

# 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

小田島 正<sup>\*1</sup> 大西 正輝<sup>\*1\*2</sup> 田原 健二<sup>\*1</sup> 向井 利春<sup>\*1</sup>  
平野 慎也<sup>\*1</sup> 羅 志偉<sup>\*1\*3</sup> 細江 繁幸<sup>\*1</sup>

## Development and evaluation of a human-interactive robot platform “RI-MAN”

Tadashi Odashima<sup>\*1</sup>, Masaki Onishi<sup>\*1\*2</sup>, Kenji Tahara<sup>\*1</sup>, Toshiharu Mukai<sup>\*1</sup>,  
Shinya Hirano<sup>\*1</sup>, Zhi Wei Luo<sup>\*1\*3</sup> and Shigeyuki Hosoe<sup>\*1</sup>

The ultimate goal of this research is to develop a robot that is able to perform physical tasks such as nursing care skillfully and safely in complex environment of our home and/or hospitals. In order to realize such a robot, the design criteria and approach should be different from that of traditional industrial robots. Specifically, considering the physical interactions between the robot and human subjects, the safety, ease and affinity are more important in addition to the robot's high power, speed and accuracy. Towards this objective, “RI-MAN” is developed in RIKEN BMC which demonstrated the high ability to carry up and hold a doll softly and safely. This paper first discusses the problems on the design of a human-interactive robot, and proposes original key technologies and system integration to solve the problems including the soft and whole body interaction. The details and basic performance of RI-MAN are then introduced together with some experimental results. The further research subjects are also pointed.

**Key Words:** Nursing-care Robot, Whole Body Manipulation, Human-Robot Interaction, System Integration, Decentralized System

### 1. はじめに

少子高齢化の深刻化に伴い、介護や福祉の重要性が増している。こうした作業は介護者の肉体的および精神的負担のみならず要介護者の精神的負担、いわゆる「気兼ね」が大きいため、介護・福祉分野での負担を軽減するロボット技術の応用が強く望まれている。その具体例として、要介護者が食事をする際の食事支援ロボット [1] や、精神的な癒しを目的としたメンタルコミットロボット [2] が挙げられる。前者は、介護者の時間的拘束を減らすだけでなく、要介護者の自立性向上や介護者に対する気兼ねや遠慮といった精神的負担の軽減が期待でき、後者はかわいらしい動物の外見を持つロボットによって、高齢者向け施設や小児病棟などでの使用で、高い癒し効果を与えているとの報告がなされている [3]。従来からある介護・福祉機器とロボット技術を融合することで、それらの機器が元来持つ機能

をより高度化した例もある。インテリジェント義肢 [4] や、インテリジェント車椅子 [5] などである。これらは使用者の活動の場を広げることで、より活動的で充実した生活の提供を目的としている。特にインテリジェント車椅子に関しては、従来の車椅子の電動化によって使用者が介護者の助けを借りずに容易に移動することを可能にしたことに加え、多くのセンサ情報をもとにより安全な移動を実現している。さらに介護者が付き添う場合には、車椅子を押す力をサポートする形で動輪を駆動することで、介護者の肉体的負担も軽減している。介護者の肉体的負担軽減の観点から介護・福祉分野での応用として挙げられるもののひとつに移乗作業がある。これは、ベッドから車椅子へ、または浴槽へなど自身での移動が困難な要介護者を移動させる作業であり、特に寝たきりの要介護者の生活には欠かせない作業である上、介護者への肉体的負担が非常に大きいため、工学の応用が強く望まれる作業のひとつである。

移乗作業を目的とした介護機器には、ベッドの付近に設置したリフトによって要介護者を吊り上げるものが複数の企業から提案されており、ロボット技術を応用したもとしてはベルト機構を備えた薄型台車によって隣接する移動式ベッドに要介護者を搬送するもの [6] も提案されている。リフト式はベッドに寝た状態から車椅子へと異なる姿勢への移乗を行うことができるが、リフトの可動範囲内での移乗となるため、例えば入浴する

原稿受付 2006年5月31日

<sup>\*1</sup>理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター

<sup>\*2</sup>産業技術総合研究所 情報技術研究部門

<sup>\*3</sup>神戸大学工学部

<sup>\*1</sup>Bio-mimetic Control Research Center, RIKEN

<sup>\*2</sup>Information Technology Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

<sup>\*3</sup>Faculty of Engineering, Kobe University

場合には可動範囲内にある車椅子で浴室へ移動したのち、浴室にも同様の設備が必要となる。また、要介護者は吊り上げ金具取り付け用補助具をあらかじめ身につけておかななくてはならないという欠点がある。ベルト機構を備えた移乗装置は、ベッドからベッドへの移乗に対して要介護者への負担が少なく抑えられるが、車椅子への移乗などのように異なる姿勢への移乗は不可能である。一方で、介護者に装着するロボットスーツを用いることで人間の高度な判断能力と巧みな運動を機械系の持つ大出力と融合させることを目的とした人間機械協調型のシステムが提案されており、介護福祉への応用が示唆されている[7]。しかし、介護の現場では移乗作業のほかにも作業があり、それらには必ずしも大きな力を必要とするものばかりではない。システムの稼働時間を考えると介護作業中に装着しつづけることは現実的ではなく、また、システムの着脱の手間を考慮すると、装着型ではなく独立したロボットによる支援が望ましい。

近年の技術力の向上によって実に多くのロボットが開発され、さまざまなパフォーマンスを披露している。これらのうちいくつかは人と同程度のサイズを有しており、十分な自由度と、優れた運動性能を有している。しかし、これらのロボットでは以下に挙げる理由から人を運ぶ動作の実現は困難であると思われる。ロボットが物体を運搬するためには、1) 対象を持ち上げるのに十分なトルクと、2) 対象物体と自身を合わせた形状と重量において安定な姿勢を維持できることが要求される。ところが、これまでに発表されているロボットは手先による把持で物体の運搬を行っているため、物体を保持するモーメントアームが必然的に長くなり、持ち上げるための十分なトルクの確保と安定な姿勢の維持が困難になるのである。特に床面に固定されていない移動型ロボットでは転倒の可能性が生じるため、運搬可能重量は極端に小さくなる。人間が重量物を運ぶ際には自然に腕全体と胴を用いて抱え上げる。これは対象を保持するモーメントアームを短くすることで必要な筋力を小さく抑えるのと同時に、胴体近くに重量物を配置することで直立姿勢において高い安定性が確保できることを経験から知っているためである。日常何気なく行うこの動作の有効性は、ロボットに同様のタスクを行わせる場合にも当てはまる。機構学的に見ると重量物の搬送には抱え上げ動作が有利である。しかし、手先による物体操作に関しては数多くの研究で実験を通じた知見から更なる理論展開が行われている一方で、抱え上げ動作に関する研究では、理論を確認する実験が限定的にしか行われておらず、その後の展開が十分に行われているとは言いがたい。その理由のひとつには、この分野の理論の検証に耐える実験環境の構築が単純に従来のロボットの流用ではまかなえないことが上げられる。そうした研究分野に対する研究用プラットフォームが果たす役割は大きい。また、人と接するロボットにおいては対象が人間であるため安全性の確保はもちろん、恐怖心を与えないように大きさや形状などの外見も重要な要素となるが、その外見に由来する条件は関節トルクや可到達範囲などロボットの基本性能を制限する可能性がある。つまり、人を抱え上げることを目的とした抱え上げ動作研究のプラットフォームを開発するに当たっては、個別の機能または部分ごとに開発するのではなく、最終目的である人間を抱え上げることを見越したトータルな設計が必要と

なる。このような理由から我々は抱え上げによって人間を運搬することを最終目標としたロボットの研究用プラットフォームとして“RI-MAN”(Robot Interacting with huMAN)を開発し、抱え上げ動作に必要な性能の評価を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。まず次章では人と接するロボットに必要な機能や特徴について考察し、その特徴から外れない範囲で抱え上げを実現するためにどのような機能が必要かについて考察する。3章では2章で考察した機能や特徴がどのようにRI-MANで実現されているかについて詳細に述べ、特に抱え上げ動作にかかわりの深い機能の性能評価実験の結果を4章にまとめる。最後にまとめとしてRI-MANを用いた今後の研究展開について述べ、人を抱え上げるロボットの実現可能性について議論する。

## 2. 介護福祉ロボットに必要な機能

RI-MANは抱え上げ動作を研究するために開発されたロボットであり、介護・福祉の現場で人と接することを指向したロボットである。そのため、精度、速度、トルクが十分であればよいというこれまでのロボットとは異なり、接する対象が人間であることに由来する設計指針が必要となる。RI-MANの詳細な説明に移る前に、本章ではまず人と接するロボットに求められる機能や特長について議論する。そのあとで抱え上げ動作を完遂するために特に重要となる機能について考察を行い、これらのうち両立が困難な要件に対して解決すべき事柄を明確にする。

### 2.1 人と接するロボットに求められる機能

介護や福祉の現場で人と接することを目的とするロボットには、高い安全性と安心感を与える外観が要求される。文献[8]にあるように、安全な動作を実現するためにとり得る戦略は、設計と制御の2つの段階に分類することができる。前者は柔軟な素材で表面を覆ったり、丸みを帯びた形状や可動部における挟み込みを防ぐ機構の採用といった材質や形状に関わる部分と、制御の段階で役立つセンサ類を充実させるなどの電気的な設計に関わるものとに分けられる。前者の可動部における危険性には、人の腕や指など比較的大きな部位がロボットのリンクに挟まれる場合と、髪や衣服など厚みの少ない部位がロボット内部に巻き込まれる場合とが考えられる。ロボットが人とどのように接するかによって部位ごとに発生し得る危険性は異なるため、各部位ごとの対処が必要となる。後者は、インピーダンス制御などをはじめとする力制御を適切に取り入れることで人間を含めた環境に対して過大な力の作用を防ぎ、安全性を確保する戦略である。こうした制御にはロボットの関節トルクなどを観測する内界センサや、環境を認識するための外界センサなど多くのセンサが必要であり、それと同時に得られた多くの情報を即座に運動に反映させられるような制御構造の採用が望まれる。

人に安心感を与えるためにはサイズが人間と同程度で、頭、胴体、腕からなる人型をしていることが望ましい。ところが、極度に人間に似せることで却って嫌悪感が増幅する、いわゆる“不気味の谷”[9]が存在する。文献[9]では、人型であれば多少デフォルメされたものの方が対人親和性が高く、またそうでなければ動物などの人型ではない形状の方が嫌悪感が少ないとしている。色彩に関しては、カラーチャートなどを用いて“安らぎ”

や“落ち着いた”などといったイメージが想起される配色を選択することが可能であるが、ロボットの形状によって受ける印象が異なる場合もある。このため、CADなどを用いたCGによる表現でデザインとともに配色を決定する手法が一般的であるが、ロボットの動きや大きさなどによってそこから受ける印象が異なることから、ロボットを原寸大で投影してその動きを観察することのできる没入型のシミュレータを用いて、主観に基づいた配色を決定するというより効果的な手法も提案されている[10]。

前述のメンタルコミットロボットは人が触れた情報をもとに発声や動作での反応を返すのが主な機能であるため、大きなトルクを必要としない。一般にアクチュエータの出力は体積に比例することから、全体のサイズ(つまり重量)を小さく抑えることができる。加えて、その動作には自然な動きの範囲内での低速な動作が許容されることから、人に危害を加えにくい設計が比較的容易である。さらに、表面を毛皮で覆ったアザラシの外見は、見た目や触り心地で使用者に安心感を与えるのと同時に、可動部をカバーするという点で安全性にも寄与している。これは、人と触れあう上で確保しなくてはならない安全と安心を実現しつつ、その範囲内で要求されるタスクが実現できているという点でロボットのデザインと機能に矛盾の生じにくい例である。しかし、人を抱え上げることを目的とするロボットには、高出力でかつ高い安全性と安心感が必要という両立の困難な要件が存在する。

## 2.2 安全・安心な抱え上げ動作に必要な機能

安全かつ安心な抱え上げ動作を行うためには小型・高出力で表面が柔軟であり、リアルタイムで処理した多くのセンサ情報を速やかに動作に反映できる機能が必要である。

力学的仕事に有意な出力が要求される場面では、現状では電動アクチュエータが油圧や空圧を利用したアクチュエータが使用されることとなるが、環境から独立したロボットへの搭載を考えた場合、総体積(または重量)を考慮して電動アクチュエータの採用が現実的である。人間のサイズから大きく外れずかつ人間の筋肉に比べて出力体積比で劣る電動アクチュエータで有意な出力を得るには、アクチュエータの利用率高める干涉駆動機構などの機構上の工夫が有効である[11]。

柔軟な表面が安全性に寄与することはこれまでに述べたが、これは同時に、抱え上げの対象が角張った形状である場合には、接触点付近での変形により多くの接触面積が得られることによって滑りを防ぐことができ、安定な保持が容易になる。この利点は表面の比較的大きな変形によるところが大きいため、接触力を計測する力センサには物理的な柔軟性が要求される。

ロボットの電気的な設計は、制御による安全な動作を実現するための重要な位置を占める。ロボット内外の状況を知るためには多くのセンサが必要であり、特にヒューマノイドロボットでは自由度が高いために多くのアクチュエータを制御しなくてはならない。システムの制御や信号処理を複数のコントローラで分散的に行うことでスループットの向上を目指す試みは、分散制御系の研究として数多く行われており[12]、ひとつの有効な解であると考えられる。

## 3. RI-MAN の概要と各部の詳細

### 3.1 概要

本章では、安全と安心の実現という観点から RI-MAN の詳細について説明する。特に前節で触れた干涉駆動機構、触覚センサ、制御構造の3点に関しては、RI-MAN の本質的な部分であるため次節以降で詳細に述べる。

文献[8]によると、ロボットによって人が被る損傷は機械的損傷、電氣的損傷、および音響的損傷に大別されるが、可動部の多いロボットでの安全性確保には特に機械的損傷に対する配慮が重要である。機械的損傷には衝突による打撲と、鋭利な端辺での接触や駆動部での挟み込み等による切傷がある。打撲による損傷はロボットが動作中に人と衝突する場合以外にも起こり得る。ロボットが正常に機能しているときには十分に考慮された制御方策によって安定に動作させることになるが、電源が突然遮断されるなどの不慮の状態であっても人に衝撃力を与えないような機構を採用すべきである。RI-MAN は Fig.1 に示すように全身に 19 の自由度を持っているが、このうち腕や腰など抱え上げ時に人を支持するための関節には不意に電力が絶たれた場合でも機構的にロックするようにウォームギヤを採用した。また、転倒の可能性を減らすため、構造的な安定を容易に得ることのできる低重心の車輪移動機構を採用した。台車には左右2つの駆動輪と、四隅に従動輪が設置されている。従動輪にはサスペンションが取り付けられており、床面の凹凸によって不用意に駆動輪が浮かないように配慮されている。また、台車の前部には抱え上げ時に前方へ重心が移動しても前方の従動輪が必要以上に沈み込まないようにサスペンションを持たない支持輪が設置されている。この支持輪は普段の走行時に床面に接することはないように従動輪よりも高い位置に配置されている。駆動輪用モータには回転量を検出するエンコーダと緊急停止用の電磁ブレーキが取り付けられている。また台車には前後各2ヶ所の超音波センサと周囲16ヶ所の赤外線センサが装備されており、走行時の衝突を回避するために障害物を検出する。

もうひとつの機械的損傷には、可動部からロボット内部に人間の身体部位の一部が巻き込まれる“巻き込み”と、リンクの外部で挟まれる“挟み込み”が考えられる。ここでは巻き込みをさらに2種類に分け、以下に挙げる3種類の危険を想定する。

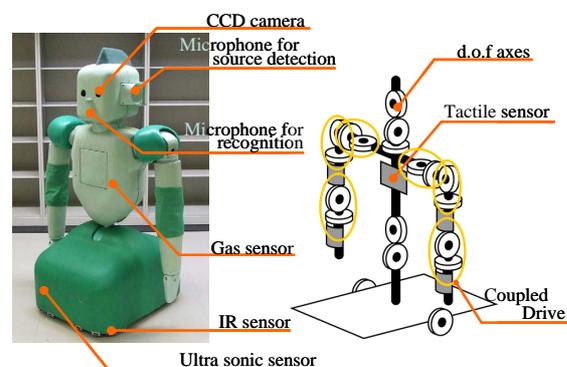


Fig. 1 Arrangement of sensors and degrees of freedom in RI-MAN



Fig. 2 Improved joint for safety

Table 1 Relationships between safety devices and results on each joint

Joint name	Devices	A	B	C
Neck	6,7			×
Between body and shoulder	1,2,7	×		
Shoulder	2,3,4	×		×
Elbow	2,3,5,7			
Waist	1			

- A 衣服を含むすべての身体部位の巻き込み  
 B 指などの細い身体部位の巻き込み  
 C リンク外部での挟み込み

A と B の違いは巻き込みを考慮する対象の細かさや強度である。対象の大小に注目すれば、隙間の小さい可動部は A と同時に B も回避できる。しかし、危険が発生する状況に着目すると、施した安全機構の機械的強度が危険回避の成否を分ける場合もある。意図的に可動部に指などを押し付けた場合と、偶然可動部に指がかかった場合などである。以下では前者を“意図的な場合”、後者を“不慮の場合”と呼ぶこととする。衣服や髪などの部位はそれ自身が柔軟であるため、無理に押し付けられてロボット内部に入り込むことはまれだが、指などは柔軟な安全機構では防ぎきれない場合も有り得る。この場合、隙間を狭めた上で安全機構にある程度の機械的強度を与える必要がある。一方で過度な安全対策は可動範囲の制限や機構の複雑化・大型化を招くことから、安全とそれ以外の機能にはトレードオフが生じる。そこで、機械的強度を持った材質で可動部の開口部を可能な限り狭める。小さな開口部は柔軟素材で塞ぐ。さらに、危険 A が予想される人間の頭部が接触する可能性の高い可動部は可動部全体を覆う。という指針で、Fig.2 に示す 5 種類（首、胴と肩の付け根、肩、肘、腰）8 箇所可動部に以下に挙げる 7 つ対策を施した。

- (1) 剛性の高い可動部品によって開口部を塞ぐ
  - (2) 剛性の高い固定部品によって開口部を小さくする
  - (3) 柔軟素材製の可動部品によって開口部を塞ぐ
  - (4) 可動部全体を剛性の高い素材で覆う
  - (5) 可動部全体を柔軟素材で覆う
  - (6) 柔軟素材を開口部に詰める
  - (7) 柔軟素材の干渉によって挟み込み時のダメージを減らす
- どの可動部にどのような対策を施したか、そして、想定される 3 つの危険性がどの状況で回避されるかの関係を Table 1 にまとめた。表中の数字は施した安全対策の内容であり、上記の箇条書き番号に対応している。危険回避の成否は回避可能な場



(a) (b)

Fig. 3 Shutter on waist joint



(a) (b) (c) (d)

Fig. 4 Mechanical shield on elbow joint

合として意図的な場合と不慮の場合を想定し、これに回避不可を加えた計 3 通りで判定した。表中の記号と状況の対応は以下のとおりである。

意図的な場合であっても回避可能

不慮の場合は回避可能

× 回避不可

以下に、もっとも防御能力の高い腰と、最も多く安全対策を施した肘について説明する。Fig.3 は腰のリンクに取り付けたシャッターが台車上部にある開口部を塞いでいる様子である。台車も胴体下部も一定の曲率で表現できる形状であるため金属製の円弧形状をした可動式部品によって開口部を塞いでいる。衣類の裾が巻き込まれる可能性が考えられるが、腰関節のシャッターと台車部の外装の間の隙間は十分に小さいため危険 A は回避される。Fig.4 に肘関節に施した巻き込み防止機構を示す。肘関節には機構上同一曲率のシャッターを取り付けることが困難なため、Fig.4(a) の開口部に対し (b) のように金属製のガイドをつけて開口部を小さくし、そのガイド上にベルクロ製のベルトを渡した (c)。腰関節とは異なりこの状態でもまだ十分に隙間を塞いでいないため、機構全体を布製のカバーで覆った (d)。肩関節も同様の手法で開口部を塞いでいるが、(d) の段階で布の代わりに FRP 樹脂によるカバーを取り付けている。

ここで行った評価はあくまで機構上の工夫による危険の回避が可能かどうかに基づいている。危険 C について回避できたと判定されたものには、腰のように大きな曲率半径の凸形状を持つことで可動範囲内では挟み込みが起きない場合と、肩付け根関節のように可動範囲まで曲げた場合でもリンクが接しないが、肘のように接しても対処法 7 の効果が大きいため、対象にダメージを与えない場合とがある。危険 C について現在防げないと評価されている関節に対しても、ソフトウェアリミットを設けることでリンク間の挟み込みの危険を軽減させることは当然可能である<sup>†</sup>。

使用者に安心感を与えるのに重要な要素には、1) ロボットが

<sup>†</sup>RI-MAN のすべての関節にはソフトウェアリミットが実装されている

現在どういう状況にあるかが分かること、2) 使用者が容易に指令を与えられ、それが速やかに実行されること、3) 色彩、形状、サイズなどの外見が威圧感を与えないこと、4) 表面が柔軟で接触時に不快感を与えない素材で覆われていること [13]、の 4 点がある。1) に関して、ロボットがどのような状態にあり、どう動こうとしているかを何らかの形で使用者に伝えることは非常に重要である。機械の状態を示すためには光や音による表示や、数値による定量的な表示といった状態を符号化したものを用いることが可能であるが、多自由度を持つロボットにおいては動作そのものを状態の表現に用いることができる。特にヒューマノイドロボットの場合は形態が人間に近いので、現在の状態と関連付けて連想しやすいような動作を取らせることが可能である [14]。2) に関しては、誰もが特別な訓練を必要とせずに入力または指示を出せることと確実に指示が実行されることが求められる。この場合の入力として有効なのは、音声認識などのように使用者が日頃人と接しているときに意思を伝える手段を用いることであろう。1) と 2) から、コミュニケーションを行うための各種センサ類の配置場所や動作を行う自由度は人間のそれに似せ、入力に音声認識を採用することで自然にコミュニケーションできるように配慮すべきである。RI-MAN ではこれを踏まえて、CCD カメラとマイクはすべて頭部に装備し、入力として音声入力を、出力として合成音声による発話を用いている。音声認識用のマイクは外見上口に見える部分に、音源定位用のマイクは頭部側面の左右に 1 つずつ配置されている。後者のマイクは半球状にくりぬいた耳介とともに取り付けられている。耳介による反響音によって音源の位置を特定して指示者の位置を判断し [15]、その方向を向くことで現在誰に注意を向いているかを表現することが可能となる。この動作を見た指示者は指示を出すタイミングをとりやすくなり、結果として認識率の向上につながるかと期待される。また、合成音声による発話が聞き取りにくい場合であっても身振りによってある程度の推測を促すことが期待される。3) に挙げたように、ロボットの外見が人に与える影響は非常に大きい。配色は多くの人に触れることを拒まない色で、落ち着いた、柔らかなイメージを連想させるものが望ましい。形状に関しては角の少ない丸みを帯びたものがより安心感を高める。人より大きなサイズでは色彩や形状に因らず威圧感を与える可能性が高くなるため、人と同程度か小さい方がよい。RI-MAN では緑色をベースとした濃淡 2 色のカラーリングと、すべての部位で角のない形状を採用し、全高 158 [cm] を基準にして、人間の体型が持つバランスから大きく外れないように各部のサイズを決定した。色彩や形状はロボットのほかの機能とは独立に決定できるが、サイズは要求される出力と密接な関連がある。サイズと出力の両立のために採用した干涉駆動機構については次節でその詳細を述べる。4) もサイズと同様安心と安全の両方に貢献する要素である。RI-MAN では FRP 製のカバーの上にウレタンスポンジとシリコンゴムを積層することで柔らかい表面を実現した。この積層構造で抱え上げ時に接触力を計測する面状触覚センサ上も含めてほぼ全身を覆っている。一般に力を検出するセンサは剛体で構成されているが RI-MAN に採用した面状触覚センサは柔軟な表面を実現しながら表面にかかる接触力を検出する。この詳細は 3.3 節

で述べる。

安全や安心とは別に RI-MAN の最終目的が介護であるために採用したセンサがににおいセンサである。このセンサはアルコールやアンモニアの検出が可能であるため、これを胴体に装備することで抱え上げ時に対象の健康状態の確認や失禁の検出が可能となる [16]。視覚・聴覚・嗅覚に関する情報は後述する認識用コンピュータに直接入力され、行動の決定に役立てられる。RI-MAN の主な諸元は Table 2 のとおりである。

### 3.2 腕部の干涉駆動

電動アクチュエータの出力重量比（出力体積比）は生体の持つ筋肉のそれに及ばないため、小型で大出力を得るためには機構的な工夫が必要となる。干涉駆動機構はそうした工夫のひとつであり、アクチュエータの利用効率を向上させることで最終的な出力重量比を改善することを目的とした機構である [11]。この機構では出力を取り出す軸と対になる軸が存在し、片方の軸に出力を集中すると対になる軸には出力が出せないため、応用の際には注意が必要である。

抱え上げ動作時に必要となるのは前方への腕の振り上げと肘の曲げである。抱え上げ時にこれらの軸に出力を集中させても支障のない自由度を対となる出力軸として用意することで、アクチュエータと同数の自由度を得ると同時にアクチュエータの利用効率向上が達成される。抱え上げ時には曲げに対して捻りの運動には大きな出力が要求されないことに注目し、RI-MAN では曲げと捻りの自由度が対になるように 3 つの干涉駆動機構を繋げた構造の腕を採用することで、Fig.1 のような曲げと捻りが交互に配置された 6 自由度の腕とした。

Fig.5 に肘に用いている干涉駆動機構の写真を示す。この機構においてはモータの出力軸と関節軸の回転速度とトルクの関係はそれぞれ以下のように表される。

$$\dot{\Theta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \dot{\Phi} \quad (1)$$

$$T_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} T_M \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\Theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$ 、 $T_{\theta} = [\tau_{\theta_1}, \tau_{\theta_2}]^T$  はそれぞれ関節軸の回転速度とトルクであり、 $\dot{\Phi} = [\dot{\theta}_{M1}, \dot{\theta}_{M2}]^T$ 、 $T_M = [\tau_{M1}, \tau_{M2}]^T$  はそれぞれアクチュエータに取り付けられたギヤヘッドの出力

Table 2 Specifications of RI-MAN

Size ( Width×Depth×Height )	830 × 800 × 1580 [mm]
Weight (Including battery)	120 [kg]
Actuator type	DC Motor
Degrees of freedom	19
Power source	NiMH 24 [V]
Max Speed	0.4 [m/s]
Sensors	CCD camera × 2
	Microphone × 2 (sound source detection)
	Microphone (voice recognition)
	Tactile sensor × 5
	Scent sensor × 2
	IR sensor × 16
	Ultra sonic sensor × 4

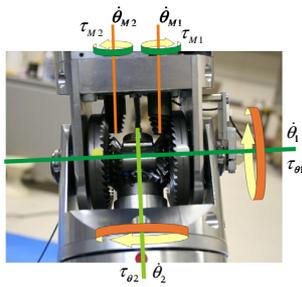


Fig. 5 Coupled drive in elbow joint

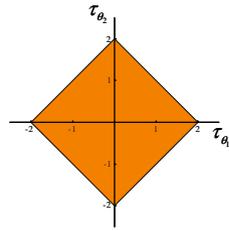


Fig. 6 Output torque range in coupled device

軸の回転速度とトルクである。2つの関節の運動は互いに干渉しているため  $\tau_{\theta_1}$  と  $\tau_{\theta_2}$  を独立に決定することはできない。 $T_{\theta}$  のとり得る範囲は式 (2) より Fig. 6 の網掛け領域のように図示される。図中両軸は関節軸トルクであり、その単位は  $\tau_{M*}$  の最大値で正規化した値である。なお、ここで  $\tau_{M_1}$  と  $\tau_{M_2}$  の最大値は等しいとしている。この図と式 (2) から  $\tau_{M_1}, \tau_{M_2}$  が同方向または逆方向にともに最大トルクを発生することで、一方の関節に出力を集中できることが分かる。干渉駆動機構の採用によって得られた効果については、第 4 章で議論する。

### 3.3 面状触覚センサ

RI-MAN では安全性確保と安心感向上の観点から柔軟な表面を採用している。また、点ではなく面での接触が想定されるため、表面の分布力を面で計測する必要がある。従来の力センサは点による計測であって比較的硬い材質で作られているため、柔軟に面での接触力を検出するという用途には適さない。そこで、我々は圧力センサをアレイ状に配置し、これを柔軟素材でコーティングしたセンサシートを開発した [17]。

Fig. 7 に示すように、1枚のセンサシートには64個の絶対圧検出センサ素子がアレイ状に配置されている。このセンサシートを抱え上げ時に人と接触すると想定される上腕、前腕、および胸前面の5箇所に Fig. 8 のように取り付けた。シートにはフレキシブル基板を用いており、比較的自由的な曲面に貼り付けることが可能であるため、5ヶ所に設置されたセンサシートはすべて同じものを使用している。

センサによる計測は後述する局所コントローラでセンサ素子の各列ごとに並列に走査することでを行い、センサシート全体の0次、1次または2次の接触力モーメントを計算することでセンサシート単位での出力を得る。このセンサシートの詳細な構造や基本的な性能については文献 [17] に譲るが、抱え上げ動作時の RI-MAN の運動とセンサの出力の関係を調べた実験結果については次章に示す。

### 3.4 階層型分散制御構造

多くのセンサとアクチュエータを備えた RI-MAN ではひとつの制御器で集中的にすべてのデバイスを制御することは得策ではない。近年のコンピュータ技術の発展による計算機の高速化によって、制御負荷の観点からのみ言えば集中制御系の構築は不可能ではないが、画像処理を始めとする多くの情報処理は依然として大きな計算負荷を要求することに変わりはなく、できる限り計算負荷の軽減を目指すことが望ましい。また、それ

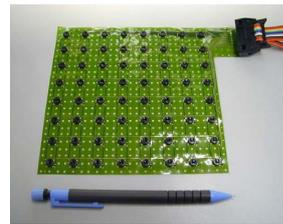


Fig. 7 Areal tactile sensor sheet

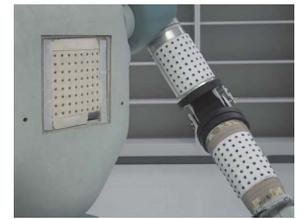


Fig. 8 Installed tactile sensor sheets



Fig. 9 Local controller “C-CHIP”

以上に重要になるのは全身に配置されたデバイスが要求する入出力ポートの数とそれらを繋ぐ配線長の問題である。センサ類の多くは出力がアナログ信号であることが多く、これを長い配線越しに取得するのはノイズが発生しやすくなり望ましくない。さらに、面状触覚センサをはじめとする計測に多チャンネルを要するセンサからの配線が占める体積はロボットの他の機構を圧迫し、小型化を困難にする。我々は、Fig. 9 に示す 30 [mm] × 40 [mm] の超小型コントローラ “C-CHIP” [18] を開発し、局所コントローラとして RI-MAN の全身に配置することで、制御負荷の軽減と耐ノイズ性の向上および省配線によるロボット全体の小型化を同時に満たした。しかし、一般に分散制御系では局所コントローラ間の情報伝達の時間遅れによる問題や、局所相互作用による系全体の振る舞いの決定が困難であるといった問題が残る。そこで、前者の問題を共有メモリの採用によって、後者を情報を統合する集中制御系を上位制御器として配置する階層制御構造の採用によって解決を図った。共有メモリによって RI-MAN の全身に配置された合計 15 個の C-CHIP 間で共有される情報が 2 [ms] 以内に更新されることが保証された。この更新周期は RI-MAN のサイズを考慮した場合、その運動に対して十分に速いと言える。また、この共有メモリの通信はシリアル通信であるため C-CHIP 間および、上位制御器との通信をデジタル化できたことに加え、各種センサの出力やモータドライバへの指令値、またはポテンシオメータによって検出された関節角度などのアナログ信号の授受が最低限の配線長内で済ませられたことでノイズに対して頑健なシステムとなった。さらに、この共有メモリは 1 本の外径 2 [mm] のシールド線によって接続されるため省配線の妨げにならない。

センサやアクチュエータといった各デバイスの機能を扱うのが下位制御系を構成する局所コントローラの役割である。センサを担当するコントローラは、前述の触覚センサのように計測した値に関する計算を行い、アクチュエータを担当するコントローラはモータの指令値を出力するだけでなく該当する関節角度の検出も行う。そして得られた情報を共有メモリ上に公開す

ることで、ロボット全体での情報の統合を可能にする。一方、上位制御系は2台のコンピュータ(以下PC)で構成される。ひとつは画像処理や音声認識といった制御負荷が大きい処理を行い、その結果をもとにロボット全体の行動を決定する環境認識用PC(以下、認識用PCと呼ぶ)であり、もうひとつは運動の詳細を決定し全身の局所コントローラ間の調和を取るための運動調整用PC(以下、運動用PCと呼ぶ)である。2つの上位制御系の役割の違いを明確にするために行動や運動という言葉について定義しておく。運動用PCが詳細を決定する“運動”とは関節の動きの組み合わせでできる一連の動作のことを指す。運動用PCは各運動におけるそれぞれの関節の時系列データを記憶しており、認識用PCが要求した運動の各関節のトルクや速度の指令値を関節の制御を担当する局所コントローラに送信する。認識用PCが扱う“行動”とは複数の運動の連なりである。認識用PCはこの行動の切り換えを行うが、それだけでなく同一の行動の中での運動の切り換えも行う。机の上にあるコップを持ってくるという仕事を例にとると、1)机に近寄る、2)コップを取る、3)コップを持ったまま移動する、の3つが運動であり、指示を受けてからコップを持って来るまでの一連の流れが行動にあたる。

Fig.10にRI-MANで採用されている階層型分散制御構造の模式図を示す。認識用PCにはWindows系OSを採用した。これは同PCでは行動の決定が比較的長い時間スケールで行えること、20[ms]程度の厳密でないサンプリング周期で動作することが許容されることに加え、開発環境が充実していることを重視したためである。これに対して運動用PCは実時間での運動の調和が要求されるため、OSの選択にはリアルタイム

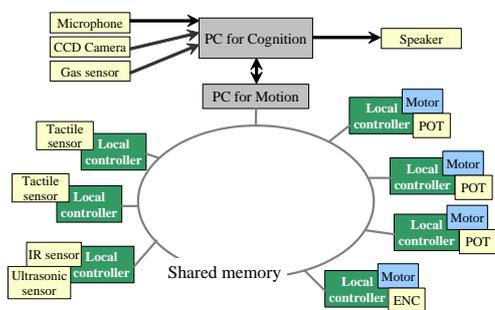


Fig. 10 Control structure in RI-MAN

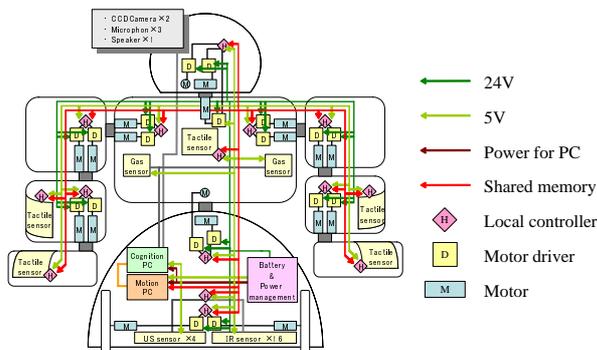


Fig. 11 Layout of controller

性を重視し RTLinux を採用した。運動用PCのサンプリングタイムは4[ms]である。局所コントローラのサンプリングタイムは担当するデバイスによって異なるが、アクチュエータを担当するものは3[ms]、触覚センサを担当するものは15[ms]としている。Fig.11にすべてのコントローラの配置位置を示す。

#### 4. 実験と考察

本章では荷重に対する腕の運動を調べ、抱え上げ可能最大重量の見積もりを行う。次いで、触覚センサの出力について行った実験の結果を示した後、指示者とのコミュニケーションを通して抱え上げ動作を行う状況を想定した一連のデモンストレーションを通して、階層型分散制御機構がどのように機能しているかについて説明する。

##### 4.1 腕部の評価

はじめに、抱え上げ動作を想定した関節の運動が荷重に対してどのように変化するかを調べた。実験では、手先(質量0.9[kg])を外し、そこに錘をつけて腕をまっすぐ伸ばした状態で肩関節だけを使って振り上げた場合(Fig.12)と、肘を曲げて錘を上げた場合(Fig.13)の2通りの運動を行い、関節角度を計測した。以下では肩と肘を使ったそれぞれの実験を case1, case2 と呼ぶ。case1は45[deg]を中心に振幅を45[deg]、周波数を0.05[Hz]とした正弦波を、case2は中心角度と振幅を40[deg]に周波数を0.05[Hz]とした正弦波を目標角度として与えた。なお、腕の諸元はTable3のとおりである。前腕の直径の値が範囲を持っているのは、抱え上げ対象の下に腕を滑り込ませることを容易にするために、前腕部を肘で円形、手首で楕円となるような断面形状をもつ断頭円錐形としているからである。Fig.14はcase1の結果を示している。縦軸は肩関節の角度[deg]を、横軸は時間[ms]を表している。実験は錘の重さを無荷重の状態から1[kg]ごとに10[kg]まで増やして行ったが、7[kg]以下ではほとんど変化が見られなかったため、グラフには0,7,9,10[kg]の場合のみを示している。Fig.15はcase2の結果である。縦軸は肘関節の角度である。case2でも錘の条件

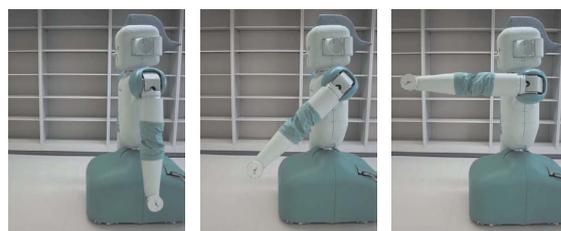


Fig. 12 Swing motion with shoulder joint (exp. case1)

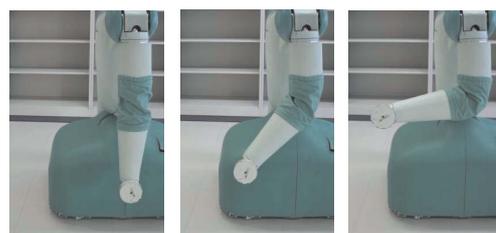


Fig. 13 Swing motion with elbow joint (exp. case2)

Table 3 Specifications of the arm

Length	Shoulder – Elbow	344.5 [mm]
	Elbow – Wrist	398.5 [mm]
Weight	Upper arm	8.8 [kg]
	Forearm	4.2 [kg]
	Hand	0.9 [kg]
Diameter	Shoulder – Elbow	140 [mm]
	Elbow – Wrist	$\phi 140 - 90 \times 60$ [mm]

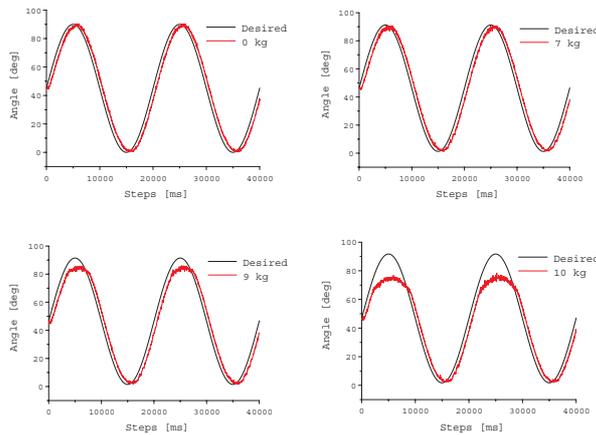


Fig. 14 Resulted joint angle in exp. case1

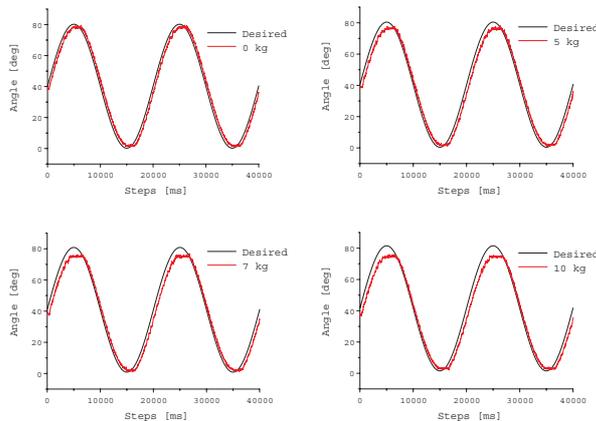


Fig. 15 Resulted joint angle in exp. case2

は case1 と同様であるが、グラフには 0,5,7,10 [kg] の場合のみを示してある。グラフより 5 [kg] 以上で追従性が悪くなり始めるが 7 [kg] 以降 10 [kg] まで変化が少ないことが分かる。

以上の結果から、手先の重さを考慮しても腕を伸ばしきった状態で両腕で 12 [kg] 程度の物体を保持しつつ、0.05 [Hz] 程度の振動的な運動が可能であることが分かった。以下では、最大抱え上げ可能重量についてより詳細な考察を加える。

#### 4.2 最大抱え上げ可能重量の見積もり

前述のように RI-MAN の腕の関節にはセルフロック機能を有するウォームギヤを採用しているため、腕を伸ばした状態の手先での保持能力について議論することには意味がない。そこで、数通りの抱え上げ動作を行い、それぞれの動作中にもっとも大きな関節トルクを必要とする瞬間を調べ、その姿勢をとった際に

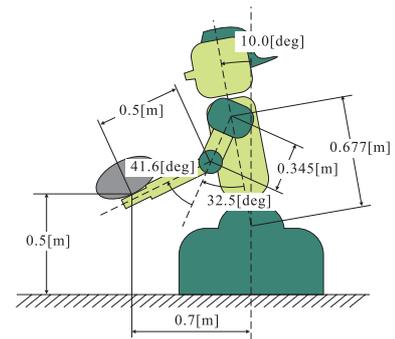


Fig. 16 Initial state of holding up motion

どれだけの荷重を保持できるかを検証することとした。事前に行ったシミュレーションの結果、複数通りの抱え上げ動作においてもっとも大きな関節トルクが必要なのは、抱え上げの開始時、つまりロボットの胴体から手先が最も離れた状態で対象を保持する瞬間であった。そこで、代表的な抱え上げ動作として、これまで行ってきた RI-MAN の抱え上げ動作実験（後述）と同じ初期姿勢での最大持ち上げ重量を算出することで RI-MAN の最大搬送重量の目安を見積もることとした。Fig.16 は抱え上げ実験の初期状態における搬送対象との相対位置と関節角度を示している。この関係は、一般的な介護用ベッドに腰掛けている要介護者の膝の裏に手を差し入れた状態に相当する（Fig.22(e), 22(f)）。前節の実験結果から見積もられた肩および肘関節の最大トルクは、それぞれ 101.9 [Nm], 35.7 [Nm] であった。この関節トルクと Fig.16 に示す各数値、および Table 3 に示す各リンクの諸元から、初期姿勢において手先で鉛直上向きに持ち上げられる重量を求めたところ、両腕による抱え上げ可能重量は肘関節の最大トルクに依存し 18.6 [kg] であった。

ここで異なる抱え上げ方について議論したい。18.6 [kg] の重量を持ち上げたときの肩関節トルクは 60.8 [Nm] であり、肩関節の最大トルクに達していない。今仮に同じ初期姿勢から肘を使わず、つまり肘関節はセルフロックの状態、肩関節だけで対象を持ち上げる動作を考えると、抱え上げ可能最大重量は 30 [kg] 程度であると計算される。この結果より、RI-MAN の全重量は 120 [kg] である (Table 2) ことから、自重のおよそ 4 分の 1 の重量物を持ち上げることが可能であることがわかる<sup>†</sup>。大きな関節トルクは抱え上げ動作の確実性の向上に貢献するが、現在の姿勢と対象物との相対位置に強く依存するこの動作の本質は、動作の成否が単純に関節トルクの大小で議論できるものではないところにある。これに関しては最終章で議論する。

#### 4.3 触覚センサを用いた実験

次に抱え上げ動作時に変化する腕表面にかかる接触力を面状触覚センサによってどの程度検出できるかを検証した。身長 156 [cm]、重量 12 [kg] の人形を肘関節をほぼ直角に曲げた状態の前腕に乗せ、Fig.17 に示すようなロール軸方向の往復運動をし

<sup>†</sup> 参考値として同程度のサイズを有するヒューマノイドロボット HRP2 の可搬重量・全重量比が 0.15 程度であることを付記しておく [19]。しかし、もともと HRP2 と RI-MAN は異なる目的で開発されたロボットであり、計測条件も異なるため、可搬重量全重量比を直接比較することで優劣を議論することはできないが、この値は同程度のサイズのロボットの可搬重量の目安にはなると思われる。



Fig. 17 Experiment scene

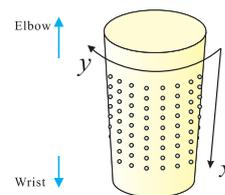


Fig. 20 Coordinate system on the sensor sheet

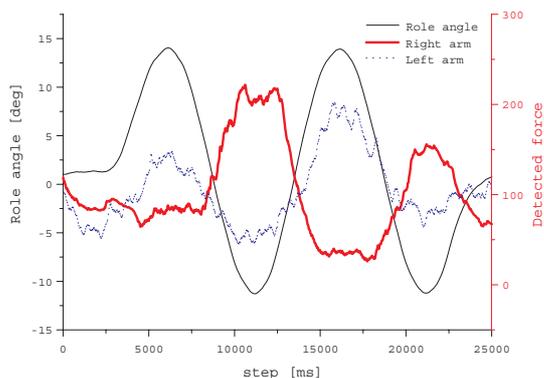


Fig. 18 Detected force on forearm sensor

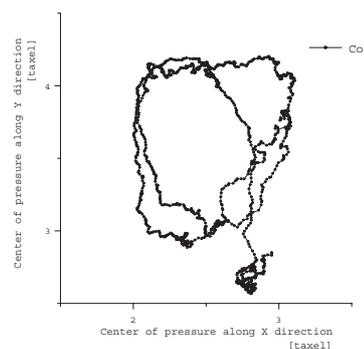


Fig. 21 Transition of center of force on left forearm

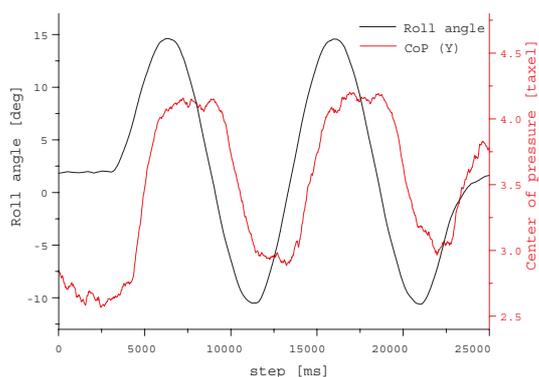


Fig. 19 Transition of center of contact force along Y axis

た．ロール軸方向の目標角度は，胴体が垂直の状態から左右に  $15$  [deg]， $0.1$  [Hz] で揺動するように与えた．結果を Fig.18 に示す．左右の縦軸がそれぞれ腰のロール軸周りの角度と各センサシートにおける接触力の合計値を表し，横軸が時間経過を表している．濃い実線で示されているのがロール軸の現在角度であり，正の値が左への傾きを意味する．太線と点線はそれぞれ右と左の前腕にかかった接触力であり，その大きさは接触力に比例したセンサシート独自の単位で表されている．グラフより腰関節の揺動にしたがって左右の腕にかかる接触力が変化しているのが分かる．

次いで Fig.19 に人形の背中から接触力を受ける左腕のセンサで得られる接触力の重心位置の変化を示す．同図において右の縦軸はセンサシート上の  $y$  軸方向の位置を表している．センサシートに設定された座標と前腕への取り付け方向の関係は Fig.20 に示すとおりであるため，Fig.19 に示されているのは腕の周回方向に沿った重心位置である．また，Fig.21 は左腕

にかかる接触力の重心位置の時間変化をセンサシート座標上で示したものである．図中重心位置はグラフ右下の端点から始まり，ロール軸の揺動が始まるまでしばらくとどまったあと反時計回りに 2 回転に渡って遷移している．重心位置が周回軌道を取っていることから，腕の長手方向にも重心が移動していることがわかる．さらに，腕上での重心位置が完全に同じ軌道上を回っていないことから，揺動によって人形が徐々にずれていく様子が観測されている．センサシート上の感圧素子のピッチが  $18$  [mm] であることから，この運動で人形の重心が腕の周回方向と長手方向にそれぞれ  $24$  [mm] と  $18$  [mm] 程度ずれていることが検出できている．また，揺動が始まるまでの間は重心位置が完全に停止しているわけではないがその幅が  $5$  [mm] 程度内に収まっていることから，RI-MAN に取り付けられた触覚センサは人間サイズの対象との接触に対して十分な空間解像度を有していると結論付けられる．なお，Fig.18, 19 および 21 では，実験で得られたデータを  $10$  [Hz] のカットオフ周波数をもつローパスフィルタを通した値を用いている．

#### 4.4 抱え上げ動作のデモンストレーション

RI-MAN は非常に多くの公開デモンストレーションを行い，多方面に能力をアピールしてきた．デモンストレーションは，離れたところにあるベッドに腰掛けた状態で置かれた身長  $156$  [cm]，重量  $18$  [kg] の人形を指示者の出す指示に従って抱え上げ，もとの位置に戻るといったシナリオに沿って行われる．以下では一連の流れがどのような機能を使って行われているかを制御機構の動きと照らし合わせて Fig.22 に従い順を追って説明する．

(a) では指示者が RI-MAN に抱え上げる対象に関する指示を出している．これに対して RI-MAN は対象を手で指し示しながら確認を取る ((b))．ここでは指示者の発話内容を認識した認識用 PC が，運動用 PC に手で指し示す運動の開始を指

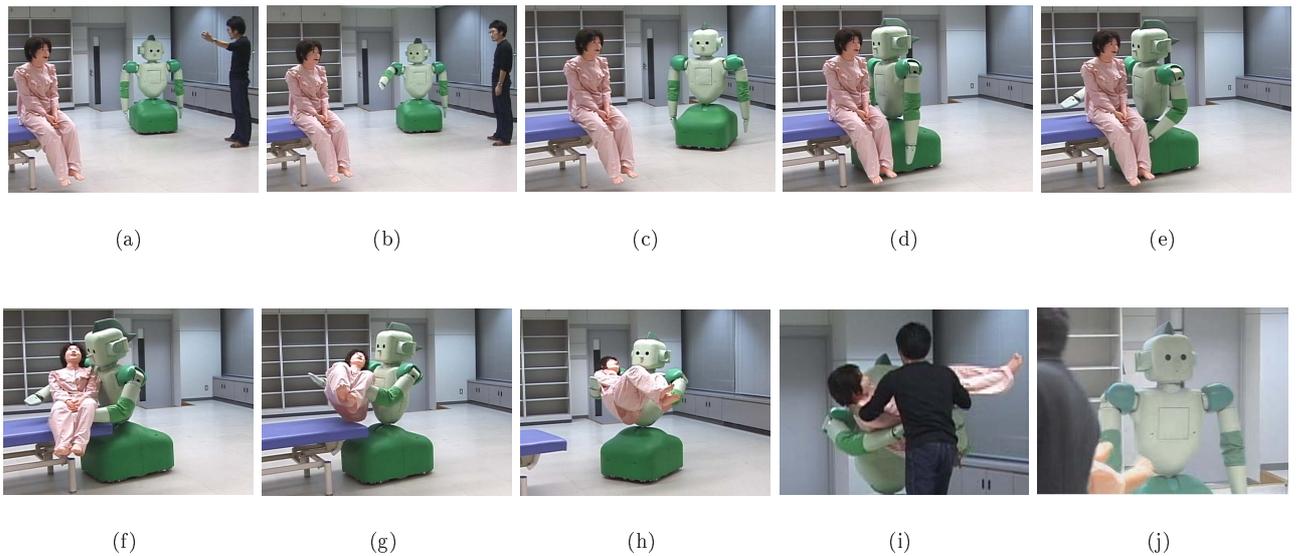


Fig. 22 Demonstration scene

令する．運動用 PC は右腕と頭部のモータを制御する局所コントローラに共有メモリを介して各関節の指令値を送る．腕部にはトルク指令値が，頭部には速度指令値がそれぞれ送られる．RI-MAN の確認に対して指示者が了承したことを認識した後，RI-MAN は対象の近くまで移動する ((c))．ここでも指示者からの指令は音声認識で行われ，その後運動用 PC に移動を促す指令が送られる．運動用 PC は台車のモータを制御する局所コントローラに移動先の具体的な位置を現在位置からの相対的な位置として指示する．移動中は局所コントローラがエンコーダの値を逐次共有メモリに公開することで運動用 PC は現在位置を知ることができ，目標位置と現在位置の関係に応じて目標速度を更新する．目標速度は台車の運動を実現するベクトル場の形で与えられる [20]．局所コントローラは与えられたベクトル場をもとに左右の駆動輪の回転数の比を求め，与えられたベクトル場にしがって運動するように自律的に駆動輪の回転数を制御する．目標地点に到達したと判断したら抱え上げ動作を開始する ((d)(e)(f)(g))．これは運動用 PC がエンコーダの値から移動終了を確認し，これを認識用 PC に伝えた後に認識用 PC が抱え上げ開始の指示を出すことで行われる．抱え上げ動作の基本的な関節角度の目標値はあらかじめ教示された時系列データとして運動用 PC に記憶されている．運動用 PC はこの時系列データを触覚センサからの情報をもとにして文献 [21] で提案されている模倣運動生成手法にしたがって修正することで修正済み目標角度を生成し，これを実現する関節トルクを計算して局所コントローラに送る．運動中，関節を担当する局所コントローラはポテンシオメータから読み取った値を共有メモリ上に公開することで現在の関節角度を運動用 PC に知らせる．抱え上げ完了後，元の位置に戻る間は (c) と同様である ((h))．移動が終了して停止した後，指示者が対象を取り上げる ((i)) と，触覚センサの値の変化が局所コントローラから運動用 PC に伝えられることで，運動用 PC は腕の局所コントローラに腕を下ろすための関節トルクを指令し，認識用 PC に動作の完了を報告

する．認識用 PC はこの報告を受けてデモンストレーションが完了したことを知らせる内容のメッセージをスピーカに出力して一連の行動が終了する ((j))．

このデモンストレーションでは (a) から (j) までをひとつの行動として定義している．また，会話による抱え上げの対象を確認すること ((a)(b))，ベッドへの移動 ((c))，抱え上げ動作 ((d)(e)(f)(g))，スタート地点への後退 ((h))，対象の退避を確認して初期姿勢に戻る ((i)(j)) の 5 つが定義された運動である．このデモンストレーションでは認識用 PC はひとつの行動の中でシーケンシャルに運動を切り替えるだけであるため，非常に制御負荷が低くなっている．一方で，局所コントローラにはサンプリング周期を 4 [ms] に維持するため最低限の計算のみを行わせているために，各関節に具体的な指令値を与える必要がある運動用 PC の計算負荷は高くなっている．

本稿では取り上げないが，耳介を装備したマイクを用いた音源定位と画像認識とを組み合わせて指示者を探して頭部でトラックするという行動を実験した際には明らかに双方の PC の計算負荷の関係は逆転していた．さらに将来複数の行動を並列に実行する，または状況に応じた優先順位を自律的に判断して行動や運動の選択を行うといったより複雑な状況下で動作する場合には認識用 PC の計算負荷はより増加することは間違いなく．このため，得られる情報の精度と計算負荷のトレードオフを考慮して意図的に計算の精度を落とすなどして計算負荷を減少させる試みが必要だと思われる [22]．

## 5. おわりに

本稿では，人と接するロボットに必要な機能について述べ，我々の開発した介護支援ロボット研究用プラットフォーム RI-MAN でそれらの機能がいかにも実現されているかについて安全性の確保，安心感の向上という観点から詳細に説明した．

安心と安全を考慮したいいくつかの設計指針には，物理的に有意な仕事を果たすために求められる仕様との両立が困難となる

部分が生じる。そのため、十分な性能を発揮することが分かっている個別の機能を単に集めただけでは不十分であり、各要素をひとまとめに実装したときにシステム全体が仕様を満たすかどうかというトータルな設計を経た上での判断が必要となる。この意味で、RI-MAN の開発と評価は人と接するロボットの実現可能性を議論するための第一歩として非常に意義深い。

RI-MAN では干涉駆動機構を用いたアクチュエータの利用効率向上によって小型かつ軽量の機構で十分な出力を実現し、柔軟な面状触覚センサの採用でほぼ全身の表面を柔軟素材で構成している。さらに、共有メモリで繋がれた分散コントローラ群と上位の集中制御器とのネットワークで構成される階層型分散制御方式の採用で、一般に両方が困難な制御負荷の分散化と局所情報の系全体への速やかな反映を可能にした。安心と安全に寄与するこれらの技術を取り入れることで、これまでに例を見ない抱え上げ動作による介護支援を指向したロボットを実現した。

単純な保持動作実験によって干涉駆動機構を採用した腕の運動を評価し、最大抱え上げ重量の見積もりを試みた。抱え上げ動作では体幹と対象がもっとも離れているときに最大トルクが必要となることから、代表的な抱え上げ動作の初期姿勢を選び、その初期姿勢において手先で操れる重量を最大抱え上げ可能重量とした。その結果、対象を真上に持ち上げる動作をした場合は約 19 [kg] の、肘を用いず肩関節のみで持ち上げようとした場合には約 30 [kg] の重量を持ち上げられることがわかった。同じ初期姿勢でもその後の運動によって可搬重量は大きく異なる。抱え上げ動作の成否は単純なモータの出力だけでなく、初期姿勢や生成される動作に依存するところが大きい。

また、腕に装備した面状触覚センサはロボットの運動に伴う対象の重心のずれを検出できるだけの空間解像度と感度を有していることも示された。さらに、指示者とのコミュニケーションを通しての一連の抱え上げ動作を含めたデモンストレーションでは、階層型分散制御構造を構成する各制御器が連携して機能することでスムーズな動作の実現が確認された。試作第 1 号の RI-MAN でのこの結果は、抱え上げ動作による人の搬送作業の実現可能性を強く感じさせるものである。しかし、実際に人を抱え上げるためには解決しなくてはならない非常に多くの問題が残されている。以下ではそれらのうち運動と行動に関して今後取り組むべき大きなテーマについて述べる。

安全の観点からはロボットの可動部において人間のあらゆる身体部位の巻き込みを防ぐことが理想であるが、可動範囲の制限などから必ずしも実現できるとは限らない。ロボットの用途に応じて起こり得る危険を想定した上で、適切に安全策を施すことが重要である。現在 RI-MAN の主要な関節に備えられている巻き込み防止機構の性能は不慮の挿入を防ぐ程度のものである。現在の評価では、防ぎうる挿入が不慮か意図的かで区別しているが、今後はより詳細に区別をし、対象となる身体部位についての考察もあわせて行うべきである。

抱え上げ動作の興味深い点は、この運動が手先による単純な搬送とは異なり、ロボットのハードウェア的な性能だけで最終的な搬送可能重量が決まらない点である。本稿で行った最大可搬重量の見積もり結果が示唆しているように、わずかな運動の違いが大きな可搬重量の違いを引き起こす。抱え上げ動作には

いわゆる「コツ」が存在する [23]。コツをうまく抱え上げ運動に取り入れるかどうかで、同じ機構、同じアクチュエータを用いたロボットでも最終的に搬送可能な重量は異なるはずである。コツを運動に組み込むためには人が人を抱え上げる動作から抽出することで可能であろうし、あるいはロボット独自の構造に依存した異なるコツを求める必要があるかもしれない。コツの抽出と運動への組み込みは抱え上げ動作のみならず、今後さまざまなロボットが冗長自由度を駆使したより複雑で巧みな運動を実現する際に求められる非常に興味深いテーマである。

現在行っているデモンストレーションでは単一の行動を行っているだけであり、状況に応じた高度な判断に基づく行動や運動の切換えが行われているとは言い難い。将来はすべてのセンサを使うことで外界の情報を取得し、これをもとにより複雑な状況に対応することになる。この際にはすべての制御器の負荷は現在よりも大幅に増加することになり、これに耐えうるハードウェアが必要となる。そしてどの状況でどのような行動を取るのがふさわしいのかという行動選択アルゴリズムの設計というより重要なテーマにも取り組まねばならない。

RI-MAN による抱え上げ動作の研究は始まったばかりである。ここで挙げた以外にも機構上の設計やデバイスレベルなどさまざまなレベルで残されている課題は多い。こうした課題をひとつずつ確実に解決していくことで人とロボットの新しい接し方を模索していきたい。

謝辞 RI-MAN の開発は、理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターの中核プロジェクトとして行われた。この開発は多くの要素技術の集積であり、同センターの研究者による惜みない協力によって実現した。これらの専門的技術や貴重なアドバイスを、浅野文彦氏、高木賢太郎氏、加藤陽氏、中島弘道氏、小林祐一氏、中坊嘉宏氏より頂いた。心より感謝したい。

## 参考文献

- [1] 石井純夫: “食事支援ロボット「マイスプーン」”, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.4, pp.378-381, 2003.
- [2] 柴田崇徳: “人とロボットの身体的インタラクションを通した主観価値の創造”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.200-203, 2000.
- [3] 柴田崇徳: “メンタルコミットロボット・パロとロボットセラピーの展開”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.3, pp.319-322, 2006.
- [4] 古庄純次, 武居直行, 中垣聡子 ほか: “インテリジェント義足継手の研究開発”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.70, No.695, pp.2163-2170, 2004.
- [5] 北川秀夫, 西坂晋, 三好孝典 ほか: “介助式全方向移動車椅子のためのパワーアシストシステムの構築”, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.3, pp.321-329, 2005.
- [6] F.Kasagami, H.Wang et.al.: “Development of a Robot to Assist Patient Transfer,” Proc. of the IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, pp.4383-4388, 2004.
- [7] 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.
- [8] 生田 幸士, 野方 誠: “福祉ロボットの安全性に関する統一的評価法の提案”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, pp.363-370, 1999.
- [9] 森 政弘: “不気味の谷”, Energy, Vol.7, No.4, pp.33-35, 1970.
- [10] 大西 正輝, 小田島 正, 羅 志偉, 細江 繁幸: “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.88-D-II, no.2, pp.368-377, 2005.
- [11] 広瀬茂男, 佐藤幹夫: “多自由度ロボットの干渉駆動”, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.2, pp.128-135, 1989.
- [12] 伊藤正美, 市川惇信, 須田信英: “自律分散宣言 明日を開くシステムパラダイム”, オーム社, 1995.
- [13] 原田達也, 佐藤和正, 森武俊: “触れ合いロボットによる心理効果”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.5, pp.698-704, 1998.
- [14] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄 ほか: “人間と相互作用する自律型ロボット Robovie の評価”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.315-323, 2002.
- [15] 中島弘道, 向井利春: “前後識別可能な反射板を用いた音源定位システム”, 第6回システムインテグレーション部門学術講演会予稿集, pp.223-224, 2005.
- [16] 加藤陽, 向井利春: “人と接するロボットのための尿失禁検知ガスセンサ”, 第6回システムインテグレーション部門学術講演会予稿集, pp.225-226, 2005.
- [17] 向井利春: “ロボットへの装着を目的とした柔軟な面状触覚センサの開発”, 超五感センサの開発最前線, (株)エヌ・ティー・エス出版, (ISBN:4-86043-100-6), pp.263-271, 2005.
- [18] 平野慎也, 羅志偉, 小田島正, 加藤厚生: “環境適応ロボットにおける分散型汎用コントローラの開発”, 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1B22, 2003.
- [19] K.Harada, S.Kajita, et.al.: “A Humanoid Robot Carrying a Heavy Object,” Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1724-1729, 2005.
- [20] T.Odashima, Z.W.Luo, S.Hosoe: “Hierarchical control structure of a multilegged robot for environmental adaptive locomotion,” Artificial Life Robotics, Vol.6, No.1 and 2, pp.44-51, 2003.
- [21] 大西正輝, 小田島正, 羅志偉: “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 C (電子・情報・システム部門誌), vol.125, no.6, pp.856-862, 2005.
- [22] 小林祐一, 大西正輝, 中島弘道 ほか: “人と接するロボットのためのソフトウェアアーキテクチャ”, 第6回システムインテグレーション部門学術講演会予稿集, pp.215-216, 2005.
- [23] Y. Kuniyoshi, Y. Ohmura, K. Terada, et.al.: “Embodied basis of invariant features in execution and perception of whole-body dynamic actions —knacks and focuses of Roll-and-Rise motion,” Robotics and Autonomous Systems, Vol.48, No.4, pp.189-201, 2004.

#### 小田島正 (Tadashi Odashima)

1972年5月8日生。1995年名古屋大学工学部電子機械工学科卒業。2000年同大学院博士後期課程修了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・環境適応ロボットシステム研究チーム・研究員, 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。日本機械学会各会員。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

#### 大西正輝 (Masaki Onishi)

1973年6月26日生。1997年大阪府立大学工学部情報工学科卒業。2002年同大学院博士後期課程修了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター研究員を経て, 2006年産業技術総合研究所情報技術研究部門研究員, 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。電子情報通信学会, 電気学会, 映像情報メディア学会各会員。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

#### 田原健二 (Kenji Tahara)

1974年10月11日生。2003年立命館大学大学院理工学研究科総合理工学専攻博士後期課程修了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・環境適応ロボットシステム研究チーム研究員, 2007年九州大学 SSP ヒューマンセントードロボティクスプロジェクト特任准教授, 現在に至る。指口ロボットによる動的物体把持, 筋骨格系の動力学解析, 冗長ロボットの制御などの研究に従事。博士(工学)。IEEE, 計測自動制御学会, システム制御情報学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

#### 向井利春 (Toshiharu Mukai)

1967年2月24日生。1990年東京大学計数工学科卒業, 1995年同大学院博士課程修了。同年4月理化学研究所フロンティア研究員。2000年10月より Laboratoire de Neurobiologie (フランス)にてポスドク。2001年10月より理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール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)。1999年度計測自動制御学会論文賞, 2000年度日本バーチャルリアリティ学会総会学術奨励賞, 2002年度日本神経回路学会研究賞, 2005年計測自動制御学会 SI 部門奨励賞等受賞。計測自動制御学会, 電子情報通信学会, IEEE 等の会員。(日本ロボット学会正会員)

#### 平野慎也 (Shinya Hirano)

1979年1月17日生。2001年愛知工業大学電子工学科卒業, 2003年, 愛知工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修了, 2006年愛知工業大学大学院工学研究科博士課程電気材料工学専攻卒業, 2006年理化学研究所バイオミメティック・コントロール研究センター環境適応ロボットシステム研究チーム, リサーチ・アソシエイト。2007年同チーム研究員となり, 現在に至る。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

#### 羅志偉 (Zhi Wei Luo)

1963年10月3日生。1984年中国華中工学院自動制御と計算機学部卒業。同年中国蘇州大学教師, 1986年愛知工業大学客員研究員。1991年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。1992年同大学院博士後期課程修了。同年豊橋技科大助手。理化学研究所フロンティア研究員, 山形大学工学部助教を経て, 現在, 神戸大学工学部教授, 兼理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・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。計測自動制御学会, 日本神経回路学会, IEEE 等各会員。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

#### 細江繁幸 (Shigeyuki Hosoe)

1942年10月7日生。1965年名古屋大学工学部金属学科卒業。1967年同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年名古屋大学工学部情報工学科教授。1993年同大学院工学研究科電子機械工学専攻教授。1999年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・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・チームリーダーを併任, 現在に至る。その間, 制御理論, システム理論などに関する研究に従事。計測自動制御学会, 機械学会, システム制御情報学会, IEEE 各会員。工学博士。