

高力ボルト自動締付けシステム Cobolt™ の橋梁工事への実装

Implementation of the Cobolt™ Automated High-Strength Bolt Tightening System in Bridge Construction

中野 隆 NAKANO Takashi JFE エンジニアリング 社会インフラ本部 橋梁事業部 技術部 技術室長
【現 経営管理部 経営統括室】
廣岡 拓海 HIROOKA Takumi JFE エンジニアリング 社会インフラ本部 橋梁事業部 技術部 開発室
柿市 拓巳 KAKIICHI Takumi JFE エンジニアリング 社会インフラ本部 橋梁事業部 開発室 兼 技術室
【現 技術部 技術室長】

要旨

鋼橋建設で多用されるトルシア形高力ボルトの締結作業について、省人化と安全・品質の両立を目的として、協働ロボットを用いた自動締付けシステム Cobolt™ を開発した。Cobolt は既製シャーレンチを搭載したシステムであり、一次締めから本締めまでの自動化を対象に要素技術の検証と現場実証を行った。ボルト孔クリアランスに起因する位置誤差やナット位相の不規則性に対し、力覚センサ、ビジョンセンサ、誤差吸収機構を統合した嵌合手法により、安定したソケット装着と連続締付けを実現した。さらに SPACE COOL フィルム保護カバーにより、外気温 40℃ の炎天下でも表面温度を許容範囲内に抑え、屋外での安定稼働の目途を得た。

Abstract:

An automatic bolt-tightening system using a collaborative robot, “Cobolt™,” was developed to reduce labor while ensuring safety and consistent quality in tightening torque shear type high-strength bolts widely used in steel bridge construction. Cobolt mounts a commercially available shear wrench and aims to automate tasks from initial tightening to final tightening; this paper reports elemental technology evaluation and field demonstration focusing on these two operations. To cope with positional errors caused by bolt-hole clearance and irregular nut orientations, JFE Engineering has developed a socket engagement method integrating a force sensor, a vision sensor, and a misalignment-compensation mechanism, enabling stable engagement and continuous tightening. In addition, for outdoor use at construction sites, a protective cover using SPACE COOL film kept the robot surface temperature within allowable limits even under direct sunlight at an ambient temperature of 40°C, demonstrating feasibility for stable outdoor operation.

1. はじめに

わが国の建設業では生産年齢人口の減少と就業者の高齢化を背景に、担い手不足がますます深刻化しており、限られた人員で施工を成立させるための抜本的な省人化が求められている。国土交通省は i-Construction 2.0 を掲げ、2040 年度までに建設現場の省人化を少なくとも 3 割（生産性 1.5 倍以上）とする目標のもと、「施工のオートメーション化」等を柱とした現場の変革を推進している¹⁾。デジタル技術を最大限活用し、少ない人数で、安全に、快適な環境で働く生産性の高い建設現場の実現が求められている。

鋼橋の建設においては、構造部材の接合にトルシア形高力ボルトが広く用いられ、1 工事あたり数万本規模の締結作業が発生する。ボルト締結は大量かつ反復的であり、重量

工具の取り扱いを伴い、高所作業となる場合も多く、作業負担と安全リスクの低減が課題である。加えて、締結品質の確保（所定手順の遵守、締付け状態の確認）と工程の安定化も重要であり、省人化と品質確保を両立する手段が求められている。

この課題に対し筆者らは、近年、製造業を中心に人と同一空間で安全に運用可能な協働ロボットの活用が進んでいることに着目し、締付け作業への適用を検討した。対象とするトルシア形高力ボルトは、所定のトルクに達するとピンテール部が破断し、適切な軸力が導入される仕組みを有する。そこで、トルク制御機能を備えた既製のシャーレンチを協働ロボットに搭載することにより、従来と同等の品質管理体系を維持したまま、締付け作業の自動化が可能であると考えた。

以上を踏まえ、筆者らは協働ロボットを用いた高力ボルト自動締付けロボットシステム「Cobolt™」の開発を進めると

2026 年 3 月 2 日受付

ともに、橋梁建設現場での適用を見据えた実証を段階的に実施している²⁾。本稿では、Cobolt のシステム概要、高力ボルトの自動締付けに向けた要素技術の検証結果、および現場適用に向けた取り組みについて報告する。

2. システムの概要

2.1 システム構成

本システムは、主に 6 軸協働ロボット、ビジョンセンサ、シャーレンチを把持するハンド機構、および制御装置が基本的な構成である。協働ロボットとシャーレンチを連携して制御し、人手による締付け手順を可能な限りそのまま再現することで、従来と同等の品質管理体系を維持した自動化を狙った。さらにロボットをジョイント部まで運ぶ搬送台車などが付随して必要となる。図 1 にシステム構成の概要を示す。

協働ロボットは、基本的な動作性能、現場での取り回しやすさ、およびシャーレンチを扱うのに十分な可搬重量を基準に選定した。シャーレンチはピンテールを把持しながらナットを回転させて締付けを行う機構で、反力トルクはレンチ内部で相殺される。このため、協働ロボットに求められる仕様は締付け時の反力トルクではなく、主として可搬重量で決定される。約 10 kg のシャーレンチ本体、ロボットを把持するためのハンド機構を加え可搬重量は 20 kg 以内と想定し、FANUC 社製 CRX-20iA/L を採用した³⁾。主な仕様を表 1 に示す。

2.2 対象作業と自動化範囲

トルシア形高力ボルトの締付けは、①ボルト挿入・ナット・座金取付、②一次締め、③マーキング、④本締め、⑤検査、⑥ピンテール処理、の順に行われる。本ロボットシステムはこのうち②一次締めから⑥ピンテール処理までを自動化対象とする。協働ロボットとハンド機構の間にはツールチェンジャを搭載しており、アタッチメントを自動交換しながら連続的に施工できる構成とした（図 2 参照）。

3. 要素技術の検証

3.1 ナット嵌合技術の検証

3.1.1 課題

協働ロボットによるトルシア形高力ボルト締付けの自動化は、シャーレンチのソケットを対象ナットへ確実に装着できることが前提となる。鋼橋で一般的に用いられる M22 高力ボルトでは、孔径は $\phi 24.5$ mm（拡大孔では $\phi 26.5$ mm）とボルト径に対して余裕を持たせるのが通常であり、この孔径の余裕によりボルトの平面位置には不規則な位置誤差が生じる。また、ナットの六角位相（向き）も個々にばらつくため、設計座標に基づく単純な位置決めだけではソケット装

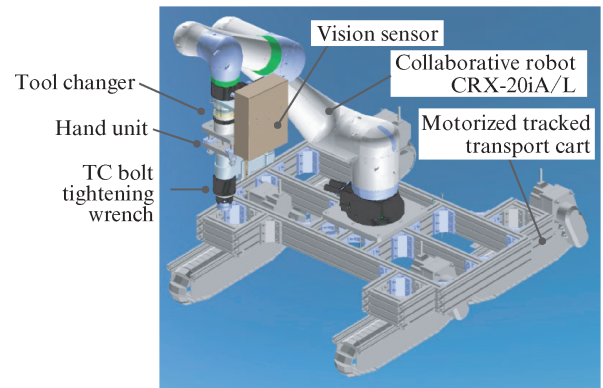


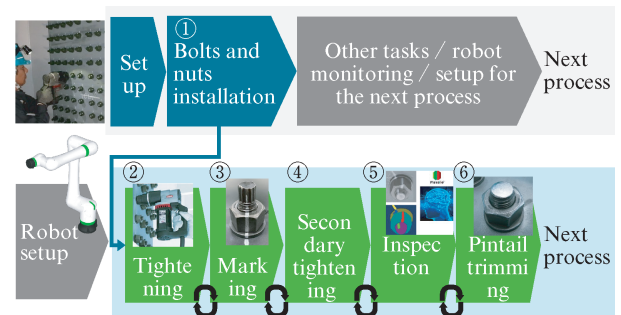
図 1 ロボットシステムの構成

Fig. 1 Robot system configuration

表 1 ロボットの仕様

Table 1 Robot specifications

CRX - 20iA/L	
Payload	20 kg
Robot weight (without transport cart)	41 kg
Reach	1 418 mm
Position repeatability	± 0.04 mm
Ambient temperature range	0 to 45°C



Automatic attachment changeover and continuous operation

図 2 協働ロボットを用いたボルト締めワークフロー

Fig. 2 Workflow for robot-assisted bolt tightening

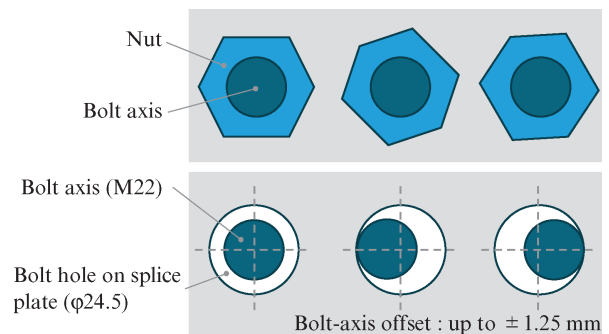


図 3 ナットの向きとボルト軸位置の偏り（模式図）

Fig. 3 Variations in nut orientation and bolt-axis position caused by hole clearance

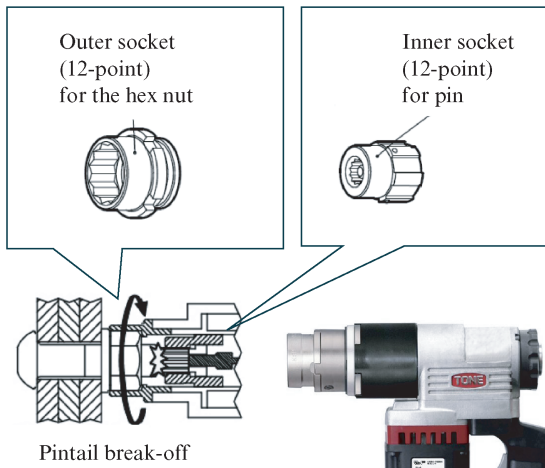


図4 シャーレンチのソケットとトルシア型高力ボルトの嵌合の仕組み⁴⁾

Fig. 4 Mechanism of engagement between the shear wrench socket and the TC bolt⁴⁾

着が成立しない（図3参照）。

シャーレンチとトルシア形高力ボルトとの嵌合のメカニズムは、図4に示すように、ナットは OUTER ソケットと嵌合し、ピンテールは INNER ソケットと嵌合するという二重に嵌合するものである。この嵌合は、人手では容易に実施できるが、ロボットを使用する場合、装着時の接触状態が不確かなまま装着を試みると、噛み込みや工具・部材への干渉を招き、ロボットの異常停止につながり人手介入が必要となる。すなわち、ロボットによる安定的なボルトの締付けを行うためには、位置誤差および六角位相ばらつきのもとで、ソケット装着を安定して成立させる技術が主要課題となる。

3.1.2 解決策

本システムでは、(i) 協働ロボット内蔵の力覚情報を用いた接触監視と探索動作、(ii) ハンド機構に持たせた誤差吸収機能を中核として、ボルト位置・ナットの向きにばらつきが存在してもソケット装着が成立する制御系を構築した。加えて、外部センサ（ビジョンセンサ等）による対象位置の補正を併用し、位置ずれの低減を図る構成とした。

3.1.3 方法

上記構成の成立を確認するため、平板試験体を用い、M22 トルシア形高力ボルトの一次締めおよび本締めの自動施工で検証した。試験体はボルト本数 24 本、孔径 $\phi 24.5 \text{ mm}$ とした。ボルト挿入からナット仮締めまでは手作業で実施し、その後の一次締め、本締めにロボットにより実施した。試験の様子を写真1に示す。

本検証は、ばらつきが存在する実際のボルト配置に対して、所定手順の自動施工が実行できるかを確認することを目的とした。評価のために、連続施工の成立状況を観察するとともに、サイクルタイムおよび成功率を記録し、ロボットが停止した場合は停止要因（嵌合不成立等）を記録した。なお本稿でのサイクルタイムはロボットアームのボルト間の



写真1 平板試験体を用いた実証試験

Photo 1 Demonstration test using a flat-plate specimen

移動と締付けに要する時間とする。成功率は人手の介入を必要とせずロボットが連続的に施工できた場合を成功と定義して算出した。

3.1.4 結果・考察

平板試験体で、一次締めから本締めまでの作業を連続的に実施できることを確認した。パラメータやプログラムの調整を重ねた結果、1本あたりのサイクルタイムがおおむね 15 秒程度、締付成功率は 90% 以上確保できることから、本システムの基本ワークフローは成立するものと判断した。

停止要因は、主にソケットの嵌合不成立であった。これはボルト位置誤差およびナット位相のばらつきに加えて、ボルトの個体差、具体的には主にピンテール周辺の形状のばらつきによる INNER ソケットとの嵌合不成立も考えられることから、完全になくすことは困難である。そこで現場実装を見据え、嵌合不成立時にアプローチ条件（ロボットの姿勢・押付け条件等）を変更して再試行するリトライ機構を実装し、ロボットの停止と人手の介入頻度の低減を図る方針とした。

3.2 屋外運用に向けた環境対策の検証

3.2.1 課題

協働ロボットは製造業を中心に屋内で多く実績があるが、屋外環境での安定稼働には追加の配慮を要する。橋梁の建設現場では、粉じん、降雨、日射、外気温の変化等の環境負荷が想定されるが、特に夏季の日射入熱に伴う機器温度上昇は、稼働停止や寿命低下の観点から重要である。対象とする CRX-20iA/L の使用可能温度は $0 \sim 45^\circ\text{C}$ であり、夏季の直射日光下ではロボット外装温度の上昇により許容範囲を超過する可能性がある。よって、日射条件下で機器温度を許容範囲内に維持する対策の検討とその有効性の確認が必要である。

3.2.2 解決策

屋外での紫外線および温度上昇への対策として、協働ロボット用の保護カバーを試作した。保護材には、入熱の反

射に加えて放熱特性を有するフィルム材料（SPACE COOL フィルム⁵⁾）を採用した。

SPACE COOL フィルムは、鋼板等に貼付した場合、夏季の直射日光下において外気温に対して2～6℃程度の温度低下が得られることが報告されており、日射入熱を抑えつつロボット表面温度の上昇を抑制できる可能性がある。本保護カバーは現場での着脱・点検性を考慮し、主要外装部を覆う構成とした。

3.2.3 検証方法

製作した保護カバーを協働ロボットに装着し、8月の屋外の炎天下で約2時間協働ロボットを稼働させ、20分間隔で外気温およびロボットの温度を計測した。ロボットの温度は、保護カバーを外したうえで、表面温度を非接触型の温度計、および赤外線サーモグラフィにより確認した。

3.2.4 結果・考察

外気温は最高で40℃と過酷な条件下であったが、計測の結果ロボット表面温度は最大でも外気温とおおむね同等の39℃台に収まり、使用可能温度の45℃を超過しないことを確認した（図5参照）。以上より、本カバーにより夏季の屋外運用に関して技術的見通しを得た。今後は、引き続き長時間稼働時の熱蓄積や降雨・粉じん等の環境条件を含め、現場条件を想定し、更なる改良を図る予定である。

4. 実証試験

4.1 合成床版試験体を対象とした本締め実証試験

実橋建設現場では、広範囲に分布するジョイント部に対し、ロボットを移動させながらボルトの締結を行うことが求められる。そこで、移動を伴う条件下での自動施工の成立性を検証するため、合成床版パネルのジョイントを対象として、搬送台車によりロボットを移動させながらボルト締結を行う実証試験を実施した。

試験対象は、JFE エンジニアリング製の合成床版「リバーデッキ⁶⁾」を模擬した実物大試験体とした。搬送台車は遠隔操作が可能な構成とし、補強リブ上をクローラで移動させながら連続的に締付けを行った。写真2に実証試験の様子を示す。

表2に実証試験結果を示す。14本に対し本締めを行ったところ、ピンテール排出不良が1本あり人手の介入を必要としたため、成功率は93%であった。締付け成功までに要した平均トライ回数は1.3回、リトライ移行率は29%であり、ソケットの嵌合不成立により再試行が必要となるケースが確認された。リトライを含む平均締付時間は23秒であり、リトライを含めない場合は18秒であった。ここでの平均締付時間は、本締め動作とボルト間のロボットアーム動作時間を含めたサイクルタイムである。

搬送台車を用いることで、広範囲のボルトを移動しながら連続的に締付けできることを確認した。一方でピンテール排

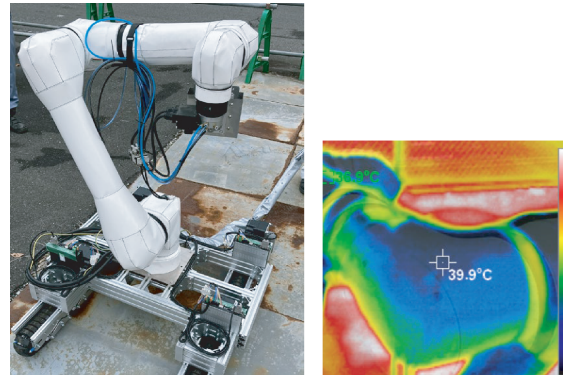


図5 保護ジャケットの装着状況と表面温度

Fig. 5 Protective jacket installation and surface temperature

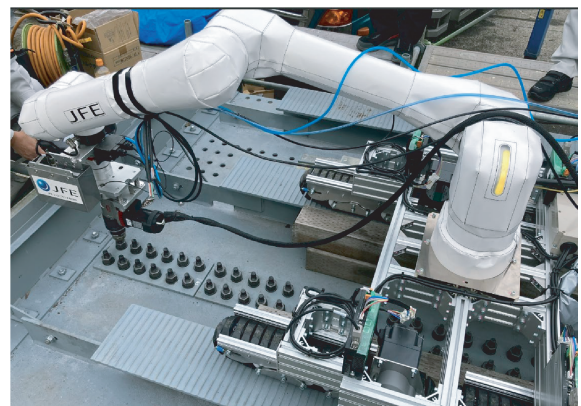


写真2 合成床版パネルを対象とした実証試験

Photo 2 Experimental verification on a composite slab panel

表2 合成床版パネルの実証試験結果

Table 2 Results of the composite deck slab panel demonstration tests

Number of bolts tightened	14	bolts
Pin-tail ejection failure	1	bolt
Success rate	93	%
Average number of tries	1.3	times
Retry rate	29	%
Average cycle time (including retries)	23	s
Average cycle time (excluding retries)	18	s

出不良時には人手の介入を用意するなど課題が残った。長時間の連続運用を見据え、ピンテール排出の安定化（排出機構・排出手順、滞留検知と復帰動作等）については引き続き改良が必要である。

4.2 実橋を対象とした一次締め実証試験

鋼鉄桁の地組ジョイントを対象として、実橋条件下でロ

ボットの適用性を検証した。地組時に作業架台を設置し、その上にロボットを固定配置して締付けを行った。対象部位は、主桁ウェブ（横向き施工）および主桁下フランジ（下向き施工）とした。上フランジ（下向き施工）は技術的には適用可能であるが、現場の足場の設置状況から対象外とした。また、現場の作業調整の制約からロボット施工の対象は一次締めのみとしたが、嵌合プロセスは本締めも同様である。写真3に施工状況を示す。

表3に実証試験結果を示す。主桁ウェブでは56本を対象に実施し、成功率は98%であった。失敗は1本のみで、ソケット嵌合時にロボットの過負荷が検出され異常停止した事象であり、オペレーターの操作により数秒後にはリスタートできた。平均トライ回数は1.4回、リトライ移行率は30%で

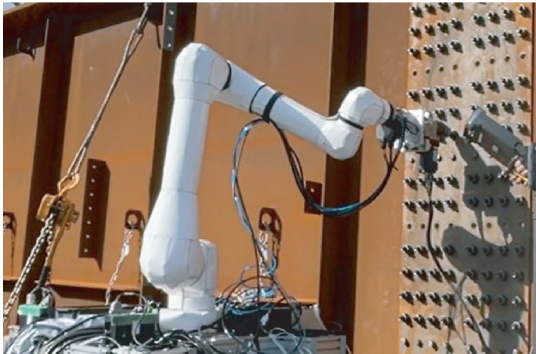


写真3 実橋を対象としたロボット施工

Photo 3 On-site robotic bolt-tightening operations for bridge construction

表3 実橋を対象とした実証試験結果

Table 3 Results of on-site construction tests

Web		
Number of bolts tightened	56	bolts
Success rate	98	%
Average number of tries	1.4	times
Retry rate	30	%
Average cycle time (including retries)	20	s
Average cycle time (excluding retries)	15	s
Lower flange		
Number of bolts tightened	5	bolts
Success rate	100	%
Average number of tries	1.8	times
Retry rate	60	%
Average cycle time (including retries)	24	s
Average cycle time (excluding retries)	15	s

あった。締付時間は、リトライを含む場合で平均20秒、リトライを除く場合で平均15秒であった。リトライ要因の内訳は、仮締め不足（手締めが緩いことに起因）7本、嵌合不成立9本であった。主桁下フランジでは5本を対象に実施し、成功率は100%、平均トライ回数は1.8回、リトライ移行率は60%であった。締付時間は、リトライを含む場合で平均24秒、リトライを除く場合で平均15秒であった。

主桁ウェブで1本が失敗となり人手の介入を要したが、これは制御プログラムの精査により低減可能な事象と考えられる。仮締め不足は施工手順により解消が可能であり、この分のリトライ率は低減可能である。嵌合不成立をなくすことは困難であるが、システム改良やハンド部の改良等により今後更なる低減の余地がある。

実橋への適用にあたっては上記のような成功率、リトライ率改善といった課題に加え、ロボットの可動範囲の制約、ボルトの締付け順序に伴うロボット本体との干渉などにより締付けが困難な箇所が存在する課題も確認された。本ロボットシステムの本格的な普及に向けては、ロボットの特性を踏まえた施工計画と適用範囲の整理、ならびにロボットが施工できない箇所に対する人との協同作業を前提とした運用設計が必要である。

4.3 ロボット導入による効果の試算

将来的な現場導入効果を概算するため、ジョイント部のトルシア形高力ボルト締付け作業を対象として、人手施工とロボット導入時の所要時間を比較した。ボルト本数は1ジョイント600本と仮定した。

人手施工のサイクルタイムは、締付け動作に加えてボルト間の移動および休憩を含め10s/本と想定した。ロボット単体のサイクルタイムは実証試験時にはリトライを含まない場合で15s/本程度であったが、本値は実証試験用の動作であり、動作速度の設定変更、プログラムの改良によるウェイトタイム短縮とリトライ率の低下により実用サイクルタイムとして10s/本程度は技術的に達成可能である。そのため、ロボット単体のサイクルタイムを10s/本として試算した。

図6に試算結果を示す。作業員1人による場合、1ジョイントあたりの所要時間は100分となる。さらにロボットを取り入れた運用形態として、人員1名とロボット1台が同一ジョイント内で役割分担しながら並行作業する「人+ロボット」を想定すると、2倍の施工速度になるため人手の作業時間は50分となり50%の省人化を図ることができる。またさらにロボットの投入台数を2台とすることにより、施工速度は人力の単独施工の3倍となり67%の省人化が見込まれる。

なお本試算は、現場での段取り替えは考慮に入れておらず、ロボットが自律的に移動しながら連続的に締付けできる状況を想定している。ジョイント部が点在する場合や、ジョイント部へのアクセス性が悪い箇所等では、ロボットの搬送・再設置に伴う段取り時間が支配的となる可能性がある

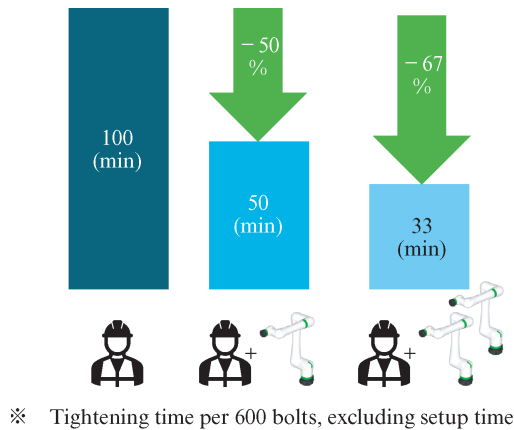


図6 省人化効果

Fig. 6 Labor-saving effects

が、本試算には含めていない。この段取り時間の低減は、ロボット施工の実用化に向けた主要課題の一つである。

5. おわりに

本稿では、協働ロボットを用いた高力ボルト自動締付けロボットシステム「Cobolt」について、要素技術の検証と現場実証を行い、橋梁工事への実装可能性を評価した。以下に、本稿で得られた成果と今後の課題を示す。

(1) 本稿で得られた成果

- 1) 既製シャーレンチを協働ロボットに搭載し、一次締め～本締めを中心とした自動締付けシステムの基本構成を示した。
- 2) ボルト孔クリアランスに起因する位置誤差とナット位相ばらつきに対し、力覚探索、誤差吸収機構、必要に応じたビジョン補正を組み合わせることで、ソケット装着と連続締付けが成立することを確認した。
- 3) SPACE COOL フィルム保護カバーにより、外気温約40℃の直射日光下においてもロボット表面温度を許容範囲内に抑制でき、屋外運用の目途を得た。
- 4) 合成床版パネルを対象とした搬送台車で移動しながらの本締め、鋼鈑桁の主桁ウェブ・下フランジを対象と

した一次締めの実証試験により、実際の橋梁に対して本ロボットシステムによる施工が成立することを確認した。

- 5) 段取り時間を除外した条件下での試算により、ロボットを1台投入することで50%、2台投入することで約67%の省人化が見込まれることを示した。

(2) 今後の課題

- 1) 嵌合不成立等に起因するリトライ低減と、制御最適化によりサイクルタイム短縮を図る。
- 2) 本締め完了時のピンテール排出不良への対策による長時間連続運用性の向上を図る。
- 3) ストローク制約や干渉、段取り替え（搬送・再設置）時間の影響を踏まえた適用範囲の整理と、人との協同作業を前提とした運用設計を行う。
- 4) 一次締め・本締めに加え検査およびピンテール処理までを含む一気通貫のボルト施工システムとしての現場実装を図る。

謝辞

本開発にあたり、FANUC 株式会社には協働ロボットの建設業界導入に関して多くのご助言をいただいた。グローバルコネクト株式会社には本ロボットシステム開発に全面的にご協力いただいた。また、TONE 株式会社にはシャーレンチの改良に関して有益なご助言をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省. i-Construction 2.0 建設現場のオートメーション化.
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>
- 2) JFE エンジニアリング. ニュースリリース.
<https://www.jfe-eng.co.jp/news/2025/20250218.html>
- 3) FANUC 株式会社. CRX シリーズカタログ.
<https://www.fanuc.co.jp/ja/product/robot/model/crx/>
- 4) TONE 株式会社. シャーレンチ取扱説明書.
<https://www.tonetool.co.jp/support/manual-search/>
- 5) SPACE COOL 株式会社ホームページ.
<https://spacecool.jp/>
- 6) 合成床版リバーデッキ製品ホームページ.
<https://www.jfe-eng.co.jp/products/bridge/t19.html>