

研究論文

リハビリ支援ロボットの教示技術開発

牧 俊一^{*1}、酒井昌夫^{*1}、山本光男^{*1}

Development of Teaching Methods for the Rehabilitation Robot

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

理学療法士の動作を学び、個々の患者に応じたリハビリテーションを実施することが出来る、リハビリ支援ロボットの研究開発を行っている。このロボットに、簡易な手法でリハビリ作業を教示するために、画像計測を応用した光学式教示機構を開発した。リハビリ作業の教示装置としての妥当性を検討するために計測試験を行い、位置±3mm以内、姿勢±1.0°以内の精度で計測出来る事を確認した。

1. はじめに

少子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リハビリ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。そこで、当所ではリハビリの効率化と、非産業分野である福祉分野へのロボットの普及を目指して、リハビリの支援を行うロボットの開発に取り組んでいる¹⁾。

従来のリハビリ装置（CPM装置）では再現することの出来なかった、理学療法士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ことを研究開発の目標とした。

そこで、ロボットへリハビリ作業を教示するために、カメラを利用した画像計測による光学式教示機構の開発を行った。

本稿では、光学式教示機構の概要と、同機構のリハビリ計測装置としての妥当性を計測試験により検討した結果について示す。

2. 光学式教示機構の開発

2.1 光学式教示機構の構成

光学式教示機構（以下、教示機構という）によるリハビリ作業の教示とは、患者の上肢に計測用装具を装着し、理学療法士が装具を介して患者にリハビリを行った際の、装具の位置姿勢および患者に作用する負荷情報をデータ化するものとした。

教示機構との構成イメージを図1に示す。カメラ一台とパソコン、計測用装具からなるシンプルな構成で取り扱いを容易にした。

位置と姿勢の測定は、患者の上肢に装着した認識マーカをカメラで計測することによって行う。また、装具には6軸力覚センサを取り付け、患者に作用する負荷を位置姿勢と同時に計測した。負荷情報は、ロボットがリハビリを再現する際に、人に無理な負荷を加えていないか判断するために利用する。

教示機構を構成するカメラ、PC、力覚センサの仕様を表1に示す。カメラは解像度 XGA (1024x768) でリハビリ作業を滑らかに計測するためにフレームレート 30fps で撮影出来るものとした。カメラを制御する OS にはリアルタイム OS の ART-Linux を使用することで、位置姿勢計測用画像データの取得と力データの正確な周期での取得を実現した（画像データは 1/30s 毎、力データは 10ms ごとに取得する）。

取得した動作（位置姿勢）と力データは、リハビリ作業の教示データとしてロボットの指令値に変換し、それらのデータを基にロボットにリハビリ作業を再現させる。

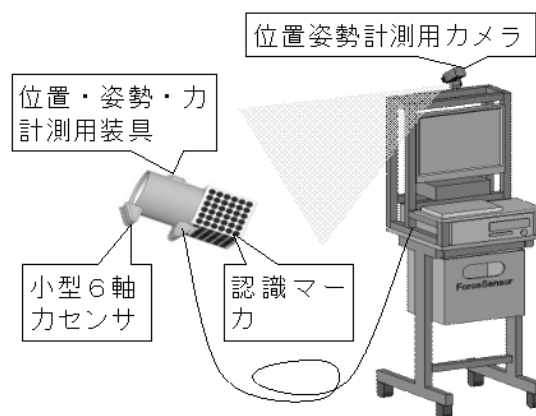


図1 光学式教示機構

*1 基盤技術部

カメラ	東芝テリー(株)製 CSFX36BC3
OS	ART-Linux
CPU	Core2Duo 2.66 GHz
メモリ	4GB
カセンサ	(株)ニッタ製 IFS-67M25A25-I40

表 1 光学式教示機構の主な仕様

2.2 作業範囲の設定とカメラの設置

教示機構を使ったリハビリ作業の教示の手順を図 2 に示す。はじめに、計測を行う作業範囲を決定した。本研究では、肘の曲げ伸ばしを中心とした上肢のリハビリ作業を計測の対象としており、装具を上腕に装着することを想定し、リハビリ作業によって上腕（正確には上腕に装着した装具の認識マーカ）が動く範囲を作業範囲とした。次に、作業範囲の全域が撮影出来る位置へのカメラの設置を検討した。カメラの撮影可能範囲は、カメラによって固有の撮像素子のサイズ、レンズの焦点距離、撮影対象までの距離などに依存する。実験では、焦点距離 8mm のレンズを使用し、撮影開始時の認識マーカまでの距離が 1000mm になるようにカメラを設置した。この撮影条件では、水平方向に約 600mm、垂直方向に約 450mm の範囲を撮影可能であり、解像度は約 0.589mm/pixel となった。また、レンズ絞りは F5.8、シャッタースピードは 1/60s で撮影を行った。

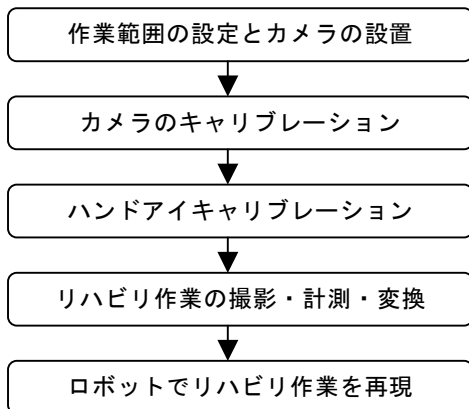


図 2 リハビリ作業の教示の手順

2.3 カメラのキャリブレーション

複数枚の撮影画像からカメラの位置姿勢や特性を推定する、カメラキャリブレーションを以下の手順で行った。

- i) 幾何特性が既知の物体を撮影する
- ii) 撮影画像から 3 次元座標と 2 次元座標の対応関係を複数点求める
- iii) 得られた対応関係から内部パラメータおよび外部

パラメータを推定する

式(1)に、カメラを数式で表現したピンホールカメラモデルを示す。 $[X Y Z 1]^t$ は計測対象となる 3 次元座標の同次座標表現であり、 $[u v 1]^t$ は撮像面の 2 次元座標の同次座標表現である (s は画像のスケール係数である)。 $r_1 \sim r_9$ と t_x, t_y, t_z からなる 3×4 行列は外部パラメータと呼ばれ、各々、カメラの姿勢 (回転行列) と位置を表している。 f は焦点距離、 $(s_u s_v)$ は u 軸および v 軸の撮像素子のサイズ、 $(u_0 v_0)$ は画像中心 (光軸と撮像平面との交点)、 k_s は u 軸と v 軸の傾きを示す係数であり、これらは 3 次元空間を 2 次元画像平面へ投影するためのパラメータである。これらのパラメータはレンズやカメラそのものの特性を表しており、内部パラメータと呼ばれる。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fs_u & fk_s & u_0 \\ 0 & fs_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

本研究では、画像計測プログラムの開発に画像処理ライブラリ OpenCV を用いており、カメラキャリブレーションについては OpenCV のピンホールカメラモデルに基づいたカメラキャリブレーション関数を利用した²⁾。このキャリブレーション関数は、幾何特性が既知の平面マーカを複数枚 (3 枚以上) 撮影することで、カメラパラメータを推定する Zhang のアルゴリズム³⁾ が実装されている。

カメラキャリブレーションの精度が後の計測精度に直接影響するので、キャリブレーションの精度を確保するため、実験では OpenCV のカメラキャリブレーション関数を利用したアプリケーションソフト (GML Camera Calibration Toolbox v0.4) を利用して、撮影範囲全域をカバーするように撮影した 34 枚のキャリブレーション用画像 (サイズが既知の格子パターン) からキャリブレーションを行った。

2.4 ハンドアイキャリブレーション

カメラとロボットの相互の位置姿勢の関係 (変換行列) を求めるハンドアイキャリブレーションを以下の手順で行った。

- i) ロボットマニピュレータのハンド上に取り付けたキャリブレーション用マーカを撮影する
- ii) マーカのカメラ座標系とロボット座標系における複数点の対応から両座標間の変換行列を求める

本研究ではカメラで撮影したりハビリ作業をロボットに再現させるために、カメラ座標系で得られるリハビリの動作 (位置姿勢) の値をこの変換行列を使ってロボット座標の指令値に変換する。

ハンドアイキャリブレーションの原理を以下に数式で示す⁴⁾ (各パラメータについては図3を参照)。マニピュレータのハンド上に取り付けたマーカのハンド座標系における位置を M_h 、ベース座標系におけるマニピュレータのマーカの位置を M_b とすると

$$M_b = C_h M_h + P_h \quad (2)$$

ここで、 C_h はハンド座標系からベース座標系への 3×3 の回転行列であり、 P_h はベース座標系から見たハンド座標系の原点の位置ベクトルである。

また、カメラ座標系におけるマーカの位置ベクトルを M_c とすると、

$$M_b = C_b M_c + P_b \quad (3)$$

ここで、 C_b はカメラ座標系からベース座標系への 3×3 の回転行列であり、 P_b はベース座標系から見たカメラ座標系の原点の位置ベクトルである。

式(2)と式(3)より

$$C_h M_h - P_b - C_b M_c = -P_h \quad (4)$$

ここで、未知のパラメータは M_h (M_{hx} M_{hy} M_{hz}) と P_b (P_{bx} P_{by} P_{bz}) および C_b (C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 C_7 C_8 C_9) であり、その他のパラメータはカメラによる計測およびロボットの軸構成と関節角度から導出出来る。

式(4)を線形の連立方程式とみなして、複数点の計測により未知パラメータを推定した。

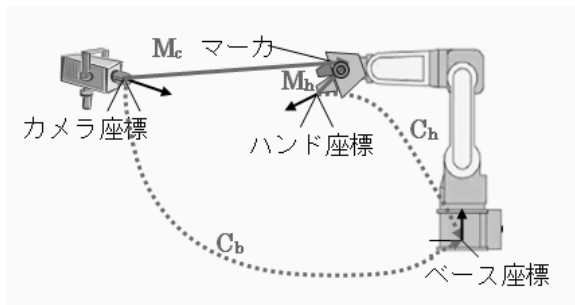


図3 カメラとロボットの座標相関

2.5 リハビリ作業の撮影・計測・変換

カメラキャリブレーションによって内部パラメータを決定した後は、内部パラメータを既知として外部パラメータを推定する。外部パラメータはカメラ位置を固定している場合には認識マーカの位置姿勢を表すので、認識マーカ付きの装具を腕に固定することで、腕の位置姿勢を計測することが出来る。そこで、カメラで連続的に撮影した画像から計測される位置姿勢のデータ群を、リハビリの動作の計測データとした。計測用装具を図4に示す。マーカは円パターンを平面上に配置したもので、マーカの欠けによって4枚のマーカを同時に識別出来る。このマーカを使うことで、リハビリ時の腕の捻りの動作など複雑な動作に対しても位置姿勢の計測を可能にした。

また、装具の内殻と外殻に挟み込んだ6軸力覚センサで患者にかかる負荷を10msごとに取得出来るようにした。リハビリ作業の計測データは最終的に10msごとのデータに補間整形し、ハンドアイキャリブレーションで得た変換行列を使ってロボット指令値に変換した。

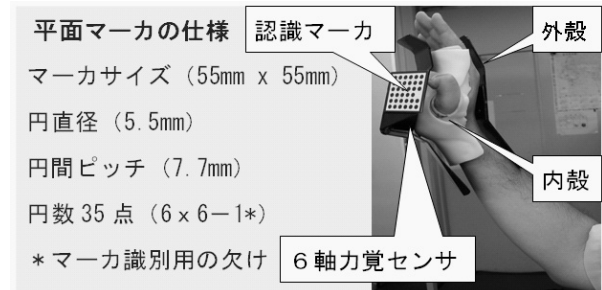


図4 計測用装具

3. 実験及び結果と考察

図5の装具のマーカ部をロータリーテーブル上に回転軸がマーカ原点を通るようにセット(図5)し、定速で回転($-70^\circ \sim 70^\circ : 0^\circ$ でマーカがほぼ正面)を与えた場合のマーカの位置姿勢の計測を行った。ここでマーカの位置および姿勢の変化量は一定であるが、計測データには、計測誤差の影響によりばらつきが生じる。そこで、計測データの差分値-差分値の平均値、を実験値としてそのばらつきから計測精度を推定した。実験値の平均と標準偏差を示したグラフを図6に示す。位置についての実験値の絶対値が最大となったのは深さ方向で2.525mmであった。姿勢については、グラフ中央付近でY軸回転成分に最大1.891°(絶対値)となった。中央付近は他にも大きな値が観測されているが、これはカメラ光軸に対してマーカ面が垂直近くなるために、撮影画像から深さの情報が失われることに一因があると考えられる。リハビリ作業の計測時は複数枚のマーカからこのような条件のマーカを選択的に排除することから、中央付近の値は特異な値として扱うものとし、特異な値を除けば、実験データは位置 $\pm 3\text{mm}$ 以内、姿勢 $\pm 1.0^\circ$ 以内となった。人体を計測するモーションキャプチャ装置でRMS誤差5mm程度のもので市販されていることや、ライティング等、計測環境の調整で精度の向上が見込まれることから、今回の教示機構の構成において、リハビリ作業の計測が可能であると考えられる。

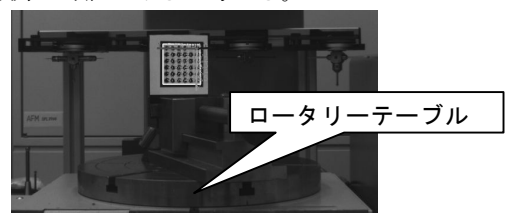


図5 計測試験

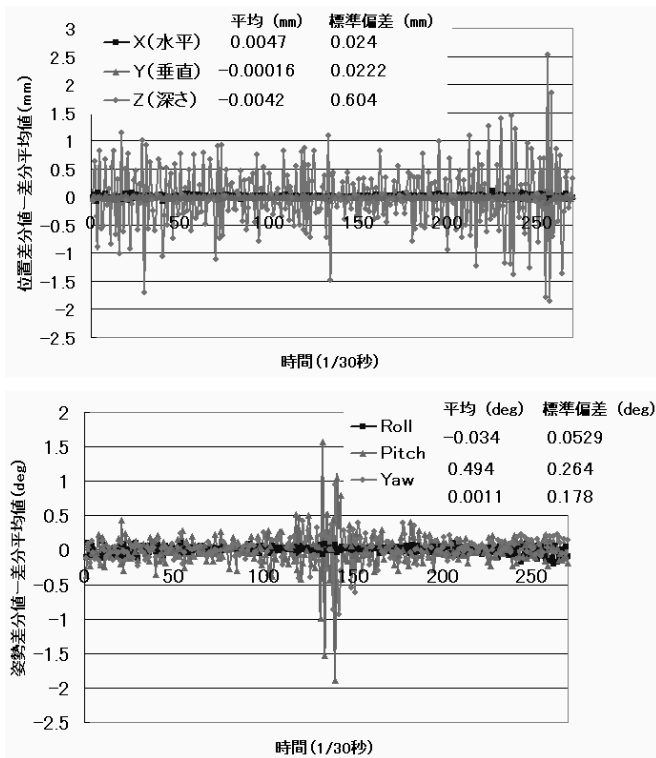


図6 実験値の推移 (位置 (上) と姿勢 (下))

4. 結び

画像計測を応用してリハビリ作業を計測しロボットへの教示を行う光学式教示機構を開発した。今後は、教示機構をソフト・ハードの両面から最適化し、ロボットシステムとの統合を進め、ロボットがリハビリ作業を安定して再現出来る条件探索などを実施して行く予定である。

文献

- 1) 酒井, 牧, 山本, 石川, 浅井, 山本: 愛知県産業技術研究所研究報告, **7**, 2 (2008)
- 2) 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム: OpenCV プログラミングブック, P272 (2007), 株式会社毎日コミュニケーションズ
- 3) Zhengyou Zhang: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **22**(11), 1330 (2002)
- 4) 中垣, 高橋, 末廣, 小笠原: 日本ロボット学会誌 **15**, 781 (1997)