

鉄筋結束ロボット T-iROBO[®] Rebar の開発

高 橋 要・西 村 健 志

建設業においては「少子高齢化」を背景とする技能労働者不足の顕在化や生産性の停滞といった問題が切迫している。本報では機械化の進まないコンクリート工において、ロボット化による単純繰返し作業や苦渋作業からの開放及び生産性の向上を目的とした鉄筋結束ロボットの開発及び現場実証について紹介する。具体的には開発経緯の第一段階として、鉄筋上の移動機構を具現化する移動機を試作した。続いて第二段階として、移動機から得た様々な知見や課題及びその対策を踏まえて改良を加え、その移動機に自動結束機を搭載した鉄筋結束ロボットを試作した。そして実際に建築現場で鉄筋結束ロボットによる実証実験を行い、各種の動作確認を行った。

キーワード：ロボット、技能労働者、コンクリート工、鉄筋結束、生産性向上、省人化、産学連携

1. はじめに

建設技能労働者は他産業に比べ極端に高齢化が進んでいる。図-1に示すように日建連の推計によれば、今後約10年間に128万人の大量離職が見込まれ、入職者の若者は少子高齢化を背景に90万人であるとした場合、不足する35万人は「生産性向上」による省人化で対応することが求められている¹⁾。

図-2に示す通り、建設業では山岳トンネル工のように約50年で生産性が10倍に向上した工種がある反面、生産性向上の遅れている分野（土工、コンクリート工）が存在する²⁾。生産性向上の遅れている特にこれらの現場において、ロボット技術による生産性の向上が期待されている。

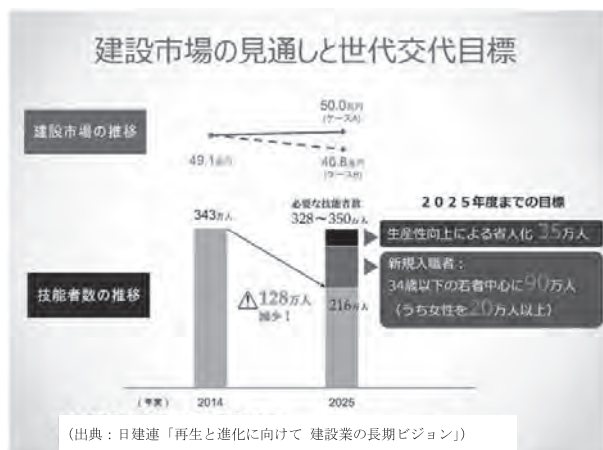


図-1 建設市場の見通しと世代交代目標¹⁾

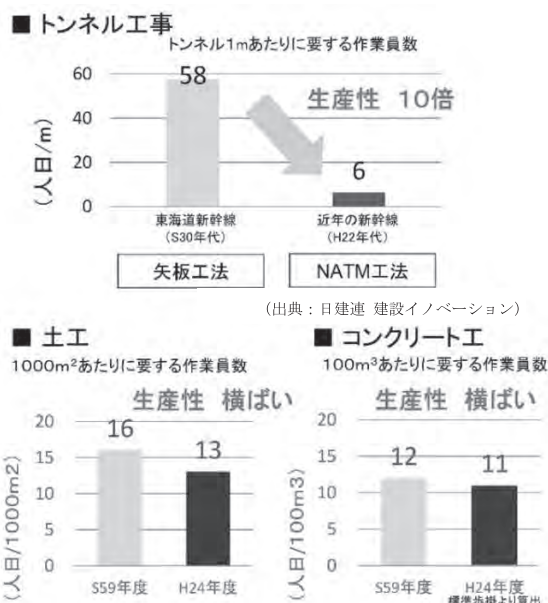


図-2 土木における生産性向上の推移²⁾

建設業におけるロボット技術の活用は災害時や危険箇所³⁾における無人化施工やシールドトンネルなど特定の工種では多く採用されている一方、建設業の根幹となるコンクリート工ではその活用が進んでおらず、釘打機等の工具レベルの使用にとどまっているのが現状である⁴⁾。

この様な背景よりロボット技術の活用が遅れているコンクリート工のうち、スラブ鉄筋の結束の自動化を開発の対象とした。写真-1にスラブ鉄筋の現場状況を示す。コンクリート工ではコンクリートを流し込



写真一 1 スラブ鉄筋 現場状況

む前に型枠の内部に配筋を行う。その形態は鉄筋を格子状に配置し、鉄筋同士を焼きなまし鉄線で結束して固定する。スラブ鉄筋の結束作業は単純であるが広範囲に渡り中腰で行う作業であるため身体への負担が大きい。そこで、鉄筋の結束作業を自動で行うことのできる鉄筋結束ロボット T-iROBO[®] Rebar（以下「本ロボット」という）の開発に着手した。

鉄筋結束ロボットは単純繰り返し作業を行い、限られた労働力は作業難度の高い作業を担当するといった人とロボットとの共働作業による当該工種の生産性向上を目指した。

開発にあたってはロボット機構等の開発を千葉工業大学が担当し、現場ニーズ調査および実験フィールドの選定を大成建設が行った。

2. 開発の概要

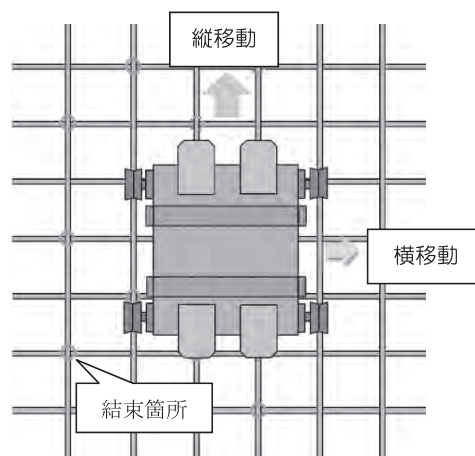
(1) ロボット開発の基本計画

鉄筋工事の現場ニーズからロボットの開発方針を定め、ロボット開発の基本計画を以下の様に決定した。

(a) 移動機構

格子状に配筋された鉄筋の上部側を案内（レール）として結束箇所へ移動（縦移動）する（図一 3）。

これによって縦方向の配筋とロボットの相対位置が拘束される。また縦移動時に横方向の鉄筋を検出することで結束箇所の判定を行う。上部鉄筋を案内レールとして縦移動し、横方向の鉄筋をセンサによって検出することで結束箇所とロボットとの相対位置を定めて結束作業を行う。縦方向の鉄筋端部または障害物などにより縦移動が不能と判断した段階で隣の鉄筋に乗り移り（横移動）、反転する機構を搭載する。また、人の鉄筋仮組の誤差に対する許容範囲内（コンクリート標準示方書⁵⁾に準じる）での移動および結束が可能な機構を開発した。尚、ロボットは誰もが手軽に持ち



図一 3 鉄筋を案内（レール）とした移動イメージ



写真一 2 結束機（マックス社製）

運べるように重量を 25 kg 以下とし、サイズは L500 × W500 × H400 mm 程度とした。

(b) 結束機構

鉄筋を結束する機構は市販の自動結束機を搭載することとした。自動結束機（写真一 2）（以下「本結束機」という）を鉄筋上の移動機構に搭載し、結束箇所を検出して自律的に結束機を操作しながら結束作業を可能とする自律制御機構の開発を行った。

(c) アルゴリズム

鉄筋上の縦移動・横移動を繰り返して指定範囲内の鉄筋を自動結束するアルゴリズムを開発した。また、人の進入や障害等を検知して停止するためのセンサおよびアルゴリズムの検討を行った。

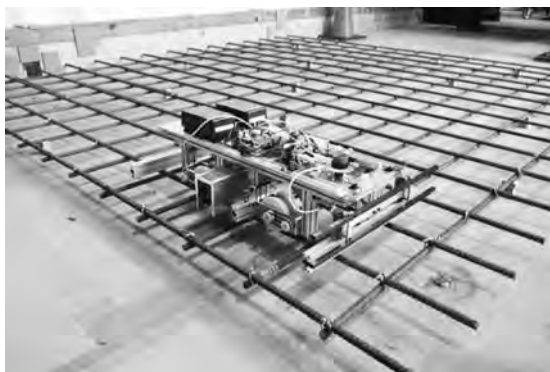
(2) ロボット移動機構部の試作及び動作確認

開発の第一段階として、移動機構の検討を具現化する鉄筋上移動機を試作した。以下にその内容を述べる。

(a) 移動機の試作

移動機を試作する主な目的は鉄筋結束（交差）部を自律的に検知して、走行・停止を繰り返す機構の動作の現実性を確認することである。

また、制御に用いるマイコンを本体に搭載し、鉄筋端部や障害物等を検知するセンサには接触式のリミットスイッチを用いた。試作機とその仕様を写真一 3、表一 1 に示す。



写真一 3 試作機（鉄筋上移動機構）

表一 1 試作機仕様

Size (W×L×H) [mm]	480×820×240
Weight [kg]	15.5
Drive System	4WD walking by mechanical linkage
Prime mover	DC motor
Battery	Li-ion battery

(b) 基本動作の確認実験

鉄筋上移動機構の確認項目を以下に記す。尚、動作確認に使用したスラブ配筋は、鉄筋径 D13 × D13、鉄筋間隔 200 mm とした。

- ①移動（縦移動・横移動）機構の動作の確実性および再現性の確認
- ②鉄筋段差部の乗越えの可否
- ③結尾部での停止・移動を繰返し、鉄筋端部を検知して反転または横に移動するアルゴリズムおよびセンシングの検証
- ④人による鉄筋仮設置の誤差（コンクリート標準示方書⁵⁾に準じる）に対する移動時の追従性の検証

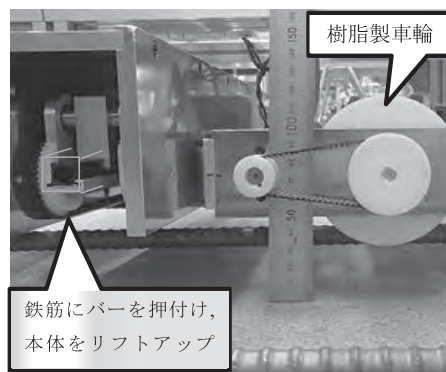
写真一 3 のスラブ配筋上において移動・停止を確実に繰返して鉄筋端部を検知し、移動方向を反転できることを確認した。また移動方向を反転する一連の動作でリンク機構による鉄筋段差部の移動（横移動）がスムーズにできることを確認した。鉄筋段差部の移動に採用したリンク機構を図一 4、5 に示す。

また機体重量は目標値を満たしたものの、サイズは目標値を満たさず、開発の第一段階においては小型化が今後の課題となった。

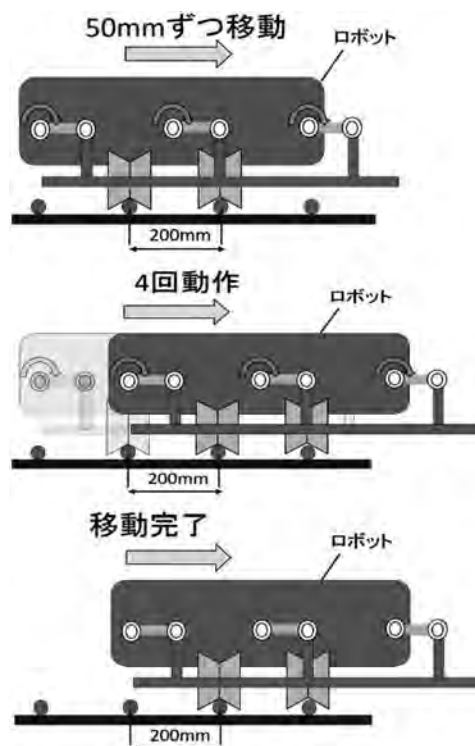
またロボットが移動する際の脱輪等は車輪形状を考慮することで有効に働き、不具合等が発生しなかった。

一方、人による鉄筋仮設置における鉄筋間隔の誤差により、走行移動時に鉄筋検知の接触式リミットスイッチが一時的に鉄筋から外れて誤動作を起こすことが確認された。

以上のような結果を踏まえて開発の第一段階の移動



図一 4 リンク機構と車輪

図一 5 リンク機構による横移動イメージ⁶⁾

機構の適合性を確認し、第二段階の鉄筋結束機構を搭載したロボットの試作を進めた。

また課題として鉄筋の配筋誤差に対する車輪の追従性の向上と、誤動作低減のためにセンサの種類や配置の見直しが必要であると判断した。

(c) 鉄筋上移動機の改良と結束機構の付加

開発の第一段階から得た移動機構の知見や課題及びその対策を踏まえて、結束機構を付加した鉄筋結束ロボットを製作した。本ロボットとその仕様を図一 6、表一 2 に示す。

搭載する結束機は、建設現場で広く使われている本結束機（適合径 D16 × D16）を採用した。本結束機は結束用鉄線を放出するため、先端部が独自のクランプ形状となっており（写真一 2）、結束機を鉄筋に対して鉛直方向に上下させるだけでは先端のクランプ部

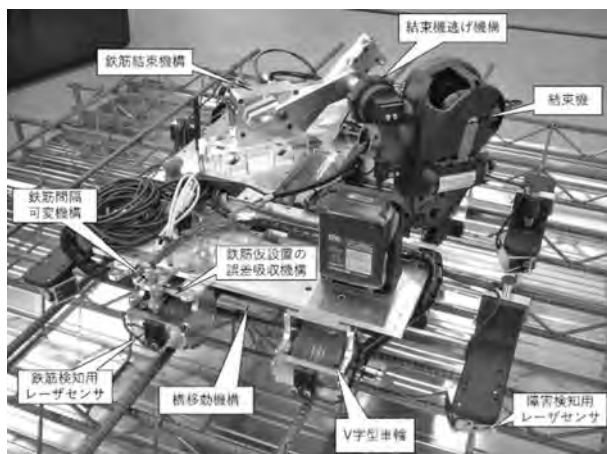


図-6 本ロボット

表-2 本ロボット仕様

Size (W×L×H)	[mm]	400×500×315 (本体)
Weight	[kg]	19.0
Drive System		4WD walking by mechanical linkage
Prime mover		DC motor
Battery		Li-ion battery

が鉄筋に干渉して結束することができない。そのため結束機は鉄筋に対して斜めに操作する必要がある。またロボットの移動中、結束機は鉄筋と干渉しない高さまで引き上げる必要もある。したがって結束部を検知すると結束機を斜め下方に降下させ、鉄筋の結束を行った後、結束機を鉄筋と干渉しない高さまで引き上げる。この繰り返しにより指定範囲内の自動結束作業を行った。

また試作の移動機からの主な改良として鉄筋検知等のセンサに非接触タイプを採用し、センシング精度の向上とセンサ配置の見直しによるロボット小型化の試みや横移動時にロボットをリフトアップする際に生じていた不安定なロボット姿勢の改善および人の鉄筋仮設置の誤差に起因する車輪の脱輪に対する改良を行った。尚、動作確認に使用したスラブ配筋は、試作機の実験と同様の鉄筋径 D13 × D13、鉄筋間隔 200 mm とした。

(d) 効果確認実験

非接触タイプのレーザーセンサを用いて鉄筋結束部と鉄筋端部の検知を行った。レーザーセンサでは接触式のリミットスイッチで問題となった配筋誤差によるセンサの誤動作が発生しないことを確認した。

移動機構についての改良効果は以下の通りである。

- ①横移動機構の改良により鉄筋面が傾斜（ロール・ピッチ）していても転倒しない安定性を確認した。
- ②人の鉄筋仮設置の誤差（コンクリート標準示方書⁵⁾に準じる）を吸収する鉄筋追従機構を車輪に付加

したことにより、± 20 mm の配筋誤差に対して脱輪すること無く走行出来ることを確認した。

- ③車輪形状および材質の見直しにより、縦移動の際に人の鉄筋仮設置の誤差によるロボットの車輪の脱輪が無くなった。

この様に移動機構の改良によって、確実な移動と結束を繰り返す高い再現性を確認できた。

また結束機構の搭載により重量が試作の移動機に比べ約 30% 重い 19 kg となったが、目標重量の 25 kg 以下を満たした。サイズはセンサ配置等の見直しにより L500 × W500 × H400 mm（本体構造）以下となり、誰もが持ち運ぶことができる重量およびサイズとなった。

以上のことから、ロボットが基本計画を満たすことを確認した。

3. 実証実験

製作した鉄筋結束ロボットを使い、実際の工事現場において、RC 在来工法の建築スラブ配筋で実証実験を行った（写真-4、5）。鉄筋は D13 と D10 の交互配筋で、鉄筋間隔は 200 mm であった。

□-1.4 × 2.0 m のエリアで全結束数 92 箇所の連続



写真-4 実証実験 建築現場



写真-5 実証実験状況

結束を試行した。ロボット姿勢の傾きや鉄筋ふみ曲げ箇所で鉄筋交差部の検出エラーが3箇所発生したが、その他の箇所では問題なく結束を行うことができ、エラー発生率は3.3%であった。

この結果から、鉄筋の上を確実に移動する移動機構、鉄筋を検知するセンサ、鉄筋を結束するための結束機構がそれぞれ高い精度で動作することが検証された。

4. 今後の開発展望

(1) ロボットの目標能力

鉄筋工事に占める結束作業の割合を推定するため、物流施設の建築現場で調査を実施した。

現場のスラブは主筋が床材に溶接されているフェローデッキである。

調査の結果、鉄筋工事に占める結束作業の割合が約20%と見込まれた。この調査結果をもとにロボット能力の算定は当該現場の鉄筋工事歩掛 500 m²/班・日を満足する様、ロボット2台を使い、1台あたり250 m²/日を目標能力とした。

現時点では確実な結束や移動繰返しの信頼性を向上するための実験を継続して進めている。ただし駆動用

のモーターは目標能力を満たすことを確認している。

(2) 現場環境に応じたセンシングと制御

今回の実証実験を行った現場のような比較的細径の鉄筋の場合、配筋作業中にわずかな鉄筋の曲がりなどを発生させやすく、これが鉄筋検知の精度に大きく影響した。また、現状のレーザセンサの検出スポットは非常に狭く、ロボット姿勢の傾斜によっては鉄筋を検出する事が出来ない場合が生じた。このような状況を想定して今後、鉄筋が湾曲している場合の検知・対応や障害物などによって結束が不可能な場所を検出・回避するための方法として、センサとアルゴリズムの工夫やカメラを用いた画像処理の検討など現場環境に適応可能なセンシングと制御の構築を目指す。

5. おわりに

コンクリート工における生産性向上に向けて、自律的に鉄筋を結束することのできるロボットの開発を現在も進めている。

今後はより実用的な鉄筋結束ロボットを開発し、現場実証を通して改善改良へのフィードバックを積み重ねながら、誰もが手軽に使えるより汎用性の高いロボットの構築を目指す。

J C M A

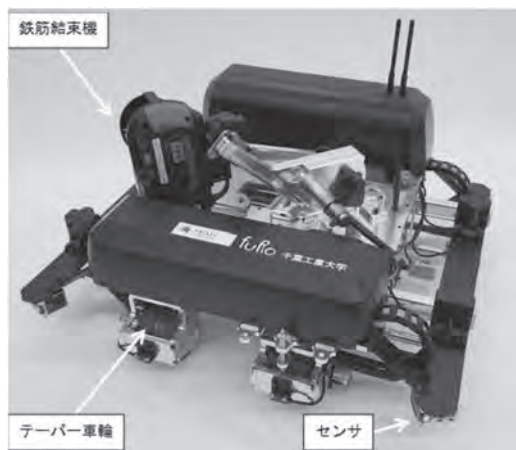
《参考文献》

- 1) 日建連ホームページ http://www.nikkenren.com/sougou/pdf/ikusei/2016_1018_ikusei.pdf (2017年8月閲覧)
- 2) 国交省ホームページ <http://www.qsr.mlit.go.jp/ict/iconstruction/page1.html> (2017年8月閲覧)
- 3) 井上猛雄：災害とロボット 第1版 平成24年4月25日
- 4) 日建連 電力土木委員会：電力土木における情報化施工・ICT活用に関する調査、調査報告書 平成29年3月
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】平成14年3月
- 6) 千葉工業大学 伊東稔明、保坂謙史郎、西村健志、米田完：自動鉄筋結束ロボットの開発、日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演論文集 平成29年5月

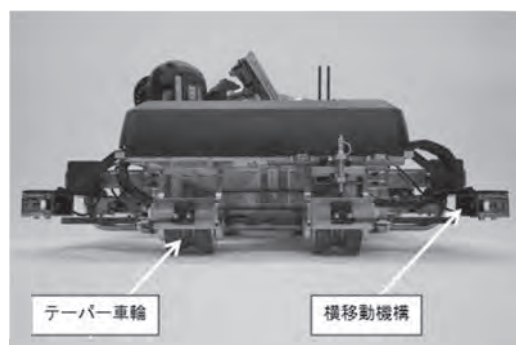
【筆者紹介】

高橋 要（たかはし かなめ）
大成建設㈱
技術センター 先進技術開発部
次世代建設技術開発室
課長

西村 健志（にしむら たけし）
千葉工業大学
未来ロボット技術研究センター
研究員



(外観)



(側面)

図一七 現在の本ロボット