

特集 ■アクチュエータ・テクノロジー ～ヒトとの親和性を目指して～

空気圧アクチュエータの基礎と応用 ～空気式パラレルマニピュレータの医療福祉分野への応用～



高岩昌弘

岡山大学

TAKAIWA MASAHIRO

1. はじめに

(社)日本ロボット工業会により算出された将来のロボット市場によると、2025年の我が国のロボット市場は約8兆円であり、その内、医療福祉分野は約1兆円と、ほぼ製造分野のそれ(1.4兆円)と同等な市場規模を予想している [1].

医療福祉分野へ応用されるロボット等の機械システムは、人と直接接触して作業を行うため、安全性や柔軟性という機能が第一に要求される。空気圧アクチュエータは出力/重量比も高く柔軟性にも優れるため、このような人間親和型の機械システムに適していると考えられる。

本研究では、空気の圧縮性による柔軟性が本質的な安全性として機能し、また、コンパクトな構造ながら多自由度を駆動できる空気式パラレルマニピュレータを用いた福祉支援ロボットの開発について述べる。

2. 手首リハビリ支援装置への応用

2.1 研究の背景

理学療法白書 [2] によれば、現在、我が国における理学療法士 (P.T.) 数は約 35,000 人であり、理学療法関連施設は約 12,000 箇所存在するが、この内の 4,000 箇所の施設には療法士が一人しか在籍していない。また、昨年 4 月の診療報酬改定によりリハビリテーションの保険診療が 180 日に限定された。これらより、療法士の絶対数不足への対応、ならびに在宅でも訓練を可能とするためのリハビリ支援機器の開発が期待されている。

2.2 目的とするリハビリシステム

図 1 に本研究で目指すリハビリ支援システムの概要を示す。先行研究により、まず同図 B の機能として、支

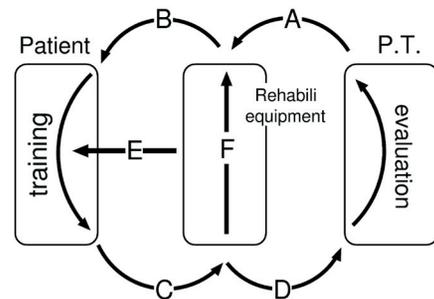


図 1 理想的なリハビリシステム (文献 [3] より抜粋)

援装置にインピーダンス制御系を構築することで種々のリハビリ動作を実現できることを実験的に確認している [4]. また、図中 C は、訓練効果を定量的に検証するため患者の手首特性を推定する機能を示し、D, E は手首特性をそれぞれ P.T. および患者に呈示する機能を表す。手首の全可動域の特性を多自由度空間において同定・呈示する手法を提案している。

本稿では図中の A は P.T. が患者に対して施した徒手訓練動作を本支援装置において獲得する機能を示す。これは、P.T. が本支援装置を介して患者に施した徒手訓練動作を本支援装置により獲得するものであり、動作獲得後、支援装置が P.T. の代わりに先に獲得した訓練動作を実施する (同図 B の機能) ことで、P.T. は別の患者に対応できるため、P.T. の絶対数不足の緩和が期待される。本研究では実際の P.T. の徒手訓練動作を獲得し実行する機能を実験により示す。

2.3 手首リハビリ支援装置の概要

図 2 (a),(b) に支援装置の写真および概要を示す。同図 (b) に示すように手首中心に手先座標系をおく。ここ

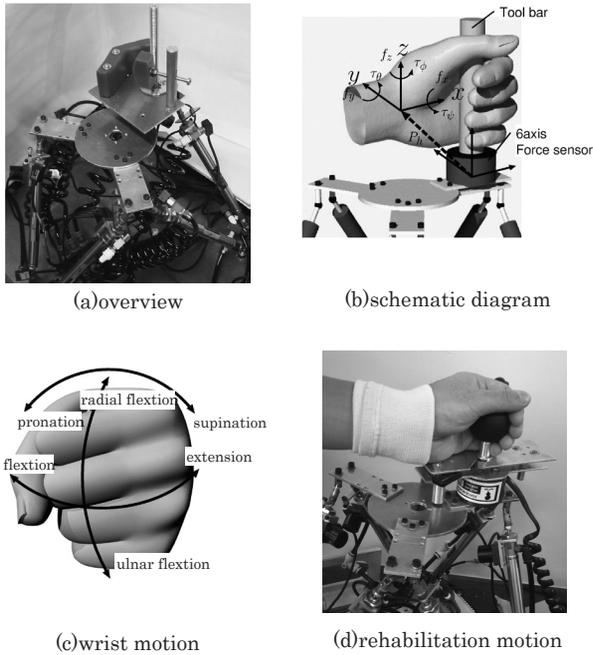


図 2 手首リハビリ支援装置

で姿勢角は roll-pitch-yaw 角で表現する。同図 (c) は手首の動作を表している。屈曲 (flexion) / 伸展 (extension) 動作は z 軸回りの回転に、橈屈 (ulnar flexion) / 尺屈 (radial flexion) 動作は y 軸回りの回転に、回内 (pronation) / 回外 (supination) 動作は x 軸回りの回転にそれぞれ対応する。また、訓練の様子を同図 (d) に示す。

2.4 P.T. の徒手訓練動作獲得

P.T. が最初に患者に訓練動作を実施する際、徒手訓練動作をマニピュレータに獲得させ、次回以降はマニピュレータが獲得した徒手訓練動作を患者に実施する。これにより P.T. は他の患者に対応でき、P.T. の絶対数不足に対応できる。マニピュレータにダンピング制御を実施し、その粘性抵抗を小さく設定しておく。この状態で図 3 (a) に示すように、P.T. はマニピュレータの上部プラットフォームに固定された治具を介して力を印加する。患者は支援装置の力センサに固定されたツールを把持しており、P.T. の印加力は支援装置を介して伝わる。このとき支援装置の動特性を無視できるなら P.T. は患者からの反力を感じながら動作を行うことができる。

実際に P.T. の協力を得て、リハビリ動作時の力データを支援装置において獲得 (図中の実線) し、その後獲得した P.T. の印加力を目標力として反復実行した結果 (図中の点線) を図 4 に示す。ここで、本来は、自然な形で徒手訓練動作を遂行するため、図 3 (b) に示すように

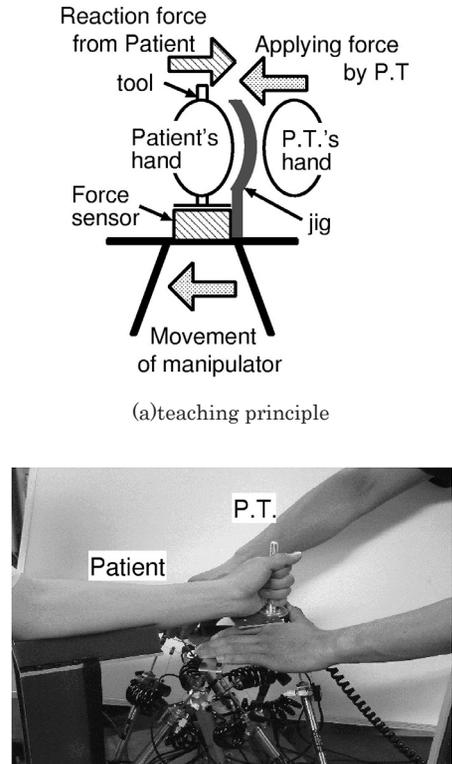


図 3 P.T. の徒手動作の獲得

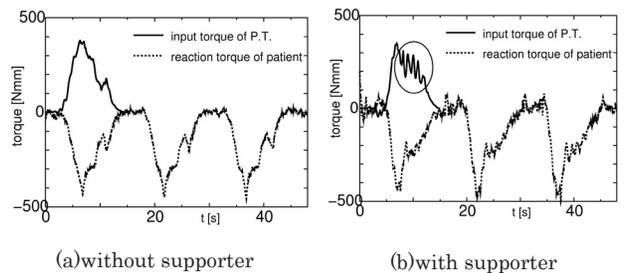


図 4 P.T. の徒手動作の獲得と実行

患者の手と P.T. のそれができるだけ近づくように治具を装着すべきであるが、現段階ではそのような治具の開発までには至っておらず、P.T. は支援装置に直接力を印加している。図 4(a),(b) はそれぞれサポータなしの、およびサポータ装着 (疑似拘縮) の場合に対応する。図 4 (b) の場合に P.T. は拘縮状態を感じ部分的に往復動作を行っており (図中丸で囲んだ箇所)、P.T. のノウハウを反映した徒手動作を獲得・実行できることがわかる。

3. 乳癌触診シミュレータへの応用

3.1 研究の背景

日本人女性において乳がんの罹患率は胃がんを抜いて

最も高く、毎年約3万人が発症する [5]。しかし、がんが乳房の一部にある場合の5年生存率は92%と高く、早期発見によりほぼ完治する。これはまた、早期発見の重要性も示している。現在、乳がん検診はマンモグラフィ（乳房のX線撮影）と触診の併用により行われている。また、このような定期検診に加えて自己検診の重要性も指摘されている [6]。

本研究では乳癌の触診動作に着目し、医師の触診動作の教育・訓練や、また、乳がんの自己検診のための標本モデルとして利用できる、触診シミュレータの構築を目的とする。

3.2 触診シミュレータの概要

触診シミュレータの概観を図5に示す。乳房を模擬した市販の触診シミュレータを空間に固定する。また、その中身（通常はシリコンで充填）は取り除かれており、その下部に空気式平行マニピュレータが配置されている。本マニピュレータは同図(b)に示すようにその上部プラットフォーム上に6軸力覚センサを介して乳房の形状モデル（市販の触診シミュレータの中身に相当、材質：ケミカルウッド）を装着している。

図6は本装置における触診動作の仕組みを示す。(a)は初期状態で、マニピュレータおよび市販の触診シミュレータは離れた状態にある。(b)は基準状態を示し、マニピュレータ上に設置された乳房の形状モデルと市販の触診シミュレータの内壁が接触するように、マニピュレータは位置制御されている。訓練者は(c)に示すように市販の触診シミュレータ表面の任意の部位に力を印加し、触診動作を行う。このときマニピュレータは乳房の形状モデルを介して指先に反力を呈示する。指先の空間位置に応じてマニピュレータのコンプライアンスを調整することにより、しこりのように空間的に異なる弾性特性を認識させる。

3.2 コンプライアンス呈示手法

図7はしこりの幾何学モデルを表している。ここでしこりは簡単のため球で表現する。今、接触したしこり表面に原点を持ち、z方向を球の中心方向、x軸を水平方向とする座標系を導入する。そして、しこりの剛性としてz方向を剛性を他の方向のそれより大きく設定することで、しこりの幾何形状を認識しやすいようにしている。後述するように、本研究では設定したしこりの剛性を実現するために位置ベース型のコンプライアンス制御系を導入している。

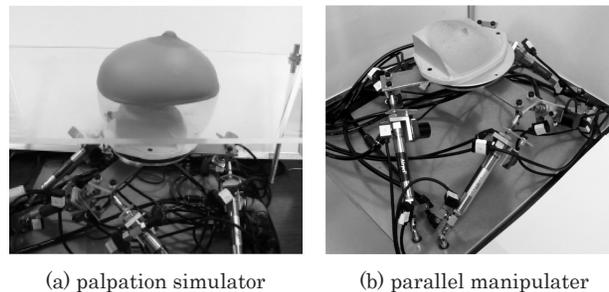


図5 触診シミュレータ

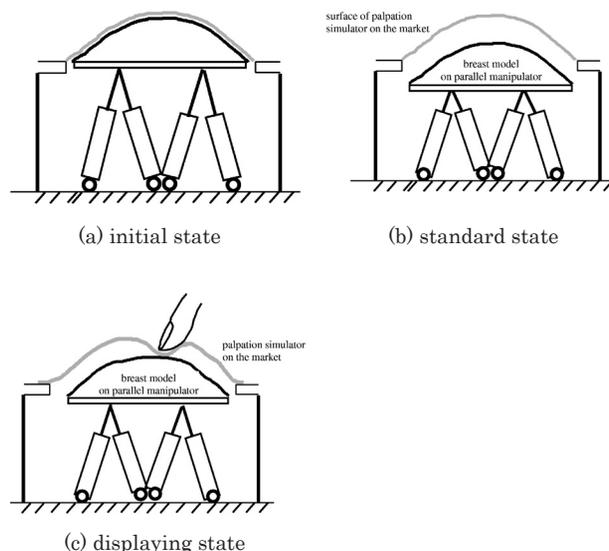


図6 しこり呈示原理

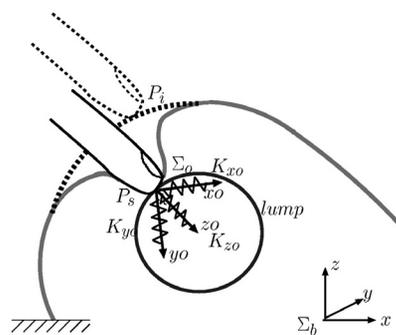


図7 しこりモデル

図8は位置ベース型のコンプライアンス制御系を示す [7]。計測された力モーメント F_m は仮想的な目標変位を計算するブロックを介してフィードバックされ、内部に位置制御系を構成している。位置制御系は、外乱オブザーバを導入し、閉ループ伝達関数が標準的な2次系となるように構成されている。

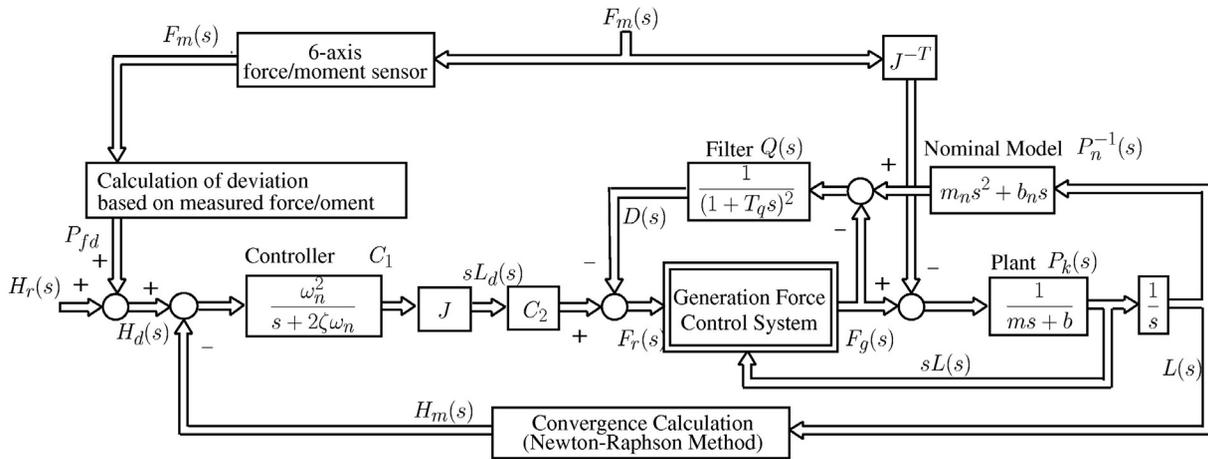


図 8 コンプライアンス制御系

4. しこりの認識結果

図 9 はしこりの認識の様子を示す。しこりモデルとして半径 10mm の球を仮定し、しこり表面を一定方向へ往復した倣い動作を行った結果である。なお、しこり内部の弾性特性は面の法線方向に対しては 0.3 N/mm と硬く、接線方向へは 0.1 N/mm と法線方向に比べて柔らかく設定している。空間的に異なる弾性特性の設定により仮想的に構築した対象物の幾何形状を認識できることがわかる。実験では半径 2mm 程度の仮想しこりを認識できることが確認されている。

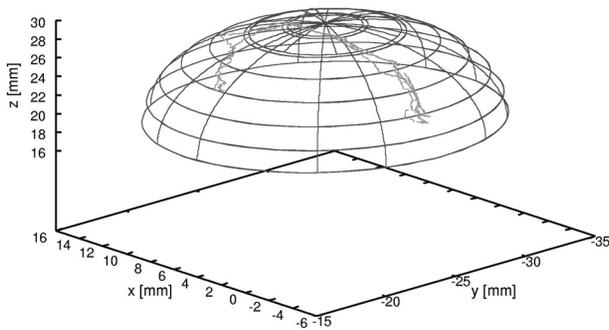


図 9 しこり表面の認識

5. おわりに

本研究では空気式パラレルマニピュレータを福祉支援ロボットへ応用することを目的とし、手首部リハビリテーション支援ロボット、および乳癌触診シミュレータの開発について述べた。双方とも実用化に向けた臨床的な有用性の検証が今後の課題である。

参考文献

[1] 平成 12 年度 21 世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書, (社)日本ロボット工業会
 [2] 理学療法白書 2002, (社)日本理学療法士協会編
 [3] 榊泰輔:リハビリ・介護機械の設計における人間と機械, システム / 制御 / 情報, Vol.45, No.11, pp.651-656 (2001)
 [4] 高岩昌弘, 則次俊郎: 空気式パラレルマニピュレータを用いた手首部リハビリ支援装置の開発—多自由度リハビリ動作の実現—, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.6, pp.65-71 (2006)
 [5] 国立がんセンター: <http://www.ncc.go.jp/jp/>
 [6] ガン情報ライブラリ: キャンサーネットジャパン <http://cancernet.jp/library/text/b021.shtml>
 [7] M. Takaiwa and T. Noritsugu : Development of Force Displaying Device Using Pneumatic Parallel Manipulator and Application to Palpation Motion, Proc. of ICRA 2003, CD-ROM pp.4098-4103

【略歴】

高岩昌弘 (TAKAIWA Masahiro)
 岡山大学 大学院自然科学研究科 准教授
 1992 年岡山大学大学院工学研究科修了。同年岡山大学機械工学科助手。2000 年同システム工学科講師。2007 年より現職。専門は制御工学, ロボット工学, 博士(工学)。空気圧サーボを中心とした人間支援型ロボットシステムの研究に従事。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 電気学会, 日本フルードパワーシステム学会, 各会員。