

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3055号



土木研究所資料

建設ロボットの現状調査報告（その1）

平成4年3月

建設省土木研究所
機械施工部機械研究室

Copyright © (1992) by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

建設ロボットの現状調査報告

(その1)

機械研究室	室長	杉山	篤之
	研究員	野村	正司
	研究員	高津	知洋
	研究員	梶田	英規
		竹田	之樹
		山田	中樹
		茂木	正晴
		米村	克己

要 旨

現在、建設ロボットと称する施工機械が数多く世に出されているが、それらの建設ロボットに付いて歴史的背景を踏まえて分類整理をし、ビジョン形成をされて得るとは言い難い。

そこで、過去にさかのぼり建設ロボットに付いて用途別に分類整理を行い、建設ロボットのビジョンの整理を行った。

なお、本資料は土木技術資料に連載されたシリーズ「建設ロボット」をベースに構成されている。

キーワード：建設ロボット、歴史、展望

建設ロボットシリーズ



平成4年3月

建設省 土木研究所
機械施工部 機械研究室

建設ロボットシリーズ 目 次

建設ロボット1 (歴史・現状)	野村正之	1
建設ロボット2 (建設ロボットに使われる技術)	高津知司	7
	竹田英之	
建設ロボット3 (土木編1…土工・基礎工・舗装工)	野村正之	14
	米村克己	
建設ロボット4 (土木編2…トンネル工・コンクリート工)	野村正之	21
	竹田英之	
建設ロボット5 (土木編3…その他)	野村正之	27
	山中勇樹	
建設ロボット6 (建築編)	梶田洋規	35
	茂木正晴	
建設ロボット7 (展 望)	野村正之	43

建設ロボット 1（歴史・現状）

1. はじめに

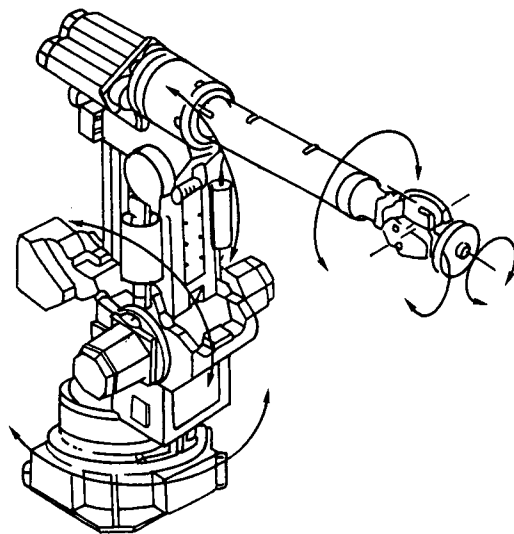
“ロボット”という言葉が使われたのは戯曲の中が最初で、その後、アシモフの提唱によると、ロボットは人間に危害を加えず、人間の命令に従い、人間の存在と矛盾しない限りその存在が確保されるものであるということである。これらは、ロボットの利用活用を考える上で非常に大切にしなければならない視点である。

“ロボット”は解釈がまちまちで、様々な自動化機械もしくはメカトロ機械にロボットの名がつけられている。ある文献によれば、ロボットと呼ばれている機械の1/3がリモートコントロール機、1/3が自動機、残りの1/3が部分的に自動化したものであったという報告もある。ここでは、田中氏の定義を例示し建設ロボットのイメージとしたい。すなわち、測定機器・測量機器・検査機器・記録機器等の工事施工の途上で使用される自動化が進んだ建設工事用機器全体及びメカトロニクス技術を利用した建設機械を建設ロボットのイメージとしてとらえたい。

我が国におけるロボット化は、欧米で開発されたプレイバック式ロボットを輸入したことによりその端緒についたが、生産工場の自動化（Factory Automation）を促進する手段として、その第1期を謳歌したといえるのではないだろうか。即ち、ある程度環境条件が整った閉鎖系に近い工場内で、単品生産工程から組立工程・検査工程さらに物流部門へ次々導入され、生産工程の改善に威力を発揮した（図-1）。続いて、その動きは生産工場の内部にとどまらず、あらゆる産業分野へその適用が図られている。これは、第二ステージを迎えたロボット化の動向といえよう。即ち、1980年代後半には、農業・林業・建設・病院福祉・家庭等の生産工場外へ着実に拡大の方向にある。換言すれば、工場を出たロボットは、個々の人間と対話するために、個々の場に活動のフィールドを拡大しつつあるといえる。特に、建設分野における熱意は高く、建設技術者と建設ロボットが対話しながら作業を進め機械の冷たさを感じさせないような状況を迎えつつあるのではないだろうか。

図-1

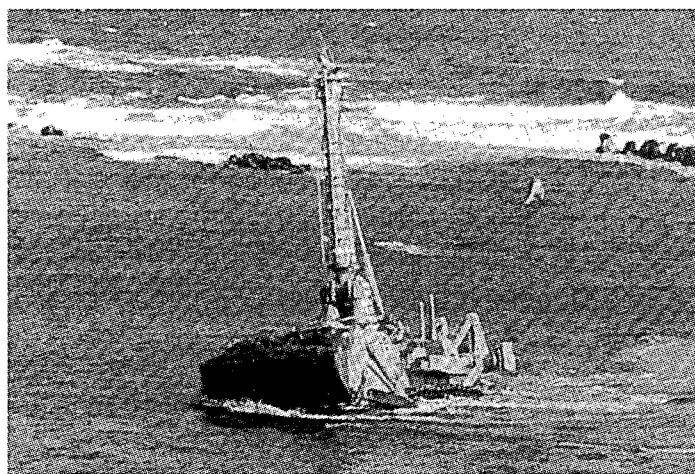
プレイバックロボット



2. 建設自動化・ロボット化の歴史

わが国の建設機械が自動化が始まったのは昭和30年代初頭である。最初に自動化が行われたのはバッチャープラント（コンクリートプラント）で、リレー制御によるインターロック機構を導入したフィードバック制御によるワンマンコントロールを実施している。昭和37年になるとアメリカ合衆国から、舗装の平坦性を確保するためにスクリード自動制御装置付アスファルトフィニッシャーが導入され、東名高速道路の建設に使用された。この時代の制御デバイスは、まだ真空管が中心であった。昭和40年代に入り、制御デバイスのトランジスタ化が始まり、振動や塵埃の多い建設事業の厳しい環境条件に耐える制御装置が入手できるようになり自動化が進んだ。目立ってつくられるようになったのはリモートコントロール機である。リモコンブルドーザ（44年）、水中ブルドーザ（43年写真－1）、リモコンショベル（47年）、水中バックホウ（47年）などが矢継ぎ早に開発されている。当時、建設省が共同開発した無人潜函掘削機は、函内に設けたバックホウを自動運転またはリモートコントロールで稼働させ、掘削土の排出も自動化していた。

オイルショック後建設機械の自動化は一時下火となったが、昭和50年代に入ると工場に産業用ロボットが導入され、省力化・労働生産性の向上に大きな成果をあげたのをうけて、建設機械も自動化・ロボット化に向けた研究開発が活発になった。さらに、ICが開発され集積化が進み制御装置の信頼性が向上し小型化も進展した。昭和50年代当初はリモコン機が主体で、クレーン、ダム用コンクリートバケットの脱着装置のリモコン化が図られている。また、当時の省エネ指向から、色々なアスファルトリサイクルプラントが開発されているが、それらは相当高度に自動化されたものであった。



写真－1 水中ブルドーザー

昭和53年頃からマイコン制御の機械が現れ始める。シフタブルコンベヤ、ダム用コンクリートトランスファーカーの自動運転などがそれで、昭和54年になるとコンピュータ制御を表示した機械が急に増えてくる。例えばコンクリートプラント、地下連続壁掘削機、グラウト機械、NATM用コンクリート吹付機などが挙げられ、また吹付ロボットなどロボットという言葉が用いられ始めたのもこの頃である。

さらに昭和55年には、油圧ジャンボ、コンクリート吹付機、小口径推進機などの全自動化を図った機械が相次いで発表された。これらの機械は全自動といっても、監視員としてのオペレータが必要なものが殆どで、ワンマンコントロールが可能なものを全自動と呼んでいるケースが多い。

昭和56年には、シールドや NATM の施工に当ってのトンネル断面の自動計測装置や杭打機の記録計など計測・記録の自動化も発表されている。

昭和57年は建設機械自動化にとって実り多き年で、より自動化程度の高いコンクリート吹付ロボット、シールド掘進機、ジャンボ、サーフェスリサイクル機械が相次いで発表されると共に新しい機種としては、耐火被覆材吹付ロボット、ローラの自動運転、大深度地中連続壁機械などが挙げられる。また部分的に自動化を図った機械としてはファイングレーダ、ロータリ除雪車、フェースショベル、タワークレーン、ローダ、リモコン機としては、油圧杭引拔機、ホイールローダ、ケーソン内ショベルなどがある。

昭和58年はいわゆるメカトロ機械と呼ばれる機械が急増した年で、すでに発表された機械の第2世代ともいべき改良形機が多く発表されたほか、新しい機種として海底捨石ならしロボット、音声モニタ付コンクリートポンプなどがあり、バックホウ、ケーブルクレーン、アスファルトフィニッシャの自動化も進められ、マイクロコンピュータの利用がより普遍的になった年である。

昭和59年に入ると、専用機の自動化が目立つようになり、人力施工にとって代るという産業ロボットの発想のものが出現する。例えばコンクリートプレーシングクレーン、自動玉掛け外し、壁面目荒し機、重量鉄筋配筋機、傾斜面舗装システムなどである。昭和60年代に入るとこの傾向はますます強くなり、コンクリート床ならしロボット、建物外壁の診断ロボットや外壁舗装ロボットなどが多くの会社から競って発表されている。一方建設機械へのマイクロコンピュータの応用はますます盛んになり、バックホウやローダといった重量機械にも、マイクロコンピュータが一部品として用いられるようになった。シールド掘進機、小口径推進機、地下連続壁掘削機などでもその操作の自動化や計測・計量などにマイコンがごく一般的に用いられるようになった。このほかダム工事の生コンクリートの無人運搬システムや複数クレーンの相互干渉防止といった複数機械の制御にも用いられるようになった。

こうした建設ロボットの導入は、ますます多くの工種工程に拡げられているが、現在までのところ、省力化よりは労働環境の改善、品質の向上といった面のメリットが強調されており、経済的に引合う機械はあまり見当たらない。

3. イメージの変革

ここで、居住性・操作性・安全性の視点より、従来の建設機械から一步踏みだし、イメージの変革が行われロボット化のイメージにつながる例について紹介する。

3. 1 居住性の改善

建設機械の運転席の居住性の改善はこのところ著しく進み、乗用車なみの快適性（アメニティ）を持つものも出始めている。運転席に関する改善項目は非常に多い。対策がとられている機種は油圧ショベル、ホイールローダ、ダンプトラック、ブルドーザ、モータグレーダなどの量産機で、中でも大型機に多い。

最も進んでいるものの一つである大型ブルドーザの運転室を例に見ると、安全対策のための ROPS（ロプス；転倒時防護構造）と一体で標準装備される傾向にあり、勿論エアコンもつけられている。運転室内は外気より少し加圧されていて、外部からのほこりの侵入を防いでいる。運転室は車体にゴムマウントされているので、振動、騒音の伝達が減っており、加えて運転シートもサスペンションシートと呼ばれるショックや振動の吸収性の良いものを用いている。

3. 2 操作性・安全性の向上

熟練オペレータの不足、オペレータの高齢化、女性オペレータの出現などの現象から、機械のイージーオペレーションへの要望がますます高まっている。操作性の向上は安全性にも大きく関与するので、ここではこの二つの項目を合せて述べてみたい。

従来操作性の改善といえば、レバーペダル類の配置、操作力などを人間工学的に研究して改善することが主眼であったが、最近はそれに加えて、操作フィーリングの改善が重要なものとなっている。例えば油圧サーボシステムの採用（油圧ショベル）、コントロールバルブの改良によるファインコントロールの容易化（油圧ショベル、モータグレーダ）、マイコンを使った巻上げ反力感知システムの採用（クレーン）などが行われている。

視野の改善も努力されており、大型ガラス窓の採用（油圧ショベル）、運転席の配置の改善による後方視界確保（大型ブルドーザ）などが行われている。コンソール部分についても、見易さにポイントをおいて表示を簡潔にする改善が行われ、メータより警報表示を重視するようになっている。表示盤は液晶デジタル表示やカラー CRT を用いたものも増えており、単なるモニタリングだけでなく、始業点検、操作手順の指示、故障診断、作業管理できるものもある。

安全性の向上対策としては、ISO 規格の整備が進みその対応としての安全対策が各機種に盛り込まれ一般化している。一部のクレーンでは、オペレータが運転席を離れる時、安全レバーが通路を塞ぐ形となっており、これを除去（レバーを動かす）するためには各操作レバーが中立位置でなければならないというもので、このレバーを動かすことによって、各レバーがロックされる構造となっている。類似のものは油圧ショベル、ホイールローダの一部でも採用されている。

このほか、ステアリングの油圧回路を2重系にしているもの（モータスクレーパ、重ダンプトラック）、電子装置を使った安全対策（例えばクレーンでアウトリガのチェックや複数機の干渉防止・作業範囲の規制装置など）もある。

ミニバックホウを含めたショベルのレバーの操作パターンの統一の問題は、安全上大きな問題である。統一の方向にはあるものの、現在のところは、各機種とも油圧回路の切替えが簡単にできる構造として対応している状況である。

3. 3 デザイン

建設機械の粗野で武骨なイメージを打破るため、以前から工業デザイナーなどによりデザインの変革が試みられてきたが、過酷な使用条件からくる耐久性とのバランスや、受入れる現場の意識もあって、成功例は少なかった。しかし、最近の CCI（Charming Construction Identity：建設事業のイメージアップの

ための統一活動)の一環として、建設機械のデザインを見直す動きがメーカーのみならず使用する現場でも出てきて、新しいデザインの機械が増えている。ニューデザインの一般的傾向としては、全体に曲線を多く使った丸っこい形とパステルカラー、アクセントカラーなどを使った派手な色づかいが挙げられて、特に小型機に多く見られる。これらの小型機は必ずしも建設用に使用されるとは限らないので、ニューデザインについての評価はまちまちといったところであるが、全般的に評判は良いようである。

建設省では平成元年から未来型建設機械(チャーミー建設機械)の検討を行っている。

これは CCI の一環として建設機械のイメージチェンジを図ろうとするもので、現在の機械の使用条件を踏まえたうえで、建設機械の外形デザインだけでなく、居住性、操作性、環境対策なども含めて未来の建設機械のあり方を検討している。学者、マスコミ、デザイナーなどの文化人を含む学識経験者と建設業、メーカーからの技術者とで構成する委員会で検討が行われ、かなりユニークな形の建設機械(バックホウ、ダンプトラック、クレーン、杭打機、コンクリートミキサー車)の提案がなされている(写真-2~写真-6 参照)。

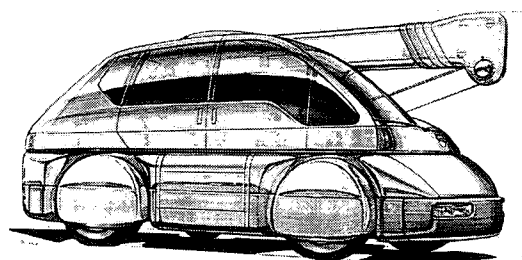


写真-2 チャーミー建機(トラッククレーン)

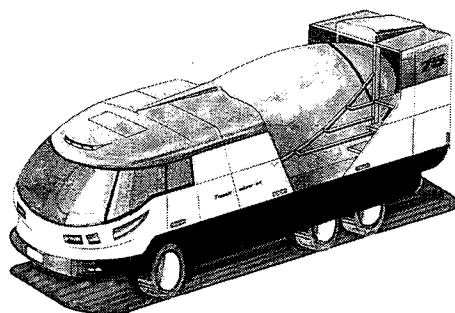


写真-5 チャーミー建機(ダンプトラック)

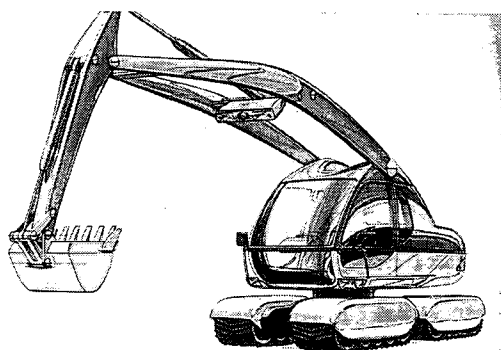


写真-3 チャーミー建機(バックホウ)

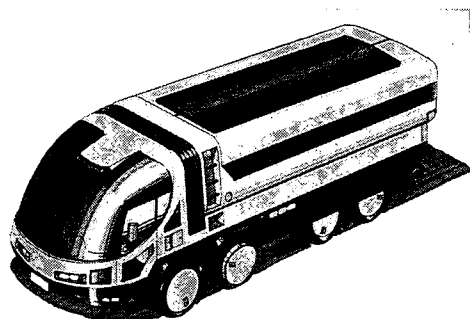


写真-4 チャーミー建機(ダンプトラック)

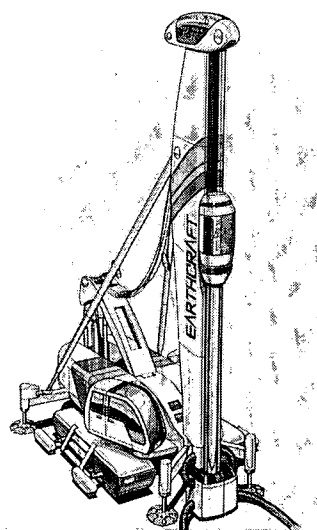


写真-6 チャーミー建機(杭打機)

4. 建設ロボットの現状

現在、多くの機種について自動化が行われているが、油圧バックホウなどの一部を除くと、比較的生産台数が多く、ロボットと呼べる程度に自動化が進んでいる機械は、油圧ジャンボ、コンクリート吹き付け機、コンクリートディストリビュータ、床仕上げロボット等であり、残りの多くは生産台数が少なく、テスト的に使われているケースが多い。

開発機の状況をみると、①オペレータの作業環境の改善では概ね良好である。②能率向上の面では、自主的に開発されている場合は達成されている。③省力化では、作業員の負担軽減に役立っている。一方、問題点として、経済性に引き合わない、施工条件に選択性が強く、稼働現場が少ない、などの課題がある。

次回から5回にわたって、ロボット要素技術と工種別ロボットの概要について紹介していく予定である。

建設ロボット2（建設ロボットに使われる技術）

－システム・制御と情報処理－

1. はじめに

「建設ロボット」と呼ばれるものが世に出て来て日は浅いが，この「建設ロボット」と言う言葉も定着してきたように思います。ところで，「建設ロボット」のみならず一般に「ロボット」と称されるものは機械工学，電子工学，システム制御工学，生産工学等の技術の集約であると言えます。ロボットの本体は機械工学，電装品関係は電子工学，情報処理・制御関係はシステム制御工学，工程の分析関係は生産工学の技術が応用されています。

本シリーズの2回目として，ロボットを構成する技術を日頃土木工学と馴染みが余りないシステム制御工学の分野にターゲットを絞り紹介したいと思います。

2. センサリング

2. 1 センサリングの意味

「計測無くして科学なし」と言われるように，計測すなわちセンサリングは物事を客観的かつ合理的に処理するためには重要な行為です。また，計測は物理現象の定量化であると言えます。ここで言う「定量化」とは，物理現象を要素に持つ集合または集合族から実数という順序集合への写象のことです。（順序集合とは，その要素に2項関係の一つである順序関係が定義された集合のことです。）順序関係が導入された空間で計測を論じることにより，物理現象に順序付けが出来ます。

その順序により，2つの現象を比較することが出来ます。そして，物理現象をセンサリングした値と，予め設定した値とを比較することで，現在の状態を評価することができ，適切なアクションを決定することが出来ます。（図2. 1 参照）

2. 2 センサリングの種類

センサをそのセンシング原理，用途等により接触センサと非接触センサ，内界センサと外界センサおよび受動センサと能動センサに分類できます。

2. 2. 1 接触センサと非接触センサ

実際にものに触れて物理量をセンシングするのが接触センサで，ひずみゲージ等がこれにあたります。それに対して実際にものに触れずに物理量をセンシングするのが非接触センサで，超音波による距離計等がこれにあたります。

接触センサは，実際に対象物に触れてセンシングするので非接触センサより確実な情報が得られるといわれていますが，周囲のものにぶつかったりして力が加わり，破損する恐れがあります。

非接触センサはさらにセンサと対象物の距離から，近接センサと遠距離センサに分類されます。

2. 2. 2 内界センサと外界センサ

シリンダ内圧、傾斜角度、エンジン回転数等の自分の内側の状態をセンシングするものと、フィールド内での位置、フィールドの3次元的形状等の自分の外側の状態をセンシングするものがあります。前者で用いるセンサを内界センサ、後者で用いるものを外界センサと言います。

2. 2. 3 受動センサと能動センサ

対象物からのエネルギーを受け、センシングするものが受動センサで、センサから触角や音波などを出しセンシングするものが能動センサと言います。

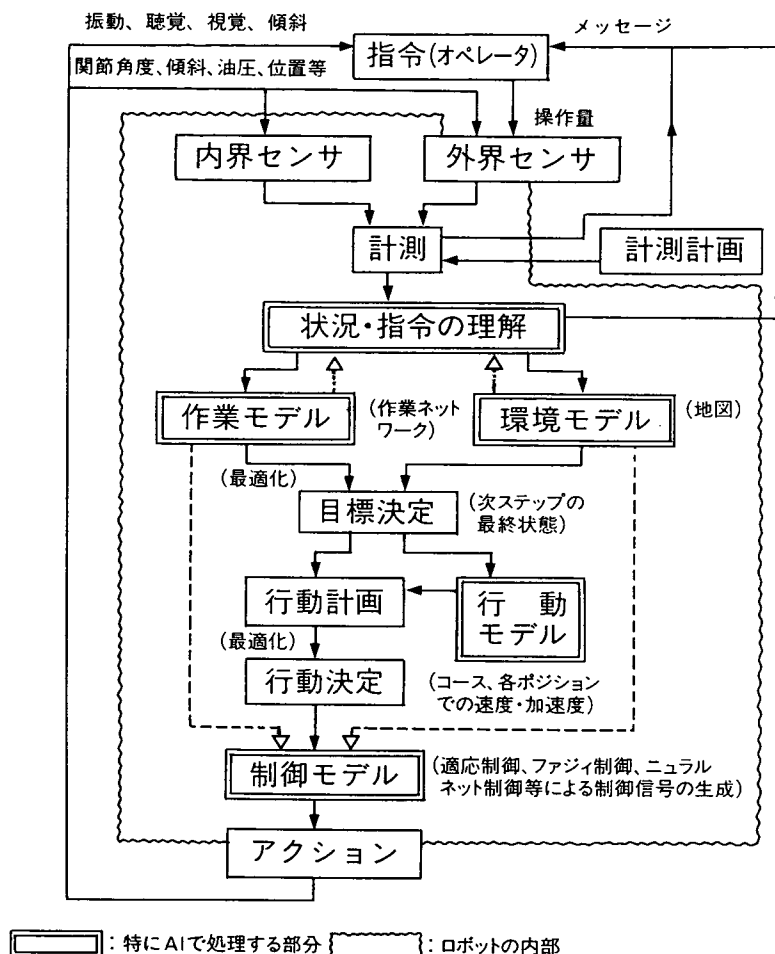


図 2. 1 ロボット化の概念図

3. 情報処理

3. 1 情報処理の意味

情報とは、「あることがらについてのしらせ」(広辞苑)とあるが、この表現では自然科学、特に工学にはなじみません。

情報が自然科学になじみ易い形で話題になりだしたのは、1948年の Shannon による “Mathematical Theory of Communication” からです。この理論は、「Shannon の情報理論」と呼ばれ、一つの学問体系をなしています。

Shannon は、情報を通信系と関係づけて、その特性を明確にしています。

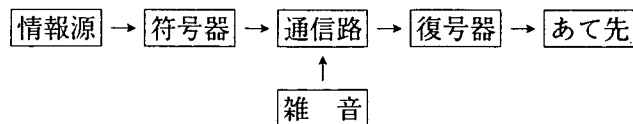


図 3. 1 Shannon の通信系モデル

Shannon は、情報を確率的概念を用いて、情報源と通報によって定義づけています。

3. 2 情報処理の種類

情報処理とは、基本的に雑音に埋もれている信号を取り出す行為です。情報は基本的に確率で定義されているので、情報源の確率密度関数をいじくる方法が一般的です。その方法に最小自乗法と最尤法との組み合わせがあるがあります。具体的な情報処理には以下のようなものがあります。

①算術平均

モデルとデータの差が正規型確率分布であると仮定の基で最大尤度を計算すると、算術平均が得られる。同じ計測を数回行い、その数値の平均を取ることで雑音を除去する方法です。

②ウィナーフィルタ

通信工学で用いられるフィルタリング理論により構成されるもので、過去のデータに重み付けをしそれらを積分することで雑音を除去するものです。ウィナーフィルタにおいては、過去のデータを蓄積しておく必要があります。これは、将来的にロボットの群制御を行うときの情報通信系に応用されます。

③カルマンフィルタ

カルマン（第1回京都賞受賞者）が1961年に提唱したフィルタリング理論で、この理論によりアポロ計画が成功したと言われています。カルマンの理論においては、情報の性質を記述する微分方程式が必要です。微分方程式を利用するので、ウィナーフィルタのように過去のデータを蓄積しておく必要がありません。

4. システム制御

4. 1 システム制御の意味

システム制御は、物理現象を希望とする状態にする事を目的とし、基本的にはフィードバック制御です。

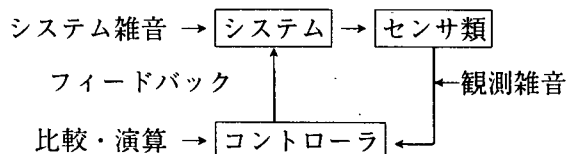


図 4. 1 システム制御の概念図

最近、「予測制御」や「フィードフォワード制御」等の新語が使われ始めていますが、「フィードバック制御」とは、計測データの時間より制御信号の時間が遅い制御なので、過去のデータから制御対象の未来の状態を予測し制御を行う「予測制御」や「フィードフォワード制御」も計測データと制御信号との時間関係が「フィードバック制御」と同じで、基本的には制御といえば「フィードバック制御」と考えてよいと言えます。

4. 2 システム制御の種類

オーソドックスなシステム制御の手法として以下のものがあります。

4. 2. 1 PID 制御

目標値と計測値との差とその微分値と積分値にウェイトをかけて制御信号を算出する方法です。簡単なシリンダストローク長の制御に用いられています。また、積分値を考慮しない場合を PI 制御と呼んでいます。

4. 2. 2 最適制御

どのような状態で制御が行われたら良いかを評価する評価関数を決め、その評価関数が最小もしくは最大になるように制御信号を算出する方法です。

一般に、評価関数は目標値と計測値の差と、制御に使われるエネルギーとの和で与えられています。この最適制御においては、システムダイナミクスとパラメータが既知である必要があります。

4. 2. 3 適応制御

最適制御において、システムパラメータが未知の場合に用いる方法で、パラメータ同定と最適制御を同時に行うものです。建設機械への応用として、小口径推進工法への適用性を機械研究室で考察しました。

5. 人工知能

人工知能 (AI) 研究が正式に始まったのは、1956年に行われたダートマス会議です。その後、AI 研究は知能活動をシミュレーションして知能のメカニズムを解明する純科学的な方向と、知的機能をコンピュータに持たせる事で、計画、制御等の種々の問題を解決しようとする工学的な方向に分離しました。

工学的な研究では、1961年にカリフォルニア大学の Zadeh の提唱に始まるファジィ、1965年にスタンフォード大学の Feigenbaum によって開発された化学構造式同定システム DENDRAL に始まるエキスパートシステム、1967年に東京大学の甘利によって学習方法概念が提唱された階層型ニューラルネットワークに代表されるニューロコンピュータ等があります。

5. 1 人工知能の意味

AI は、人工知能 (Artificial Intelligence) の略であり、人間の知能機能 (問題解決、推論、学習など) を模倣した、コンピュータ技術全般を言います。特に、エキスパートシステムを AI と呼んでいた時期がありましたが、現在ではエキスパートシステム、ファジィ、ニューロコンピュータ等を総称して AI と呼んでいます。

5. 2 人工知能の種類

5. 2. 1 ファジィの定義と特徴

ファジィ (Fuzzy) とは「曖昧」という意味です。ファジィ理論では、自然界の現象を「YES」か「NO」で表すのではなく、「どちらかと言えばYES」とか「かなりNO」のように人間の感覚に近い表現をし、推論や制御を行います。

5. 2. 2 ニューロの定義と特徴

ニューロとは、人間の脳細胞の事です。ニューロコンピュータは特に小脳の細胞をハード的またはソフト的に模倣し、情報を処理するコンピュータの事です。一般的にニューロコンピュータと言えば、学習機能を持ったニューラルネットワークのことを言います。

5. 3 AIの要素技術

AIの要素技術として、ハードに関するものとソフトに関するものがあります。

5. 3. 1 ハードに関するもの

①ファジィチップ

ファジィの演算を高速で行う専用IC。現在商品化され、パーソナルコンピュータとの接続も可能です。

②ニューロチップ

光素子を用いてニューロを模倣し、それを自由に配線できるようにしたICの事です。一部商品化されていますが、まだ研究段階です。

5. 3. 2 ソフトに関するもの

①エキスパートシェル

エキスパートシステムにおける「知識ベース」と「推論機構」をモジュール化したソフトウェアパッケージで、数多く商品化されています。

②ファジィエンジン

ファジィ演算をソフトウェアで実現したもので、演算速度はファジィチップには及びませんが、十分実用に耐えています。現在「ファジィ」と称するものの多くはこのファジィエンジンが組み込まれています。

③ニューロシミュレータ

ニューロをシミュレートするソフトで、階層ニューラルネットワークのシミュレータを始め多くの種類のものが市販されています。

5. 4 産業界における使用例

5. 4. 1 ファジィに関して

その工学的応用が始められたのは1974年にロンドン大学の Mamdani のスチームエンジンの制御の実験に始まりデンマークの F.L.Smidt 社のセメントキルンの制御ではじめて実用化されました。日本におけるファジィの応用は、1984年の地下鉄運転システムに始まり、現在では管渠の推進機械の方向制御システム（官民連帯共同研究「小口径管渠掘進制御システムの開発」の成果）を始め、洗濯機、掃除機等の電化製品にも用いられるようになってきています。

5. 4. 2 ニューロに関して

音声認識、ポートフォリオシステム等の開発がなされていますが、そのほとんどが研究段階です。実用例は、電化製品のファジィルールを、予め与えられた入力信号で希望とする出力が得られる様に自動的に決定する段階で応用されている程度です。

5. 4. 3 エキスパートシステムに関して

橋梁設計支援システム等が提唱されていますが、それらの多くが試用段階です。

6. 展 望

ロボットを構成する要素技術の完成度にはかなりのバラツキが有ることが認められています。たとえば、間接の角度はある程度の精度で計測できますが、フィールド内に盛られている土砂の形状はほとんど計測できません。

そこで、ロボットの開発のためにこれらの未発達な要素技術を、何らかの方法で補完しなければなりません。そのひとつの方法として、作業の中で機械が得意な部分と人間が得意な部分を分け、機械と人間が協調してひとつの作業を行う形態の自動化（例えばイージーオペレーション）が考えられます。自動化における機械と人間との作業分担の比率の例を図5.1に示します。この例では、右上がりのグラフになっていますが、作業によっては右下がりやすり鉢型、釣り鐘型等が考えられます。

ロボット化を進めていくに従い、各種の要素技術が成熟して人間の分担領域が小さくなり、全自動化に近づいていきます。

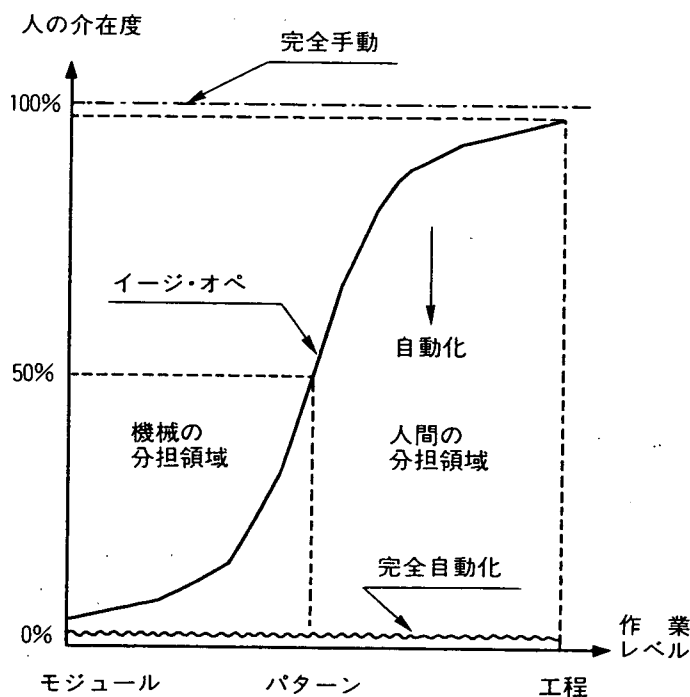


図6.1 作業レベルから見た自動化

7. おわりに

具体的なセンサ、コントローラ等の紹介がなく「建設ロボットに使われる技術」というタイトルに忠実な内容とはいえないですが、世に出ている建設ロボット関連記事では扱うことが少なかったものをあえて扱いました。これまで紹介される事が少なかった技術を紹介する事でこれからの建設ロボット開発に多少は役立つことを願って止みません。

シリーズ第2回を執筆するにあたり、有効な助言を与えて下さった機械研究室の諸氏、特に機械研究室長に紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献

1. 坂元慶行ほか, 「情報量統計学」, 共立出版
2. 砂原善文, 「確率システム理論」, (社) 電気通信学会
3. Takatsu, T. and Takeda, H., 1989, "On an application of the adaptive control theory to the micro-tunnelling", Preprints of ISCIE' 89-5, pp. 161-162.
4. Takatsu, T. and Takeda, H., 1989, "A study of the parameter identification with a parameter's dynamics", SICE Preprints of Dynamical System Theory Symposium, pp. 274-277

建設ロボット 3 (土木編 1…土工・基礎工・舗装工)

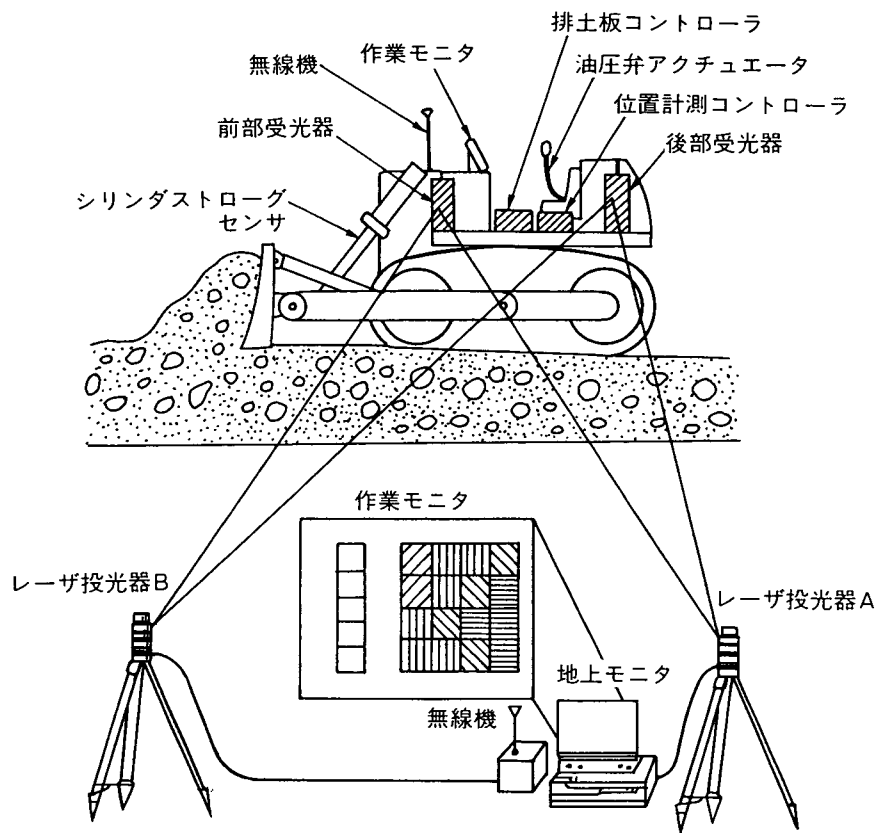
1. 土 工

土工機械の量産機が中心であるため、その自動化の動きはコスト見合いで着実に進められており、成果を挙げているといつて良いでしょう。油圧ショベルで始まったコンピュータによるエンジン制御、変速制御は各機種に広がりつつあり、ホイールローダ、大型ダンプトラック、モータスクレーパなどにも採用されており、制御される項目も増えています。作業装置の制御では油圧バックホウのバケットコントロール(例えば水平仕上げや斜面仕上げ)、ブルドーザにおける負荷とシュースリップのバランスを制御するシステム、スクレーパの切込み量の自動制御などがあります。またダンプトラックの無人運転システムの実用化も採石場で行われています。

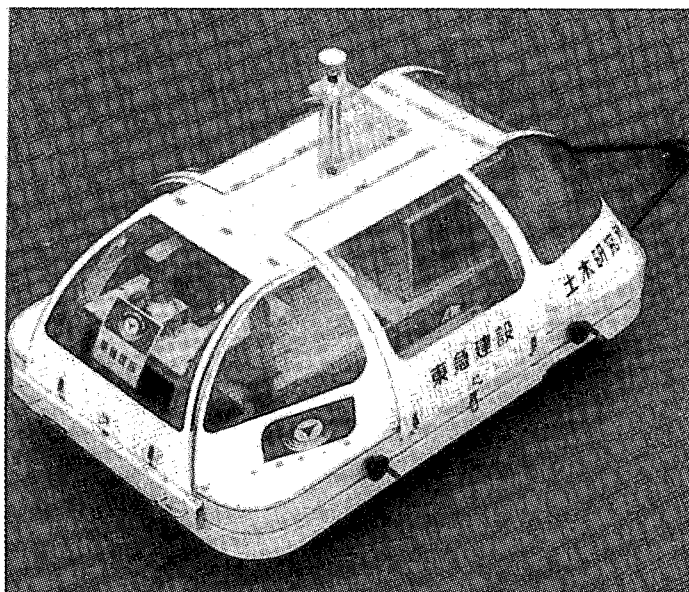
土工の高度化事例として特筆できるものには、建設省総合技術開発プロジェクトで実施されたブルドーザの位置決めと排土板制御があります。これは、ブルドーザによる掘削作業の自動化を目標とし、均平掘削作業のオペレータアシストシステムとしての位置計測システム・ブレード制御システムの開発を行ったものです。そのシステム全体構成は図-1の通りであり、機械本体とその姿勢を測定計測するシステム、排土板を制御するシステム、地盤の高低(出来高)を記録する装置から構成されています。このシステムは、平面の整地を対象としており、斜面や任意形状の整地に拡大するには改良が必要であると思われます。また、位置情報の検出につきましては、作業機側に演算機能を持たせたので複数の作業機に対して位置情報の供給が可能です。検知媒体にレーザを使用しているためレーザの遮断に対する対応が困難であり、他の媒体を用いた精度の高い即時的な3次元位置検出装置の開発が必要です。しかしながら、本システムは、今後の土工ロボット化システムの方向性を示した重要なものです。

また、土の締め固め度管理システムの開発も重要ですが、同じく総合技術開発プロジェクトで取り組まれています。これは、締め固め度合いを連続的にリアルタイムで測定しデータとして次の施工にフィードバックしていくシステムを目指したもので、電磁波法、インピーダンス法、散乱型 RI 法等で締め固めロボットの開発が実施されています。(写真-1)

工種	機 械 名	自動化・ロボット化の内容
土 工	油圧バックホウ	省エネ、運転簡易化、作業管理などの目的で、エンジン油圧制御、自動運転、モニタなどにコンピュータを導入
	土地造成万能ロボット	油圧バックホウをアタッチメント交換なしに、堀削・ブロック積などの作業ができるようにした。リモコン、バケット水平保持可能
	ブルドーザ	レーザ利用の3次元1計測技術技術を使って、均平作業を自動で行う。
	モータグレーダ	オートマチックブレードコントロールをレーザ光を利用して行い、平面仕上げをする。
	移動式ベルトコンベヤ	長いシフタブルコンベアを数台の自走式クローラ台車に乗せ、ベルトが蛇行しないよう直線を保ちながら横移動する。
	無人走行ダンプ	オフロードダンプトラックによる無人走行システム



図ー１ ブルドーザの位置決めと排土板制御システムの構成



写真ー１ 電磁波法の締固めロボット

2. 基礎工

基礎工事用機械は土木構造物・建築物を支える基礎杭・基礎地盤を様々な条件のもとで作り出す役割を持っています。近年は、本州四国連絡橋に見られるように水中基礎が施工されたり、ニューマチックケーソンの作業室内の掘削方法が遠隔操作によるロボット化（図2、写真3参照）が実用段階に入りつつあるなど話題が豊富です。

基礎工における自動化・ロボット化の動きを見ますと、無人潜函掘削機などは比較的早くから自動化が進められており、地下連続壁掘削機も掘削精度を上げるための自動化や泥水管理の自動化が進められていて、最近ではむしろ自動化が一般化してすっかり定着した感があります。変わったところでは深礎工法用の掘削機のリモコン化が進められています。このほか、地盤改良機械では石灰散布機の散布量制御やスタビライザの混合深さ、傾斜角度の自動制御も行われています。

ところで、近年、大都市部を中心として、狭隘な敷地に中高層ビルの建設が活発ですが、その多くは建設機械の搬入にも制限があり、また、隣接建物と数十センチメートルしか離れていないような現場で作業している場合もあります。このような中で、転倒事故が多発しており、その対策が求められています。また、建設基礎工事の労働事情もご他聞に漏れず熟練労働者が減少しています。このため、ますます安全化・効率化が追求されていくものと思われます。このため、建設基礎工事分野で建設ロボットを普及させるには、作業工程や使用する杭料等の標準化を進める必要があります。なお、本シリーズの最終回におきまして、「施工合理化技術開発のビジョン」（建設技術開発会議）に示された基礎工の今後の開発目標を例示する予定ですので参考にして頂きたいです。また、図-3に連続地中壁工法のロボット化施工のイメージ図を示します。

工種	機 械 名	自動化・ロボット化の内容
基礎工	ニューマチックケーソン 地下連続壁掘削機	函内圧力自動調節、排土自動運転、掘削機のリモコンなどを実施している。 掘削精度工場、掘削・速度制御、コンクリート打殿などの自動化を図っている。
	アースオーガ等の自動 運転	アースオーガで土に固化剤を混合する工法で、アースオーガ等の沈下速度や固化剤の注入量を自動調整する。
	メカトロニック・コンソリ デーションシステム	サンドパイル造成において沈下量と材料供給量などを自動調節する。船体の位置決めにも自動測量システムを採用している。
	ペーパドレーン機	ドレーン材の挿入・切断作業の一部を自動化し、ドレーン材の共上りなどを防止している。
	パイルドライバ	連続壁工法でモルタル注入を微速で一定速度で行うため自動運転を行っている。

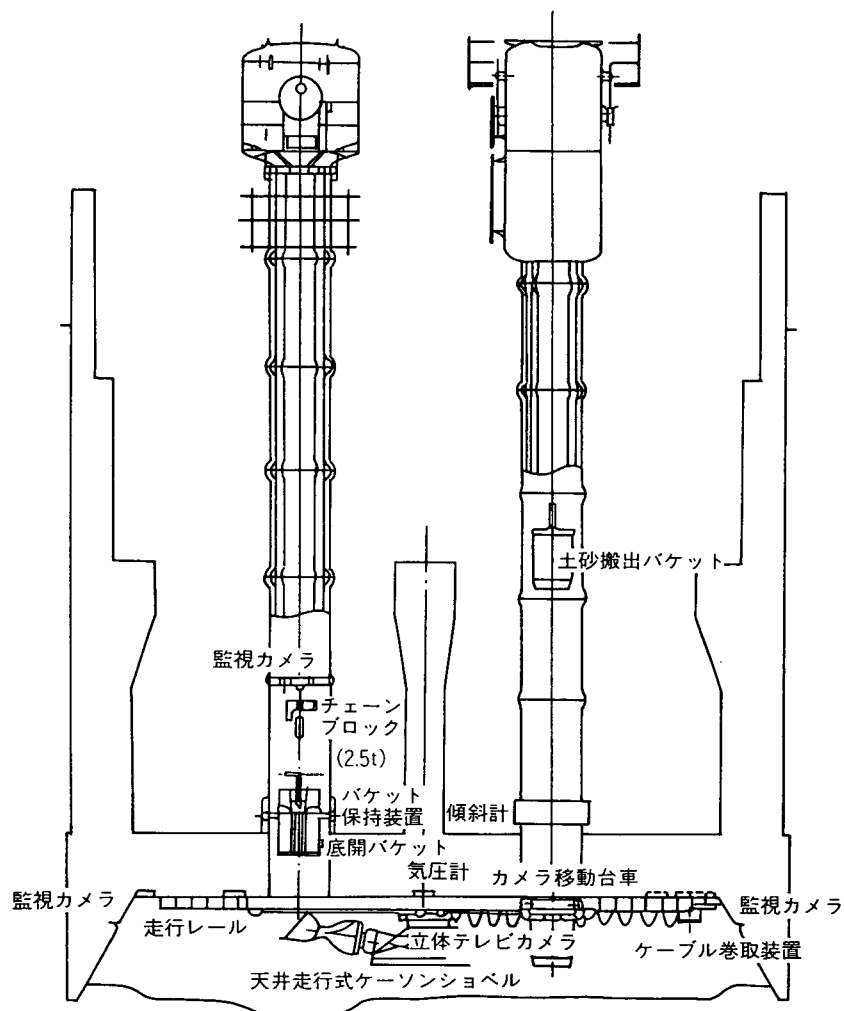


図-2 無人ニューマチックケーソン

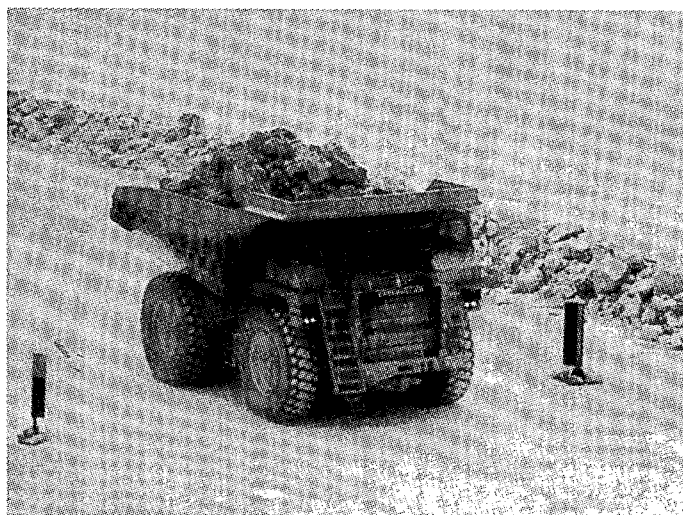


写真-2 無人走行ダンプトラック

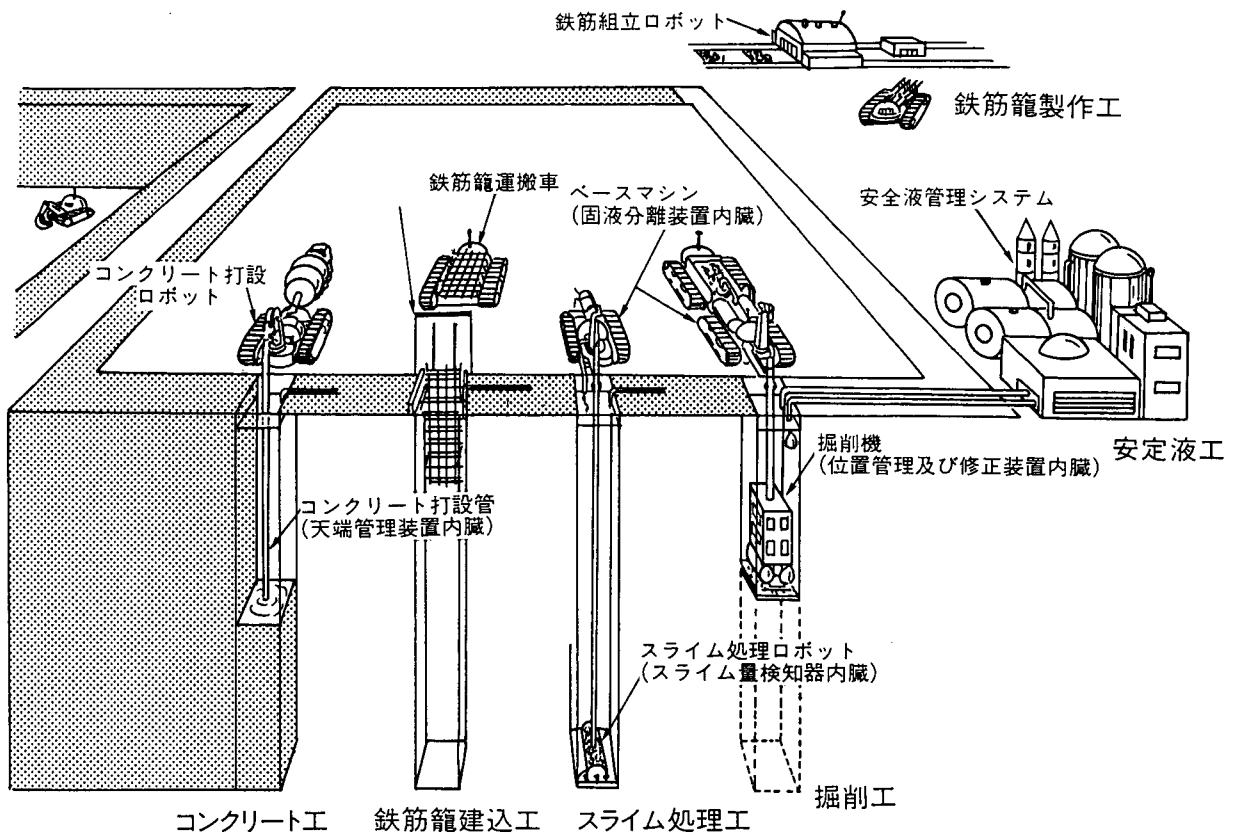
3. 舗 装 工

舗装機械は、自動車社会の発展と共に改良が進み、駆動機構は早くから油圧化されています。また敷均し高さを保持するフィードバック機能を備えたフローティングスクリード機構は1938年米国で開発され実用化されています。さらに、1965年頃にアスファルトフィニッシャにレベルセンサや角度センサを用いた自動敷厚調整装置が開発され東名高速道路建設で活躍して以来、日本における精度の高い施工を可能としてきました。舗装機械は、車両をスムーズに走行させるため、数ミリ単位の仕上がり精度が要求されます。そのため年間生産台数が少ない割には、かなり自動化が進んでいるといえます。路面切削機や加熱路上表層再生工用としてのサーフェスリサイクル機等の専用機が開発され使用されていますが、舗装機械の自動化で件数的に多いのも、路上再生処理機（サーフェスリサイクル機）関係です。平坦性の自動制御が一段落したあと、操向・切削量・配合で自動化が進んでいます。アスファルトフィニッシャの自動化も件数的には多いですが、内容は仕上げ・操向・合材供給等の制御で仕上げ精度を高めている状況です。また、道路機能に対するニーズも多様化してきており、路面排水機能・走行騒音対策・短時間補修工法の実施等が要求され、傾斜面や曲面の仕上げ用特殊フィニッシャや特殊ローラの制御で、より滑らかで、精度の高い仕上げを可能にしています。一方、深夜作業等が多いため労働力は他分野へ流出し、大幅に不足しています。その対策の一環として自動化・ロボット化による省人化・非熟練化も要求されています。

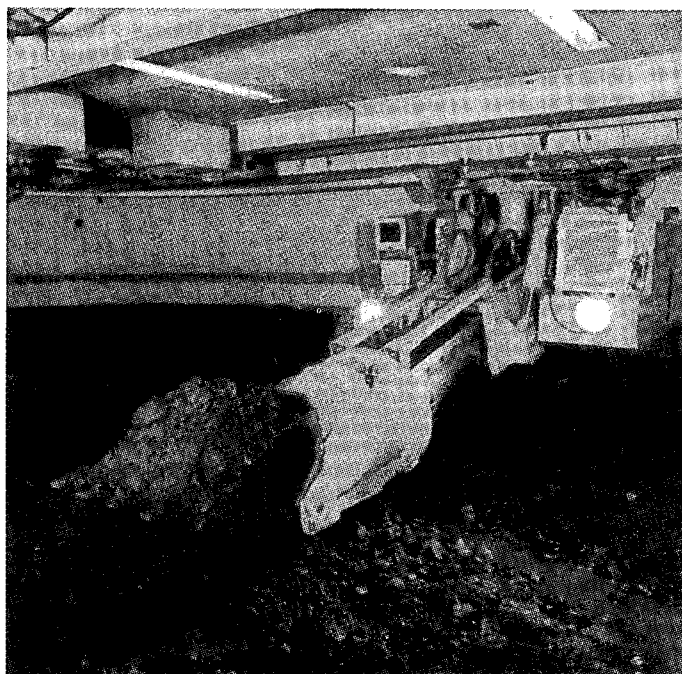
舗装機械は一般土工用建設機械等のように土砂の掘削または排土作業の単一作業に比べ、アスファルトフィニッシャのように一台の機械に多機能を持たせる場合や、振動ローラのように多くの機能を搭載していない場合もあり、作業内容の把握については画一的な把握は困難が多いです。また、一般工作機械のように対象物が移動するのではなく、機械本体が移動してその移動速度に合わせ作業を行う必要があることは他の建設ロボットと同様です。また、フィールドテストを繰り返し行うことが非常に困難であり（公共事業では失敗が許されない）、少ない生産量の中で専用の要素機能を開発製作することは製造コストを上げる原因となり実用化が遠のく原因となっています。

今回は、土木編の3回目として、トンネル工・コンクリート工のロボット化について紹介する予定です。

工 程	機 械 名	自 動 化 ・ ロ ボ ッ ト 化 の 内 容
舗 装 工	ロードヒータ	サーフェスリサイクル用ロードヒータをリモコン化した。
	路上再生処理機	切削深さ、スピードのコントロール、材料混合量、まき出し厚さのコントロールなどいろいろな面で自動化されている。
	アスファルトフィニッシャ	歩行方向、速度、仕上げレベル、合材供給量などの要素を自動制御している。リモコンのものもある。
	自動運転ローラ	タイヤローラの歩行パターンを入力すると、その命令に従って自動的に走路、締固め回数などを制御する。
	締固め管理ロボット	締固め度を自動的に測定するとともにその位置を測量し、CTR画面上に表示する。
	振動ローラ用制御装置	振動ローラの前後進、車速、振動のオン・オフなどを自動的に制御してオペレータの負担を軽減した。
	コンクリート縦仕上げ機	縦仕上げ機の高さ調整を自動化し、デジタル表示できるようにした。



図ー3 基礎工連続地中壁工法施工イメージ図



写真ー3 無人ニューマチックケーソンの天上走行式掘削機

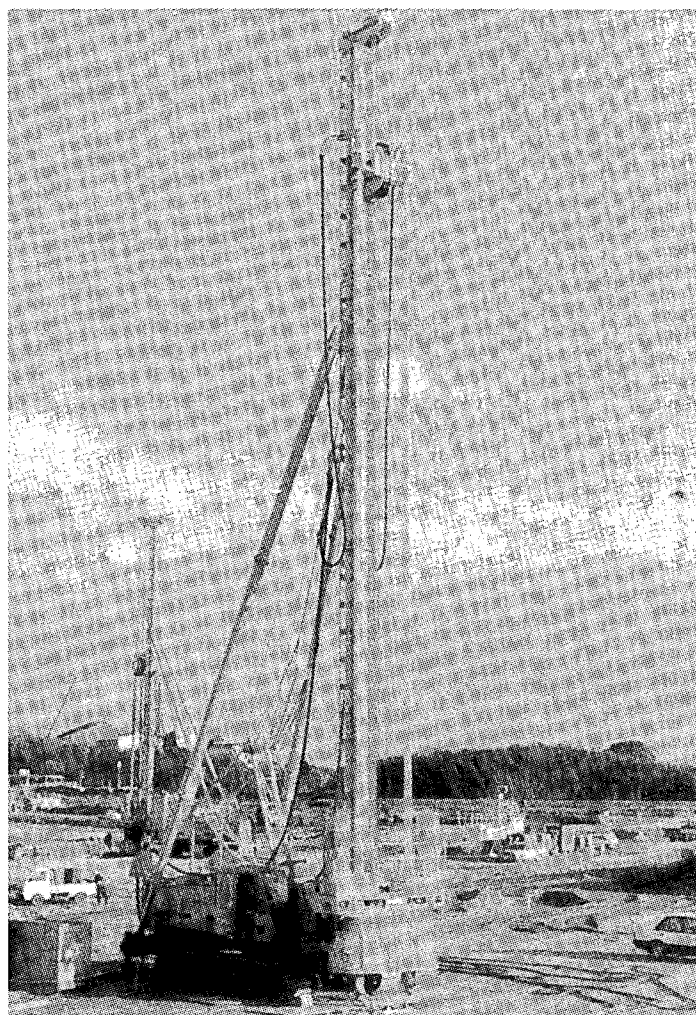


写真-4 深層混合攪拌機

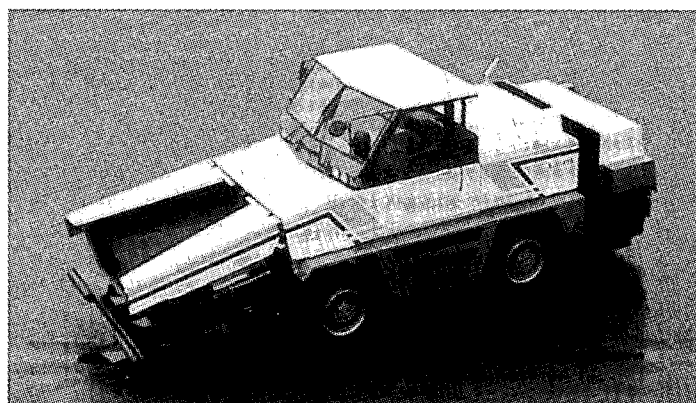


写真-5 ロボットアスファルトフィニッシャ

建設省土木研究所機械施工部機械研究室 のむらまさし、米村克己

建設ロボット 4（土木編2…トンネル工・コンクリート工）

1. トンネル工

1. 1 山岳トンネル

トンネル施工は、作業範囲が限定され、また同一作業箇所（切羽等）で複数の作業ができないため、施工能率を向上させるには各作業の能率をあげる必要がありました。このため、現在のようなロボット化が叫ばれる前から個々の作業で各種の開発が行われ、専用機種の開発も行われてきました。また施工法が NATM に代り、従来の勘と経験を主体とした施工法から、計測によるデータ分析とフィードバックによる理論的・合理的な施工思想に変わりました。掘削中の地山の挙動を知って施工を行う NATM は従来以上の正確な掘削を必要とし、加えてトンネル作業技能労働者の高齢化の進展と労働者不足は、施工品質の低下を懸念させる事態となっています。このような状況におきまして、ロボット化による施工の合理化が求められています。さらに、他部門におけるロボット化の急速な発展と実績は、トンネル施工のロボット化構想にさらに拍車をかける結果となっています。このため、削孔部門でロボットドリルジャンボが開発されています。開発当初は、特例を除いて、ロボットの機能を十分生かすことなく仕事を完了しており、ロボットとしての十分な実績を残すには至っていませんでした。この原因として技術的な問題はもちろんですが、作業環境、作業員のロボットに対する認識、受け入れ体制等、多くの問題を噴出させました。このロボットは従来に比して本格的なロボットといえるもので、今後の建設事業のロボット化への重要な布石となりました。最近では、NATM におけるロボットドリルジャンボ（写真－1 参照）やコンクリート吹付けロボットはかなり普及しており、実績も多いです。特に吹付けについては色々なものが作られていますが、台数的に多いのはリモコン式のものです。さらに、レーザを使った掘削断面の自動計画システムやずり搬出用バッテリーロコの無人運転システムの普及も著しいです。

工種	ロボット名	自動化・ロボット化の内容
トンネル工	コンクリート吹付けロボット	NATM におけるコンクリート吹付け作業をリモコンもしくは自動で行う。
	ロボットドリルジャンボ	3 本程度のブームを持ち、所定の深さまで自動的に削孔する。 削孔パターンはティーチングまたは数値制御
	セグメント組立ロボット	シールド工事におけるセグメントを自動的に組立てる。
	シールド方向制御	ジャイロまたはレーザにより計画線からの偏位を 20～50mm 程度で制御している。
	セグメント組立ロボット	セグメントの組立てを数ミリ程度の精度で位置決めしている。
	シールド運転管理システム	泥水圧、掘進速度、ズリ搬出、方向制御、セグメント組立等の総合制御システムの試作
	小口径推進システム	AI コントローラによるファジィ制御
	バッテリーロコ無人運転システム	バッテリーロコを手動・リモコン・無人の 3 モードで運転制御
	自動換気システム	ガス、粉塵量を計測して送風機を自動制御運転
	トンネル用防水シート貼ゴンドラ	防水シートを貼り合わせ溶接する。

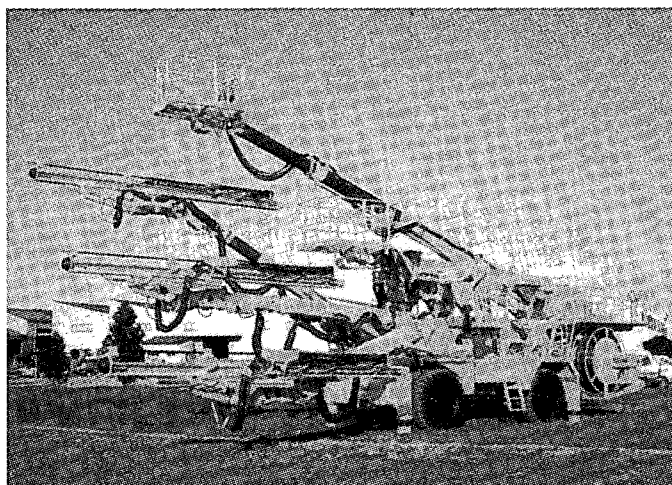


写真-1 ロボットドリルジャンボ

1. 2 シールドトンネル、小口径推進

シールド掘進機は、ほとんどが何らかの形の自動化が行われています。その内容を大きく分けると測量と方向制御の自動化や土圧制御などの掘進機本体の自動化にかかわるものと、セグメントの搬送、組立ての自動化にかかわるものになります。

掘進機の自動掘進システムで最近目立つのは、エキスパートシステムにファジィ制御を利用し始めたことです。

ここで、AI（人工知能：Artificial Intelligence）とは、人間と同じような知能を電算機に求めるものです。例えば、機械の運転を電算機にやらせようとするのもその一つであり、ベテランオペレータが色々な運転条件に遭遇した時に、どういう対処の仕方、運転操作を行うかをあらかじめ調べておいてこれを電算機に覚込ませる方法がとられます。こうしてでき上がったシステムをエキスパートシステムと呼びます。エキスパートシステムは、“もし（IF）、こうならば（THAN）、こうする”という知識がいくつも複雑につめ込まれるわけですが、電算機は、YES、NOの2値しか取り扱えないのに対し、エキスパートの知識は、必ずしもYES、NOでは割切れないのがほとんどです。従来方法では、これをどこかで割切ってルール化していたのですが、ファジィ制御ではその中間のあいまいな所をメンバーシップ関数という概念を導入して、電算処理できるようにしています。ファジィ制御を用いると色々なメリットが考えられます。例えば、

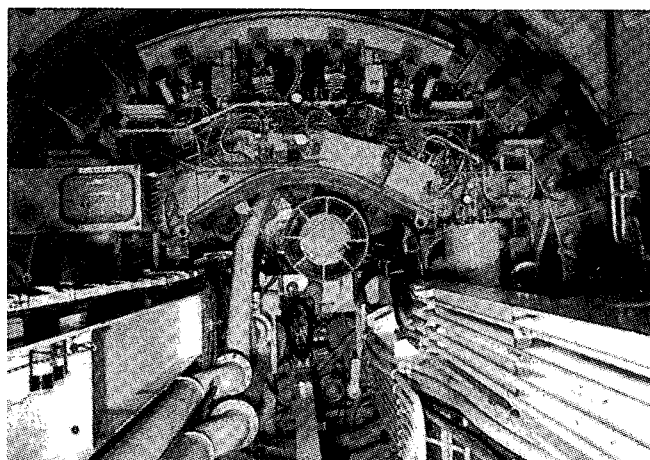
- ① 今まで整理が難しかった熟練者のもつ知識がとり入れやすい。
- ② いくつもの操作ルールを並列的にかつウエイトをつけて利用できる。
- ③ メンバーシップ関数を学習的に改善することによって、より適切な制御システムとすることができる。
- ④ 操作ルールが変わったり欠落しても結果に影響する度合いが少ない。

などです。これは、不確定な要因が多い建設機械や施工システムの制御には適したもので、今後建設の分野でも採用されるケースが増えると予想されます。

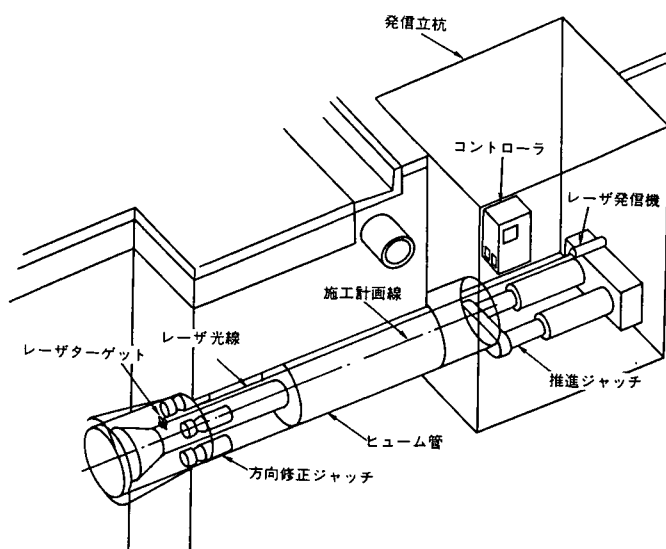
また、シールドの方向制御につきましては、平成2年度に建設省において技術評価が行われており、ジャイロやレーザ等を使用した制御システムが発表されています。

セグメントの搬送・組立てのシステムも各社で開発されています（写真－2）。セグメントを倉庫にストックしその出し入れを自動で行うもの、立坑から切羽までの自動搬送システム、切羽での組立てを自動で行うもの、およびそれらのいくつかを組合わせたものなど色々あります。数百kgという重いセグメントを時には1mm以内の精度で位置決めするという非常に難しい制御が必要であり、一個のセグメントの位置決めに5～10分程度の時間を必要としており、高速化が求められています。

小口径推進工法についての自動化も色々試みられています。主な内容は、方向制御、泥水管理、掘削管理、リモコンなどです。特に建設省土木研究所では、小口径推進工法の高度化を図る目的で、建設省官民連帯共同研究を実施し、ファジィ制御理論を応用したAIコントローラの開発による高度化、検査機器の開発、礫地帯での超小口径推進技術の開発、非開削による取付け管施工技術の開発を行っています。（図－1）。



写真－2 シールドセグメント組立ロボット



図－1 小口径推進機

2. コンクリート工

2. 1 吹付コンクリート

吹付コンクリート工法は大きく分けて混練、運搬、圧送、吹付ノズルよりの打込みといった順になります。そして吹付機といった場合、圧送装置、吹付装置の何れか、あるいは両者を含めて指しています。

圧送装置としては乾式またはセミ湿式と呼ばれる吹付工法に変わって、最近は湿式工法が主流となってきました。両者を比較すると、湿式工法の方がよりコンクリートの品質管理がし易く、より粉塵およびはね返りが少ないといわれます。また従来の吹付作業はコンクリート構造物の補修、法面保護等の目的で行われてきましたが、近年NATMの普及により、トンネル工事において必要欠くべからざるものになってきており、急速吹付けに対応して湿式工法による多量かつ連続吹付けが可能になったことによって、口径の大きくなったノズルを人力によって保持し操作することが困難になってきました。

そこで、吹付け作業における労働環境の改善、危険作業の回避、また施工能率の向上、省力化を図るために、コンクリート吹付ロボットの開発が相次いで発表されてきました（写真－3参照）。現状において、吹付機のロボット化は吹付ノズルの支持、旋回、スライド等を自動化したものであり、以下に示すような項目が上げられます。

- ① ベースマシンを油圧バックホウとして、そのブームの作動を利用し空間をカバーするもの。
- ② キャリア、平台車等に可動アームを取付けて空間をカバーするもの。
- ③ 吹付ノズルの揺動装置としては、円運動（楕円運動）、または一定のストロークでの往復運動をするもの。
- ④ 吹付ノズルの位置を遠隔操作で移動させるもの。

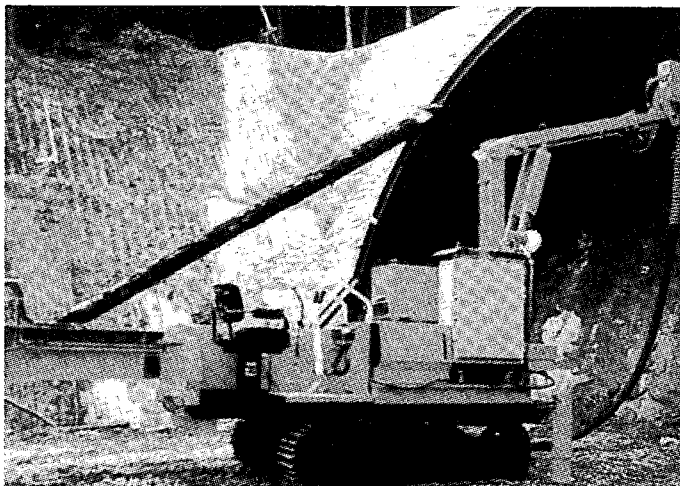
このように現在の段階では、ノズルの保持に関するものに限られ、マニュアルマニプレータの域を脱していないといえます。

工種	ロボット名	自動化・ロボット化の内容
コンクリート工	コンクリートポンプ車	コンクリート吐出量を付加に応じてコントロールする。音声合成、液晶パネル等による作業指示。リモコン化操作。
	水ジェット切断装置	高圧ジェット水流によりコンクリートをリモコンでブロック状にする。
	型枠測量システム	3次元的に変化する構造物の型枠の測量を自動的に行い設計値との誤差も図式化出力する。
	型枠ケレンシステム	建築型枠のケレン、検数、積み上げを自動的に行う
	コンクリート吹付ロボット	（前出）
	コンクリートディストリビュータ	吐出口を特定範囲の任意の地点に移動させる遠隔制御、または、リモコン制御。
	コンクリート床仕上げロボット	木鏝作業および金鏝作業の自動化

今後吹付けの最終的なロボットの形は、ノズルが吹付面との距離を一定に保ち、設定された吹付厚で移動して行くものですが、改良開発しなければならない項目がいくつか上げられます。

- ① 掘削後の地山には当然凹凸があり、吹付厚を一定にするような移動パターンを決める技術。
- ② リバウンドが地山の諸々の条件で変り、吹付厚を一定にする技術。
- ③ トンネルの悪環境に耐えられる吹付厚・急結剤の量等を決定するセンサ技術。

このようなことから考えますと現状のロボットを超えた、数値制御ロボットあるいは最終の知能ロボットに発展して行くためには相当な期間が必要であろうと思われます。



写真－3　　コンクリート吹付ロボット

3. コンクリートディストリビュータ

コンクリートディストリビュータとは、コンクリートと「分配者・配達者」という意味の「Distributor」とを組合せた名称で、まだ固まっていない生コンクリートを分配して回る装置のことを称しています。またプレーシングブームといった呼び方をするものもあります。コンクリートディストリビュータは、従来のコンクリート打設作業で一般的となったポンプ圧送工法における次のような問題点を解決する手段として開発された機種です。

すなわち、

- ① 筒先フレキシブルホースが非常に重く、振回し作業を頻度良くやるほど配筋を乱し、その補修に手間や時間的ロスが多くなる。
- ② 配管の盛替えや筒先振回し作業は重労働であり、そのうえ汚れ作業といった悪環境下での作業である。
- ③ 圧送による脈動で配筋や型枠が動き、躯体の品質や精度に悪影響を及ぼす。
- ④ コンクリート吐出時の脈動のため、ポンプ工2～3名で筒先を押えて打設しなければならない。
- ⑤ 配管の盛替え作業により打設が中断され能率の低下をまねく。

等の問題点を解決し、自動化・ロボット化されたもので、生コンクリート圧送のためのコンクリートポンプを必要とするところは従来と同じです。

コンクリートディストリビュータはヨーロッパでタワー式が昭和30年代後半に開発実用化され、日本には昭和54年に導入され、原子力発電所の工事で使われたのが始めです。近年の建築ブームにのり次第に普及してきています。

4. コンクリート床仕上げ

コンクリート床の直仕上げ工法（モノシリック工法）は、昭和40年代の前半に普及した工法です。現在では全床の90%以上を占めるに至っており代表的な工法となっています。

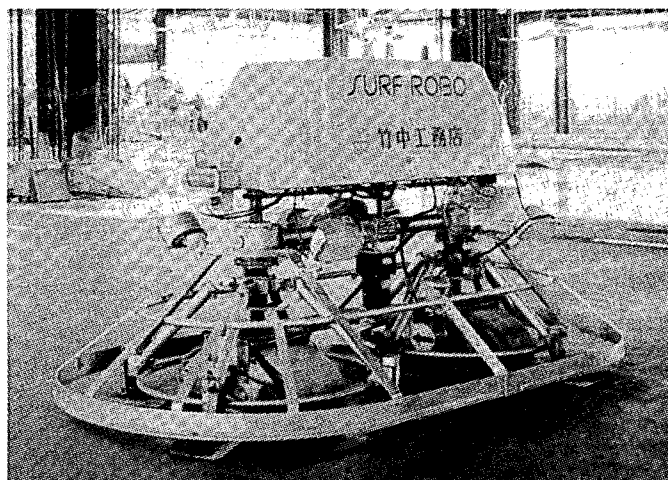
床仕上げ作業は一見単純作業のようにみえますが、かなりの技能と経験を要します。すなわち、コンクリートの凝結の進み具合は温度に大きく影響されるため、深夜作業や短時間高密度作業をしいられています。また、長時間にわたる中腰姿勢での作業のため、新規入職者は少なく、作業員の高齢化が進んでいます。

このような状況から、コンクリート床仕上げロボット（写真－4参照）が開発されています。このロボットは床面積の広い工場、物流倉庫、高層事務所等の400～500㎡以上の広い床で活躍しています。また、熟練職人と比べて5～8倍程度のスピードで作業を行うことができ、代表的な建設ロボットです。

現在の床仕上げロボットは、床仕上げ作業の標準工程のうちの後段の工程を受け持っており、作業全体からみると前半部分すなわちコンクリート粗ならしや定規ずり等の工程を処理できるロボットの開発が待たれています。

以上、今回はトンネル工とコンクリート工に関するロボットを紹介しましたが、ほんの一部であることを申し上げておきます。

次回は、土木編の最後としまして、いろいろなロボットを紹介する予定です。



写真－4 床仕上げロボット

建設ロボット 5 (土木編3…その他)

今回は、土木編の3として、1, 2で取り上げなかったもののうち数例を取り上げます。各種開発が行われているため、偏りがあることをあらかじめ申し上げておきます。

1. ダム工

コンクリートダムの施工で、プラント打設現場間の生コンの移送システムの無人化は多くの建設現場で行われており、恐らくは最も成果の上がっている自動化システムといって良いでしょう。一般にプラントからトランスファーカで生コンを運び、ケーブルクレーンでつったバケットに移す方式が取られています。この間は全く無人で、プラントの運転員とケーブルクレーンのオペレータのリモコンで行われています。トランスファーカとコンクリートバケットの位置合わせおよびコンクリートバケット開閉用圧縮空気の自動供給方式に各社アイデアを競っています。

自動型枠は建設省が昭和62年に技術評価を実施した関係もあって増加しています。橋脚や煙突に使われるものもありますが、多くはダム工事用です。フレームを既に打設したコンクリートにボルト等で固定し、リモコンの油圧力で幕板を脱型、上昇、再リセットする方式が多いです。従来5～6名必要であった型枠移動を2名程度でしかも短時間でできますので省力化の効果が高いです。(写真-1 参照)

打設上面に生じるスケールなどを除去するグリーンカットの作業も、回転ブラシや高圧ジェットを搭載した車で、自動操作で行う機械がつくられています。あらかじめ走行経路を入力してやって自動走行させるものもあります。

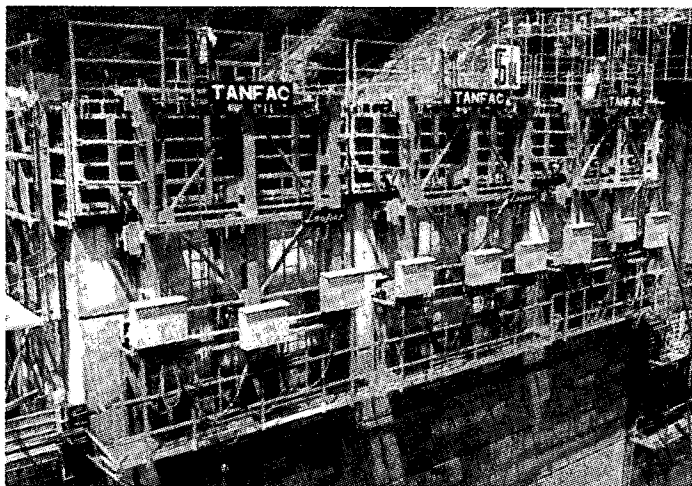
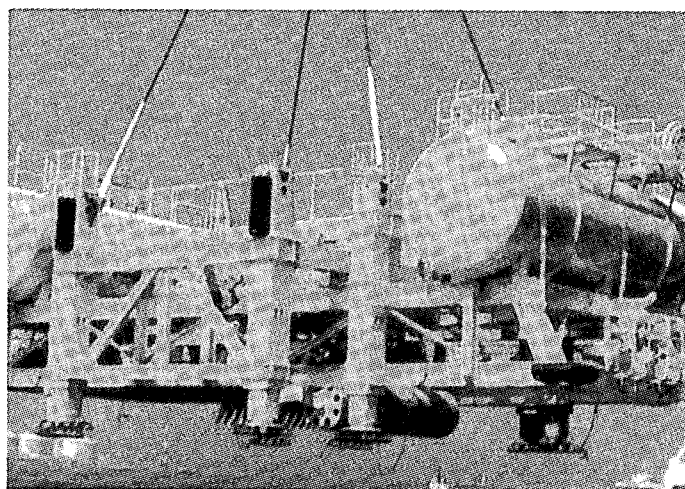


写真-1 ダム自動型枠

2. 作業船・水中作業

作業船の位置制御や作業位置の操作の自動化は、以前から行われていますが、潜水作業を省力化する水底捨石ならしロボット（写真－2参照）も多くの会社で作られ、実用に供されています。これは水底の捨石をレーキでならし、締固めも行う機械で、一連の作業は自動化されていて、水上からのリモコンも可能です。仕上がり状況を計測できる機械もあります。

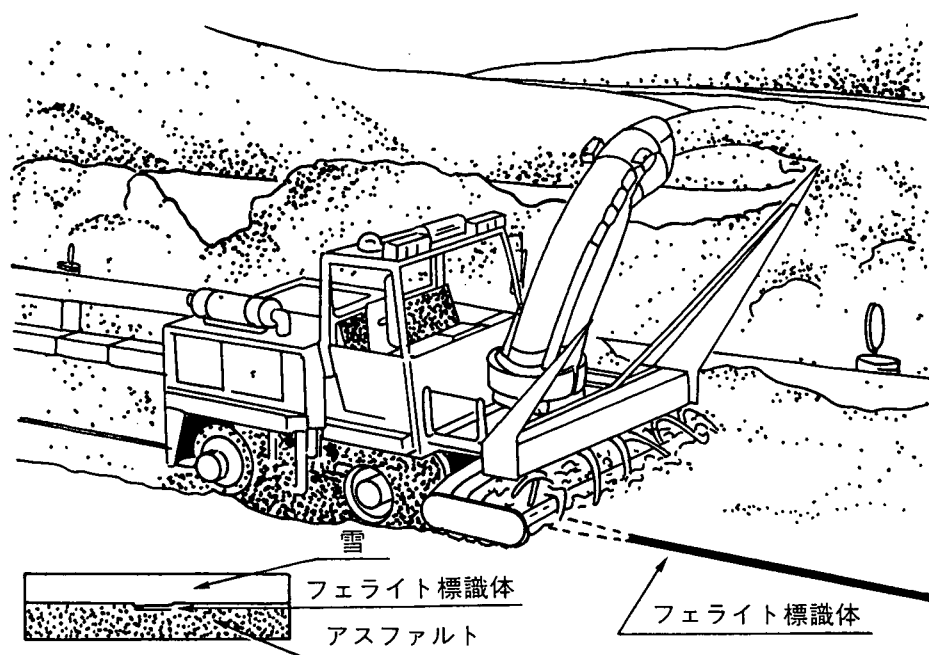
工種	ロボット名	自動化・ロボット化の内容
ダム工事	振動ローラ自動運行システム	建設省が民間企業と共同開発したもので、設定した転圧エリアを教示した転圧パターンで自動走行し転圧を行う
	RCDダム重機稼働管理システム	RCDダムのコンクリート打設時に使用する重機の稼働記録、作業日報の作成をICカードとコンピュータにより自動的に管理、作成ができるシステム
	生コンクリート自動搬送システム	トランスファーカーもしくはインクラインの自動運転、バケットの脱着の自動化
	グリーンカット車	3組のノズルを7種のパターンで自動運転
	グラウトポンプ管理システム	注入圧力、注入量などを自動制御
	ボーリングロボット	ボーリング作業の自動化システム
	ケーブルクレーン運転システム	ケーブルクレーンの運転を熟練者の運転パターンに合わせて自動運転
作業船・水中作業	自動昇降型枠	ダムのコンクリート型枠の昇降を自動的に行う
	ロボット浚渫船	ラダーの自動制御、船の位置・浚渫状況を計測しCRT等に表示する
	自動グラブ船	グラブの開閉時、常に爪先が一定深度を保つように巻上げ・巻下げを行い、地盤の水平掘削を行う
	水陸両用ブルドーザ	無線操縦により各種水中土工作業を行う
	捨石ならし機	リモコンもしくは自動で捨石を海底で水平にならす
	深海無人潜水機システム	海底ケーブルの建設、保全、修理の支援システム
	水中テレビロボット	自航式水中テレビで小型カメラ等を封入し水上のモニタに画像を伝送する
維持その他	水中ブレーカ	水中岩盤堀削エアブレーカ
	原子炉解体ロボット	リモコン式のクローラトラクタにコンクリートカッタ等を搭載し放射線汚染区域の作業を行う
	ロボットロータリ除雪車	任意の地点に投雪でき、自動走行する
	建設機械管理システム	建設機械（除雪車、清掃車）の稼働状況がICカードにより即時に把握できるシステム
	管更生機	リモコンで既設ヒューム管を破壊し新しいヒューム管を施設する。又、管にさく孔し枝管を付ける
	ガードレール清掃車	センサによりガードレールに対する清掃ブラシの追従を自動化
維持その他	除雪グレーダ	圧雪処理時のブレード押付け力をコンピュータにより一定に保持し、作業員の負担軽減と路面管理の向上



写真－２ 捨て石ならしロボット

３．道路維持工

道路維持用機械の中で、自動化の最も進んでいるのは除雪機械のなかでもロータリ除雪車です。除雪負荷に応じた車速、シュート操作を自動化しピンポイントに投雪できる制御、道路にフェライトなどを埋め込み、その案内で走行位置を決める制御など次第に全自動化へ近づいています（図－１参照）。このほかモータグレーダやトラックグレーダのブレードの押付け力のコントロール、薬剤散布車における車速－散布量の自動制御なども行われています。



図－１ ロボットロータリ除雪車

4. そ の 他

ウォータージェットによる構造物の切断破壊工法がふえており、そのノズルの移動制御を自動化もしくはリモコン化している例が多いです。同様な作業で原子炉解体工事が現実問題となっておりその解体ロボットも開発されています。原子炉解体作業は破壊だけでなく、切断物の搬出や発生粉塵の回収さらには放射能レベルが場所によって異なるのでその選択的切断など難しい問題をかかえていて、単なるリモコン機ではなくいわゆる知能ロボットの働きが要求されます（極限ロボット参照）。

5. 他分野におけるロボット

ここで少し目先を変えて他分野におけるロボットの紹介をいたします。

5. 1 宇宙ロボット

ロボットの分類方法にはいろいろありますが、作業用アームを備えたものを宇宙ロボットと定義すると、次の五つに分類できます。

1. 固定形マニピュレータ 自重を無視できる有人の大型構造物上で、パイロードの搬送やEVA補助作業を行う比較的大型のマニピュレータであり、人間による遠隔操縦を基本とします（図-2）。
2. 着脱形マニピュレータ 固定形マニピュレータや構造物上の移動機構に装着する着脱可能な小形の繊細作業用マニピュレータで、やはり人間による遠隔操縦を基本とします。
3. 固定形ロボット 複数のパイロードを搭載する無人の構造物上でパイロードの搬送作業を行うものであり、自律作業を基本とします。
4. 飛行形ロボット 大型衛星並の飛行体にロボットアームを備え、空間を自由に飛行して各種の宇宙機に対する作業を行うもので自律飛行と自律作業を基本とします。
5. 移動形ロボット 月や惑星の表面を移動して探査や採掘作業を行うもので、走行や歩行などの不整地の自律移動とロボットアームによる自律作業を基本とします。（図-3）。

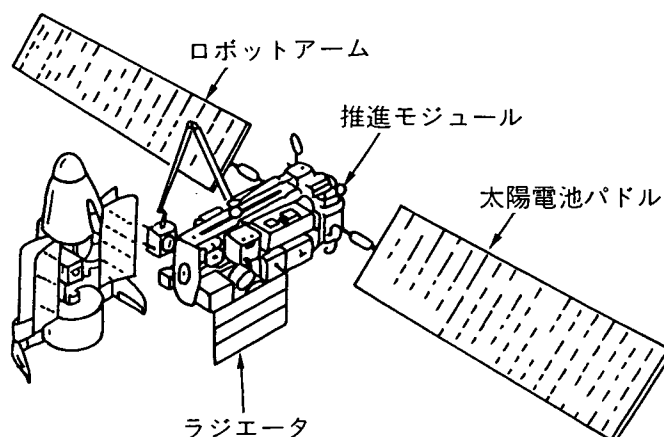


図-2 プラットフォームと宇宙往還機

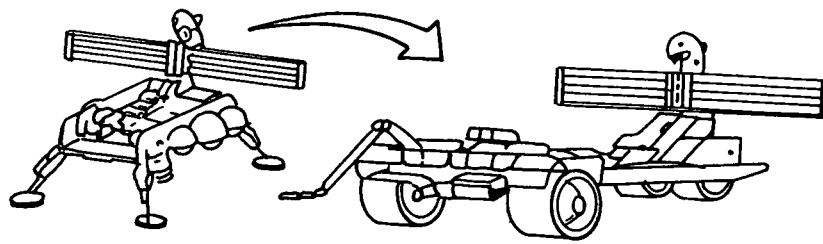


図-3 月着陸船と月面探査ロボットの概念図

5. 2 林業ロボット

林業作業のロボット化には、工場内作業の自動化やロボット化とは大きく異なる以下のような条件が存在します。

1. 対象が人工ではなく自然であり、したがってすべて多様である。たとえば移動環境は凹凸・傾斜・障害物が存在するきわめて多様な環境である。また、作業対象である樹木も幼苗から巨木まで、直立したものや少し曲がったもの、枝のあるものなど、非常に多様である。
2. 巨大な馬力を必要とする。伐出適期の樹木は数tもの重さになる。また長さも20mを越すものもある。傾斜地での重作業は困難を極める。
3. 一方で繊細な作業も要求される。たとえば苗木植え付け後2, 3年は幼木を草から守るために苗木を傷めずに周辺の草刈をしなければならず、これが結構微妙な神経を必要とし、かつ重労働である。
4. 降雨時や積雪時でも動作しなければならない。すなわち全天候型である必要がある。

以上に挙げた諸条件は、林業作業の機械やロボット化を著しくコストのかかる、また技術的に困難なものとしています。

農林水産省森林総合研究所では、有人で傾斜不整地を移動できる車両機構を開発しています。今後、これにマニピュレータ技術を導入していけば相当有効なロボットとなる可能性があります(図-4, 5)。

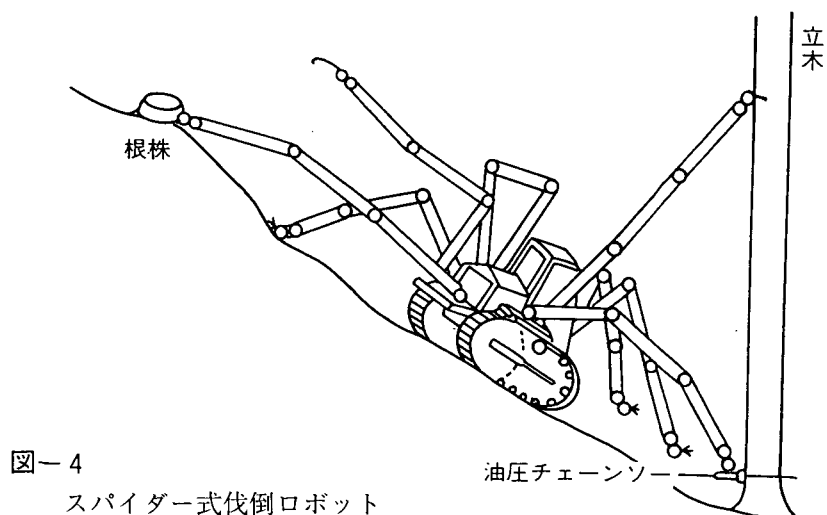


図-4
スパイダー式伐倒ロボット

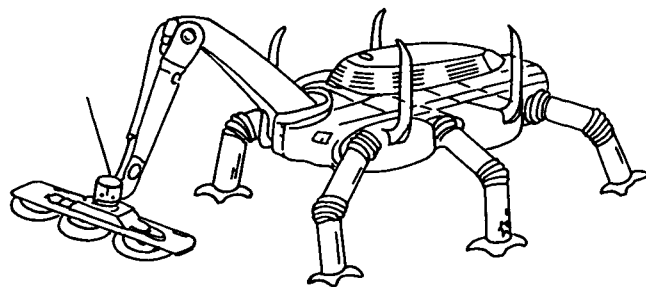
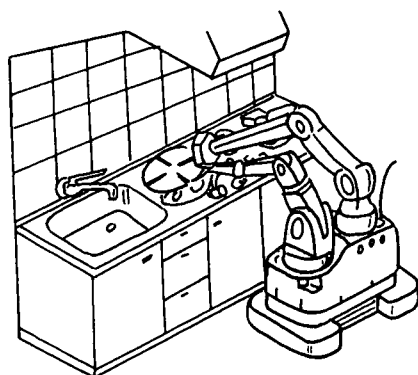


図-5 林内走行ロボットの想像図

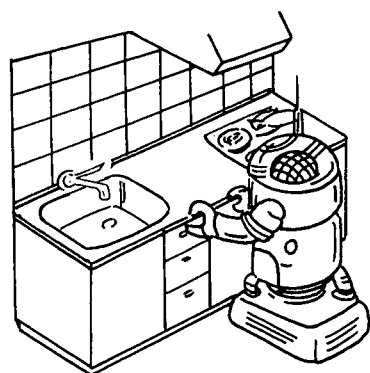
5. 3 ホームロボット

日本産業用ロボット工業会による、パーソナルロボットに対するイメージに関するアンケートがあります。これは図-6に示したような3種類のキッチンロボット（産業用ロボットふう、知能ロボットふう、人間形ロボットふう）を提示し、どのタイプが好きかを問うたものです。

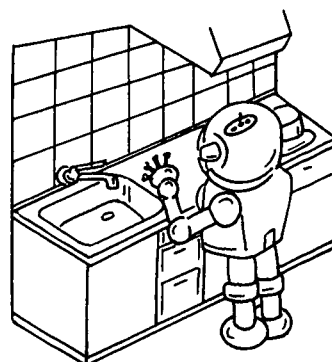
その結果は、人間形ロボット、知能ロボット、産業用ロボットの順と報告されています。ただし、人間形ロボットと知能ロボットはほとんど差がなく、第2希望までいれると知能ロボットが上位となり、また世代別にみたとき若い世代では知能ロボットタイプ支持がかなり多いです。



産業ロボットタイプ



知能ロボットタイプ



人間形ロボットタイプ

図-6 キッチンロボット

図からみても明らかなように、産業用ロボットふうはいかにも機械のイメージがありますが、他の2種はいずれも親しみのもてるデザインとなっており、イメージ的には両者は近いといえます。違いは手の形態、足の形態です。

このことから、ホームロボットの形態は環境適応能力のレベルによって変わってきますが、究極的には人間と同じ形が必然となるでしょうが、導入段階ではある程度の環境の標準化が行われ、知能ロボットふうの形態をとることになるでしょう。

5. 4 極限作業ロボット

極限作業とは、人間が作業するには極めて厳しい環境下での作業のことです。例えば原子炉の放射線、海中での水圧、火災現場の高温、送電線の高所と高電圧、宇宙の真空などがこの厳しい環境の代表的なものです。

すべての環境や作業に対して、これらの能力を1つのロボットで実現することは将来にわたって不可能です。そこで、適用できる環境を限定した汎用機能を持ち、人間の判断による遠隔制御とロボットの自律制御を調和した人間協調ロボットが実現可能な次世代先端ロボットです。

(1) 原子力ロボット (図-7)

原子力発電所などの放射線環境下での点検や保守などを人間に代わって行い、放射線暴露量の低減やプラントの信頼性向上を期待しています。これまでに開発してきた限定した作業の専用ロボットに比べますと、広範囲の作業を可能とする汎用性に特徴があります。

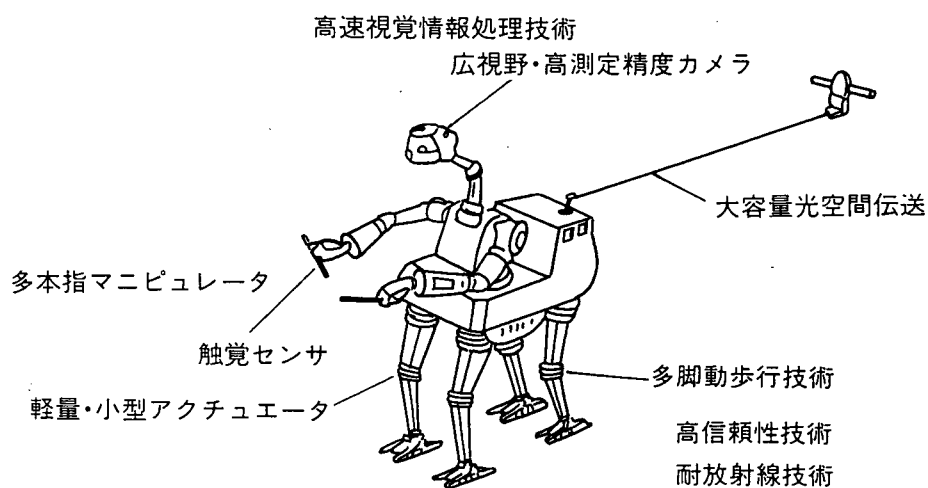


図-7 原子力ロボットの想像図

(2) 防災ロボット (図-8)

火災などの災害現場の状況把握、災害の拡大防止作業、救援などを行います。具体的には石油プラントの火災を対象としています。

次回は、建築関係のロボット化を紹介する予定です。

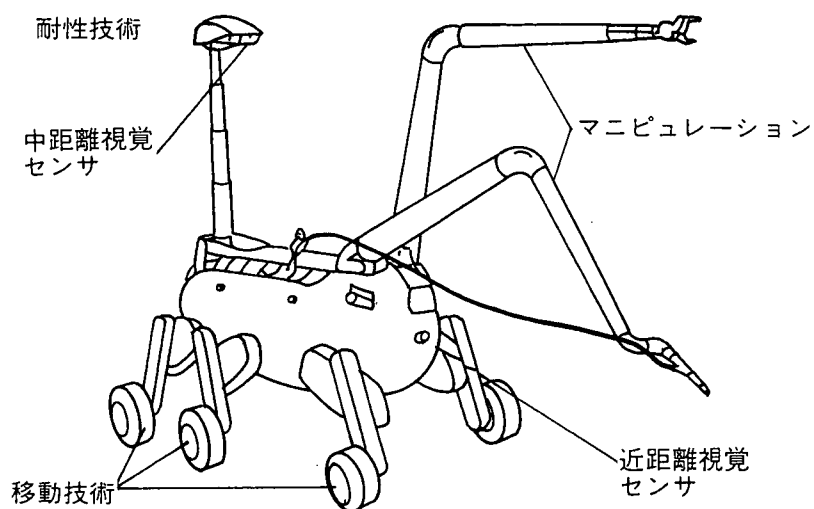


図-8 防災ロボットの想像図

建設ロボット 6（建築編）

－機械のロボット化と施工のロボット化－

1. 背 景

ここ数年、民間設備投資の増加等の内需主導による景気の拡大の中で、我国の最近の年間建設工事量は、米国やEC諸国を凌ぐ70数兆円に達しており更に日米構造協議に基づく公共工事の増大を加えると、やがて100兆円の大台に達することも予想されている。その中で、建設投資の6割を占める建築工事も、ビル建築ラッシュを始めとして、活発な民間建築活動が行われてきた。

このような工事量の増加傾向に対して鉄筋工、型枠工の技能工を中心として労働力不足が進むとともに、いわゆる3K（きつい、汚い、危険）に代表される印象により、建設業に魅力を感じなくなることにより若年労働者が減少し、高齢化が進んでおり、施工が需要に追いつかない状況にあり、技能者不足は一層深刻な問題となっている。

一方、単品生産、受注生産という建設業の特性、熟練労働者の不足と高齢化の進展による作業能率の低下等のほか、零細企業が多いことや生産システムが非効率なこと等により、生産性はここ十数年来低迷を続けている。

そこで、建設事業のイメージを、明るく、安全で、快適なものにするよう、今、官民あけて取り組んでおり、建築業各社では、メカトロニクスを利用する高度の技術開発によって、企業イメージの向上を図る

表－1 建築ロボット、自動化技術の現状

作 業	名 称	概 要
鉄 骨	自動玉掛外し装置	鉄骨組み立て時の玉掛外しを無線遠隔操作で実施
揚 重	クレーン自動運転システム	目的地を指示すると、安全で最短ルートを通してフックを自動的に移動
	クレーン監視システム	タワークレーンの動きをセンサ検出マイコン制御、相互干渉防止
コンクリート	コンクリートプレッシングクレーン	タワークレーン利用、ブーム先端ノズルからコンクリートを所定場所へ吐出
	水平ディストリビュータ	水平4関節ロボットで水平に動き、コンクリートを所定場所へ吐出
	鉄筋加工ロボット	鉄筋の曲げ加工、切断等を自動的に実施
	ユニット鉄筋配筋ロボット	ユニット毎に鉄筋を自動的に配置
	鉄筋組立ロボット	CADによる配筋図に従って、スターラップも含め自動的に組立、結束
	床均しロボット	高さ水平を自動制御するコンクリート均し作業ロボット
	床仕上げロボット	床仕上げ左官作業をリモコン又は自律移動で自動化
外 装 工 事	外壁塗装ロボット	ビル頂部に置いたルーフカーからユニットを下げて外壁を自動塗装
	外壁塗膜剥離ロボット	リフレッシュ用に外壁塗装を剥離するロボット
	外壁タイル検査ロボット	吊り下げ又は吸着でリモコン移動しながら外壁タイルを検査
	外壁板取付けロボット	外壁PC板を建屋内部から取り付ける操縦ロボット
内 装 工 事	天井パネル取付けロボット	天井パネルを持ち上げ、所定位置への取り付けビス止めを自動化
	天井作業ロボット	誕生面墨出し、切り込み、器具の取り付けロボット
	内装パネル取付けロボット	間仕切り壁材、内装パネル等の取付けロボット

とともに、労働者不足に対応する省力化、品質の安定化、生産性の向上を図ること等を目標に、近年目ざましい進歩を遂げたエレクトロニクス関連技術を始め、数多くの新技術を導入している。現在導入されている新技術として、設計段階ではコンピュータ利用による自動設計、自動製図、自動積算、現場施工段階ではマイコンによる工程管理、各種施工ロボット、また維持管理段階ではコンピュータ制御による設備・施設管理等があり、また各段階ごとにデータベースの拡充が進められている。

2. 建築ロボットの現状

このような背景の中で、建設ロボットは、1980年代中頃から現在に至るまで表-1にみるように様々な開発が積極的に進められてきた。

建築ロボットは様々な工種に対して開発されているが、特にクレーン監視システムやコンクリート床仕上げロボット、外装工事や内装工事用には、各種のロボットがそれぞれ各社毎に多くの企業で開発されている。この他にも、クリーンルームの検査ロボットや吹付けロボット等、多様な対象物や作業内容に応じた自動化機械が開発されている。1台で幾つかの作業を行わせるため、アタッチメントの取り替えによって把持機構を変えて処理する方法も研究されている。また、現場作業を少なくするため、梁、床、壁等をプレキャスト化して、機械によって現場で組み立てる工法を採用し、ユニット化したプレキャスト部材は、工場で鉄筋加工、配筋を含めて自動化する努力が払われている。

以下に、いくつかの建築ロボットを紹介する。

1) 外壁塗装ロボット

高所の危険作業から作業員を開放することを目的に、超高層ビルの外壁のリフレッシュ作業を自動化したロボットである。

屋上からワイヤーロープで懸垂され、目地部に設置されているガイドレールを案内に、スプレーガンを収めた塗装用フードを上下・左右に移動させながら外壁を塗装する。

2) 外壁タイル検査ロボット

外壁タイルの付着状態を自動的に診断できるロボットである。

屋上から懸垂されたチェンを嚙んで上下しながらタイルを打診して、その打音解析で診断する。

3) 天井パネル取付けロボット

天井パネルを供給し、持ち上げ、パネル背面の鋼製下地を高周波発振型近接センサにて検出し、パネルを所定位置にセットし、ネジ留めする。

フロア全面への作業足場の設置が不要になり、安全性と施工能率が向上する。

4) 外壁板取付ロボット

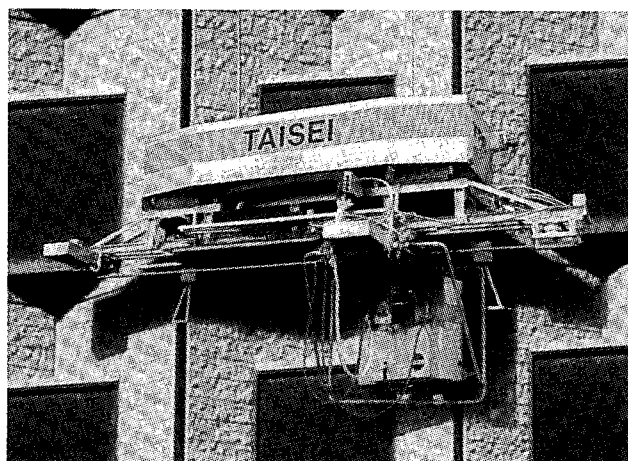
従来、外壁の取り付け作業は高所に外部足場を仮設し、クレーンによって吊り上げた外壁板を4人1組で取り付けていた。そこで、危険・苦渋作業の解消、省力化を目的に開発された。

外壁板をハンドリングアームで把持し、遠隔操作によって建築現場の各フロアを移動、屋内側から1mm単位の高い精度で所定の位置に取り付けを行える。

5) コンクリート床仕上げロボット

打設後の床のコンクリート表面を固化する前に平滑に仕上げるもので、従来の手作業による方法では前かがみの姿勢で作業しなければならず、苦渋度の大きな作業であった。

ロボットには羽のついた回転ゴてが2基装着されており、移動をしながら仕上げ作業を行う。障害物や動作の終端の壁をタッチセンサが検知すると、自動的に方向転換を行って作業を続ける。



写真－1 外壁塗装ロボット



写真－2 外壁タイル検査ロボット

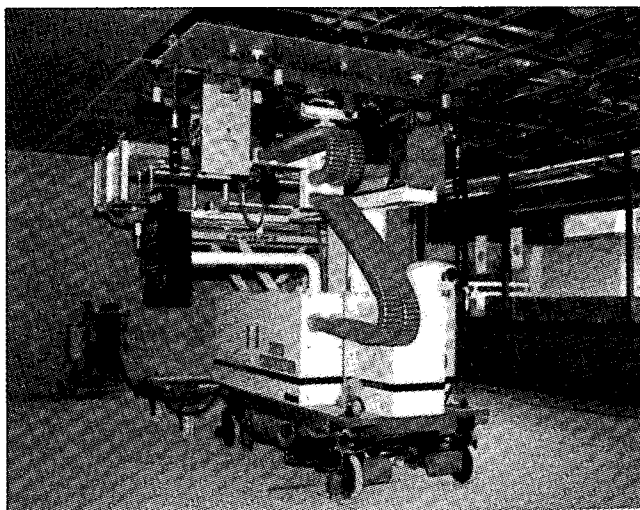


写真-3 天井パネル取付けロボット

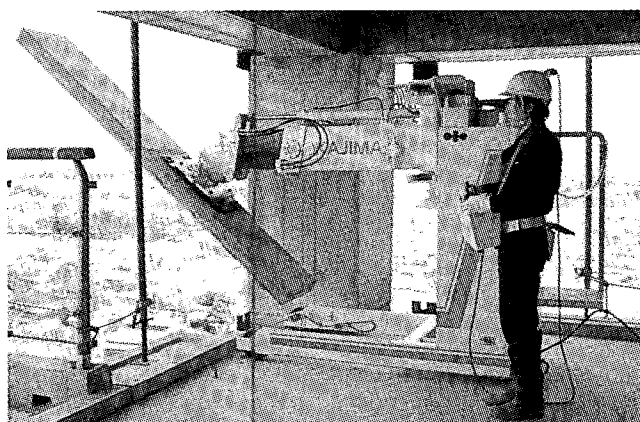


写真-4 外壁板取付けロボット

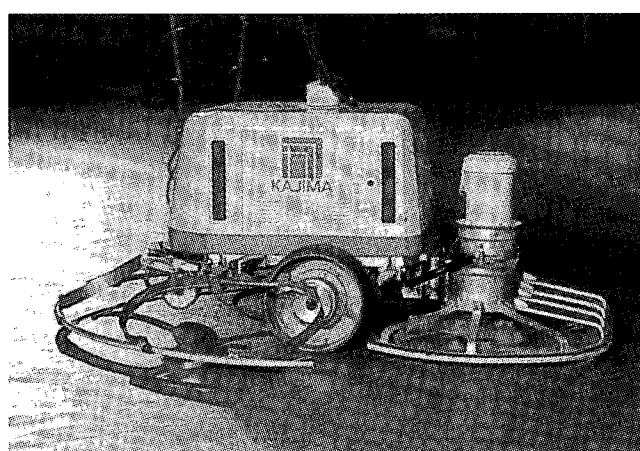


写真-5 コンクリート床仕上げロボット

3. 問題点

以上のようにかなりの種類のロボットが研究・開発されているが、1部を除くとなかなか普及していないのが現状である。より盛んな研究・開発及びロボットの普及のためには、建築産業固有の解決しなければならない問題も少なくなく、それらは次のように整理される。

3. 1 技術的な問題点

- 1) 作業や対象物等が規格化・標準化が進んでいない。
- 2) 作業工程が多く、また各工程間に連続性が少ない。
- 3) ハンドリング重量が大きいのに、ロボット自体の軽量化が求められる。
- 4) 作業現場が一定でなく、ロボットが動きまわらなければならず、かつその足場が不安定である。
- 5) 人間との作業が多く、安全性等の必要十分な対策が必要である。
- 6) 設計の標準化ができていない。設計者が多く、また各々が特異性を発揮することから、工場生産化したプレハブについても生産性が伸びない。

3. 2 建築産業の持つ構造的な問題点

- 1) 作業時間の制約が多く、稼働率が悪くなりがちである。
- 2) 建築産業は下請精度で成立っており、企業固有の技術というものが育ちにくい。また、材工式発注は自動化できるが、労務発注は自動化できない。
- 3) ロボット導入の成果として期待されるものの1つに品質保証が挙げられるが、建築物の品質に対する定量的な評価手法が確率されていない。
- 4) 土木工事と異って民間発注の割合が多く、政策的判断に基づく技術の導入がしにくい。

4. 今後の方向性

これまでの方法では、手作業を中心とした在来の技能が生きる生産システムのなかで、単機能のロボットを活用してきた。しかし、左官とか吹き付けとか、単に人間の作業をロボットに置き換えるだけの個別作業のロボット化では、苦渋作業の解消や災害の防止については効果があるが、生産性の向上には限界があることがわかってきた。そのため、ロボットの全面的使用による機械施工を前提とした工法について設計、構造面など様々な角度から検討する必要がある。

そこで、設計にまで立ち入って、構・工法の検討も含めて、旧来の建築生産体制の枠を越えた、自動化工法に適した新しい建築生産システムを開発する方法の研究開発が大手ゼネコンの間で進められてきている。これは、建築生産システムを、複数のロボット集団を有機的に組み合わせて、全体をコンピュータで制御するようなロボット中心の生産システムに変革することにより、省力化を図り、生産性の向上に結びつけようとするものである。

この代表的な例として、ゼネコン各社により研究・開発されているビル建設自動化システムが挙げられる。この1例を図-1及び2に示す。

建設現場には床仕上げやコンクリート打設などのロボット導入が活発化しているが、個別作業のロボット化では生産性向上に限界がある。

また、躯体工事中は床筋や梁型枠鉄筋等で足元が悪いこと、床上に重い機械を載せられない等の制約条件の多さが、機械化・自動化施工を困難にしていた。

そこで発想を変えて、床の上を歩くロボットではなく、上から下へ降りてくるロボットであれば、床面の凹凸、障害物、床積載荷重の制限に関係なく作業が進められるとの考えに立ち、ロボットを吊り下げるための天井走行クレーンと、それを受ける天井梁を設け、それらをリフトアップする機構により、ロボットの全面的使用により機械施工を前提とした工法になり得たものであり、製造業と同じ感覚で現場施工を行えるものである。

今後も施工の合理化等のために自動化・ロボット化は進められ、その方法として以上のように、機械単体の高度化とともに、施工システム自体も機械化・ロボット化が前提とされてものが開発されていくであろう。

次回は最終回として、ロボットの施策的位置付けや方向性等を述べていく予定である。

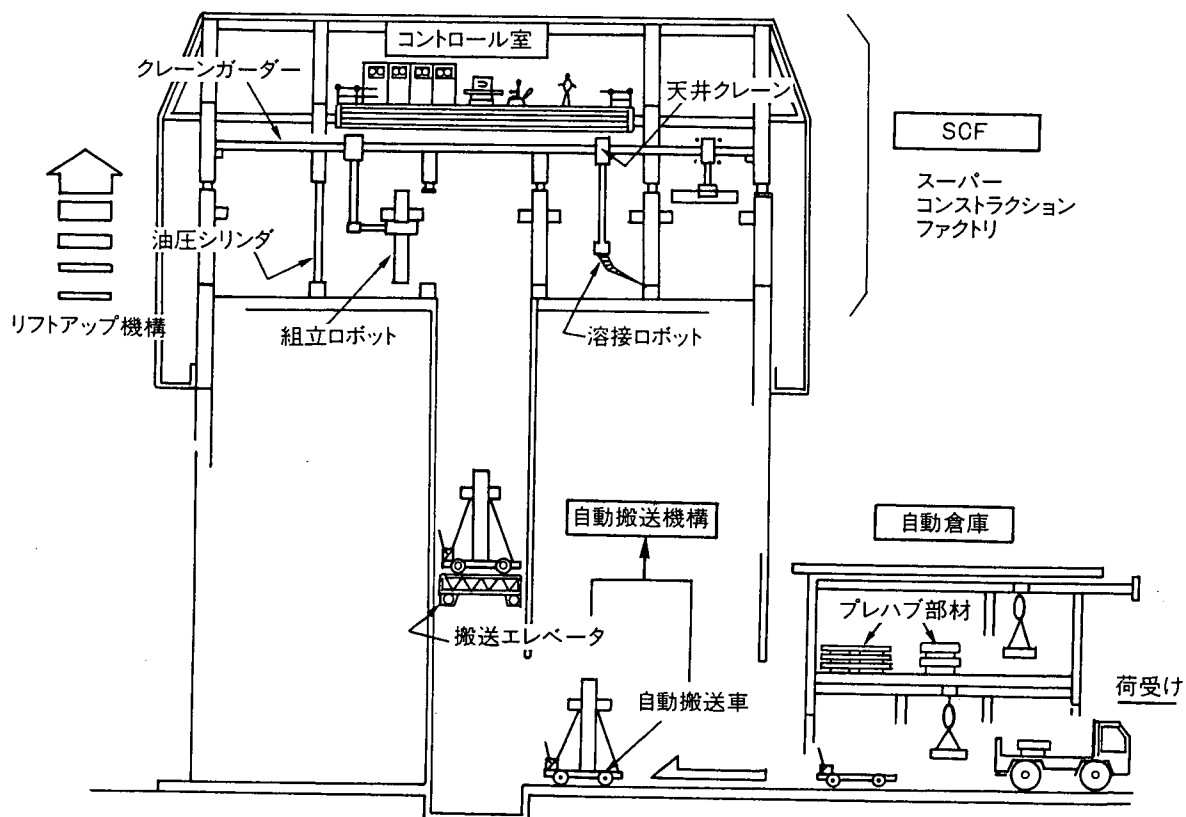


図-1 ビル建築自動化システム（全体図）

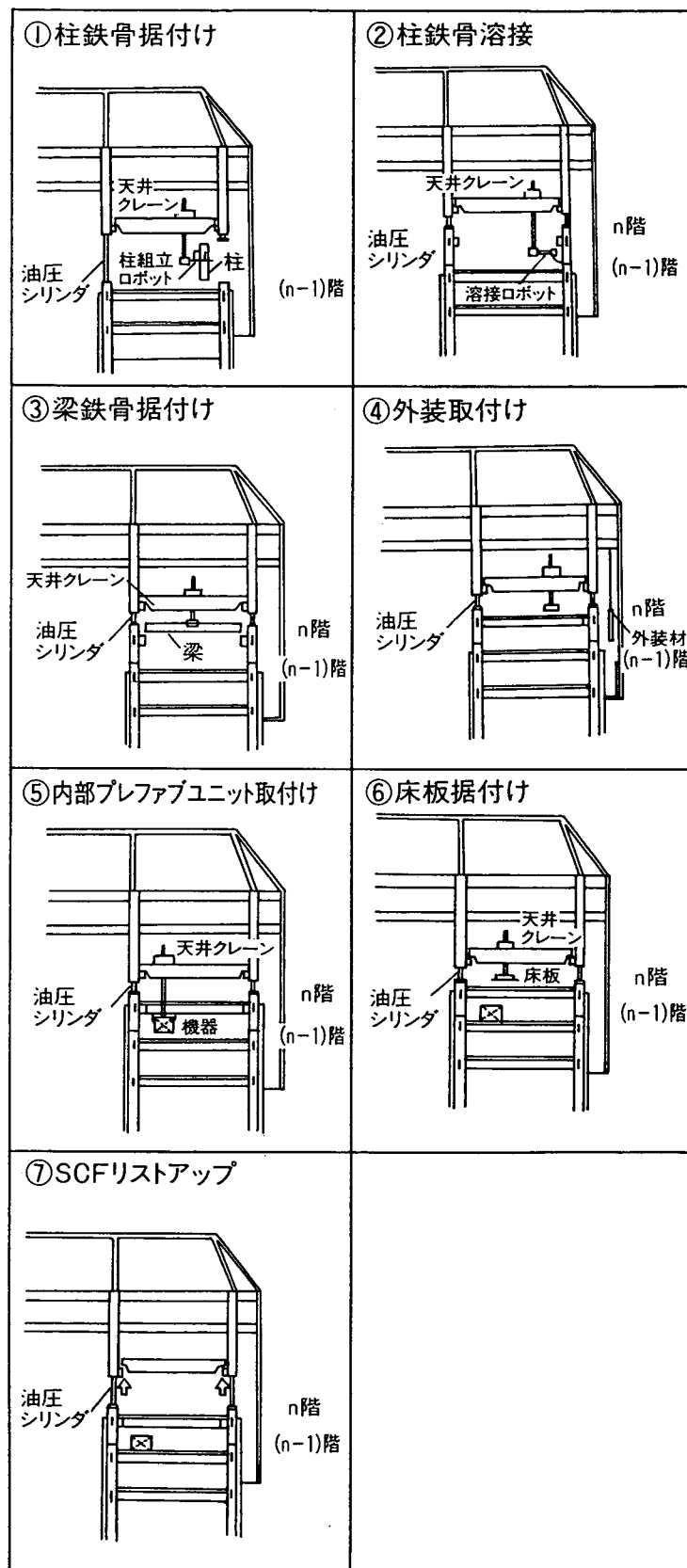


図-2 ビル建築自動化システム (施工手順)

参考文献

- 1) 「建設用ロボット」, 建築ロボット研究会,
- 2) 山崎裕ほか, 「建設工事における自動化技術の展望」, 建設の機械化 '88. 6
- 3) 長谷川幸男, 「建築作業システムロボット化の現状と緒課題」, 油圧と空気圧1991年 5 月
- 4) 赤松惟央, 「建設作業ロボット化の促進」, 油圧と空気圧1991年 5 月
- 5) 森哲郎, 「全自動ビル建設システムと技術開発の課題」, 油圧と空気圧1991年 5 月
- 6) 「建設工事のメカトロニクス化の現状と将来」, 機関誌編集委員会, 建設の機械化'82. 3
- 7) 田中康之, 「建設ロボットの概況」, 建設の機械化'88. 6

建設ロボット7（展 望）

1. 建設産業におけるロボット化

最近の建設投資は着実な伸びをみせ、平成2年度における建設投資額はG N Pの約18%に相当する77兆円余りと見込まれている。さらに、日米構造協議に対応し、欧米諸国と比較して整備が遅れている住宅・社会資本を充実させるために、平成3年度からの10年間にわたり430兆円の公共投資額を「公共投資基本計画」として定めるなど21世紀に向けて積極的な建設投資の方向が示されている。

この様な状況において、建設作業は、いわゆる「3 K」（危険、きつい、きたない）作業の典型と目されている。また、一般に屋外の自然環境下で作業が行われ、取り扱う対象物が重量物や大形物である場合が多く、作業員に対する労働負荷が大きい。さらに、振動・騒音・粉塵飛散等の悪環境下での作業も少なくない。このため若年労働者の新規入職や入職者の定着率は非常に低くなっており、ある統計によれば、建設機械のオペレータは、10年前は50歳以上が10%以下であったものが、今日では約25%程度となり、新規入職者は1～2年程度で30%に減少するという報告もある。

これらに対応するためには、省力化、施工能力の向上等を図るための施工合理化・ロボット化の推進が不可欠である。

しかし、建設現場には種々の制約条件があり、工場用ロボットをそのまま導入してもなかなかうまくいかないことが多い。即ち、①構造物は移動せず、ロボット側に移動機能が必要であり、固定設備とならず②ハンドリングする材料等が重量大形物であるにもかかわらず、数ミリ単位での位置決めが必要であり③単品生産的要素が強く、施工現場が時々刻々と変化する。等の技術課題に取り組んでいかなければならない。

これらの課題に対処するために開発改良していかなければならない技術をランダムに列記すると、大型部材や機械の搬送・制振・姿勢制御・高速高度精度位置決め技術、作業主体（すなわち建設ロボット）の移動機構、施工ノウハウの知識データベース化、建設現場の悪環境に耐える各種センサ技術等が挙げられる。

また、併せて、建設ロボットによる施工に適した構造物の設計法や施工法が必要になる。さらに、作業方法や工程計画もロボットの導入を前提とした手法が導入される必要がある。

2. ロボット化の施策

ロボット化の推進にあたっては、各種団体等において活発に活動がなされていますが、建設省では建設大臣の諮問期間である建設技術開発会議の施工合理化部会の中に施工合理化技術開発専門部会を設け各種検討を行っている。

施工合理化技術開発専門部会では、建設ロボッ

表－2 メカトロ税制の対象となる建設ロボット

	ロ ボ ッ ト 名	適 用
1	コンクリート床仕上げロボット	平成2 年度より
2	外壁塗装ロボット	
3	コンクリート吹付けロボット	
4	ロボットトリルジャンボ	
5	ロボットアスファルトフィニッシャ	
6	外壁検査ロボット	平成3 年度より
7	自動玉掛け外しロボット	
8	コンクリート打設ロボット	

表-1 ビジョンに示された建設ロボットの例 (1/2)

構 造 物 対 応					工 種 対 応					
構造物名	工 種	開発課題	段階的開発課題	当面課題	工種名	工 種	開発課題	段階的開発課題	当面課題	
山岳トンネル（発破工法）	準 備 工	前方地質予知システム	センシング技術の開発	○	土工（一般土工・盛土工）	全 工 程	土工情報管理システム	土工情報管理支援システム	○	
		測量・マーキングシステム	測量マーキング技術	○		掘 削（切 土）	ロボットブルドーザ	負 荷 検 知 装 置	○	
	掘 削	多機能ロボットジャンボ	半自動ロボットジャンボ	○				自己位置検知装置	○	
		ワイヤレス発破	ワイヤレス発破用雷管	○				姿勢制御装置	○	
	ズリ搬出	積込み、運搬システム	ズリ積込みの遠隔操作 連続ズリ搬出システム	○			ロボットパワーショベル	バケット位置制御装置	○	
								自己位置検知装置	○	
	支 保 工	支保工建込みロボット	多関節多機能型支保建込み機械	○					姿勢制御装置	○
		吹付けロボット	半自動吹付けロボット	○			積込位置画像監視装置	○		
		吹付けに代わるライニングシステム	吹付けに代わるライニングシステム							
		多機能ロボットジャンボ	半自動ロボットジャンボ	○						
	二 次 覆 工	シート貼りロボット	シート貼り機械			土工・法面工	積 込 み（切 土）	ロボットパワーショベル		
		シートに代わる防水システム	シートに代わる防水システム				運 搬（切 土）	ダンプトラック無人運搬トラック	無人ダンプトラック	○
		多機能セントル	多 機 能 セ ン ト ル				敷 均 し（切 土）	ロボットブルドーザ		
同上（自由断面TBM）	準 備 工	前方地質予知システム	センシング技術の開発	○	掘 削（盛 土）		締 固 め（盛 土）	ロボット振動ローラ	振動ローラの遠隔制御	○
		測量・マーキングシステム	測量マーキング技術	○			法 面 清 掃	法面用コンクリート吹付けロボット	法面形状計測装置	○
	掘 削 工	多機能自由断面掘削機	掘削システム	○					法面形成ロボット	
			掘削能力の向上	○	ラス張・アンカピン打設・水抜きパイプ自動設置ロボット				○	
	掘削機の決め装置		○	コンクリート吹付けロボット	○					
	ズリ搬出		可動積込み機械		土工（表層混合）		天日乾燥工	堀 削 機	堀削機の遠隔操作	
			高性能ズリ積込み機				土質改良材混合工	土質改良システム	土質改良機の遠隔操作	○
	掘 削	掘削制御システム	掘削能力の向上	○			プラント処理工	改良土処理プラント	含水比自動検出装置	○
			可動積込み機械				基礎工（ニューマチックケーソン）	刃口据付工 躯体構築工 機 装 工	躯体のプレハブ化 プレキャスト部材の組込システム	土 質 判 定 装 置
	準 備 工		自己位置検知システム	自動測量システム	○					掘削沈下工
			自動方向制御システム	○	躯体形状の標準化	○				
	同上（全断面TBM）		掘 削	掘削制御システム	掘削機の決め装置	○	地耐力試験	地耐力試験ロボット	シャフト・ロックの接続方法簡素化	
		可動積込み機械				姿勢制御システム				
ズリ搬出		積込み、運搬システム	ズリ積込みの遠隔操作 連続ズリ搬出システム		○	掘削パターン標準化による自動掘削	○			
		連 続 ズ リ 搬 出 シ ス テ ム			地耐力試験			地耐力試験ロボット	掘削バターン標準化による自動掘削	
支 保 工		支保工建込みシステム	支保工建込み機械				中詰コンクリート		コンクリート充填確認	コンクリート充填確認システム
		全自動シールド	自動掘進管理システム	○	頂 版 工	頂版工のプレハブ化		プレハブ化設計法の開発		○
土圧式シールド		排 土 工	搬出システム	排土量の自動計測システム	○	躯体構築工	プレキャスト部材の組込	躯体形状の標準化	○	
				自動運搬システム				掘削沈下工	自動掘削排土 圧入システム	大型断面掘削機
	作泥土材注入	土質による対応システム			掘削沈下工	地耐力確認水中試験ロボット	自動掘削・掘削土処理システム			
				頂 版 工			頂版工のプレハブ化	プレハブ化設計法の開発	○	

表-1 ビジョンに示された建設ロボットの例 (2/2)

構 造 物 対 応					工 種 対 応				
構造物名	工 種	開発課題	段階的開発課題	当面課題	工種名	工 種	開発課題	段階的開発課題	当面課題
泥水式シールド	掘 進	全自動シールド機	自動測量システム	○	基礎工(バケット工法)	掘 削 法	自動掘削制御システム	位置検出装置	○
			自動掘削管理システム	○				指示地盤確認装置	○
			セグメント組立ロボット	○		安 全 液 工	安全液管理システム	安全液管理基準の確立	
			裏込自動注入	○				安全液性状測定システム	○
	坑内搬送	無人搬送システム	土質対応型排土処理システム			スライム処理工	スライム処理ロボット	スライム処理基準の確立	
			坑内無人搬送システム	○				スライム量測定装置	
	延長工事	延長工事の自動化	送泥管自動延長システム			鉄筋籠・製作工	鉄筋組立ロボット	鉄筋組立機	○
			自動清掃システム					鉄筋籠建込み機	
			コンクリート自動打			鉄筋籠・建込み工	鉄筋籠建込みロボット	鉄筋組立機	○
			自動型枠	○				鉄筋組立機	
コンクリートダム(RCD工法)	二次覆工	コンクリート打設システム	コンクリート自動打		基礎工(アースドリル)	コンクリート工	コンクリート打設ロボット	天端測定装置	
			自動型枠	○				無はつり工法の開発	
			コンクリート急速打設システム			壁頭処理工	壁頭処理ロボット	無はつり工法の開発	
			コンクリート急速打設システム					自動水平装置機構	
	鉄筋組立	鉄筋籠組立システム	鉄筋籠継手接合ロボット	○		掘 削 工	多機能アースドリル機	垂直掘削システム	○
			自動型枠	○				半自動掘削システム	○
			コンクリート打設システム	○		安 定 液 工	安定液管理システム	安定液性状測定シス	○
			コンクリートプレス管理システム	○				鉄筋組立機	○
	全 工 程	広域監視システム	鉄筋籠継手接合ロボット	○		鉄 筋 工	鉄筋組立ロボット	鉄筋組立機	○
			自動型枠	○				スライム量測定装置	
			コンクリート打設システム	○		二次スライム工	スライム処理機	スライム量測定装置	
			コンクリートプレス管理システム	○				天端測定装置	
	原石採取工	削孔・装薬システム	削孔装置	○		コンクリート工	コンクリート打設システム	天端測定装置	
			自動ブルドーザー					無はつり工法の開発	
			ブルドーザーの遠隔操作			杭頭処理工	杭頭処理ロボット	無はつり工法の開発	
			自動ホイルローダ					掘削中の精度管理と方向制御システム	○
	堤体掘削工	自動ブルドーザー	ブルドーザーの遠隔操作		基礎工(場所打杭リバース工法)	掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			ブルドーザーの遠隔操作					掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			自動ホイルローダ			掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			ブルドーザーの遠隔操作					掘削中の精度管理と方向制御システム	○
	基礎処理工	自動ボーリング機械	自動ボーリング機械			掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			自動ボーリング機械					掘削中の精度管理と方向制御システム	○
	骨材コンクリート製造工	全自動パッチャープラント	オーバーサイズ等自動除去システム			掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			骨材品質試験システム					掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			骨材品質試験システム			掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			骨材品質試験システム					掘削中の精度管理と方向制御システム	○
	コンクリート運搬工	高機能コンクリート圧送システム	ダム用コンクリートの圧送			掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			ダム用コンクリートの圧送					掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			ディストリビュータ			掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			コンクリートポンプ自動運転					掘削中の精度管理と方向制御システム	○
	コンクリート打設工	自動ブルドーザー	主ベルトコンベアのリフトアップの自動化	○		掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			主ベルトコンベアの自動化	○				掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			ベルトコンベアの計量化	○		掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			ベルトコンベアの計量化	○				掘削中の精度管理と方向制御システム	○
	表面処理養成	自動ブルドーザー	ブルドーザーの遠隔操作	○		掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			ブルドーザーの遠隔操作	○				掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			自動振動ローラ	○		掘 削 工	自動掘削システム	掘削中の精度管理と方向制御システム	○
			自動振動ローラ	○				掘削中の精度管理と方向制御システム	○

トによる施工の推進の基本となる項目を「施工合理化技術開発の基本方針」に、さらに技術開発の方向性を示すために21世紀初頭の建設施工のあるべき姿を「施工合理化技術開発のビジョン」として取り纏めをおこなっている。このビジョンの開発課題を例示すれば、表1のようになっている。特に、○のついた課題は、当面5年間のうちに早急に着手すべき課題であり、施工新技術総合技術開発プロジェクト等の各種施策で取り組みがなされている。今後とも着実に実行していく必要があると思われる。

また、建設ロボットを取得する際の初期投資負担を軽減するため、「中小企業新技術体化投資促進税制（通商：メカトロ税制）」のなかで建設作業用ロボットに税制上の優遇措置がされる（表2参照）。この税制は、中小企業の建設作業用ロボット取得への支援措置が講じられたものであり、今後は、建設ロボットの導入に積極的な大企業や建設機械器具賃貸業にも適用されることが必要である。また、機種的大幅な拡充も必要であろう。

さらに、建設ロボットとにつきましてはまだ開発途上にあり、その信頼性が確率されていないという現状があるため、ユーザが安心して建設ロボットを購入できるように、建設ロボットについての情報を的確にユーザに提供するとともに、一定レベルに達しているものを建設省が認定していく「建設ロボット認定制度」について検討が進んでいる。

3. 建設事業の効率的な執行

ところで、建設事業の効率的な執行を実現するためには、施工機械単独の完全のみならず機械化施工全体を考慮した新たな改善策が求められている。

建設事業の機械化施工は、概ね昭和20年代に始まり、油圧駆動方式の導入、大型化などの改善がなされてきた。この時期は、建設機械がその出力を大きくすることによって施工効率を高めてきたといえる。その後、困難な工事条件での施工、長大化や巨大化への取り組みが数多く行われてきた。

それらの取り組みにおいては、多種多様の建設機械と施工法が密接に結びついている中で、改善の対象とする工種・工程・機械を単独に抽出し、経験者に依存しながら改善を実施している。その上、このような方法での改善におきましては、改善の効果が客観的に評価されていることが少ない。

このため、複雑な作業手順によって組み立てられている建設工事に対して、分析的・定量的な記述手法を開発することによって、客観的な問題表現と解決への合意形成に基づく作業改善、機械化あるいはロボット化を推進し、生産効率の向上・安全の確保・苦渋の低減に資することが必要であり、その手法としてIE（industrial engineering）の適用が考えられ、今後は活用されるようになるであろう。

4. 建設ロボットの今後

現在、建設ロボットとして各種開発が行われているが、その数は100台程度である。その理由として第一に挙げられるのは、前述のようにそれ自体では経済的に引合ないことにある。第二には現場の施工条件に合わないためうまく使いこなせないことがある。その原因としては機械の耐環境性の問題や施工条件とのミスマッチがあげられる。このほかメカトロ機を扱える現場作業員の不足の問題もある。

従って今後ロボット化を進めるためには、

- ① ロボットを導入し易い形に変えてもらうことが必要になる。例えば施工単位を大きくし、途中の障害物をできるだけ減らすなど。
- ② できるだけ広い施工条件に適合できるロボット（できれば汎用機）を開発し、量産してコストを下げる。
- ③ 取扱いの容易な（専門家の不要な）ロボットとする。

などの方策が必要です。

産業用ロボットでは最近知能ロボットの開発が盛んであるが、建設工事用ロボットはもともと知能ロボットの働きを要求されるものが多く、その意味ではまだ未来のものというべきで、いわゆる人工知能（AI）の進歩に大きく期待したい所である。また建設工事は1台の機械で行われることよりも、複数機で施工されるケースが多い。従って一機種のみのロボット化は効果が減殺されるわけで、システムとしてのロボット化が望ましい。その場合必要な技術は群制御技術と通信技術で、現在進められているこれらの技術の開発結果も建設ロボットの開発に大きく寄与することが期待される。

5. さいごに

建設のロボット化は、夢の段階から具体的な段階を迎え益々活況を呈していると言える状況にあるが、開発や宣伝することに目を奪われ、その目的を忘れてしまうことがないようにマネジメントの視点を忘れず産学官が総力を結集する姿勢を忘れないで欲しいと願うものである。

また、本シリーズをまとめるにあたって御指導を頂いた（社）日本建設機械化協会自動化委員長田中康之氏と貴重な写真や資料を提供いただいた関東地方建設局及び関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森一, IE—インダストリアル・エンジニアリング, 建築の技術1980年1月号, p. 55
- 2) 建設省, エレクトロニクス利用による建設技術高度化システムの開発 (1988)
- 3) 坂本重泰, IEの見方・考え方, 日本能率協会 (1980)
- 4) 小野敏郎, 「工場から出るロボット」発刊に際して, 日本機械学会, 1990年12月号, p. 1
- 5) 前田純一郎, 建設用ロボット, 日本機械学会, 1990年12月号, p. 14
- 6) 建設機械化の40年
- 7) 建設機械要覧, 建設用ロボット, p. 1451
- 8) 田中 建設の機械化, 1988年6月号, p. 15
- 9) 田中 建設の機械化, 1991年4月号, p. 57
- 10) 建設技術開発会議, 施工合理化のビジョン

建設ロボットの現状調査報告
(その1)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3055号
平成4年3月 (1992)

杉山 篤, 野村正之
高津知司, 梶田洋規
竹田英之, 山中勇樹
茂木正晴, 米村克己

要旨 現在, 建設ロボットと称する施工機械が数多く世に出されているが, それらの建設ロボットに付いて歴史的背景を踏まえて分類整理をし, ビジョン形成をされて得るとは言い難い。
そこで, 過去にさかのぼり建設ロボットに付いて用途別に分類整理を行い, 建設ロボットのビジョンを整理を行った。
なお, 本資料は土木技術資料に連載されたシリーズ「建設ロボット」をベースに構成されている。

キーワード: 建設ロボット, 歴史, 展望

○

郵便はがき

41円切手
をはって
下さい。

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

機械研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料 第3055号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印