

研究論文

リハビリ支援ロボットの研究開発

酒井昌夫^{*1}、牧 俊一^{*2}、山本光男^{*3}

Research and Development of a Rehabilitation Robot

Masao SAKAI^{*1}, Syunichi MAKI^{*2} and Mitsuo YAMAMOTO^{*3}Research and Development Division, AITEC ^{*1*2*3}

病気やけが、手術後などで関節の可動域が狭くなった患者に行うリハビリテーションとして関節可動域訓練がある。この訓練の効率化を目指し、人間の関節の複雑な動作に対応する自由度の高い機体と、この機体に容易にリハビリ動作を教示する機能を有するロボットを開発した。具体的には医療スタッフが肘を対象として行うリハビリ動作をロボットの動作指令値に変換する光学式教示機構と、患者の腕を動かすためのロボット本体を開発し、これらをネットワーク（LAN）で接続することで、リハビリの教示から動作再現までを行う一連のシステムとした。

1. はじめに

高齢化社会が進むことによって、リハビリテーション（以下、リハビリという）を必要とする患者の増加が予想されている。一方、リハビリの現場では理学療法士などの医療スタッフが十分確保できず一人の患者にかける治療時間が限られている現状がある。また、既に上肢・下肢を対象としたリハビリ支援機器（CPM 装置）が実用化されているが、単純な構造のため定型的な動作に限定される。そのため医療の現場では個々の患者の症状・体型などに応じたきめ細かい動作を行わせたいとの要望がある。また、CPM 装置にはリハビリ中の患者の状態をモニタする機能が無いため、その状態に応じて運転条件を再調整する目的で負荷モニタ導入への要望もあった。

そこで、当所ではこれらの要望に応えるため、医療スタッフが行う上肢リハビリの複雑な動作と患者に作用する負荷をロボットに教示し、再現させるリハビリ支援ロボットを開発した。

筆者らはこれまでに、ロボットにリハビリ動作を教えるための光学式教示機構を開発してきた^{1) 2)}。この機構は医療スタッフが行うリハビリ動作を一台のカメラで撮影し、得られた動画からロボットの軌道情報を算出するとともに、6軸力覚センサを利用して患者に作用する力を計測するものである。本稿はこの光学式教示機構と、6自由度マニピュレータを利用したロボット本体をLANで接続し、リハビリ支援ロボットとして一連のシステムを構築した。さらに本機による専門家への聞き取り評価を行った。

2. リハビリ支援ロボットの開発

2.1 リハビリ支援ロボットの概要

本研究で開発したリハビリ支援ロボットの主要部を図1に示す。本ロボットでは患者が専用の装具を装着した上でロボット本体と向かい合って座り、腕をアームレスト上に固定して利用する。患者が装着する装具は、教示時には光学式教示機構により腕の動きを計測する為の目印であるマーカ（後述）を腕に固定する役割をし、リハビリ時にはロボットと腕を固定する役割を担う。

本ロボットを利用する手順は、次の3段階で行う。

- ① 教示作業（リハビリ動作をロボットに教示：図2）
理学療法士が患者の腕を動かし、この動きと負荷をカメラと力センサで取得し、光学式教示機構内でロボットの指令値に変換する。その結果をLAN経由でロボットに転送する。この作業中、ロボットはスタッフまたは患者の邪魔にならないように退避する。
- ② 接続作業
教示終了後、退避していたロボットをリハビリ開始位置まで移動させ、患者とロボットの接続を行う。接続は着脱のしやすさと異常時の安全対策の面から、電磁石を利用する。
- ③ リハビリ作業（図3）
ロボットによりリハビリ動作を再現する。リハビリ中も患者への負荷を力センサにより10msec周期で計測し、教示時の負荷情報と比較して一定以上に変動した場合に停止する。

このロボットの最大の特徴は、医療スタッフが患者の腕に実際触れてその症状や患者の反応など様々な情報を

^{*1} 基盤技術部（現工業技術部 機械電子室） ^{*2} 基盤技術部 ^{*3} 基盤技術部（現常滑窯業技術センター 応用技術室）

元にリハビリ動作を行うという作業を、そのままロボットに対する教示作業に利用したことである。これにより、ロボットの専門知識が無い医療スタッフでも任意の動きをロボットに行わせることを可能にした。



図1 リハビリ支援ロボット

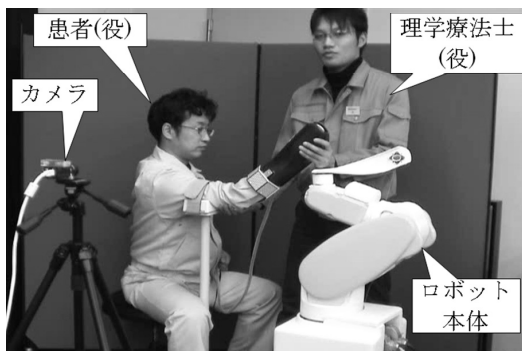


図2 リハビリロボットへの教示作業（イメージ）



図3 ロボットによるリハビリの再現（イメージ）

2.2 光学式教示機構

光学式教示機構による動作計測は、平面の認識マーカを1台のカメラで撮影し、この画像を元にカメラから見たマーカの位置と姿勢を計算する原理を利用する²⁾。リハビリ支援ロボットに利用するにあたり、図4のように3枚の認識マーカを60度ずつ傾けて立体的に配置した。

これを患者が腕に装着する装具（後述）に固定し、理学療法士は装具を動かすことでリハビリ動作を教示する。ここでは、1枚の認識マーカでは腕を動かすことによりマーカが患者の腕の影に隠れるなど測定を失敗する可能性があるため、方向の異なる3枚の認識マーカの中で最も利用しやすいものを随時切り替えて計算に利用するようにしている。

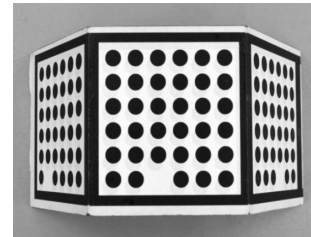


図4 位置検出用認識マーカ（3面）

2.3 装具

図5に患者が装着する装具を示す。本装具はアウターシェル（外側：黒色）を医療スタッフが把持して動かすことで教示に利用し、リハビリ作業時にはロボットとの接続に利用する。患者の腕はインナー（内側：白色）にマジックテープで固定し、更にインナーとアウターシェルの間を6軸力覚センサで接続することで、患者に加えられる負荷の計測に利用する。

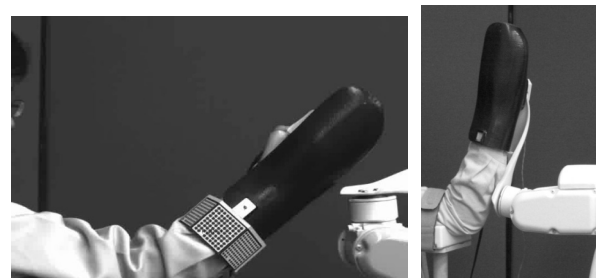
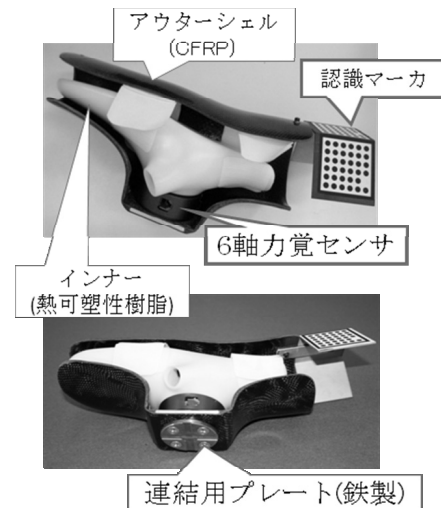


図5 装具

（上・中：全体、左下：教示時、右下：リハビリ時）

教示作業では、前述の画像認識マーカを直接人体に固定することはできないため、図5に示すようにアウターシェルに認識マーカを固定し、マーカの動きを装具の動きとして認識するようにした。そしてこの結果得られた軌道情報を腕の動きの情報としてロボットの教示に利用する。また装具は鉄製の連結用プレートを備えており(図5中段)、ロボット側の電磁石でこのプレートを吸着してロボットと装具の接続を行っている(図5右下)。

この装具はアウターシェル、インナーともに熱可塑性樹脂で作成した。これは加熱すると柔らかくなる熱可塑性樹脂の特性を利用し、患者にあわせて形状の変更・調整を可能にすることを目的としている。また、アウターシェルはカーボン繊維を利用して CFRP 化することで軽量化と剛性の確保を図った。

2.4 リハビリ支援ロボットシステムの構築

今回開発したロボットは、カメラ、装具、および計測用パソコンで構成する光学式教示機構と、リハビリロボット本体で構成され、その間を LAN で接続し、一つのシステムを構築している。

このような構成にした理由の一つは光学式教示機構単体で独立したシステムにすることで、リハビリの計測を何処でも可能にすること。もう一つはロボット本体の制御はリアルタイム制御(正確な一定周期での制御)が必要であり、コンピュータの負荷が大きくなるため緊急停止など優先度の高い割り込み処理以外の処理、特にユーザーインターフェース等の処理は、ロボットの制御部と切り離れた方が安全性の面で有利なためである。

本ロボットの内部処理を図6に示す。教示中は計測システム側で位置と姿勢、リハビリ負荷の計測を行う。この情報をリハビリロボット制御用のパソコンに送り、これをもとにリハビリ動作を行う。リハビリ動作中は患者に作用する負荷を光学式教示機構側でモニタし、

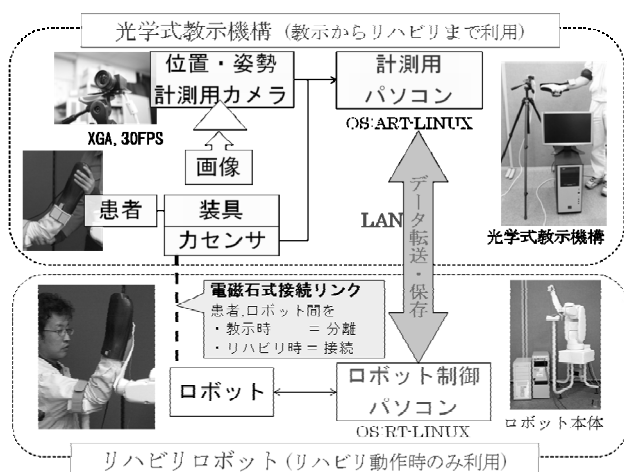


図6 リハビリロボットの内部処理

10msec 周期でロボット制御用パソコンに送信する。ロボット制御用パソコンは受け取った負荷情報と、教示時の負荷情報の比較を行い、一定以上の差を検知した場合、リハビリ効果の低下または異常発生と判定し、機体を停止する。

3. 評価

3.1 システム精度の検証

はじめにシステム全体での精度について検証する。まず本ロボットの光学式教示機構で取得したリハビリの動作と、これをロボットで再現した結果の誤差を示す。行った動作は基本的な肘の屈伸(曲げ伸ばし)運動である。教示情報、動作再現結果ともロボットの手先(エンドエフェクタ)の位置(X,Y,Z:単位mm)と姿勢(α 、 β 、 γ :単位deg,オイラー表記)で表現した結果を図7、図8に示す。この結果、 β 軸に顕著な遅れが発生している。これはロボットの安定性確保のために制御系ソフトウェア内の一時遅れ要素によるもので、全ての軸に同様の遅れが発生するが、傾斜が大きい、つまり速度の大きな動作ほど顕著に表れる。この値はソフトウェア上で設定する既知の値のため、この影響を考慮して算出した位置及び姿勢の誤差を図9、図10に示す。この結果から、数か所で大きな位置誤差が存在するが、ロボットはほぼ全軌道で追従し、その誤差は位置誤差が3mm、角度誤差が 2° 以内であった。

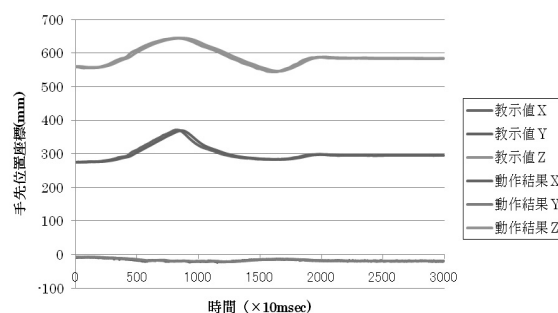


図7 ロボットの位置座標（教示及び動作時）

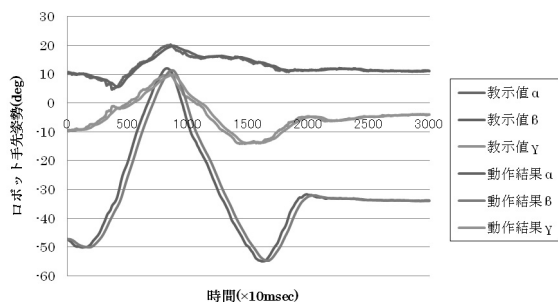


図8 ロボットの姿勢（教示及び動作時）

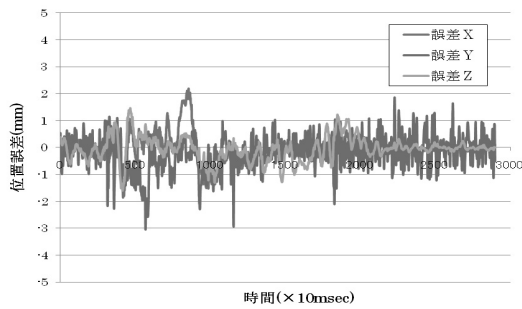


図 9 ロボットの位置誤差

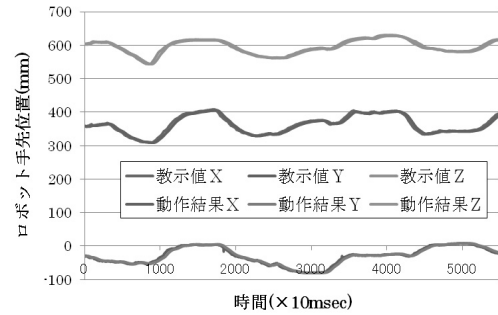


図 11 ロボットの位置座標（教示及び動作時）

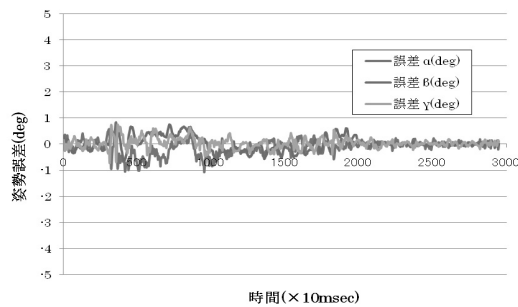


図 10 ロボットの姿勢誤差

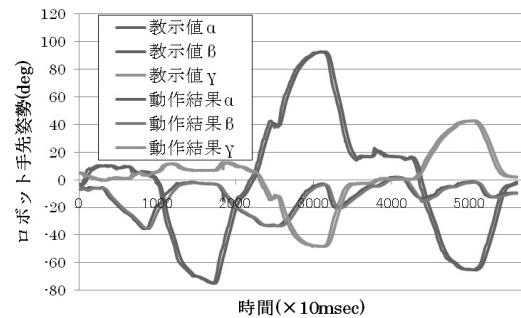


図 12 ロボットの姿勢（教示及び動作時）

誤差の主な要因は、光学式計測機構の発生する計測誤差に対し、ロボット側が追従できず動作を平滑化したため、その差が表れたものである。

すでに光学式教示機構単体ではリハビリの計測に必要なとした精度を達成²⁾しているが、今後もシステム全体での精度を改善する為に、光学式教示機構の精度改善、特にノイズ状の誤差を除去する手法の研究が必要である。

3.2 医療スタッフによる試運転

実際に医療スタッフによる教示とそのデータによる再現運転をした時の精度を検証した。この動作は肘の屈曲と旋回を同時に行い、加えて肘の曲げた角度にあわせて肘から手先方向に腕を伸展させるように患者の腕を動かす、複数の動作を合成した軌道である。その際の軌道計測及びロボットによる再現結果が次の図 11, 図 12 である。この結果から専門家が行う複雑な軌道であっても教示軌道を再現していることが確認できた。

4. 結び

ロボットの専門知識を持たない一般的な医療スタッフでも扱える簡単な教示手法等の要素技術の開発と、これを利用したリハビリロボットを開発し、その評価を行った。この結果は下記の通りである。

- (1) 光学式の教示機構とすることで通常のリハビリ動作を行うだけで、教示～軌道再現まで可能なロボットシステムを試作した。
- (2) リハビリ動作の精度向上には、教示の精度向上と、ロボットの応答性改善の余地がある。
- (3) リハビリの専門家による教示とリハビリ動作の再現を行い、専門家の行うリハビリ動作でも作動することを確認した。

今回得られた知見をもとに今後も本システムの改善とリハビリロボットとしての有効性の検討を行っていきたい。

文献

- 1) 酒井, 牧, 山本: 愛知県産業技術研究所研究報告, 7, 2 (2008)
- 2) 牧, 酒井, 山本: 愛知県産業技術研究所研究報告, 8, 2 (2009)