

ロボット技術 特集

建設作業に人間型ロボットは使えるか

横井 一 仁

経済産業省では、平成10年度から14年度まで人間型ロボット技術とその適用分野を探求する人間協調・共存型ロボットプロジェクト（HRP）を実施した。建設作業への人間型ロボットの適用として、HRPでは、産業車両等代行運転分野において代表的な建設機械であるバックホウの代行運転を、屋外共同作業分野において人と一緒にプレハブ小屋へのパネルの建込み作業を実施した。本報文では、これらの研究成果を紹介するとともに、人間型ロボットの建設作業への適用可能性について述べる。

キーワード：人間型ロボット，バックホウ，遠隔操縦，パネル建付け

1. はじめに

経済産業省、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDOと略す）は、1996年度から5年間「人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト」（Humanoid Robotics Project; HRP）を約46億円の予算を投じて実施し、「働く人間型ロボット」の実現可能性を探求した¹⁾。

HRPには、独立行政法人産業技術総合研究所の他、民間企業12社、8大学11研究室他が参加し、研究開発用人間型ロボットおよびそれらの動作ソフトウェアの開発²⁾、「プラント点検」、「ビルホームサービス」、「対人サービス」、「産業用車両代行運転」、「屋外共同作業」の五分野への人間型ロボットの応用が研究された³⁾。

本報文では、その中で建設作業を対象とした、産業車両代行運転ならびに屋外共同作業への人間型ロボットの応用研究開発成果について紹介するとともに、人間型ロボットを建設作業に適用するための今後の課題についてNEDOで行われた調査研究結果⁴⁾を基に述べる。

2. 人間型ロボットによる産業車両の代行運転

人間型ロボットにより現在人が運転している建設機械等の産業車両を人に代わり遠隔運転することを目指し、川崎重工業株式会社、東急建設株式会社、産業技

術総合研究所が共同で研究開発を実施した。

従来、危険空間や悪環境下で建設機械の操作が求められる現場では、建設機械本体を無線化するなど機械ごとに改造を施す試みが数多く行われており、実用に耐え得る十分な成果が上がっている。

しかし、遠隔操作型の建設機械が要求される現場は、恒常的には非常に限られている。このため、例えば、バックホウの年間販売台数は30,000台を超えているのに対し、平成13年7月現在、遠隔操縦機能付きバックホウは全国で103台しかないという状況を生み出している⁵⁾。

一方、人間型ロボットは、人に類似の形態と機能を有するが故に、現在、人が使用している道具や機械、例えば建設機械をも使用することが可能である。つまり、人間型ロボットを搭乗させることで、現在人が運転している全ての建設機械のロボット化を図ることができる。

さらに、建設機械を運転する人間型ロボットは、運転専用のものである必要はなく、他の分野で活躍しているロボットを必要に応じて導入することができ、トータルな人間型ロボットのマーケットの拡大により、その生産コストや運用コストを低減できる。また、人間型ロボットを用いることで、運転のみでなく、それに付随した作業（例えば、下車しての現場確認、簡単な修理等）を実施することも可能と考えられる。

そこで、人間型ロボットを用いて現在、人が運転操作している市販の産業車両を人の3倍以内の作業時間で遠隔操作することを目標とし、研究開発を推進した。以下の各研究開発項目について具体的に説明する。

(1) 人間型ロボット

本研究開発では、HRP で開発された人間型ロボット HRP-1S(図-1) を用いた。HRP-1S は、P3 をベースに本田技研工業が製作した身長 160 cm、体重 117 kg (バッテリーを含む) の HRP-1 に産業技術総合研究所で開発した制御ソフトウェアを搭載したものであり、全身の協調動作、実時間歩行が可能となっている。

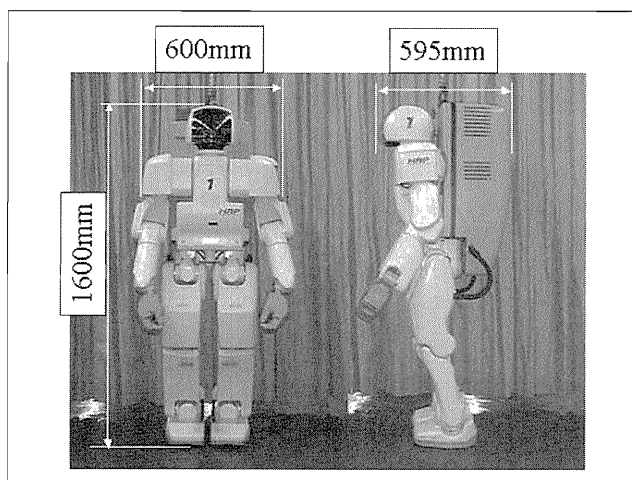


図-1 人間型ロボット HRP-1S

(2) 産業車両

市販のバックホウ (バケット容量 0.08 m³ 級) を、運転対象として選定した (図-2)^{*1}。HRP-1S では、その形状、腕の可動範囲から、バックホウの操縦席にある各種レバー、エンジンキー等の操作装置の内、残

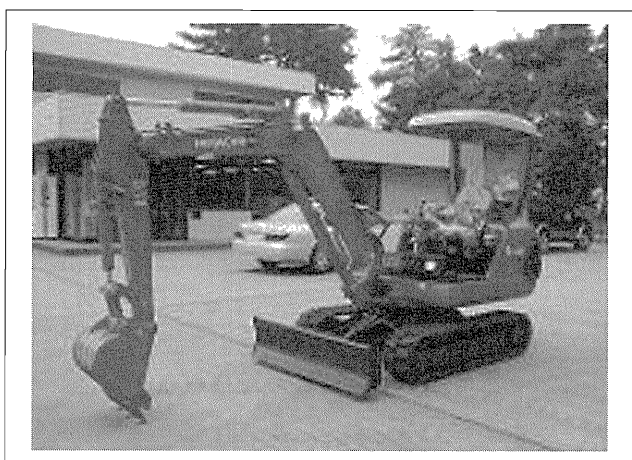


図-2 運転対象としたバックホウ

念ながら「走行レバー」、「操作レバー」の操作のみが可能であった^{*2}。

また、HRP-1S を安全かつ安定に着座させるため新たに開発した保護シートに換装した。

(3) 遠隔操作装置

産業車両の代行運転では、災害対応時のように、現場近くで遠隔操作装置を使用するニーズも大きいため、可搬性にすぐれた遠隔操作装置であることが望ましい。そこで、遠隔操作装置を質量 20 kg 以下のユニット構成とした「可搬型遠隔操作装置」を開発した (図-3)。

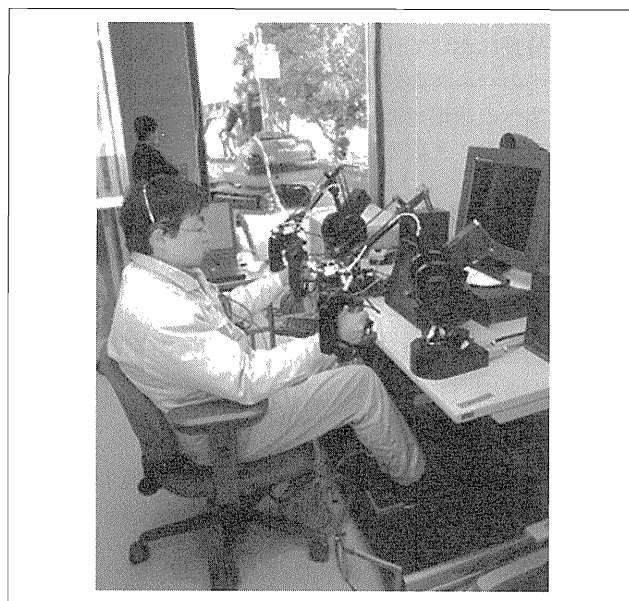


図-3 可搬型遠隔操作装置

可搬型遠隔操作装置は、人間型ロボット HRP-1S の主に手を遠隔操作するマスターアーム、主に脚を遠隔操作するマスターフット、ロボットの眼から得られる視覚情報を操作者に提示する 3 次元視覚提示ディスプレイ、操作のための情報を提示する GUI 提示ディスプレイおよび、視覚処理装置、制御装置から構成される。

(4) ロボット用保護具

バックホウの急な加減速、振動や、屋外作業の際の降雨から、人間型ロボットを保護するため、人間型ロボットのための各種保護具を開発した。

まず、バックホウ運転席への着座時の衝撃や作業中の振動から、ロボット臀部や内部電子機器の損傷を防止するため、人間型ロボット HRP-1S 用保護シートを開発した (図-4)。この保護シートは、

- ① 操作エラーにより着座動作中にロボットが座席に倒れ込んでも、高級電子機器に対する許容衝撃

*1 立ち姿勢運転型フォークリフトの運転にも成功している。

*2 搭乗時に HRP-1S のバックパックの干渉が避けられなかった運転席左側の操作レバーは、脱着可能に改造し、HRP-1S が手に持って搭乗した後、自ら差込むこととした。また、操作レバーの長さも若干延長した。

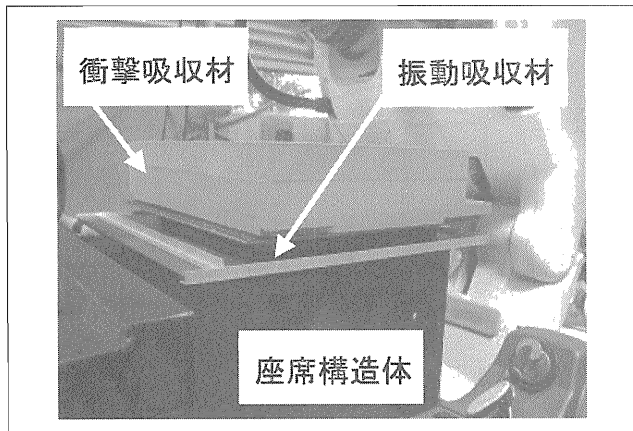


図-4 保護シート

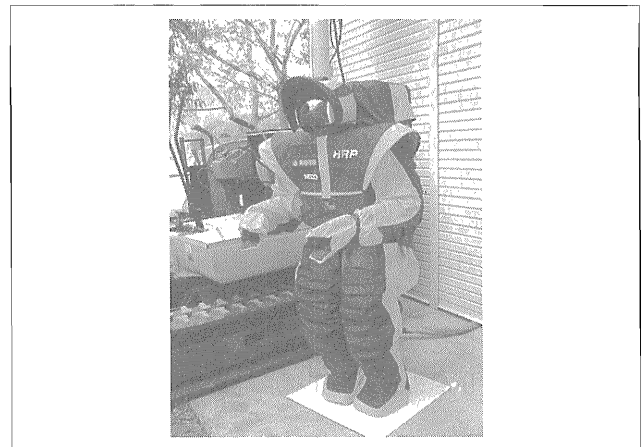


図-5 保護ウェア

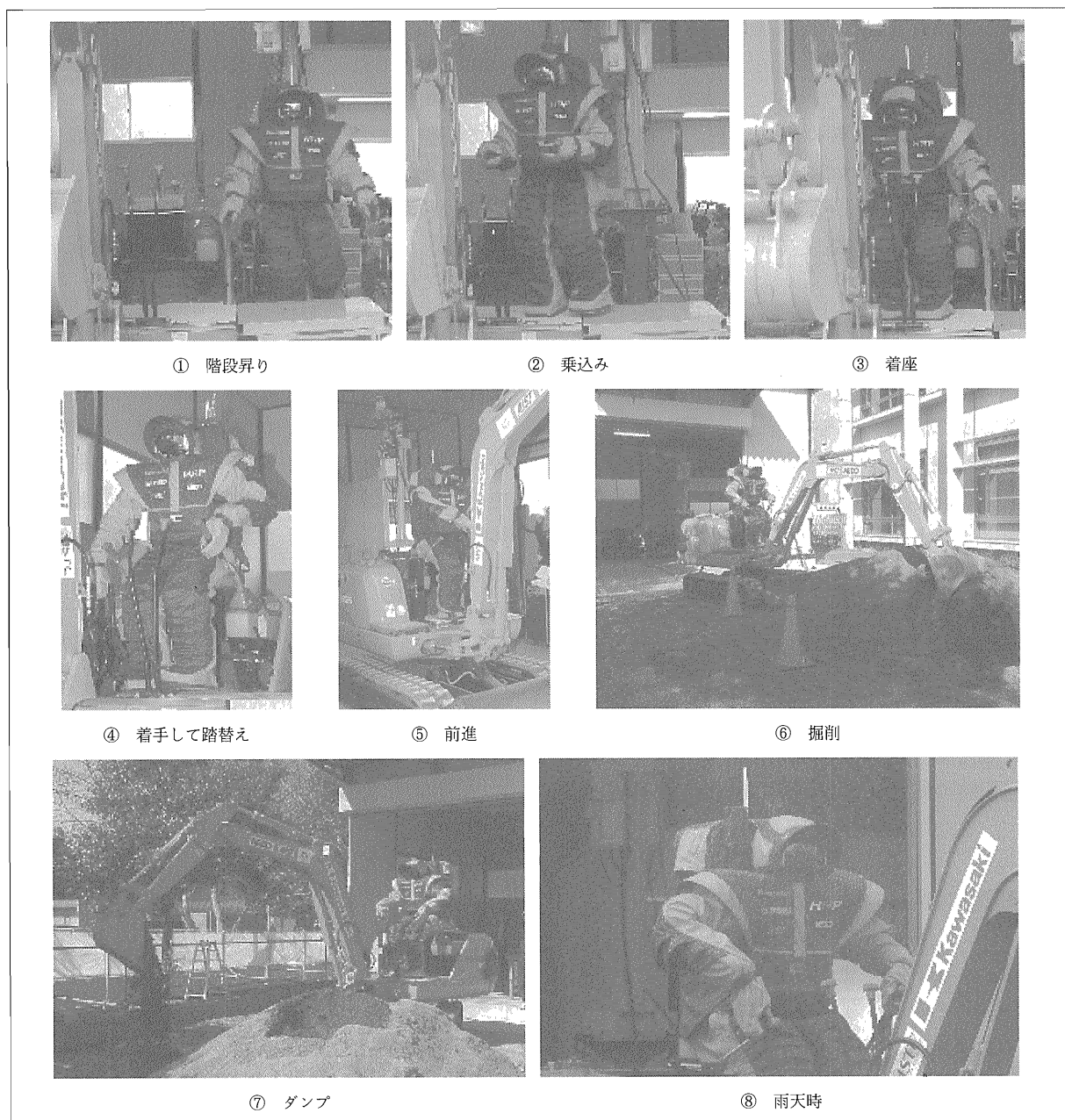


図-6 バックホウ代行運転の実証実験

加速度である 196 m/s^2 ($20g$) を超えないこと、
 ② バックホウ運転中のロボット重心点における振動が、一般的なハードディスクの稼働中の振動許容値 6.6 m/s^2 以下となること、
 を満足している。

次に、屋外における作業では、防塵・防雨機能が必要となるが、HRP 1-S は防塵・防雨機能を有していないため、保護ウェアを着用させ防塵・防雨機能を実現することとした。

人間とロボットの形状、可動範囲、発熱箇所等は大きく異なるため、これらを考慮した人間型ロボット HRP-1 S 専用の保護ウェア (図-5) を開発した。着脱性を考え、保護ウェアはフード、ベスト、スリーブ、パンツ、ブーツの五つのパーツから構成し、屈伸や、振れを伴う箇所は蛇腹構造として動作に影響を与えないようにした。

この保護ウェアは、人工気象室での実験により、毎時 200 mm の鉛直方向からの降雨状況において、縫製箇所や開口部から直接水の浸入は無く、動作に影響が無いことを確認した。また、温度計測実験により、HRP-1 S の制御装置への温度による影響を与えないことも確認した。

(5) 運転実験

HRP-1 S および可搬型遠隔操作措置を使用し、バックホウの遠隔操作評価実験を実施した (図-6)。

建設機械運転技能士の実地試験に準じ、

- ① 5 m 前進走行、
- ② 掘削ポイントに停止、
- ③ バケット掘削、
- ④ 旋回により土砂移動、
- ⑤ ③、④をもう一度繰返す、
- ⑥ ②の姿勢に戻し停止、

という一連の動作を行ったところ、本研究の目標である「人が直接搭乗して運転するのに対し、ロボットによる代行運転時の時間を3倍以下にする」が達成できた。

3. 人間型ロボットによる共同作業

建設現場における作業では、多くの場合二人作業が行われている。このような作業においては、二人が共に熟練者である必要はない例が多く見受けられる。HRP ではこのような二人作業において、非熟練者を人間型ロボットに置換えることを目標として研究開発を進めた。

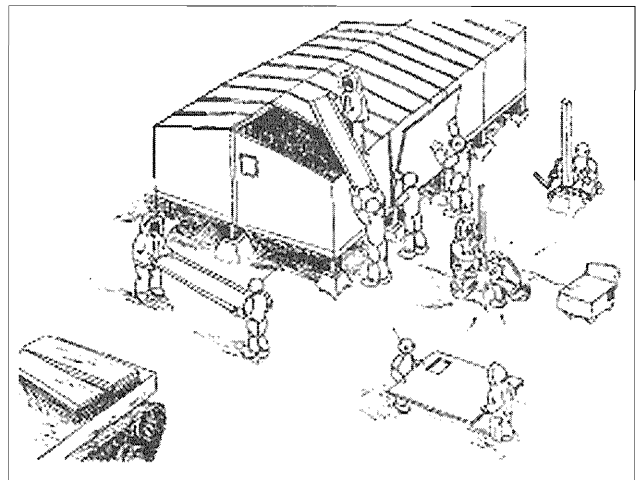


図-7 屋外共同作業のイメージ図

具体的には、図-7のようにプレハブ式簡易建築物の建設現場を想定して、操作装置を携帯した作業者とパネル集積所からパネルを共同で持ち上げ、据付け位置まで不整地を移動し、作業者が指示した取付け位置へパネルを建込む作業を、人間型ロボットと人の共同作業で行わせることを、株式会社安川電機、川田工業株式会社、清水建設株式会社、産業技術総合研究所が共同で研究開発した。

(1) 人間型ロボット HRP-2

HRP-2 は、川田工業が中心となり開発された人間型ロボットである。不整地対応機構、転倒回避機構、仮に転倒したとしてもダメージを極力回避できる機構を考慮に入れた設計がなされている。身長 154 cm 、体重 58 kg (バッテリーを含む) と特に軽量化が図られている (図-8)。

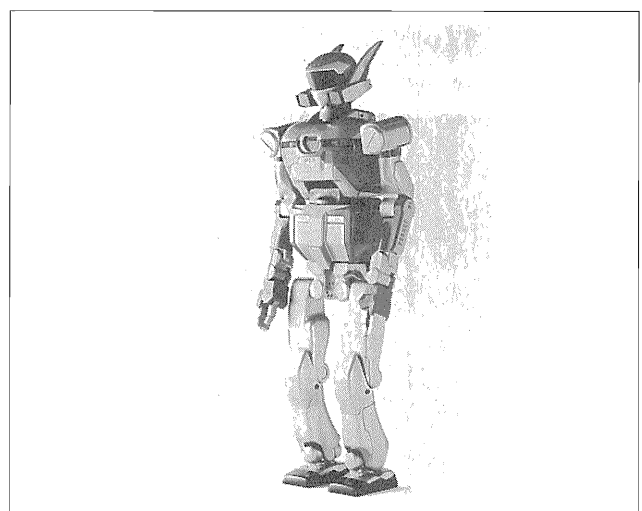


図-8 人間型ロボット HRP-2

(2) 環境認識技術

離れた場所に置かれたパネルへの接近、近傍のパネルに対するロボットの立ち位置の微調整、およびパネル把持の際に、セグメントベースト・ステレオ法を用いたパネルの認識を行い、パネルの位置と姿勢を計測した。また、それぞれの場合に、数回の画像取込みを行い、計測誤差の低減を図った。

ロボットの歩行動作及びパネルの把持動作は計測結果をもとに自動的に生成される。

認識においては、HRP-2 頭部に搭載された3台のカメラの画像から対象物体の輪郭線の3次元形状復元を行い、あらかじめ想定したパネルモデルと照合しその位置姿勢を求めた。

パネル把持に際しては、パネル角を検出するが、このときに最も高い精度が要求される。視覚システムから把持部までの距離は約400mmであり、このときの測定精度は2mm以内であるため、安定した把持動作が可能になった。

(3) コミュニケーション技術

人間とロボットが協調してパネルを積載場から取付け位置まで搬送し、建込みすることを目的とした人間-ロボット間のコミュニケーション手段として、音声操作手段でロボットの制御モード変更や動作コマンドを入力し、力覚操作手段で人間が加えた力と力の方向に応じてロボットが移動する手法を開発した。

(4) 脚腕協調技術

歩行型のロボットは車輪型の移動体とは異なり、移動時(歩行時)に上体の揺動を伴う。この歩行によって生じる揺動は人間との協調搬送時にはパネルが大きく揺れるためロボットの力覚誘導を困難にしていた。このような揺動を、歩行時の上体(腰)の揺動量から双腕にその逆位相の動作をさせることにより吸収する手法を開発した。

(5) 実証実験

図-9に目標とした人間との実証実験の状況を示す。

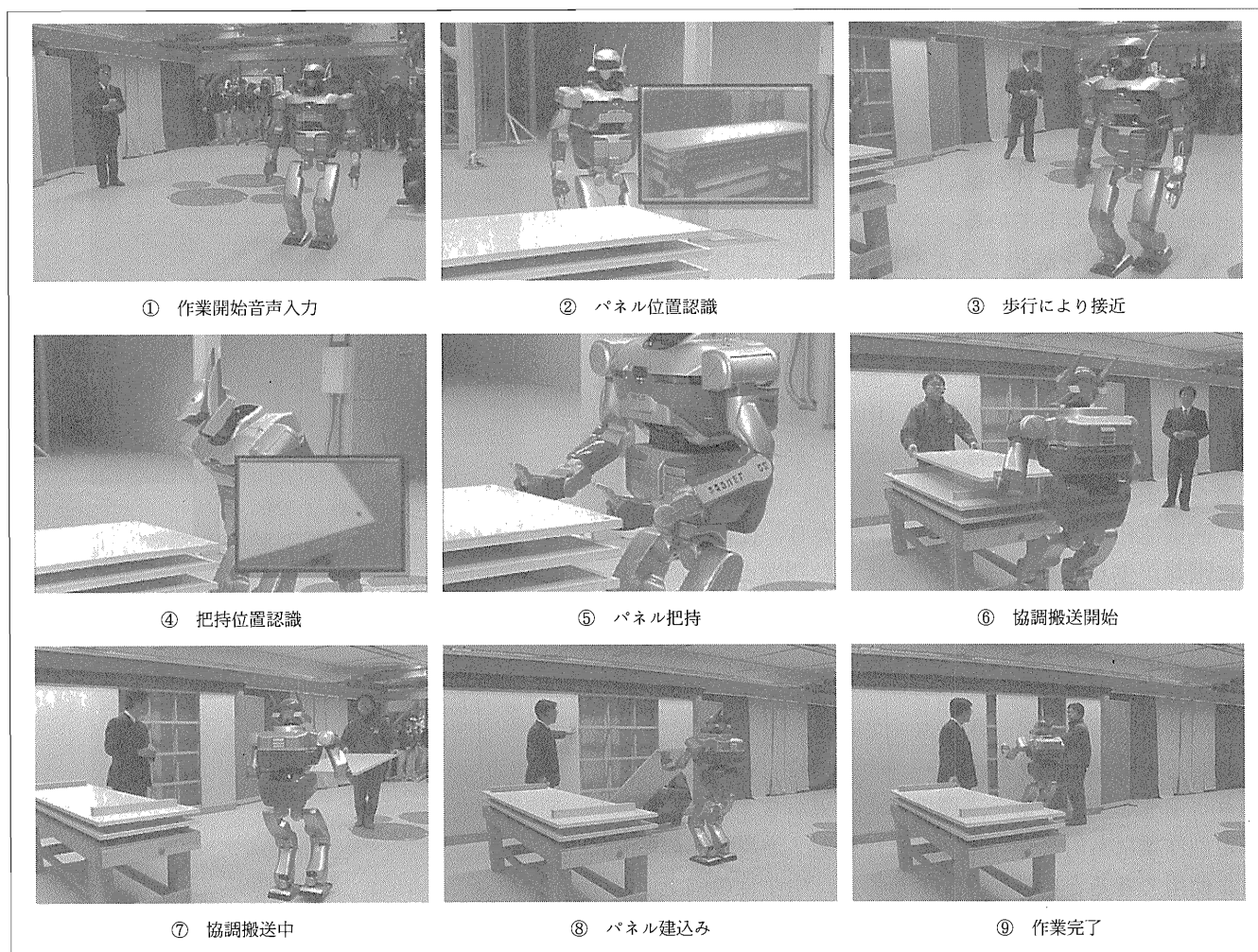


図-9 共同作業を想定した実証実験

ロボットへの作業指示は、音声入力により行った(①)。

環境認識技術にて地形計測、パネルの位置を認識し、パネル付近まで歩行する(②, ③)。

この際パネル把持位置が正確に取得できる位置まで環境認識技術を利用して自律移動する(④)。

再びパネル把持位置を検出し把持する(⑤)。

作業員(人間)と共同でパネルを搬送する(⑥)。

ロボットはパネルを介して伝えられる作業員の動きに合わせて共に(力覚操作)、歩行によるパネルの揺れを抑えながら(脚腕協調)移動する(⑦)。

プレハブ式簡易建築物に到着した後、パネルを溝に差込み、建込む(⑧)。

腕部の力センサでパネルからの反力を感知したら作業員にパネルの固定を依頼して作業終了となる(⑨)。

4. 人間型ロボットの建設作業適用に関する課題

建築工事を労働生産の観点から見ると、

- ・ 少子高齢化による労働力人口の減少、
- ・ 高学歴化による3K(きつい、きけん、きたない)職場の敬遠、
- ・ 熟練工不足、
- ・ 機械化が進まず労働集約型産業である、
- ・ 製造業よりも生産性が低い、

などの問題点を有している。

これらの問題を解決するために1980年代より各種建設ロボットが業界全体で数十機種開発されてきたが、ほとんど普及していないのが実情である。これらのロボット開発においては製造業の工場内ロボットの成功例に習い、機械化のために環境(現場)側を変更させようとして、かえって手間が増えたり、定型の繰返し作業を対象とし適応範囲が狭くなったり、機械の専用化・高機能化を図り稼働効率が低下したり、使いこなすに困難が生じたりする、というような問題点が多々あった。また、製造業とは違い、作業対象を動かすことが不可能なため、それらのロボットを作業員が作業場所まで運んでセットしてやらなければならない、このことも普及を阻害する一因となっていた。

これらの問題点の解決策の一つの切り口として人間型ロボットを使用すると、環境側の変更がなくなり、不定型作業にも対応が可能で、既存機器・道具がそのまま使用できるというメリットがあり、生産性の向上が期待できる。もちろんロボット自身が階段等も移動するため運搬やセッティングの手間が省力できる。

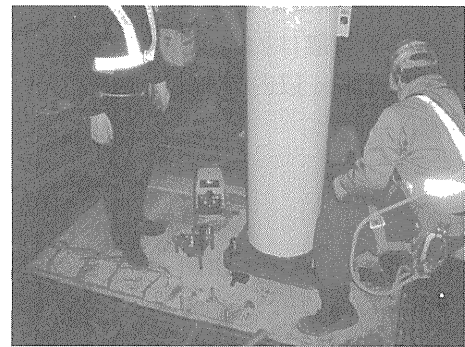
では、どのような建設作業に人間型ロボットが導入

できるであろうか。

建設作業は、不定型な場所で、多種の作業が実施されているが、資格を有しなければ作業を許可されない、



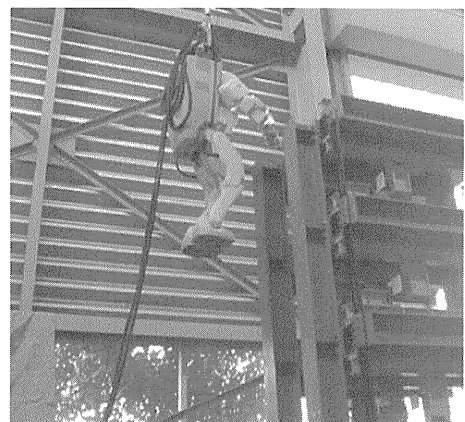
① 鉄骨建て方



② 計測作業



③ 小運搬



④ 高所作業

図一〇 人間型ロボットの適用が見込まれる建設作業

しかも未熟練者には危険性の高い作業などは、人間にとってもかなりの熟練を要するため人間型ロボットが行うことも近未来的には難しい。一般的な作業の中でも比較的人間型ロボットが適用しやすい作業として、HRPで行われた「建設機械の遠隔運転」「人との協調搬送」の他、図10に示す「鉄骨建て方」「計測作業」「小運搬」「高所作業」などが考えられる。特に、高所作業は、仮設足場を組む必要がないので、その分のコスト低減も望める。

しかし、現状の人間型ロボットでは建設作業に適用するには、まだまだ不十分である。具体的には、

- ① 人間並み（最低4時間）、またはそれ以上の連続運転が可能である。
 - ② 人間が耐えられる以上の悪環境下（温度、湿度、騒音、有毒物質）で作業が行える。
 - ③ 現場の採算にあう導入・運用コストへ低減する。
 - ④ 可搬重量を数十kgまで高める。
 - ⑤ 滑りやすい路面、ぬかるみ、仮設足場など、作業員が通行する現場の環境を歩行できるようにする。
 - ⑥ 地形形状や作業環境などの効率よく環境認識が行えるようにする。
- 等の課題を解決することが必要となろう。

5. おわりに

人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト、

HRPでは、一部の建設作業（建設機械の運転、パネルの協調搬送）に人間型ロボットが適用可能なことを実証した。今後は、ロボットの耐環境性、自律移動機能、自律作業機能等の向上を図ることにより、実用化へ大きく近づくものと考えられる。

人間型ロボット関連技術は、我が国が世界のトップで2位はない、という状況である。応用までの道のりは決して平坦ではないが、何とか課題を克服し、2010年までには実用化を実現したいと考えている。JCM/A

《参考文献》

- 1) 井上博允, 比留川博久: 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, 2001.
- 2) H. Hirukawa, et al.: Humanoid Robotics Platforms developed in HRP, Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, 2003.
- 3) K. Yokoi, et al.: Humanoid Robot's Application in HRP, Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, 2003.
- 4) 「次世代人間協調・共存型ロボットの応用に関する調査研究」, NEDO報告書, 2001.
- 5) 日本建設機械化協会ホームページのURL, <http://www.jcmanet.or.jp/saigai/>

【筆者紹介】



横井 一仁 (よこい かずひと)
 独立行政法人産業技術総合研究所
 知能システム研究部門
 ヒューマノイド研究グループ
 主任研究員

移動式クレーン Planning 百科

社団法人日本建設機械化協会機械部会建築生産機械技術委員会移動式クレーン分科会（石倉武久分科会長）では、約2年間の編集作業を終え標記の図書を刊行しました。

本書は、

- ・ 建築工事計画担当者,
- ・ 工事担当者,
- ・ 作業実施担当者,

にとって、短期間に移動式クレーン作業の要点を習得するのに最適な書物です。担当する建築工事に適合する移動式クレーンをより迅速に、より効果に選定・運用する際に大いにご活用下さい。

A4判 159頁 定価2,000円（消費税別） 送料400円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289