小型3軸加速度計を用いた歩行時下腿運動分析の 再現性の検討

Investigation of the Reproducibility of a 3D Accelerometer-Based Gait Analysis System of the Tibia

桜井 進一^{1,2)} 坂本 雅昭²⁾ 中澤 理恵³⁾ 川越 誠¹⁾ 加藤 和夫¹⁾

SHINICHI SAKURAI^{1,2)}, MASAOKI SAKAMOTO²⁾, RIE NAKAZAWA³⁾, MAKOTO KAWAGOE¹⁾, KAZUO KATO¹⁾

¹⁾ Asakura Clinic, Seseragi Hospital: 249-1 Asakura-machi, Maebashi City, Gunma 379-2212, Japan.
TEL & FAX +81 27-265-6522

²⁾ Graduate School of Health Sciences, Gunma University

³⁾ School of Health Sciences, Gunma University

Rigakuryoho Kagaku 25(1): 7-12, 2010. Submitted Jul. 15, 2009. Accepted Aug. 24, 2009.

ABSTRACT: [Purpose] To determine the test-retest reliability of an accelerometer-based gait analysis system which measures 3D accelerations of the tibia. [Subjects] The study subjects were 10 healthy individuals. [Methods] Accelerations were measured during comfortable and regulated speed walking using a triaxial accelerometer mounted on the head of the fibula and lateral malleolus of the subjects. Peak acceleration, time from the initial contact to peak acceleration and acceleration at initial contact during the stance phase in each direction (vertical, anterior-posterior, and mediolateral) were analyzed. [Results] By the test-retest method the average of intraclass correlation coefficients (I.1), peak acceleration and time from the initial contact to peak acceleration of comfortable speed were better than those of regulated speed. [Conclusion] We conclude that these parameters have reasonable reliability and objectivity for evaluating abnormal motion and instability of the knee joint during comfortable walking.

Key words: small accelerometer, gait analysis, reproducibility

要旨:〔目的〕下腿部の小型3軸加速度計による歩行分析の再現性を検討すること〔対象〕健康成人10名を対象とした。〔方法〕3軸加速度計を足関節外果と腓骨頭部に設置し、自由歩行及び歩行率を規定した歩行において歩行分析を行い、立脚期における垂直方向、前後方向、側方方向のピーク加速度とその踵接地からの時間及び踵接地時の加速度を求めた。〔結果〕再テスト法による級内相関係数 (I.1) はピーク加速度及び踵接地からピーク加速度までの時間において規定歩行に比較し自由歩行で良好な再現性を示した。〔結語〕今回の加速度計を用いた自由歩行での歩行分析では、膝関節部の異常運動や不安定性の客観的評価指標として有用なパラメーターが得られると考えられた。

キーワード: 小型加速度計, 歩行分析, 再現性

¹⁾ 医療法人恵泉会 セセらぎ病院附属あさくら診療所: 群馬県前橋市朝倉町249-1 (〒379-2212) TEL & FAX 027-265-6522

²⁾ 群馬大学大学院 医学系研究科保健学専攻

³⁾ 群馬大学 医学部保健学科

受付日 2009年7月15日 受理日 2009年8月24日

I. 緒 言

現在、歩行分析の定量的解析を行える測定機器として床反力計や三次元動作解析装置などが臨床的に一定の評価を得ている¹⁾。しかし、これらの装置は高価で、機器の操作や解析処理が煩雑であり、さらに測定環境も限定されることにより臨床現場に広く浸透しているとは言いがたい。その一方で、近年加速度計の小型化が進み、そのコストや簡便な操作性からも臨床現場で実用性のある評価機器として使用されるようになってきている。

小型加速度計を用いた歩行評価の有用性は様々な方法や対象で検討されており²⁾、重心の近似部である腰椎部に加速度計を設置して歩行の対称性や円滑性を評価する方法³⁾だけでなく、運動時の下肢の動きを評価する方法としても注目され⁴⁾、変形性関節症患者^{3,5-8)}や膝前十字靭帯損傷患者⁹⁾の lateral thrust を代表とする下肢の異常運動の定量的評価の試みなどが行われている。また、筋電図やフットスイッチと比較した結果、加速度計によって得られる時間パラメーターについても、高い再現性と妥当性が得られたという報告もある¹⁰⁾。歩行時の下肢の異常運動の定量的評価が、加速度計を用いる事で臨床現場においても簡便に行えれば、理学療法評価及び治療効果の判定に大いに役立つと考えられる。しかし、加速度計による歩行分析の再現性については、腰椎付近に加速度計を装着した分析では良好な再現性が報告されているものの¹¹⁻¹³⁾、下肢に加速度計を装着した歩行分析の再現性の報告については散見される程度である^{14,15)}。さらに加速度は歩行速度の影響を受けやすいことから、歩行条件が再現性へ及ぼす影響についても検討が必要であると考えられる。

本研究の目的は、小型3軸加速度計を用いた歩行時の下腿運動分析の再現性を、異なる歩行条件で比較・検討し、その臨床的有用性を検討することである。

II. 対象と方法

1. 対象

対象者は健康成人10名（男性5名、女性5名）であり年齢は22～31歳（平均25.3歳）、体重48～86 kg（平均60.6 kg）、身長155～180 cm（平均168.6 cm）であった。被験者には、研究の内容、プライバシーの保護等に関して十分に説明をし、承認を得た。

2. 方法

今回使用した小型3軸加速度計は、MA3-04 Ac（マイクロスコーン（株））である。本センサは、外形寸法縦25 mm、横45 mm、高さ8 mm、重量4 gと小型軽量であり、圧電素子に歪みが生じた時に電荷を発生する圧電効果と呼ばれる原理を利用し、検出範囲 $\pm 40 \text{ m/s}^2$ （ $\pm 4G$ ）にて加速度を左右、上下、前後の3方向において測定することが可能である。木藤ら⁷⁾の方法を参考に、加速度センサを左足関節外果部と左腓骨頭部にそれぞれ固定した。センサの3方向が立位姿勢において前後方向、垂直方向、側方方向となる様に設置し、センサ部で測定したデータは、ベルトにて腰部に固定した無線型送信装置を経て、PCへリアルタイムに受信し取り込んだ。

足関節外果部の垂直方向センサによって下腿長軸方向の衝撃加速度をとらえ、踵接地期を同定し¹⁶⁾、腓骨頭部のセンサによって下腿近位部に加わる加速度を測定した。加速度センサからの出力はPCにてデータ解析ソフトMVP-RF-Sを用いて解析した。サンプリング周波数は100 Hzとした。

歩行条件は自由歩行速度（以下、自由歩行）、及び110 steps/minの歩行率（以下、規定歩行）で非測定肢より歩行を開始し14歩以上の歩行を行った。歩行は裸足とし、歩行順序の影響を考慮して自由歩行での測定を行った後に規定歩行での測定を行った。規定歩行ではメトロノーム音を用い、十分な練習をした後に測定に臨んだ。歩行開始時の加速、終了時の減速の影響を考慮し、各試行中の6歩、8歩、10歩目から得られた加速度波形を分析した。なお、各条件にて歩行路区間内の10 mに要した時間をストップウォッチにより測定し、歩行速度を算出した。

得られた前後、垂直、側方方向の加速度計波形を示す（図1）。なお、前後方向においては前方向が+、後方向が-、垂直方向においては上方向が+、下方向が-、側方方向においては外側が+、内側が-と規定した。

立脚期中の腓骨頭部センサにおける各方向の加速度波形より、以下の加速度パラメーター及び時間パラメーターを求めた。加速度パラメーターとして立脚期中の最大加速度（以下、+方向にて+max、-方向にて-max）及び踵接地時の加速度（以下、IC）を求めた。また側方方向においては進行方向や股関節の内外転運動の影響を受けやすい事を考慮し、より純粋な下腿部の側方動揺性を評価できる指標として、安永ら⁸⁾の方法を参考に腓骨頭部センサの加速度から同時期の外果部センサの加速度を減算した真の側方加速度を算出し、同様に+max、

図1 腓骨頭部から得られた各方向における加速度波形

−max, ICを求めた。また、時間パラメーターとして各方向の+max及び−maxにおける踵接地からの時間（以下、+maxT, −maxT）をそれぞれ求めた。

測定は各歩行条件で2回行い計6歩行周期を解析対象とし、各パラメーターについてその平均値を被験者の代表値とした。統計処理はSPSS（Ver11.0）を使用し、歩行速度の比較においては、対応のあるt検定を用い、加速度波形によるパラメーターの再現性には再テスト法を用いて級内相関係数ICC（1.1）を求めた。なお、有

意水準は危険率5%未満とした。

III. 結 果

歩行速度の平均は自由歩行で 1.25 ± 0.15 m/s, 規定歩行で 1.24 ± 0.12 m/sであり、両条件での歩行速度に有意な差は認められなかった。

各加速度パラメーター（+max, −max, IC）の再現性を表1に、時間パラメーター（+maxT, −maxT）の再現性を表2に示す。

再テスト法による加速度パラメーターにおけるICC（1.1）は、自由歩行において各方向のピーク加速度（+max, −max）で0.62～0.85（平均0.72）、ICで0.24～0.90（平均0.45）、規定歩行においてはピーク加速度で0.50～0.85（平均0.65）、ICで0.07～0.53（平均0.36）となり、全体の平均では規定歩行に比較して自由歩行にて高い再現性が得られた。またピーク加速度とICの比較では、いずれの歩行条件においてもピーク加速度で高い再現性が得られる傾向にあった。ピーク加速度のICCを測定方向で比較すると、自由歩行の各方向の平均では、前後方向0.79、垂直方向0.67、側方方向0.72、真の側方方向0.73、規定歩行の各方向の平均で、前後方向0.69、垂直方向0.67、側方方向0.64、真の側方方向0.58となった。

時間パラメーターにおけるICC（1.1）は、自由歩行の+maxT, −maxTの平均で0.34～0.97（平均0.67）、規定歩行で0.17～0.80（平均0.42）といずれの歩行条件で

表1 加速度パラメーターと級内相関係数

	自由歩行		規定歩行	
	加速度 (m/s ²)	ICC (1,1)	加速度 (m/s ²)	ICC (1,1)
前後方向				
+ max	18.91 ± 6.02	0.73	19.30 ± 4.24	0.53
− max	−22.01 ± 7.55	0.85	−22.87 ± 7.42	0.85
IC	5.02 ± 3.84	0.24	5.68 ± 2.16	0.07
垂直方向				
+ max	17.04 ± 4.19	0.67	17.74 ± 4.51	0.58
− max	−9.69 ± 2.68	0.67	−10.41 ± 3.90	0.76
IC	2.04 ± 3.19	0.36	2.40 ± 2.40	0.53
側方方向				
+ max	12.79 ± 6.16	0.81	13.90 ± 7.14	0.79
− max	−12.88 ± 5.33	0.62	−11.42 ± 2.86	0.50
IC	1.07 ± 5.37	0.90	−0.04 ± 2.84	0.48
真の側方方向				
+ max	26.55 ± 12.99	0.75	26.28 ± 11.52	0.66
− max	−19.54 ± 9.40	0.71	−16.90 ± 10.10	0.51
IC	1.67 ± 5.72	0.29	0.35 ± 4.44	0.35

表2 時間パラメーターと級内相関係数

	自由歩行		規定歩行	
	踵接地からの時間(s)	ICC(1,1)	踵接地からの時間(s)	ICC(1,1)
前後方向				
+ maxT	0.06 ± 0.02	0.60	0.06 ± 0.02	0.50
− maxT	0.14 ± 0.09	0.97	0.14 ± 0.06	0.33
垂直方向				
+ maxT	0.05 ± 0.02	0.77	0.05 ± 0.02	0.42
− maxT	0.09 ± 0.02	0.64	0.10 ± 0.02	0.39
側方方向				
+ maxT	0.07 ± 0.04	0.78	0.07 ± 0.04	0.80
− maxT	0.08 ± 0.03	0.64	0.10 ± 0.02	0.25
真の側方方向				
+ maxT	0.05 ± 0.02	0.63	0.06 ± 0.02	0.50
− maxT	0.06 ± 0.02	0.34	0.07 ± 0.02	0.17

もばらつきがみられた。測定方向の比較では、自由歩行での前後方向0.79、垂直方向0.70、側方方向0.71、真の側方方向0.48となり、規定歩行で前後方向0.41、垂直方向0.41、側方方向0.52、真の側方方向0.33となった。

IV. 考 察

今回の研究目的は、小型3軸加速度計を用いた歩行時の下腿運動分析の再現性を自由歩行と規定された歩行で比較し、その臨床的有用性を検討することである。

歩行速度の影響を受けやすいと考えられる加速度の測定において、その再現性を高める為に歩行速度を規定する必要性について検討しなくてはならないと思われる。そこで本研究では、歩行環境を限定することなく歩行速度を可能な限り規定する方法として、健常成人の普通歩行速度¹⁷⁾を参考に歩行率110 steps/minでの歩行をメトロノーム音に合わせて行う事で規定歩行として条件に加え、自由歩行速度との比較を行った。

桑原ら¹⁸⁾はICCの評価基準について、0.9以上を優秀、0.8以上を良好、0.7以上を普通、0.6以上を可能、0.6未満を再考としている。再現性検討の結果、各方向のピーク加速度ではICCが自由歩行にて0.62～0.85(平均0.72)であったのに対して、規定歩行にて0.50～0.85(平均0.65)と劣る結果であった。歩行速度が再現性に及ぼす影響について、Turcot¹⁵⁾はトレッドミルを用いて自由歩行速度と速い歩行速度での下腿部におけるピーク加速度のICCを算出し、自由歩行速度で0.64～0.92(平均0.83)、速い歩行速度で0.68～0.94(平均0.81)と歩行条件で有意差は認められなかったと報告している。

Kavanagh¹⁴⁾は自由歩行速度と速い歩行速度における加速度パラメーターはいずれも高い再現性を示し、特に速い歩行速度での再現性が高く、歩行速度が上がることで働く慣性力がその再現性に寄与している可能性があると報告している。本研究では両条件での歩行速度には有意差はなく、速度自体が再現性の違いに影響を及ぼしたとは考えにくい。歩行において下肢の動きは厳密に調整されていると言われており¹⁴⁾、自由歩行速度という条件でも一定の再現性が得られたと考えられる。逆に規定歩行においては、メトロノーム音に合わせて歩行を制御するという課題が、歩行の定常性に影響を及ぼしてしまった可能性も考えられる。垂直方向の−maxでは自由歩行と比較して、規定歩行でより高いICCを示す結果となったが、全体の傾向をみるとピーク加速度の計測においては自由歩行速度による測定が好ましいと考える。

ICにおけるICCは、自由歩行の側方方向0.90を除いて、いずれの歩行条件においても0.6未満の結果となった。踵接地とは遊脚期から立脚期へと歩行動作が転換する時期であり、下肢への床反力が生じることで下腿の運動方向や速度が急激に変化する瞬間である。よって、踵接地前後では単位時間での加速度の変化も大きくなると考えられ、踵接地という特定の時期においては十分な再現性が得られなかったと考えられる。加速度計による歩行時下肢運動分析の再現性については、ピーク値や実効値についての報告はみられるが^{12,14,19)}、踵接地や足尖離地などの特定の時期における加速度値の再現性を報告しているものは乏しく、評価指標として用いるにはさらなる検討が必要であると考えられる。

測定方向別の再現性の比較では、Kavanagh¹⁴⁾らは外果3 cm 上方における加速度の再現性は、垂直方向、前後方向、側方方向の順に高かったと報告し、Turcotら¹⁵⁾も、トレッドミルを用いて変形性膝関節症患者を対象に行った歩行分析にて、下腿部の加速度パラメータとしては側方方向の再現性がICC 0.64と最も乏しかったとしている。本研究では、各方向のピーク加速度のICCは自由歩行で0.62～0.85、規定歩行で0.50～0.85となり、いずれも側方方向の-maxにて最も低い値となった。安永ら⁸⁾は、膝関節固有の側方動揺性を評価するためには下腿部のみでなく、他部位での加速度計測と比較する事でより正確な評価が行えると報告している。よって、側方方向においては、腓骨頭部センサから外果部センサの加速度を減算して補正を行い、理論上の純粋な下腿の側方加速度を求めることにより高い再現性が得られるかを検討した。規定歩行では真の側方方向加速度の再現性はいずれも0.7未満と良好な再現性は認められなかったが、自由歩行では、真の側方方向-maxにてICC 0.71となり、側方方向のICC 0.62より高い再現性が得られた。よって、自由歩行での測定において、足部センサの加速度を用いて側方方向加速度を補正する方法は有効な解析方法と考える。

加速度計により得られた時間パラメータも歩行分析を行う上で有用なデータとなりうる。木藤ら⁷⁾は、膝OA群と健康者群で歩行分析を行い、歩行周期により時間の正規化を行った加速度波形から、踵接地後の加速度がピーク値に達するまでの時間を両群で比較検討し、膝OA群の特徴を報告している。今回は、データ処理の簡便性を考慮して、歩行周期による時間の正規化という煩雑な処理を行っていないものの、自由歩行では前後方向の平均0.79、垂直方向の平均0.70、側方方向の平均0.71といずれも良好な再現性が得られ、評価指標として有用な結果と考える。

加速度計は装着部位の加速度を直接測定できるため、ニュートンの運動方程式 $F = m\alpha$ (F : 力, m : 物体の質量, α : 加速度) より、装着部位に働く力を捉えている事となる。運動が直接測定でき、さらに小型で非拘束の測定が行えることから、歩行時の膝関節付近の異常運動のようなわずかな運動でさえも捉えられ、異常なメカニカルストレスを明らかにできる可能性がある⁷⁾。よって、その信頼性を明らかにすることで、日常診療で求められている簡便かつ客観性を有する動作分析ツールとしての役割を十分に果たす可能性を有している。

今回の結果からは、自由歩行の条件下でピーク加速度及び踵接地からピーク加速度に達するまでの時間に

において良好な再現性が得られ、速度を統制するなどの煩雑な手順を踏まずともlateral thrustやKnee in²⁰⁾に代表される視覚的・主観的な膝関節部の異常運動や動揺性を客観的に評価できる可能性があることが示唆された。しかし、加速度波形のみから歩行の評価を行う場合においては、歩行速度が留意すべき点として挙げられる。極端に歩行速度が低下した状態では、上下方向の加速度変化が乏しくなることで踵接地期の特定が困難となり¹⁾、時間因子に関わるパラメータの信頼性も低下すると考えられ、高齢者や著明な歩行障害を有する患者を対象とした評価においては、今回の分析方法の適用には十分な検討が必要と思われる。

引用文献

- 1) 高田耕太郎, 安保雅博: 小型三次元加速度計を用いた歩行評価の臨床的有用性の検討. 慈恵医大誌, 2004, **119**(5): 331-338.
- 2) Selles RW, Formanoy MA, Bussmann JB, et al.: Automated estimation of initial and terminal contact timing using accelerometers; development and validation in transtibial amputees and controls. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2005, **13**(1): 81-88.
- 3) 山田 実, 平田総一郎, 小野 玲・他: 体幹加速度由来歩容指標による歩容異常の評価. 理学療法学, 2006, **33**(1): 14-21.
- 4) Itoh T, Kumagai Y, Morioka I, et al.: Development of new instrument for evaluating leg motions using acceleration sensors. Environ Health Prev Med, 2007, **12**: 111-118.
- 5) Turcot K, Aissaoui R, Boivin MK, et al.: The responsiveness of three-dimensional knee accelerations used as an estimation of knee instability and loading transmission during gait in osteoarthritis patient's follow-up. Osteoarthritis Cartilage, 2009, **17**: 213-219.
- 6) 野見山宏, 緒方公介, 安永雅克: 膝関節における側方加速度の再現性とinsoleの効果について. 整形外科と災害外科, 1993, **42**(3): 1041-1047.
- 7) 木藤伸宏, 島澤真一, 弓削千文・他: 加速度センサを用いた変形性膝関節症の歩行時下腿運動分析. 理学療法学, 2004, **31**(1): 86-94.
- 8) 安永雅克, 緒方公介, 野見山宏: 変形性膝関節症における膝関節側方動揺性の加速度解析. 臨整外, 1994, **29**(7): 841-846.
- 9) Yoshimura I, Naito M, Zhang J: Lateral thrust of anterior cruciate ligament-insufficient knees and posterior cruciate-insufficient knees. International Orthopaedics, 2002, **26**(5): 303-305.
- 10) Saremi K, Marehbian J, Yan X, et al.: Reliability and validity of bilateral thigh and foot accelerometry measures of walking in healthy and hemiparetic subjects. Neurorehabil Neural Repair, 2006, **20**(2): 297-305.
- 11) 田中尚文, 園田 茂, 村岡慶裕・他: 小型加速度計による歩行分析の再現性および妥当性の検討. リハビリテーション医学, 1996, **33**(8): 549-553.
- 12) Henriksen M, Lunda H, Moe-Nilssen R, et al.: Test-retest reliability of trunk accelerometric gait analysis. Gait Posture, 2004, **19**(3):

- 288-297.
- 13) Moe-Nilssen R: A new method for evaluating motor control in gait under real-life environmental conditions. Part 2: gait analysis. *Clin Biomech* (Bistol, Avon), 1998, **13**(4-5): 328-335.
- 14) Kavanagh JJ, Morrison S, James DA: Reliability of segmental accelerations measured using a new wireless gait analysis system. *J Biomech*, 2006, **39**(15): 2863-2872.
- 15) Turcot K, Aissaoui R, Boivin K, et al.: Test-retest reliability and minimal clinical change determination for 3-dimensional tibial and femoral accelerations during treadmill walking in knee osteoarthritis patients. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, **89**(4): 732-737.
- 16) Selles RW, Formanoy MA, Bussamann JB, et al.: Automated estimation of initial and terminal contact timing using accelerometers; development and validation in transtibial amputees and controls. *IEEE Trans Neural Sys Rehabil Eng*, 2005, **13**(1): 81-88.
- 17) 窪田俊夫, 土田隆政: 健常者の歩行時間・距離因子に影響を与える要因—計測条件について—. *バイオメカニズム学会誌*, 2000, **24**(2): 107-114.
- 18) 桑原洋一, 斎藤俊弘, 稲垣義明: 検者内および検者間の Reliability (再現性, 信頼性) の検討. *呼吸と循環*, 1993, **41**(10): 945-952.
- 19) Turcot K, Aissaoui R, Bovin K, et al.: Three-dimensional pattern of knee linear accelerations during treadmill walking on an asymptomatic and osteoarthritis populations. *Gait Posture*, 2006, **24**(Suppl 2): 144-146.
- 20) 川野哲英: ダイナミック・アライメント. *トレーニング・ジャーナル*, 1992, **14**: 84-85.