建設工事用ロボットの現状と将来

Present states and future prospects of robots for construction works in Japan

三 谷

たけし
健*

1. はじめに

昭和の初年頃、今から50年ぐらい前には当時私ども少年の間で人気のあった雑誌に少年クラブというのがあった。

夢多き少年にますます夢をもたせるような空想漫画や空想小説がのっていた。当時私どもの心をゆすぶったものが、月世界旅行であり、ロボットであり、殺人光線であった。

このときおぼえた言葉にロケット、レーザー、頭脳をもったロボットというものがある。

当時はまさに夢のまた夢という感じで子供心にまさかこんなものはいくら科学が進歩しても実現などするわけはないと思っていたものだ。

しかしどうです今日これらはまさに実現されて、当時の子供が本当に夢物語と信じていたものが現実となって来ている。当時の胸おどらせた心を思い返すと、まさに感無量である。

ロボットもその中の一つで、人間と同じに口をきき、人間の手足のように運動をする機械などまさかという思いでありながら、一方でそんなものが出来たらすばらしいなどと思った。

今日の日本は世界の先進国の中でのロボット王国とさえいわれるようになって来た。

最近ロボット展示会を一回りして来てつくづく子供の頃の夢を思い起こしながらどの機械の前でも感服するばかりであった。

ロボット化の進展はまさにあっという間に、あれよあれよと眼を見張るうちにひろがっていった。

現在はいわゆる工作機械を中心とした産業用ロボットが最も進歩しており、かつその数も利用範囲も広い。

一方わが土木工業界では皆がこの傾向に遅れまいと最近特に建設工事のロボット化が叫ばれ、一種の流行となっている。

流行に弱いのは土木屋のつねで、NATM と言えばだれもがそれNATM、NATM以外はトンネル工法でないみたいに言い出す人が多くなっている。

しかし何も今さらあらたまってロボット化とさわがなくても我々土木の世界では、戦後いち早くロボット化に取り組んで大いに進んでいる分野の一つと言える。

戦後間もなく我々の先輩が建設工事の機械化を進めて来たが、これこそロボット化の第一歩と考えてよい。ただ機械化という言葉を使ったのでロボット化と言わないだけである。

私がロボットという最も良い例はパワーショベルに表れている。ショベルのバケットの操作は明らかに一種の Manipulator そのものであり、操作室から遠隔操作で自由に土を掘削、積込みするという作業をしているのである。このように他の機械も多かれ少なかれ一種のロボットと言って差し支えない。

工業技術院で設定した「産業ロボット」の定義は「人間が操作しようが、自動制御装置により操作しようが、何らかの操作方法によって、三次元空間において多様な動作を行うことができる機能を有するもの」とされている。この定義に従えばまさに上述のような建設機械の大部分は一種のロボットと言って差し支えない。

ただ最近急速に普及して来た産業用ロボットの大部分は我々土木でも使っているマニピュレーターとほとんど機構的には変わらないが、その大部分が最新のエレクトロニクスの機器を利用してほとんど無人化している点が今までの我々の建設機械と少し相違する点であろう。

2. 建設工事ロボット化の現状

前節でのべたように建設工事で使われている建設機械は明らかに一種のロボットと考えてよい。

しかし最新のメカトロニクス利用の無人、自動化されたものは比較的少ない。

一般に現在製造工業の工場内で盛んに利用されている産業用ロボットをそのまま建設工事に持ち込んで利用することはいまのところ非常に困難である。

その理由としては、私が最近調べた結果では現段階では Manipulator が取り扱える最大荷重は1t以下である。一方土木の分野では数tというオーダーになるのでこの一例から見てもそのままの姿で導入することはむづかしい。

さらに現在工場内で広く採用され始めているロボットの使用条件の特徴は次のように考えられる。

- 1) 製品の原料は寸法、品質が規格化されて統一されているものを使っている。
- 2) 出来上る製品もまた規格が統一されている。

*社団法人 日本建設機械化協会副会長

総 説

- 3) 大量生産でその作業工程は一定作業の繰返しが多い。
- 4) 以上のような条件から計画生産がやりやすい。
- 5) ロボットを利用する作業場内の環境，すなわち湿度，温度，粉じん等のロボットの機器類に悪い条件の環境をいつも一定に保つようにコントロールすることが容易である。

これらに反してわが建設工事は上記の条件とほとんど反対と言って良い。それゆえ産業用ロボットをそのままの形で建設工事に利用することがむづかしい。

つぎに建設工事でロボット化がむづかしい点を挙げると

- 1) 建設工事が一般に受注産業であるために計画的に同種の工事を引続き行うということが困難なために多額の初期投資による設備の償却がむづかしい。
- 2) 工事に使用される材料の大部分が一次産品が多く，二次製品である鋼材なども箇所ごとに設計が異なっているために寸法，材質の規格統一したものを繰返し使用することがほとんどない。
- 3) 作業工程が一定作業の単純な繰返しでない。
- 4) 作業が一定の場所で一定作業を繰返し行うことが少ない上に，たえず作業場所が移動している。
- 5) 一般に建設現場での環境条件は現在産業用ロボットなどに利用されている電子部品，とくにセンサー類にとっては非常に苛酷な条件である。自然条件下で作業を行うのが通常であるため悪い気象条件をものに受けるので温度変化，湿度変化，さらには粉じん，衝撃等々あらゆる条件はセンシブルなこれらエレクトロ部品にはやっかいなものばかりである。

以上建設工事が最近の急成長をした産業ロボットにひどく立ち遅れている印象を与えるが，我々の先輩達は相当の努力と実験を重ねて来ている。

殊に建設工事では自然条件等のきびしさから工事にはいつも危険がつきまといっていると言っても過言ではない。これらの危険作業から人間を解放しようという考えは早くからあった。

特に危険作業とされている地下の工事，トンネル，ケーソン基礎等の作業などでは早くから自動化，無人化による危険作業，悪環境下の作業から人間を解放しようという努力がなされて来た。

過去においても建設省が無人操作の潜函を試作して国道22号線の木曾川橋の橋脚基礎工事に実際に使用した。これなどは全く無人，自動化をしたものであって，もっとも利用されてしかるべきものであったが，土木屋の狭い器量から一度使われただけで破棄されてしまった。今ふり返って見ても立派なものと感じている。

また現在自動化，ロボット化を積極的に進めている分野としてはトンネル工事がある。

一部にはほとんど完全に近い自動化が行われているもので日本で開発されて各国からも注目されている泥水シール

ド機械などはその代表と言っても良い。

一方山岳トンネル工事でも既に実用化に近いまでになっているものとして，削孔パターンを記憶させて自動的に削孔を行う無人自動化のドリルジャンボなどもあり，さらにロボット吹付け機は盛んに実用に供されつつある。

これらはいずれもその第一歩を踏み出したにすぎず，これらが本当に活躍するためにはいまだいろいろな問題を解決しなければならない。

他方基礎工事の一種である，場所打ち杭，地中連続壁等の仕事はまさに飛躍的に進歩して，人間が危険な地中にもぐり込んで作業をせず，地上から機械操作でどんどん出来るようになって来ている。これらも一種のロボット化であり，自動化と考えて良い。

かつては径3mぐらいの地中杭などの基礎工法にとっては人間が中に入って掘削した後，鉄筋入りコンクリートを打っていた。径3mで深さ70m以上までの場所打ち杭を本四連絡橋の工事の番ノ州の埋立地で本工事に先立って現場実験を行い，世界でも初めての大口径大深度の場所打ち杭の工事に成功した。

その結果に基づいて最近では実際の番ノ州高架橋の橋脚の基礎として全面的に採用し，盛んに施工中である。

これなども従来ではとても70mの地下まで人間が入って掘削することなど考えられず，すべて地上から掘削，ずり上げ，鉄筋建込み，コンクリート打設とほとんど地上からの操作ですんでいるので一種の無人化に近い仕事になったとも言える。

また最近全国的に広く施工されている地中連続壁の工事も上記の場所打ち杭を平面的に長い壁を作ることを目的として機械が開発され，少なくとも地中に所要の厚さの鉄筋コンクリート壁を作るまでは人は地上からの作業のみですむようになって来た。

そして完全にそれらの壁で囲まれた中を機械で掘削して，安全な状態になって初めて人がその中に入って作業出来るようになって来ている。

いずれにせよ地下構造物としての基礎工事は地下に人間が入らなくても仕事出来る部分が非常に大きくひろがり，安全の確保に役立っている。

最近では横浜港内に作られるベイブリッジの基礎のうち水中でケーソンの中掘りをするのに，三浦層群の土丹の中に根入れするための水中軟石掘削機も開発され，掘削中の状態は操作室に備えられたディスプレイによって示され，それをもとに遠隔操作を行ってこれもまた実際の現場での実験工事で成功している。

以上は最もロボット化，自動化にとって条件の悪いところでかえって土木の分野では，その必要性の高いために多くの試みがなされて来て一部は既に実用化されている例と考えて良い。

ただいずれも最新のメカトロニクスと言われている高

度の電子技術による自動化、無人化とは大分ちがっていて、まだこれらの最新の電子機器やセンサー類を縦横に駆使してのロボット化という点ではいまだしの感が深い。

ただし土工機械の中のブルドーザー、トラクターショベル、パワーショベルの類では既に完全に電子機器を利用し、無線操作で遠隔操縦による無人化が行われている。

特にブルドーザーの無人化されたものは製鉄所のノロの処理ないしは、危険な崩壊後の崩土の取除きなどにその偉力を発揮している。同様にトラクターショベル、パワーショベルでもそのような作業では偉力を発揮している。

しかし従来人間が操縦して自由自在に使いこなしているようなあらゆる土工作業に縦横に活躍するというわけにはゆかない。

それらの理由としては初めにのべたような条件のためである。

なおこのほかにも既に感度の高いセンサー類を用いて自動化している建設機械は比較的早くから使われて来ている。その例としては舗装工事用のコンクリートフィニッシャーのうちのスリップフォームペーパーであろう。これにはあらかじめ基準になるピアノ線を設置しておいて、その線にそってセンサーを走らせることによって仕上り表面を規定の面にコントロールする方式で、現在では大部分が自動化されている最もいい例であろう。

我々が関係する仕事の中で最も無人化、自動化が要求されるのは、前述の地下の工事のような危険作業ないしは環境劣悪な工事であるが、これら以上に海中なり海底なりの工事はその要求度はもっと高いと言って良い。

現在では潜水の技術およびその器具ともに非常に進歩して潜水夫の特に熟練した高度の技術をもったものは水深50m以上で100mぐらいまで潜ることは出来る。しかしこれらの人が作業出来る時間はごくわずかな時間に限られるので工事に本当に従事することは非常にむづかしい。

最近でも事故死した例も多く、ますます大水深での作業が要求されるとなるとほとんど人では不可能に近くなる。加えて潮流のある場合はその危険度は計り知れない。

このため調査用として潜水球、潜水艇でマニピュレーターをもったものなども作られ、さらには本四公団の海中工事のために海底作業用のロボットも作られたが、実用に十分たえるまでには至らなかった。

しかし海底での掘削作業等は早くから大深度まで掘削する技術は開発されており、その最もいい例としては石油掘削であろう。リグ上に掘削機を据えて、海上から海底下1000m以上の深さまでも自由に掘れる。

本四公団では橋梁の塔、橋脚の基礎は非常に大きな荷重となるので海底岩盤を相当深く、しかも広く掘る必要があり、このため SEP (Self Elevating Platform) を海底に据えて、海底下35mぐらいの掘削孔を約200本も行い、かつ水中での発破を一部では電磁誘導起爆で完全に遠隔操作

による起爆を行った。

このように建設工事の現場でも無線誘導装置等もとり入れて、無人化、自動化、遠隔操作への多くの試みが行われている。

以上はざっと現在の建設工事でのロボット化というか、自動化、無人化等を含む遠隔操作などについて見て来た。

上述のとおりそれぞれの工事の分野で種々の試みが行われて、真剣に取り組み来ているが、何分にも前にのべたとおり工場内での作業条件に比較して非常に苛酷な自然条件下で使われることが多いので、現在広く利用されているエレクトロニクス関係の機器を縦横に組み込んで自動化に使いこなすという域には達していない。

3. 建設工事でのロボット化の将来

前述のとおり現在までに広く開発され、利用されているエレクトロニクス機器は苛酷な自然条件を考えてまで開発されたものは非常に少ない。

このために我々の建設工事ではそれらが十分に使われるという段階には至っていない。

しかし一方では建設工事での各作業は他の業種に比較して作業環境も一般に悪く、かつ危険度が高い。

さらに今までより以上に大規模な新しい工事などが考えられるに従って、作業の困難性、危険性はますます大きくなる可能性がある。

例えば今後計画されている本四架橋のうちの明石大橋などは、今建設中の南北備讃瀬戸大橋の基礎よりはるかにきびしい条件で、しかもその規模は大変大きなものとなり、現在供用されているイギリスのハンバー橋はそのスパンが1410m という長いものであるが、これをはるかにこえる長大スパンの吊橋となるはずである。しかもその基礎は水深も50m近くでしかも潮流も10ノット近くで、その上海底下なお50m前後の掘削を要することが予想されている。これらの条件を考えればますます工事の大部分をすべての面で無人化、自動化をはからなければならないと考えられる。

ただその厳しい自然条件に耐えうる機器類を日本の既にトップをいっているエレクトロニクスの機器としてさらに改良されて利用しうるものを開発してもらうことを望むものである。

いずれにせよ建設工事における自動化・無人化はある意味から言うと他の産業よりそのニーズは高いともいえる。

悪い環境下での作業、危険な作業からの人間の解放ということはますますその要求が強くなるものと考えられる。

今後建設工事でのロボット化に必要な条件としては、前にも少しふれたが、エレクトロニクス機器の改良にたよるだけでなく、根本的には建設工事の各作業の個々のロボット化ではその進歩がおぼつかない。

例えば現在でも個々の作業で最もロボット化が進んでい

総 説

と思われるトンネル工事をとって見ても、たしかに無人、自動の削岩機ないしはジャンボが作られている。しかしこれだけが自動化されても全体のトンネル工事へのその貢献度はそれ程高くない。

それ以後の作業の火薬の各孔への装てん、結線等の自動化が伴わなければ片手落ちとも言える。

さらに吹付け機のロボット化は早くから行われているが、例えば花崗岩のような岩では発破によって掘削した場合現在のような削孔、発破の方法、パターンでは凹凸がはげしく、せつかくロボット化しても一様に吹き付ければでこぼこのまま仕上ってしまい、表面をスムーズに仕上げようとすれば高い吹付け用コンクリートを凹部には大量に吹付けざるを得ないことになり、いずれにしても不経済なものとなる。

これらを考えるとトンネル工事の設計から施工までを一貫した作業システムとしてとらえて、それらの相互の関連でロボット化、自動化、無人化を考えなければならない。

最も望ましい姿はトンネルボーリングマシンで掘削を行って、平滑な掘削面を作り、それにロボット吹付け機で吹付けければ均等な厚さでかつ平らな表面となり、経済的でもある。

さらに発破を使うとすれば平行削孔をしてでこぼこを少なくするようにする等の工夫が必要であり、そのためには断面の統一化等によってジャンボの転用を容易にして十分経済的にひき合うようにする等の配慮が必要である。以上は単なる一例であるが、設計上で工事全体を統一化、規格化する等の配慮をすることが必要である。機械化の際にもよくいわれたことであるが、自動化については特にその必要性が高いと言える。

また一方では既に一部で自動化されているブルドーザー、ショベル等も更に高度の自動化がのぞまれる。

例えばブルドーザー、ショベル等では対象の地盤は非常に軟らかいものから岩石に至る広い範囲のものを相手とする。このために機械にかかる力もたえず変化すると考えてもよい。

これらの反力に応じたパワーを出すようにコントロール出来れば非常に経済的な施工が出来るので、例えば反力をすばやくとらえてこれを電気信号等でエンジンの回転力にフィードバックするような自動化は我々の前々からの夢と言っても良い。

もっともこのようなセンサーが簡単に利用出来るとすれ

ば、現在あるブルドーザー、ショベルで人間が操作するにしても大変有効であろう。

同じようなことは岩石の立坑の掘削機ないしはトンネルの掘削機のようなものでも、相手の岩の硬さがすぐに手もとにフィードバックされるようなセンサーがあればまことに効率よく作業が出来ることになる。

さらに飛躍をした夢のようなものとしては、我々がもっとも以前から関心をもっているもので、既に一般工場内では利用されている薄板鋼版の7mmぐらいまできれいに切れるレーザービーム等があるが、土木の世界で使われるような厚板まで切れるようなものがあると自動化をするのに非常に助かるものと思われる。

またかつてアメリカの大学で実験されたようであるが、Nuclearによる岩の掘削では、岩そのものを溶かしてその後を冷しながら進めば、岩石の溶解したものがそのまま固まってライニングをしないでも立派な硬い内装が自然に出来て行くようなものも、無人で自動化すれば十分実用にも使えるのではないだろうか。

また軟弱地盤の処理にも最近は大深度まで処理出来るいろいろな工法が開発されて来たが、これらに使われる改良材の補給などもほとんど自動化されているが、システム全体としてもっと高度の自動化がのぞまれる。

いずれにせよ今後の我々建設工事に携わる技術者としてはロボット化の必要を痛感しているのであるから、上に例示したようにどのようにして我々の工事をシステムとしてとらえて、その各作業を分析し、全体として調和のとれた姿でメカトロニクスをとり入れてロボット化することが大切であろう。

特に今後大きく開発されるであろう視覚センサー、触覚、重量センサー、さらには人工頭脳の利用などのセンサー類をどしどし取り入れるために、これらのセンサー類を我々建設工事にも耐えるような耐久性のある、しかも重作業、悪条件に耐えるように改良すべく電子関係技術者の協力を得て共同開発すべき時代に来ていると思われる。

やがて我々建設技術者が月にあるいは宇宙に基地を作るとなれば、やはりそこでの建設事業に耐える技術者になるためにはメカトロニクスに強くなる必要はますます求められるであろう。

いずれにせよ未来の土木技術の大きな研究課題として調和のとれたロボット化を強くのぞみたい。

(原稿受理 1983.10.3)