

4足歩行双腕作業ロボットの紹介

片山周二

近年、建設機械へのロボット技術の応用は目覚しく、自動化や安全装置の発達には目を見張るものがある。現在の建設機械は一昔前であれば「建設ロボット」と称して通用する機械に進化している。また、災害復旧にも数多く使用され活躍している。さらに新技術を追加してより災害復旧支援機に近づける試みも行われているが、元来、建設機械は災害用に供するために企画されたものではないため不満足な部分も多い。今回、移動式油圧クレーンで使用している技術を再構成して全く異なる機械「4足歩行双腕作業ロボット (ROBOTOPS)」を製作する機会を得たので、これを紹介し被災者救出支援、災害復旧機としての可能性を探る。

キーワード：建設機械，油圧クレーン，レスキューロボット，4足歩行ロボット，遠隔操作

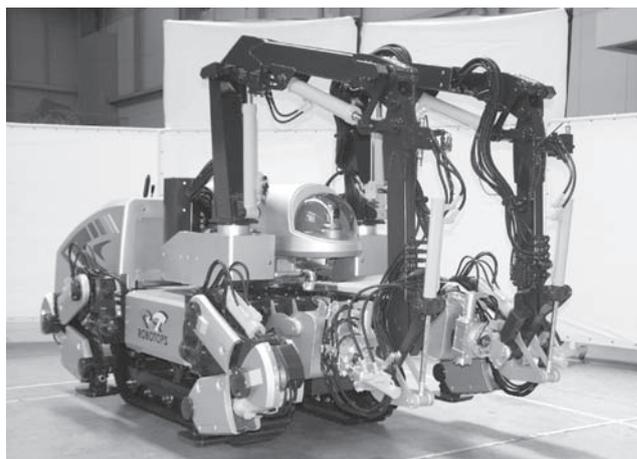
1. はじめに

レスキューロボットは最終的に被災者の救助を第一の目的としている。その役割は、①被災者の捜索、②瓦礫などの撤去作業による被災者救出の支援、の二つに大別される。各大学や民間企業で、地震などの災害を想定して、レスキューロボットの研究開発が進められている。しかし、その多くは特殊な移動機構やセンサーを装備して行方不明被災者の探索を目的とし瓦礫の中を移動する前述①の場合が大半である。

一方、②の瓦礫撤去など救出支援に供するレスキューロボットの開発事例が少ないのは、倒壊家屋や瓦礫などの撤去作業が、建設・土木作業に類似しており、現有の建設機械を流用する事で、ある程度その目的が達せられる。また現在の建設機械は、急な調達や過酷な作業環境にも十分応えられる機械である事が主要因と考えられる。このため災害復旧にはバックホーやクレーンなど市販の移動式建設機械が数多く投入されている。しかし、厳密には建設機械は元来、その作業場周辺に不明被災者の存在などを想定しての設計はなされておらず、レスキュー隊員と共同で被災者の救出支援に当たるには限度がある。危険地域なるがゆえのオペレーターの二次災害も考慮すると、災害発生後の投入時期、場所は限定され、被災者救出活動の多くの部分は未だに人手に頼らざるを得ない。将来想定される大規模災害を思うと、人手に代わり人と共同作業できる「救出支援レスキューロボット」の出現が望ま

れる所であろう。

今回油圧式クレーンに使われている「構造設計、油圧システム、電子制御」の3技術を分離・再構成し、写真—1に示す「4足歩行双腕作業ロボット (ROBOTOPS)」を開発したのでこれを紹介し、より受災初期段階へ投入できるレスキューロボット実用化への足掛かりとしたい。



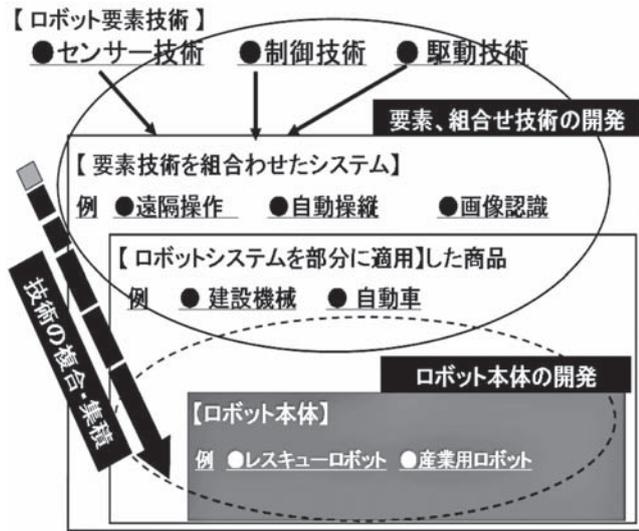
写真—1 「ROBOTOPS」 走行姿勢

2. ロボット開発のねらい

(1) 建設機械とロボット要素技術

ロボットの研究開発には図—1に示すようにロボットテクノロジーと呼ばれる①「要素技術」の開発と、②「ロボット本体」そのものの開発の2つの側面が

ある。要素技術はセンシング技術，制御技術，駆動技術の3技術に分類され，これら3技術を組み合わせる事により様々なシステム（新機能）を創造・構成する事ができる。ここで構成された機能は建設機械と重複するものも多く，安全装置や自動化などに利用されオペレーターの操作を補助することにより安全作業に役立っている。各メーカーは競合他社と商品の差異化を図るため，要素技術や新機能の研究開発にしのぎを削っている。その結果，建設機械はロボットと要素技術を共有しロボット化が急速に進んでいる。



図一 要素技術とロボット本体の関係

(2) 建設機械の将来像

実現までに長期間を要する新技術や機能は，現有の商品にすぐに適用実施できる例は少ない。何かの形に集約して研究開発を継続する必要がある，そこから新たな機能が創造される場合が多々ある。自動車メーカーなどで長年にわたり「ロボット本体」の研究を継続させているのはこの辺りに理由があるのではと推測している。我々建設機械メーカーも保有技術，現有商品から建設機械の将来像をイメージし，要素技術を集約した形で研究を進化させ新機能を創造する必要がある。そのために②の「ロボット本体」を開発する意義があると考えている。自社商品の将来像を描き進化させていくには具体的な目標を想定し，その用途に特化して新しい機能を付加する工夫が大切である。今回は建設機械の未来の用途分野の一つとして災害復旧支援作業を想定し，その第一段階で遠隔操作，多軸制御など保有技術を集積・高度化した。

3. 「ROBOTOPS」の概要

(1) 主要仕様

(a) 格納時

全長	3.84 m
全高	2.1 m
全幅	2.1 m
機体重量	2.7 t
動力源	エンジン駆動 油圧式

(b) 上部

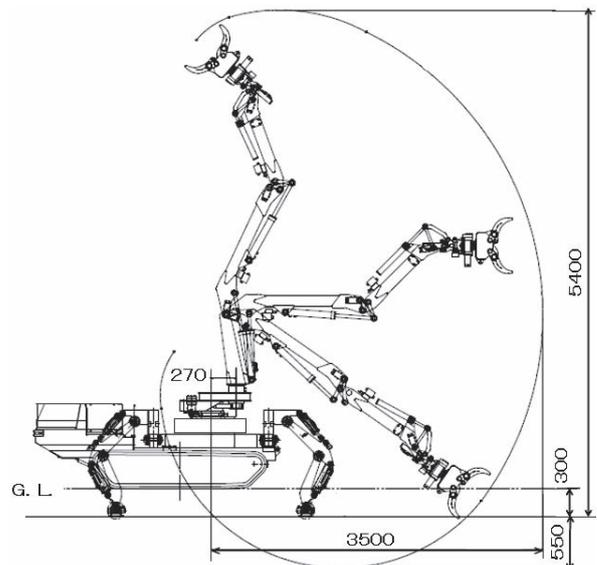
手	4自由度（把持開閉，手首捻り，手首左右，手首チルト）× 2本 油圧シリンダ駆動 グラブ最大開き幅 550 mm
腕	3自由度（肘上下，肩上下，肩旋回）× 2本 油圧シリンダ駆動
腰	1自由度（旋回） 油圧モーター駆動
把持重量	片腕 各 100 kg（全域）

(c) 下部

脚	3自由度（股関節左右，前後，膝）× 4本 油圧シリンダ駆動
歩行速度	150 m/h
※走行速度	クローラ 0～7.2 km/h
※エンジン	3気筒水冷ディーゼルエンジン
※走行体は他社製	

(d) 作業範囲（図一2に示す）

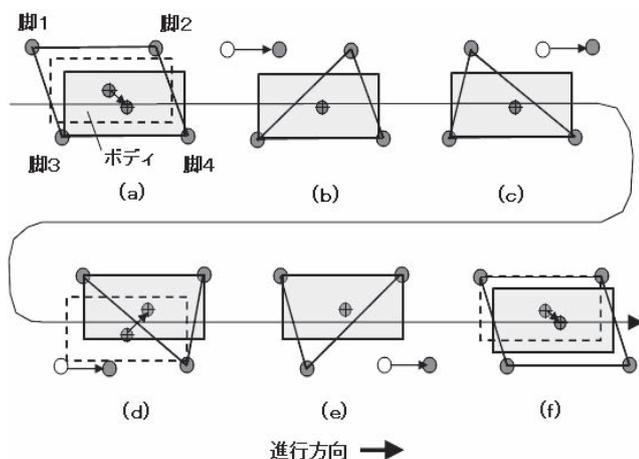
到達高さ	5.4 m
作業半径	3.5 m



図一2 作業範囲図（単位：mm）

(2) 歩容方式

本ロボットは総重量 2.7 トンと大型なため、安定的な移動を実現できる静歩行とし、**図一三**に示す重心移動と運脚を交互に繰り返して歩行する間歇クローラ歩容を採用した。まず (a) でボディ重心を 3 本の支持脚が構成する 3 角形内に移動する。(b) で遊脚 (脚 1) を前方に運び接地する。(c) (d) (e) に示すように脚 2 から脚 4 へと同様の動作を繰り返し、(f) で初期状態に戻る。前後を左右に置き換える事で、横方向にカニ歩きする事ができる。歩行時にボディを重心移動するための左右の動きを少なくするために歩行姿勢での重心位置は 4 脚のほぼ中心に配置した。



図一三 間歇クローラ歩容

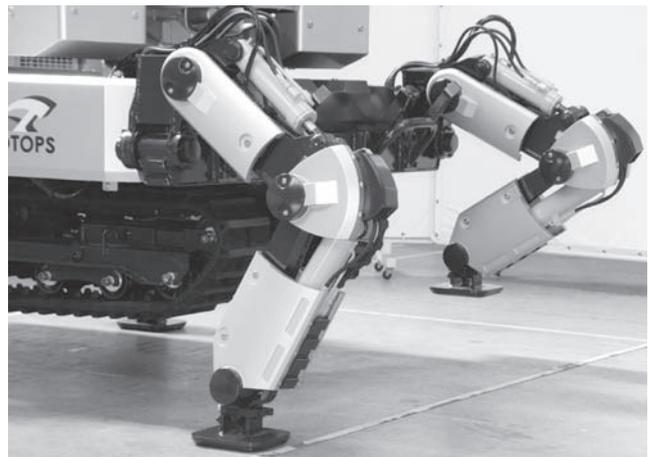
(3) 災害復旧支援用途としての工夫

災害復旧支援を想定し、従来に無い機能を付加したので特徴的な部分を次に説明する。

(a) 走行～歩行～作業支持

脚部には①移動、②作業時の安定確保の 2 つの機能を持たせ 4 足とした。災害現場のさまざまなフィールドで活躍するためにはまず多様な路面に対応しアプローチできる移動能力が必須となる。クローラ走行と 4 足歩行の各々の長所を組合せ、あらゆる路面に対応できる移動体を目指した。つまり傾斜地、泥濘地などの連続路面はクローラの低面圧と走行性を生かし、クローラが不得手とする凸凹、瓦礫、溝など不連続路面を 4 足歩行に任せ、状況に応じてクローラ走行と 4 足歩行を選択する方式とした。それぞれに対応路面を特化する事により、4 足歩行は移動速度よりも踏破性向上を優先する事ができる。4 足のメリットは足先をピンポイントで下ろせる所にもある。被災者を避けての歩行や、崩れやすい瓦礫を避けながら移動する事ができる。今回共同研究した大学からの提案もあり、**写真一三**に示す動物に似た関節方式を初めて採用した。

この結果、4 足歩行は前後進、左右転回はもとより真横へのカニ歩きも可能になった。従来の建設機械では難しかった横移動は当初想定した以上の動きで、踏破性と合わせて様々な現場への状況に対応できる可能性を上げた。このロボットの最大の特徴は 4 足で歩行し現場に着いた後、4 足を油圧ロックする事で上部体の支持脚となり重作業時の安定を確保する所にある。作業時の反力を十分支えられる地盤、崩れにくい箇所足を設置し、さらに上部体を水平にレベリングする事で、より安全で安定した作業が可能となる。



写真一三 歩行脚

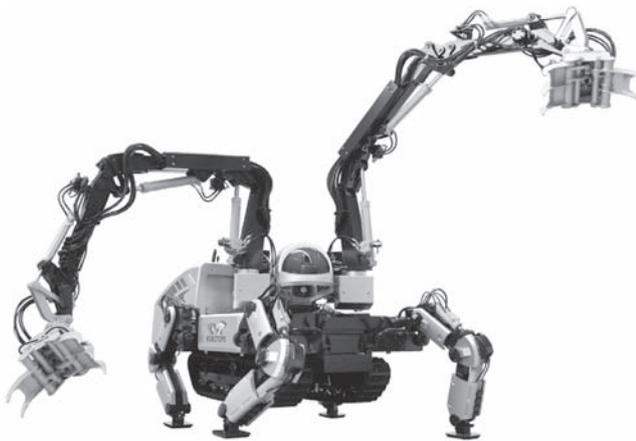
(b) 双腕

産業用ロボットや建設機械でも最近双腕の機械が見られるようになった。災害現場のような狭いスペースで 2 台分の作業ができるだけでも、より災害復旧支援機に近づいたといえる。双腕にする主目的は単腕では難しい複雑な作業を左右のアームが協調してこなせる所にある。例えば片方の腕で固定し、もう一方の腕で曲げる、除去する等の作業である。さらに、ROBOTOPS では、**写真一四**に示すように双腕の肘部を従来のクレーンではできない上向きまで可動範囲を広げ、自機の真上の作業も可能にした。これにより、倒壊しかけた建物や瓦礫の崩落を支え救出スペースを確保しながら他方の腕で被災者周辺の障害物を取り除く作業などもできるのではと考えている。また、将来は左右の腕を協調させ双腕を一对の大型グラップルとして機能させる事により、嵩物を抱え上げて動かす動作や、一旦抱えた把持物を機体上に預ける、運搬する事なども想定している。

写真一四に 4 足で踏ん張り、双腕を使用した時の作業姿勢を示す。4 足を移動式クレーンのようにアウトリガー (安定支持脚) として機能させる事で傾斜地、段差地での上部双腕作業は格段に安定する。これは従



写真一三 双腕上向き姿勢



写真一四 「ROBOTOPS」作業姿勢

来機に無い機能で、現在人手に頼っている被災者救出時の重量物ハンドリング作業を機械に置き換えていけるのではと考えている。

(c) 操作装置

操作者が被災地で二次災害を受けるリスクを軽減するため遠隔操作のみとした。写真一五に示すように操作はコブラ型4軸ジョイスティック2本で上部2腕と下部4足の操作を可能にした。また、作業場所から離れて操作することを想定し機体中央頭部に当たる部分に全体監視用、左右のグリップ中心には把持物捕捉用の合計3台のカメラを装備した。操作者は操作ボックスモニターの3画面のカメラ画像を見ながら把持物を全景、正面、横からと3次元的に捉え操作する。また、モニターにはロボットの状態をCG画像でリアルタイムにシミュレーション表示し、離れた所から自機の動作状況を確認する事もできる。カメラ画像とCG画像は適宜切り替えて使用する。



写真一五 操作装置とカメラ画像

4. 今後の課題

(1) 踏破性の改善

前述したように、災害救出支援ロボットで最優先される機能は多様な災害現場にアプローチできる4足歩行の踏破性であると考えている。今回前後・左右転回・横歩きと全方向への歩行が可能となり移動性に関しては従来機から進化したが、路面の状況に応じた踏破能力はかなり限定的であり実用面から見ると未だ改良の余地は大きい。今後踏破能力を高めるためには路面の凹凸や障害物などの外界センシング技術、足先を着地点に正確に下ろす動作・位置制御技術、制御値を正確かつ円滑に実行する油圧駆動技術、さらには乗り越え段差に応じた可動範囲の確保と足首など機構部分の路面状況への適合が求められる。

(2) 作業性の向上

4足には作業機の移動と作業の安定を確保するという相反する二つの機能が要求される。段差越えなどの踏破性を改善するために関節の可動範囲やストロークを増やす事は、結果的に安定幅を上げたり作業機の上部を水平に保つ機能も向上する。一方、双腕には作業現場に適合できる多様性が望まれる。まずは現在の建設機械のように災害の種類、把持物に合わせて先端のグリップを交換することで対応する。左右の腕を協調制御し把持物の形状により柔軟に対応することは前述した通りである。将来はグリップの自由度を増すことにより掴み機能を進化させ、レスキュー隊員が手動工具を使うように、より大型の手動工具をロボットがグリップを手として使うようになればスピーディで効率的な作業が可能になると考えられる。

(3) 人と協調, 親和

踏破性と作業性の進化に合わせて災害救出支援機に要求されるのはいかに人との共同作業が可能かという点だ。作業機械は被災者のみならず救助者をも傷つける事があるとはならない。そのためには、作業現場周囲の被災者位置情報の入手に基づいた人に優しい制御, 駆動システムが望まれる。被災者探索情報により瓦礫処理作業では作動範囲を制限したり, 救出作業においてはグラップルの力を制御することも必要となるだろう。人と接する部分の機構は油圧, 空圧, 電動とそれぞれの特徴を活かした複合システムになる可能性も大きい。

5. おわりに

世界各地で大規模災害が発生し, その度に悲惨な光景を目の当たりにする。にもかかわらず, 救出支援ロボット開発のテンポは遅く, 現段階では未だ実用レベルには至っていない。そこには, 純技術的な課題があるが, これは開発に着手さえできれば技術革新の目覚ましい今日, 時間が有る程度解決してくれるだろう。それよりも, 開発を阻害しているのは企業活動に起因すると考えられる。最近, 企業が採算性の問題でロボット事業から撤退を余儀なくされる事例をよく耳にする。ただ歩行するだけでは付加価値を生まず, 商品には成りえない。救出作業を支援できる専用ロボットを新たに開発するには多大な費用と長期間を必要とす

る。商品としての費用対効果を想定できない事が民間企業にとって開発をためらわせる足かせとなる。

しかしながら将来, 建設機械もロボット化が進み人に頼っている作業のかなりな部分が機械にとって代わる時代が来ると予測している。前述したようにそれに必要な新技術はロボット技術と共通するものが多い。今回, 企業歴史の節目ということもあり, 保有技術を4足双腕ロボットという形で他に先駆けて報告する機会を得た。一企業が継続して進めるには難しいテーマではあるが, これで滞る事無く建設機械メーカーとして災害復旧支援機の実用化を目指し次のステップを模索していくべきと考えている。それが延いては今後建設機械をさらに安全で効率的な機械に進化させていき, 合わせて災害復旧支援機をより現実へ引き寄せるものと確信している。

JICMA

《参考文献》

- 1) 空気圧駆動型4脚移動ロボットの開発: 趙子磊 則次俊郎 高岩昌弘 佐々木大輔 (岡山大)

【筆者紹介】

片山 周二 (かたやま しゅうじ)
 (株)タダノ
 技術研究所
 所長

