

無線式身体動作計測評価システムに関する研究

Research on wireless measurement and evaluation system for body motion

本田雄一郎 赤澤康史 根本和彦 中村 豪 李 虎奎

HONDA Yuichiro, AKAZAWA Yasushi, NEMOTO Kazuhiko, NAKAMURA Go, LEE Hokyoo

陳 隆明 岡野生也 柴田八衣子 溝部二十四 服部芽久美

(兵庫県立総合リハビリセンター中央病院)

CHIN Takaaki, OKANO Ikuya, SHIBATA Yaeko, MIZOBE Futoshi, HATTORI Megumi

(Hyogo Rehabilitation Center)

キーワード：

身体動作、ワイヤレス、計測、評価

Keywords:

Body motion, capture, measurement, evaluation, wireless

Abstract:

Various motion capture techniques are developed in recent years. Each system has proper and improper application according to its measurement principle. In the case of clinical use of the systems, typical users, occupational therapists and physiotherapists, want to apply a measurement system without time-consuming preparation. Otherwise use of the system can hinder their daily work.

The purpose of this research tends to develop a wireless measurement system for body motion and evaluate/visualize the motion in order to find physical improvements for further training.

1 はじめに

本報告では、リハビリテーション訓練において患者や療法士の身体動作を測定し、訓練による身体動作の変化などを評価できるシステムの開発を目標として、簡便に身体動作計測が行える装置を目指して開発を行った成果のまとめを報告する。

身体動作計測はモーションキャプチャとも言われ、様々な原理により計測を行える装置が開発され販売されている（図1）。しかしながら、その価格や使い勝手からリハビリテーションの訓練現場で手

軽に利用出来るものにはなっていない。本稿では、まずそれらの身体動作計測における現状の技術を紹介したのち、リハビリテーション訓練の現場で利用する際の不具合を明らかにし、本開発にて解決すべき課題を明確にする。次にこの課題に対しての解決案を紹介し、実装した結果を示す。開発にあたり注意した点は、現場の日常的な訓練の流れを可能な限り変えることなく手軽に利用できるシステムを実現することを念頭に、業務から蓄積された経験や智慧を持つ療法士に意見を聴取しながら開発を進めたことである。

本研究成果を利用することで得られる定量的な動作計測データの利用用途として、リハビリテーション訓練後に「上手く」身体を動かせるようになるケースと「ぎこちなさ」が残るケースの訓練期間中の動作分析を行うことや、身体動作の流れの中に含まれる「上手さ」の定量評価がある。また、リハビリテーション訓練において、動作の「上手い」人の各部位の動きと自らの動きをリアルタイムに比較しながら、「上手い」身体の動きを模倣できる訓練方法のあり方についての検討や、必要に応じて訓練用補助具の提案を行うことにつなげていくことを考えている。

2 現状の技術

身体動作計測技術は、スポーツにおける運動力学の解析のほか自然な人の動きを映画の中のキャラクターの動作に反映させることに利用されている。その他、新たなセンシングデバイスの出現と共に、利用時の容易さを求めてさまざまな計測システムが開発されている。

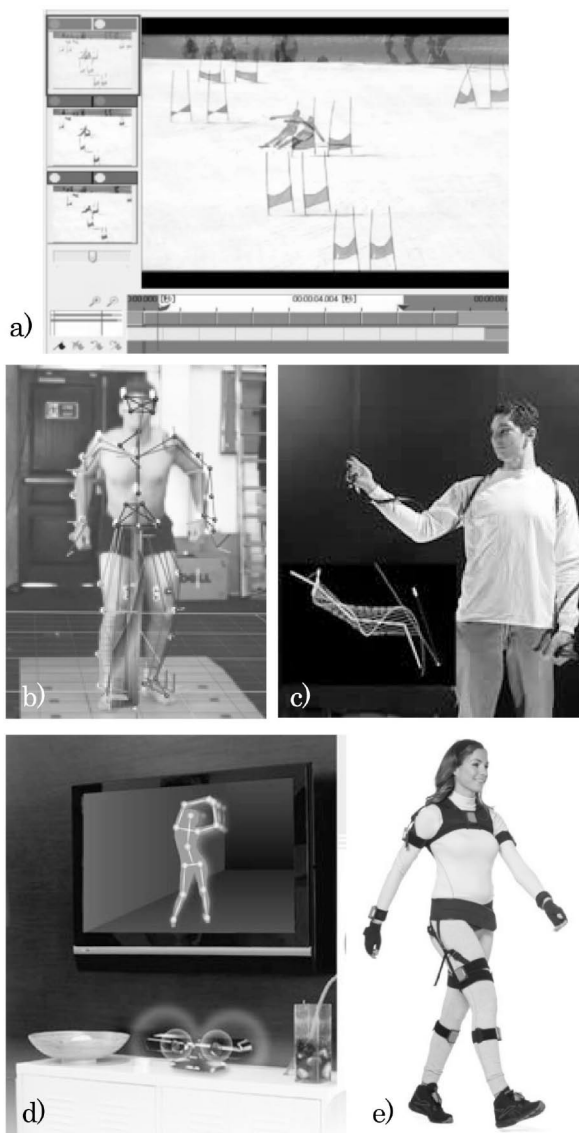


図1 動作計測装置の例：a)ビデオ映像比較，b)光学反射式測定装置³⁾，c)シェイプテープ⁵⁾，d)パターン照射方式測定装置⁴⁾，e)加速度・ジャイロセンサ複合型計測装置⁵⁾

Fig.1 Example of measurement instruments: a) comparison of video image, b) optical reflection type, c) Shape Tape, d) optical pattern projection type, e) Accelerometer & Gyroscope fusion type

とりわけスポーツ分野におけるモーションキャプチャでは高速撮影が可能である利点を生かし、光学マーカを伴った光学式計測装置が主に利用されている。その場合、被験者の身体あるいは測定用スーツに光学マーカが取り付けられる。また、時々刻々と変化する姿勢に対して光学マーカが複数台のカメラのうち、少なくとも1台から捉えられるよう、被験者を取り囲むようにカメラを配置することで光学マーカの追従ができるよう工夫がなされる。

加速度センサやジャイロセンサを用いた製品群では、おなじ製品であっても、個々のセンサの出力値

は必ずしも校正されておらず、利用時に研究者側で各センサに対して校正を行うことを前提に販売されているものがあるため、取り扱いに十分注意する必要がある。

市販されている身体動作測定に利用されている測定機器の代表例を下記に示す。近年の動作解析においては、光学反射式モーションキャプチャシステムが主流となっているが、設置環境や費用、利用の手軽さなどの点から、ビデオカメラによる平面映像のデータ分析ソフトを利用した動作分析も行われている。ゲーム用入力装置として利用されているKinectなどは、モーションキャプチャの新技術を安価に利用できるため、その応用研究も進んでいる。

表1 各機器の利点と欠点

Table 1 Advantage and disadvantage of Measurement

計測デバイス	利点	欠点
ビデオカメラ (平面投影像)	身体動作が時系列で観察可能 比較的安価 (数十万円)	関節の角度変化の情報を測定不能。 手作業で評価すると時間がかかる
光学反射式測定装置 (立体的なマーカ位置)	光学マーカを取り付けた部位の動きを立体的に計測可能	光学マーカ取り付けにより誤差の発生 計測可能な空間の限定 高価 (1000 万円以上)
パターン照射方式測定装置 (表面までの距離)	光学マーカ無しで直接撮影可能	多方向からの撮影時に複数の装置を同時に使うことは原理的に難しい
シェイプテープ (テープ形状)	テープ状センサを身体に固定し容易に利用可能 (取り付け方により関節角度の算出は困難となる。例上図で肘が曲がっているかテープのたるみか判別困難。)	測定部位が増えると高価格 (全身動作測定：measurand 社 Shape WrapIII, 6,667,500 円)
加速度センサ (加速度)	身体に取り付けて計測可能 見えない部分でも測定可能	速い身体動作において、重力成分の加速度と動作による加速度の分離が困難
ジャイロセンサ (角速度)	身体に取り付けて計測可能 見えない部分でも測定可能	平行移動に関して測定できない。

表1に、各機器の利点と欠点を主観的に、また計測情報について計測デバイス欄に丸カッコで示す。これらの異なる物理量による計測情報を複合することでより冗長性のある計測が可能となる。それぞれの装置には利用用途、設置環境など、多岐にわたる条件にて利点や欠点が存在し、様々な利用分野において活用されているが、現状ではリハビリテーション訓練の現場での導入は盛んではない。

3 問題点

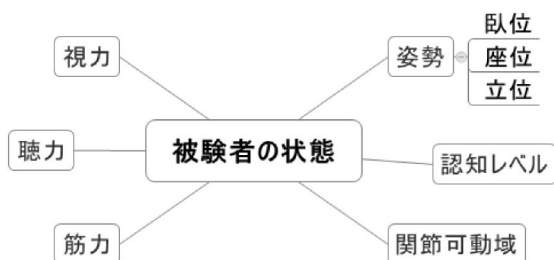
臨床訓練現場にて、身体動作の計測を行えば、同一の患者に対して、訓練により自らの身体動作がどのように変化してきているかを定量的に知ることができる。このことは患者にとっては訓練による自らの身体動作を客観的にフィードバックされ、訓練を行うモチベーションを持ち続けることが期待できる。訓練者側にとっては、行った訓練がどの程度、患者さんの動作に影響を与えることができたかを定量的に知ることができる。これらのデータの蓄積より、効果的な訓練課程が明確になると、効果に裏打ちされたリハビリテーション訓練（EBM）に通じていく。

しかし、身体動作計測には、様々なトレードオフが生じる。これらは被験者の状態、測定場所、計測技術による制約など、多岐に渡る。それ故、測定に当たり、どのような動作を、どこで、どのような制約下で測り、計測データをどのように利用したいかを明らかにしておく必要がある。これらを整理するために以下に示す五項目について整理する。

- ・ 被験者の状態
- ・ 測定場所
- ・ 計測技術
- ・ 計測動作
- ・ 計測後のデータの表現

被験者の状態

被験者の状態は、装置を校正する際に必要なポーズや動きと密に関連する。特定のポーズや動作ができない場合、校正が出来なくなる。



そのため、自然な姿勢や動きの中で校正を行えるのが望ましい。

測定場所

測定場所に関しては、屋内と屋外に大別できる。屋内に関しては、その場の広さ、高さ、明るさなどが、カメラを用いる測定では、カメラの固定の仕方や場所の確保、カメラの向きや絞りなどに影響が出てくる。屋外では電源供給について考慮しておく必要がある。またカメラを用いた撮影では、周囲で訓練されている方々のプライバシーが問題となる環境もある。これらのように、測定場所は、計測装置の持つ性能を十分に活用できるか否かに影響を及ぼす。



計測技術

計測技術については、表1を参照。

計測動作

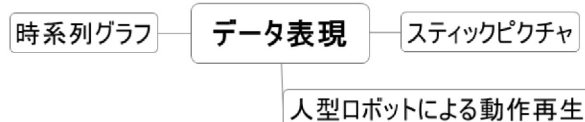
当初は上肢動作の計測を主眼としてしていた。光学式モーションキャプチャを利用して計測しづらい動作として、義手を用いた作業動作や服の着替えがある。これらは動作途中で腕のねじりや身体の前屈などでカメラが光学マーカーを捉えられなくなる。

歩行動作は光学式モーションキャプチャ装置でも計測できるが、計測可能範囲が限定されている。自然に歩いているときの動作を計測するには、範囲を限定せず通常の練習コース上での計測ができるようにしておきたい。



計測後のデータの表現

計測したデータ表現で希望されたものは、各関節角を時系列に表現したグラフとスティックピクチャの2形式である。



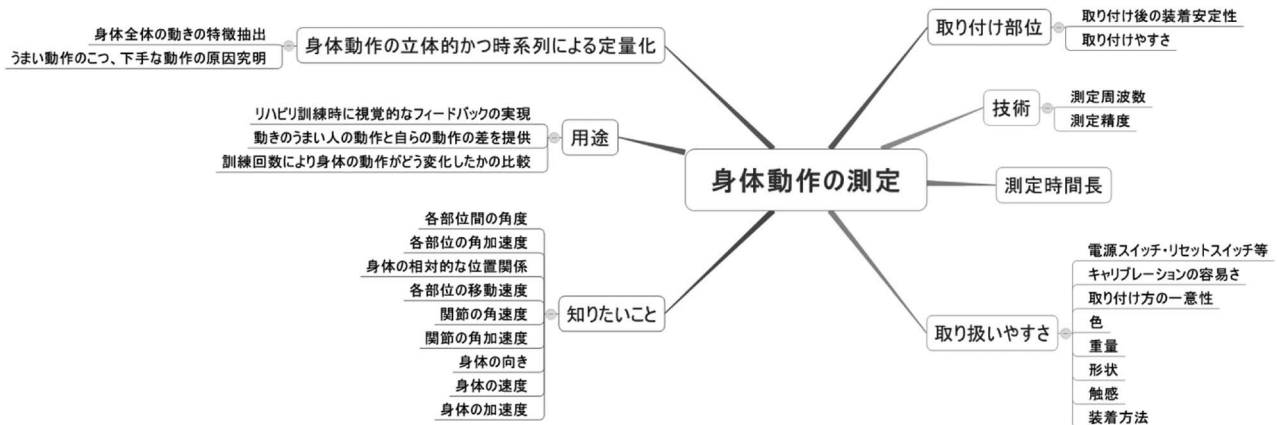


図2 身体動作測定に関する考慮項目
Fig.2 Considering terms of body motion capture

しかし、コンピュータのモニタに表示されるスティックピクチャでは立体的な身体の位置関係を把握しづらい人もいるため、データ表現のひとつとして小型人型ロボットによる動作再生も将来的に対応できるよう考慮している。

上記の考慮点は工学的発想によるものである。前年度の研究で工学系研究者と療法士の視点が異なることが判明しており、現場で利活用される機器の開発を進めるうえでは両者の視点を合わせることが重要である。そのため、身体動作の測定に関して考えられる項目を活字化し（図2）、この図を元に、どのような項目が療法士の視点では重要となるかを聞き取った。

本装置の開発を進めるに当たって療法士から得られた重要な項目を順に列挙する：

- 形状：身体の形状に沿って薄く
- 取り扱いやすさ：できるだけ簡単に
- 30分間連続測定可能（バッテリー使用時）

市販されている機能的に似たセンサの形状は、角張っており、訓練動作中に引っかかりそうであることが最も気にかかることを教えられた。

機能モデル開発

療法士の意見を聞くために具体的なデモンストレーション用に使える機能モデルを準備し⁶⁾（図3）、測定協力者に食事動作の計測をさせていただいた⁷⁾（図4、5）。この機能モデルは、3軸加速度センサと無線送信機の入った無線センサモジュール8台から構成されている。それぞれの加速度センサ

の重力に対する傾き情報を隣り合うセンサ同士で比較することで2つのセンサがなす角度の測定ができる。

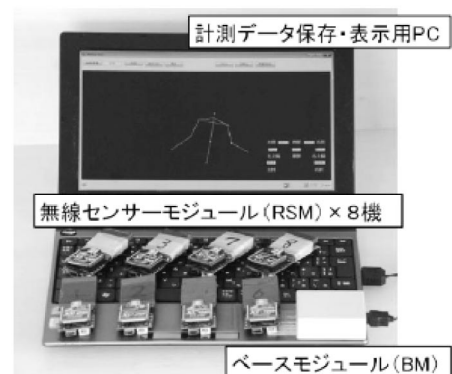


図3 加速度センサを利用した身体動作計測装置⁶⁾
Fig.3 Measurement system with acceleration sensors

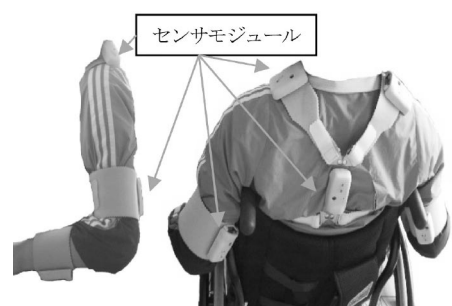


図4 ネオプレンベルトによるセンサの固定
Fig.4 Attachment of sensors with neoprene belt

当初は加速度センサをテープで身体に固定していたが、位置調整の際にテープの貼り直しが必要となり煩雑であった。また、発汗に対する問題もあった。加速度センサの脱着時のテープの貼り直しの手間の軽減というニーズに対応するため、装具材料であるネオプレンを材料にした装着用ベルトを作成した。このベルトを用いることで、センサケース背面

に貼り付けた面ファスナーで容易にセンサの脱着が行える（図4）。また、以前は体幹部のセンサの取り付け位置を腹部側としていたが、背部側へ取り付けよう療法士の方にアドバイスを受けた。

市販されている機能的に似たセンサの形状では、訓練動作において、身体装着時のセンサの張り出しが最も気にかかることを教えられた。

機能モデルによる計測

カメラを使わず、厚みを薄く無線化した、試作1号機（機能モデル）を開発した。1号機のセンサ回路部分は、市販品より薄くできたが、回路を保護するカバーを付けると全体的にひとまわり大きくなった。サイズダウンは次のステップへの課題とし、実際に測定を行うことで明らかになってくる問題を探ることとした。上肢の動作を測れるよう、センサを左右の腕に2個、肩に2個、体幹に2個、（この写真では車椅子のシートの後ろに1個隠れている。）準備し装着した（図4）。また、センサを身体に装着しやすいよう装着用ベルトの作成を行った。これらを用いて計測を行い、重力方向を基準として、そこから各センサ間の相対的な角度が計測できること、例えば、食事中に肘の関節の変化角が計測できることが判明した⁷⁾。図5に各関節部の相対角度に換算した計測結果を示す。右肘の動作を見ると、当初軽く伸びていた状態から、一気に曲がり、60度程度の曲がり具合を中心として小刻みな曲げ伸ばしが起こっていることがわかる。

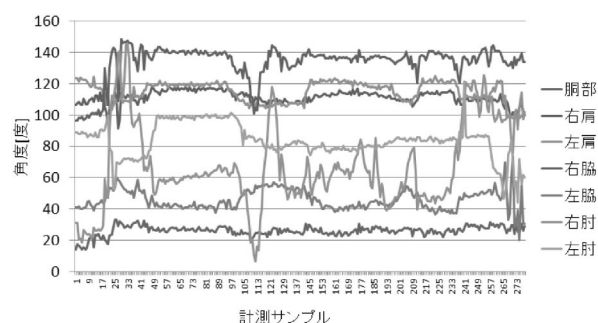


図5 各関節部の相対角度
Fig.5 Relative Angle between joints

しかし、この初期状態の軽く肘が伸びている状態がわかるのは、センサを取り付ける際に微調整を繰り返して、センサの計測軸を腕の軸方向に合わせたからであって、この調整がなければ、腕が伸びている状態でもセンサが傾いたまま取り付けられていれば異なる解釈が起こる。それゆえ、変化角ではなくて、どういう姿勢で今あるがわかる状態がわかるように測りたいという改善点が明らかになった。また、セ

ンサを身体に取り付けるケースの小型化の要望もでた。

4 課題

前節にて、考慮した問題点と療法士の利用ニーズから、日々のリハビリ訓練時に利用しやすくなる計測器は以下のような特徴を有するものと考えられる。

- 動作時に支障がでないようケーブルを無くし薄くコンパクト化
- 身体に取り付ける計測部は無線式とし、動作の範囲の拡大
- 絶対的な角度で身体の動きがわかる測定
- 簡単な計測準備で利用開始
- 30分の計測可能時間の確保



図6 改良版計測評価システムのコンセプトイメージ
Fig.6 Concept of improved measurement system

この身体に装着し簡便に身体動作の特徴を測定可能とする動作計測システムのコンセプトを提示する（図6）。

5 解決手法

本装置を利用するにあたり最も重要となる簡易に取り扱うための問題点は、加速度センサを身体各部に装着する際、加速度センサの計測軸と身体各部の軸方向を常に物理的に一致させるところの自動化である。物理的に例えば、下腕の長さ方向の軸と加速度センサのX軸の向きを常に容易に一致させられる装着方法があればよいが、現状では存在しておらず、装着するたびにずれてしまう。そのため、絶対的な各部位の角度が計測できない。そこで、基準となる座標系を用意し、そのなかでの身体動作と現実の計測系での測定結果を一致させる座標変換を行うことで、センサ装着時の取り付け方向のずれを補正する

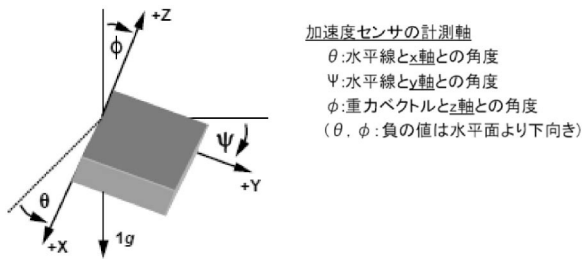


図7 3軸加速度センサの計測軸の傾き
Fig.7 Inclination of measurement axis of 3D Accelerometer

手法を考えた。

目指していたカメラを排除した計測システムを変更し、身体各部の位置を計測可能な深度センサを校正用カメラとして利用する。加速度センサを身体に装着後、深度センサによる計測結果と加速度センサによる計測値を用いて両者の向きが同じになるよう補正用回転ベクトルを算出し、深度センサなしでもこの回転ベクトルを用いて加速度センサからの計測値だけで身体動作を計測できるようにする。

加速度センサから得られる加速度情報をセンサの傾きに換算する計算式はアプリケーションノート⁸⁾より、x, y, z軸に対する加速度をそれぞれ A_x , A_y , A_z とすると、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \quad (1)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \quad (2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \right) \quad (3)$$

となる。

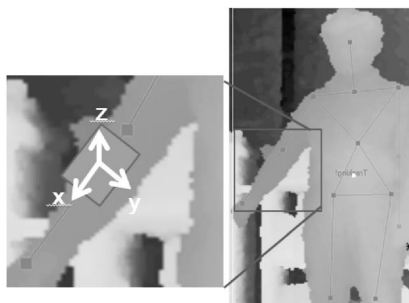


図8 深度センサによる骨格構造の認識結果。左：加速度センサと骨格の軸を合わせたイメージ、右：深度センサが捉えた身体と推定骨格情報

Fig.8 Recognition of skeletal structure with a depth sensor. Left) Overlapped image of the x-axis of the accelerometer and skeletal information, Right) suggested skeletal information scanned by a depth camera.

深度センサを用いた計測では(図8)、各関節部の自動認識機能により、手首、肘、肩の位置が立体的に検出されるため、それらを結ぶ線分ベクトルを容易に求められる。

6 実装

機能モデルから得られた改良点を取り入れ、測定システムの再構成を考えた。既に開発したプログラムを大きく変更することなく再利用していきたい。

新たに加わった深度センサを適切な高さと向きに調整するため、点滴スタンドを利用する。点滴スタンド上部に深度センサを固定し、全体の高さ調整も可能とした。

計測用加速度センサ

計測センサは、3軸加速度センサ(ADXL335, Analog Devices社)、マイコン(Arduino Pro Mini328, Sparkfun)、リチウムポリマーバッテリー(3.7V, 400mAh, Sparkfun)、無線モジュール(Xbee, デジインターナショナル)により構成した。マイコンは加速度センサのアナログ出力をデジタル化するだけでなく、無線モジュールからの信号の種類に合わせて、他の計測センサとタイミングを合わせて加速度情報をサンプリングする機能を持たせている。計測センサの回路全体を保護するカバーは、バンドなどを通して身体に装着しやすくするため、VME-A03シリーズ(摂津金属工業)を用いた。

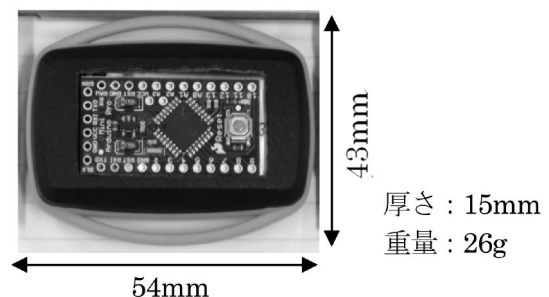


図9 無線式身体動作計測装置の計測センサ部
Fig.9 Sensor module of wireless body motion measurement

深度センサ

計測センサを身体に装着してから、容易に校正できるように深度カメラとしてKinect(マイクロソフト社)を利用する。開発途中ではXtion Pro Live(Asus社)を利用していたが、製造中止となる情報を得たため、機種変更を行った。深度センサは身体がどのような姿勢にあるかを立体的に計測できるセンサである。近年、このセンサの利用が学会などでも頻繁

に発表されてきている。

点滴スタンドを改造し、深度センサの高さ調整が柔軟に行えるようにした。また、同時にタブレットPCを固定できるようにした（図10）。

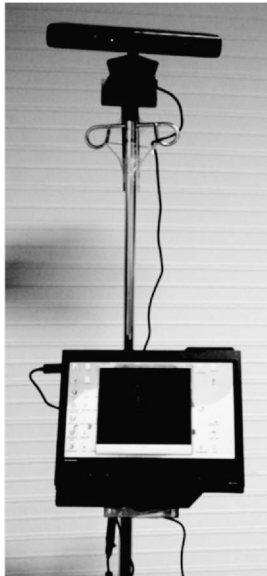


図10 深度センサ固定用およびモニタスタンド
Fig.10 Stand of depth sensor and a monitor.

ロボット技術ミドルウェア

上記の新型の身体動作計測装置を開発するに当たり開発を加速化するための手段として、ロボット技術ミドルウェアを利用する。産業総合研究所が開発したOpenRTMは、様々な入力モジュール、信号処理モジュール、出力モジュールを組み合わせ、目的とする機能を持つソフトウェアを構築できる。必要とされる機能を実現するモジュールを一度準備すれば、それらはミドルウェア上で独立して利用可能なため、他の研究開発へも使い回しが可能となり、開発効率が上がっていく。

図11に加速度センサのデータを無線で受け取り、PCに表示するアプリケーション例を示す。

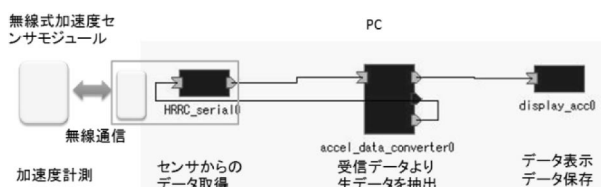


図11 加速度センサからのデータをPCで受け取り表示するアプリケーション例。薄色の四角:物理的なモジュール、濃色の四角:実際のOpenRTMモジュールとその信号接続
Fig.11 Sample Application for Acceleration measurement. light color Box: physical module, dark color Box: Real OpenRTM Module and signal connection.

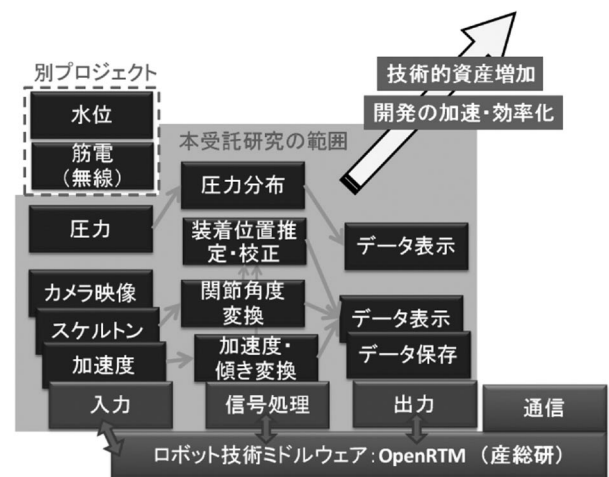


図12 OpenRTMの導入と取り扱うモジュール
Fig.12 Using OpenRTM and modules.

例えば、今回の研究開発、身体の動作情報に加えて、その時の筋電信号も同時に計測したいとなれば、筋電信号を測るセンサを身体に装着し、そこから得られる信号をOpenRTMに取り込むモジュールを追加することで機能拡張が可能となる。

加速度情報と骨格情報の統合モジュール

加速度センサの装着時の軸のずれを補正するためのモジュールについて、計測用加速度センサひとつを例に説明する。本来、センサの測定軸を図3の $\vec{R}' = (X', Y', Z')$ に合わせて身体に装着したい。しかし、実際には装着時に測定軸がずれてしまい、測定軸が $\vec{R} = (X, Y, Z)$ を向いてしまうと仮定する。

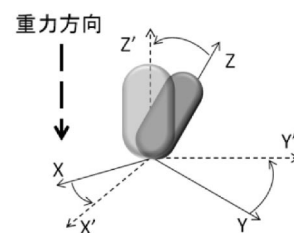


図13 加速度センサの計測軸の装着時のずれ補正
Fig.13 Compensation of gap of a measurement axis of the acceleration sensor during attaching on a body.

ここで、座標系の基準として深度センサの測定結果を利用し、加速度センサの校正を行うため、まず深度センサの測定範囲にて、加速度センサを装着した測定対象者の動きのなかから数パターンの両センサからのデータを取得する。その際の測定情報 $\vec{r}$ を加速度センサにて、加速度センサをとりつけた部位の位置情報 $\vec{o}$ を深度センサにて計測する。次に $\vec{r}$ を $\vec{o}$ に変換する補正用回転行列 $\vec{A}$ を算出する。この $\vec{A}$ による行列演算により、加速度センサの測定軸の補正が行われ、加速度センサが理想的な装着位置にある

ものとして、以降の計測が可能となる。(式4)

$$\vec{O} = \vec{A}\vec{R} \quad (4)$$

部分的な実装だけを終えられたため、身体動作の一連の計測が行えないが、加速度センサの実装数を増やしていくことで、可能となる。

この開発成果は、次年度の研究開発テーマで応用していく予定があるため、身体動作計測に加え、筋電信号や筋疲労度などを計測するセンサと組み合わせ利用することとなる。

8 おわりに

リハビリテーション訓練の現場で利用されうることを目指して身体動作計測器の開発を行った。初年度は訓練に直接携わっている療法士の方とエンジニアの視点には差異があり、また持ち合わせている専門知識の違いから、現場で望まれるツールに対する考えの違いが浮き彫りになった。次年度は、この経験を活かし、計測器の利用者としての療法士の意見を取り入れた改良を行った。開発成果をモジュール化し統合することでアプリケーションが作成できるOpenRTMを基盤とするようにソフトウェア開発プラットフォームを移行した。今後、必要とされるモジュールの開発を進めることで利用可能なツールを増やし、より効率的な開発が行えるよう体制を整えていく。

本研究成果を利用することで得られる定量的な動作計測データの利用用途として、身体を使う「上手さ」に着目していたが、そこに留まらず、身体動作に同期した筋活動、筋疲労などと組み合わせることで、科学的データに基づいた医療（EBM）を行うためのツールとしての利用も将来的に考えられる。また、リハビリテーション用ロボットの制御ツールとしての発展も見込まれる。

謝 辞

貴重な意見を提供していただいた兵庫県立リハビリテーション中央病院の療法士の方々、その意見を引き出す際に、実験に協力していただいた患者様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 株) ダートフィッシュ・ジャパン: 「DARTFISH」、URL[<http://www.dartfish.co.jp/>].
- 2) VICON、VICON MX+、URL[<http://www.vicon.com/>].
- 3) ASUS、Xtion PRO LIVE、URL[http://http://www.asus.co.jp/Multimedia/Motion_Sensor/Xtion_PRO_LIVE/].
- 4) シェイプテープ、URL[<http://www.solidray.co.jp/product/3dglove/sensor2.html#3Dセンサ1>]
- 5) XSens, MVN BIOMECH, URL[<http://www.xsens.com/en/movement-science/mvn-biomch>]
- 6) 大槻 伸吾・他: 「少年野球肘の予防・治療のための投球フォームチェックシステムの開発」, 32, pp.118-127, デザインスポーツ科学, 2011
- 7) 本田雄一郎・他: 「リアルタイム姿勢測定装置を用いた食事動作の快適さ調査」, リハ工学カンファレンス講演論文集, No.27, pp.45-46, 2012
- 8) Analog Devices、AN-1057 Application Note、URL[http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1057.pdf]