

人間と同じ重労働が可能な人間型ロボット試作機 HRP-5Pの開発

建築現場や航空機・船舶など大型構造物組立での実用化を目指して

阪 口 健

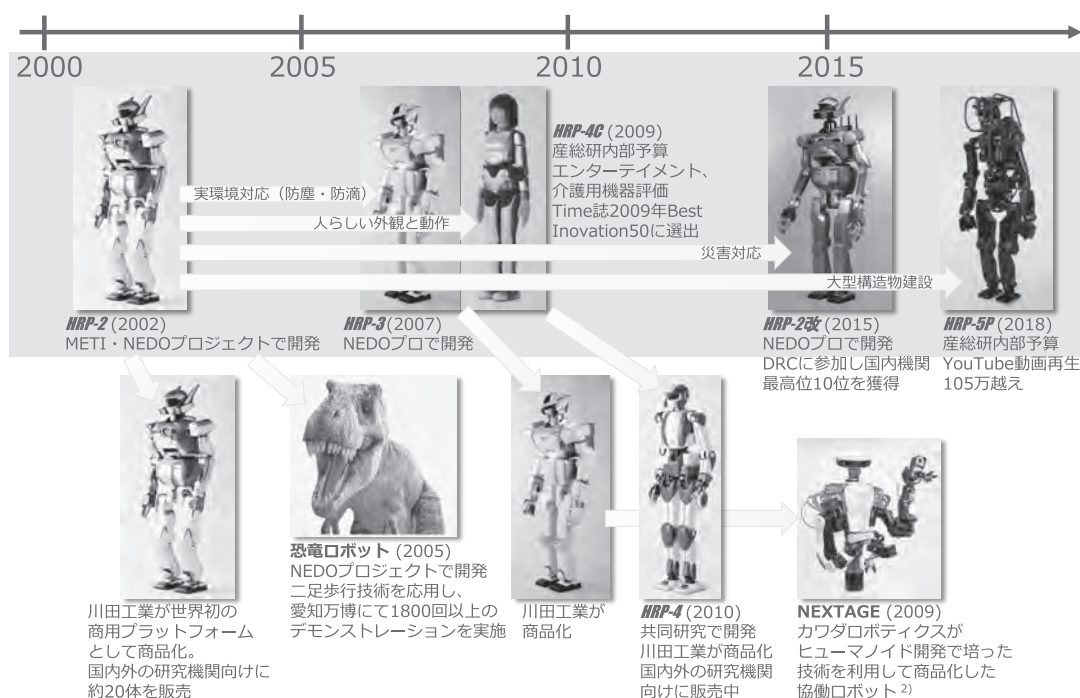
国立研究開発法人 産業技術総合研究所（以下、産総研）では、人間の重労働作業や危険な環境での作業を自律的に代替することを目指した人間型ロボットの試作機 **HRP-5P¹** を開発した¹⁾。この試作機は、産総研にてこれまでに開発してきた人間型ロボット **HRP** シリーズの技術を継承しながら最新のハードウェア技術を活用しシリーズ最高の身体能力を備える。これに環境計測・物体認識技術、全身動作計画・制御技術、タスク記述・実行管理技術、高信頼システム化技術からなるロボット知能を搭載することで、建築現場での代表的な重労働作業である石膏ボード施工の自律的な遂行を実現した。

キーワード：人間型ロボット、大型構造物組立、ロボット設計、ロボット知能、ロボットプラットフォーム、環境に応じた作業システム開発、新ロボットサービス

1. はじめに

少子高齢化に伴い、建設業など多くの業種が今後深刻な人手不足に陥ると見込まれており、これをロボット技術によって解決することが急務となっている。また、建築現場や航空機・船舶の組み立てなどの非常に大きな構造物を組み立てる現場では、作業員が危険な

重労働作業を行っており、これらの作業をロボット技術によって代替することが望まれている。しかしこれらの大型構造物の組立現場では、ロボットに合わせた作業環境の整備が難しくロボットの導入が進んでいない。その点、人間型ロボットは人間と類似した身体構造を持つので作業環境を変えずに人間の作業を代替でき、重労働作業からの解放が可能となる。



図一 産総研における人間型ロボット開発とその展開

¹⁾ 産総研において開発された歴代人間型ロボットは **HRP** シリーズと呼ばれ、今回の開発機は 5 代目の試作機という意味で **HRP-5P** と命名されている。

産総研は、複数の民間企業と協力してこれまでに複数台の人間型ロボットを開発し、実用化に向けた基盤技術の開発に取り組んできた（図—1）。2002年に開発した人間型ロボット **HRP-2** では二足歩行、寝転び・起き上がり動作、隘路歩行などを実現し、2007年に開発した人間型ロボット **HRP-3** では滑りやすい路面での歩行や遠隔操作による橋梁のボルト締め作業を可能とした。産総研が2011年から取り組んできた災害対応人間型ロボットの研究では、**HRP-2** の身体能力（手足の長さや可動範囲、関節出力など）を向上させた改良版 **HRP-2改** により、環境の3次元計測に基づく不整地歩行やバルブ回しなどの作業の半自律実行を実現してきた。しかし、石膏ボード壁面施工のような重労働作業には身体能力が不足し、また、複雑な環境での人間の運動を模擬するには関節数や関節の可動範囲が十分ではなかった。そのため、産総研は、人間の重労働作業を代替できる身体能力を備えた人間型ロボットを開発することとし、今回の試作機 **HRP-5P** 開発となった。

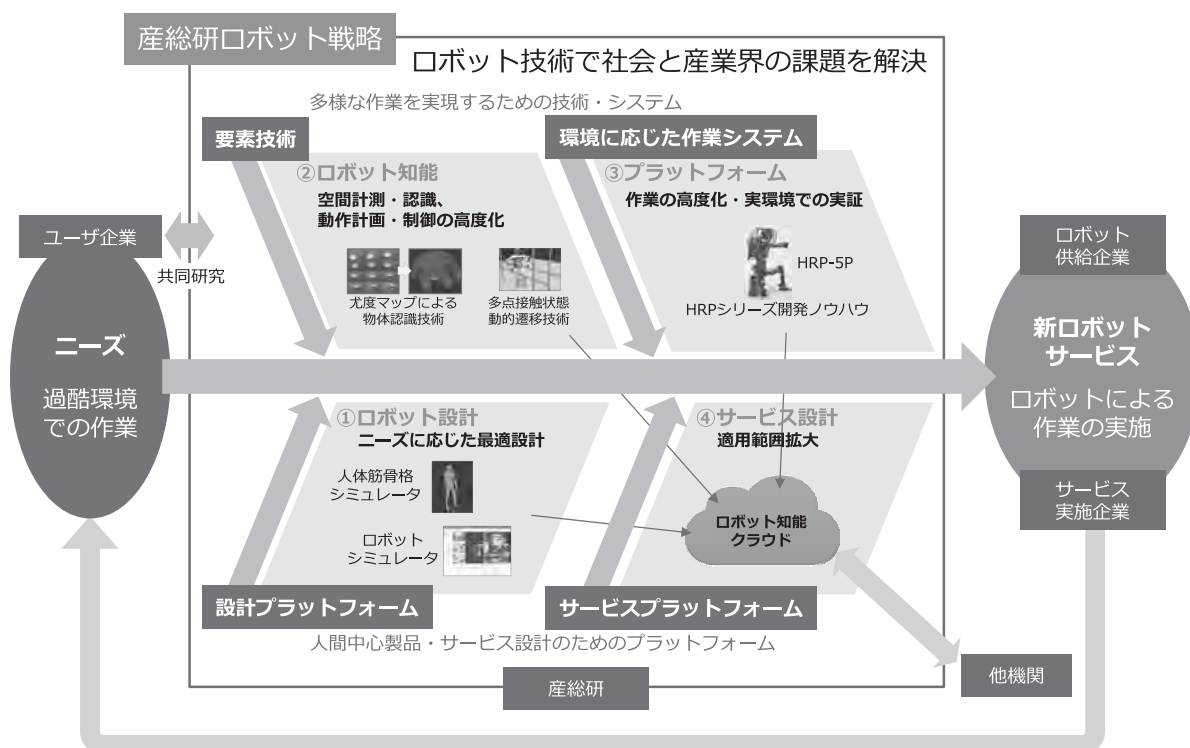
2. 開発の経緯

大型構造物の組立作業現場では、作業員不足が深刻化してきており（建設業就業者数は平成9年ピーク時685万人から平成28年は492万人と約28%減³⁾）、狭隘な空間での困難な姿勢での作業や単純繰り返し作

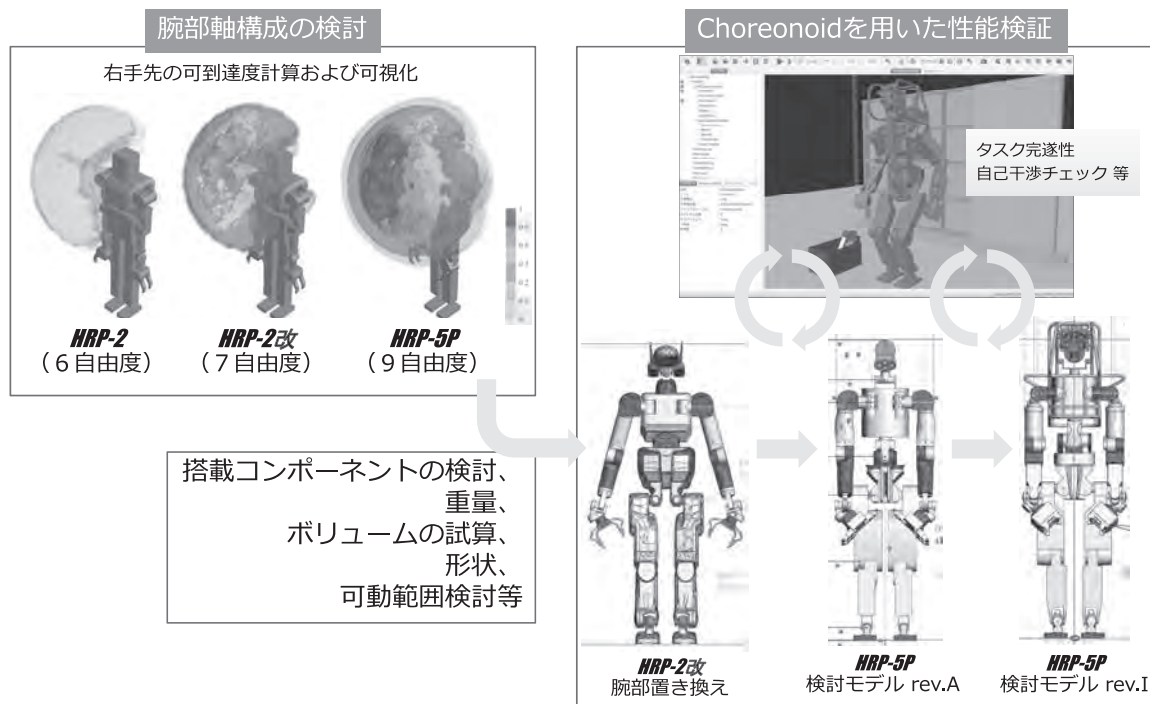
業、重負荷作業、危険作業という現場の課題が浮き彫りになっている。我々は、石膏ボードという重量物搬送が重労働であること、多数のビス打ちは単純繰り返し作業であること、天井へのビス打ちは上向き作業で作業員にとり高負荷であること、ボードを抱えた脚立昇降は危険作業であることなどから、石膏ボード壁面施工に建築業界のロボット化のニーズがあると考えた。事実、このような状況を打破すべく、清水建設や積水ハウス⁴⁾も既にロボット化を検討し始めている^{4), 5)}。

このニーズに基づき、産総研では図—2に示すような形で戦略を立て、ロボット設計、ロボット知能の要素技術開発、環境に応じた作業システム開発を行い、適用範囲拡大をはかりつつ、パートナーとなる企業を探し、その企業と共に新ロボットサービスを作り上げていくといった枠組みを考え、その実現に取り組んでいる。

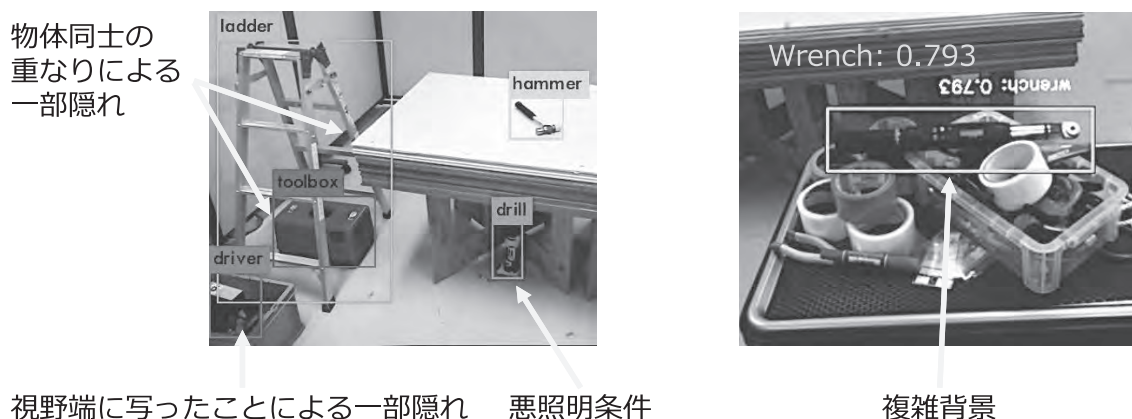
- ①ロボット設計では、オープンソースのロボット用統合 GUI ソフトウェアであり、動力学ロボットシミュレーターでもある Choreonoid⁶⁾ を設計プラットフォームとして活用し、例えば腕部軸構成を何自由度にすれば目的の作業を実行できるか、しやすくなるかをシミュレーションしながら最終デザインを詰めていった（図—3）。
- ②ロボット知能としては、環境計測・認識技術、動作計画・制御技術、高信頼システム化技術などの要素技術を開発した。環境計測・認識技術では、



図—2 産総研の人間型ロボット戦略



図一3 Choreonoid を用いたロボット設計例



図一4 対象物検出例

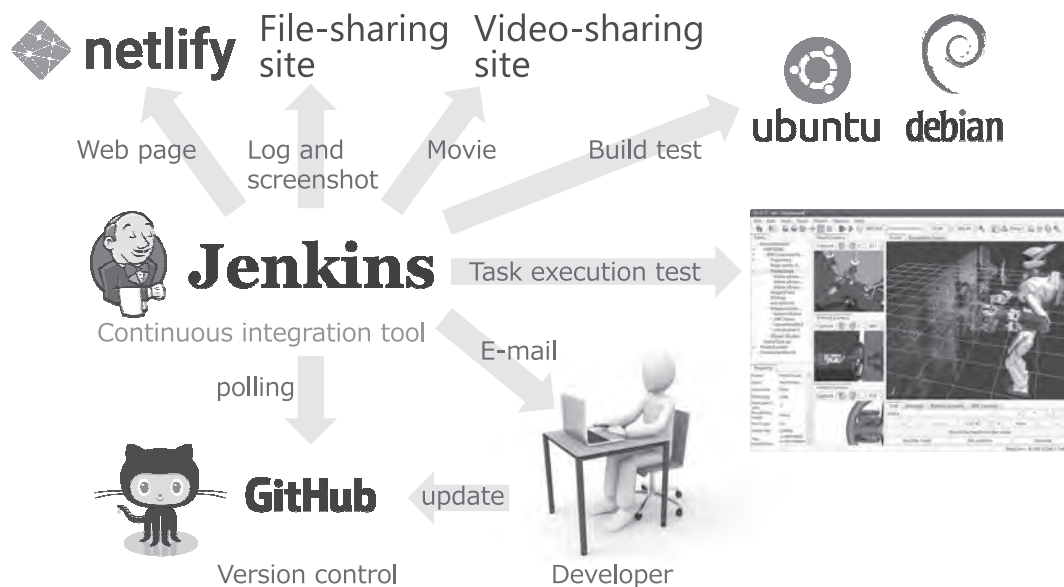
物体の見え方、照明、背景等の条件が一定ではない非整備環境において、物体の位置と種類を検出するために、作業現場に適した画像DBを構築して深層学習を適用することで90%以上の高精度で対象物体を認識できるようにした(図一4)。動作計画・制御技術では、環境計測データに基づいたロボスト多点接触運動技術を開発し、手足の環境との接触状態に応じて動作時間を伸縮可能で高速な動作生成と制御を可能とした。また、高信頼システム化技術を導入し、ロボットシミュレーター上にロボット知能の仮想テスト環境を構築し、24時間ソフトウェアのリグレーションを監視することで約25万行の大規模ソフトウェアの品質を維持し、信頼性の高いロボットシステムを構築することを可能とした(図一5)。

このようにして大型構造物組立での人間型ロボットプラットフォーム(図一2③)として試作機 **HRP-5P** を開発した。

3. 人間型ロボット試作機 **HRP-5P** の特徴

重労働作業の代替を目指し、強靱な身体と高度な知能を兼ね備え、ロボット単体で自律的な作業ができる人間型ロボット試作機 **HRP-5P** の特徴は以下の通りである。

- 身長 182 cm, 体重 101 kg で首部 2 自由度, 腰部 3 自由度, 腕部各 8 自由度, 脚部各 6 自由度, ハンド部各 2 自由度の合計 37 自由度を備え, ハンド部を除く自由度数では歴代 **HRP** シリーズで最大。
- ・ **HRP-2改** に比べて, 腰に 1 自由度, 腕部付け根



図一五 シミュレータを用いた CI (継続的統合) 環境

に 1 自由度を追加したことにより、より人間に近い動作が可能。

- ・石膏ボード (1820 × 910 × 10 mm, 約 11 kg) やコンパネ (合板) (1800 × 900 × 12 mm, 約 13 kg) のような大きな対象物の両腕でのハンドリングが可能。
- 人間よりも自由度数が少ないロボットで人間の動作を模擬するため、複数の関節が集中する股関節部や腰関節部でも、最大限の可動範囲を確保。
- ・例えば、脚を屈曲・伸展させる股関節の可動範囲は人間の 140 度に対して本試作機は 202 度、上体を旋回させる腰関節の可動範囲は人間の 80 度

に対して本試作機は 300 度。

- ・これにより深く屈み込んで上体をひねった姿勢などさまざまな姿勢での作業が可能 (図一六)。
- 高出力モーターの採用、駆動機構への冷却導入、および一部の関節での複数モーターによる関節駆動方式の採用により、**HRP-2改**に比べて関節トルク、速度ともに平均で約 2 倍に向上。
- ・これにより石膏ボードを平積み状態から持ち上げるような重負荷作業が可能。
- ・腕を水平に伸ばした状態での片腕の可搬重量が **HRP-2改**の 1.3 kg に対して本試作機では 2.9 kg。
- 頭部複合センサーを用いて、常時 (0.3 Hz) 周辺環



前後180度開脚

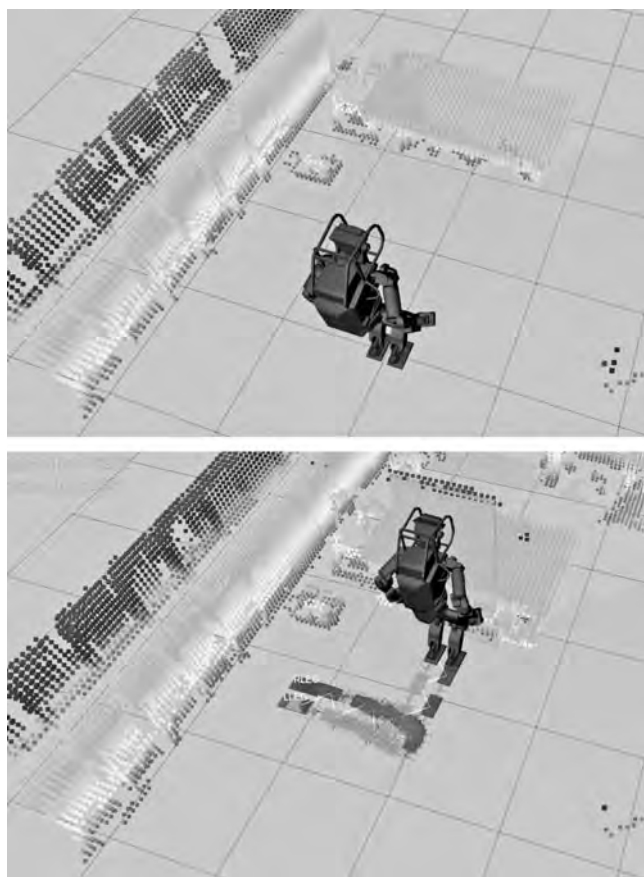


90度以上の前屈



腰高さ程度の台への乗り上げ

図一六 多自由度化、可動範囲拡大による人動作模擬能力の拡大



図一七 周辺地図（上）と歩行計画（下）

境を3次元計測。

- ・計測結果の蓄積や記憶の更新により作業対象物で視野が制限される状況でも搬送の歩行計画や足部の滑りなどに対する歩行補正が可能（図一七）。



作業環境の一例



ハンドと内蔵カメラ



しっかりと正確に把持



改造後の連結ねじドライバ

図一八 作業とロボットに合わせた電動工具改造

4. 人間型ロボットによる石膏ボード壁面施工

前章で述べた各技術の統合により、大型重量物のハンドリング、搬送が必要な石膏ボード壁面施工を、模擬住宅建築現場（図一八左上）において本試作機単体で自律的に遂行することを実現した。

但し、試作機のハンドでは電動工具のトリガーが引けないことと、しっかりと把持しないとビス打ち時に工具がはじけ飛ぶ可能性があり危険なこと、ネジ打ちの位置ズレを防ぐためには工具先端の位置・姿勢をしっかりと定める必要があることなどの理由から工具に改造を施した。具体的には、試作機のハンド形状に合わせたグリップ形状にして握りやすくし、そのグリップの空間内に電源用リレースイッチと無線モジュールを内蔵することでスイッチのON/OFFを無線化、グリップエンドに産総研で開発した高精度ARマーカを貼ることでグリップ把持位置の認識精度を向上した（図一八右および下）。この高精度ARマーカは、Lenticular レンズによりモアレ縞を作ることで、正面からの撮影を苦手とするARマーカの弱点を克服し、単眼カメラのみで複数のマーカの位置・姿勢を高精度に検出できるという特徴を持ち⁷⁾、市販化もされている⁸⁾。

なお、電動工具のグリップをロボット用に改造することに関しては、多くの大工が自分用の道具を持ち、自分の手に馴染むように使い込んでいることから、さほど大きな問題ではないと考えている。また、最近で



HRP-5Pが握りやすいグリップ形状に変更し、Wi-FiによりスイッチをON/OFFできるボードをグリップに内蔵

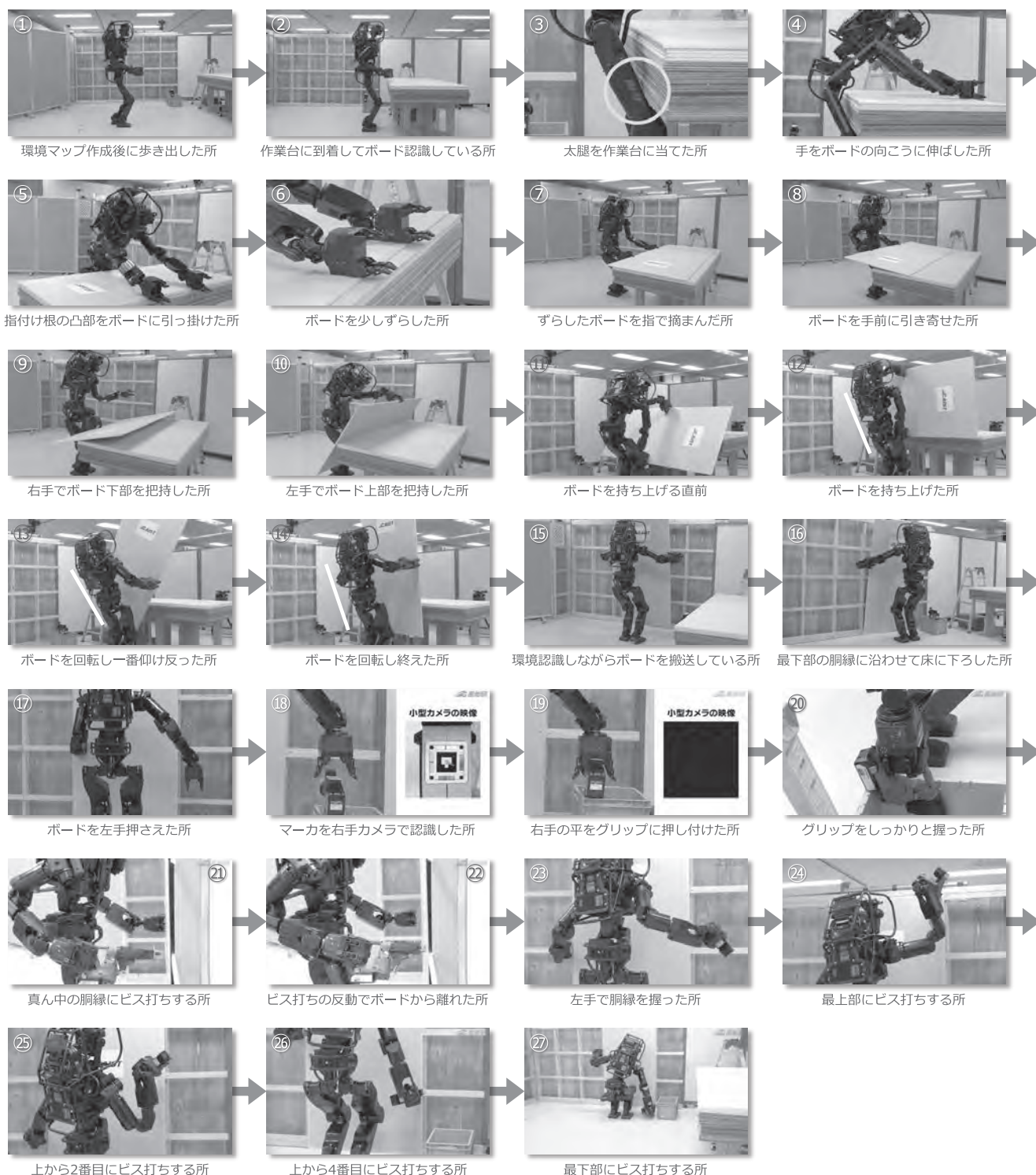
高精度ARマーカをグリップエンドに取り付けることで把持精度を向上

はBluetoothにより集塵機と無線連動する工具も登場してきているので、近い将来、ロボットと通信できる無線化改造は不要になる可能性がある。

図—8に示すような作業環境において、具体的には以下の一連の動作を行い、石膏ボード壁面施工を自律的に実行している（図—9）。

図—7上にあるように **HRP-5P** はまず作業環境全体の3Dマップを作成した後に作業台に近づく（図—

9①）。この最初の立ち位置は特に決められたものではなく、作業環境全体を把握しやすい位置に設定される。作業台に近づいたら石膏ボードを認識し（図—9②），石膏ボードに対する立ち位置を同定する。ここで、同定した位置がボードの左右方向の真中心と、石膏ボードの端から手前に設定した目標位置からどれだけずれているかを計算する。目標立ち位置に対して現在の立ち位置が大きくずれている場合は歩行し、20



図—9 人間型ロボット試作機による自律的な石膏ボード壁面施工

～30 mm 程度のズレならボードに手をついてにじり寄る際にその誤差を織り込むように動作を生成する。

作業台に平積みされた石膏ボード山から最上部の一枚を取り上げるには、**HRP-5P** のハンドは人間ほど器用ではないので、体全体を使ってまず石膏ボードを手前に少しずらすようにした。この際、二本脚で立ったままでは手を石膏ボードの向こうへ伸ばすことができないので、まず太腿を石膏ボード山に当て（図―9 ③）、そこで体を支えるようにして手を伸ばしている（図―9 ④）。指の付け根の凸部に一枚目の石膏ボードを引っ掛け（図―9 ⑤）、体を縮めるようにして石膏ボードを少しずらす（図―9 ⑥）。体を起こしてから少し後退し、ずらした石膏ボードを指でつまんで（図―9 ⑦）作業台から手前に引き（図―9 ⑧）、テコの原理を用いて石膏ボードを傾けながら（図―9 ⑨）両手で石膏ボードを把持する（図―9 ⑩）。

しっかりと把持したら石膏ボードを持ち上げ（図―9 ⑪⑫）、上体を反らしてバランスを保ちながら一気に石膏ボードを回転させる（図―9 ⑬⑭）。これは、**HRP-5P** の各部のトルクアップや自由度数を増した事による効果といえ、人間的には体幹を強化したことに相当する。体の仰け反り具合は⑫～⑭の白線を比較されたい。

石膏ボードを縦にした後、周辺環境を認識しながら石膏ボードを壁まで搬送する（図―9 ⑮）。約 11 kg の重量物を両手で把持して移動するので、足裏のスリップは否めない。また、畳大の石膏ボードを前に抱えているので目の前の情報が極端に狭くなってしまうが、図―7 下のように最初に計測して得られた環境マップにて計画しておいた経路を辿りつつ、足裏のスリップなどでずれてしまった経路を随時修正しながら目標位置まで移動する（図―10）。ただし、畳大の重量物を持っているので大股となるステップは抱えた石膏ボードを膝蹴りしたり、大きくバランスを崩す危険性があるので、瞬時の大幅なステップ修正は行わないように設定し、図―10 (c) のように徐々に経路修正

するようにしている。なお、経路上に脚立が置かれていたり、床に木の切れ端が転がっていたりするような、より現場に近い環境での石膏ボード運搬もできる能力がある¹⁰⁾。目標位置に辿り着いたら石膏ボードの下端を一番下の胴縁に当て、力情報に基づきながらピッタリと床に下ろすようにしている（図―9 ⑯）。

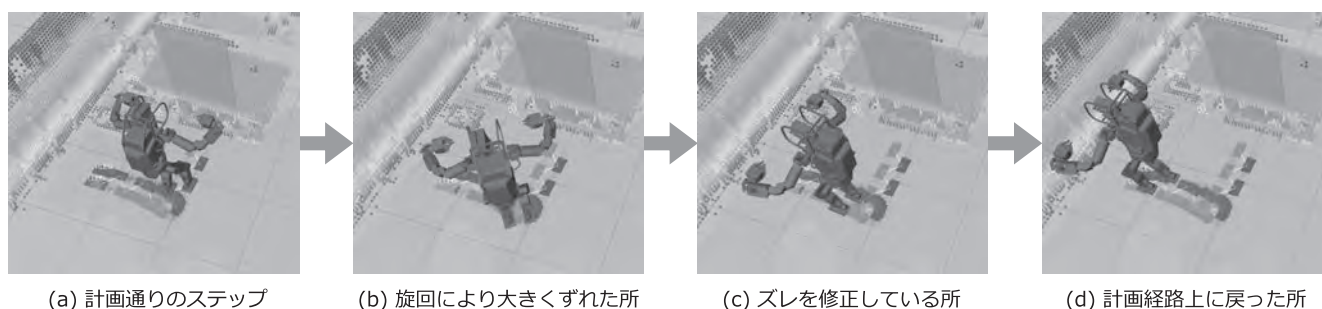
石膏ボードを床に下ろしたら工具箱に入っている工具を拾い上げる。この際、未固定の石膏ボードが倒れてこないように左手で押さえつけながら（図―9 ⑰）、右手の平に内蔵された小型カメラで高精度 AR マーカを認識して右手で取りに行っている（図―9 ⑱）。この際、右手の平がグリッパーに当たったことを手首の力センサにて判断し（図―9 ⑲）、しっかりと握れたことを設定把持角度から判断し工具を拾い上げるようにしてあり（図―9 ⑳）、把持失敗と判断すれば一旦手を離して再認識と再把持を繰り返す。

ビス打ちの一発目は石膏ボードを左手で押さえた状態で行うため、前傾姿勢で最も力が出やすい真ん中の胴縁にビスを打つようにした（図―9 ㉑）。ビスの頭が石膏ボードから飛び出たままにならないようにある程度強く打ち付けるので一瞬左手が浮くほどの反動がある（図―9 ㉒）。石膏ボードが固定できたらビス打ちの反動を押さえ安定性を確保する為に左手で胴縁を握り直す（図―9 ㉓）。この状態で、最も力の出にくい最上部から順に真ん中を飛ばして最下部まで合計 5 箇所ビスを打って石膏ボードを固定する（図―9 ㉔～㉗）。実際の動きは、YouTube 動画^{11), 12)}を参照されたい。

なお、右端列のビス打ちが終われば、真ん中、左端列と順に移動しながら打つことになるが、あとは同じ行動の繰り返しなので、動画では割愛している。

5. おわりに

本稿では、人間の重労働作業や危険な環境での作業を自律的に代替することを目指した人間型ロボットの



図―10 自己位置同定による歩行修正の様子

試作機 **HRP-5P** について、その開発経緯や特徴、模擬住宅建築現場における石膏ボード壁面施工を実現したことを紹介した。

今後、我々はこの試作機の技術をベースにした研究開発プラットフォームの開発並びに産学連携による活用を促進し、人間型ロボットの実用化を目指す。プラットフォーム上でロボット知能の研究開発を進め、ビル・住宅、航空機や船舶などの大型構造物組立現場でのさまざまな作業の自律的代替を目指す。これにより作業員不足を補うとともに、人間を重労働作業から解放し、より付加価値の高い作業に労働力を割り振れるようになることが期待される。

J C M A

《参考文献》

- 1) K. Kaneko, H. Kaminaga, T. Sakaguchi, S. Kajita, M. Morisawa, I. Kumagai, and F. Kanehiro, "Humanoid Robot HRP-5P: an Electrically Actuated Humanoid Robot with High Power and Wide Range Joints," IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.4, Issue 2, pp.1431-1438, Apr. 2019.
- 2) KAWADA Robotics Gallery から引用 (<https://www.kawadarobot.co.jp/gallery/>).
- 3) 国土交通省資料「建設業及び建設工事従事者の現状」, <http://www.mlit.go.jp/common/001180947.pdf>
- 4) 清水建設ニュースリリース, "建築工事現場で最先端技術を搭載したロボットと人がコラボ〜次世代型生産システム「シミズ スマート サイト」〜", <https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2017/2017011.html>, 2017.07.12.
- 5) 積水ハウス㈱プレスリリース, "作業の負担を最大7割軽減し施工現場の環境を改善 住宅施工現場にロボット技術導入へ", https://www.sekisuishouse.co.jp/company/topics/datail/_icsFiles/afieldfile/2018/05/16/20180516_2.pdf, 2018.05.16.
- 6) Choreonoid ホームページ, <http://choreonoid.org/ja/>
- 7) H. Tanaka, Y. Sumi, and Y. Matsumoto, "A Portable 6-DOF Motion Tracker Using High-Accuracy AR Markers - First Report on the Feasibility", Proc. of the 14th IAPR Int. Conf. Machine Vision Applications (MVA), pp.563-566, May 2015.
- 8) ㈱フォトロン, "6D-MARKER Analyst", <https://www.photron.co.jp/products/analysissoft/6d-marker/>
- 9) HiKOKI 18V Automatic Screw Driver から引用 (<https://www.hikoki-powertools.com/products/powertools/li-ion-drill/wf18dsl/wf18dsl.html>).
- 10) I. Kumagai, M. Morisawa, S. Nakaoka, T. Sakaguchi, H. Kaminaga, K. Kaneko, and F. Kanehiro, "Perception Based Locomotion System for a Humanoid Robot with Adaptive Footstep Compensation under Task Constraints," Proc. of 2018 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.713-719, Oct. 2018.
- 11) YouTube 動画, **【HRP-5P】 Humanoid Robot** 【産総研公式】, <https://www.youtube.com/watch?v=ARpd5J5gDMk>, 2018.09.27.
- 12) YouTube 動画, **【HRP-5P】重量のある実物の資材で建設作業に成功【産総研公式】**, https://www.youtube.com/watch?v=kxi3hpAm_eQ, 2018.10.16.

【筆者紹介】

阪口 健 (さかぐち たけし)
(国研) 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

