 4枚の画像を統合した計測結果例（左：個別結果、右：統合結果）



写真-13 使用状況（左：雨天時、中央：暗所部、右：降雪時）

付けることにより、自動的に統合できる。この機能を用いることで、1段目の鉄筋により遮蔽されている2段目の鉄筋がある場合にも、遮蔽されている鉄筋が見える異なる角度から撮影した結果を統合することにより対応可能である。写真-13のように暗所部、雨天時や降雪時でも使用可能である。

検査結果は3枚の元画像を用いた算定値であるため、元画像を変更すると検査結果も異なる。3枚の元画像を改ざんして任意の検査結果を得ることは極めて困難である。また、検査結果データや撮影画像が後から編集されたかを判定できるように、ハッシュ関数を用いた改ざん検知処理を行っているため、高い信憑性を有する。

従来、遠隔臨場時には動画撮影用のウェアラブルカメラを用いていたが、システムのカメラとWeb会議システムを利用して遠隔臨場が可能であり、機器構成の簡易化を図れることを確認した(写真-1)。このため、遠隔地との情報共有ができ、監督員の検査場所への移動時間低減や、複数人でのリアルタイムな検査情報確認による配筋ミスの防止に貢献できる。

### 3. システムの鉄筋平均間隔計測精度

橋梁上部工や橋梁下部工、トンネル、ダム、鉄道高架橋のたて壁、擁壁、底版などの面状部材や、鉄道高架橋や建築構造物の柱や梁部材などさまざまな構造物を対象として、248個のデータを

基にシステムの鉄筋平均間隔の計測精度を検証した。計測誤差はシステムで計測した結果と現地でメジャーで計測した結果を比較することにより算定した。なお、システム使用時には、撮影距離は配筋面に対して1.3m程度で、45度以内の角度で計測した。

スケールとシステムを用いた平均間隔の誤差と鉄筋径との関係を図-3に示す。鉄筋径によらず平均間隔誤差のばらつきに大きな差異は見られなかった。また、逆光時や背景が明るい場合、雨天時にも良好な精度を有していることが確認できる。

平均間隔誤差を鉄筋径で正規化した値の最大値は-0.137であり、平均間隔の規格値 $\pm\phi$ を計測可能であることが確認できる。

平均間隔誤差は鉄筋径によらず5mm程度で、国土交通省の鉄筋における平均間隔の規格値<sup>6)</sup> $\pm\phi$ ( $\phi$ は鉄筋径)を判定可能であることを確認した。

## 4. システムの現場適用性評価

橋梁の上下部工事において、従来の配筋検査とシステムを用いた場合の必要人数および作業時間を計測することにより、システムの生産性評価について検証した。

妙高大橋下部工事では、RC橋脚部(幅8.0m×奥行8.0m×高さ42.0m)内の1ロット4.5mのRC橋脚中空部の内側面4カ所で比較検証を実施した。妙高大橋における検査状況と従来

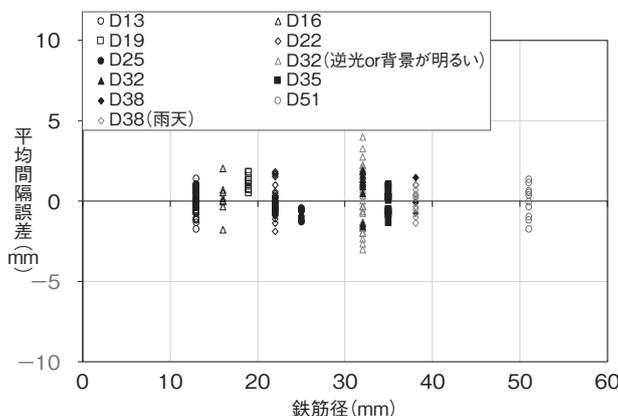


図-3 鉄筋径ごとの平均間隔誤差

表－1 生産性評価（妙高大橋下部工事）

配筋箇所	作業場所	従来検査				システム検査	
		作業時間	人工	人工・時間	作業内容	人工	人工・時間
橋梁下部工 （中空橋脚 1ロット4.5m 内側面4カ所）	事務所	1：00	1	1：00	・配筋調書ひな型作成	1	1：00
	現場	4：00	2	8：00	・自主配筋検査	1	1：30
	事務所	1：30	1	1：30	・自主検査調書記入	1	1：00
	現場	2：00	2	4：00	・検尺ロッド設置，黒板記入	1	0：00
	現場	1：00	3	3：00	・立会検査，写真，片付け	1	1：40
	小計				17：30		5：10
削減率（%）					70		

検査とシステム検査による検査時間の比較を表－1に示す。従来は自主検査の際に、配筋調書のひな型を事務所で作成し、検尺ロッドやマグネット、黒板などを準備し、現場でスケールを用いて計測し、黒板に計測結果を記入し、写真撮影をして、事務所に戻って帳票を整理していた。

自主検査は計測やマグネットの取付けの必要があるため2名で、立会検査は3名で実施していたが、本システムを使用することにより、1名で対応可能であることを確認し、現場および事務所での作業時間が17時間30分から5時間10分と70%削減できた。撮影から帳票作成まで7秒程度であった。

従来の配筋検査で柱を検査する際は、マグネットなどの取付けのために鉄筋に触れる必要があり、ブラケット足場を解体できなかつた。本システムでは離れた位置からの検査が可能のため、鉄筋組立後、すぐに足場解体ができ、工程短縮にも寄与できる可能性がある。

生産性の向上により高所作業時間は、妙高大橋



写真－14 検査状況（妙高大橋下部工事）

下部工事では15時間を3時間10分に大幅に削減できた。さらに、写真－14のように足場など鉄筋から離れた安全な位置からの検査が可能になること、マグネットや検尺ロッドなどの設置の必要がないため、それらの落下の危険性が除去でき、安全性の向上にも寄与することも確認した。床版配筋では、マグネットや検尺ロッドは中腰での設置となるため、システムを利用することにより、腰への負担軽減も期待できる。

新思惟大橋上部工事は橋長394m、幅員12.78m、最大支間長150mの4径間連続PCラーメン箱桁橋で、張出し架設工法により10日程のサイクルで施工した。

生産性評価は張出し架設の1ブロックで、張出し両側で上床版4回、下床版4回、側壁2回の計10回の配筋検査時に実施した。自主検査は計測やマグネットの取付けの必要があるため2名で、立会検査は3名で実施していたが、本システムにより、1名で対応可能であることを確認した。従来は3名で合計19時間かかっていたが、本システムでは1名により5時間40分で実施でき、作業時間の70%を削減でき、生産性が大幅に向上した（表－2，写真－15）。

本システムにより、現場での作業時間が大幅に削減すること、さらに、非接触・非対面での検査が可能になること、省人化により新型コロナウイルス感染症対策にも有効であることを確認した。今後は遠隔臨場との組合せにより、発注者監督員の移動時間削減や、交通事故の撲滅などの生産性・安全性向上効果も期待できる。

表-2 生産性評価（新思惟大橋上部工工事）

配筋箇所	作業場所	従来検査				システム検査	
		作業時間	人工	人工・時間	作業内容	人工	人工・時間
橋梁上部工 (上床版4カ所, 下床版4カ所, 側壁2カ所)	事務所	2:00	1	2:00	・配筋調書ひな型作成	1	0:40
	現場	5:30	2	11:00	・配筋自主検査	1	3:00
	事務所	3:00	1	3:00	・配筋調書記入(自主検査用)	1	1:00
	現場	1:00	3	3:00	・段階確認 (配筋検査, 写真撮影, 片付け)	1	1:00
	小計			19:00			5:40
削減率(%)					70		

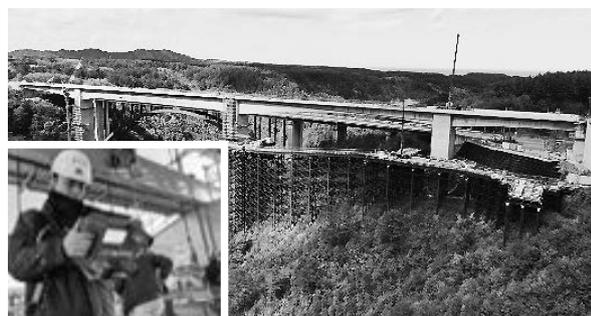


写真-15 検査状況（新思惟大橋上部工工事）

## 5. まとめ

3眼カメラを用いた配筋検査システムを現場で長期運用し、システムに必要な機能や使い勝手に関する課題や要望を抽出し、機能改善を実施し、橋梁上下部工事で生産性評価を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 配筋検査システムは簡単な操作により7秒程度で現場における帳票作成が可能で、寒冷地や雨天時などでも、現場での使用に支障はないこと。
- ② スケールとシステムを用いた平均間隔の誤差は5mm程度で、平均間隔の規格値 $\pm\phi$ を計測するために十分な精度を有すること。
- ③ 橋梁の上下部工事での生産性評価では、検査員を従来の3名から1名に省人化でき、検査時間を70%削減でき生産性が大幅に向上すること。

- ④ 現場作業時間の大幅な削減や非接触・非対面での検査が可能となり、新型コロナウイルス感染症対策を含む安全性向上に貢献できること。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

### 【参考文献】

- 1) 竹内啓五, 太田達見：鉄筋観測のための小型形状スキャナの適用性評価, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 材料施工, pp.193-194, 2012。
- 2) 蔡成浩, 中村隆寛：配筋検査システム, コンクリート工学, Vol.55, No.9, pp.840-843, 2017。
- 3) 森本直樹, 後閑淳司, 酒匂智彦, 早川 博久, 平陽兵, 吉田裕亮, 桑島奨：ステレオカメラを活用した自動配筋検査システムの実証, 土木学会全国大会第74回年次学術講演会, VI-1102, 2019。
- 4) 吉武謙二, 中野貴公, 井手章人, 藤井彰, 有田真一：3眼カメラによる配筋検査システムの現場適用性に関する研究, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.45, pp.129-132, 2020。
- 5) 国土交通省：建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト, ([https://www.mlit.go.jp/tec/tec\\_tk\\_000062.html](https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000062.html)), (入手 2021.10.24)。
- 6) 国土交通省：土木工事共通仕様書(案), 2018。
- 7) 国土交通省：建設現場の遠隔臨場に関する監督・検査試行要領(案), (<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001397222.pdf>), (入手 2021.10.24)。