

氏名	東 祐二
学位の種類	博士(学術)
学位記番号	博甲第948号
学位授与の日付	平成19年9月28日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	ウェアラブルセンサによる運動解析システムの開発と脳卒中リハビリテーション訓練評価への応用研究
論文審査委員(主査)	山越 憲一(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	岩田 佳雄(自然科学研究科・教授), 田中 志信(自然科学研究科・教授), 根本 鉄(医学系研究科・教授), 田村 俊世(千葉大学・教授)

Abstract

In this study, it was tried to obtain the data for evaluation in natural measuring method. And, it measured to consecutive activity of standing up and walking and turning and sitting down. We used the method of wearable sensing of the acceleration sensor and the gyro sensor. The subjects were the post stroke hemiplegic patients. We attached on the acceleration sensors and the gyro sensor to subjects waist and lower extremity. The corner velocity signal was effective to detect the activity phase in the consecutive activity. And, the acceleration signal facilitated the quantitative evaluation to each activity phase. In addition, the RMS value of walking cycle that was calculated from the acceleration signal, it was effective to evaluate a qualitative difference of the independence level of walking. We showed utility in rehabilitation training of the method of wearable sensing of one the acceleration sensor and the gyro sensor.

第1章 序章

<背景>

日本の社会保障給付費をみると、2004年の86兆円から2025年には152兆円に膨張すると推計されている。また、2005年の潜在的国民負担率は、すでに44.8%に達している。これは、社会保障費を中心とする国民の負担率が拡大してきていることを示している。これらの背景のもと、社会保障費の効率化は必須であり、診療報酬・介護報酬ともにマイナス改定というかたちで示された。

超高齢社会を迎え、上述のような施策を背景にして、医療保険や介護保険におけるリハビリテーションは利用者の自立支援、介護予防の観点で社会的に大きな期待が寄せられている。特に、脳卒中は高齢者において発生率の高い疾患であるとともに、後遺症の片麻痺はリハビリテーション対象者の中でもっとも多くを占める。この片麻痺に対するリハビリテーション訓練を早期に開始し、早期自立をはかることで利用者のQOLの向上はもちろんのこと、入院費など、医療費の削減効果につながることで

期待されている。

近年、EBM (evidence based medicine) は医学会で提唱され、わが国でも急速に広まりつつある。一般に、臨床場面における歩行獲得などのリハビリテーション効果の評価は、医師やセラピストの経験に基づいた判断に頼るところが大きく、経験にもとづく主観の介入によりその基準が評価者によって大きく異なるリスクが生じる。このような点から、運動療法や作業療法効果を客観的に示す方法が必要であり、定量的データに基づいた、運動解析をもとに、効果判定を行う必要がある。

これまで、運動解析には、床反力計や3次元動作解析装置など、様々な計測機器による実験がおこなわれているが、装置が大がかりなため、臨床上簡便な計測法とは言えない。加速度計測法は、近年の、集積回路技術の発展により、小型で高性能の加速度センサやジャイロセンサの入手が可能となり、生体計測の分野で力学的解析が進んでいる。

一般に脳卒中のリハビリテーション訓練は、立ち上がりや移乗、歩行などの基本的でかつ日常的に繰り返される動作の回復をはかることから開始される。これらの動作の評価は、筋力や骨関節機能、姿勢反射機能に基づく、重心の滑らかな移動、加速と減速の効率的な変換がなされているかに着目する。この点で、加速度信号計測は、基本動作の定量的かつ質的な評価に適していると考えられる。

<リハビリテーションにおける基本動作の臨床評価>

臨床で通常用いられる動作の評価尺度は、移乗動作の場合、特化したものは存在せず、日常生活活動の評価の一貫として行われており、Barthel index (BI) や FIM (Functional Independence measure) が一般的に利用されている。

歩行能力の評価尺度は種々あるが、歩行の評価の視点は、①歩行能力 ②歩行バランス ③歩行耐久性に大別されていた。歩行能力評価には、10m 最大歩行速度が多く用いられ、被験者の持つ歩行のポテンシャルを測定する点に意味がある。

Berg Balance Scale (BBS) は、バランス機能に特化した測定法であり、種々のテストバッテリーとの相関も高いが、14 項目の検査項目から構成されており、加速度センサを装着しての測定には適応しがたい。FRT は、バランスを測定する上で、簡便さにおいて臨床上、最も計測しやすいテストバッテリーと言える。しかし、測定方法が、重心の支持基底面を規定したかたちで実施されるため、歩行を直接的に計測することにならない。

PCI と 6 分間歩行は、歩行持久力の指標としてとらえられている。しかし、脳卒中片麻痺などの、運動障害を伴う障害者、特に、急性期から回復期においては、耐久性の低下は明らかであり、適正なバッテリーとは言いがたい。

TUG-T は、歩行に関連する座位からの立ち上がりなどの準備動作や、ターンしながらの歩行など、より日常的なパフォーマンスを要求している。元来本法は、歩行や基本動作時のバランス機能を評価し転倒との相関の高いテストバッテリーであるが、大がかりな道具を必要とせず、簡便に実施でき、歩行に代表されるように、支持基底面の移動を伴う動作群であり、加速度計測による評価には適した動作群である。

しかしながら、欠点として、一連の複合動作を評価することで、被験者の動作上の問題を特定することが困難となり、定量的な情報は動作遂行時間のみとなることがあげられる。

<本研究の目的>

以上のことから、TUG-T は臨床上簡便に評価が可能であり、加速度情報などの定量的な情報をもたらすことによって、臨床上意義のある評価が可能であると考えられる。しかしながら、一連の動作を評価する上では加速度測定から姿勢情報をより精度高くとる方法には限界があり、精度の高い姿勢情報を得るには、角速度センサを用いることが有効であると考えられる。しかし、それは、センサを1、あるいは2個増やすことになるので、より対象者を拘束することになる。そこで、本研究の最終目的は、加速度と角速度信号の両者が相互補完するかたちで、計測システムを確立し、できるだけ少ないセンサの情報から、立ち上がり動作や歩行等の基本動作のトレーニング効果判定を、より日常に近い環境で評価することをねらいとした。

第2章 ウェアラブル加速度センサの開発

<ウェアラブル加速度センサ動作計測システムの開発>

ここでは、試作したウェアラブル加速度センサの、リハビリテーション評価への応用について述べる。

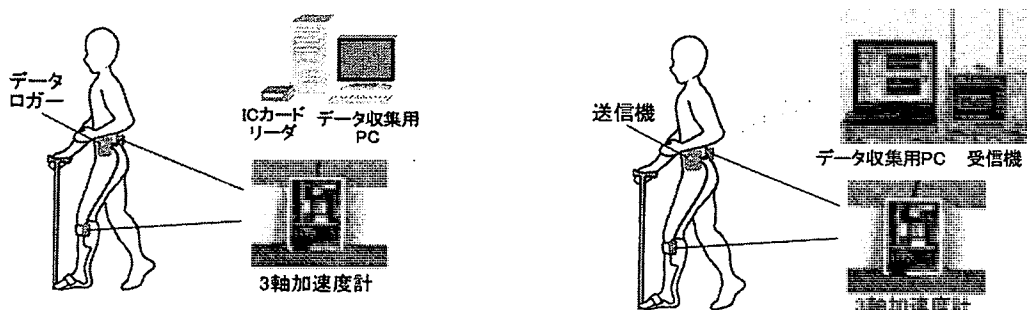


図 データロガータイプ加速度計測システム

図 テレメータタイプ計測システム

<日常行動のモニタリング—立ち上がり・起き上がり動作の判別>

無拘束で日常生活下の活動を記録可能なシステムの開発を目的として、立ち上がり

及び起き上がり動作を検出するシステムの開発を行った。いずれのケースも立ち上がり及び起き上がり以外の動作の誤認検出はなく、比較的精度が高く日常生活下の計測において動作の検出ができることが確認された。

＜腰部加速度信号と歩行周期＞

健常人の歩行における、加速度信号とフットスイッチの対比から、歩行周期の特定を行った。加速度信号から、歩行周期を特定できる点で意義深いものであったが、歩行周期内における動作の質的評価には課題が残った。

＜下肢加速度信号による片麻痺者の歩行解析—加速度原波形による比較＞

加速度センサを両脚の腓骨小頭下部に装着し、得られた加速度波信号を周波数解析、位相面軌跡による解析を行い、片麻痺の程度による差を比較した。臨床上、原波形をグラフ表示し単純比較することは、両者の特徴を概観ではあるが視覚的に簡潔に評価することが可能であった。

＜位相面軌跡による比較＞

軽度片麻痺者は再現性のあるパターンを示した。重度片麻痺者の非麻痺側では、軽度片麻痺者と比べて、位相面軌跡の振幅が小さく、麻痺側については特定のパターンに定まらず複雑な形状となった。個人比較における再現性の評価や運動障害の特徴の抽出に有用であると考えられた。

＜加速度信号のみを用いた、TUG-T 歩行運動の計測と信号解析法の検討＞

本研究では、動作を定量的に評価することに加えて、出来るだけ、被験者に負担をかけない方法、つまり、腰背部に取り付けた加速度センサのみから得られる信号を元に、歩行や立ち上がり・着座動作の客観的な評価方法について検討した。その結果腰部加速度信号は測定が容易であり、ApEn は律動的に繰り返される歩行運動の安定性を評価することに適応があると考えられた。また立ち上がりや着座動作における評価指標のひとつとして、体幹の前傾角度は有用性が高いことが示唆された。訓練経過を追った事例からは、歩行形態の不確定さから角度成分と ApEn の評価は必ずしも一致しなかった。

＜加速度信号による動作フェーズ検出の限界＞

各動作の検出は、立ち上がりと着座動作を特定し、その後歩きはじめは、運動成分の信号開始地点から、終了地点を着座動作の開始付近から推定して求めた。加えて、セラピストの目視により精度を補完している。以上のことから、加速度信号のみによる動作フェーズの検出には、簡便性と精度において、明確に動作を検出する点で、限界が生じた。

より高い精度で、姿勢の変化を求めるには、やはり、角速度情報を利用するのが有用であると考えられる。そこで、最小限のセンサで拘束感を極力少なくして、計測をするためにセンサユニットを1個のみ増やして計測することが、被験者にとっての限界と考えられた。

第3章 ウエアラブル加速度・角速度センサ動作計測システムの開発と応用研究

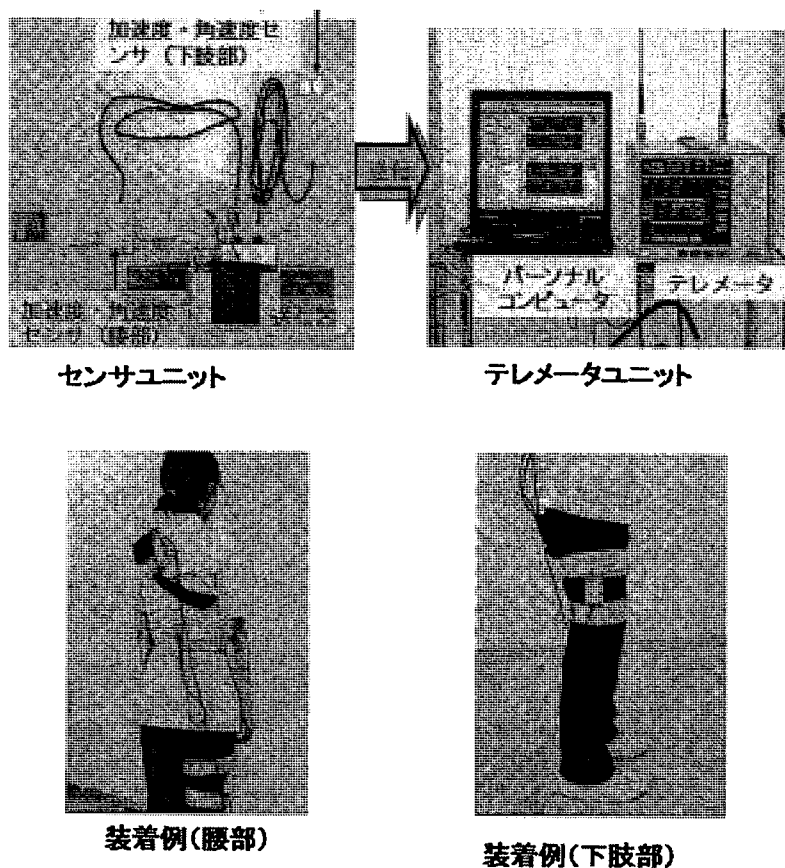


図 ウエアラブル加速度・角速度センサ動作計測システムの概要

ここでは、試作したウエアラブル加速度・角速度センサ動作計測システムを用いた基本動作の評価について述べる。

<角速度センサを用いた脳卒中片麻痺者における畳からの立ち上がり動作の定量的評価の試み>

脳卒中片麻痺者における畳からの立ち上がり動作について、腰部に装着した三軸方向の角速度センサの情報から、姿勢の変化について定量的な評価を試みた。畳からの立ち上がり動作は、片麻痺者が日本家屋で自立した生活をおくるためには最も重要な動作のひとつである。しかしながら、動作は連続する一連の複合動作であるため、各々の動作フェーズを検出する必要があった。腰部の角速度情報は、骨盤の動きを顕著に反映していると考えられ、骨盤の動きの特徴から3つの動作フェーズを検出し、フェーズごとのRMS値を求めることで、定量的なデータに基づいた評価を可能とした。その結果、ケース間での自立度の差異を判断するのに有効な情報をもたらすことができた。また、RMS値はフェーズごとの計測ポイントにおける角度変化量（姿勢変化

量)をあらわすひとつの指標と考えられるが、フェーズの遂行時間に影響を受けやすい。したがって、動作フェーズごとに遂行時間を求めることによって、各方向別のRMS値の解釈をする上で重要なパラメータであると考えられた。

今後の課題として、動作検出方法の標準化をはかるとともに、同時計測した加速度情報を臨床評価に応用することが必要であると考えられた。

<角速度信号を用いた、日常行動に近似する歩行運動の計測と動作フェーズの検出法の検討>

本研究では、角速度センサを被験者の腰背部と大腿部に装着し、臨床で一連の移動動作の評価に用いられるTUG-Tの動作フェーズを検出する手法を提案し、片麻痺者のTUG-Tに対して本手法とセラピストの観察による評価結果が一致するかについて検討した。その結果、本手法とセラピストの評価では、高い相関関係がみられ、本手法が臨床ならびに他の定量的評価において有用であることが示唆された。

従来TUG-Tはどちらかといえば、転倒と高い相関がある評価とされていたが、細部にわたる分類を行うことによって、動作の開始と終了(立ち上がり→立位)や動作の切り替え(歩行→ターン→歩行)などの部分の評価が可能となり、動作時の情報が詳細に得られることができる。さらに進んで、一連の複合動作の流れを評価するため、より日常における実践に近い情報(本来のパフォーマンス)を得ることができると考えられ、臨床的にも有意義な情報を得ることができる。

さらに、同時に計測された、加速度信号をもとにして、動作フェーズごとに定量的評価を行うことを目的とし、歩行レベルの違う片麻痺者の臨床評価に応用し、自立度判定のモニタリングが可能かについて検討した。

本手法を実際の臨床評価に応用した結果、歩行動作における加速度信号から、1サイクルごとのRMS値と変動係数を求めることで、片麻痺者における歩行の自立度の質的な差を定量的に評価することが可能であった。

第4章 結 論

本研究では、立ち上がり動作やTUG-Tなど、複合する一連の動作のながれをとめることなく、自然なかたちで計測し評価情報を得ることを試みた。角速度信号は、動作フェーズを検出するために有効であり、動作フェーズが特定できることによって、同時計測した加速度信号の解釈を容易にすることが可能となった。また、本検出法を実際の臨床に応用した結果、片麻痺者の歩行動作における、加速度信号から1サイクルごとのRMS値と変動係数をもとめることで、歩行の自立度の質的な差を評価することができた。従来TUG-Tはどちらかといえば、転倒と高い相関がある評価とされていたが、細部にわたる分類を行うことによって、

動作の開始と終了(立ち上がり→立位)や動作の切り替え(歩行→ターン→歩行)などの部分の評価が可能となり、本研究の最終目的である、より日常における実践に近い情報(本来のパフォーマンス)を定量的に評価できることが示唆された。

＜今後の展望＞

本計測システムならびに、解析方法は、脳卒中片麻痺者のリハビリテーションの定量的評価に有効活用されることが期待される。具体的には、臨床場面での、装具クリニックにおける補装具の適合性のチェックやケースカンファレンス時の客観的情報の提示、転倒予防外来時の基本動作の評価など、多様な臨床場面で積極的に利用されることが期待される。その際の課題としては、データ解析からアウトプットまでの時間短縮は重要であり、解析ソフトの整備と、個別のデータの保存方法の確立などが今後の重要な課題であると考えられた。

学位論文審査結果の要旨

平成19年8月3日に、第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文及び関係資料について詳細に検討した。更に平成19年8月3日に行われた口頭発表後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議した結果、以下の通り判定した。

本論文は、ウェアラブル(携帯型)という実用上理想的な形態を用いた活動計測システムの開発と、リハビリテーション訓練評価への応用研究を行ったものである。特にリハビリ訓練は、臨床で頻繁に実施している歩行や立ち上がりなどの基本動作である。従来の床反力計や3次元動作解析装置などによる訓練評価は、装置が大掛かりで、空間的・時間的制約が大きく、臨床場面で日常的に実施するには問題が残されていた。そこで、被験者に拘束を与えず、臨床場面でも簡便に利用できる、加速度センサおよび角速度センサを用いて、立ち上がりから立位、歩行などの連続して行われる複合動作群の計測から、各動作移行点を検出する新しい手法を提案し、実際に脳卒中片麻痺者を対象としたリハビリ訓練中の運動評価を行い、システムの実用性と臨床的有用性を検証している。

以上のように、本研究は近年の高齢社会の中で脳卒中患者が益々増えていることを背景に、その早期リハビリ訓練において、日常的な臨床場面で、簡便に運動解析を可能とするシステムを開発しており、今後の医療・福祉工学分野に多大な寄与が期待できるものと考えられる。よって、本論文は博士(学術)に値するものと判定する。