

重労働が可能な人間型ロボット

— ロボット技術で重労働からの解放を目指す —

国立研究開発法人産業技術総合研究所知能システム研究部門上級主任研究員 金子 健二

1. はじめに

日本は人口減少社会に突入し、今後労働力人口の大幅減少が見込まれている。また、建築現場や航空機・船舶などの非常に大きな構造物を組み立てる現場（以下、大型建造物組立現場）では、作業員が身体に負担がかかる姿勢での作業や重負荷作業などの重労働作業を行っており、作業員不足が深刻化しつつある。国土交通省の資料¹⁾によれば、建設業就業者数は、1997年ピーク時685万人から2016年は492万人へと約28%減少している。

これら大型構造物組立現場は、建造後に人間の活動空間になることもあり、作業環境をロボットに合わせ難く、ロボットの導入が遅れている。そのため、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。人間と類似した身体構造を備えた人間型ロボットは、人間の活動空間で、作業環境を変えずに重労働作業を代替できる可能性を秘めている。

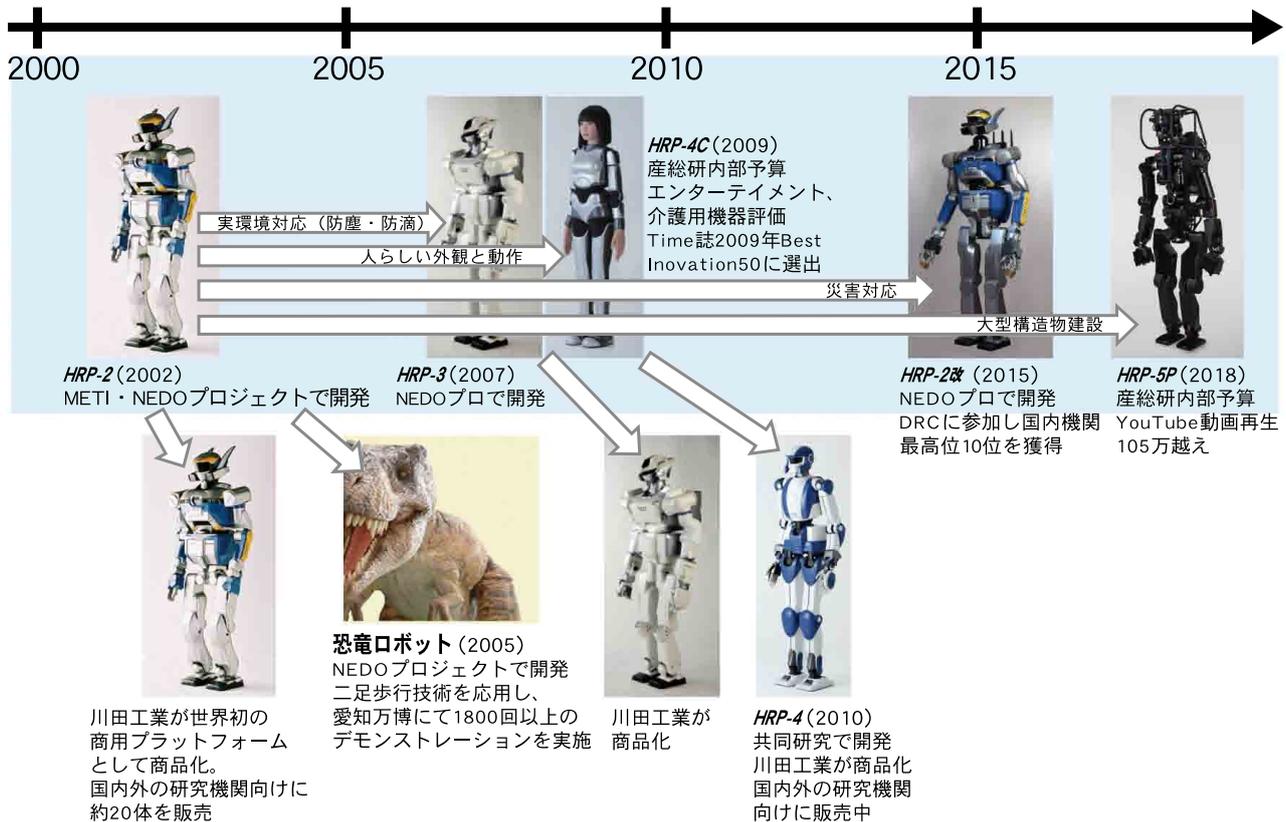
このような背景から、(国研)産業技術総合研究所（以下、産総研）では、人間の重労働作業や危険な環境での作業を自律的に代替することを目指した人間型ロボットの試作機 *HRP-5P* を開発した^{2, 3, 4)}。本稿では、これまでの産総研における人間型ロボットの研究開発に関する取り組みと、産総研で開発した最新型人間型ロボットの試作機 *HRP-5P* について説明する。

2. 産総研の人間型ロボット

経済産業省と(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）は、「人

間の作業・生活空間において、人間と協調・共存して複雑な作業を行うことが可能な人間協調・共存型ロボットの実現」を目的として、1998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」（以下、HRPプロジェクトと称す）を実施した。国家プロジェクトであったHRPプロジェクトに産総研も参加し、以来、本格的に働く人間型ロボットの研究開発を進めている。これまでに、民間企業と協力しながら複数の人間型ロボット *HRP* シリーズを開発してきている（図-1）。

HRPプロジェクトにおいて、身長154cm、体重58kg（バッテリー含む）、腰2自由度（自由に運動できる方向の数を意味し、ロボットの場合には関節軸数）を含む全30自由度を備えた *HRP-2* を2002年に開発し、働く人間型ロボットの実現性を示



提供：産総研

図-1 産総研における人間型ロボット開発とその展開

した⁵⁾。また、研究開発用プラットフォームとして実用化され、これまでに約20体が国内外の研究開発向けに販売された。

2005年には、*HRP-2*で開発した二足ロボットの制御技術を活用し、二足歩行する恐竜ロボットを開発した⁶⁾。恐竜の関節構造と歩行動作を可能な限り最新学説に基づき再現し、軽量高剛性な内骨格構造とリアルな外観を備え、外観はティラノサウルス型とパラサウロロフス型の2種を開発した。愛知万博において1,800回以上のデモンストレーションを実施した。

2002年から5年間実施されたNEDO基盤技術研究促進事業の「実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」において、身長161cm、体重68kg（バッテリー含む）、全42自由度の*HRP-3*を開発した⁷⁾。*HRP-3*は防塵・防滴機能を備え、また滑りやすい路面での歩行技術も開発し、*HRP-3*で3K作業への応用の可能性を示した。

2009年には、産総研が2006年から3ヵ年計画で実施した産総研独自のプロジェクトにおいて、*HRP-4C*を開発した⁸⁾。*HRP-4C*は、身長158cm、体重43kg（バッテリー含む）、全42自由度で、関節の位置や寸法は日本人成年女性の平均値を参考に、人間に近い外観を実現した。ファッションショーに出演するなど、*HRP-4C*でエンターテインメント分野への応用を示した。また、2011年には*HRP-4C*の高密度実装技術を応用し、さらに片腕を7自由度化し、全34自由度を持ちながら、身長151cm、体重39kgの軽量でスリムなボディーを実現した*HRP-4*を開発した⁹⁾。*HRP-2*同様、*HRP-4*も研究開発用プラットフォームとして実用化され、国内外の研究開発向けに販売された。

産総研では、災害対応人間型ロボットの研究にも取り組み、2015年に*HRP-2*を改造した*HRP-2改*を開発し¹⁰⁾、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動化を実現してきた。

しかし、これまでに開発してきた人間型ロボットは、大型建造物組立現場で人間の重労働作業を代替できる身体能力を備えていなかった。具体例として、石膏ボード施工について考えてみる。標準的な石膏ボードの寸法は910mm×1820mmで、重量は約11～14kgであり、これまでに開発してきた*HRP*シリーズの人間型ロボットにとって石膏ボードは重量が重

く、また寸法も大きく、マニピュレーションすることが困難であった。加えて、これまでに開発してきた人間型ロボット単体で作業するには環境計測や物体認識などの知能も不足していた。

3. 重労働が可能な人間型ロボット試作機：HRP-5P

(1) HRP-5Pの主な仕様

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、単体で自律的な作業ができる人間型ロボットの研究開発用プラットフォーム試作機として*HRP-5P*を開発した。なお、*HRP-5P*の名称の中の“HRP”は*HRP* (Humanoid Robotics Platform) シリーズを、“5”は第5世代を、“P”は試作機を表している。

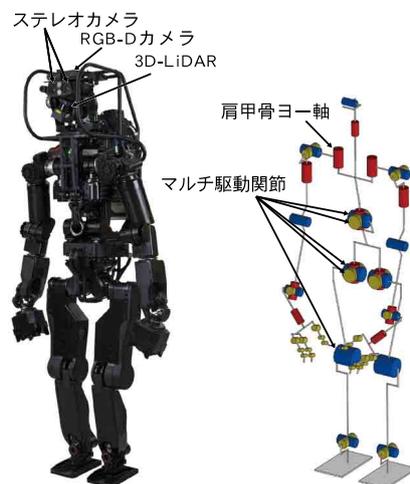
*HRP-5P*は*HRP*シリーズの技術を継承しながら最新のハードウェア技術を活用し開発した人間型ロボットで、身長183cm、体重101kg（バッテリーを含む）で、*HRP*シリーズ最高の身体能力を備えている。主な仕様を表-1に示す。

*HRP-5P*では、身体能力向上をはかるため、関節の高出力化を行った。具体的

表-1 HRP-5Pの主な仕様

身長	1,830 [mm]
体重 (バッテリー含む)	101 [kg]
自由度数	全37 D.O.F.
頭	2 D.O.F.
腕	2腕×8 D.O.F.
ハンド	2ハンド×2 D.O.F.
腰	3 D.O.F.
脚	2脚×6 D.O.F.

提供：産総研



提供：産総研

図-2 HRP-5Pの頭部センサと関節配置

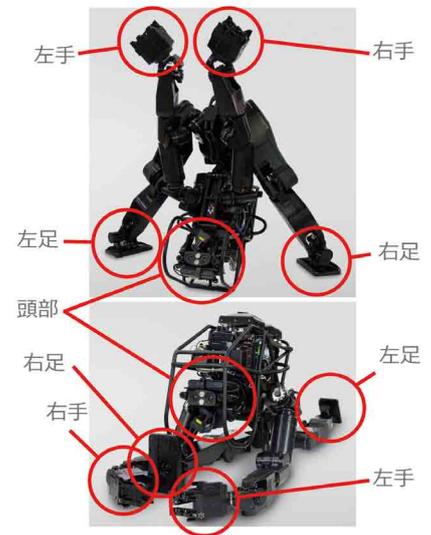
には、各関節を駆動するサーボモータに高出力サーボモータを採用し、駆動機構に冷却システムを導入した。また、シングル駆動（1台のサーボモータで1関節を駆動すること）では実現が難しい関節に関しては、マルチ駆動（複数台のサーボモータで1関節を駆動すること）で高出力化を実現した（図-2）。これらにより、*HRP-2改*に比べて関節トルク、速度ともに平均で約2倍に向上させた。関節の高出力化により、石膏ボードを平積み状態から持ち上げるような、重負荷作業が可能となった。また、腕を水平に伸ばした状態での片腕の可搬重量が*HRP-2改*の1.3kgに対して、*HRP-5P*では2.9kgと向上した。

自由度に関しては、頭部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自由度の全37自由度を備えた。*HRP-2改*に比べて、腰部に1自由度、腕部付け根に1自由度（肩



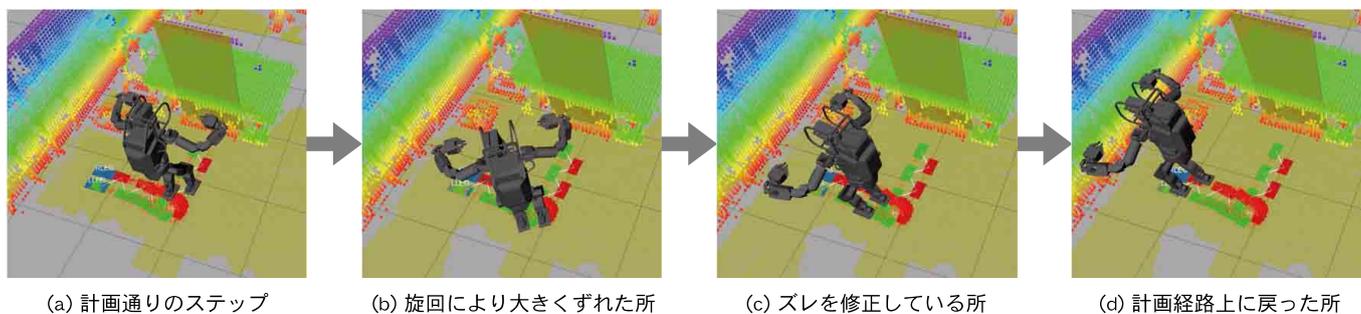
提供：産総研

写真-1 HRP-5Pによる石膏ボードのマニピュレーション



提供：産総研

図-3 HRP-5Pによる柔軟姿勢



提供：産総研

図-4 自己位置同定による歩行修正の様子

甲骨ヨー軸)、ハンド部に1自由度を追加した(図-2)。ハンド部を除く自由度数では、*HRP*シリーズの中で最大であり、より人間に近い動作が可能となった。これにより標準的な石膏ボードのような大きな対象物を両腕でハンドリングすることが可能となった(写真-1)。

また、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、*HRP-5P*では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した。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*HRP-5P*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*HRP-5P*は300度を確保している。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となった(図-3)。

加えて、*HRP-5P*の頭部に、RGB-Dカメラ、ステレオカメラ、レーザーで環境や対象物までの距離を3次元で計測する3D-LiDARを搭載した(図-2)。3D-LiDARでは、常時(0.3Hz)周辺環境の3次元計測を実行している。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の補正を可能にするなどの知能を向上させた(図-4)¹¹⁾。

(2) *HRP-5P*による石膏ボード施工

模擬住宅建築現場において単体で石膏ボード施工の自律的作業を実現した(図-5)。具体的には以下の一連の動作により作業を遂行した。実際の動きは文献3)の動画を参照されたい。

まず、作業環境全体の3Dマップを作成し、作成3Dマップに基づき作業台に近づいている(図-5①)。作業開始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ている。

作業台に近づいたら石膏ボードを認識し(図-5②)、石膏ボードに対する立ち位置を同定している。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のズレを計算(計測)し、目標立ち位置に対して現在の立ち位置が大きくズレている場合には、再度歩行をして立ち位置調整をしている。ズレが20~30mm程度であれば、この誤差を考慮して次の動作(ボードに手をついてにじみ寄る動作)を生成している。

作業台に平積みされた石膏ボードの山から最上部の一枚を取り上げるため、体全体を使って石膏ボードを手前に少しずらし(図-5③~⑥)、ずらした石膏ボードを指でつまみ手前に引き(図-5⑦,⑧)、テコの原理を用いて石膏ボードを傾け、そして両手で石膏ボードを把持している(図-5⑨,⑩)。続けて、把持した石膏ボードを持ち上げ、上体を反らしてバランスを保ちながら石膏ボードを90度回転させ、石膏ボードの向きを縦向きに変えるマニピュレーションをしている(図-5⑪~⑭)。このような石膏ボードのマニピュレーションが実現できたのは、*HRP-5P*の関節の高出力化や自由度数を増したことによる効果といえ、人間的には体幹を強化したことに相当している。

石膏ボードを縦向きにした後、周辺環境を認識しながら石膏ボードを壁まで搬送している(図-5⑮)。搬送中、目の前に把持した石膏ボードで視野が制限され、また足部で滑りなどが発生するが、頭部に導入した3D-LiDARで計測した環境計測結果の蓄積や記憶の更新により、搬送の歩行計画や足部の滑りなどに対する歩行の補正をし、目標位置まで移動し

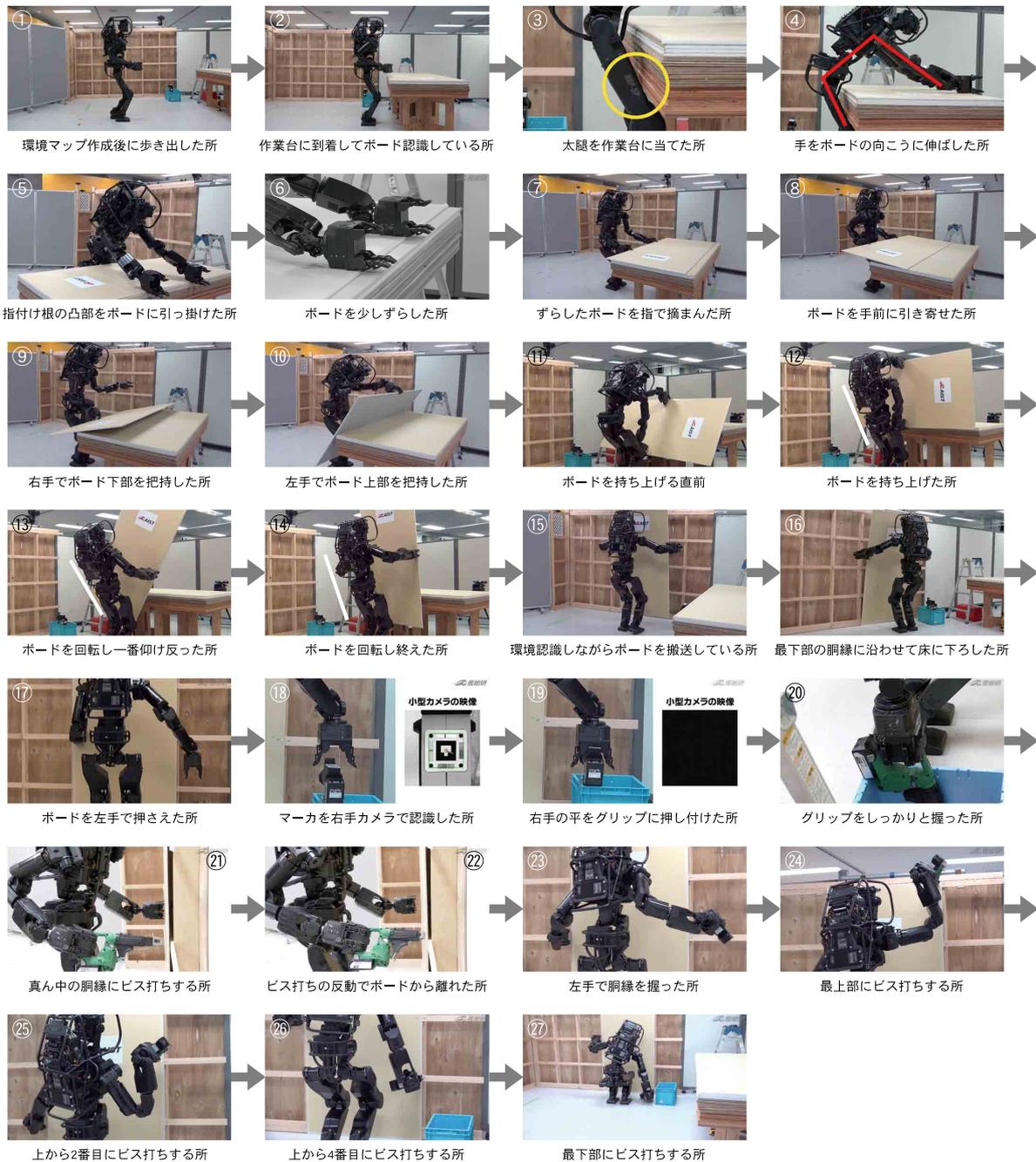
ている(図-4)。目標位置に辿り着いたら石膏ボードの下端を一番下の胴縁に当て、力情報に基づきながらピッタリと床に下ろすようにしている(図-5⑯)。

石膏ボードを床に下ろした後は、工具箱に入っている工具(トリガを引かなくてもWiFiにて工具の電源をOn/Off制御可能に改造した連結ドライバ)を拾い上げている。この際、未だビス打ちされていない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-5⑰)、ハンドに内蔵された小型カメラで工具に予め貼った高精度ARマーカを認識して工具を自律的に把持している(図-5⑱~⑳)。この際、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おり、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ことで、工具を確実に把持するようにしている。

1本目のビス打ちに関しては、未固定の石膏ボードを左手で押さえ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ている(図-5㉑,㉒)。1本目のビスで石膏ボードを固定した後の2本目以降のビス打ちに関しては、ビス打ちの反動で転倒する可能性があり、左手で胴縁を握りながらビス打ちを行っている(図-5㉓)。この状態で、最も力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している(図-5㉔~㉗)。

4. 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試作機*HRP-5P*について、その開発経緯や主な仕様、模擬住宅建築現場における石膏ボード施工を実現したことを紹介した。



提供：産総研

図-5 HRP-5Pによる自律的な石膏ボード施工

今後、HRP-5Pを人間型ロボットの実用化を目指した研究開発用プラットフォームとして活用してロボット知能を向上させることで、大型建造物組立現場でのさまざまな重労働作業の代替が期待される。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：“建設業及び建設工事従事者の現状”，<http://www.mlit.go.jp/common/001180947.pdf>, (参照 2019年3月)。
- 2) 産総研：“人間と同じ重労働が可能な人間型ロボット試作機 HRP-5Pを開発”，https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2018/pr20180927/pr20180927.html, (参照 2019年3月)。
- 3) 産総研：“【HRP-5P】 Humanoid Robot【産総研公式】”，<https://youtu.be/ARpd5J5gDMk>, (参照 2019年3月)。
- 4) 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, doi:10.1109/LRA. 2019. 2896465, Apr. 2019.
- 5) K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi, and T. Isozumi, “Humanoid Robot HRP-2,” Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 1083-1090, 2004.
- 6) 産総研：“恐竜型ロボットの開発に成功”，https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2005/pr20050304/pr20050304.html, (参照 2019年3月)。
- 7) K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, G. Miyamori, and K. Akachi, “Humanoid Robot HRP-3,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2471-2478, 2008.
- 8) K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, and S. Kajita, “Cybernetic Human HRP-4C,” Proc. IEEE-RAS Int. Conference on Humanoid Robots, pp. 7-14, 2009.
- 9) K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Akachi, G. Miyamori, and N. Kanehira, “Humanoid Robot HRP -4- Humanoid Robotics Platform with Lightweight and Slim Body -,” Proc. IEEE/

- RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4400-4407, 2011.
- 10) K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, and S. Kajita, “Humanoid Robot HRP-2Kai - Improvement of HRP-2 towards Disaster Response Tasks -,” Proc. IEEE-RAS Int. Conference on Humanoid Robots, pp. 132-139, 2015.
- 11) 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. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 713-719, 2018.