

原著論文

受付：2015. 9.18

受理：2016. 1.18

方向転換動作に伴う頭部・体幹・骨盤の回旋運動に対する6軸センサの信頼性についての研究

仁 木 淳 一

水谷病院 リハビリテーション科

浅 井 友 詞

日本福祉大学 健康科学部

名古屋市立大学大学院 医学研究科 リハビリテーション医学分野

杉 山 文

医療社団法人 盛翔会 浜松北病院 診療技術部 リハビリテーション科

森 本 浩 之

水谷病院 リハビリテーション科

名古屋市立大学大学院 医学研究科 リハビリテーション医学分野

Everett B. Lohman , Eric G. Johnson, 柏 直 子

School of Allied Health Professions, Loma Linda University

和 田 郁 雄

名古屋市立大学大学院 医学研究科 リハビリテーション医学分野

The reliability of 6-axial sensor for body segmental movement of head,
trunk and pelvis during straight walking and turning

Junichi Niki

Department of physical therapy, Mizutani hospital

Yuji Asai

Faculty of Health Sciences, Nihon Fukushi University

Department of Rehabilitation Medicine, Nagoya City University Graduate School of Medical Sciences

Fumi Sugiyama

Department of physical therapy, SEISYOUKAI of Hamamatsu-kita hospital

Hiroyuki Morimoto

Department of physical therapy, Mizutani hospital

Department of Rehabilitation Medicine, Nagoya City University Graduate School of Medical Sciences

Everett B. Lohman , Eric G. Johnson, Naoko Kashiwa

School of Allied Health Professions, Loma Linda University

Ikuo Wada

Department of Rehabilitation Medicine, Nagoya City University Graduate School of Medical Sciences

Abstract:

BACKGROUND: Turning has frequent occurrence in activities of daily living. Accelerometer and gyroscope are relatively simple instruments that have been used for the analysis of straight walking. However, the reliability of this technology in the measurement of turning has not clear in previous studies. The purpose of this study was to examine the reliability of tri-axial accelerometer and gyroscope (6-axial sensor).

METHODS: Participants walked a straight ahead approximately 3 m to reach the turning zone, and then turned off at an angle 180 degree to their left. We used 6-axial sensor and 3D motion analysis system for measuring angle displacement of each body segments (head, trunk and pelvis) during straight walking and turning.

RESULTS: There were good correlations between the angle displacement of head, trunk and pelvis during turning (ICC3.1 0.97 to 0.99; $P < 0.05$).

CONCLUSION: The 6-axial sensor had good reliability for measuring angle displacement of each body segments during straight walking and turning. This instrument is low cost and portable system, thus this system could be useful for monitoring walking, turning and other daily activities in clinical setting.

Keywords: 方向転換, 歩行, 6軸センサ, ジャイロセンサ, 信頼性

1. はじめに

我々は移動手段として歩行動作を日々活用している。さらに日常では、直線的に歩くだけではなく、視覚情報から瞬時に周囲の状況を判断し、身体の回旋運動をさせながら様々な方向へと進路を変えている。

通常、我々が移動中に方向転換を意識することは少ないが、方向転換の頻度は歩行中の35-45%と報告されている¹⁾。さらに、近年では転倒の発生因子としても挙げられ、方向転換に関する研究が増加している^{2-4, 10, 12-14)}。その中でも、方向転換中の頭部および眼球の動きに注目している研究は多く²⁻⁴⁾、Patla²⁾や Vallisら³⁾は頭部回旋が先行することで重心移動制御を補い方向転換を円滑にしていると結論づけている。また、Imaiら⁴⁾は歩行および方向転換中には眼球と頭部および体幹が相対的かつ不随意に動き、この相対的運動には視覚系、前庭系、体性感覚系による反射レベルでの制御が関与しているとの見解を示している。歩行中の姿勢制御には前庭動眼反射 (Vestibulo Ocular Reflex, 以下: VOR)、前庭脊髄反射 (Vestibulo Spinal Reflex, 以下: VSR) が主として関与している。VORは頭部と眼球の協調運動に働き、歩行中に上下、左右、前後に移動する頭部に対し、眼球が相対的に運動することで動体視力を安定させている^{5, 6)}。VSRは歩行中に加わる頭部の動揺に対し、体幹および下肢の筋が収縮することで頭部を空間的に安定させている⁷⁻⁹⁾。

一方、高齢者においてはVOR、VSRの低下により動体視力も低下するとされている。Cromwellら¹⁰⁾は高齢者の歩行中の頭部および体幹の相対的運動を評価し、

若年者と比較すると運動範囲が減少していると報告しており、この減少は加齢によって低下した視覚機能や前庭機能を補うための姿勢戦略であると述べている。さらに、Wrightら¹¹⁾は立位での方向転換動作を転倒群と非転倒群で比較し、転倒群は頭部、体幹の回旋運動が減少することを明らかにし、転倒リスクの予測因子に成り得ることを示唆しており、頭部の動きと方向転換は深く関連していると考えられる。したがって、方向転換中の頭部および体幹の回旋運動の分析は、高齢者の前庭機能を評価する指標として重要であると考えられる。

一方、方向転換動作と回旋運動に着目した研究は、そのほとんどが三次元動作解析装置を用いて報告されている¹²⁻¹⁴⁾。三次元動作解析装置は高価であり、環境が制約されることや準備に時間が掛かるなどの要因で、臨床応用が困難であると指摘されている¹⁵⁾。そこで近年、加速度センサやジャイロセンサが安価で環境に制約されない利点によって歩行分析などに応用され、その精度を示す報告もある^{16, 17)}。さらに、Spainら¹⁸⁾は多発性硬化症患者を対象に、加速度センサとジャイロセンサが搭載された小型無線式センサを用いて方向転換中における体幹回旋運動を計測している。しかし、方向転換などの不規則な動作に対する加速度センサやジャイロセンサの信頼性は明らかにされていないのが現状である。そこで本研究では、ジャイロセンサが搭載された小型無線式センサを使用し、方向転換動作時の頭部、体幹、骨盤の回旋運動に対する信頼性について明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 対象

対象は健常若年男性 13 名であり，平均年齢 20.5 ± 1.5 歳，平均身長 170.7 ± 4.1 cm，平均体重 60.9 ± 6.2 kg，平均 Body Mass Index 20.9 ± 2.1 kg/m²，であった．対象者には，測定に先立ち本研究の主旨および目的，計測によるリスク，参加の自由など倫理的配慮について口頭および書面にて説明し，同意を得た．

2.2 使用機器

計測には 3 軸の加速度計と 3 軸のジャイロセンサが搭載された小型無線ハイブリッドセンサ WAA-010 (ワイヤステクノロジー社製，東京) (以下：6 軸センサ) と三次元動作解析システム VICON Nexus-1.3.106 (VICON 社製，Oxford, UK) (以下：VICON) を使用した．6 軸センサには圧センサ (Mega Electronics 社製，フィンランド) と 2 台の家庭用ビデオカメラを同期させ，VICON には床反力計 (AMTI 4 社製，米国) を同期させた．6 軸センサおよび圧センサと家庭用ビデオカメラの取り込みソフトウェアは Sync-Record (ATR-Promotions 社製，京都) を使用した．サンプリング周波数は 6 軸センサ，VICON，圧センサ，床反力計ともに 200 Hz に設定した．6 軸センサの装着部位は頭頂 (頭部)，Th1 棘突起 (体幹)，S1 正中仙骨稜 (骨盤) とし，圧センサは右踵部足底面に貼付した．さらに，赤外線反射マーカーを VICON Plug-In-Gait モデルに準じて，C7，Th10，右肩甲骨中央，頸切痕，剣状突起，上腕骨外側上顆，橈骨・尺骨茎状突起，第 2 中手骨頭 (手背)，上前腸骨棘，上後腸骨棘，大腿骨外側上顆，上前腸骨棘と大腿骨外側上顆の間の遠位 1/3，外果，第 2 中足骨頭，踵骨，大腿骨外側上顆と外果の遠位 1/3，頭部に貼付した．

2.3 実験手順

歩行路は VICON スタジオ内に 3 m の直線路を設け，3 m 地点に方向転換の指標を被験者の目線の高さに合わせて設置した．2 台の家庭用ビデオカメラは，指標から 2.5 m 先の直線方向と 90 度横方向に設置した．

歩行速度は自由快適速度とし，計測回数は 10 回とした．計測は 2 人の検者で行い，6 軸センサと

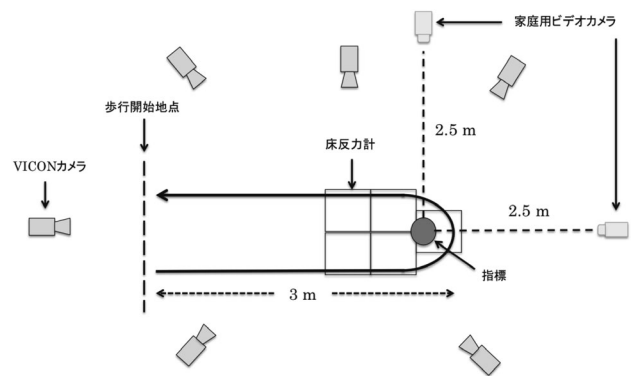


図1 実験手順

VICON をそれぞれの検者が操作し，キャリブレーションは計測直前に静止立位で行った．被験者は計測を開始する前に練習を 5 回行った後，歩行開始地点に立ち，検者の合図とともに右下肢から振り出し，3 m 歩行路を直線的に歩き，指標が設置してある地点で左方向へ 180 度方向転換後，開始地点まで戻り停止した (図 1)．

2.4 解析方法

VICON と 6 軸センサの同期は，圧センサと床反力計データを使用し Excel 上で行った．まず，6 軸センサと同期している家庭用ビデオカメラを確認し，スタート地点から床反力計を踏むまでの歩数を計測した．その歩数と圧センサ入力回数を照合し，床反力データが入力された地点より，両機器の時系列データを同期させた．計測した回数 10 回のうちランダムに 1 つ採用し，そのデータを解析した．また，今回使用した VICON のカメラは 6 台であったため，検出できる範囲が床反力計の周囲に限られた．そこで解析範囲は VICON，6 軸センサの両機器の同期点から 2 秒間とし，6 軸センサに搭載されているジャイロセンサから検出された各部位の水平回旋角速度 (頭部 z 軸・体幹 y 軸・骨盤 y 軸) を定積分し，水平回旋角度を算出した．

VICON から検出された時系列データは Butterworth filter ソフト VICON Nexus-1.7.1 (VICON 社，Oxford, UK) にてローパスフィルターを行い，6 軸センサは Excel マクロにて処理し，それぞれの遮断周波数は 6 Hz とした．さらに，両データにオフセットをかけ，同期点を 0 とした．

2.5 統計処理

本研究では、対馬¹⁹⁾やKolber²⁰⁾らの報告を参考に VICON と 6 軸センサをそれぞれ検者とみなし、またそれぞれの機器の特性からバイアスが発生する可能性を考慮して級内相関係数 (intra-class correlation coefficient, 以下: ICC_{3,1}) を使用した。統計ソフトは R コマンドーを使用し、VICON と 6 軸センサ間の頭部、体幹、骨盤における角度変位を比較し、両機器間の ICC_{3,1} を算出した。

3. 結果

各被験者にて、6 軸センサと VICON から算出された頭部、体幹、骨盤の回旋角度は方向転換開始から 2 秒間で近似した時系列変化を示した (図 2)。さらに、両機器間の ICC_{3,1} の平均値は、頭部は 0.97-0.99、体幹 0.93-0.99、骨盤 0.95-0.99 と各部位ともに高い信頼性を示した (表 1)。

4. 考察

4.1 6 軸センサの信頼性

我々は 6 軸センサに搭載されたジャイロセンサと VICON を併用して方向転換中の頭部、体幹、骨盤の回旋角度変位を比較し、臨床研究での信頼性について検討した。結果は両機器間で高い相関を示し、ジャイロセンサは方向転換時の回旋運動にも有用であることが示唆された。先行研究においても、ヒトを対象に小型ジャイロセンサを使用し、歩行中の関節角度変位や歩行周期の算出などに応用した精度検証に関する報告がされている^{15-17, 21, 22)}。いずれも下肢に着目した検証が多く、Tongら²¹⁾は大腿と下腿にジャイロセンサを

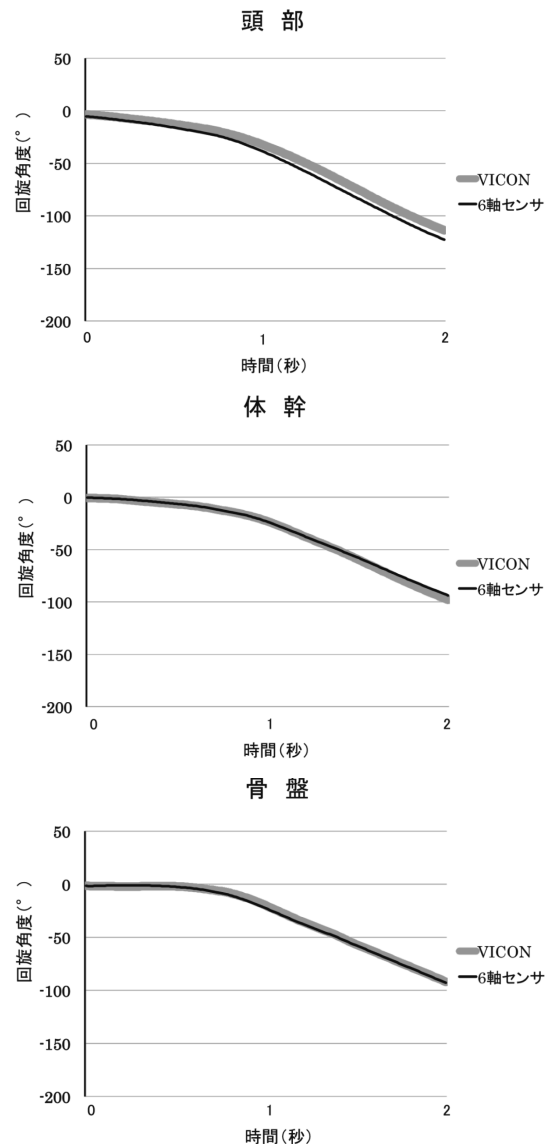


図 2 角度変位結果

表 1 ICC 結果

被験者	信頼性					
	頭部		体幹		骨盤	
	ICC _{3,1}	95%信頼区間	ICC _{3,1}	95%信頼区間	ICC _{3,1}	95%信頼区間
1	0.99	0.9992-0.9995	0.99	0.9922-0.9951	0.99	0.9979-0.9987
2	0.99	0.9985-0.9989	0.99	0.9983-0.9988	0.99	0.9962-0.9975
3	0.98	0.9828-0.9881	0.99	0.9917-0.9943	0.97	0.9738-0.9819
4	0.99	0.9974-0.9984	0.99	0.9993-0.9995	0.99	0.9967-0.9980
5	0.99	0.9994-0.9996	0.99	0.9972-0.9983	0.99	0.9984-0.9990
6	0.97	0.9763-0.9828	0.97	0.9764-0.9829	0.97	0.9691-0.9776
7	0.99	0.9997-0.9998	0.99	0.9976-0.9983	0.99	0.9983-0.9989
8	0.98	0.9780-0.9850	0.93	0.9211-0.9457	0.95	0.9398-0.9587
9	0.99	0.9993-0.9995	0.99	0.9936-0.9956	0.99	0.9936-0.9957
10	0.99	0.9996-0.9997	0.99	0.9888-0.9921	0.99	0.9964-0.9974
11	0.98	0.9855-0.9897	0.97	0.9685-0.9777	0.97	0.9688-0.9779
12	0.99	0.9893-0.9924	0.97	0.9746-0.9821	0.98	0.9795-0.9855
13	0.99	0.9991-0.9994	0.99	0.9885-0.9916	0.99	0.9931-0.9950

取り付け、各部位から検出される角速度とそこから算出される傾斜角度、さらに大腿と下腿の傾斜角度から膝関節角度を算出し、三次元動作解析装置から示された関節角度と高い信頼性があったと報告している。また、Aminan ら²²⁾はジャイロセンサを用いて歩行周期中の heel-strike と toe-off のタイミングを計測するため、同時にフットセンサを併用して両機器間のタイミングに有意差はなかったと報告している。しかし、これらの先行研究はあくまでも直線歩行中の膝関節角度変位やケイデンスおよび歩幅に対するジャイロセンサの信頼性を証明したものであり、歩行周期中の頭部や体幹の回旋運動に関しては述べられていない。本研究では、6軸センサにフットセンサを同期したことで heel-strike と toe-off を明確に判断することができ、それぞれの歩行周期における各身体部位の動きを把握することが可能となった。さらに、歩行だけでなく方向転換中の頭部、体幹、骨盤の回旋角度変位に高い信頼性があったことから、より詳細な身体運動の分析にも有用であると考えられる。

4.2 ドリフトによる問題

今回の研究でジャイロセンサの信頼性が示されたが、その一方でジャイロセンサにはドリフト現象による問題点が挙げられている²²⁻²⁴⁾。今回、我々は VICON と比較するためジャイロセンサから検出された角速度を定積分し、角度変位を算出した。先行研究によると、ジャイロセンサは温度や微小な振動によってドリフト現象が発生するとされている。このドリフト現象は積分によって角度を算出した場合に影響しやすく、計測時間の延長に伴って誤差が増加すると報告されている²²⁻²⁴⁾。さらに現在、使用されているジャイロセンサは振動式が主要となっているが、Aminan ら²³⁾によると振動式ジャイロセンサは感度が高いためドリフト現象に影響がおよびやすく、これらの誤差に対し複雑な補正方法を用いる必要があると報告している。しかし、今回我々はドリフト現象などの誤差に対する補正を行わなかったにも関わらず、高い精度で計測することができた。その理由として、解析範囲が2秒間と先行研究よりも短い時間であったため誤差が少なかったと考えられる。また Luinge ら²⁴⁾も1分以内であればドリフトの影響による誤差は少ないと報告していることから、短時間であればドリフト現象に対する補正は必要

ないと考えられる。

4.3 今後の展望

今回、我々が使用した6軸センサは環境に制限されないことや比較的安価に購入ができる利点に加え、我々の研究結果により、方向転換中の頭部、体幹、骨盤の回旋運動の分析にも有用であることが示唆された。しかし、本研究の限界として、回旋運動のタイミングや下肢との関連性は調査できていないため、今後は解析方法を再考したうえで更なる検証が必要である。また、高齢者や脳卒中患者を対象に頭部、体幹、骨盤の回旋運動のタイミングを分析していくとともに回旋運動時の身体動揺を分析し、歩行や日常生活動作の安定性の評価、さらに治療プログラムの立案へ役立てていきたい。一方では、投球やバッティングなどスポーツ分野における動作分析にも活用できる可能性があり、幅広い分野への発展が期待できると考える。

5. 結論

方向転換動作中の頭部、体幹、骨盤の回旋運動における6軸センサの信頼性について検証した。VICON と6軸センサの回旋角度に妥当性の高い級内相関係数が認められ、6軸センサは方向転換動作のような不規則な動作においても有用であることが示唆された。したがって、脳卒中患者はもとより高齢者を対象とした日常生活動作の分析やスポーツ動作の分析にも応用が期待できると考えられる。

引用文献

- 1) Glaister BC, Bernatz GC, et al: Video task analysis of turning during activities of daily living. *Gait posture*, 25, pp. 289-294 (2007)
- 2) Patla AE, Adkin A, et al: Online steering: coordination and control of body center of mass, head and body reorientation. *Exp Brain Res*, 129, pp. 629-634 (1999)
- 3) Vallis LA, Patla AE, et al: Control of steering in the presence of unexpected head yaw movements. Influence on sequencing of subtasks. *Exp Brain Res*, 138, pp. 128-134 (2001)
- 4) Imai T, Moore ST, et al: Interaction of the body, head, eye during walking and turning. *Exp Brain*

- Res, 136, pp. 1-18 (2001)
- 5) Grossman GE, Leigh RJ, et al: Performance of the human vestibuloocular reflex during locomotion. *J Neurophysiol*, 62, pp. 264-272 (1989)
 - 6) Moore ST, Hirasaki E, et al: Effect of viewing distance on the generation of vertical eye movements during locomotion. *Exp Brain Res*, 129, pp. 347-361 (1999)
 - 7) Pozzo T, Beryhoz A, et al: Head stabilization during various locomotor tasks in humans, . Normal subjects. *Exp Brain Res*, 82, pp. 97-106 (1990)
 - 8) Pozzo T, Beryhoz A, et al: Head stabilization during various locomotor tasks in humans, . Patients with bilateral peripheral vestibular deficits. *Exp Brain Res*, 85, pp. 208-217 (1991)
 - 9) Kavanagh J, Barrett R, et al: The role of the neck and trunk in facilitating head stability during walking. *Exp Brain Res*, 172, pp. 454-463 (2006)
 - 10) Cromwell RL, Newton RA, et al: Influence of Vision on Head Stabilization in Older Adults During Walking. *J Gerontology*, Vol. 57A, No. 7, pp. M442-M448 (2002)
 - 11) Wright RL, Peters DM, et al: Differences in axial segment reorientation during standing turns predict multiple falls in older adults. *Gait & posture*, 36, pp. 541-545 (2012)
 - 12) Akram SB, Frank JS, et al: Coordination of segments reorientation during on-the spot turns in healthy older adults in eyes-open and eyes-closed conditions. *Gait & posture*, 32, pp. 632-636 (2010)
 - 13) Akram SB, Frank JS, et al: Effects of walking velocity on segment coordination during pre-planned turns in healthy older adults. *Gait & posture*, 32, pp. 211-214 (2010)
 - 14) Spildooren J, Vercruyse S, et al: Freezing of Gait in Parkinson's Disease: The Impact of Dual-Tasking and Turning. *Movement Disorders*, 25 (15), pp. 2563-2570 (2010)
 - 15) Mayagoitia. RE, Nene. AV, et al: Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems. *Journal of Biomechanics*, 35, pp. 537-542 (2002)
 - 16) Hongyin Lau, Tong Kaiyu, et al: The reliability of using accelerometer and gyroscope for gait even identification on persons with dropped foot. *Gait & Posture*, 27, pp. 248-257 (2008)
 - 17) Williamson R, Andrews B. J: Detecting absolute human knee angle and angular velocity using accelerometers and rate gyroscopes. *Med Biol Eng Comput*, 39(3), pp. 294-302 (2001)
 - 18) R. I. Spain, St. R. J. George, et al: Body-worn motion sensors detect balance and gait deficits in people with multiple sclerosis who have normal walking speed. *Gait & Posture*, 35(4), pp. 573-578 (2012)
 - 19) 対馬栄輝 : SPSS で学ぶ医療系データ解析. 東京図書, pp. 195-214 (2007)
 - 20) Morey J. Kolber, William J. Hanney: THE RELIABILITY AND CONCURRENT VALIDITY OF SHOULDER MOBILITY MEASUREMENTS USING A DIGITAL INCLINOMETER AND GONIOMETER: A TECHNICAL REPORT. *Int J Sports Phys Ther*, 7(3), pp. 306-313 (2012)
 - 21) Brian Coley, Bijan Najafi, et al: Stair climbing detection during daily physical activity using a miniature gyroscope. *Gait & Posture*, 22, pp. 287-294 (2005)
 - 22) Tong Kaiyu, Granat MH: A practical gait analysis system using gyroscopes. *Med Eng Phys*, 21 (2), pp. 87-94 (1999)
 - 23) K. Aminian, B. Najafi, et al: Spatio-temporal parameters of gait measured by an ambulatory system using miniature gyroscopes. *J Biomechanics*, 35, pp. 689-699 (2002)
 - 24) H. J. Luinge, P. H. Veltink: Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers. *Med Biol Eng Comput*, 43(2), pp. 273-82 (2005)