

介護ロボット リーマン

向井利春* 平野慎也* 細江繁幸*

1. まえがき

少子化と高齢者人口増大の同時進行により、日本社会は多くの新たな課題に直面している。その一つは介護の問題である。国立社会保障・人口問題研究所による¹⁾と、平成20年から平成30年のわずか10年間に、生産年齢人口は8,233万人から7,473万人に減少するのに対し、高齢者人口は逆に、2,821万人から3,538万人に増加すると予測されている。これらの数字を見ると、現在でも介護者不足や施設の不足などが指摘され大きな問題になっているが、今後それらが一層深刻になることは明白である。

このような背景下で、介護に先端的な科学技術を導入することに、大きな期待がもたれている。介護が抱えている課題は多様である。これらの中で、介護職員の肉体的負担が大きく仕事がきついことは、人手不足の重要な一因になっている。このため、介護リフトや他の様々な機器が介護に導入されている。しかし、いまだ実際には普及が十分でないことや、力仕事に伴って生じる腰痛の問題などの解決には、必ずしも役立っていないということが報告されている²⁾。しかしながら、上述の少子高齢化を考慮すれば、介護機器の導入による身体労働の軽減を図ることの重要性は高まりこそすれ減ずることはない。

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（BMC, 1993-2008）では、生物の運動制御機能の解析と工学的な応用を行うことを目的として研究を行ったが、その具体的な応用として、介護支援ロボットRI-MAN（写真1）の開発に取り組んだ。この主目的は研究成果の社会還元であるが、同時に、介護支援ロボットには従来のロボットにはない新しい機能が要求され、ロボット研究とし

*理研—東海ゴム人間共存ロボット連携センター

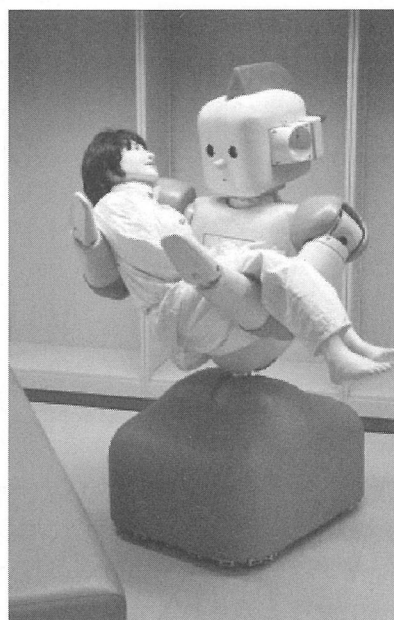


写真1 RI-MANが人形を抱えている様子

ても新しい研究内容を含むことを明確化する目的もあった。

開発されたRI-MANについては、これまでも多くの場所で紹介^{3),4)}してきたので、構造や機能に関する全般的な説明はそれらに譲る。本稿では、特に介護における力仕事に重点を置きつつ、介護支援ロボットの特徴、RI-MANで開発した技術、今後進めてゆくべき課題を説明する。

2. ロボットによる力仕事の支援

RI-MANで主に目標にしたのはベッドからベッド、ベッドから車椅子、あるいはそれらの逆方向などの移乗作業の支援である。実際、介護における移乗作業の比重は大きい。我々の調査した施設では、1人の介護者が1人の被介護者に対して食事3回と

2日に1回の入浴のため、1日平均7回の移乗作業を行っていた。介護者1人が5人程度を見ているため、介護者は1日当たり35回の移乗作業を行っていることになる。理想的には毎日の入浴と散歩を行いたいと考え、1日に必要な作業はさらに増加する。移乗はこのように回数が多く、大きな力が必要であるので、大変厳しい作業であり、腰痛に悩んでいる介護者は多い。したがって、せめてこの作業で大きな力が必要な部分だけでもロボットで肩代わりできれば、その効果は大きい。しかし、これは単に大きな力を出せるロボットを導入すれば解決する、というほど簡単なことではない。

たとえば、介護支援ロボットは、安全性や操作のしやすさ、制御性能、安心感、現場の邪魔にならないなど多くの理由から、人の抱き上げが可能な範囲で、軽く、細く、小さくあってほしい。しかし、一方で、ロボットは体重が数十キログラムの人を抱き上げる必要があり、このためにモータやギア（パワー部）は大きくなり、結果的にロボットサイズを小さくすることが制約される。すなわち、大きさとパワーの両立は困難である。実際に設計されたRI-MANは、高さ158 cm、重量100 kgと人間と同程度のサイズを有する。パワー部のサイズをなるべく小さくするため、関節の駆動には干涉駆動方式を採用している。しかし、それでもギア比は高くする必要があり、大きめのサイズや低速動作、バックドライバビリティ不足などの原因になっている。

介護におけるロボットの役割はあくまでも脇役であり、介護者の全面的な肩代わりをするわけではない。また、それを目指しているわけでもない。介護は基本的には人と人との関係である。また、実現可能性からみても、ロボットの自律動作を目指すよりも、半自律動作を目指す方が現実的である。したがって、ロボット支援による介護は、介護をされる人、介護する人、ロボットの3者の協調作業である。このとき、3者間でのコミュニケーションをどのようにとり行うかは重要である。最近盛んに研究されている人間共存ロボットでもコミュニケーションについては多く研究されている。しかし、介護支援ロボットでとくに重要な‘力を媒介したコミュニケーション’についての検討はまだほとんどない。人が人と直接接するとき、位置、力、質感、温度、あるいはそれらの時系列情報である運動、あるいはさらに高次情報である意志、など多くの情報を交換する。ロボットが被介護者を抱き上げる際にも、抱き上げ

の安定性や被介護者に過大な力を加えないために、接触点力、介護者の重心の位置や運動方向、など多くの力情報が必要である。また、介護者がロボットに、運動方向や速度を指示するとき、手をロボットの表面に触れて、力によって直接的、直感的に運動を指示するアプローチ（触覚ガイダンス）は大変有効である。このような物理的な接触力による情報の伝達、すなわち‘力を媒介したコミュニケーション’は介護支援ロボットの重要な課題である。RI-MANの製作では、力を媒介したコミュニケーションを実現するためのキーデバイスとして、ロボット表面を柔軟にカバーできる面状触覚センサ⁵⁾を開発するとともに、ロボットでの有効な利用方法について研究⁶⁾した。次章以降でその概要を紹介する。

3. 人と柔らかく接するための面状触覚センサ

今日、商用のセンサとして、感圧導電性インクなどいくつかが入手可能であり、研究レベルでもPVDFフィルムを用いたものなど、多数が報告されている。しかし、ロボットによる介護支援で、力を媒介したコミュニケーションに用いるには、精度や、サンプリングレート、耐圧性などで問題があり、新たにより高精度な触覚センサが必要である。RI-MANおよびそれに引き続くプロジェクトでは以下で述べる触覚センサを開発した。

3.1 センサの仕様

触覚センサの仕様としては空間解像度、測定レンジ、測定解像度、センサコントローラの性能、サンプリング速度を考えた。

空間解像度は、人間の2点弁別閾について一般に言われている値、指先2~3 mm、手掌10 mm、前腕40 mmを参考にして、10~20 mm程度とした。指先は別のセンサを用いることにすれば、この程度でロボットの他の部分を覆うには十分であると考えられる。測定レンジは、体重60 kgの人を接触面積 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ で保持する場合を想定したときの平均圧力（ゲージ圧、以下同様） 0.15 kgf/cm^2 を基にして、さらに局所的にはより大きな圧力がかかることを踏まえ、安全率6とし、 $0 \sim 0.9 \text{ kgf/cm}^2$ を計測できることを目標とした。また、測定解像度については、フィードバック制御をスムーズに行えることを目標とした。このための明確な基準は存在しないが、我々の経験に基づき、5 bit以上の解像度で測定レンジが表現できることとした。垂直応力に加えてせん断応力も測れるほうが望ましいが、まずは

垂直応力を測れるセンサにターゲットを絞り開発を行った。

センサコントローラは、触覚センサの近傍に設置可能で、さらに、ロボット内のネットワークに接続できることが求められる。センサとコントローラの間は多数本のケーブルで接続され、さらに、センサからの微弱なアナログ信号が伝達されるので、この距離を短くすることで、ケーブルの束を引き回す必要がなくなりメンテナンス性が向上するとともに、ノイズの混入を抑えることができる。ネットワーク内の通信は、2本のケーブルのみで、耐ノイズ性を有するデジタルにより行われる。コントローラは、ロボット内の各所に設置できるように小型であることが必要である。また、コントローラで触覚センサのパターン情報を処理して、ネットワークには圧縮・抽象化されたデータを送り出すために必要な計算能力を持たせることとした。

さらに、ロボットでの使用では制御に十分なサンプリング速度が必要である。これは、センサとセンサコントローラの両方に依存する。サンプリング速度はロボットの制御周期と同程度であることが望ましい。経験的に、フィードバック制御では制御対象の共振周波数の10倍以上の速さがあれば安定でスムーズな制御が行えることが知られている。一般的なロボットは1~50 Hzの共振周波数を持つので、制御は10~500 Hzで行う必要がある。つまり、センサとしては最高で2 msの速度でサンプリングできれば十分である。

3.2 センサの基本構造

RI-MANに用いている触覚センサでは、8×8の感圧素子（フジクラのFPBS-04 A）を18 mmピッチでフレキシブル基板上（センサシート）に並べて触覚センサとしている（写真2）。フレキシブル基板の可撓性により、（2次元平面に展開可能な）2次元曲面であれば巻きつけることができる。センサシートを（2次元平面に展開不可能な）自由曲面にも装着できるようにするために、実際の回路パターンは、配線が櫛状の中心部に集中するように設計した。これにより、センサシートの不要部分を切り落として、球面などの自由曲面に貼り付けることが可能となった。さらに、配線は中心部が残っていれば周辺部は切断しても動作するように設計してあるので、もとのシートより小さな面に適用することも可能である。信号の読み出しはスイッチングによって行と列を選択して行うこととした。スキャン

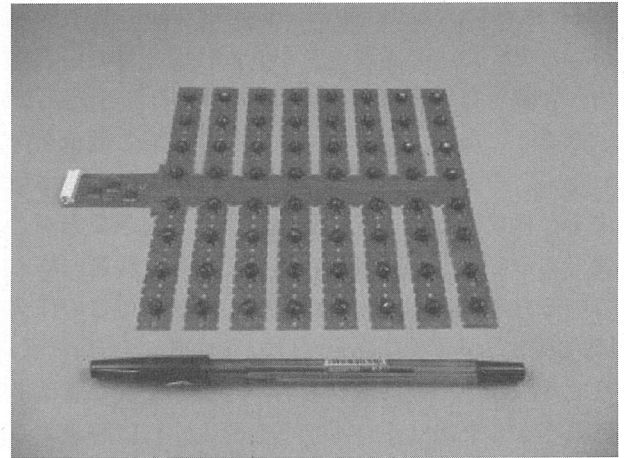


写真2 製作したセンサシート

を行うことによって全素子の出力が得られる。センサシートから外部に出る配線数を減らすため、シートに回路を搭載して簡単な処理を行うことにより、8×8のシートの場合には基本的には10本のケーブルで計測が行えるようにした。

この触覚センサシートを弾性体に埋め込むことで触覚センサとする。このためには、まず前述の通り、触覚センサシートを装着したい曲面に巻きつけて固定する。次に、感圧素子間のギャップを無くすために、望みの形状に成形して硬化可能な塑性材（紙粘土など）でギャップを埋め硬化させる。次に、感圧素子のダイアフラム上に、弾性体で作成した突起状の形状を配置し、全体を弾性体シートでテンションをかけながら覆う。突起形状の素材は弾性体シートより硬い弾性体を選ぶ。これにより、突起が弾性体シートを突き上げる形になる。突起の周辺は圧縮された結果、その他の領域より硬くなり、弾性体シートに硬さの構造が生まれる。提案している触覚センサの構造を図1に示す。

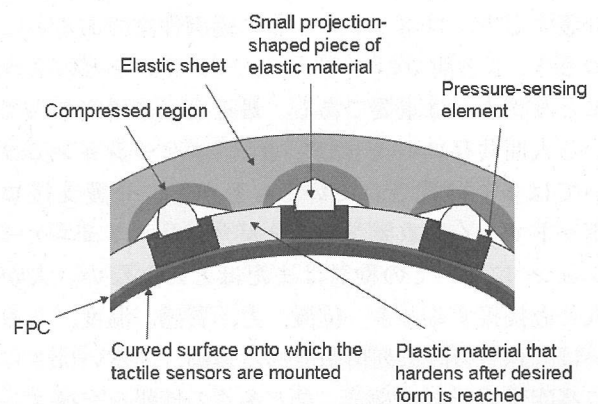


図1 触覚センサ内の感圧素子と弾性体の構造

実際の製作では、弾性体シートとしては5 mm厚のスポンジシート、突起には液体ゴムを用いた。液体ゴムは硬化するとスポンジシートより硬くなる。この構造により、突起を配置しない場合と比べて、2~3倍程度の増幅効果が得られることが実験により確認されている。

3.3 触覚センサコントローラ

初期のRI-MANでは、触覚センサシート1枚のサンプリングに15 ms程度かかっていたが、これはロボットをセンサフィードバックで動かすには十分な速度とは言えない。そこで、写真3に示すdsPICボード (Landmark LM 517) を用いて新たな触覚センサコントローラを製作した。dsPICボードは、計測や制御の多様な用途に使うことを目指して我々が開発した小型汎用ボードであり、CPUとしてマイクロチップ・テクノロジーのdsPIC 30F 6012 Aを搭載している。これに、PCと1 Mbpsで通信できるUSBインタフェース (FTDI FT 232 RL) を加え、また、30F 6012 Aのほとんどのピンにアクセス可能なコネクタをつけ、35×50 mm²のサイズのボードとした。さらに、拡張基板をスタッキングコネクタで接続できるようにした。

ここでは、30F6012Aの備えている12bitのA/DコンバータとデジタルI/Oを用いて触覚センサコントローラとした。プログラムはC言語で開発され、フラッシュメモリにダウンロードされる。プログラムにより、触覚センサのパターン情報をどのように処理し、ネットワーク通信に適した抽象データに圧縮するかが決められる。このボードにより、最高で、周期1 msで触覚センサシート1枚がサンプリングできるようになった。

さらに、RI-MAN内部のネットワークに接続するために、dsPICボードにスタッキングして用いる

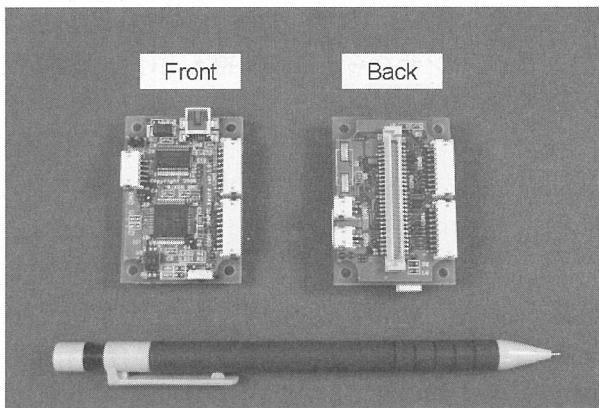


写真3 触覚センサコントローラ

拡張用通信ボードも製作した。通信ボードはネットワーク用にステップテクニカのMKY 40を搭載している。これは最大512 byteの仮想的な共有メモリを実現する。同期に必要な時間は、256 byteのメモリでは1 ms、512 byteでは2.4 ms程度と高速である。ボードは小型であり、また、ネットワーク通信の機能を備えているので、ロボット内のセンサ近傍に埋め込んで、分散型の処理系を構築することができる。

3.4 触覚センサ出力

1 Hzの正弦波状の力を加えたときの触覚センサ出力を図2に、周波数応答を図3に、補間性能を図4に示す。100 Hz程度まで、きれいな出力が得られている。また、弾性体の補間効果により、不感領域がなくなっている。

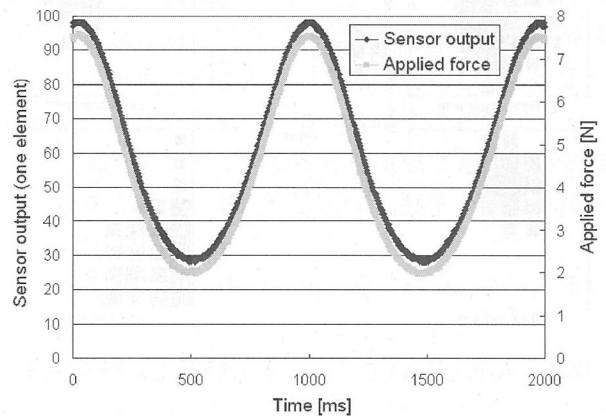


図2 1 Hzの正弦波で力を加えたときの触覚センサ出力

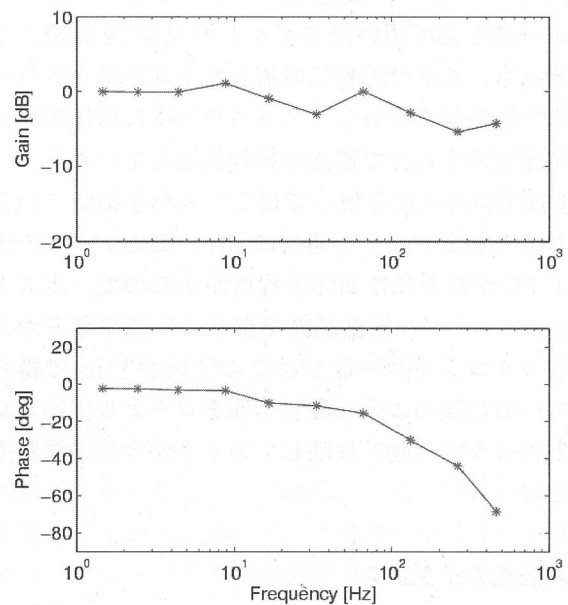


図3 周波数応答

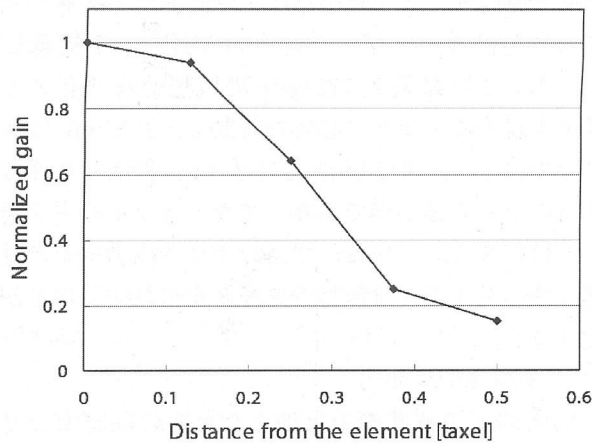


図4 補間性能

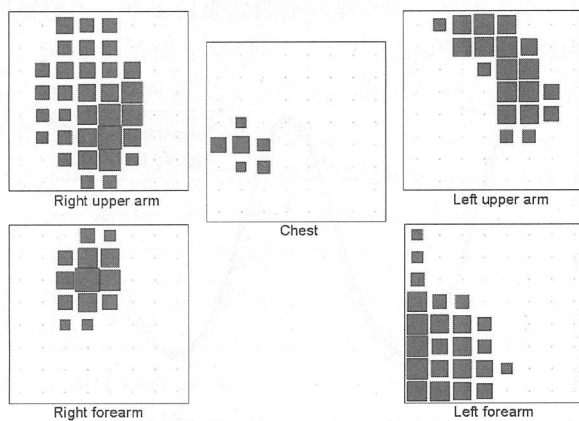


図5 人形を抱いているときの触覚センサデータ

この触覚センサをロボットに取り付けて、触覚センサ出力を用いた全身マニピュレーションによる対象操作⁷⁾、および、触覚センサをマンマシンインタフェースとして用いたロボットの操作⁸⁾を実現した。いずれも、センサ近傍に設置したセンサコントローラ内で特徴量を計算し、ネットワークには圧縮された情報を流すことで高速な操作実現している。

1行ずつの通信を使って得た、人形を抱いているときの全触覚データを図5に示す。このデータをホストPCが得るには90ms程度かかるので、ホストPCでフィードバック制御を行うには遅すぎるが、ローカルコントローラではこの情報が1msで得られている。このような触覚情報をローカルで処理してどのように行動に反映していくかが今後の課題である。

4. 触覚ガイダンス

4.1 基本コンセプト

介護者がロボットの腕などに触れ、力の伝達に

よって直接的、直感的に運動を指示する手法である「触覚ガイダンス」を提案し、RI-MANに実装した。ここでは基本概念について説明する。

スポーツなどで人間が他人に複雑な動作を教える時に、「手取り足取り」教える場合がある。教えられる側は、力を抜いて受けた力で動いたり、触覚や力覚により相手の意図を察知し、それに合わせて動いたりする。ロボットの場合、軽量でギア比の小さなものなら人間の力で動かせる。これは、人間では力を抜く場合に相当する。しかし、人を抱き上げるように大きな力が必要とされるロボットの場合、高いギア比を有するのでバックドライバビリティを持たせることは難しい。人間共存ロボットでは触覚センサを広範囲に設置することが多く、RI-MANでも実際に5ヶ所（左右の上腕、前腕と胸部）に柔軟面状触覚センサを備えている。そこで、この触覚センサを使って人の意図を読み取り、姿勢を変化させたり移動したりしようというのが触覚ガイダンスである。操作したい部位に装着された触覚センサを用いることにより、力を加える方向と実際の動きの方向が一致するので、直感的な操作が行える。

触覚ガイダンスを行うために、センサ出力から何らかの特徴量を計算することを考える。触覚センサには、垂直応力だけを検出するタイプでも、素子数分の自由度がある。最初に触ったときの圧力中心の位置と力を基準とし、現在の値との差を見ることにより、センサの面方向（圧力中心位置）と垂直方向（力）の合計3自由度の特徴量が得られる。さらに、接触面積や形を考慮することにより、最大、素子数分の自由度（RI-MANでは1触覚センサあたり64）の特徴量が得られる。

また、ロボットが人や物を抱え上げた状態での移動を触覚ガイダンスにより行う場合には、抱え上げられた対象の重量によるセンサ出力をキャンセルしたい。このように、圧力を空間的に分離したい場合にも、触覚センサなら、最初に抱え上げた状態で反応している領域（と必要に応じてその周辺領域）をマスクすることにより、容易に実現できる。

このように、触覚センサの、操作したい部位にあり、多くの自由度を持つという特性を使うことにより、人間にとって直感的で分かり易い操作が実現できる。これは、介護現場などで、人間が認識を行いロボットの動きを補助する必要がある場合に有用な方法であると期待している。

4.2 実験結果

触覚ガイダンスの実用性をテストするための実験を行った。未だ予備実験の段階ではあるが、結果を簡単に紹介する。

・姿勢操作

胸への接触でセンサの表面方向のガイド用特徴量（横方向の圧力中心位置 g_x ）を検出し、ロボットの腰関節を左右に回転させた場合と、前腕に接触し、センサの垂直方向のガイド用特徴量（圧力の総和 g_z ）を検出して肘関節を動かした場合の結果を図6に示す。PC モニタ上に関節角度を表示し、操作者がそれを見ながら目標角度に行くように触覚ガイダンスを行った。腰関節は-10~10度の往復、肘関節は10~60度の往復を目標とした。操作者がモニタを見て調節するためか、目標角度より行き過ぎる傾向があるものの、思うように関節操作ができることが確認できた。

・移動操作

前腕に接触して接触位置を前後左右に動かすことにより、前進後退と回転移動を実現した。写真4に示すように、人形を抱いた状態でも、人形の荷重部

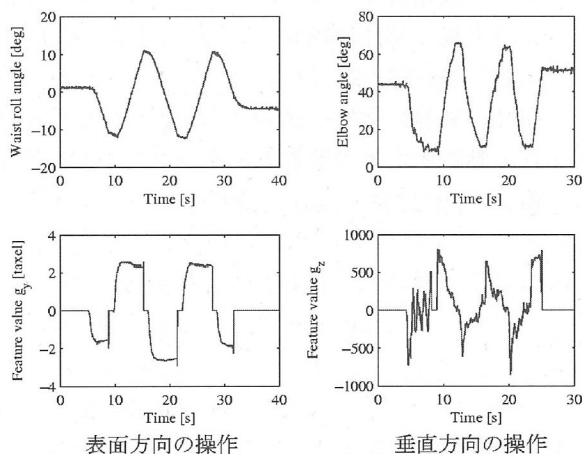


図6 触覚ガイダンスによる関節角操作

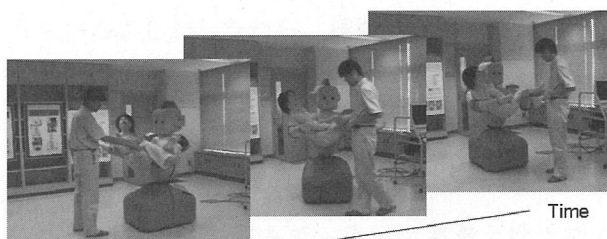


写真4 人形を抱き上げた状態での触覚ガイダンスによる移動操作

分にマスキングを行うことにより、触覚操作での移動が行えることを確認した。

5. あとがき

われわれは、ベッドの端に腰かけた人と同サイズの人形を抱き上げ移動できるロボット RI-MAN を製作し、介助支援型ロボットの将来の一つの形を示した。しかし、これを現実のものに持ってゆくにはまだ課題は多くある。本稿を締めくくるにあたって、少し一般的な立場から、これらを整理し、今後の参考に供する。

RI-MAN の開発にあたって目指したのは、第1章で述べたように力仕事の支援、とくに移乗（+移動、体位変換）である。このとき、我々は、「なぜ専用機でなくロボットを用いるか」という点について、しばしば議論した。また、多くの方から質問された。これに対しては、ロボットを用いることのメリットを列挙することで答えることにしたい。また、これは、今後の開発の一方向を示すことになる。

- ・一通りでなく多様な動作を生成できる。移乗では被介護者の状況によって、移乗介護の方法を変える必要がある。
- ・被介護者の身体的特徴（背が高い・低い、重い軽い、障害の状況）への対応が可能
- ・使用環境の変化への対応がしやすい。
- ・介護者、被介護者に操作の楽しさを与えることができる。これは、動作の特徴ではないが重要である。

さらに、移乗動作以外に、将来的には

- ・生活支援（食事、排泄、入浴、洗面、整容など）
- ・被介護者の自立の補助、増進（含リハビリ）

などの支援も期待される。

第2章で、移乗介護において力を介したコミュニケーションが重要であることを述べ、実際に面状触覚センサを開発することによって、介護者からロボットへの動作指示に応用する方法を示した。しかし、これは、やっと触覚出力をフィードバックに使い始めた段階であり、本格的な利用はこれからである。今後、人が他者に手・足・体の接触によって運動を指示する動作（例えば、スポーツやダンスなどでの「手取り足取り」の教示）を具体的に観察・解析することなどによって、力を介したコミュニケーションについて基礎的な研究を推進することが重要である。これには、運動の指示だけでなく

- ・人とロボットの動的協調による抱き上げ動作の

安定性維持

- ・ダイナミックス（慣性力）を利用した大きな力の生成
- ・触覚センサを利用した抱き上げ中の被介護者の動きの予測と、過重な力の集中の回避

など、介護者、被介護者、ロボット間の力学原理、ボディメカニクスを利用した高度な運動制御も含まれる。

また、まえがきで、現場での介護機器の応用が十分でない状況について述べた。これの理由としては

- ・機器の操作でかえって時間がかかってしまう
- ・使用に手間がかかるので面倒
- ・機器を移動させるための空間が必要

などが指摘されている。ロボットの導入に際しても同様な問題点が生じないようにする必要がある。同時に、安全性や保守のしやすさについても、従来の介護機器以上に注意が必要である。

以上に述べた要件、条件を順序づけ一步一步前進することが必要である。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を引き継ぎ、平成19年8月に開始した理研—東海ゴム人間共存ロボット連携センターではRI-MANの研究をベースに、より進んだ介護支援ロボットを開発し、社会に貢献することを目指している。

参考文献

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所：“日本の将来推計人口（平成18年12月推計）”，（2006）
- 2) 井上 剛伸，山崎 信寿：“移乗介助機器使用時の身体的負担”，バイオメカニズム学会誌，Vol. 25, No. 3, pp. 123-129 (2001)
- 3) 小田島 正，大西 正輝，田原 健二，向井 利春，平野 慎也，羅 志偉，細江 繁幸：“抱え上げ動作による移乗作業を目的とした介護支援環境適応ロボットシステム研究チーム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)
- 4) 大西 正輝，小田島 正，田原 健二，平野 慎也，向井 利春，羅 志偉，細江 繁幸：“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—”，日本ロボット学会誌，Vol. 26, No. 3, pp. 247-250 (2008)
- 5) T.Mukai and Y.Kato：“1 ms Soft Areal Tactile giving Robots Soft Response”，Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 20, No.3, pp. 473-480, (2008)
- 6) 向井 利春，平野 慎也：“ロボットを希望通りに動かすための触覚ガイダンス”，第7回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI 2007），pp. 1246-1247 (2007)
- 7) 大西 正輝，小田島 正，向井 利春，羅 志偉：“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集，Vol. 44, No. 1, pp. 78-85 (2008)
- 8) 向井 利春，平野 慎也：“ロボットを希望通りに動かすための触覚ガイダンス”，SI 2007 予稿集，pp. 1246-1247 (2007)