

氏名	本井 幸介
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第727号
学位授与の日付	平成17年3月22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	ウェアラブル活動計測システムの開発と医療・福祉への応用研究
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)	佐藤 秀紀(自然科学研究科・教授), 神谷 好承(自然科学研究科・教授), 田中 志信(自然計測応用研究センター・助教授), 根本 鉄(医学系研究科・教授)

学位論文要旨

[Abstract] The importance of monitoring human activity is well recognized in the field of gerontology. It is particularly important for the elderly to maintain their physical activity in daily life in order to avoid becoming bedridden. Human posture monitoring is also well recognized as being useful in the field of rehabilitation. In order to determine the effect of rehabilitation the physical therapist must evaluate the characteristics of motion during standing-up or walking. Taking these backgrounds into consideration, the author developed a wearable sensor system for measuring human posture together with walking speed. The system was composed of three accelerometers and one gyro-sensor. The accelerometers are attached to the subject's trunk, thigh and calf for measuring the angles to the gravitational direction of each. The gyroscope is attached to the thigh for the walking speed estimation and the angular change in the sagittal plane during walking is obtained by integrating the sensor signal. These sensor signals are recorded using the portable data logger. Accuracy of the system was experimentally evaluated using thirteen healthy subjects. According to the results, it was clearly demonstrated that human posture in sagittal plane (± 180 deg) and walking speed (0.2~2.0 m/s) were measured with reasonable accuracy. Based on these findings, a wearable sensor system was newly devised, and an attempt was made to measure the activity of elderly under daily living and patients under rehabilitation. The results clearly demonstrated that detailed motion characteristics could be detected during standing-up or walking as angle changes between specific body segments.

1. 序論

近年の高齢者増加に伴い寝たきり老人の急増が問題となっている。寝たきりを防止するためには、活動性の変化を的確に把握・評価し、取り組むべき具体的な治療（適切な運動等）の目標を決め、さらにその治療効果を適切かつ定量的に判定する必要がある。この目的を達成するために行動・活動性を無拘束的に計測する携帯装置の必要性が高まりつつある。

一方脳卒中等による片麻痺患者が近年増加し、的確な早期リハビリテーション訓練が非常に重要となりつつある。そのためには患者の動作についての評価及び訓練後の再評価を的確に行う必要がある。しかし現在はセラピスト自身の目視や経験に基づいて評価を行う場合がほとんどである。動作を記録する方法としてはビデオ撮影や床反力計等があるが、装置が大掛かりかつ計測範囲が限られ、さらには得られる情報が不十分である等の多くの問題がある。

そこで本研究では上記問題を解決すべく、計測範囲を限定せず、非常に詳細かつ定量的に患者の動作を計測できるウェアラブル（携帯型）システムの開発を行い、高齢者を対象とした日常生活下の活動性評価、また片麻痺患者を対象とした動作計測を試みた。

2. ウェアラブル活動計測システム概要

Fig. 1 は今回開発したウェアラブル活動計測システム概要である。体幹・大腿・下腿部に設置した加速度センサ出力（2軸）の低周波成分（DC～0.5 Hz）を用いて各部の重力方向に対する傾斜角度を検出する。一方、大腿部のジャイロセンサから検出した角速度を積分することにより、Fig. 2 のような歩行中の股関節角度変化を検出し、下肢全体を一本の棒状としたコンパスモデルを仮定することにより重複歩距離及び歩行速度の算出を行う。なお各センサ出力は小型データロガーを用いて記録が行われ、PCにデータ転送後、解析プログラム（MATLAB、Mathworks 社）により自動で評価が行われる。

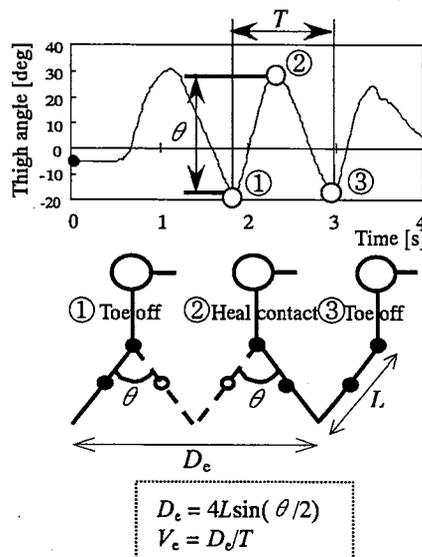
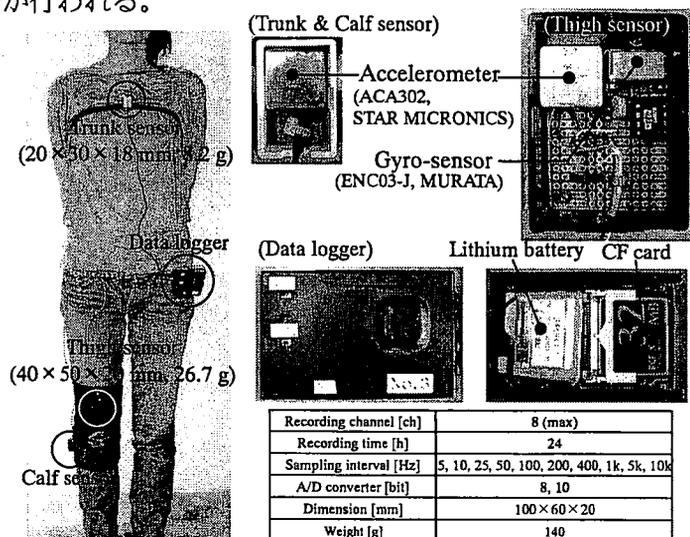


Fig. 1 Outline of a wearable system for measuring activity.

Fig. 2 Method for estimating walking speed.

3. 姿勢及び歩行速度計測における精度評価結果

Fig. 3 は健常成人3名（22～23歳）を対象とした加速度センサによる姿勢計測結果2例を示した。図中実線はセンサ出力低周波成分より算出した角度、また図中プロットは被験者側面より同時記録したデジタルビデオ画像から、関節のマーカ位置を読み取ることにより角度を算出し0.5秒間隔で表示したものである。この結果から実線及びプロットの良好な一致が確認された。

Fig. 4 は θ_1 ・ θ_2 ・ θ_3 の各角度におけるセンサ出力値と実測値を3名の被験者（○、△、+）の計測結果より集計し相関図を示したもので、各被験者における大きな個人差は見られず、各々の角度において相関係数が0.98以上、回帰直線の傾きが0.98～0.99と広い計測角度範囲において極めて良好な直線相関が得られている。従って立位を0°として広範囲の姿勢角度を精度良く計測できることが確認された。

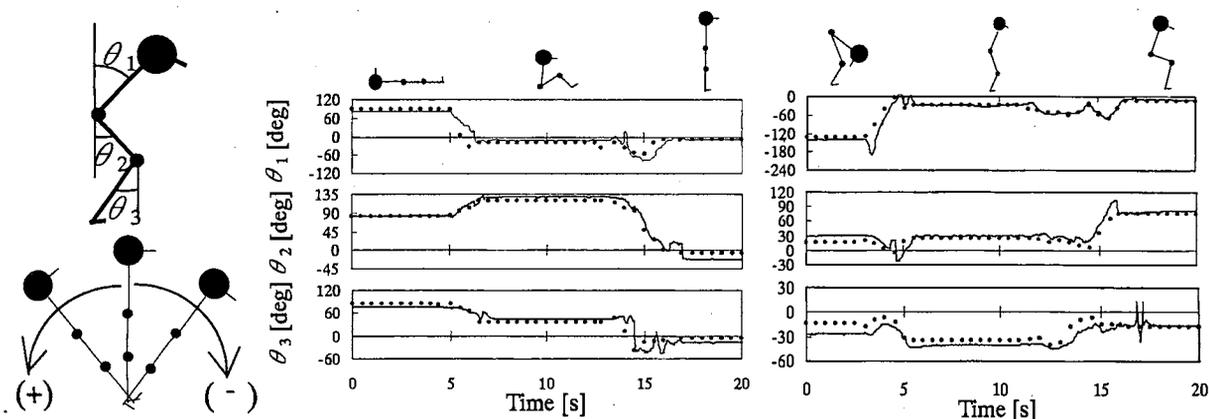


Fig. 3 Typical recordings of the angle to the gravitational direction of trunk, thigh and calf.

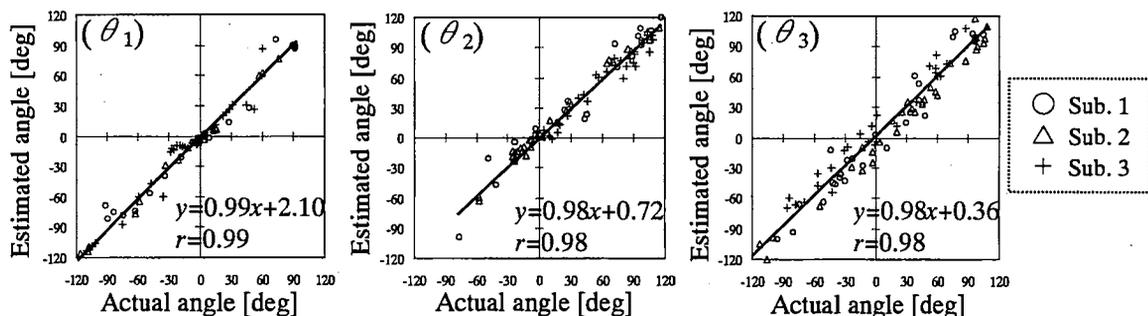


Fig. 4 Scatter diagrams between the angle obtained from accelerometers outputs and actual values.

Fig. 5 は健常成人 10 名 (22~23 歳) 及び高齢者 3 名 (68~74 歳) を対象とし、健常成人については様々な速度で、また高齢者は普段の日常生活下での速度で平地歩行を行い、歩行速度計測精度評価を行ったものである。実測歩行速度 V_a をビデオ画像から重複歩距離と 1 歩行周期を読み取り算出し、Fig. 2 の歩行モデルを用いて算出した V_e との比較を行った。この結果より各被験者における大きな個人差は見られず、相関係数が 0.97、回帰直線の傾き 0.97 と極めて良好な直線相関が得られている。従って 0.5 m/s 以下 (高齢者) を含めたあらゆる範囲の歩行速度を精度良く計測できることが確認された。

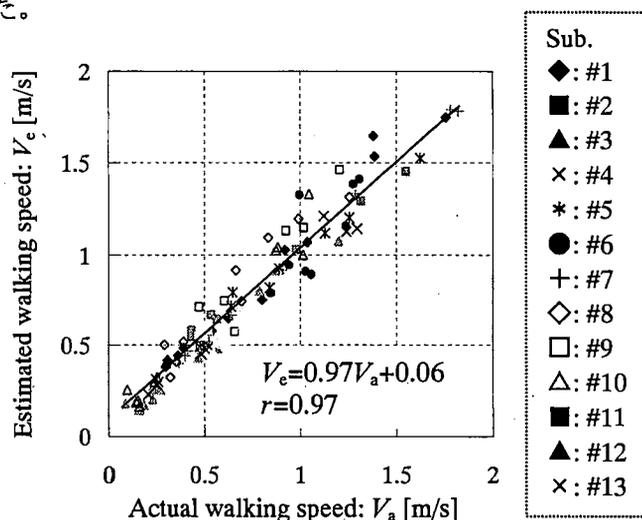


Fig. 5 Correlation between the walking speed obtained from VTR and those from gyroscope

4. 日常生活下での高齢者活動計測結果

Table. 1 は活動計測を行った高齢者 4 名の概要であり、あらかじめ 4 名には実験に対する同意をもらった。被験者 1 及び被験者 2 については 3 時間、また被験者 3 及び被験者 4 については 2 時

間において、ウェアラブル活動計測システムによる無拘束活動計測を行い、計測後PCにてあらかじめ製作された解析プログラムを用いて活動の解析・評価を行った。計測は各高齢者の自宅において平日の起床から1時間後（洗顔、朝食後）に開始した。なお実験の際には、デジタルビデオ画像の同時記録を行い、本システムの角度情報を用いて解析した姿勢分類（歩行、立位、座位、臥位）と、デジタルビデオ画像より解析した姿勢分類を比較することにより本システムの姿勢判別精度評価を行った。

Fig. 6 は被験者 2 における立ち上がり及び歩行をスティックピクチャにより解析した結果であり、画像抽出間隔は 0.2 秒である。まず立ち上がり動作の解析結果より、立ち上がるには約 2 秒かかることが確認され、また体幹の前傾運動を利用して滑らかに動作を行っていることが確認された。一方歩行動作の解析結果より、体幹がやや前傾し、かつ下肢の後方への動きが小さいという高齢者特有の歩行姿勢が確認された。

Table. 1 Summary of subject details.

Subject	Gender	Age [yr]	Family size
1	Male	74	6
2	Female	68	3
3	Female	77	2
4	Female	85	4

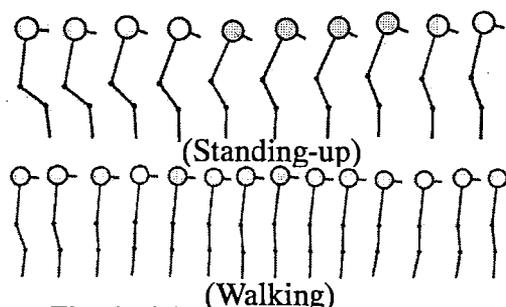


Fig. 6 Stick picture of posture change.

Fig. 7 は本システムにより得られる角度情報から姿勢を4種類（歩行、立位、座位、臥位）に分類することにより活動性評価を行った結果であり、図中左はセンサシステムによる判別結果、また図中右は同時記録されたビデオカメラによる判別結果である。まずセンサシステム及びデジタルビデオ画像の両者の判別結果は非常に良く一致しており、本システムを用いて良好に姿勢を判別できることが確認された。一方各被験者における姿勢の割合に着目すると、被験者 1 及び被験者 3 においては座位あるいは臥位の割合が非常に多いことが確認される。またこれらと比較し、被験者 2 及び被験者 4 は立位あるいは歩行の割合が多いことが確認される。これら結果より各被験者の活動性の違いが明確に確認された。

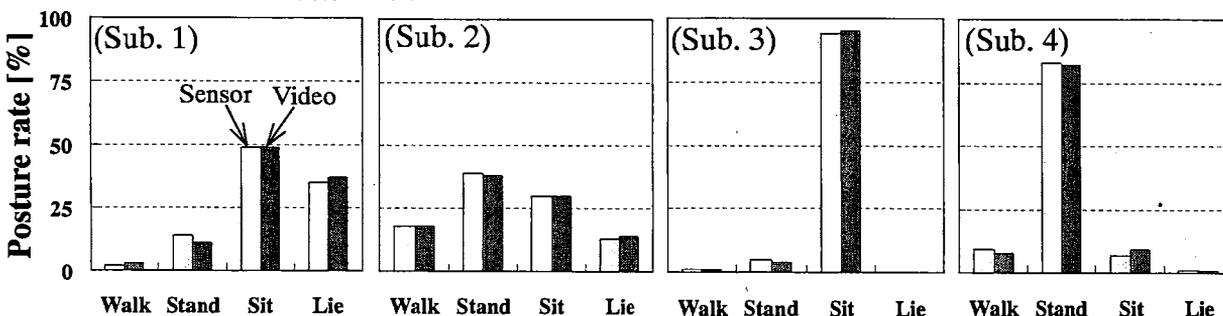


Fig. 7 Results of four postures classified by the wearable system.

Fig. 8 は歩行が含まれる 180 秒のデータを詳細解析した結果である。図中は姿勢変化、 θ_1 、 θ_2 、 V_e の結果を示しており、 θ_2 においては踵接地及び爪先離地を同時に検出した。なお θ_1 については踵接地及び爪先離地と同時間の体幹角度が、 V_e については1歩行周期に1つのデータがそれぞれプロットされている。

まず姿勢変化の結果より、姿勢変化の頻度を確認することができた。次に V_e については、被験者 1 及び 2 は健常高齢者 (0.5 m/s 前後) 以上であったが、被験者 3 と 4 は 0.4 m/s と若干低速度であった。一方 V_e が 0.2 m/s 以下まで低下する点があくつか確認されたが、これは一度立ち止まる、あるいは方向転換で減速したからであることが同時記録されたデジタルビデオ画像より確認された。一方 θ_1 、 θ_2 の結果より、特に被験者 3 及び 4 において体幹が大きく前傾し、大腿部が前方のみで動く歩行姿勢であることが確認された。

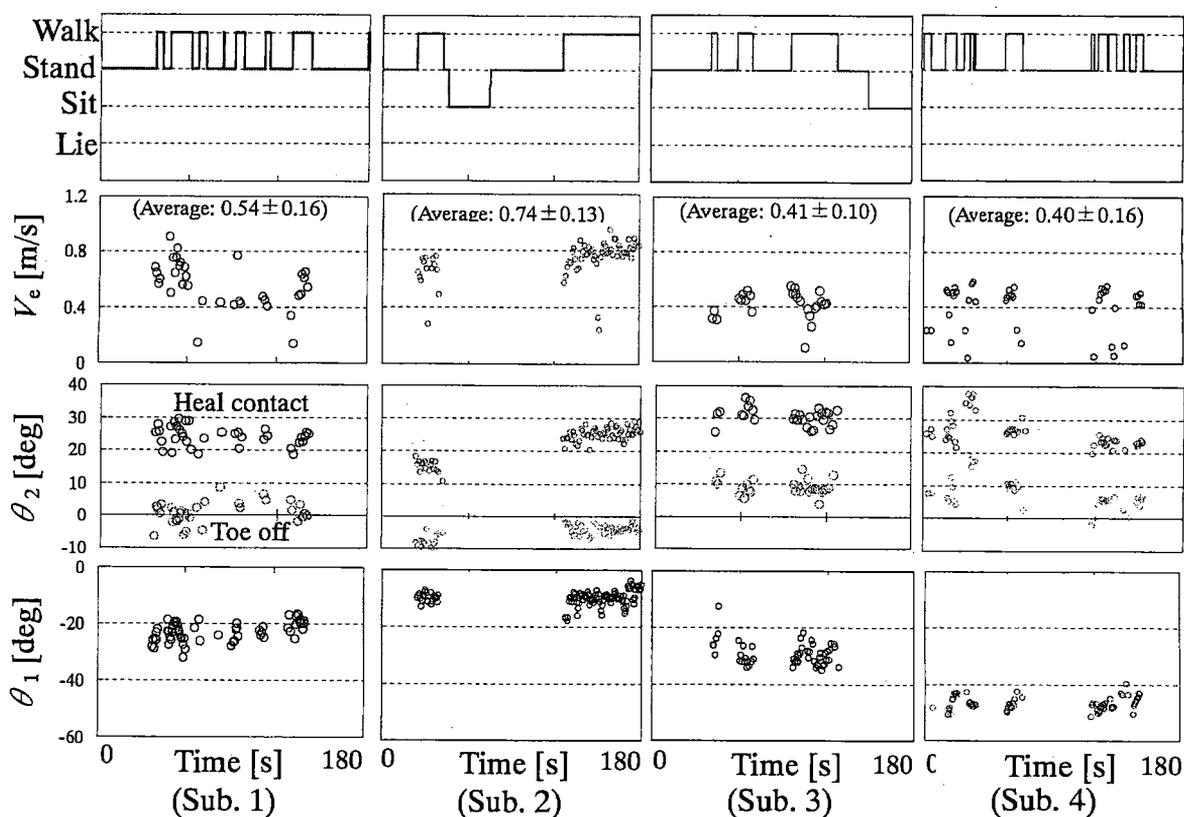


Fig. 8 Results of detailed posture change and walking movement analysis.

5. リハビリテーション患者の動作計測結果

Table. 2 は被験者詳細である。被験者は脳梗塞あるいは脳出血を起因とする片麻痺患者7名である。計測は(社)八日会藤元早鈴病院において行い、あらかじめ当該病院の倫理委員会の承認を受けると共に、患者から実験に対するインフォームドコンセントを得た後に計測を行った。また計測はリハビリテーション中の起立及び歩行動作を対象とした。なお下肢センサは麻痺側に装着した。

Table. 2 Summary of subject details.

Subject	Gender	Age	Diagnosis	Rehabilitation [day]	Paralyzed side	Walking level
A	Female	68	Brain infarct	4745	right	T-Cane, MAFO
B	Male	72	Brain hemorrhage	1735	right	T-Cane, SLB
C	Female	53	Brain hemorrhage	1120	left	T-Cane, MAFO
D	Male	65	Brain infarct	621	left	Q-Cane, MAFO
E	Male	73	Brain infarct	568	left	T-Cane, MAFO
F	Female	86	Brain hemorrhage	314	left	T-Cane, Non-Blace
G	Male	63	Brain infarct	62	right	T-Cane

Fig. 9は起立時の θ_1 、 θ_2 、 θ_3 及び体幹加速度センサ出力の高周波成分(0.5 Hzハイパスフィルタ使用)により算出した前後方向運動加速度 A_1 の計測結果である。起立動作は体幹角度変化の開始時間から安定するまでの時間として抽出を行った。まず体幹前傾運動に伴い θ_1 が 0° から 45° に変化すると共に、股関節伸展に伴って θ_2 が 90° から 0° に変化していることが確認された。

θ_1 の結果から、被験者A及びCにおいて1つピーク $\theta_{1,min}$ が検出された。これは体幹の反動を利用して立ち上がるための前傾運動によるものであり、これに伴い A_1 において、前方向への加速時における正のピーク $A_{t,max}$ と、その後の反動による後方への加速時における負のピーク $A_{t,min}$ が同時に検出された。以上より健常者同様に体幹反動を利用する安定した起立動作が行われていることが確認された。一方被験者D及びEにおいて2つのピーク $\theta_{1,min1}$ 、 $\theta_{1,min2}$ が検出された。これは体幹前傾運動を行うものの安定せず、前後方向の加速・減速を伴った滑らかな運動ができないからである。従って立ち上がりに必要な反動を得ることができず、 A_1 において明確なピークが検出されず、また前述の影響から体幹を支える股関節に大きな負担がかかることで θ_2 の結果において2つのピーク $\theta_{2,max1}$ 、 $\theta_{2,max2}$ が検出された。

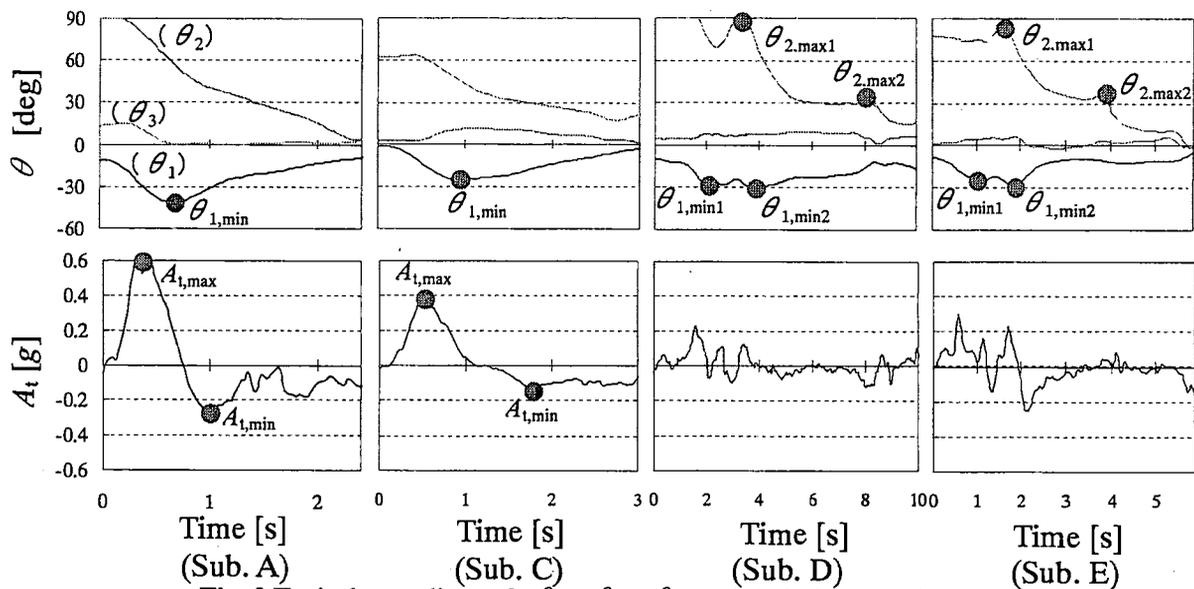


Fig. 9 Typical recordings of θ_1 , θ_2 , θ_3 , and A_t during standing-up.

Fig. 10 は定常歩行状態での角度変化計測結果から1歩行周期ごとに角度データを切り出して集計すると共に、平均及び偏差を算出したものである。横軸は爪先離地を歩行周期 0%、次の爪先離地を歩行周期 100%として規格化した。従って0%から $\theta_{2,max}$ （踵接地）までは麻痺側遊脚層であり、それ以降は麻痺側立脚層となる。

まず θ_1 の結果から、被験者 A、B、G において負のピーク $\theta_{1,min}$ が検出されている。これは麻痺側立脚時に下肢を後方へ運動する際に、体幹が安定せず前傾したためである。一方被験者 G において正のピーク $\theta_{1,max}$ が検出されている。これは麻痺側遊脚時に下肢を前方に振り出すためには体幹を後方に反って反動をつける必要があるためである。

一方 θ_2 の結果から、被験者 A は角度が -15° から 20° まで変化し、下肢が後方まで運動していることが確認された。なお $\theta_{2,max}$ は周期 55%で検出され、麻痺側立脚運動が遊脚運動と比較し若干速いことが確認された。これは麻痺側立脚時に膝関節が後方へ急に下がる「Knee back」による影響と考えられる。これに対し被験者 B、F、G は下肢が後方へ大きく運動せず、特に被験者 B は角度が -2° から 14° までと非常に小さな変化であり、歩行速度が非常に小さいことが確認された。また被験者 G は大きな角度変化が得られているものの、非常に歩行速度が小さいことが確認された。なお $\theta_{2,max}$ は周期 37%（被験者 B）、60%（被験者 F）、35%（被験者 G）で検出され、麻痺側立脚運動及び遊脚運動の特徴が明確に確認された。

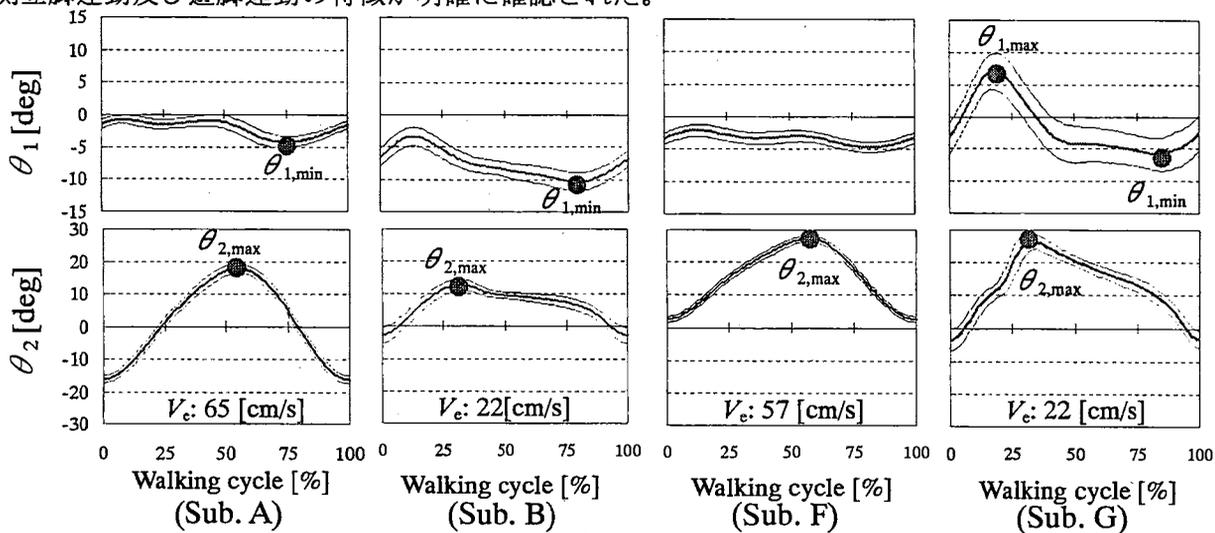


Fig. 10 The averaged data of θ_1 , θ_2 during one walking cycle.

Fig. 11 は歩行中の特徴が大きく現れると考えられる踵接地及び爪先離地に着目しFFT解析を行った結果である。今回踵接地時の大腿部傾斜角度 θ_H と、踵接地から次の踵接地までの間隔 HH 、爪先離地時の大腿部傾斜角度 θ_T という特徴点を抽出し解析を行った。被験者 A においては θ_H 、 HH において大きなパワーは検出されなかったことから、麻痺側踵接地は非常に安定していることが確認された。一方 θ_T においても大きなパワーは検出されなかった。麻痺側爪先離地は健側の踵接地の特徴を反映していると考えられ、従って健側踵接地も安定していると考えられる。一方被験者 D 及び G においては、被験者 A と比較し θ_H 、 θ_T において 0~0.2Hz に大きなパワーが検出され、麻痺側踵接地及び爪先離地（健側踵接地）時の角度が低周波で変化していることが確認された。また HH においても 0~0.2Hz に大きなパワーが検出され、低周波で踵接地の間隔が変化していることが確認された。

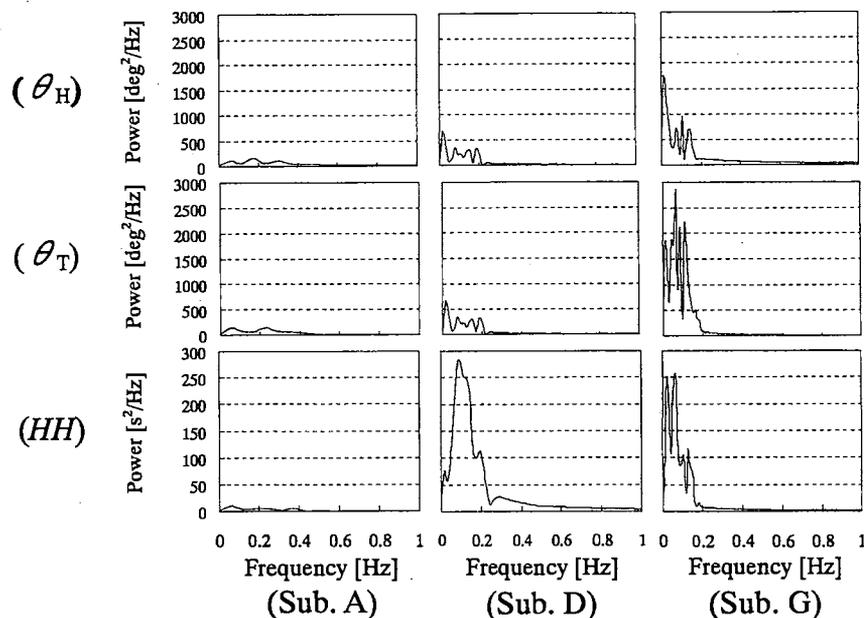


Fig. 11 Results of FFT analysis

6. 結論

体幹・大腿・下腿各部に加速度センサ及びジャイロセンサを装着するウェアラブル活動計測システムを開発した。センサ出力及びデジタルビデオ画像との同時記録により性能評価を行った結果、本システムにより姿勢及び歩行速度が高精度で計測可能であることが確認された。

次に上記ウェアラブルシステムを用いて、高齢者4名を対象とし各自宅で2~3時間の活動計測を行った。計測結果より、本システムは立位・座位・臥位・歩行の4種類の姿勢分類のみならず、姿勢変化の頻度を用いた活動解析、姿勢変化時の角度を用いた起立動作能力の評価、歩行中の各部角度変化を用いた歩行姿勢や安定性の詳細解析が可能であることが確認された。上記計測はこれまで病院施設内の限られた環境下で行われ、得られたデータが被測定者の実際の能力を反映してない等の問題があった。しかし日常生活下において詳細に活動・動作を記録可能な本システムを用いることで、日常生活における実際の状態を評価できると考えられる。

一方リハビリテーション時における患者の動作を計測した結果より、健常高齢者のような体幹前傾運動による反動を用いた起立動作が行えているか否か、また歩行中においてどのような姿勢変化を行っているかを詳細に記録することができた。歩行と神経活動には深い繋がりがあることから、本システムはリハビリテーションの神経系に対する治療効果を評価できる可能性が高い。上記計測はこれまで床反力計と大掛かりな光学的計測装置を必要とし、また検査室という緊張から自然な動作を引き出せないといった問題があったが、本ウェアラブルシステムを装着し通常のリハビリテーションを行うだけで患者の詳細な情報を得ることが可能であり、非常に実用化の可能性が高い。

学位論文審査結果の要旨

平成 17 年 1 月 25 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 17 年 1 月 25 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、高齢者やリハビリテーション患者の定量的かつ詳細な活動解析を目的とし、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、その応用研究を行ったものである。従来のビデオ撮影法等を用いた手法においては、データ解析や装置構成の煩雑さなどの問題が残されていた。そこで計測原理については、加速度センサ及びジャイロセンサを用いて体幹・大腿・下腿の各部の重力方向に対する角度を計測するという新たな手法を提案し、その計測精度を実験的に確認している。次に小型データロガーを用いたウェアラブルシステムの開発を行い、高齢者の日常生活下の活動計測を行うと共に、脳卒中片麻痺患者を対象としたリハビリテーション中の活動計測を病院施設にて実際に行うことにより、システムの有用性を確認している。

以上のように、本研究は近年重要性が高まりつつある高齢者の活動性維持と脳卒中患者の早期リハビリテーション治療において、活動評価・治療・活動再評価のサイクルの的確な実施を可能とする新たな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に寄与できるものである。よって、本論文は博士（工学）に値すると判定する。