

## 5. 建設用ロボットの安全制御技術に関する検討委員会の報告と今後の研究課題

池田博康\*, 梅崎重夫\*, 佐々木哲也\*, 清水尚憲\*  
富田 一\*\*, 呂 健\*\*, 大幢勝利\*\*\*, 高梨成次\*\*\*

### 5. Report of the Investigation Meetings on the Safety Control Technology for Construction Robots and Research Subjects

by Hiroyasu IKEDA\*, Shigeo UMEZAKI\*, Tetsuya SASAKI\*, Shoken SHIMIZU\*,  
Hajime TOMITA\*\*, Jian LU\*\*, Katsutoshi OHDO\*\*\* and Seiji TAKANASHI\*\*\*

**Abstract:** In many cases, the construction industry is, unlike production industry at large, comparatively dependent on manual work based on judgments by workers as there are a few repetitive work. For this reason, industrial robots used in manufacturing are not adequate to be applied construction sites. In fact, the construction robots are required to have transfer technology and high-grade intelligence, which are beyond the technological category of the current industrial robots, but the current construction robots have not yet reached such a high technological level. Particularly, as to the robots moving around in an environment in which they are working jointly with human workers, unless the safety technology for assuring safety for the human workers has been established, the construction robots would not easily spread.

Under the circumstances, our institution held an “Investigation Meeting on the Safety Control Technology for Construction Robots” for the purpose of identifying safety and technological problems with the current automatic construction systems and construction robots. This meeting was held four times in total. The institution listened to the attended experts in robots from major construction companies and universities about the subject together with the presentation of construction robot introduction cases, and discussed problems with the automatization of construction work.

This chapter summarizes examples of the automatization and robotization of construction work, describes the current technology for such automation and robotization, and identifies the problems with such automatization discussed at the meetings.

The construction robot introduction cases to be covered in this report encompass a wide applications, including material installation, concrete floor finishing, concrete placing, fire-resistant coating material spraying, external wall installation, material transfer, welding and interior construction. On the other hand, element technology cases for the automatization and systematization of construction work encompass automatic building construction system, automatic crane and high-place work, remote control, environment (sign) recognition, handling, teaching, etc.

As for the safety and technological problems, typical items were picked up from each field related to sensing, manipulator and transfer mechanism, control and system, and analyzed. As a result, the limited applications of the current general-purpose robot technology and the immaturity of the safety related technology were brought into sharp relief. That is, it was found that the performance of assuring the safe motion of movement and manipulation had not yet been realized, and the safety

\* 機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division

\*\* 物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

\*\*\* 建設安全研究部 Construction Safety Research Division

control of controllers and communicators had not yet been established. It was also found that there were many assignments to be fulfilled before developing the construction robot, such as the risk assessment of special working environments different from factories and designs.

Based on the above investigations and findings, this chapter summarizes the problems to be solved and the possibility of solutions to such problems.

**Keywords**; Construction robot, Safety, Safety control, Automatization and robotization, Investigation

### 1. はじめに

建設用ロボットは、生産・施工システムの中でその中核を担う重要な要素の一つであり、生産技術と施工技術を融合するシステムとして研究・開発が進められている。我が国では、製造業における産業用ロボットの普及に伴い、世界に先駆けて1970年代後半から建設工事ロボットの研究が始まった。実際、非製造業分野へのロボット導入の期待は、建築・土木分野が極めて高く<sup>1)</sup>、当初は、いわゆる3K（危険、きつい、汚い）作業の低減と代行、及び建設需要増大に伴う労働力不足の解消と作業効率を向上させる手段として期待されてきた。

しかしながら、建設作業は比較的作業者の判断に基づく手作業に依存することが多く、また、工場内とは異なる作業環境のために、製造業で使用されている産業用ロボットをそのまま適用することは難しい。実際に、移動技術や高度な知能化など、現状の産業用ロボットの技術範疇を超える能力が要求されるにもかかわらず、それらの基盤技術が十分活用できるレベルまでは至っていない。特に、柵でその動作範囲を囲うことのできない移動する建設ロボットが、人に対する安全を確実に確保する技術を持たない限り、建設用ロボットの普及は困難であろう。現実には、実用化されている建設用ロボットは、無人の作業環境下で動作するものや作業者が建設機械を遠隔操作する形態が多い<sup>2,3)</sup>。

このような状況を踏まえ、当所では、人間が共存する作業環境下で動作できる建設用ロボットの安全技術の開発研究を進めている。そこで、現状の自動施工システムや建設用ロボットについて、先ず、安全上の問題点を把握し、今後当所で取り組むべき安全関連技術の課題を抽出することを試みた。そのため、建設用ロボットや関連技術の専門家からなる「建設用ロボットの安全制御技術に関する検討会」を開催し、各専門家から建設用ロボットの事例を説明いただくとともに、建設における施工自動化の問題点と課題について検討を行った。

本章では、建設作業における災害状況と現状の自動

化・ロボット化技術を概括するとともに、検討会で審議された施工自動化の問題点と課題を抽出する。特に、センシング、マニピュレータと移動機構、制御、システム関連の各分野について分析を加え、人共存環境での安全な移動動作とマニピュレーションを保證する機能について検討して、今後取り組むべき研究課題について考察を加える。

### 2. 建設作業における災害とロボット導入の現状

#### 2.1 建設機械による災害発生状況

建設業における労働災害は、長期的には減少傾向にあるものの、重大災害の発生件数については近年横ばいの傾向を示している<sup>4)</sup>。しかし、死亡災害者数は792人（平成11年）であり、これは全産業における死亡者数の約4割と依然として高い数字である。

死亡災害を種類別に見ると、Fig. 1に示すように、墜落・転落による災害に次いで建設機械等による災害が高いことが分かる。建設機械等による死亡災害者数は、平成10年までは全死亡災害者の2割以下で推移していた<sup>5)</sup>が、平成11年に初めて21.4%になった。その内

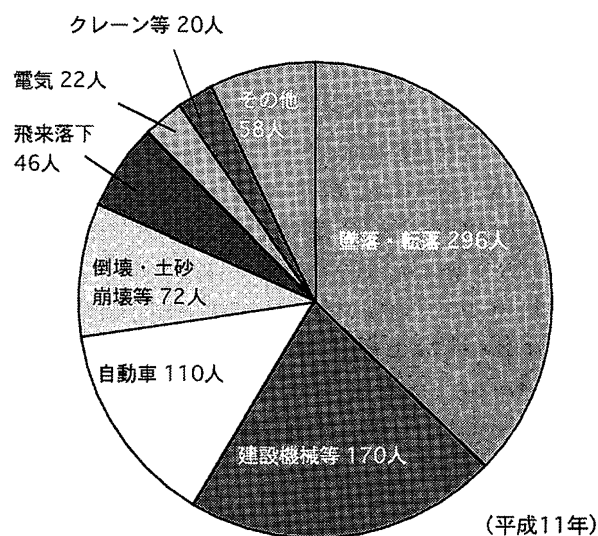


Fig. 1 Fatalities by cause type in construction industry. 建設業における死亡災害の種類別発生状況

訳は、パワーショベルとローラーで半数以上を占める。全産業における機械設備による死傷者数を見ても、一般動力機械や動力運搬機械等は年々下がっているのに対して、建設機械等は横ばいからやや増加傾向にあり<sup>4)</sup>、災害低減が難しいことを示している。

建設機械等の死亡災害の発生状況は、油圧ショベルによる挟まれ・巻き込まれと転落・墜落が非常に多い<sup>6)</sup>。これは、油圧ショベルの稼働台数が他の建設機械に比べて圧倒的に多いことによる。詳細を見ると、ショベル運転者は路肩の崩壊等により機械が転倒、転落する場合が、周辺作業者は運転者が操作するショベルとの接触、衝突が多い。

このような機械周辺に作業者の存在する作業環境で、運転者がマニュアルで機械を操縦する形態では、種々の安全装置が装備されるにもかかわらず、確実に災害を防止できるものは少ない。その上、災害要因を調べると、機械の誤操作とともに安全装置の無効化等の人間の不安全行動が無視できず<sup>7)</sup>、安全方策が有効に機能していないことが推察される。

一方、建設用ロボットについては、稼働状況が乏しいために災害統計がないが、従来の建設機械と自動化機械・産業用ロボットを合わせた災害が想定される。特に、移動するという特性故、想定される災害にはロボットのハードウェア/ソフトウェア、環境、人間という3つの要因が絡むことになる<sup>8)</sup>。建設用ロボットであっても、基本的に動作停止すれば安全を確保できるわけであるから、ロボットハードウェアに安全技術を導入することを第一義に考える必要がある。

## 2.2 建設用ロボット開発動向

現在、建設用ロボットは産業用ロボットメーカーではなく、ユーザであるゼネコンを中心とした建設業界で開発されている。これは、汎用性を特徴とする一般の産業用ロボットに対して、建設用ロボットは個別の建設・施工作業を対象とし、従来の建設機械の自動化というアプローチがし易かったことによる。当初の建設用ロボット開発は、危険作業の削減と生産性と品質の向上に加えて、労働力不足の解消が大きな目的であった。さらには、技能作業者の高齢化が問題とされて、1980年代後半から建設用ロボットの開発研究に拍車が掛かった。

しかし、いわゆるバブルの崩壊後は建設用ロボットの開発にブレーキが掛かり、最近では、経済性重視故にロボットよりも建設作業員を雇用する傾向が見られる。実際に、雲仙普賢岳の災害復旧工事用無人重機<sup>9)</sup>や地下工事などの特殊な用途を除けば、建設用ロボットの活躍の場は少なくなっている。普及を妨げる要因としては、コスト高、安全性の不安、対環境の脆弱性、

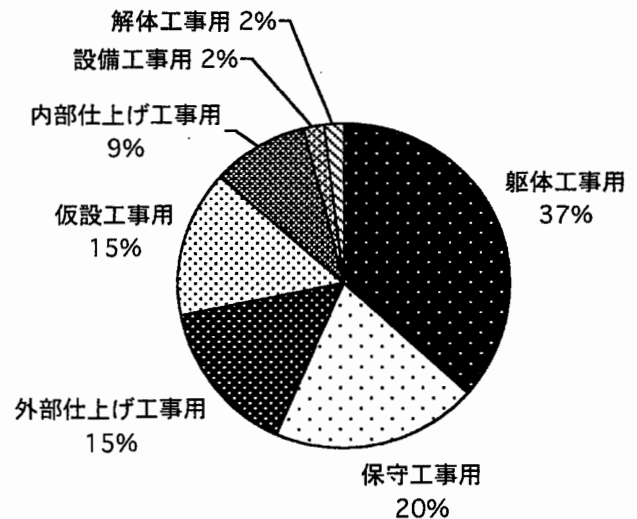


Fig. 2 Developed construction robots by work.  
作業別建設用ロボット開発状況

投資・興味の減退、自律化の不完全さ等が挙げられている<sup>2)</sup>。

建設用ロボットの明確な定義はないため、建築、施工、土木工事用の自動化機械、及び遠隔操縦のマニュアルマニピュレータ型のロボットを全て含めると、これまでに開発された建設用ロボットは150機種ほどに上る。これらのロボットを工事用途別に分類すると、Fig. 2のように、鉄骨・鉄筋工事やコンクリート工事などの躯体工事用が約1/3を占める<sup>10)</sup>。

開発された建設用ロボットの内、これまでに商品化されたものは10作業用21機種であり、500台を超えている<sup>11)</sup>。これらの多くは、自動玉掛け外し装置や建材ハンドリングロボットなどの遠隔操作型の自動化装置あるいはマニュアルマニピュレータの類である。ただし、商品化はしていないが、社内で開発・活用している建設用ロボットは42機種あり、これらは比較的完成度が高い。そして、現在では、このような単体のロボットを組み合わせたビル自動化施工システムまで発展している。

ここで、開発されてきた建設用ロボットの特徴をまとめると、次のようになる。

- ① 作業種類は多いが、繰り返し作業は少ない。
- ② 作業対象が多様で大きく、自身が移動する。
- ③ 様々な作業環境に適応する。
- ④ 現場作業員でも容易に扱える。

その他、駆動源を搭載することなどが、通常の産業用ロボットとの相違点である。しかし、これらの特徴を全て実現できるほど現在の技術レベルは成熟しているとは言えず、多くの技術的ブレークスルーが必要と考えられる。そのため、建設用ロボットの開発アプロー

チは、高度な自動化を目指す研究と、経済性に優れて直ぐ役立つ実用開発に二極化されてきた。前者は、自律移動や知能化、環境適応/ロバスト性の向上とシステム化を指向し、後者は、使いやすい半自動あるいは遠隔操縦技術を指向することになる。

今後は、比較的安価で現場作業者の判断に委ねる操縦型ロボットの実用化を図りつつ、将来の専門技術者や熟練した技能労働者の不足を見越して、高度で高機能な技術革新が求められる。

### 3. 検討委員会報告

#### 3.1 開催主旨

技術革新に伴って、合理化、省力化のためコンピュータ制御された大型建造物等の施工システムが施工現場に導入されてきている。しかし、コンピュータを利用した大規模な施工システムでは、建設用ロボットに代表される移動する自動化機械と作業者が共存する環境が想定される。そのため、従来では予想し得ないような災害や重大災害の発生が危惧されている。

このような背景から、施工システム全体にわたって安全性を科学的に解明・評価し、システム要素の安全技術や安全制御等の総合的な対策を行うことが不可欠となっている。したがって、特別研究「生産・施工システムの総合的安全制御技術の開発に関する研究」では、施工システム全体にわたる危険性の認識と問題点の抽出を行い、それらの分析からシステムの安全化に資する要素技術や安全制御手法等を開発する予定である。

そのため、まず現状の自動施工システムにおける安全上の問題点や技術レベルを把握し、当所における対象施工システムや研究対象技術、及び開発研究目標を策定する必要がある。そこで、施工システムの自動化を推進している産業界からの専門家とロボット専門家を招へいして、施工システムにおける作業の実態や自動化の研究の現状を紹介いただくとともに、安全上の問題点と技術課題を抽出することを試みる。その成果を、当所で開発研究すべき自動施工システムの安全確保技術の研究に資するため、建設用ロボットの安全制御技術に関する検討委員会を設置する。

#### 3.2 検討会の構成

検討会委員は外部機関より、以下の8名を招へいた。(所属は委員就任当時)

委員長	木下鈞一	(株)熊谷組	環境安全本部常勤顧問
委員	柿倉正義	東京電機大学	工学部電子工学科教授

委員	新野義仁	鹿島建設(株)	建設総事業本部機械部担当部長
委員	吉武亮二	(株)フジタ	建築本部生産技術部担当課長
委員	上野隆雄	東急建設(株)	技術本部技術研究所メカトロ研究室技師
委員	吉野恭司	(株)大林組	技術研究所建築第一研究室主任研究員
委員	奥山信博	清水建設(株)	建築本部機械部課長
委員	藤井卓美	(株)竹中工務店	技術研究所生産研究開発部主任研究員

なお、事務局は、当所の特別研究「生産・施工システムの総合的安全制御技術の開発に関する研究」担当者を中心に構成した。

#### 3.3 検討会審議経過

##### 第1回検討会(平成10年9月16日)

各委員と事務局の紹介を行った後、木下委員を委員長に選出した。事務局より特別研究「生産・施工システムの総合的安全制御技術の開発に関する研究」について説明があり、これまでの当所の研究活動状況と建設用ロボットに関する研究テーマについて紹介された。その後、施工の自動化や安全問題等について自由討論を行った。

##### 第2回検討会(平成10年10月27日)

新野委員より建材取付ロボットとコンクリート床仕上げロボットについて、吉武委員より全天候型ビル自動建設システムと耐火被覆吹き付けロボットについて、上野委員より遠隔操縦ロボットと急傾斜地施工ロボットについての説明が行われた後、質疑応答と意見交換を行った。

##### 第3回検討会(平成10年12月8日)

吉野委員より標識認識自律搬送システムと仕上げ資材搬送システムについて、奥山委員より各種ロボット事例と全天候ビル自動施工システムについて、藤井委員よりコンクリート工事用ロボットと内装施工ロボットについての説明が行われた後、質疑応答と意見交換を行った。

##### 第4回検討会(平成11年1月28日)

柿倉委員より各種ロボット要素技術とヒューマン・ロボットインタフェースについて説明が行われた後、質疑応答を行った。また、各委員より施工自動化の問題点について意見交換が行われ、安全上の問題と技術的課題の抽出を行った。

### 3.4 各機関におけるロボット開発研究状況

#### 3.4.1 鹿島建設（株）における自動化・ロボット化技術

##### a. 研究開発の経緯

快適な環境を創出するために、これまでの経験と技術を基にした新たな建設技術の研究開発が行われてきており、特に、自動化・ロボット化は工事の効率化や省力化、施工精度の向上、安全性の確保、環境との共生を実現するために不可欠な技術として推進されている。このような技術は、既に全自動建築生産システムによる施工工法、掘削や運搬などの施工工事、測量システム等多方面に適用されている。さらに、建設技術やメカトロニクス技術、情報システム技術を融合させた研究開発が、基礎から応用分野まで行われている。

##### b. 自動化・ロボット化の事例

##### (1) 建材取付作業ロボット（多目的建設ハンド）

建材取付作業ロボットは、技能工の不足や高齢化が進む建設現場において、作業員の手足として有効に利用できる操縦型のマニピュレータ（Fig. 3）であり、1988年の開発開始以来、約100台の使用実績がある。作業対象は、建設作業で使用される多種多様な重量建材（200～500kg）であり、ハンドアタッチメントの交換により対応する。

ロボット本体は、三輪の走行装置、5自由度ハンドリングアーム、制御部、運転ステージから構成され、3本レバー式遠隔操作盤で全動作を操縦できる。高度な自動化を目的とした高機能なロボットは、複雑な作業環境に適応しきれず、その普及は遅れているが、このロボットのようなマン・マシン一体型作業機械の形態は、現場に容易に受け入れられるものと考えている。特に、高齢化が進む作業現場では、力仕事の軽減と操作取り扱いの容易さをもたらす、より実用的な建設ロボット化の試みとして導入されている。

安全面の機能としては、ロボット本体の診断・保護機能をはじめとして、障害物検知用の接触式センサーや過荷重・落下防止機能、非常停止機能等の安全装置により、ロボット周辺の作業員や操縦者に対する安全確保を行っている。特に、操縦型というロボットの性質上、操縦者の操作上の制約を必要としないフルプールの考え方を盛り込んだ安全装置が考慮されている。また、人間工学的に検討された操作ボックスの採用や、ハンドアタッチメントに依存しない基本操作性により、操縦者の操作ミスの低減や操作習得度の向上が図られている。

この建材取付作業ロボットは、Fig. 4のような外壁取付作業に多く利用されており、従来の危険な高所足

場作業を安全に実施できる。このような事例は、これまで難しいとされていた無足場工法を実現する一手法として注目される。

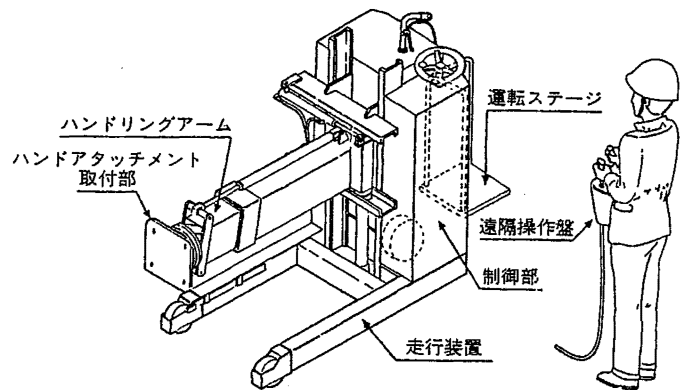


Fig. 3 Versatile handling robot.  
多目的建設ハンドの構成



Fig. 4 Panel installation using versatile handling robot.  
多目的建設ハンドによる外壁取付作業

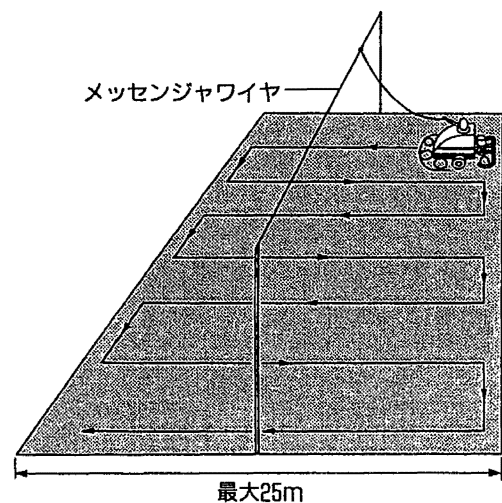


Fig. 5 Finishing method of concrete floor finishing robot.  
コンクリート床仕上げロボットの施工方法

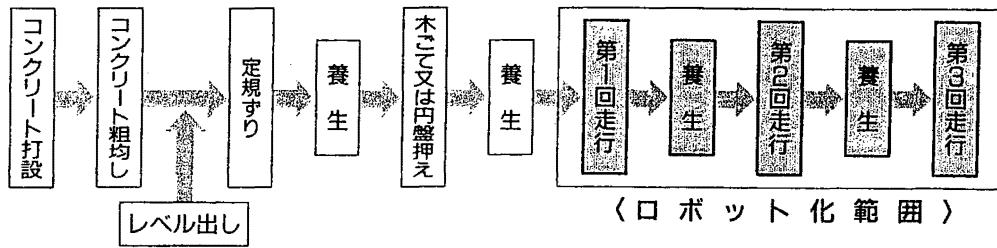


Fig. 6 Concrete floor finishing process and robotized process.  
コンクリート床仕上げ工程とロボット化範囲

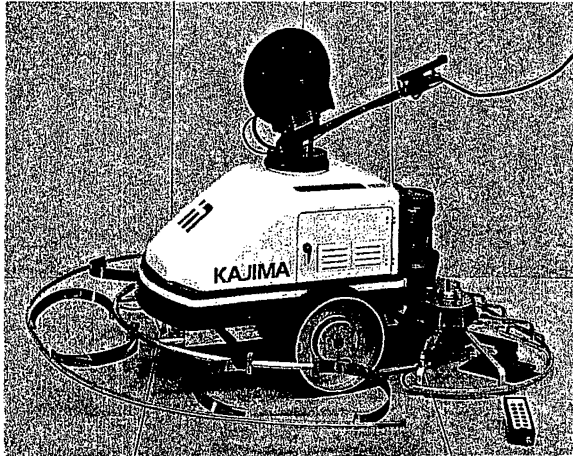


Fig. 7 Concrete floor finishing robot.  
コンクリート床仕上げロボット外観

(2) コンクリート床仕上げロボット (コテキング)

コンクリート床仕上げは、コンクリート打設後コテで表面を平滑に仕上げる作業であり、従来は左官技能工による手作業で行われていた。コンクリート床仕上げロボットは、熟練工並の作業品質の確保と作業時間の短縮、省力化を目的に開発され、新霞ヶ関ビル（1986年）を始めとして既に適用事例が多数ある。

このロボットは、指定区域内で自動的に走行経路を決めて、移動しながら床直仕上げ作業を行える無軌道式の自走ロボットであり、自立航法装置と学習機能を有することを特徴とする。ロボット本体には Fig. 5 のようにメッセンジャワイヤより電源が供給され、自動で直進、直角ターンをしながら、1時間あたり 500 m<sup>2</sup> 施工できる。また、無線遠隔操作により手動運転も可能である。

床仕上げ中のロボット作業領域は、硬化中のコンクリート上であるため、床仕上げ職人以外は入らないことと硬化時間に余裕があることから、比較的自動化しやすい作業環境である。したがって、Fig. 6 に示すように仕上げ作業の大半をこのロボットに任せることが可能となった。

センシング機能としては、自動走行のためのジャイ

ロコンパスやメジャリングローラを装備し、本来の走行制御のための情報生成以外にも走行状態の異常診断も行っている。また、Fig. 7 に示すような前方バンパセンサと後方の回転コテを覆うバンパセンサが設置されており、障害物検知により回避あるいは非常停止動作を行う。一方、遠隔手動運転時には、無線操作器からの電波をロボット側で受信できないときは非常停止する構成となっている。

このロボットの操作者は、ロボット作業状況や仕上がり具合の監視を行うと共に、ロボットの入れない狭い領域の仕上げ作業を行うのみでよい。このロボットの導入により、従来の人手による長時間の不自然な作業姿勢などの労働条件が改善され、実際のロボットによる作業品質も満足できるなど、開発目的を十分実現している。

c. その他

大型、高機能な建設ロボットよりも、今回紹介のような小型で簡易なロボットの方が現実的であり、実際の使用例も多い。人間と機械の分離は重要な課題ではあるが、現実の作業環境では完全な分離は困難である場合が多く、今回の事例は今後のロボット化の方向と合理的な施工方法を示唆しているものと考えられる。

3.4.2 (株) フジタにおける自動化・ロボット化技術

a. 耐火被覆吹付けロボットシステムの開発

鉄骨構造等の建物において乾式吹付け工法で施工される耐火被覆吹付け工事は、多量の粉塵を伴う悪環境下での作業であり、材料の投入や足場の解体・移動等も含め重労働となっている。そのため、熟練した作業員の老齢化が進む一方で、若年作業員の不足が問題となっている。

これらの問題点に対する改善はあまり進んでおらず、機械化や新素材などによる大幅な作業改善が望まれている。本開発は、汎用型産業用ロボットを利用し建築工事の自動化を推進する一事例として、耐火被覆吹付け工事の大半を占める「現場配合の乾式吹付け工法」を対象としたロボットシステムを構築することにより、従来作業の問題点を大幅に改善し省力化・高品質化を

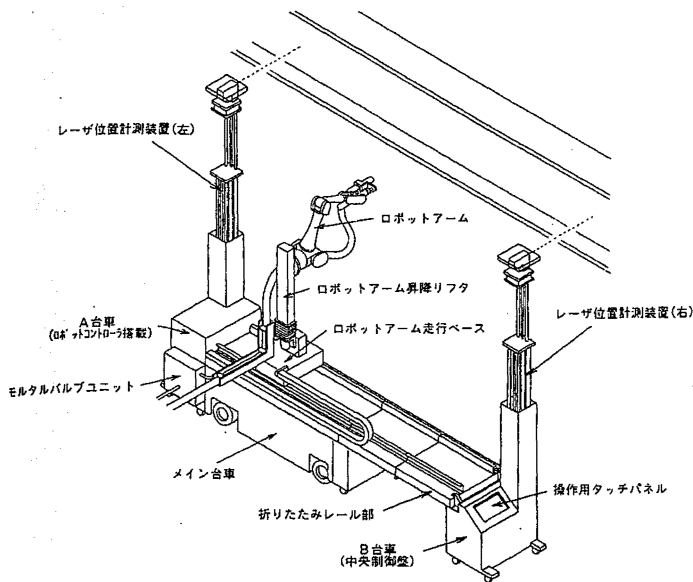


Fig. 8 Fireproof covering material spraying robot system. 耐火被覆吹付けロボットシステムの構成

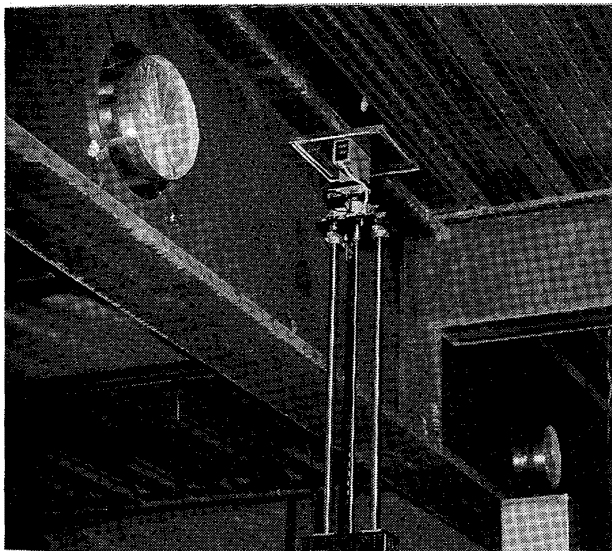


Photo 1 Automatic position measuring system of laser type. レーザー自動位置計測装置と機能

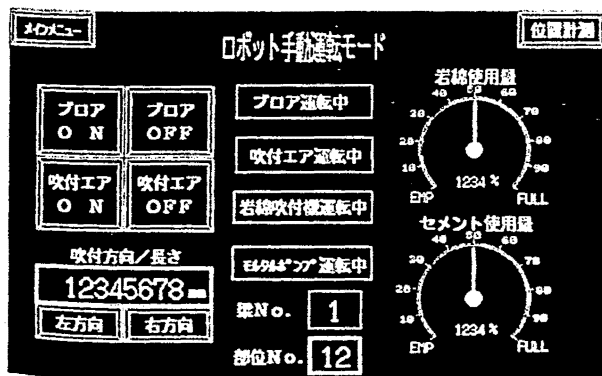


Fig. 9 Touch panel display of central control panel. 中央制御のタッチパネル表示例

図るものである。

### b. システムの構成及び概要

本システムは、Fig. 8 に示すように耐火被覆吹付けロボット及び全自動半湿式耐火被覆吹付けプラントにより構成される。

#### (1) 耐火被覆吹付けロボット

工程に応じて順次施工階へ移動し吹付けを行なう耐火被覆ロボットは、1) 台車ロボットアーム部、2) 自律走行レール、3) レーザー自動位置計測装置 (Photo 1)、4) 中央制御盤 (Fig. 9) の4つの部位から構成される。

#### (2) 全自動半湿式耐火被覆吹付けプラント

材料の安定した供給による施工品質の安定と操作性の向上を目的として、施工階に設置された制御盤からの指示によりロックウール、セメント、水の供給からセメントスラリーの調合・攪拌等の一連の作業を行ない、岩綿吹付機、ブローア、モルタルポンプのON/OFF制御と回転数値制御を行なうことのできる全自動プラントを新規に開発した。このプラントは大別して岩綿プラントとモルタルプラントの2つにより構成され、各プラントの作業フローは、Fig. 10 に示す通りである。

### c. システムの制御・操作概要

本システムの制御は、自律走行レール台車後部に搭載した中央制御盤をホストコンピュータとして、タッチパネルディスプレイにより入力されたデータを基に、ロボットアーム、自律走行レール台車、全自動プラントの各々の制御盤をコントロールするようにしている。また、操作方法には、吹付開始位置への誘導と吹付け長さの入力を作業員が直接行う手動モードと自動で行う自動モードがあり、作業条件に合わせて任意に選択ができる。

吹付け動作順序は、ロボットアームの動作条件を考慮して吹付けガンを横方向に振りながらロックウールを吹付ける横吹き方法とした。梁への吹付け状況を Photo 2 に示す。

### d. 汎用型産業用ロボットアームの現場適用結果

汎用型産業用ロボットアームの建築現場へ適用を試みてきた結果以下の長所・短所が確認された。

#### 長所

- 汎用品を利用することにより、システムのコストダウンが図れる。
- 開発期間の短縮が図れる。
- 保守部品の入手が容易に行える。
- 動作プログラムの作成も付属のソフトにより容易に行える。

#### 短所

- 工場等で床に設置して使用するのに適した設計の機

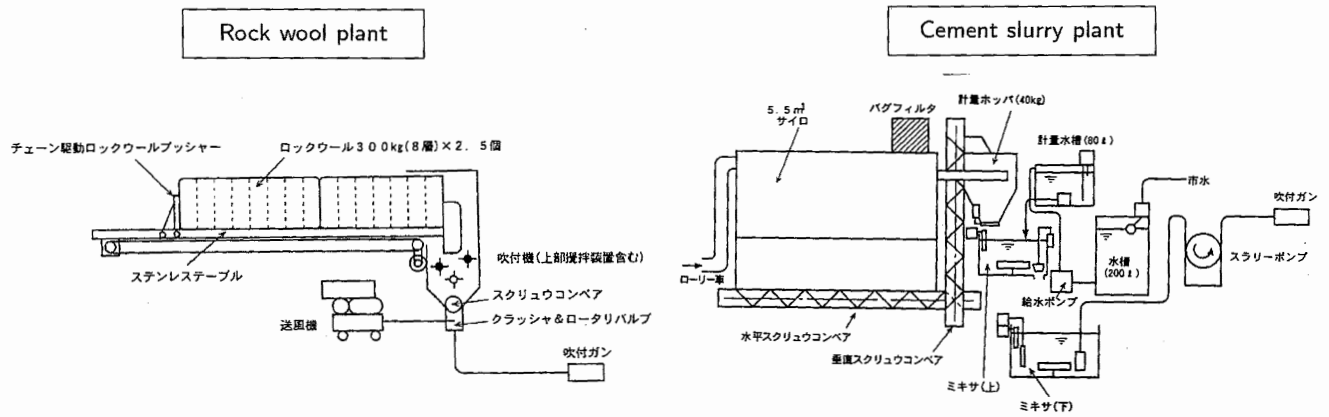


Fig. 10 Outlines of two plants.  
各プラントの概要

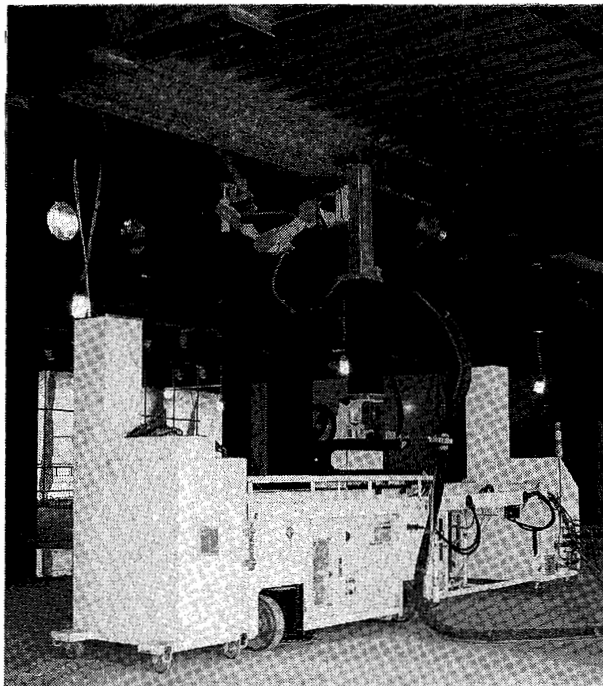


Photo 2 Splying to beam.  
梁への吹き付け状況

種が多く、自重が重い。

- ・ 制御ケーブルが太く、移動には適さない。
- ・ 汎用品のため全体のシステム設計に当たり、寸法・形状等の制約がある。

以上の点を考慮した上で、汎用型産業用ロボットアームの建築現場への適用は、組み合わせる周辺装置を開発することによって充分可能であり、耐火被覆吹付け工事のみならず他の建築工事での省力化・高品質化に有効な方法であると言える。今後は、本システムをより実用性の高いものにするため、実際に施工を行う中で改良を進めると共に、本開発で得られた周辺技術を生かし汎用型産業用ロボットアームの他作業への適用を検討している。

### e. おわりに

今回開発したシステムでの基礎実験、及び本施工の結果、吹付けロボットは耐火被覆吹付け工が1人で移動及び施工が可能であり、全自動プラントと合わせて使用することで材料の安定した供給も可能となり、高品質の施工ができることが確認された。また、軽量で対環境性に優れたロボットアームを選択したことにより、全体のシステムが小型化・計量化され、施工フロア間の移動も容易に行えることも確認された。

### 3.4.3 東急建設(株)における自動化・ロボット化技術

#### a. 研究開発の経緯

現在、建設技術に最も期待される課題は、自然生態系及び地球環境の保全・回復と、ライフサイクルを見据えたコスト縮減だといわれている。また、来るべき少子高齢化に伴う若年労働者の減少及び労働者の高齢化も重要な課題と考えられる。

最近、ライフサイクルコスト縮減の方法の一つとして、構造物の維持・補修技術が注目されている。また、若年労働者の減少と労働者の高齢化については、施工の効率化、生産性の向上、作業環境の改善、安全性の確保といった対策が必要であり、その一つの手法として建設ロボットの活用が期待され、実用化が進められている。

東急建設(株)では、早くから建設ロボットの研究開発に着手し、建設機械の遠隔操縦による建設作業の省力化及び安全化、また電磁波探査による構造物診断技術の効率化、無足場化工法による安全化及び仮設コスト縮減などに取り組んできた。

#### b. 自動化・ロボット化の事例

##### (1) 深礎工事機械化工法

深礎工事機械化工法は、掘削からずり搬出までの一連の作業を1台で行うことのできる深礎工事ロボット



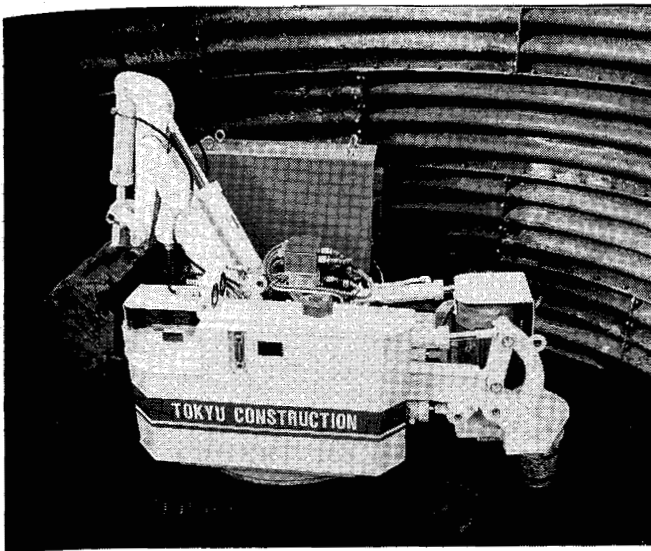


Photo 3 Deep shaft working robot.  
深礎工事ロボット



Photo 5 Working robot on wall surface.  
壁面作業ロボット



Photo 4 Underground exploring robot.  
地中探査ロボット

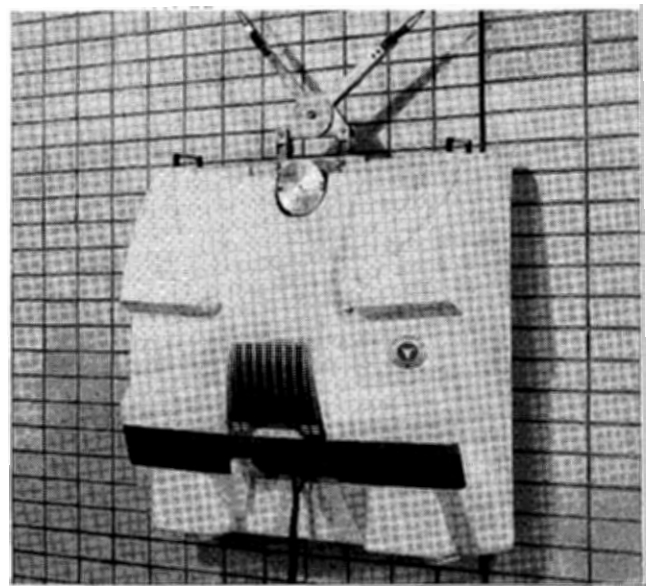


Photo 6 Wall surface inspection robot.  
壁面診断ロボット

(Photo 3) を用い、坑内作業の安全性と効率性の向上を実現した新しい深礎工法である。土砂切削用カッタと土砂積込用パケットを備えた本ロボットは、軽量コンパクトでありながら、従来の小型機械では掘削困難であった軟岩の掘削が可能であるほか、クラムシェルによる掘削時のように、坑壁周辺部の人力による仕上げ作業を必要としない。さらに、オペレータステップから遠隔操作を行うことができる。

## (2) 地中探査ロボット

道路の陥没や沈下の原因となる地中空洞や空隙の大きさや位置を早急にかつ正確に把握するため、地中探査ロボット (Photo 4) を開発した。このシステムは、

アンテナ部のパルス送信機によって電磁波を地中に発信し、空洞や埋設管に反射して戻ってきた電磁波を受信機が捕らえ、これを電気信号に変換した後、コントロール部で画像処理し、カラーディスプレイにコンピュータ映像として表示する。この映像は、アンテナ部に搭載された距離測定器によって測定位置と画像とを対応させ、空洞の大きさや位置を正確に判断することができる。

## c. その他の建設ロボット

以下の建設ロボットが開発・実用化されている。

### (1) 壁面作業ロボット

壁面作業ロボット (Photo 5) は、アタッチメントを交換することにより、壁面上での塗装・描画・清掃等の作業を一台で行うことができ、安全性と生産性を

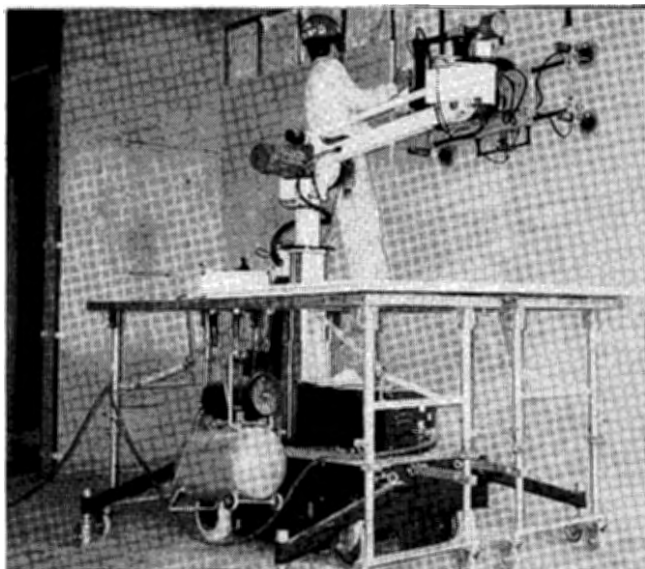


Photo 7 Lightweight manipulator.  
軽量マニピュレータ



Photo 8 Measuring robot.  
測量ロボット

向上させている。描画は、コンピューターで作成した原画情報をもとに、複雑な模様や色柄を忠実に再現できるものである。また、タイル剝離調査用の小型の壁面診断ロボット (Photo 6) も用意している。

(2) 軽量マニピュレータ

各種内装材を把持、位置決めするマニピュレータと自走式移動ステージを組み合わせた多目的ハンドリンクマシン (Photo 7) で、アタッチメントを交換することで天井、壁、床の工事に対応することができる。

Table 1 Troubles of devices and countermeasures.  
使用機器と発生トラブル、対処例

使用機器	トラブル	原因	対処	備考
シーケンサ	誤動作	・瞬時的電圧降下 ・電磁ノイズ	・電源別系統化 ・プログラムのフェールセーフ化	システム設計時の注意が必要
リミットスイッチ	誤動作	振動	検出方式の変更 (機械式→光学式)	最適な方式の選択が重要
無線装置	到達距離不足	電磁ノイズ	方式の変更、無線化廃止	環境調査、許認可の調査が必要

(3) 測量ロボット

不整地走行台車に自動追尾式トータルステーションを搭載したロボット (Photo 8) で、すべての測量作業を一人で行うことができ、CADシステムとデータ通信が可能である。

(4) 自由断面掘進機の高度化システム

トンネル自由断面掘進機を自動追尾し数値制御することにより、オペレータの熟練度に関わらず高精度な切削断面の仕上げを実現するものである。(財)先端建設技術センターからの委託研究)

(5) 電磁誘導式草刈機

電磁誘導方式による無人走行機能を付加した草刈機で、自動運転により無人で緑地帯の草を刈ることができ、草刈作業の省力化を図ることができる。(大阪ガス(株)からの委託)

d. 今後の課題

現場自体の安全性を図るため、以下のものを研究中である。

(1) 遠隔操縦システム

- ・立体画像を見ながら遠隔操縦し、現場の無人化を図る。
- ・機能的電気刺激によるフィードバックシステムの開発。(秋田大学との共同研究)

(2) 急傾斜地施工ロボット (東京工業大学との共同研究)

- ・ウィンチを併用した歩行機構により、従来人がロープでぶら下がりながら行っていた斜面施工作業を機械化し安全を確保する。

また、建設ロボットの研究開発の過程で、実験時にTable 1のような問題が発生し対処した。開発時に留意する必要がある。

3.4.4 (株)大林組における自動化・ロボット化技術

a. 研究開発の経緯

地球環境や高齢化は今日の重要な課題であり、建設業においてもそれらの課題に配慮した施工法の開発は

重要なテーマとなっている。そのため、大林組においては産業廃棄物を排出しない省資源型工法の開発や、CO<sub>2</sub>固定化を考慮した新木質構造の研究を進めている。また、省力化、生産性向上、品質向上を目的として、建

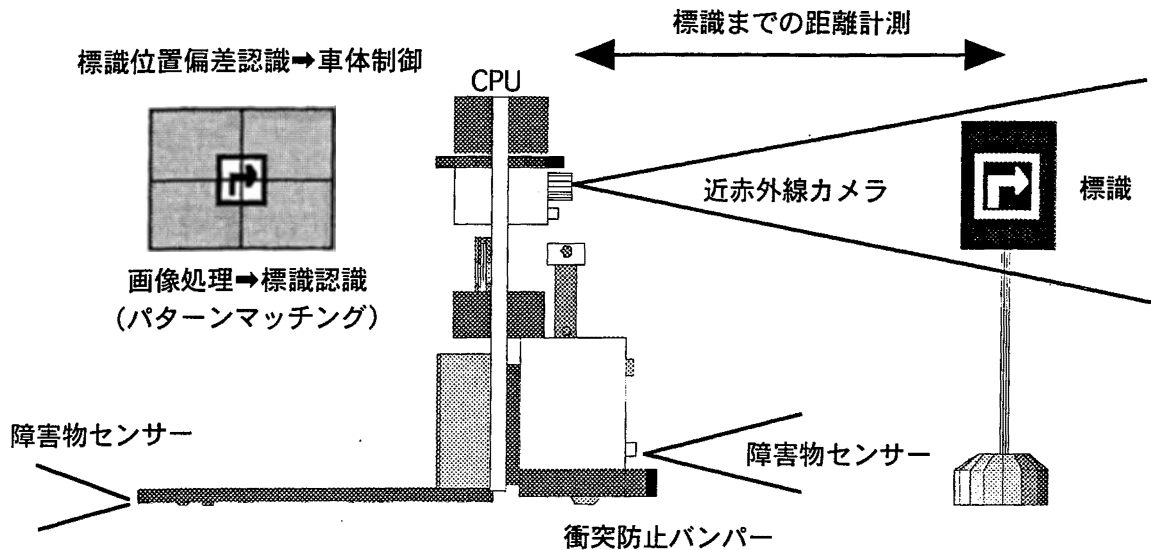


Fig. 11 Sign recognition and sensing of autonomous transportation system.  
標識認識自律搬送システムの標識認識とセンシング

Table 2 Safety measures for autonomous transportation system with sign recognition.  
標識認識自律搬送システムの安全対策

安全対策	機能	手法
人体、物体の非接触検知	(1) 進行方向の前方の人体を検知し、検知時間が1秒以内であれば復帰して走行を続けるが、1秒以上であれば停止する (2) 進行方向の前方1mまで物体に接近すると徐行し、50cmまで接近すると停止する。ただし、検知時間が1秒以内であれば自動復帰し、1秒以上であれば停止する (3) 後進中に後方30cmまで障害物に接近すると停止し、フォークを下げる	(1) 焦電センサ (2) 光学式センサ (3) 光学式センサ
物体との接触による検知	前方の障害物との接触による検知出力で停止する	バンパースイッチ
載荷検知	荷物の積載を検知する	リミットスイッチ
荷姿監視	荷幅アンテナへの接触による検知出力で停止する	リミットスイッチ
操作確認	非常停止	非常停止ボタン
停止確認	(1) 障害物検知等による異常停止を表示する (2) 標識の認識不能や作業の正常終了等を表示する	(1) パトライト 赤色点灯 (2) LED表示
接近警告	前方障害物への接近を警告する	パトライトとアラームの併用
速度監視	(1) 適正速度の監視と制御をおこなう ① 高速 51 (前進), 25 (後進) [m/min] ② 低速 33 (前進), 17 (後進) [m/min] (2) 手動制御による坂道進行を知らせる	(1) エンコーダ (2) アラーム
走行路確認	走行路の明示をおこなう	標識
暴走監視	目標が捕捉不能となると停止する	ソフトウェア処理

設作業の一部ロボット化やCAD/CAM化など多方面からの研究・開発を進めている。

## b. 自動化・ロボット化の事例

### (1) 概要

本システムは、フロアに立てられた標識に従って、天井用の板材等を目的の場所まで自動的に運搬するもので、標識認識自律搬送システムと呼称している。基本的な走行は、Fig. 11 に示すように、近赤外線カメラによって動作の指示を与える標識を捉え、標識までの距離を計算するとともに、捉えた標識を画像処理のパターンマッチングによって認識し、指示に従った動作（右左折、迂回直進、停止など）を自律的に行う。運搬中に障害となる物体の検知には障害物センサを用いている。

特徴には次の項目が挙げられる。

- ① 標識の位置を変えることによって容易に搬送経路を変更できる。
- ② 搬送車が軽量であるため、通常の仕上げ階フロアの走行が可能である。
- ③ バッテリー電源であるため作業環境を汚すことなく、通常の使用状態では8時間以上の連続稼働が可能である。

なお、無線画像転送による動作のモニタリング、無線によるリモートコントロールも可能となっている。

### (2) 安全対策

本システムの走行にともなう障害等に対する対策をTable 2 に示す。赤外線センサによる障害物の非接触検知、バンパースイッチによる接触検知、機械的なりミットスイッチなどを利用している。

### (3) 今後の課題及び問題点

今後の課題等には次の事項が挙げられる。

- ① 人を挟み込む場合が想定されるが、挟まれる力や速度についての検討（例えば、車輪の摩擦力など）が必要となる。
- ② 標識の認識では、ロボットと人体の両者ともに見分けやすい簡単なマークの利用が実用的である。

## 3.4.5 清水建設（株）における自動化・ロボット化技術

### 1) はじめに

建築物は、その性格上一品生産となり、使用材料は言うに及ばず、同一現場での作業職種は、多岐にわたっている。さらに、それら多業種間での関係、連絡も複雑に絡み合って建築物は生産されている。そのような環境下において、建築工事における自動化やロボット化は困難であると言われ続けていた。しかしながら昨今、熟練工不足や若年者の現場離れが問題視されており、建築生産の自動化、ロボット化の必要性が唱えら

れている。

清水建設（株）では、建築工事の工期短縮、コスト低減、安定した品質提供を目的として、建設工事の自動化、ロボット化に積極的に取り組んでいる。

## b. 自動化・ロボット化の事例

### (1) 床仕上げ多機能ロボット

建築物は、生産対象が大きいいため、一般の工場での生産と異なり、作業者が移動して生産が進められる。これにより建設工事のロボット化にはロボットの移動技術の開発が不可欠となり、建設ロボットは、日々変化する現場の状況に適応して移動できることが要求される。この移動技術を備えた「MTV—1」（Fig. 12）が開発された。MTV—1は、走行ユニット（制御モジュール）と床仕上げ作業用ユニット（作業モジュール）とから構成されており、作業用途に応じて、作業モジュールを交換して多目的に使用することができる。

走行ユニットは、ジャイロセンサと距離センサにより、作業対象となる床面を取り巻く壁面に沿って自動的に走行する。その時、作業領域を認識し、ロボット自身で走行経路を作成する。その領域内を床仕上げ作業に適した速度とピッチで往復走行を繰り返して床作業を実施する。

床仕上げ作業用ユニットには清掃作業ユニットやケレン作業ユニットがある。

安全システムとして次のことが配慮されている。

- ① 衝突を防ぐために、超音波センサが内蔵されており、障害物の検知をするためのシステムが走行ユニットに搭載されている。
- ② バンパー及びバンパー内蔵タッチスイッチにより、万一作業員等に接触した場合には、直ちに停止する。
- ③ 誤操作防止のため、2段押しボタンによる、スタート方式としている。

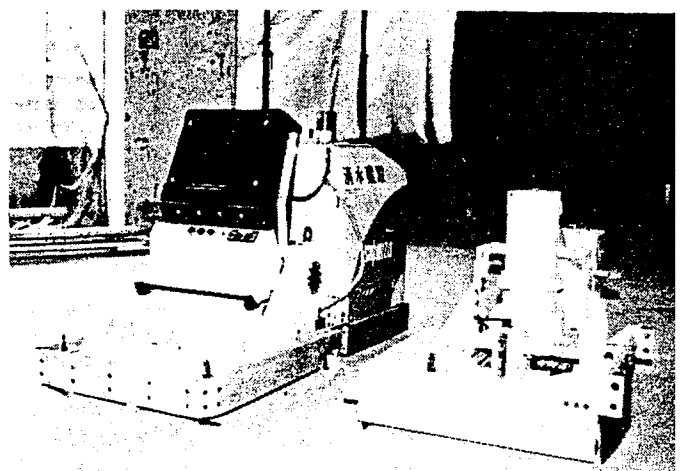


Fig. 12 Versatile floor finishing robot.  
床仕上げ多機能ロボット

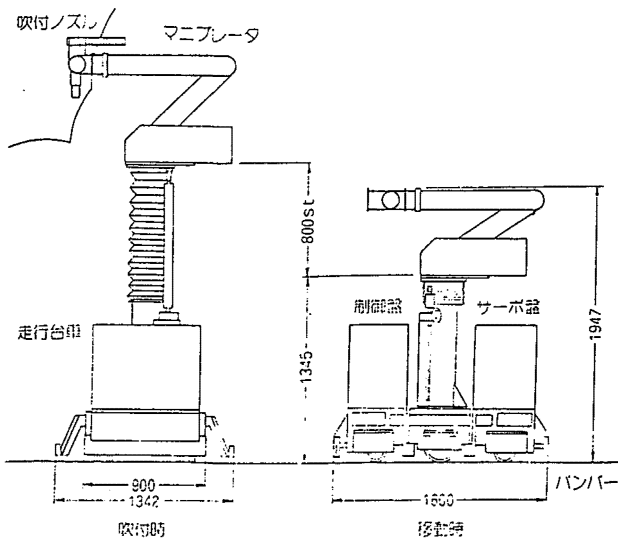


Fig. 13 Fireproof covering material spraying robot.  
耐火被覆吹付けロボット

## (2) 耐火被覆吹付けロボット

耐火被覆吹付け作業は、鉄骨構造には欠かすことができない作業である。一般的には、作業者が吹付けガンでロックウール等の耐火材料を鉄骨に所定の厚さで被覆されるように吹付けながら作業足場を移動しながら作業を続ける。この作業は、耐火材料の跳ね返りから、夏期でも防護服とマスクが必需品となり、苦渋かつ危険を伴う作業の一つである。

このような耐火被覆吹付け作業を改善するため、マニピュレータをもった「SSR-3」(Fig. 13)が開発された。SSR-3は、2.8~4.4mの高さにある鉄骨の大梁、小梁にロックウールを吹き付ける半湿式吹付け工法に適用できる。また、一般にロボット操作のティーチングは難しいことから「オフラインティーチングシステム」を用意して、梁の寸法と階高のデータ及び走行パターンをパソコンで入力すれば、作業現場でロボット操作が行えるようになっている。加えて、ロボットは超音波センサにより、梁の位置を検出し走行方向を自動的に補正して作業を行う。

安全システムとして次のことが配慮されている。

- ・バンパー及びバンパー内蔵タッチスイッチにより、万一作業者等に接触した場合には、直ちに停止する。

## (3) 自動玉掛け外し装置

鉄骨の玉掛けを外す作業は、足元の不安定な鉄骨上を鳶工が移動するため、建設工事の最も危険な作業の一つである。この作業を省略するため、自動玉掛け外し装置「マイティシャックル・エース」が開発された。これは、玉掛けの開放を無線操作で行えるため、鳶工が玉掛け部位まで移動する必要がなく、安全性の向上が図られるとともに、従来5分程度かかっていた玉外

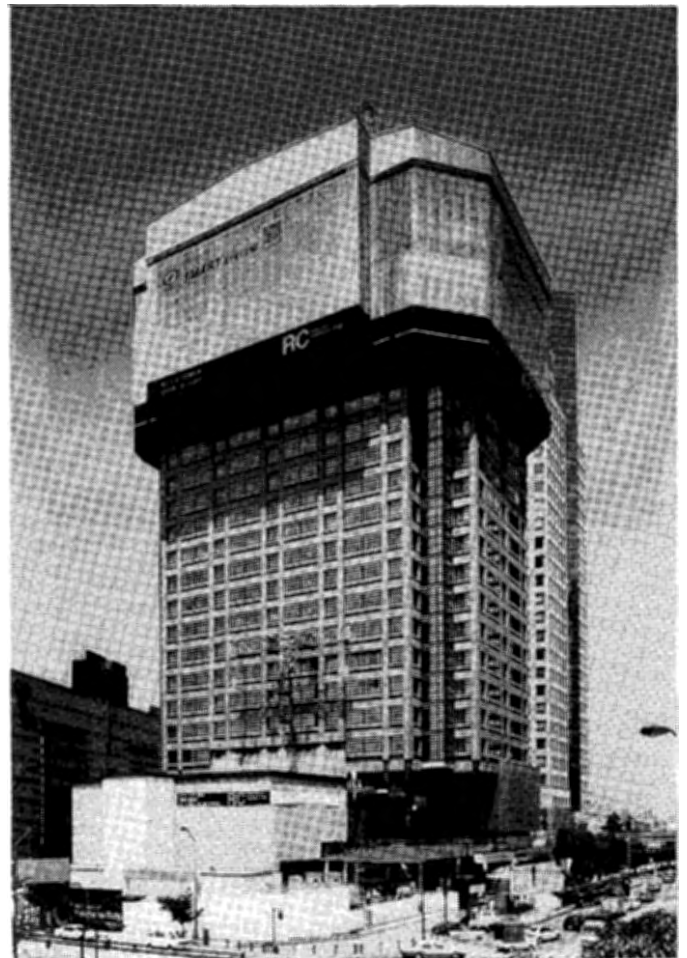


Photo 9 Weather-unaffected building construction system.  
全天候ビル自動化施工システム

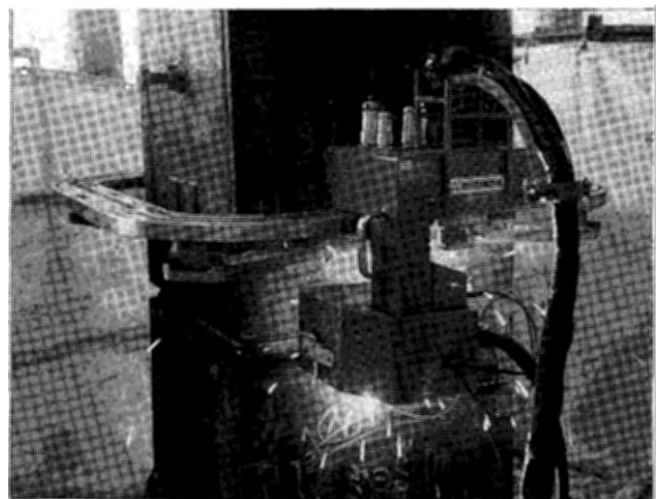


Photo 10 Automated welding robot.  
柱自動溶接ロボット

し作業が20秒程度でできる装置である。また、玉掛けもレバーでワンタッチで行え、従来のシャックルのように吊りピンを落とす心配が無い。マイティシャックル・

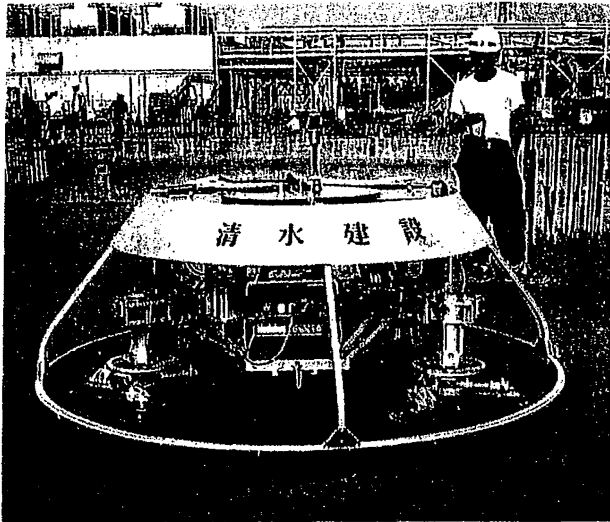


Fig. 14 Plastering robot (Concrete Floor finishing robot).  
左官ロボット

エースは、電動シリンダ、制御装置、バッテリー等を内蔵した本体と吊揚用ワイヤ、操作ケーブル及びクランプ部から構成されている。

安全システムとして次のことが配慮され、安全性に十分配慮している。

- ① 操作無線方式はFM多重変調方式を用いており、混信に対して強い。
- ② 誤操作防止のため、2段押しボタン方式としている。
- ③ 玉掛け外し完了を音と光で知らせる表示機能を有している。
- ④ クランプ部は、2重のロック機構で信頼性を確保している。

c. その他

上記に記した事例は、清水建設（株）で比較的最近開発された技術である。その他に、高層ビルの躯体工事から仕上げ工事までを機械とコンピュータによって自動的に施工する全天候型の建設システム「SMARTシステム」(Photo 9)、柱自動溶接ロボット (Photo 10)、左官ロボット「フラットくん」(Fig. 14) 等多数の機械化施工に取り組んでいる。

3.4.6 (株)竹中工務店における自動化・ロボット化技術

a. 研究開発の経緯

建築物は通常一品生産であると同時に、使用される材料が多種多様で、作業内容も複雑なため、建築工事の自動化・ロボット化は大変困難である。しかし、建築工事における生産性向上、労働環境改善のためには、作業の自動化・ロボット化は急務となっている。このため、(株)竹中工務店では早くから自動化・ロボット技術の開発を進めており、躯体工事から仕上げ工事、ア

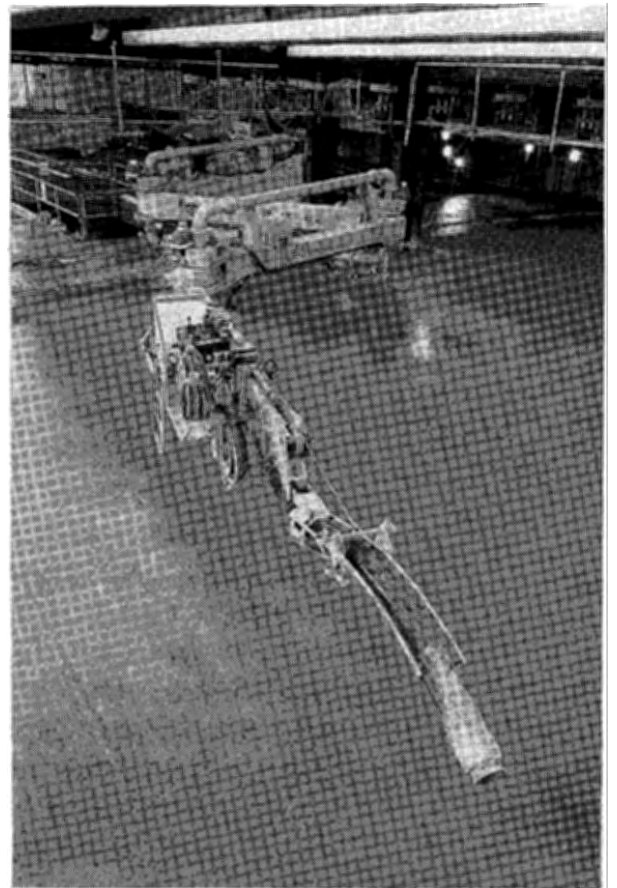


Photo 11 Horizontal concrete distributor.  
コンクリート水平ディストリビュータ

フターサービスに至るまでの建築工事の各分野で自動化やロボット化を実現している。

b. 自動化・ロボット化の事例

(1) コンクリート工事用ロボット

コンクリート工事用ロボットの開発は1979年に開始され、これまでにコンクリート工事における一連の作業がロボット化されている。

まず1979年にコンクリート水平ディストリビュータが実用化された。これは、Photo 11のように水平4関節機構によって自在なコンクリート打設を可能にしたもので、柱・壁等の障害物を回避する自動運転機能を有している。

1987年にはコンクリート床仕上げロボット「サーフロボ」(Photo 12)、1989年にはコンクリート床ならしロボット「スクリードロボ」(Photo 13)がそれぞれ実用化された。「サーフロボ」は2連のコテと走行機能によってコンクリート床面の自動仕上げを実現したもので、コンピュータ制御による自動運転と熟練工と同程度の仕上げ精度により、作業能率を向上させるとともに、作業員を中腰姿勢の苦渋作業から解放した。「スクリードロボ」はコンクリート打設直後の自動レベル

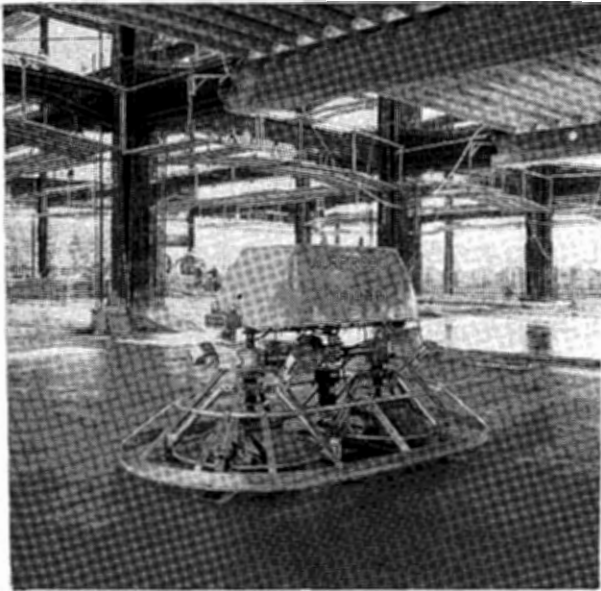


Photo 12 Concrete floor surface finishing robot.  
コンクリート床仕上げロボット

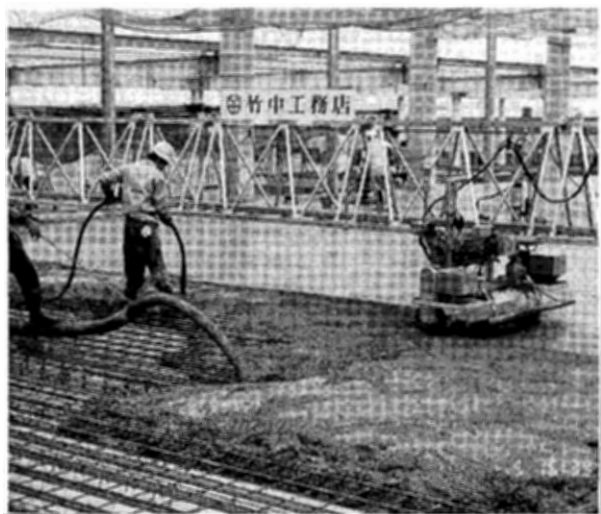


Photo 13 Concrete floor screeding robot.  
コンクリート床ならしロボット

出しとスクリーによる打設面のならし機能を有しており、ガータ自動盛換方式によって作業能率を向上させるとともに、重労働、汚れ作業の低減を可能とした。

さらに、1993年にはコンクリート表面吸水ロボット及び簡易ディストリビュータが実用化された。

なお、以上全てのロボットでは通常の施工用機械としての安全性確保が図られている。

## (2) その他の建築施工用ロボット

鉄筋工事に対しては、1986年に鉄筋組立自動クレーンが実用化された。また、鉄骨工事に対しては、1990年に鉄骨溶接ロボットが実用化され、柱・梁または柱・柱の自動溶接が可能となった。仮設工事に対しては、1986年に自動リフトが実用化されるとともに、1990年には

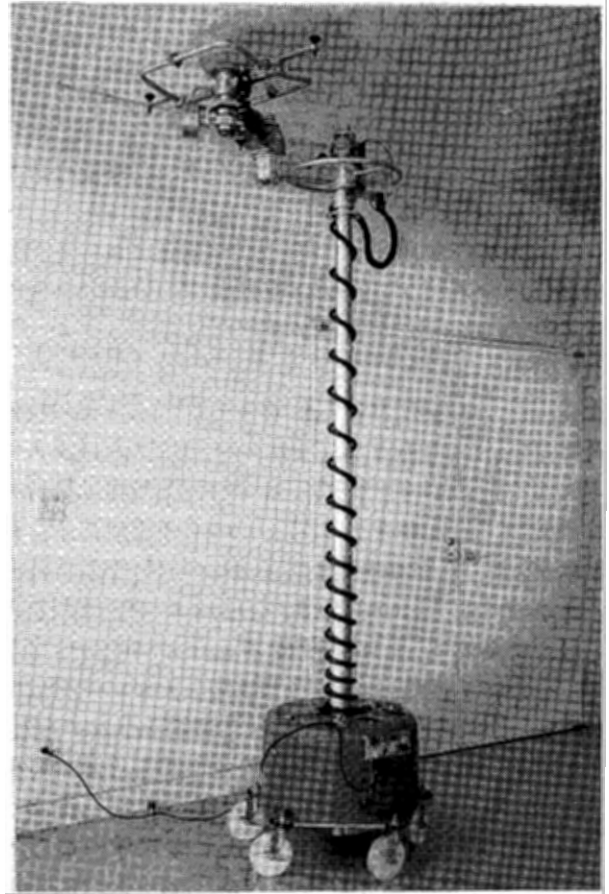


Photo 14 Interior material installation robot.  
内装施工マニピュレータ

揚重管理システム、4クローラ式キャリアロボットが開発された。さらに、仕上げ・保全工事に対しては、1987年に外装自動吹付機、1985年に外装調査ロボット、1988年に外壁塗膜剥離ロボット「JET-SCRAPER」がそれぞれ実用化された。

## (3) 建設作業用マニピュレータ

ビル自動施工システム等により、躯体工事に関わる作業者は従来よりも少なくなっているが、内装関連作業では変わっていない。そこで、内装関連工事のロボット化が検討されたが、現状では指示や技能は人が担い、重筋・単純作業を機械化するアプローチが有効であったので、作業者と一対一で協調して作業を行うことが可能な建設作業用マニピュレータの開発が開始された。

マニピュレータの制御方法では、作業者との協調性、安全性確保に重点を置き、作業時反力のフィードバックと転倒防止等が考慮された。その結果開発されたのが、Photo 14のボード張り機「パーソナルハンド」である。実用化に際しては、価格、寸法、重量等の制約があるため、空気圧駆動とし、制御システムも簡略化されている。実際の作業は、技能工1人にパーソナルハンド1台のペアで行う。技能工はジョイスティック

でマニピュレータを上下方向にマニュアル操作することにより、天井・壁へのボード張り作業等を行う。このマニピュレータでは、空気圧サーボを採用しているため、空気の圧縮性によって細かい位置合わせが可能であるとともに、万一の誤操作でも作業者を傷つけないようになっている。

今後の建設作業用マニピュレータ開発における課題としては、マニピュレータと移動機構の協調や重量物揚重のための油圧駆動などが挙げられる。

### c. その他

現在、建設作業における自動化・ロボット化の技術開発は停滞気味であるが、現場の作業者からは導入に肯定的な意見が多く、将来の需要と受入環境は期待できるので、安全問題をクリアしておく必要がある。特にロボット化技術においては、センシング、コンピュータ制御、マニピュレータの3つの基本要素間情報交換が重要であるから、安全制御を考えるに当たってはこれらの要素間の問題、例えば階層化システムの構成や学習・成長による運動制御なども検討する必要がある。また、今後は安全性の面でも国際規格等も考慮する必要がある。

### 3.4.7 電子技術総合研究所、東京電機大学における 知能ロボット技術

#### a. はじめに

コンピューター、計測自動制御技術などの進歩によって、製造業など伝統産業のロボット化が著しく進んでいる。しかし、現在使われている産業ロボットのほとんどは知能を持っていない。これら知能のないロボットを利用するため、あらかじめ作業環境の整備や教示、また、複雑な作業の教示とプログラミングを行わなければならない。このため、作業環境や作業タスクの変化が多い建設業のロボット化にとっては、ロボットの知能化または知能ロボット技術の開発が重要な課題である。ここでは、知能ロボット技術の開発研究で先端をいく電子技術総合研究所での研究例を基に、これらの課題を解決する技術について紹介する。

#### b. 能動両眼視覚システム

能動両眼視覚システムは人間の視覚機能と似たシステムで、視野中心部の解像度が高く、周辺視野の解像度が低い性質を持つ超広視野(120度)レンズを使用している。中心窩画像入力と注視点制御により視覚機能の効率化・適応性を追及し、視覚の能動化が研究されている。視覚センシングの能動化を目指して開発された中心窩能動ステレオ装置によって、視野中心の高解像度画像の実時間処理結果のフィードバックによる追跡視を実現し、同時に周辺視野で捕らえた広範な事象への反射的な視点移動も可能である。

#### c. ステレオビジョン

ロボットには、能動的、計画的に注視点の移動や追跡が可能視覚システムが求められている。このためには、カメラの向き、ズーム、フォーカスの変更がコンピュータで制御可能であり、かつ、リアルタイムで3次元情報の抽出が行えなければならない。現在、2台もしくは3台のカメラを使用したステレオビジョンシステムが開発されている。

ステレオビジョンはロボットの高度知能化の鍵を握る技術であり、現在様々な研究が展開されている。

#### d. ヒューマン・ロボットインターフェース

ヒューマン・ロボットインターフェースとは人間の行動がロボットに分かり、ロボットの行動が人間に分かるための、すなわち意志疎通のためのインターフェースシステムである。今後予想される人間とロボットとの共存環境下において、事故防止のためにも必要とされるシステムである。

インターフェースの実現方法として現在はプロジェクターでの投影を利用した2次元デバイスが研究されているが、今後はVRやホログラフィなどの3次元表示デバイスの利用が予想される。

#### e. レンジファインダによる環境教示

レンジファインダによる環境教示とは、レーザ光を物体に照射した際に得られる輪郭情報から、物体形状の面情報が取得可能なことを利用して、物体形状のモデル化を行う手法である。ただし、実際の作業環境下では、オクルージョンや鏡面反射などの悪条件により、完全な自動的環境モデリングは困難であり、オペレータによる補助が必要とされる。このため、レンジファインダを用いて3次元位置を測定し、オペレータの教示により効率よく環境モデルを構成する手法として、教示ツリーによる人間の介入が検討されている。これにより、オペレータにかかる負担を軽減し、効率のよい環境モデルの教示を行うことが可能である。

#### f. 移動ロボットによる環境認識(事情通ロボット)

屋内を移動しながら環境や人に関する情報を収集し、自律的に学習するシステムの構築方法が研究されている。これは、人間とロボットの共存環境下においては、機械の側からの環境や人に適応するための学習機能の実装が不可欠なためである。

環境認識のために超音波センサーやステレオビジョンなどが利用されている。状況に応じた様々な入力データを学習するために、階層型ニューラルネットワークが使用されている。学習に入力と同じパターンを使用するため、環境内を動作中に学習が可能であり、より効果的に動くことができる。



### g. 仮想環境による組立教示

現在、仮想環境を利用して組立作業の教示を行い、その結果から、プログラムを自動生成する方法が検討されている。シミュレータを用いて作業を行うと、自動的に接触状態の遷移系列が抽出され、その結果を基にプリティブな接触状態を実現するライブラリと教示データからロボットによる作業が実現される。

仮想環境内の物体を見ながら人間が教示を行うため、視覚的に理解しやすく、また、教示の際に実ロボットを利用しないため、安全に教示が行えるという利点がある。

### h. 群ロボットシステム

群ロボットシステムとは仲間の行動に応じて、その場で素早く自分の行動を切り替え、相手を助ける適切な働き方をし、という臨機応変な作業能力を有するロボット群である。

現在、「観察に基づく協調」という新しい技術体系が構築されつつあり、基本的な協調行動の例として、複雑な環境中で相手を発見し、他のものに惑わされず追跡する機能、物の受渡しのように相手に自分の動作を合わせる機能、衝突などの事態を事前に予測し先回りして助けてやる機能、そしてそれらを統合する仕組みなどについて研究が進められている。

多数のロボットに作業をさせるときに、人間がそのごく一部を遠隔操作して主な作業をさせ、他のロボットは臨機応変に自動的にそれを助けるといった使い方を可能にし、作業効率や柔軟性が大きく向上するものと期待される。

### i. 群ロボットのインターフェース

1対多のインターフェースシステムが開発されている。通常、ロボットによる作業を実行する際には人間がロボットに対して指令を送るが、このシステムでは対象物体に対して指令を送る点が特徴である。動かされる物体と多数のロボットがオブジェクト化してプログラミングされているため、人間からのメッセージを受け取った物体は、自らの動き方の決定とその結果をメッセージとしてロボットへ伝えることが可能である。人間は対象物体に対してのみ、動き方の指令を送ればよいので、群を構成するロボット数が増えても、オペレータの負担が増大することはない。

### j. 柔軟物体（電線）のハンドリング

電線のような柔軟物体は、作業中の形状変形を正確に予測することが困難であるが、現在、この問題に対して視覚を利用した物体形状の観測に基づく形状制御方法が検討されている。対象物体をステレオ視により観測し、得られた形状結果をもとに、制御量を決定し操作を行う。

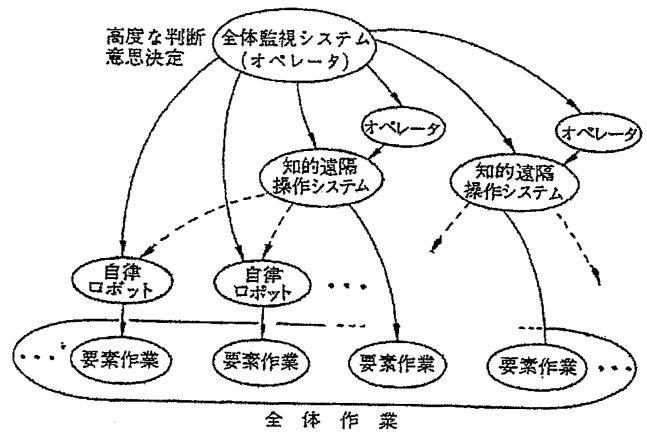


Fig. 15 Super long distance tele-operation.  
超遠距離テレオペレーション

電線の場合には、複数の追跡点を電線上に設置し、リアルタイムで追跡することによって形状変化の観測を行う。制御量を決定する際には、変形を予測するためのモデルが必要となるが、観測間隔が短くなるほど物体形状の変化が線形的になるため、粗いモデルのみで制御が可能となる。

### k. 多指ハンドによる物体モデル獲得

把持操作を通じて物体情報を得て、物体のモデル化を行うという人間の能力を実現するために、多指ハンドの物体操作機能とセンサ機能を融合することで物体情報を獲得し、把持物体の形状モデルを作成する方法が提案されている。触覚センサを利用して接触面状態を取得し、把持状態を変化させていくことにより、インクリメンタルに物体情報を獲得していく方法である。

触覚センサからは接触点の位置と表面法線方向及び接触力などの情報を得ることができるものの、接触点の局所な情報しかとれないので、物体の全体形状を認識するためには、マニピュレーションを通じて物体とスライディング接触、あるいはローリング接触を行う必要がある。

### l. 超遠距離テレオペレーション

超遠距離オペレーションでは、地球外に設置されたロボットを地上から遠隔操作することを目標としている (Fig. 15)。超遠距離状態での遠隔操作で問題となるのは、通信容量の制約と通信遅延である。

これらの問題を克服するため、物体操作知識ベースによる自律制御と知的モニタリングによる自律監視法を用いたシステムが開発され、太平洋間の遠隔操作実験では良好な結果が得られている。また、柔軟な展開構造物の組み立てにより生ずる累積誤差を補償するためコンプライアンス/力複合制御が用いられている。

この技術を発展させると、宇宙に送られた貴重なリソースであるロボットを各国のユーザーが相互利用で

きるばかりでなく、家庭からネットワークを用いて、宇宙を含めた世界中のロボットを利用できる可能性につながる。

#### m. 点光源照明による3次元計測

壁、ドア、柱など平面や円柱状物体の3次元計測を簡便に行うための手法で、TVカメラと2台のストロボを使用する。ストロボ照射時の画像から等輝度曲線を求め、輝度分布のピークの画像上での位置から面情報を得ることにより、3次元情報の再構成が可能である。システム構築が容易であることなどから、移動ロボット用のビジョンセンサとしての応用が期待されている。

#### n. おわりに

ロボットビジョン分野、特に建設ロボットに有用と思われる知能ロボットに関連する研究テーマを紹介した。ここに挙げたテーマはロボットの知能化のために最も重要なものであり、生産効率の向上だけでなく、作業環境及び対象物に対する自動認識や、人間とロボットの意志疎通を可能にする。このようなロボットの知能化は、生産の安全性の根本的な改善にもつながるものである。

### 3.5 建設における施工自動化の問題点と課題の抽出

各委員から、施工の自動化・ロボット化に際して留意すべき事項や問題点を挙げていただき、各々の項目について検討を加えた。基本的には、建設用ロボットの形態にこだわらずに、開発されたものから今後出現が予測されるものまで含めて、技術的問題点や課題を抽出した。

#### 3.5.1 問題点と必要要件の分類

主に技術的観点から抽出された現状の問題点と今後検討すべき要件を、センシング、マニピュレータ・移動機構、制御、システム・その他に分類して、各々の分野内で以下のように細分化した。

##### a. センシング関係

###### 1) 障害物（人を含む）の非接触検知

・超音波、光、画像

環境に対する影響

信頼性が低い（冗長化などの高信頼化が必要）

高速化（処理）

検出範囲（ダイナミックレンジ）

複数（多様な）の組み合わせで確実な判断

実際の現場での適用環境に注意

###### 2) 接触検知

耐久性

干渉性（柔軟さ）

感圧処理（しきい値の設定など）

##### 検出範囲

自己診断機能、フェールセーフ性

対象の把握、認識

使用環境の認識

触覚センサからの情報取得

###### 3) 過負荷防止（荷振れ防止）

モーメントリミッターの運用（無効化の対処）

安定性と適正な負荷バランス

荷姿認識（形状・質量）

###### 4) 標識の認識

環境（外乱光など）の影響

簡素化・対象物（マーク）の検討（標準化）

移動物体認識性能と多方向認識性能

認識精度

##### b. マニピュレータ・移動機構関係

###### 1) ハンド・アーム・アクチュエータ

本質安全（力・速度）、柔軟さ

挟まれるの対処（メカニズム・センサ）

軽量化・剛性・精度

可動範囲の認識（対人）

誤動作への対処

###### 2) 動力源

出力/重量比

ケーブル処理

負荷バランス

発電機（電源の質、ノイズ）

###### 3) ロコモーション機構

作業環境（走行路面）に応じて検討

モジュール化

転倒、荷崩れ防止（姿勢制御）

##### c. 制御関係

###### 1) コンピュータ制御

ソフト更新への対応

ソフト蓄積（資産）と利用

ドキュメント化

自己診断機能

ソフトのデバックの完全性

制御停止の確保

コスト（評価に対して）

###### 2) リモートコントロール

時間遅れと自律性の関係

死角（全体の把握）

通信経路の遮断で停止の確保

###### 3) 自律制御

単純な機能の集積で高度化が可能か？

最低限必要な自律機能の検討

人間介入の必要性

- 4) マニュアル操作
  - 操作者とのインターフェイス
    - (情報の呈示, VR, フィードバック利用の操作)
    - ヒューマンエラー (通常の管理でよいか)
    - 人間の知覚, 操作モード認識
    - 作業内容による操作の違い
- d. システム関係, その他
  - 1) 安全装置
    - 許容範囲の設定
    - タンパーレジスト性
    - 保守性
    - 停止モードの実現
    - 耐環境性
    - 産業用ロボット用途の装置の流用可能性
  - 2) 無線通信
    - 遠距離通信性能
    - 混信, 中断
    - リアルタイム性
    - 操縦用通信装置の管理と使用者資格
    - GHz 帯の利用
  - 3) 人間との共存・協調
    - センシング処理の高速化
    - 環境, 動作認識
    - 知能化 (人間の知覚判断速度を超える技術)
    - 機械技術, 建築技術の進展
  - 4) 危険性の評価
    - 危険状態の定義
    - 想定される影響 (被害) の定義
    - 既存の法律体系との適合性
    - VR によるシミュレーションの活用
  - 5) 操作者とのインタフェース
    - 疲労の軽減
    - 異常時の対応
    - 操縦系フィードバックの採用
    - 操作の単純化と確実性
    - 視覚確認時の情報提示
  - 6) ノイズ
    - 環境適合した計測方法, 対策, 基準
    - 外乱ノイズ (電波帯, 溶接時) の分析と対策
    - 侵入ノイズと放出ノイズの防止
  - 7) 標準化
    - 設計条件, 環境の整備
    - 産業用ロボット安全規格の導入可能性
    - 技能, 技術の公表と共用
  - 8) 操作者とロボットの役割
    - 役割の明確化 (操作者の判断の妥当性)
    - ロボットの外乱要因の整理

技術進展と操作者の役割とのトレードオフ

- 9) コスト
  - リース・保守体制の整備
  - コストメリットと技術開発
  - トータルコストの算出
  - 安全性向上と環境負荷低減
- 10) 知能化・多機能化
  - 設計, 施工計画との情報連携
  - 標準化や規格化との関連
  - 高度化に伴う人との不親和性
  - 既存技術の適用範囲の拡大
  - 既存技術のブレイクスルー

### 3.5.2 安全防護手段についての考察

前述したように, 建設用ロボットによる災害統計は存在しないが, その災害は建設機械と産業用ロボットを合わせたものが想定されるため, 挟まれ, 激突や転落が多くを占めることが予想される。すなわち, 建設用ロボットの安全防護としては, ロボットの移動あるいはアームの動作に対して人間との接触を防止するか, ロボット転倒によって搭乗者が転落したり下敷きになることを防止することが優先される。そこで, 接触防止用と転倒防止用の安全防護手段として, 現状利用されている装置や開発されている装置について検討を行った。

Table 3 は, 安全防護の目的別に安全防護装置を分類して, 実用性と安全性のレベルを考察したものである。接触防止のためには, 先ずロボットが人間が近接する前にその存在を検知して, ロボット側は回避や減速を行うとともに人間へ警告を与える。それでも人間とロボットが近接する場合は, 人間のロボットへの接触を検知して最終的にロボットを停止させて災害を防止する。一方, 転倒防止のためには, 先ずロボットの走行路面が正常でないとき, すなわち障害物が存在したり路面が平坦でなければロボットは回避する。もし, ロボットが傾いてしまったら, 転倒する前にそれを検知して, ロボットを最終的に停止させることで災害を防止する。なお, 速度監視は, ロボットが減速して人間に接触するときの低速度が過大にならないことを確認するためである。

各々の安全防護装置については, 実際に建設用ロボットに適用する場合の実用性が高い場合を○, やや高い場合を△で示し, 実用性が低い安全防護装置については割愛した。また, 現行の安全防護装置を今後フェールセーフ化して, 安全水準を向上できる可能性のあるものを○, 可能性はあるが技術的に困難と思われるものを△で示した。

実用性の高い装置の内, 対象物に超音波や光線をアクティブに照射して, その反射波を捉える反射式のセン

Table 3 Classification of safeguarding devices for construction robots.  
建設用ロボットに適用される安全防護装置の分類

安全防護の目的	安全防護の機能	安全防護手段	問題点	実用性	フェールセーフ化の可能性
存在検知	進行/動作方向前方の人を非接触に検知し、ロボットを回避、減速、あるいは停止させる	反射式超音波センサ	風の影響を受け易い	○	○
		反射式光線センサ (赤外線, レーザー)	反射面形状や反射率による変化が大きい	○	△
		焦電センサ	外光, 温度の影響を受ける	△	△
		静電誘動式センサ	環境変化に対応できない	△	△
		トランスポンダ方式 (電波, 赤外線, 超音波, データキャリア)	受信機を持たない第三者の検知ができない	○	○
		マイクロ波センサ	検知範囲が限定される	△	△
		画像処理 (カメラ)	応答性に限界があり高価	△	△
接触検知	進行/動作中に人との接触を検知し、ロボットを回避あるいは停止させる	バンパ (テープスイッチ, リミットスイッチ)	断線や接触不良により検知できない恐れがある	○	△
		バンパ (感圧ゴム, 磁歪式センサ)	スイッチ式に比べて高価	○	○
		タッチスイッチ (接点式)	接触検知箇所が限定される	○	△
		荷重・圧力センサ (ゲージ式, 磁歪式, マグネセル式)	接触判定に作業環境の影響を受け易い	△	○
		加速度 (振動) センサ	衝突検知のみで高価	△	△
走行確認	走行路面の不整, 段差を早期に検出し, ロボットを回避させる。	測距センサ (超音波, 赤外線, レーザー)	環境変化を受け易い	△	△
		画像処理 (カメラ)	高価	△	△
傾斜検知	ロボットの水平状態または過大な傾斜を検知し, ロボットを回避あるいは停止させる	傾斜スイッチ (接点式, 液面式)	精度, 応答性ともに低い	○	△
		傾斜センサ (容量式)	スイッチに比べて高価	○	○
		ジャイロ	高価	△	△
速度監視	状況に応じた適切なロボット移動速度を監視する	エンコーダ, レゾルバ, タコジェネレータ	極低速時の速度判定が困難	○	△
		回転センサ (フォトセンサ, 近接センサ式)	極低速時の速度判定が困難	○	△

さは、多くの種類が普及しているが、人間の存在を危険信号として通報する構造上、常に正常に機能していることの確認が必須である。しかし、市販の反射式センサはそのような正常性確認機能を持つものはないため、センサを多重化したり人間に反射テープ付きの服を着せたりして検知信頼性を向上させることが試みられる。ただし、検知感度を上げたり、検知判断を安全側にとりすぎると、ロボットは頻繁に停止して稼働率低下が危惧される。

また、ロボットから発信される電波等を人間側のヘルメットや服に装着された受信器で受信し、さらにロボット側へ返信するというトランスポンダ式は、受信

／返信器を持つ人間の位置把握が可能のため、機能的なロボットの停止制御と常時通信による正常性確認の実現が期待される。しかし、受信／返信器を持たない人間には無関係であるし、受信／返信器の配布や回収等の管理も問題となる。

接触検知手段は、無人搬送車には多く装備されているが、建設機械にはあまり使用されていない。バックホーのような長いアームに対してはバンパーで全てをカバーすることは現実的でなく、また、作業対象への接触自体が避けられないことがその理由と推測される。しかし、ロボットの移動機構にはバンパーが実用的であり、正常性が確認できれば極めて有効な手段である。

ただし、バンパーが人間に接触するときは低速でなければならず、なおかつ、バンパーには緩衝性も要求される。

カメラ等を用いて画像処理を行って人間や障害物を識別し、あるいは路面状況を把握する方法は、早期の警告目的には有効と考えられるが、コストがかかり、安全防護装置の目安であるロボット本体価格の1割以下の実現は難しい。

一方、転倒防止のための傾斜センサも有効ではあるが、転倒しない機構でない限り、早期の正しい傾きの判断と正常性の確認が求められる。ただし、現状のものではそれらの要件を満たしているとは言い難い。

以上の建設用ロボットに適用可能な安全防護装置の要件をまとめると、人体と他の障害物や構造物を識別して人体のみ検知でき、人間側に依存せず、耐環境性や応答に優れ、低コストであることが求められる。さらに重要な点は、危険検出時には速やかにロボットに検知出力を伝達するとともに、それ自体の正常性を常時確認して、確認できないときは危険検出と同様の挙動を保証する仕組みが基本的に必要である。それが実現できない場合は、検出信頼度を上げる工夫を施すとともに、人間側、システム側（ハードウェア、ソフトウェアの自己診断処理等）の連携を積極的に活用することが望ましい。あるいは、安全防護を適用する前に、本質安全設計の可能性を探るべきである。

#### 4 今後取り組むべき課題と研究の方向

建設用ロボットの安全制御技術に関する検討委員会から抽出された施工自動化の問題点と課題は、非常に多岐に渡っているが、安全にかかわる問題の解決は「危険状態に陥る前に、如何に確実に安全を確保できるか」という点に尽きる。ロボットシステムのハードウェアやソフトウェアが故障や異常時に、あるいは操作者を含む人間のエラーであっても、少なくとも安全を損なわない仕組みを有することは不可欠である。たとえ、生産性を下げても、ロボット停止で安全を確保することが基本となる。このような安全確保の原則は、国際規格で規定されている<sup>12)</sup>通り、危険状態を生じる危険源やそれに暴露されるリスクを除去あるいは低減するため、本質安全設計や安全防護を講じることになっている。

一般の産業用ロボットにおいては、このような安全原則に則って、ガード等による「隔離」とインターロック機能による「停止」を保証している。建設用ロボットであっても、このような安全原則に従って設計されるべきであるが、人間と共存する環境下で移動する形態がその原則の適用を困難にしている。すなわち、物理的なガードによる「隔離」は無理なため、安全確保は

「停止」の原則に依存せざるを得ないが、高リスク対応の人間検知防護装置が建設用ロボットに適用できることが少ないからである。前節の人間のセンシング手段では高信頼化とフェールセーフ性が重要であり、特に接触検知手段は、非接触式検知手段が無効となっても最後にロボット停止を実現するためにフェールセーフ性は必須である。

また、現在のロボット制御システムは、強力な自己診断機能により高信頼化は進んでいる<sup>13)</sup>が、未だフェールセーフコンピュータは実現していない。ノイズや過酷な環境に対しても脆弱である。自律制御機能や知能化は技術の進展がそれらの実現を後押ししているが、安全機能はようやく簡単な機械制御に展開されつつある<sup>14)</sup>のが実状である。

以上のような状況に鑑み、当所における建設用ロボットに関する研究課題として、次のような項目を策定した。

- (1) 開発対象の建設用ロボットは、高機能な自動化を求めず、マニュアルマニピュレータを基本とする。ただし、マニピュレータは本質安全設計を優先し、移動機構は人間共存環境下である程度の自律走行を可能とする。
- (2) 自己診断機能や多様性・冗長性のある高信頼の非接触式障害物（人間を含む）検知手段とフェールセーフな接触式障害物検知手段を開発して、階層構成とする。
- (3) ロボット制御系は、機能目的部と安全（インターロック）目的部に分割してハードウェアを階層構成とする。

(1) については、仮に人間と接触しても危害を与えないマニピュレータの本質安全構造の実現を目指し、必要な要素技術を開発する。また、画像処理技術を応用した機能的な環境認識システムを構築し、自律走行の実用可能性について探る。(2) については、各々の検知手段の代表的なものを開発し、それらの安全機能（故障特性）を試験・評価する。さらに、階層化構成による効果を検証する。(3) については、安全多重化コントローラを導入し、センサや（無線）通信権を含めた機能的な安全性について評価を行う。また、ノイズによる誤動作可能性についても調査を行う。

このような研究を遂行することによって、安全機能の要素技術の開発とシステム化、およびそれらの評価まで期待でき、建設用ロボットの安全化と普及に寄与することが可能と考える。さらに、これらの研究成果が、移動機械や今後出現が予想される人間協調型ロボットの安全規格、指針への端緒となることが期待できる。

## 5. おわりに

本章では、「建設用ロボットの安全制御技術に関する検討会」の検討結果を中心に、建設用ロボットの現状と取り組むべき研究課題について考察した。その結果、現行の産業用ロボット汎用技術の適用限界と安全関連技術の未成熟さが明らかになった。すなわち、人間が共存する環境下での安全な移動とマニピュレーションを保証する機能は実現されておらず、また、制御機構や操作系・通信系の安全制御化もまだ不十分であり、確立していない。また、国際安全規格を踏襲したリスクアセスメントが適用されていないなど、ロボット開発段階以前に検討すべき課題も多い。

これらの結果を基に、当所では建設用ロボットの安全制御技術に関する研究に取り組み、主として、安全制御要素技術の開発や階層化安全制御のシステム開発を推進する所存である。

## 謝 辞

「建設用ロボットの安全制御技術に関する検討会」に参加いただき、貴重なご意見をいただいた検討会委員の方々に深謝する。

## 参考文献

- 1) 長谷川幸男, 建設用ロボットの現状と今後の課題, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No. 2, pp. 66-70(1990).
- 2) 長谷川幸男編, 建設作業のロボット化, 工業調査会(1999).
- 3) 土木学会建設用ロボット委員会編, 21世紀を展望した

建設工事の自動化・ロボット化 —人と機械との協調を目指して—, 土木学会(1996).

- 4) 平成11年度版建設業安全衛生年鑑, 建設業労働災害防止協会(1999).
- 5) 労働省労働基準局編, 安全の指標(平成11年度), 中央労働災害防止協会(1999).
- 6) 建設機械の安全性の確保に関する研修会資料(最近の建設機械の安全装置をめぐる現状と課題), 建設業労働災害防止協会(1999).
- 7) 建設機械の自動化・コンピュータ化に伴う事故災害事例, 日本建設機械化協会(1997).
- 8) 「プラント点検作業ロボットの標準化調査研究」成果報告書, 日本ロボット工業会, pp. 212-222(1995).
- 9) 松井宗広他, 火山噴火対策における無人化工事, 土木施工, Vol. 36, No. 4, pp. 65-71(1995).
- 10) 新井一彦他, 建設施工ロボットの現在—ロボット開発の進め方, 施工, pp. 76-81(1997).
- 11) 新井一彦他, 建設施工ロボットの現在—開発体制並びに適用の実態, 施工, pp. 164-167(1997).
- 12) ISO/CD12100, Safety of machinery-Basic concepts, general principles for design(1998).
- 13) 杉本 旭, 池田博康, 産業用ロボットの安全性と高信頼性技術, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 6, pp. 30-33(1996).
- 14) 三平律雄, PSDIでいま何が起きているか, プレス技術, Vol. 35, No. 9(1997).

(平成12年1月14日受理)