

計算論的システムリハビリテーションのための上肢運動計測システム

Analysis of Arm Movements based on Computational System Rehabilitation

○大保武慶（首都大） 久保田直行（首都大）

Takenori OBO, Tokyo Metropolitan University
Noyuki KUBOTA, Tokyo Metropolitan University

Abstract: This paper presents a system for arm movement analysis base on computational system rehabilitation. In rehabilitation, arm motion analysis is crucial as a number of daily activities are directly related to arm movements. If the arm motion analysis is applied regularly to the rehabilitation and diagnosis, a set of desired functional tasks can be established. In this study, we have built a rehabilitation support system with 3D image sensor and kinematic model in a virtual space. The 3D image sensor can be applied to the postural measurement and joint angle estimation, and the kinematic model can provide a visualization of arm movement tracking. This paper shows an experimental example of the rehabilitation support system.

Key Words: Computational System Rehabilitation, Arm Movement Analysis, 3D Image Sensor

1. はじめに

リハビリテーションにおいて評価は、「評価に始まり評価に終わる」という言葉に代表されるように、きわめて重要な過程とされている。評価とは全ての処置に先行して実施されるもので、治療を始めるにあたっての必要不可欠な過程であり、様々な手段を用いて、情報を収集し、さらにそれを整理・分析・統合・解釈するという作業である[1]。しかしながら、リハビリテーションの評価は、療法士が個々の経験をもとに行うことが多く、病院や施設では、個別に扱ってきたそれぞれの症例の数が非常に限定的であるため、専門的な知識や経験を共有することが難しい。そのため、情報の大域的な構造化に関する研究が重要となる。リハビリテーションに関する様々な分野の知見を取り込みながら、情報技術、計測技術、通信技術、ロボット技術、システム化技術、知能化技術などを用いた枠組みを構築することが、一つの解決策となりうる。本研究ではこのような概念を「計算論的システムリハビリテーション」とよぶ。

本研究では、上肢運動の計測、分析、評価を目的としたシステムを構築する。リハビリテーションの現場では、上肢の関節可動域を計測するため、しばしばゴニオメーターが用いられる。しかしながら、ゴニオメーターは、静止姿勢を主な計測対象としており、運動中の解析に適用することは困難とされている。また、動作解析を行うためにモーションキャプチャーを適用する場合もあるが、モーションキャプチャーは、高精度な動作解析に応用できる一方で、表面マーカの設置が必要であることや、装置が大規模で高価なことから実臨床での実用事例が少ない。そのため、本研究では、安価でかつ容易にマーカーレスのモーションキャプチャーが可能な 3 次元距離画像センサを適用したシステムを構築する。具体的には、3 次元距離画像センサによって計測された被写体の各関節位置情報から、運動学モデルを用いて上肢の各関節角度を推定する。また、計測された関節角度情報から、運動中の関節可動域を解析するため、仮想空間内に運動学モデルを構築し、リアルタイムに動作軌跡の可視化が可能なシステムを構築する。仮想空間内では、運動の可視化だけではなく、物理演算を用いて、「ものを持つ」などのタスクを与えることもできる。本稿では、構築したシステムを用いた実験例を示す。

2. 上肢運動計測システム

2.1 3次元距離画像センサ

本研究では、Microsoft 社製の Kinect センサを適用する。Kinect センサは、カメラ画像だけでなく、対象物体に向けて赤外光を照射することで物体までの距離を計測できるアクティブセンサである。従来の距離情報を計測するレーザ式センサや CCD カメラを用いたステレオ視とは異なり、広範囲の距離情報を一度に取得できることや、暗所などでも計測が可能であるなど多くの利点がある。また、Kinect センサは、従来のモーションキャプチャー技術のように、身体に多数のマーカを付ける必要がなく人間の骨格モデルを容易に取得できるセンサでもあり、様々な研究事例に適用されている。Kinect センサによって計測される骨格モデルは、内蔵されているプロセッサによって演算され、リアルタイムに各関節位置を追従することができる。

2.2 上肢関節角度推定と可動域の可視化

Kinect は、20 カ所の関節位置の座標情報を計測することが可能であるが、各関節角度を直接取得することはできない。そこで、本システムでは、あらかじめリンク長を定義した運動学モデルを用いて、取得された各関節位置に運動学モデルの関節座標を近似させることで、間接的に、被写体の姿勢を推定する方法を用いる。具体的には、日下、大保らが提案している進化型多目的最適化に基づく関節角度推定手法を適用する[2]。

図 1 に本システムで用いる運動学モデルを示す。各関節角度は、解候補が生成され、計測される被写体の姿勢に合わせて解の探索が行われる。 i 番目に生成した解候補は以下のように表現される。

$$\mathbf{g}_i = (\theta_{i,1}, \theta_{i,2}, \theta_{i,3}, \theta_{i,4}, \theta_{i,5}, \theta_{i,6}) \quad (1)$$

運動学モデルの各関節位置は、順運動学を解くことによって求められる。時刻 t における運動学モデルの肘、手首、手先の関節位置を $\mathbf{p}_{i,j,t}^*$ 、Kinect センサによって計測された関節位置を $\mathbf{p}_{i,j,t}$ とする。ここで、 j は肘、手首、手先の関節番号である ($j=1, 2, 3$)。運動学モデルの関節位置と計測された関節位置の近似の度合いを目的関数とし、ユークリッド距離に基づき表現すると以下ようになる。

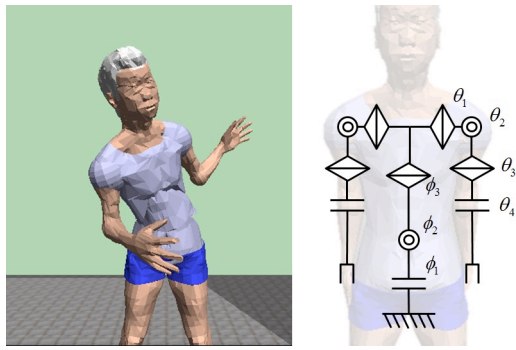


Fig. 1 Kinematic model.

$$f_{i,j} = \sum_{j=1}^S \| \mathbf{p}_{i,j}^* - \mathbf{p}_{i,j} \| \quad (2)$$

S は各腕の関節数を示す($S=3$)。被験者の姿勢に対して、人間モデルの姿勢を近似させることを目的とするため、最小化問題として扱うことができる。

さらに、本システムでは、運動学モデルを仮想空間内に構築することで、リアルタイムに被写体の姿勢を追従し、各関節の運動軌跡を可視化するシステムを構築する。仮想空間の構築には、Open Dynamic Engine を適用しており、物演算を用いて、物体把持などのタスクも与えることができる。関節の運動軌跡の可視化には、5 フレーム毎に球体のマーカを出現させて、運動軌跡を表現している。運動中における、マーカ間の距離の変化や粗密さによって、運動を評価できることが考えられる。

3. 実験事例

本システムを用いた実験例を紹介する。ここでは、Kinect センサを被験者の正面から約 1.8m 離れた位置に設置する。被験者は、椅子に座った状態で、肩及び肘の基本動作を行う。なお、本実験における被験者は健康者である。

まず、本システムで適用する関節角度推定手法の精度に関する実験結果を示す。ここでは、10名の各被験者に、肩の外転、伸展・屈曲、内旋・外旋、肘の屈曲を行ってもらった。表1は、ゴニオメーターと3次元距離画像センサを用いて推定された関節角度の比較結果であり、推定結果は各被験者の平均値を示している。実験結果より、ほとんどの基本姿勢において、ゴニオメーターと比べ、 ± 5 度以内での計測ができていることが確認できる。ゴニオメーターを用いた計測では、計測者によって主観的に測られることが多いため、 ± 5 度程度は、許容誤差の範囲であるとされている。一方、肘の屈曲運動での計測では、本システムの推定手法で精度が良く出ていないことがわかる。これは、肘の屈曲運動時に、手先がセンサに対して肘を隠蔽することで、推定精度が低下したことが考えられる。

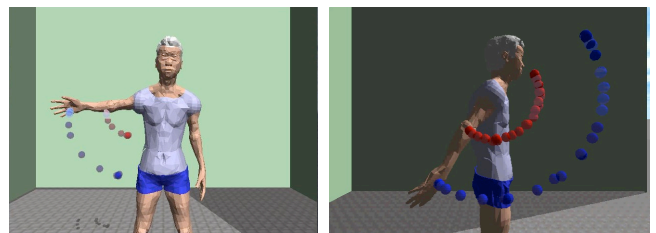
次に、関節可動域の可視化結果の一例を図3に示す。図中では、(a)肩の外転、(b)肩の伸展・屈曲における結果を示している。(a)では、右腕の運動に対して、肘と手先の軌跡を正面から可視化しており、(b)では、側面から可視化している。マーカである球体は半透明であるため、マーカが密になっている領域では色が濃く、粗になっている領域では薄く表現される。また、被験者にとって阻害なく運動可能な動作軌跡に関しては、マーカ間の間隔が比較的均等に現れるが、阻害要因がある運動に関しては、マーカの間隔にばらつきが生じることが確認できた。



Fig. 2 Positers in the experiment

Table 1 Angle Estimation Results [deg]

Posture	Goniometer	Proposed System
Shoulder Abduction	60	57
	90	82
Shoulder Extension	30	25
	60	60
Shoulder Flexion	90	89
	120	122
	60	56
Shoulder External Rotation	60	55
Shoulder Internal Rotation	60	48
Elbow Flexion	60	74
	90	116
	120	



(a) Shoulder abduction (b) Shoulder extension/extension

Fig. 3 Visualization of arm motion trajectory

4. おわりに

本稿では、上肢運動の計測、分析、評価を目的とし、3次元距離画像センサを用いた上肢運動計測システムを構築した。具体的には、3次元距離画像センサによって計測された被写体の各関節位置情報から、運動学モデルを用いた関節角度推定手法を適用し、被写体の運動を仮想空間内に表現可能な可視化システムを構築した。実験事例では、角度推定手法の精度を示すと同時に、一例として、肩の外転、肩の伸展・屈曲における運動の可視化結果を示した。今後の課題として、リハビリ現場において、本システムを導入した実証実験を実施し、患者の動作を解析するために必要な方法論に関して議論することが挙げられる。

参考文献

- (1) 木下撰, 評価とは, 日本作業療法士協会作業療法学全書改訂第2版第3巻, 協同医書出版社, 2000
- (2) 大保武慶, 日下純也, 久保田直行, 計算論的システムリハビリテーションのための距離画像センサを用いた関節角度推定, システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 5, pp. 114-121, 2016.