

JCMA 報告

平成 29 年度 日本建設機械施工大賞 受賞業績 (その 3)

大賞部門 最優秀賞

重量鉄筋配筋作業支援ロボット (配筋アシストロボ) の開発

清水建設(株), アクティブリンク(株), (株)エスシー・マシーナリ

業務内容

建設業では、高齢化による大量離職等により今後 10 年間で技能労働者が約 130 万人減少することが予測されている。このような中、必要なインフラを整備していくためには、生産性向上や 3K (きつい、きたない、きけん) からの脱却による新規入職者の確保が早期に求められており、国土交通省主導のもと i-Construction 施策による取組みが推進されている。

また、コンクリート工においては、近年の耐震化により鉄筋が太径化・高密度化し、鉄筋組立時の負担が増大している。さらに技能労働者の高齢化も相まって生産性が低下している。そこで、重量鉄筋の配筋作業に着目し、熟練技能労働者のコツを生かしながら作業負担を大幅に低減できる、人間の腕の動きを模した重量鉄筋配筋作業支援ロボット (配筋アシストロボ) (以下「本ロボット」という) を開発した。本ロボットは、配筋作業の省人化・省力化、苦渋作業の軽減が図れ、安全性も向上する技術であり、実現場での適用において優れた効果を確認した。

写真—1 に本ロボットを示す。



写真—1 本ロボット全景

(1) 開発のコンセプト

構造物を構築する際、どこにどのような鉄筋をどれだけ配置するのか、その鉄筋の太さや長さ、配置間隔等、いわゆる配筋の仕様は構造物によって異なり、まったく同一のものはない。その上構築する場所も同じ場所ではないため、配筋作業の自動化の弊害となっている。また、効率よく鉄筋配筋作業を行うには組立て順序等に熟練者のノウハウが

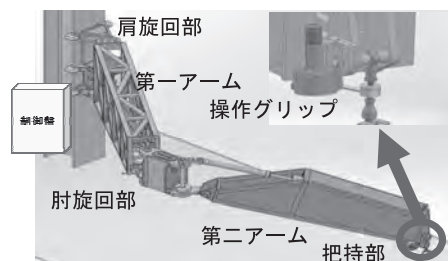
必要である。しかし、配筋作業は体力が必要なため、熟練者が高齢化すると体力が低下し、配筋作業に従事することは困難であった。そこで、体力のいる力仕事部分はロボットで補い、高齢化した熟練技術者のノウハウを継続して活用する、人とロボットの融合したシステムの構築をコンセプトにして、鉄筋組立作業の大幅な生産性向上を目指した。

(2) 開発の目標

- ①重量鉄筋組立に要する人員の削減 (省人化)
- ②重量鉄筋運搬・組立時の人的重量負担の低減 (苦渋作業の低減・高齢熟練者の活躍)
- ③ハンドガイド方式によるなめらかな動作 (熟練者のコツの発揮)
- ④軽量化および分解組立方式による設置・運搬時の機動性の向上
- ⑤操作者が手で圧力を加えた時のみ動作することによる安全性の向上

(3) 技術概要

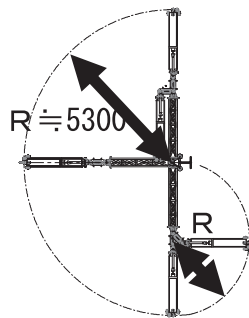
本ロボットは、人間の肩、上腕、肘、下腕、手にそれぞれ相当する「肩旋回部」「第一アーム」「肘旋回部」「第二アーム」「把持部」の 5 パーツと制御盤から構成されている。図—1 に構造概要を示す。腕全体の動きをアシストするサーボモータを肩旋回部と肘旋回部、第二アームに組み込むことで、人間の腕に近い動作性を実現した。本ロボットは人力での運搬を可能にするため、4 分割の構造とし、各ブロックの重量は約 40 kg ~ 約 60 kg 程度である。諸元を表—1、水平可動範囲を図—2、鉛直可動範囲図を図—3 に示す。



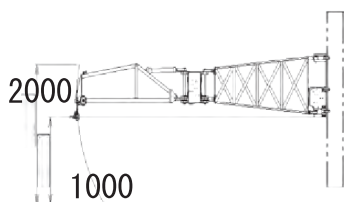
図—1 本ロボット構造概要図

表—1 本ロボット諸元表

定格荷重	250 kg
作業半径	約 5.3 m
揚程	約 2.0 m
分割数	4 分割
入力電源	三相 AC200 V
水平方向操作	操作グリップ式 (6 軸力学センサー内蔵)



図一2 水平可動範囲図



図一3 鉛直可動範囲図

また、操作グリップ内にはセンサーが内蔵されており、操作者の微妙な手の動きをも感知して本ロボットが動作するので、操作者の意のままに鉄筋移動をサポートすることができる。(ハンドガイド方式) 鉄筋移動の際には、鉄筋重量は本ロボットが負担するため、重量負担なく鉄筋の移動ができる。

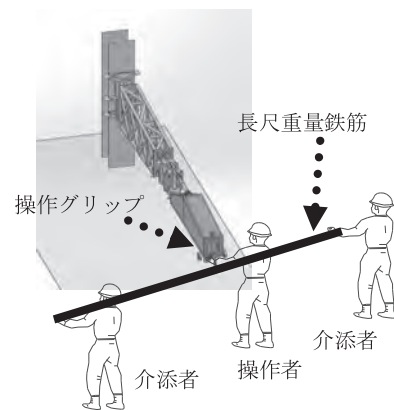
運用方法は操作者は、本ロボット先端にて操作をして鉄筋を移動する。介添者は鉄筋端部に配置され、鉄筋移動時の荷ぶれ防止や鉄筋の正確な位置への配筋作業を行う。そのイメージ図を図一4に示す。移動時の荷ぶれ防止や鉄筋の正確な位置への配筋作業を行う。

配筋作業時は、本ロボットを固定した後、昇降ボタンを操作して重量鉄筋を持ち上げる。その後、操作者が移動したい方向に、手で操作グリップに圧力を加えるだけで動きに合わせてサーボモータが稼働し、アームがアシスト制御され、操作者の意図する方向に移動できる。アームが操作者の意思と判断に合わせて直感的かつなめらかに動くため、計画線（墨）に合わせて高精度に配筋できる。

(4) 特徴

①人とロボットの協働作業の実現

操作グリップに最新の6軸力覚センサーを採用し、操作



図一4 作業イメージ図

者の微妙な手の動きをも検知して本ロボットは動作する。したがって、熟練技能労働者が操作することにより、熟練者のもつコツをも生かしながら、操作者の意のままに鉄筋移動のサポートをすることが可能となった。(ハンドガイド方式) これにより、建設業で初めて、人とロボットの協働作業が実現した。

②人間の腕のモデル化

本ロボットの動きに関して、3次元的に人間の腕（肩＋上腕＋下腕）をモデル化した。操作者の手の動きに追従し、高速演算システムにより、リアルタイムに各腕の移動位置が計算・出力され動作する。

③軽量化

本ロボットを、治具として、生産性の低下が懸念される箇所に容易に手で運搬・設置できるように軽量化を図り、本ロボットの構造部材をアルミ（板・トラス）とした。

④分解組立方式

人力での運搬・設置ができるように分割（4分割）でき、簡単に組立・解体ができる構造とした。

⑤サーボモータとアシスト制御の採用

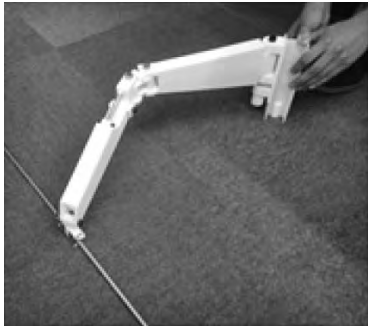
電動式のサーボモータを採用し、アーム関節をアシスト制御することにより、なめらかな動作が可能となっている。そのため、細かい調整が必要とされる鉄筋詳細位置決めにも支障なく使用が可能である。

(5) 開発の経緯

2015年4月から開発をスタートした。適用の対象として、太径鉄筋（D51等）が多用され、生産性低下が特に懸念される開削トンネルを想定した。ただし、適用は開削トンネルに限定されるものではなく、他工種や他分野など汎用性を持たせるべく目標設定した。

5-1 鉄筋工の組立ノウハウの取得および設計（2015.4～2015.9）

本ロボットのユーザーである熟練鉄筋工も当初から開発メンバーとして開発に参画し、鉄筋の組み立て時のノウハウ



写真—2 模型による確認

ウや詳細な手の動きを確認し、操作時に無理や支障となるべく項目を排除した。そして、小型模型を作り（写真—2）、動きや使い勝手を全メンバーで確認した後、開発の目標を設定し（（2）に記述）、設計に着手した。

5-2) 構造部材の軽量化への取り組み（2015.4～2015.9）

人力での運搬を可能とするため、軽量化をする必要があった。構造部材は、人間の手で運搬・設置・撤去できることを前提に、分解した部材の重量を 60 kg 以下とした。本ロボットを多くの部材に分解する設計にした場合、一部材は軽くなるが組立に時間がかかるため、できるだけ分割数を少なくして、部材重量も抑えることが必要となる。形状検討、構造解析及び材料選定を実施し、軽量化を追求した結果、材料にはアルミ材を選定した。構造的には、引っ張り強度確保のため薄板をアーム表面に貼る板金構造とした（写真—3）。これにより、分割数を 4 分割で、一部材の重量も 60 kg 以下に抑えられることが判明した。ところが、動作実験を行ったところ、想定以上にアルミ板の変形が大きく、かつ、薄板にきしみ音が発生した。原因は、先

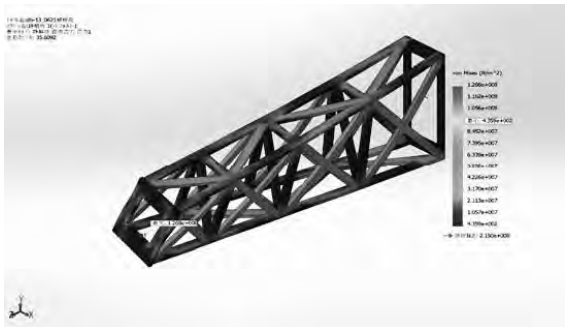
端の第二アームの動きにより、根本の第一アーム部にねじれによる正反逆のモーメントが繰り返し発生したためである。このままでは、溶接部が繰り返し疲労により破断する可能性があるため構造の変更を決定した。

5-3) 構造の確定および実証実験（2015.10～2016.8）

多くの設計検討・実験の後、部材の重量は 60 kg 以下を維持しつつ、上腕部となるパーツを一般的なトラス構造とし、最適形状（最軽量構造）を決定した（図—5）。ただし、先端アーム部材は従来通り板金構造を維持した。この変更した設計をもとに、再度、本ロボットを試作し、性能の実証を試みた（写真—4）。実証実験での確認項目を表—2 に示す。

5-4) 操作性向上の取組み（2016.8～2016.10）

協働作業を実現するためハンドガイド方式を採用している。実証実験の結果、人の移動を伴う大きな動作がある場合、人が操作グリップに与える力が安定しないため、センサーへの入力不安定せず、「なめらかな操作」に支障をきたすことがわかった。このため、動作試験を繰り返し行い、入力値の変動データを解析した。これらのデータから、最



図—5 構造解析例



写真—3 動作実験（板金構造）



写真—4 変更後第一アーム構造写真

表—2 性能確認項目

項目	確認項目	確認基準	備考
重量	一部材重量	60 kg 以下	
準備	組み立て・解体	人員 2 人以下、各 20 分以内	
操作性	動作確認	操作者の意思通りの動作	
	振動・異常音	なし	定格荷重時 250 kg
	操作者への負荷	なし	
	稼働範囲内の動作	操作可能	

適な制御システムを導き出し、改良することで、「なめらかな操作」を実現させた。

(6) 実施工への適用

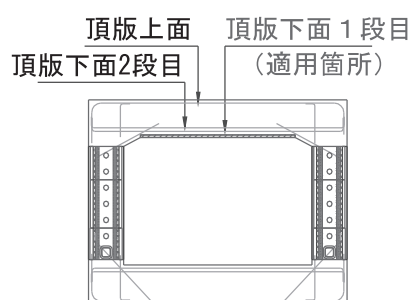
2016年12月に千葉県と大阪府の2現場に適用した。以下に詳細を記す。

6-1) 適用例1

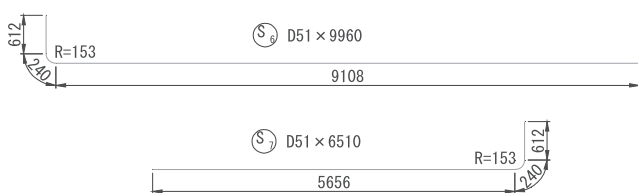
ランプ道路用1連ボックスカルバートの頂版部の主筋D51(長尺鉄筋)で適用した。以下図—6, 7に適用箇所、鉄筋加工図を示す。なお、本適用箇所は埋設型枠を使用しているため、鋼製リブ材や鋼材が存在し、特に鉄筋組立のしづらい場所であった。なお、組立て数量は4tである。

従来は、6人1班で人力による施工を行っていた。以下に本ロボットを使用した場合と従来通り施工した場合の比較を表—3に、施工状況を写真—5, 6に示す。

ここで、生産性を評価するために、1分で1人あたりに施工した鉄筋重量を【物的労働生産性】と定義して比較をおこなった。この結果より、本ロボットにより労働生産性は約1.9倍となった。1箇所での配置できる施工量は配筋の仕様(配筋ピッチ、鉄筋径、長さ)により変化するが、参考として準備解体を含めた物的労働生産性を比較しても約



図—6 適用箇所断面



図—7 適用鉄筋加工図



写真—5 本ロボット使用作業状況



写真—6 従来作業状況

1.4倍の効果があることが確認できた。また、重量負担軽減効果も大きく、苦渋作業の解消に大きく効果がある。

6-2) 適用例2

道路用2連ボックスカルバートの頂版部の主筋D51で適用した。対象鉄筋は6mであり、前事例に比べ対照的に短尺であるが適用し、効果を確認した。以下図—8, 9に適用箇所および鉄筋加工図を示す。なお、組立て数量は4.7tである。

以下に本ロボットを使用した場合と従来通り施工した場合の比較を表—4に、施工状況を写真—7, 8に示す。

本工事においては、鉄筋投入開口寸法の制約と人力で組立作業をすることを考慮して、1本6mに分割されて施工している。その上、当初から省力化・省人化の工夫を既に行っている。

以上の対策をおこなった状況下であっても本ロボットを使用すれば現状より物的生産性は約1.3倍あり、効果が十

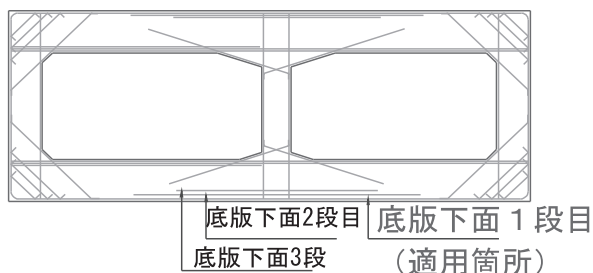
表—3 適用結果1

	本技術 (A)	従来 (B)	(A)/(B)
鉄筋組立時間 (分)	120	150	0.80
鉄筋工数 (人)	4*	6	0.67
物的労働生産性 (施工量 (kg)/(工数 (人)×時間 (分))	8.33	4.44	1.88
一人あたり重量負担 (kg)	0	28	
(参考) 準備・解体時間 (分)	20 + 20	0	
準備解体を含めた物的労働生産性	6.25	4.44	1.41

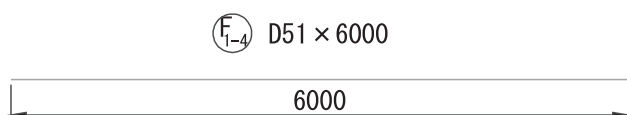
*本ロボットによる作業3人+既設縦配筋の間を通すための補助1名 計4人

表一 4 適用結果 2

	本技術 (A)	従来 (B)	(A)/(B)
鉄筋組立時間 (分)	83	110	0.75
鉄筋工数 (人)	2	2	1.00
物的労働生産性 (施工量 (kg)/(工数 (人) × 時間 (分)))	24.10	18.18	1.33
一人あたり重量負担 (kg)	0	48	
(参考) 準備・解体時間 (分)	20 + 20	0	
準備解体を含めた物的労働生産性	16.26	18.18	0.89



図一 8 適用箇所断面図



図一 9 適用鉄筋加工図



写真一 7 本ロボット使用作業状況



写真一 8 従来作業状況

分あることが確認できた。また適用例 1 同様に重量負担軽減効果も大きい。

①省人化及び省人化による施工効率の上昇

D51 で 10 m 程度 (重量約 160 kg) の鉄筋を配筋する際には、従来 6 人前後必要であった。しかし、適用例 1 で 4 人に削減でき、省人化 (33% 減) が図れた。また、施工時間は 20% 短縮できた。さらに、本ロボット使用により削減できた人員は他作業に従事しており、施工効率が上昇した。

②省力化

鉄筋移動時の重量は、本ロボットが負担するため、作業員は重量負担がなく作業が可能で、苦渋作業から開放される。適用例 1 では、10.5 m 配筋時、一人あたり一回約 30 kg の重量を負担しなければならなかったが、本ロボットを使用すれば、重量負担はなく意のままに操作可能であり、鉄筋作業の省力化が図れる。

③分解組立方式採用による機動的な運用

本技術は、人力で運べる重量になるように 4 分割が可能で、移動が容易である。したがって、太径重量鉄筋の組立等の重量負担が大きく作業効率の悪い作業に機動的にピンポイントで使用することができる。そのため、人力での組立が効率的な場合 (細径の配力筋、幅止め筋等) は人力で組立を行い、本ロボットによる組立のほうが効率のいい場合には本ロボットによる組立を行うといった具合に、効率のよい組立方法を自在に選択が可能となり、施工効率も上昇する。

④人とロボットの協働作業 (高齢熟練工のノウハウの活用)

体力の落ちてしまった熟練高齢者でも使用可能で人とロボットの協働作業を実現した。したがって、より高齢でも働くことが可能となるため、高齢熟練工のノウハウを生かし、技術を伝承する機会が広がるとともに将来懸念される労働者不足解消の一助となることが期待できる。

お断り

この JCMA 報告は、受賞した原文とは一部異なる表現をしています。