

解 説

人体を外側から扱うロボットの設計

—人と接するロボット RI-MAN の研究開発を通して得られた知見—

Design of a Robot that can Lift a Human Body

—Knowledge Acquired from Research and Development of a Human Intereactive Robot “RI-MAN”—

大西正輝^{*1*2} 小田島 正^{*1} 田原健二^{*1*3} 平野慎也^{*1}
向井利春^{*1} 羅志偉^{*1*4} 細江繁幸^{*1}

^{*1}理化学研究所 ^{*2}産業技術総合研究所 ^{*3}九州大学 ^{*4}神戸大学
Masaki Onishi^{*1*2}, Tadashi Odashima^{*1}, Kenji Tahara^{*1*3}, Shinya Hirano^{*1}, Toshiharu Mukai^{*1}, Zhiwei Luo^{*1*4}
and Shigeyuki Hosoe^{*1}
^{*1}RIKEN ^{*2}AIST ^{*3}Kyusyu University ^{*4}Kobe University

1. はじめに

2006年3月13日、名古屋市守山区のはずれで1台のロボットが発表された。そのロボットは取材に集まった記者団を前に身長158 [cm]、体重18 [kg]の介護練習用人形を両腕を使って抱き上げることに成功した。次の日の新聞の朝刊には「介護ロボ初めの一步」「人も物も落しません」などの見出しと共にロボットが紹介された。

このロボットの名前は RI-MAN (図1)、人と接するロボットを意味する Robot Interacting with Human から命名され、理化学研究所パイオ・ミメティックコントロール研究センター(理研 BMC)のチーム横断型研究プラットフォームとして開発された[1]。RI-MAN は米 TIME 誌の Best Inventions 2006 に選出され、その年の科学技術白書では山海らのロボットスーツ HAL [2] などと共に介護福祉の向上に役立つ事例として取り上げられた。少子高齢化を迎える先進国にとって介護福祉は眼前にせまった問題である。RI-MAN のメディアへの取り上げられ方からも介護福祉の現場で活躍するロボット開発への期待が感じられる。

筆者らはこれまでに RI-MAN 本体の開発[1]や搭載されている面状触覚センサ[3]、触覚を用いた全身マニピュレーション手法[4]、ロボットの設計・制御方法[5]などを発表してきた。今回は解説記事ということで特に「論文に書けないような内容を」という執筆依頼を受けた。本稿ではそのような観点から筆者らが RI-MAN の研究開発を通して



図1 介護練習用人形を抱き上げる RI-MAN

得た知見を紹介する。

2. 機構・機能の設計

2003年、理研 BMC では人を抱き上げることを目標としたロボットを開発することが決まった。人サイズの重い物は全身を使って抱き上げ、コップのように軽い物は手先で持つという意欲的なロボットの実現案もあったが、機構が大きくなることや人を抱き上げる際に指が邪魔になるかもしれないという懸念から、指の自由度は断念した。

全身を利用して人サイズの重い物を抱き上げるには高いトルクの出せるアクチュエータと全身触覚が必要である。さらに、抱き上げる対象が人だとすると安心感と安全性を確保するためにはアクチュエータ(関節)の柔らかさと表面の柔らかさが必要になると考えられる。人の筋肉は、力がありかつ関節が柔らかいという、現在のロボット技術では困難な要求を実現している。従来より筋肉のような特性

原稿受付 2007年12月26日

キーワード: Human Interactive Robot, Tactile Sensor Feedback, Whole Body Manipulation

*1 〒463-0003 名古屋市守山区下志段味ヶヶ洞 2271-130

*2 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1

*3 〒819-0395 福岡市西区元岡 744

*4 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

*1 Moriyama-ku, Nagoya-shi, Aichi

*2 Tsukuba-shi, Ibaraki

*3 Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka

*4 Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo

を持つ人工筋肉の研究が盛んに行われており、本研究センターにおいても重点的な研究課題に位置付けているが、現状の現実的な解としてはモータを選択せざるを得ない。

しかし、モータで人を抱き上げる程度のトルクを出すためには高いギヤ比が必要になり、バックドライバピリティが失われることから、関節を柔らかくできないという問題がある。ワイヤ駆動やベルト駆動を利用することでバックドライバピリティを確保しながらバックラッシュを最小限に抑える試作機を作成したが、ワイヤが外れたときのメンテナンスやテンションの調整が必要になることから、結局はギヤを採用することになった。高いトルクを出すためには高いギヤ比が必要となり、バックドライバピリティの確保は難しい。RI-MAN では触覚を用いたフィードバックによって疑似的に関節の柔らかさを作りだした。

一方、表面の柔らかさは全身の FRP を 4 [mm] ほどのウレタンで覆い、その上に 1 [mm] ほどのシリコンを積層することで実現した。さらに、 8×8 のアレイ状に半導体感圧素子を配置した面状触覚センサ [3] を開発し、左右の上腕と前腕、胸部の合計 5 箇所に取り付けられた。このセンサによってシート全体の 0 次, 1 次, 2 次の接触力モーメントを得ることができる。

また、機構設計の際に注意が必要なのは巻き込みの防止である。RI-MAN では関節ごとに剛性の高い素材や柔軟素材で可動部品や固定部品を作り、開口部を塞ぐための七つの対策を施している [1]。

RI-MAN の機構自体は比較的スリムである (図 2 左)。しかし実際にロボットを動かすには配線が必要となる。配線は人間の血管と同じようにロボットの全身に張り巡らされている。作業が進むにつれてリールの配線残量がみるみるうちに少なくなっていった。

総配線長を短くするのに威力を発揮したのが C-CHIP である。C-CHIP は分散制御を実現するための超小型コントローラであり [7]、基盤の大きさは 30 [mm] \times 40 [mm]、CPU や FPGA、AD や DA など必要な機能をスタックすることで自由な組み合わせで使うことができる。概観を図 3 に示す。

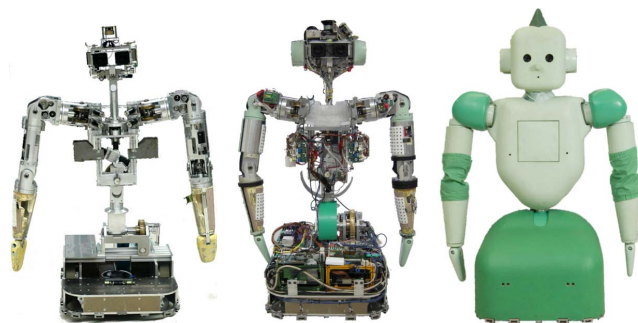


図 2 RI-MAN の開発過程

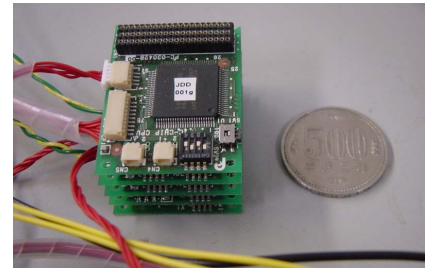


図 3 C-CHIP

RI-MAN は階層型分散制御構造を持つ。上位層としては画像、音声 (音声認識・音源定位)、においを認識するための環境認識用 PC (Windows) と、各関節の角度を指令する運動制御用 PC (RT-Linux) を用意した。下位層の局所コントローラである C-CHIP の役割は触覚センサの計測とモータの指令出力である。

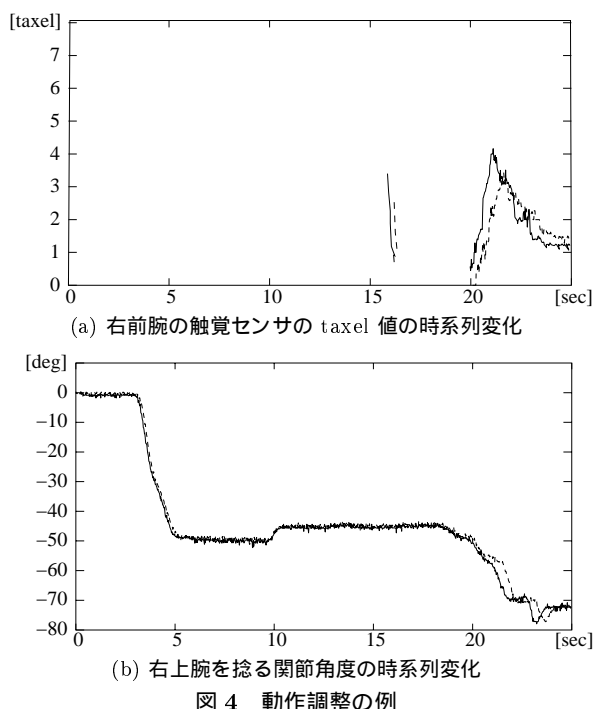
それぞれのコントローラはデジチェーンで接続された共有メモリによって情報が共有される。これらの共有メモリは 2 [ms] 以内に情報が更新されることが保証されている。局所コントローラは制御するモータや観測する触覚センサに近い位置に設置できることから、計算負荷の分散や耐ノイズ性の向上を実現しただけではなく、省配線化に大きく貢献した。

3. 動作の設計

人と接触するような動作を行う場合に、ロボットの表面に柔らかさが必要になることは述べた。また、人自身の表面も柔らかいため、人とロボットは多面接触になる。これまでのロボットの運動制御は身体と環境のモデルを作り、安定性を保証した ZMP 軌道に追従させることで安定した運動を実現するのが一般的な手法である。

Asano らはロボットの構造を単純化し、抱き上げる対象を球としてモデル化することで全身マニピュレーションの理論的な解析を行った [8]。このようなアプローチはモデルを正確に作ることができ、外乱が少ない環境においては有効である。しかし、本問題のような柔軟物体の多面接触をモデル化するのは非常に難しいという問題がある。また抱き上げ対象は人であり、自らの意志で動く可能性があることも問題を難しくしている。さらに触覚センサ自身も柔らかい素材で覆われているため高い精度で触覚情報を得るのが難しいという問題もある。

これらの問題を解決するために RI-MAN の動作生成はタスク成功時の触覚情報を記憶しておき、その時々で得られる触覚情報と成功時の触覚情報を比較することで、動作を時空間的に修正するアルゴリズムを用いた。アルゴリズムの詳細に関しては文献 [4] にゆずるが、図 4 に実際に抱き上げを行った際の関節角度と触覚センサの taxel 値の例



を示す．taxel 値とは面状触覚センサの座標を連続値で表したものである．実線と点線は異なる二度の抱き上げの動作をプロットしたもので，二度の動作を見比べると触覚情報が得られた付近から動作の時間調整が行われていることが分かる．

これらの動作生成アルゴリズムは，人と接するロボット開発のための没入型三次元力学シミュレーション環境 [9] を用いて評価を行い，実機へと応用した．今後，重さが異なる人を抱き上げる時にどのように抱き上げ方を変化させるかや，右腕と左腕の協調調整方法を明らかにすることなど実環境で活躍するロボットの実現には解決しなければならない問題も多く残っている．

4. コミュニケーションの設計

ロボットであるがゆえに避けては通れないのがコミュニケーションの設計である．コミュニケーションは見て感じるという意味で外見のデザインを含んでいる．RI-MAN は人に近付いた時に威圧感を与えてはいけないということで，高さを女性の平均身長程度の 158 [cm] とし，全体のバランスはできるだけ人間と近くなるようにした．また，親しみや優しさを感じさせる色として緑をベースとした濃淡 2 色のカラーを選んだ．

一連のデモンストレーションでは，人が「あの人を抱き上げて下さい」とロボットに指示し，ロボットは「あの人ですか」と確認する．「はい，そうです」と人が応じると，ロボットは被介護者に近付き，抱き上げて移動するというストーリーを想定した (図 5) ．



図 5 デモンストレーション風景

実際の介護の現場において声かけはとても重要なコミュニケーションである．後に指摘されたことであるが，抱き上げる前にロボットが被介護者に「抱き上げてよろしいでしょうか」などと確認するようにするべきであった．

また，ほんの遊び心から抱き上げる際に「よっこらしよ」と声をかけるようにした．雑誌記事やネットブログなどではこれが様々な見解で取り上げられた．あえて無駄を作るのは愛嬌があってよいという意見とロボットなのに必要ないという意見の賛否両論だった．

こういったコミュニケーションの問題は，ロボットに人を抱き上げさせるという研究の本質とは関係しない．しかし，様々な見学者の反応からは人型のロボットであるがゆえのコミュニケーション設計の大事さが痛感させられた．

5. 似たコンセプトのロボット

RI-MAN 発表後に似たコンセプトのロボットが発表された．Vecna Robotics が開発した BEAR (Battlefield Extraction-Assist Robot) は戦場で傷ついた兵士を見つけ出し，抱き上げて運ぶことを目的としたロボットである．論文などでの発表を見つけることはできなかったが，ウェブページによると BEAR は 270 [kg] 以上の重さのものを運ぶことができるという [10] ．ウェブページを見る限りは重い人を運ぶことを目標の主眼においており，優しく抱き上げることは考慮されていないようである．研究の目的にもアプローチ方法にも日米の違いを垣間見ることができるようで興味深い．

また國吉らは，文献 [11] で使用したロボットを 30 [kg] の荷物を持ち上げることができるように改良した．さらに，66 [kg] の人形を腕の上で寝かせて水平に移動させることに成功している．

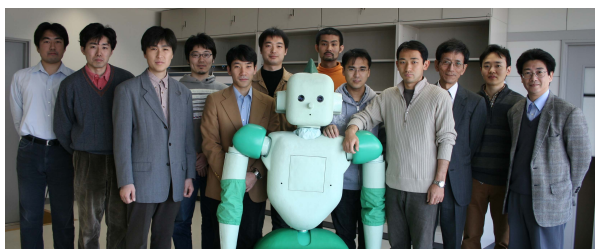


図 6 RI-MAN の研究開発に関わった研究員

6. おわりに

2 足歩行は難しいといわれた時期があった。もちろん、現在でも簡単な問題になった訳ではない。しかし、ホンダの P2 が歩く映像が全世界を駆け抜け、多くの研究者を驚愕させた後は、歩き方に対する議論はあるだろうが、現実として多くのロボットが歩いている。

現状でロボットに体全身で接触するような力仕事をさせるのは難しい。しかし、RI-MAN が発表されてからは、多くのロボットが全身を使った力仕事をしている。そんな時代が到来することを願って解説を締めくくりたい。

謝辞 図 6 は RI-MAN の研究開発に関わった研究員である。RI-MAN の研究開発に貢献したすべての人に感謝する。

参考文献

- [1] 小田島, 大西, 田原, 向井, 平野, 羅, 細江: “抱え上げ動作による移乗作業を目的とした介護支援ロボット研究用プラットフォーム “RI-MAN” の開発と評価”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.4, pp.554-565, 2007.
- [2] T.Hayashi, H.Kawamoto and Y.Sankai: “Control Method of Robot Suit HAL working as Operator’s Muscle using Biological and Dynamical Information,” Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), pp.3455-3460, 2005.
- [3] T.Mukai, M.Onishi, S.Hirano and Z.W.Luo: “Development of Soft Areal Tactile Sensors for Human-Interactive Robots,” The 5th IEEE International Conference on Sensors, pp.831-834, 2006.
- [4] 大西, 小田島, 向井, 羅: “触覚情報を用いた全身マニピュレーションの実現”, 計測自動制御学会論文誌, vol.44, no.1, pp.78-85, Jan. 2008.
- [5] 羅: “人に優しい介護支援用ロボットの設計と制御”, システム/制御/情報, vol.51, no.10, pp.458-463, 2007.
- [6] 大西, 小田島, 羅: “環境と接するロボットの感覚運動統合による動作模倣”, 電気学会論文誌, vol.125-C, no.6, pp.856-862, 2005.
- [7] 平野, 小田島, 大西, 田原, 高木, 向井, 羅: “人と接するソフトロボット “RI-MAN” のための複合階層型分散制御ネットワークの構築”, SICE SI 部門 講演会論文集, pp.1158-1159, 2006.
- [8] F.Asano, Z.W.Luo, M.Yamakita and S.Hosoe, “Modeling and bio-mimetic control for whole-arm dynamic cooperative manipulation,” Advanced Robotics, vol.19, no.9, pp.929-950, 2005.
- [9] 大西, 小田島, 羅, 細江: “人間と接するロボット開発のための没入型三次元動力学シミュレーション環境”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J88-D-II, no.2, pp.368-377, 2005.
- [10] <http://vecnarobotics.com>
- [11] 國吉, 大村, 寺田, 長久保: “等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起き上がり行動の実現”, 日本ロボット学会誌, vol.23,

no.6, pp.706-717, 2005.

大西正輝 (Masaki Onishi)

2002 年大阪府立大学大学院博士後期課程修了。同年理化学研究所研究員を経て、2006 年産業技術総合研究所研究員、現在に至る。理化学研究所客員研究員。ロボットの認知・知識処理に関する研究に従事。博士(工学)。

(日本ロボット学会正会員)

小田島正 (Tadashi Odashima)

2000 年名古屋大学大学院博士後期課程修了。同年理化学研究所研究員を経て、2006 年トヨタ自動車(株)に勤務、現在に至る。自律分散制御を用いた冗長多自由度ロボットシステムの研究に従事。博士(工学)。

(日本ロボット学会正会員)

田原健二 (Kenji Tahara)

2003 年立命館大学大学院博士後期課程修了。同年理化学研究所研究員を経て、2007 年九州大学特任准教授、現在に至る。理化学研究所客員研究員。指口ロボットによる動的物体把持などの研究に従事。博士(工学)。

(日本ロボット学会正会員)

平野慎也 (Shinya Hirano)

2006 年愛知工業大学大学院博士後期課程修了。同年理化学研究所リサーチ・アソシエイト、2007 年同研究所研究員となり、現在に至る。分散制御用の通信と制御などの研究に従事。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

向井利春 (Toshiharu Mukai)

1995 年東京大学大学院博士後期課程修了。同年理化学研究所フロンティア研究員。2000 年 Laboratoire de Neurobiologie (フランス)にてポスドク。2001 年より理化学研究所 BMC 研究センター生物型感覚統合センサー研究チームチームリーダー、現在に至る。生体情報処理の工学的応用、人工筋肉などの研究に従事。博士(工学)。

(日本ロボット学会正会員)

羅 志偉 (Zhi Wei Luo)

1984 年中国華中工學院卒業。同年中国蘇州大学教師。1992 年名古屋大学大学院博士後期課程修了。同年豊橋技科大学助手。理化学研究所研究員、山形大学助教授を経て、現在、神戸大学教授、兼理化学研究所 BMC 研究センター・環境適応ロボットシステム研究チームチームリーダー。ロボティクス、制御工学の研究に従事。博士(工学)。

(日本ロボット学会正会員)

細江繁幸 (Shigeyuki Hosoe)

1967 年名古屋大学大学院博士前期課程修了。同年名古屋大学工学部助手。同大学講師、助教授を経て 1988 年名古屋大学教授。1999 年理化学研究所 BMC 研究センター制御系理論研究チームチームリーダーを併任、2001 年同研究所センター長、同運動系システム制御理論研究チーム・チームリーダー、現在に至る。

制御理論、システム理論などに関する研究に従事。工学博士。