

AI技術を用いた高力ボルト締付判定システム 【Bolero (ボレロ)】



岡村 敬 ①
和田 貴裕 ②
三宅 寿英 ③

要旨

鋼橋架設における部材接合では高力ボルトが数多く使用されており、その摩擦締結の管理として検査員が本締前にボルトにマーキングを行った状態から目視にて判定する手法が一般的に用いられている。本開発では、多量に使用される高力ボルトの検査漏れの削減を目的に、複合現実デバイスやタブレット端末で撮影した映像を用いた高力ボルト締付状態判定システムを構築した。

本システムでは、物体検出技術であるYOLOを用いて高力ボルトを抽出し、深層距離学習により正常状態と異なる度合いを判別した。また、撮影映像に対してラプラシアンフィルタを適用して画像のブレを計算し、ブレが大きい画像を判定対象としないことで、撮影時にカメラが揺れたとしても、システムの誤作動とはならず、検査できるようにした。実物の架設桁を用いた運用試験を行った結果、精度良く締付状態を判定できることを確認した。

キーワード

高力ボルト、物体検出、深層距離学習、複合現実デバイス、タブレット

1. 緒言

国土交通省では2016年より生産性革命プロジェクトの1つとして、建設現場においてICT技術による施工の省人化などの生産性の向上を目指すi-Constructionと呼ばれる取り組みが進められている。また、近年のデジタル技術の普及・拡大に伴い、2022年にはインフラ分野のDXアクションプランが策定されており、橋梁を含むインフラ分野の設計・施工・検査などのあらゆるプロセスに対してXR (Cross Reality: VR、AR、MR等の総称) を含むデジタルツインやAIの活用が推進されている。

鋼橋のような大型構造物の施工では、主要部材を接合する方法の一つとして高力ボルトを用いた摩擦接合がある。その接合の成否の判定方法として、高力ボルトの締付検査があり、締め付ける前に施したマーキングのずれを検査員が目視することで、正常に締め付けているかを確認する。1橋当たりで使用される高力ボルトは数万本にのぼるため、確認作業において検査漏れが生じることが課題となっている。

本稿では、高力ボルトの締付検査漏れの削減を目的として開発した、複合現実デバイスやタブレット端末を用いた高力ボルト締付状態判定システムについて報告する。

2. 高力ボルト締付検査

鋼橋における主要部材の接合には、一般的に施工管理が容易で導入軸力が安定した図1 (a) に示すトルシア形高力ボルトが使用される。トルシア形高力ボルトのボルト軸先端はピンテールと呼ばれ、トルクをかけることで、締め付け後は図1 (b) に示すようにピンテールが破断した状態になる。

トルシア形高力ボルトの締め付けは、はじめにインパクトレンチなどを用いて1次締めを行い、その後、ボルト、ナット、座金および部材にわたる直線のマーキングを施す。次に、専用の工具によりボルトに一定のトルクをかけて本締めを行う。本締め後、ピンテールの破断を確認し、締め忘れがないかを確認する。また、事前に施したマーキングのずれから本締めの成否を確認する。正常に締め付けができた場合は、ナットのみが回転し、ナットに施されたマーキングのみがずれる。一方、締め付けが不十分である場合、ナットと座金と一緒に回転する共回りやボルト軸が回転する軸回りと呼ばれる現象が発生する。締

① 機械・インフラ事業本部 鉄構・防災ビジネスユニット 橋梁設計部

② 開発本部 技術研究所 知能機械研究センター

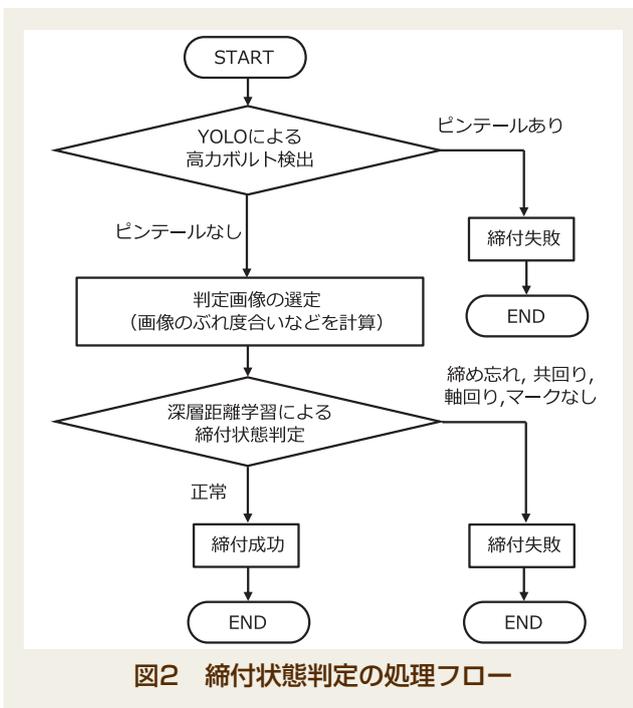
③ 開発本部 技術研究所 知能機械研究センター 博士(理学)



付不良の際は、新しい高力ボルトに取り換える作業を行う。検査員はこの確認作業をボルト全数に対して行う必要があるために、迅速かつ漏れの無い検査手法が求められている。

3. 締付状態判定の処理フロー

本システムにおける締付状態判定の処理フローを図2に示す。本システムでは、YOLO(You Only Look Once)¹⁾および深層距離学習(Deep Metric Learning)²⁾の2つのAI技術を採用し、映像上に写る全ての高力ボルトのうち、条件を満たした高力ボルトの締付状態を判定する。フローの各処理について以下に詳述する。



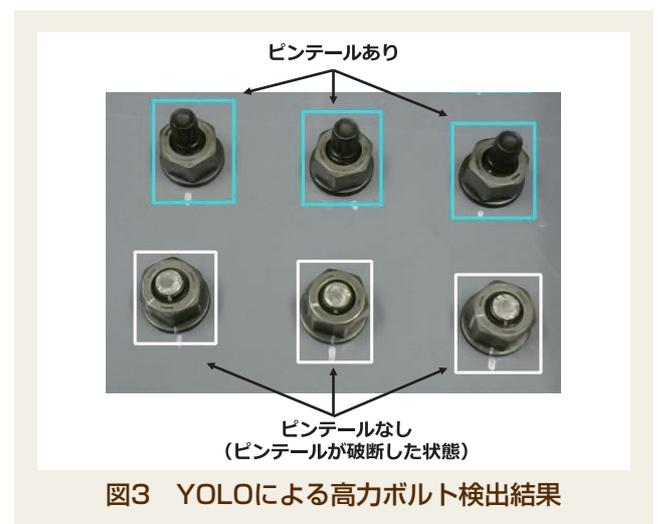
3.1 YOLOによる高力ボルト検出 カメラから取得した映像に写っている高力ボルトをYOLOにより検出する。YOLOは、リアルタイム処理が可能な深層学習を用いた物体検出用ニューラルネットワークであり、単一の畳み込みニューラルネットワーク構造を用いて、画像全体から「領域推定」と「識別」を同時に行う。そのため、

領域を推定し、その後にクラスの識別を行う手法に比べて処理時間が大きく改善されている。本システムでは、YOLOv3³⁾を使用した。

添接板を模擬した試験体にピンテールあり/なしの高力ボルトを設置して距離や角度を変えながら撮影した画像を使用し、YOLOによる高力ボルト検出モデルを構築した。検出対象は、「ピンテールあり」と「ピンテールなし」の2クラスとし、高力ボルトの座標情報とクラス情報を各クラス6,000枚の画像に付与して学習を行った。このとき、以降の処理で高力ボルトに施されたマーキングのずれをもとに締付状態を判定するため、マーキングを含む範囲に対してアノテーション(四角形の枠で高力ボルトを囲んで座標情報を付与する作業)を行った。

YOLOによる高力ボルトの検出結果例を図3に示す。図3における水色の枠が「ピンテールあり」と検出された高力ボルトで、白色の枠が「ピンテールなし」と検出された高力ボルトである。図3に示すようにピンテールあり/なしにかかわらず、YOLOによりマーキングを含む範囲を検出することができた。また、YOLOによるピンテールあり/なしの判定精度は、被写体との距離(撮影距離)が離れるにつれて低下したが、撮影距離がおおよそ2 m以内であれば高力ボルトの検出は問題なく行うことができた。ただし、撮影距離によっては「ピンテールあり」の高力ボルトを見逃す場合があるため、以降の処理で「ピンテールあり」の高力ボルトを「締め忘れ」または「マークなし」として判定できるようにすることで検出漏れを防ぐようにした。

図2に示すようにYOLOによる高力ボルト検出において「ピンテールなし」と検出された高力ボルトは、次の処理に進む。一方、「ピンテールあり」と検出された高力ボルトは締付失敗として、映像上に結果を描画する。



3.2 判定画像の選定 本システムでは、撮影条件や撮影状態によっては図4に示すようなぶれた画像の高力ボルトが検出される場合がある。画像が大きくぶれた場合、ボルトに施されたマーキングが不鮮明になり、締付状態判定において精度が低下する。そこで、ぶれた画像を除外する処理を締付状態判定前に行う。

ぶれの度合い	大きい場合	小さい場合
YOLOによる 高力ボルト検出画像		
ラプラシアンフィルタ適用後の 高力ボルト画像		
ラプラシアンフィルタ適用後の 画素値の分散	11.92	145.31

図4 ぶれ度合いの異なる高力ボルト画像例

画像がぶれているかを判別するには、YOLOにより検出した高力ボルトの画像にラプラシアンフィルタを適用し、その画素値の分散を用いた。ラプラシアンフィルタは、二次微分を用いて画像の輪郭を検出するフィルタであり、ぶれが小さい画像の場合には、高力ボルトの輪郭がきれいに抽出され、画素値の分散が大きくなる。一方、ぶれが大きい画像の場合には、高力ボルトの輪郭がうまく抽出されず、画素値の分散が小さくなる。この画素値の分散が閾値以下の場合には画像がぶれていると判定し、締付状態判定の対象外とした。また、撮影距離によりぶれ度合いが異なるので、YOLOにより検出した領域の大きさから撮影距離を推定し、その距離に応じた閾値を設定した。

また、YOLOにより検出した領域の大きさが極端に大きい場合は、検出結果が誤っている可能性が高いと考え、検出領域の大きさが閾値以上の場合には締付状態判定の対象外とした。

さらに、YOLOにより検出された高力ボルトが画像端に位置する場合は、領域内にマーキング全体が写らないことがあるので、検出位置が画像端に近い場合は締付状態判定の対象外とした。

3.3 深層距離学習による締付状態判定 YOLOにより検出した高力ボルトの画像から深層距離学習を用いて高力ボルトの締付状態を判定する。深層距離学習は、

特徴量空間上の距離によりデータ間の類似性を計算する手法であり、類似画像検索や異常検知などに応用されている。異なるクラスの画像同士から得られる特徴量は遠くなるように、同じクラスの画像同士から得られる特徴量は近くなるように学習することで、類似データ間は近く、非類似データ間は離れるような特徴量空間を得ることができる。損失関数にはCenter Loss関数を使用した。学習により得られる特徴量空間上の各クラスの中心点と判定対象となるデータから得られる特徴点との距離を計算し、最も距離が近いクラスに分類する。

YOLOにより検出した高力ボルトの画像を使用し、深層距離学習による締付状態判定モデルを構築した。締付状態判定のクラスを図5に示す。ナットのみが回転し正しく締め付けができた状態である「正常」、ナットの回転が不十分で正しく締め付けができていない状態である「締め忘れ」、ボルトの軸とナットと一緒に回り正しく締め付けができていない状態である「軸回り」、ナットと座金と一緒に回り正しく締め付けができていない状態である「共回り」、ボルト、ナット、座金および部材にマーキングが施されていない状態である「マークなし」(印なし)の5クラスとし、各クラス約40,000枚の画像を用いて学習を行った。

試験体から収集した各クラス100枚の評価画像に対する深層距離学習による締付状態判定の混同行列を表1に示す。深層距離学習による判定精度は99.6%となった。ただし、撮影距離や角度によってはボルト先端についてのマーキングが見えにくい場合があり、本来は「軸回り」であるが「正常」と判定される例がみられた。

表1 深層距離学習による締付状態判定結果

混同行列		予測結果				
		正常	締め忘れ	軸回り	共回り	マークなし
実際の状態	正常	100	0	0	0	0
	締め忘れ	0	100	0	0	0
	軸回り	2	0	98	0	0
	共回り	0	0	0	100	0
	マークなし	0	0	0	0	100

締付成否	締付成功					締付不良				
	正常	締め忘れ	軸回り	共回り	マークなし	正常	締め忘れ	軸回り	共回り	マークなし
画像例	<p>ボルト、座金、ナット</p>									

図5 深層距離学習による締付状態判定のクラス

図2に示すように深層距離学習による締付状態判定において「正常」と判定された高力ボルトは締付成功、「締め忘れ」、「軸回り」、「共回り」、「マークなし」と判定された高力ボルトは締付失敗として、映像上に結果を描画する。

4. 複合現実デバイスを用いたシステム

複合現実デバイスに内蔵されたカメラで撮影した映像に写る高力ボルトの締付状態を自動で判定するシステムを開発することで、検査員による高力ボルトの締付検査漏れの削減を図った⁴⁾。

4.1 システム構成 複合現実デバイスを用いた高力ボルト締付状態判定システムの構成を図6に示す。本システムでは、非接触・リモート化技術の一つである複合現実デバイスを使用する。複合現実デバイスには、Microsoft社製のHoloLens2を使用した。これは、ヘッドセット型の複合現実デバイスであり、工場や医療現場などでも活用事例が増えている。この複合実現デバイスに内蔵されたカメラを用いて高力ボルトを撮影し、無線LANを通じて撮影した映像を判定用PCに転送する。転送された映像に対してAI技術を用いて写っている高力ボルトの締付状態を判定し、映像上に判定結果を描画する。その映像を複合実現デバイスのディスプレイ上に表示する。これにより、この複合実現デバイスを装着した検査員は現場で判定結果をすぐに確認することができる。また、高力ボルトの規格などの添接部情報を登録したBIM/CIM (Building/Construction Information Modeling, Management) モデルもディスプレイ上に表示することが可能であり、締付検査を実施しながら施工情報なども確認することができる。



図6 複合現実デバイスを用いたシステム構成

4.2 運用試験の結果 橋梁工事で使用する実際の鋼桁における添接部に試験用の高力ボルトを設置した状態で本システムの実用性を評価した。図7に示すようにHoloLens2を装着した状態で添接板を撮影し、高力ボルトの締付状態を判定した。添接板には、「正常」以外に「共回り」や「軸回り」などの締付不良の高力ボルトを設置した。

HoloLens2のディスプレイ上に表示された高力ボルトの締付状態判定の結果例を図8に示す。判定結果は、分類された5つのクラスに対応した色で高力ボルトの検出領域を囲み、「正常」以外の締付状態を一つでも検知したときは左上に異常ありと表示した。

運用試験の結果、概ね目視判定と同等の精度で判定できることを確認した。撮影してからディスプレイ上に判定結果が表示されるまでの時間は2秒程度であるが、画像のぶれによる誤判定を低減できており、動きながらの運用でも問題ないと判断した。しかし、暗い場所で撮影した場合や離れた位置や斜め方向から撮影した場合において、高力ボルトに施されたマーキングが不鮮明になるため精度の低下がみられた。

HoloLens2のディスプレイ上に表示されたBIM/CIMモデルと実物を合成した映像例を図9に示す。インフォマテイクス社製のGyroEye Holoを用いることで、締付検査と並行しながらBIM/CIMモデルと実物を合成した映像上で、検査している添接部の情報を確認することができた。検査中に不良情報をその場で映像内に書き込むことも可能であり、補修対象個所の見落とし防止にも活用できると考えている。



図7 運用試験の様子



図8 複合現実デバイスを用いたシステムによる高力ボルトの締付状態判定結果例

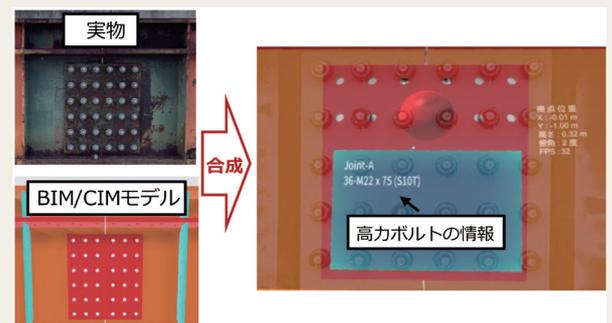


図9 BIM/CIMモデルと実物を合成した映像例

5. タブレット端末を用いたシステム

複合現実デバイスを用いたシステムでは、カメラのズーム機能が使用できないなどの制限があったため、撮影距離が離れるにつれて精度の低下がみられた。また、複合現実デバイスで撮影した映像を判定用PCに転送し、判定用PCで締付状態判定を行うため、締付判定結果をディスプレイ上に反映するまでに2秒程度のタイムラグが生じた。さらに、ネットワーク接続の状態等によりシステムの動作が不安定になるといった課題がみられた。そこで、上記課題を解決するために撮影デバイスをタブレット端末に置き換え、端末上で使用可能な高力ボルト締付状態判定用のアプリケーションを作成した。

5.1 システム構成 アプリケーションの起動画面と概要図を図10に示す。タブレット端末には、Apple社製のiPad Proを使用した。アプリケーション起動後、タブレットに内蔵されたカメラで撮影した映像からフレームを切り出し、複合現実デバイスを用いたシステムと同様に高力ボルトの検出、判定画像の選定、締付状態の判定を順に行う。最後に、アプリケーションの起動画面に判定結果を表示する。本アプリケーションでは、必要に応じてキャプチャ映像と締付判定結果映像を動画ファイルとして端末上に保存することができる。また、カメラのズーム倍率や解像度を変更することができ、複合現実デバイスを用いたシステムに比べてカメラの制限がない。さらに、ネットワークを介して外部との接続は行わず、タブレット端末上で締付状態判定の処理を行うことができる。



図10 アプリケーション起動画面と概要図

5.2 運用試験の結果 3.3と同様に実際の鋼桁における添接部を用いて本アプリケーションの実用性を評価した。アプリケーションの画面上に表示された高力ボルトの締付状態判定結果例を図11に示す。判定結果は、分類された5つのクラスに対応した色で高力ボルトの検出領域を囲み、「正常」以外の締付状態を一つでも検知したときは画面上に異常ありと表示した。



図11 タブレット端末を用いたシステムによる高力ボルトの締付状態判定結果例

運用試験の結果、概ね目視判定と同等の精度で判定できることを確認した。また、ズーム倍率やカメラ解像度を適切に変更することで、離れた距離からの撮影でも概ね高力ボルトの締付状態判定が可能であることが確認できた。さらに、ネットワーク接続の状態による影響を受けず、タブレット端末上で締付状態判定を行うため、判定結果の反映までの時間を1秒以内に短縮できた。しかし、撮影距離が3 m以上になると高力ボルトに施されたマーキングが不鮮明になるために精度が低下した。

6. 結言

複合現実デバイスであるHoloLens2を用いた高力ボルト締付状態判定システムを作成し、実際の鋼桁を用いた運用試験を実施した。運用試験の結果、概ね目視判定と同等の精度で高力ボルトの締付状態を判定できることが確認できた。また、BIM/CIM情報を見ながら判定結果を確認することができ、動きながらの運用でも問題はないことを確認した。

次に実施したタブレット端末であるiPad Proによる判定システムでは、撮影状況に応じてカメラ条件を適宜選択することで同等の判定精度を有しつつ複合現実デバイスよりも離れた距離で締付判定が可能となり、かつデータ通信が不要となることで判定に要する時間も向上した。以上のことから両デバイスでの本システムでの使い分けは以下が望ましい。

- ① 複合現実デバイスのシステムは対象部材の情報を同時に確認する場合や、遠隔監視のようにその場にはいない人と一緒に検査または情報共有するのに適している。
- ② タブレット端末のシステムは、広範囲を迅速に検査するのに適しており、また桁内部のように薄暗い場合やデータ通信速度が低下する環境でも問題なく使用できる。今後は学習データの追加等による更なる精度向上を図るとともに他の検査項目にも本技術を適用することで、検査の省力化やヒューマンエラーに起因した施工不良の削減に繋げていきたい。

SDGsに貢献する技術

本稿で紹介した技術を拡張することでインフラ整備における「検査漏れの低減」や「省人化」に貢献できることを確認した。

参考文献

- 1) J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi : You Only Look Once : Unified, Real-Time Object Detection, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 779-788, **2016**.
- 2) Y. Wen, K. Zhang, Z. Li, Y. Qiao : A Discriminative Feature Learning Approach for Deep Face Recognition, European Conference on Computer Vision, pp. 499-515, **2016**.
- 3) J. Redmon, A. Farhadi : Yolov3: An Incremental Improvement, Computer Vision and Pattern Recognition, arXiv : 1804. 02767, **2018**.
- 4) 和田貴裕, 岡村敬, 三宅寿英, 馬野元秀 : 複合現実デバイスを用いた高力ボルト締付状態判定システム - YOLOと深層距離学習の適用 -, 第39回ファジィシステムシンポジウム 講演論文集, 1E3-3, pp.244-247, **2023**.

文責者

日立造船株式会社 機械・インフラ事業本部
鉄構・防災ビジネスユニット 橋梁設計部
岡村 敬
E-mail : okamura_t@hitachizosen.co.jp

Bolero : High-Strength Bolt-Tightening Determination System Using AI Technology

Abstract

In steel bridge construction, the members are joined using numerous high-strength bolts. The technique generally employed for the management of friction fastening is visual determination from a state in which the bolts have been marked by an inspector before final tightening. With the aim of reducing missed inspections of the high-strength bolts used in large quantities, in this project, we developed a high-strength bolt-tightening state determination system that uses images captured with a mixed reality device and tablet terminal.

The system uses YOLO object detection technology to detect the high-strength bolts, and deep metric learning to determine the degree of deviation from normal conditions. The captured images are subjected to a Laplacian filter to calculate amounts of blur. Very blurred images are then excluded from the determination target, so that even if the camera shakes at the time of shooting, the system does not malfunction and inspections can continue. The results of an operation test carried out on an actually erected girder confirmed that the system can determine tightening conditions with high accuracy.

Authors

Takashi Okamura (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : okamura_t@hitachizosen.co.jp)
Takahiro Wada Toshihide Miyake