

姿勢・歩行速度の無拘束同時計測法に関する基礎的検討

著者	本井 幸介, 田中 志信, 野川 雅道, 山越 憲一
雑誌名	生体医工学 : 日本エム・イー学会誌
巻	41
号	4
ページ	273-279
発行年	2003-12-10
URL	http://hdl.handle.net/2297/7047

姿勢・歩行速度の無拘束同時計測法に関する基礎的検討*

本井 幸介**・田中 志信***・野川 雅道†・山越 憲一**

1. はじめに

近年、ホルター心電計や自由行動下血圧測定装置を用いた循環生理情報の無拘束計測が可能となってきた。このような循環生理情報は姿勢や行動により大きく変動するため、被験者の姿勢や活動状態を無拘束的に同時記録するための装置開発が望まれている。またリハビリテーション医学や老年医学分野では、高齢者の生活の質を極力高い状態に維持し寝たきりを防止するために、日常の活動性を客観的に把握することが重要視されている。中でも歩行速度は高齢者の自立性を評価する上で有用な指標とされており^{1,2)}、日常生活下における姿勢情報と歩行速度を無拘束的に同時計測できれば、その利用価値は非常に大きいものと期待できる。

このような背景を考慮し、著者らは磁気抵抗素子型傾斜角度センサを用いた無拘束長時間姿勢計測装置を開発し³⁾、その応用例として高齢者の生活環境が日常の活動性に及ぼす影響などについて報告してきた⁴⁾。しかし使用しているセンサの構造上、姿勢の計測角度範囲が立位を基準に $\pm 90^\circ$ に限られるうえ、歩行時のアーチファクト混入により歩行速度の計測精度が十分でないなど、実用上の問題点を残していた。

一方、近年の半導体素子製造技術の発達により超小型・軽量の加速度センサやジャイロセンサが市販され、これらを活動性評価や歩行速度計測に適用した例が多数報告されている。例えば活動性計測に関しては、胸部と大腿部の加速度計測により活動を把握する方法を Aminian らが報告しており⁵⁾、岡らは腰部に取り付けた3軸加速度センサを用いて、出力の低周波成分により立位や臥位の判別を行うと共に、運動加速度成分により移動距離の推定を行っている⁶⁾。歩行速度計測に関しては、大腿部にジャイロセンサを取り付

け歩行中の大腿部角度変化を計測し、簡単な歩行モデルにより歩幅及び歩行速度を算出する方法が Miyazaki により報告されている⁷⁾。根武谷らはこの手法を発展させ、腰部に加速度センサを追加し歩行速度と共に階段昇降や平地歩行等の判別を行っている⁸⁾。このように種々の試みが報告されているが、姿勢状態については「座っているか、立っているか、寝ているか」程度の大雑把な分類がほとんどであり、また姿勢情報と歩行速度の両方を高精度で計測可能な装置はこれまで報告されていない。

そこで本研究では、前述した著者らの従来システムにおける問題点を解決し、姿勢及び歩行速度を高精度で同時計測可能とするため、加速度センサ及びジャイロセンサを用いた新たなセンサシステムを考案し、その計測精度について実験的検討を行った。

2. 姿勢・歩行速度同時計測システム概要

第1図に試作センサシステムの概要を示した。

まず従前のシステムの問題点であった「立位 $\pm 90^\circ$ 」という姿勢計測角度における制限を解消する目的から、体幹・大腿・下腿の各部位に2軸加速度センサ(MC 201, WACOH)を取り付け、各センサ出力の低周波成分を利用することにより、重力方向に対する各部位の相対角度を検出する。これにより矢状面全角度「立位 $\pm 180^\circ$ 」の姿勢角度計測が可能となる。

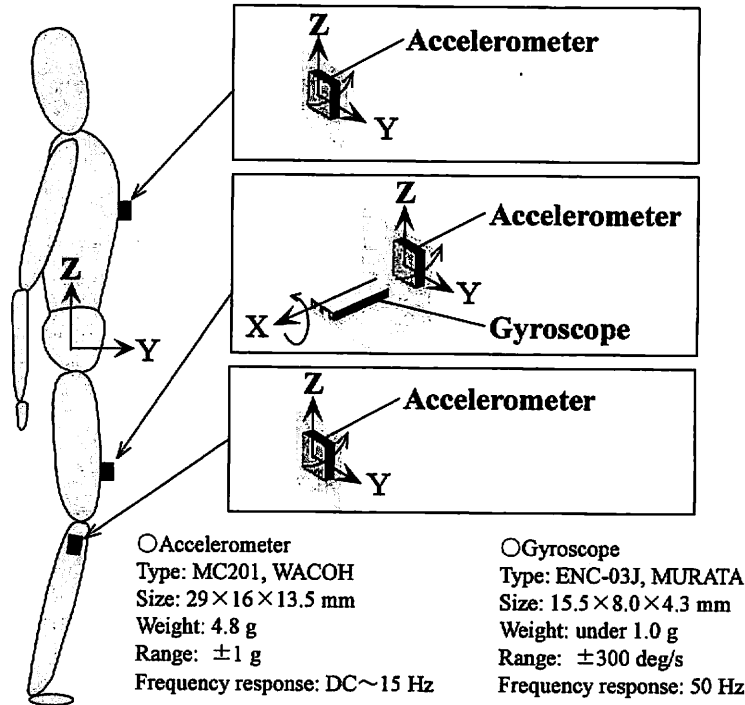
次に歩行速度を高精度で計測するために、大腿部の2軸加速度センサと同一部位に圧電ジャイロセンサ(ENC-03 J, MURATA)を組み込み、歩行に伴う大腿部角速度(股関節を回転中心とする)を計測し、これを時間積分することにより股関節角度変化を算出する。一方、第2図に示す歩行モデルを仮定することにより、計測データから歩行速度を推定することが可能となる⁷⁾。即ち、股関節角度変化: θ (deg)と1歩行周期時間: T (s)を読み取り、同図中に示したような下肢全体を1本の棒状と考えたコンパスモデルの歩行を仮定し、予め計測しておいた被験者下肢長: L (m)を用いることにより、推定歩幅: $D_0=4L \sin(\theta/2)$

* 2003年6月26日受付, 2003年10月14日改訂

** 金沢大学大学院自然科学研究科

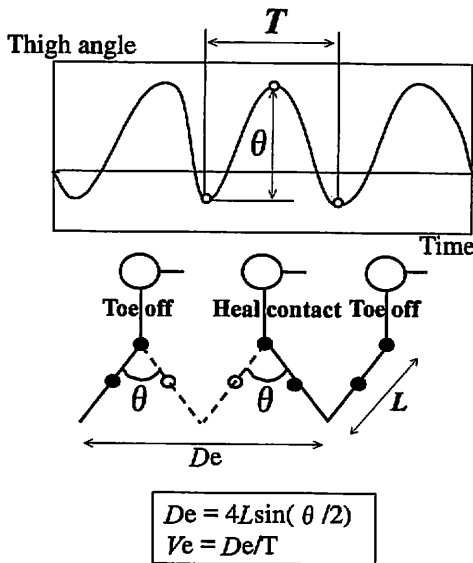
*** 金沢大学自然計測応用研究センター

† 金沢大学工学部



第1図 姿勢・歩行速度同時計測システム概要

Fig. 1 New sensor system for ambulatory monitoring of human posture and walking speed.



第2図 歩行速度算出法

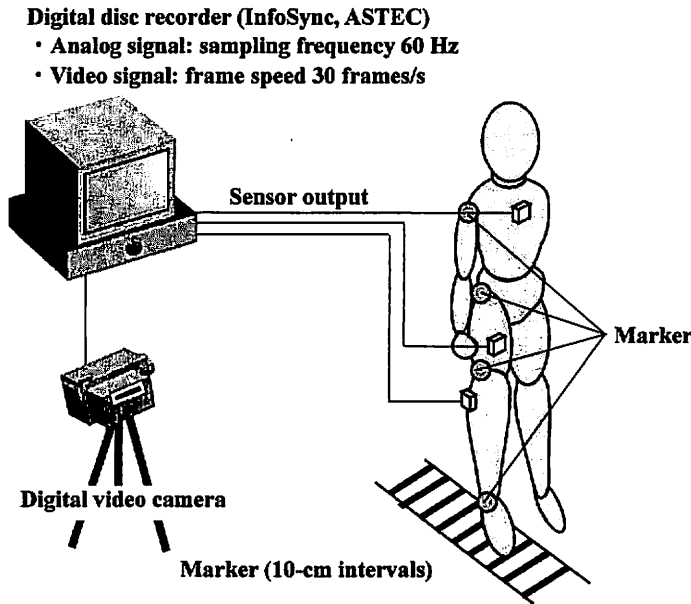
Fig. 2 Method for estimating walking speed using thigh angle measurements.

(m)を算出し、推定歩行速度： $V_e = D_e / T$ (m/s)を算出することができる。

3. 計測精度評価実験方法

試作システムの性能評価を、第3図のような実験システムを用いて行った。加速度センサ及びジャイロセンサの出力は「画像・アナログ信号同時記録装置 (InfoSync, ASTEC)」に記録される。なお、今回の実験では加速度センサ及びジャイロセンサ出力のサンプリング周波数は 60 Hz、ビデオ画像のフレーム速度は 30 フレーム/s とした。

実験に先立ち加速度センサについては、センサユニットの重力方向に対する傾斜角度を±180°に渡り変化させ、各角度に応じた2軸出力を計測することにより、センサ出力-傾斜角度特性を求めた。またジャイロセンサについては、製造元より提供されたデータシート (0.67 mV/deg/s) によりセンサ出力-角速度特性を決定した。一方センサ出力記録後に、パーソナルコンピュータ上で1次デジタルローパスフィルタ (3 Hz で-3 dB の利得) を用いて、加速度センサ出力から DC~3 Hz の低周波成分 (姿勢変化成分) を抽出した。同様に1次バンドパスフィルタ (3 Hz で-3 dB の利得) を用いてジャイロセンサ出力から 0.3~20 Hz を抽出し、温度ドリフト等の影響を取り



第3図 計測精度評価実験システム

Fig. 3 Experimental setup for evaluating the accuracy of human posture and walking speed measurements.

除いた。

以上の実験システムのもと、まず姿勢計測に関しては、ビデオカメラの前で、各被験者（健康男性3名、22～23歳）にそれぞれ座位や臥位といった数通りの姿勢をとらせ、加速度センサの出力とデジタルビデオ画像との同時記録を行った。被験者には図中のように各関節部分にマーカーを取り付けてあり、これを用いて体各部の実測傾斜角度を算出し、加速度センサにより算出される推定傾斜角度と比較することにより、姿勢計測における精度評価を行う。

次に歩行速度計測に関しては、図中のように床に貼り付けた10cm間隔のマーカーの上で、各被験者（健康男性10名、22～23歳）に高齢者のすり足歩行を模擬した低速度歩行を含む様々な歩行速度（0.1～1.8m/s）で歩行させた。この時の大腿部のジャイロセンサ及び加速度センサの出力をデジタルビデオ画像と共に同時記録した。実験後、記録されたビデオ画像から、床マーカーを利用して実測歩行速度を算出（重複歩距離÷1歩行周期時間）し、大腿部ジャイロセンサ出力により算出された推定歩行速度と比較することにより、歩行速度計測における精度評価を行った。

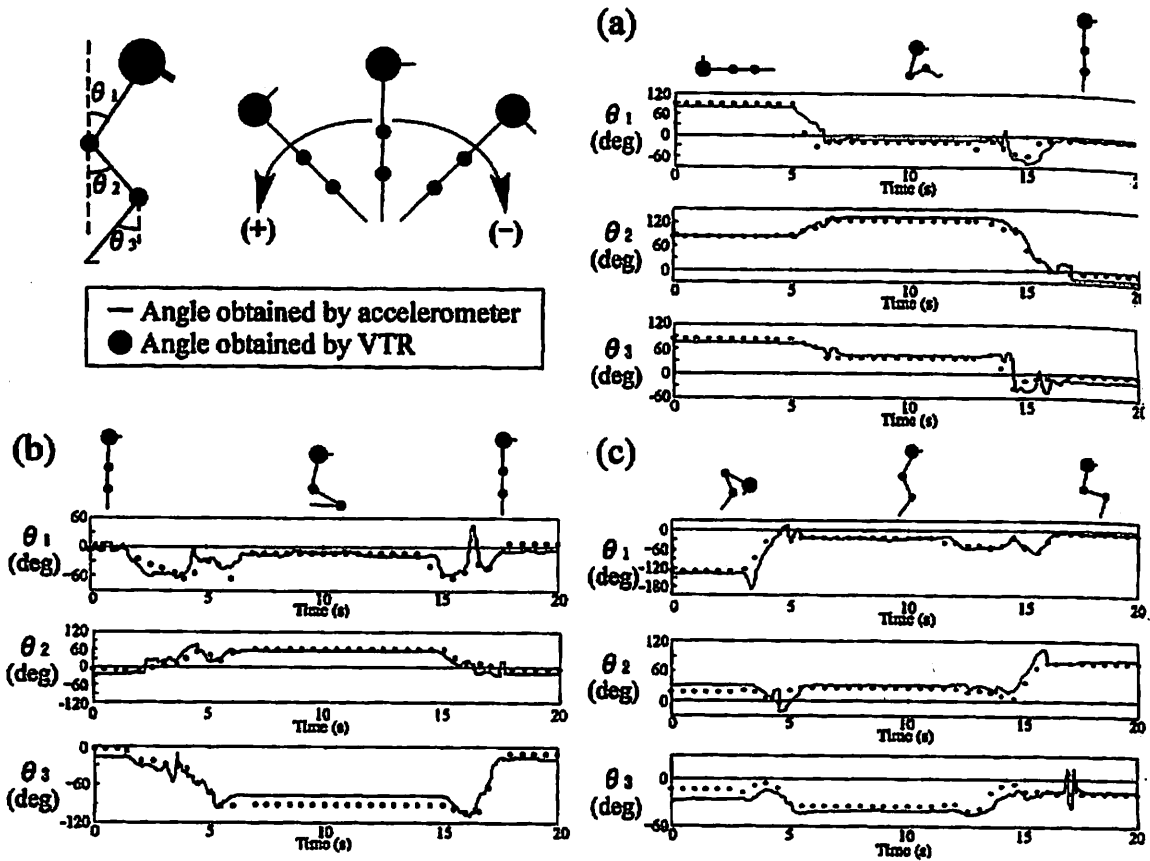
4. 計測精度評価実験結果

第4図に試作システムによる姿勢計測結果を3例

（各被験者から1例ずつ）示した。角度の定義は同図上のように、立位を基準（0°）として体幹・大腿・下腿の重力方向に対する傾斜角度を θ_1 、 θ_2 、 θ_3 とした。図中a、b、cにおいて、実線は加速度センサ出力の低周波成分から算出した体の各部位の角度変化を示し、各プロットは被験者に取り付けたマーカーから読み取った角度変化（デジタルビデオ画像から約0.5秒間隔で抽出）をそれぞれ示している。この結果から、実線とプロットがよく一致しており、本センサシステムにより姿勢の変化中を含めほぼ実測値と一致した角度計測が可能であることが判る。またこれら以外の実験結果においても同様に実線とプロットの良好な一致が確認された。

また第5図は、 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。

次に第6図は、歩行中の大腿部ジャイロセンサによる大腿部角速度の計測例（同図a）と、その時間積分を行うことにより算出した大腿部角度変化の計測例（同図b）である。なお、 θ の絶対値決定のために必要となる積分初期値、即ち大腿部傾斜角度の初期値に



第4図 試作システムによる姿勢計測結果例

Fig. 4 Definition of the three angles (top left) and typical recordings of the sensor output during various posture changes (a-c).

については、本システムの場合、同一部位に姿勢計測用の加速度センサを設置しているため、この出力から歩行開始直前の大腿部傾斜角度を決定できるという利点を有している。第6図bの初期角度(縦軸切片の値)はこのようにして求めたものである。

第7図はこのようにして求めた股関節角度変化に前述のモデルを適用して得た推定歩行速度と実測歩行速度との相関を示したもので、各被験者間に大きな個人差は見られず、相関係数が0.96、回帰直線の傾き0.96と極めて良好な直線相関が得られている。

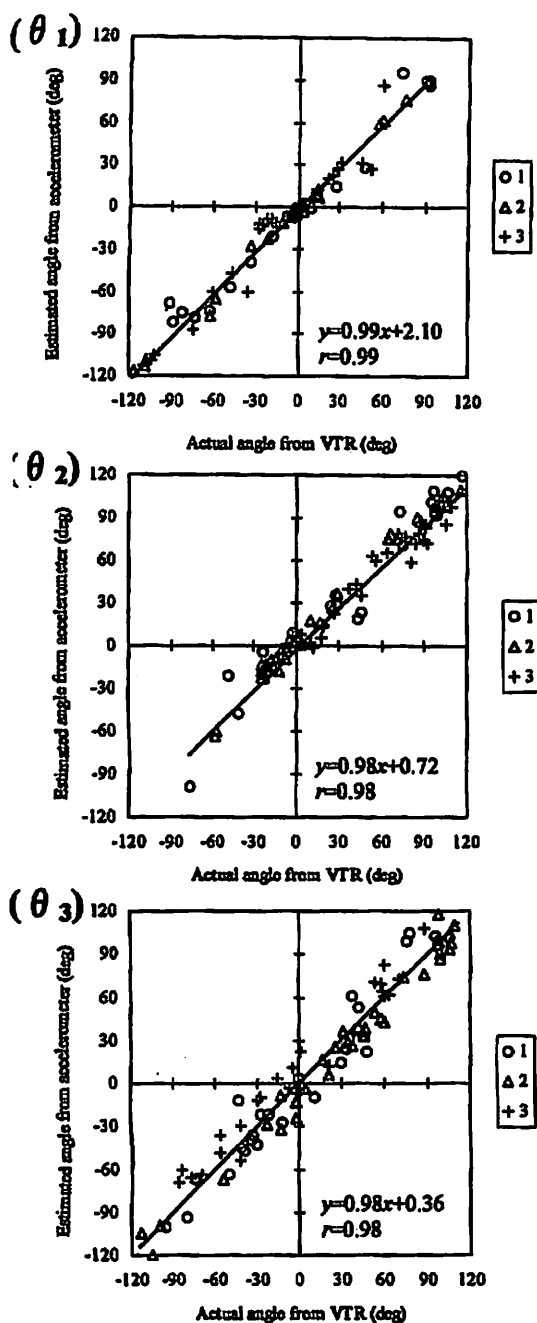
以上の結果より、今回試作したセンサシステムにより姿勢及び歩行速度共に良好な精度で計測可能であることが確認された。

5. 考 察

以上示したように、センサ出力とビデオ画像の比較による姿勢計測精度評価の実験結果から、今回新たに考案したセンサシステムにより被験者の姿勢状態を極

めて高精度で計測可能であることが確認された。さらに今回の改良により、姿勢計測の角度範囲が従前の立位±90°から立位±180°まで拡張され、体幹が大きく前傾するような姿勢や組み座位、または正座といった姿勢を計測することも可能となった。しかしながら、素早い姿勢変化や運動を行った際には、姿勢変化の過程における角度変化までを高精度で計測することは困難であったため、ジャイロセンサを併用するなどの工夫が必要である。また、今後日常生活下で姿勢計測を行う際には、ひねりを含む体各部の傾斜運動、寝返り、胡坐等の複雑な動きを計測の必要があると考えられるが、その場合2軸加速度センサではなく、3軸加速度センサを用いることにより容易に適応可能であると考えられる。

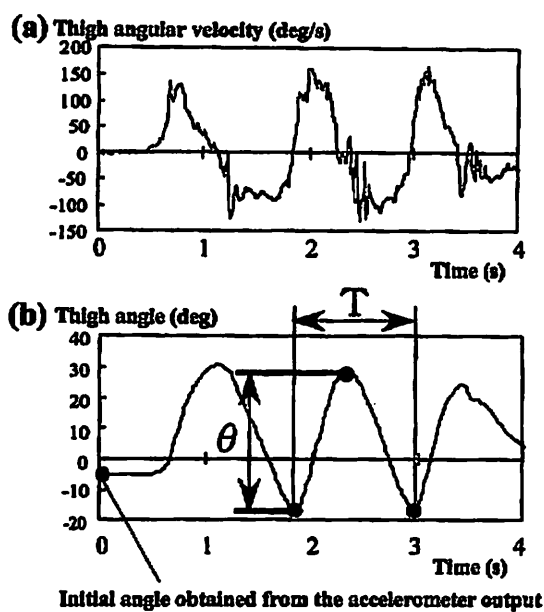
また、著者らが開発して来たシステムは体幹、大腿、下腿の3カ所の角度を計測するもので、必要最低限のセンサ数で被験者の姿勢状態を極めて直感的にかつ詳細に判別できるだけでなく、細かな姿勢(動



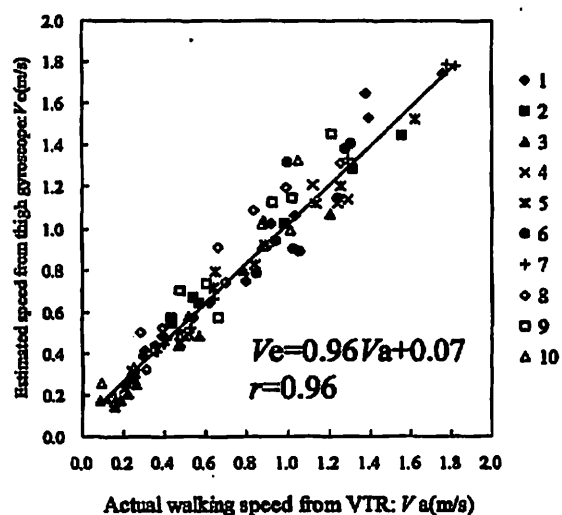
第5図 試作システムにおける角度計測精度評価結果
 Fig. 5 Correlation between angle values obtained from VTR analysis and those obtained from an accelerometer.

作) 解析も可能であるという独自の特徴を有しており、簡便性という観点からも実用化が大いに期待できる。

次に歩行速度計測に関しては、従前の傾斜角度センサを用いたシステムではアーチファクト等の問題で実



第6図 歩行開始時における大腿部ジャイロセンサ出力と積分波形の一例
 Fig. 6 Typical recording of the gyrosensor output (a) and integrated values (b) just after the beginning of walking.



第7図 歩行速度の計測精度評価結果
 Fig. 7 Correlation between walking speed values obtained from VTR analysis and those obtained from the gyroscope signal.

用に供し得る精度が得られなかったことから、今回のシステムでは Miyazaki の報告を参考にジャイロセンサの適用を試みた⁷⁾。その結果ジャイロセンサ出力を時間積分することにより大腿部角度変化がアーチファ

クトの混入もほとんどなく得られ、高精度で歩行速度が計測可能であることが確認された。

また、ジャイロセンサ出力の積分により得られるのは、「何度動いたか」という相対的角度変化であり、正確な脚部の状態(矢状面における傾斜角度)を知るためには、運動前に「何度傾いていたか」という正確な積分初期値が必要となる。Miyazakiのシステムでは、ジャイロセンサから得られる角速度を積分する際に積分初期値の決定を正確に行うことができず、日常生活において長時間の無拘束計測を行うことは困難であるという問題を残していた。これに対して佐川らのつま先にセンサを装着した例⁹⁾では、同一部位に取り付けた加速度センサから被験者の歩行中の立脚相を検出し、この間にジャイロセンサ出力をリセットするという工夫を凝らしている。

一方本システムの場合は、姿勢計測のための加速度センサが同一部位に取り付けられているため、歩行開始直前の静止時(立位や座位等)において、重力方向に対する大腿部傾斜角度を検出でき、この値からジャイロセンサの積分初期値を決定できる。この初期値決定を毎回歩行開始直前に行うことで、積分誤差が過度に蓄積することはなく、日常生活における歩行速度を長時間に渡り高精度で計測可能であると考えられる。

今回歩行速度推定に際しては、Miyazakiの報告に限りて第2図に示す極めて単純なコンパス状の歩容を仮定したが、このような単純化により計測誤差が発生していることは十分考えられる。例えば今回のモデルでは遊脚相に移る直前のheel offからtoe offまでの、いわゆる「蹴り」による体幹の移動が考慮されておらず、第7図における1m/s以上でのばらつき増加はこれに起因していると思われる。またこの計測誤差は被験者の足の大きさにも依存する可能性があり、今後、測定精度向上のためには、下腿部角度情報を取り入れた新たなモデルの検討が必要と考えられる。

一方、歩行速度計測のより簡便な方法として、進行方向の加速度成分を積分するといった方法ももちろん考えられるが、この方法では被験者の歩容に関する情報は当然のことながらほとんど得られない。しかし本システムでは歩行中の股関節角度変化が得られているために詳細な歩行解析が可能で、片麻痺患者における歩容の改善過程の追跡など、リハビリテーションや高齢者医療など多くの分野でその有用性が期待される。

6. 結 論

今回、体幹・大腿・下腿の角度変化を計測し活動を評価するという原理のもと、過去の磁気抵抗素子型傾斜角度計を用いた無拘束姿勢計測システムの問題点を解決し、姿勢・歩行速度をより高精度で同時計測するために、2軸加速度センサ及びジャイロセンサを用いた新たな計測システムを考案し、ビデオ画像との同時記録により性能評価を行った。その結果、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り、実用上十分な性能を有していることが確認された。

今後、より実用化レベルへ移行するために、携帯記録ユニットを用いた無拘束計測システムとして完成させると共に、被験者の拘束感軽減のためにセンサと記録ユニット間のテレメータ化などを行うなど、より簡便なシステムとして完成させる予定である。

またその性能評価に際しては、若年者から高齢者まで広い年齢層を対象としたフィールド試用により姿勢及び歩行速度の計測精度を検証すると共に、歩行解析のために有用となる解析パラメータの洗い出しなどについても検討していく予定である。

文 献

- 1) 田井中幸司, 青木純一郎: 高齢女性の歩行速度の低下と体力, 体力科学, 51, 245/252 (2002)
- 2) A. Hendry, W. Gilchrist G. Duncan, A. L. Evans & D. C. Smith: Measurement of walking speed in elderly in-patients, Med. Biol. Eng. Comput., 28-6, 602/604 (1990)
- 3) S. Tanaka, K. Yamakoshi & P. Rolfe: New portable instrument for long-term ambulatory monitoring of posture change using miniature electro-magnetic inclinometers, Med. Biol. Eng. Comput., 33, 357/360 (1994)
- 4) 村田和香, 田中志信: 高齢障害者の活動性と役割意識との関係について—無拘束姿勢計測装置による解析結果をもとに—, 高齢者問題研究, 14, 11/18, (1998)
- 5) K. Aminian, P. Robert, E. E. Buchser, B. Rutschmann, D. Hayoz & M. Depairon: Physical activity monitoring based on accelerometry: validation and comparison with video observation, Med. Biol. Eng. Comput., 37-3, 304/308 (1999)
- 6) 岡久雄, 井上智紀: 3軸加速度センサによる身体活動モニタリング, 第13回生体・生理工学シンポジウム論文集, 331/334 (1998)
- 7) S. Miyazaki: Long-term unrestrained measurement of stride length and walking velocity utilizing a piezoelectric gyroscope, IEEE Trans. Biomed. Eng., 44-8, 753/759 (1997)
- 8) 根武谷晋, 山崎佐緒, 野越真理: 角速度および加速度センサを使用した歩幅と歩行速度の無拘束計測, 第15回生体・生理工学シンポジウム論文集, 233/236 (2000)
- 9) 佐川賢一, 佐藤 豊, 猪岡 光: 水平方向歩行距離の無拘束計測, 計測自動制御学会論文集, 36-11, 909/915 (2000)

Evaluation of a New Sensor System for Ambulatory Monitoring of Human Posture together with Walking Speed*

Kousuke MOTOI,** Shinobu TANAKA,*** Masamichi NOGAWA,† Ken-ichi YAMAKOSHI**

The measurement of physical activity is one of key subjects in fields like rehabilitation and gerontology. Moreover, ambulatory monitoring of changes in human posture in daily life will provide useful information for evaluating results obtained by Holter-type ECGs or ambulatory blood pressure monitors. From this viewpoint, several instruments have been developed which can estimate physical activity in daily life. For example, the Actigraph is a wrist-worn commercially available activity monitor that measures the movement of the subject's hand, and has been widely used for evaluating sleeping disorder. Another example is a system that measures acceleration of the thigh or waist using an accelerometer or gyroscope for rough estimation of a subject's behavior during daily life. However, these instruments have limitations for detailed analysis of posture change and cannot be used for the simultaneous measurement of walking speed, which is a useful index for evaluating the independence of elderly individuals. Taking these factors into consideration, we developed a new sensor system that accurately measures human posture together with walking speed. The system is composed of three accelerometers and one gyroscope. The accelerometers are for posture measurement, and are attached to the subject's waist, thigh and leg, respectively, so as to measure the angle in terms of gravitational direction of each part. The gyroscope measures the change in thigh angle when walking in order to estimate walking speed. The accuracy of the system for posture and walking speed measurements was experimentally evaluated using ten healthy male subjects. According to the results, it was clearly demonstrated that, using the system, human posture in the sagittal plane (± 180 deg) and walking speed (0.2 m/s-2.0 m/s) can be measured with reasonable accuracy, and that the system is a useful means for analyzing human activity during daily life.

* Received June 26, 2003 ; revised October 14, 2003.

** Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University

*** Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University

† Faculty of Engineering, Kanazawa University