

歩行分析における加速度センサの適用

浅井 剛 PT, MS

神戸学院大学 総合リハビリテーション学部

医療リハビリテーション学科

土井 剛彦 PT

神戸大学大学院医学系研究科

[要約] 近年のセンサ製造技術の発展によって、安価で信頼性の高い小型加速度センサの製造が可能となり、加速度センサは動作分析用機器として広く用いられるようになってきた。加速度センサは、動作分析に必要な特徴を数多く備えており、動作分析における最適な装置として注目されている。加速度センサによる代表的な動作分析の一つに歩行分析がある。加速度センサを用いた歩行分析では、一般的歩行指標（歩行スピードや歩行周期）だけでなく、今まで評価が困難であった歩行の規則性や両側下肢動作の対称性などの定量化が可能で、高齢者の歩容異常を多面的に評価することが可能である。本論文の目的は、医学的リハビリテーション領域での加速度センサを用いた歩行分析の結果を把握し、今後の歩行分析における加速度センサの可能性について検討することである。

キーワード：加速度センサ、歩行分析、高齢者

I 背景と目的

人を対象とした動作分析に、加速度センサが初めて用いられたのは1950年代の初頭である[1]。当時の加速度センサは、高価で信頼性が低く、大型であったために人の動作を測定する機器として問題が多かった[2]。しかし、近年のセンサ製造技術の発展によって、安価で信頼性の高い小型加速度センサの製造が可能となり、加速度センサは動作分析用機器として広く用いられるようになってきた。

加速度センサは、動作測定装置として多くの利点を有する[2-7]。加速度センサは、その感度の高さから、動作時に生じる僅かな力学的変化を感知することができ、様々な動作に適用可能である[3-7]。また、環境の制限を受けず長時間に亘る動作の計測が可能で、臨床的な計測を容

易に行うことができる[2]。このように、加速度センサは、動作分析に必要な特徴を数多く備えており、動作分析における最適な装置として注目されている。

加速度センサによる代表的な動作分析に歩行分析がある。加速度センサを用いた歩行分析では、一般的歩行指標（歩行スピードや歩行周期）だけでなく、今まで評価が困難であった歩行の規則性や両側下肢動作の対称性などの定量化が可能で、高齢者の歩容異常を多面的に評価することが可能である[1, 3, 8-11]。この歩行能力の定量化における可能性の高さから、加速度センサは歩行分析における研究可能性を拡大させる機器として期待されている。

本論文の目的は、医学的リハビリテーション領域での加速度センサを用いた歩行分析の結果を把握し、今後の歩行分析における加速度センサの可

能性について検討することである。歩行分析における加速度センサの適用について俯瞰することは、今後の研究方向性を検討する上で意義があると考えられる。

Ⅱ 加速度センサを用いた歩行分析の信頼性・妥当性

臨床における歩行能力評価は、臨床経験の豊富な理学療法士やその他の職種によって行われることが多い。しかし、これらの評価は主観的かつ質的な評価であるために一貫性がなく、また経験の浅い理学療法士による評価では重要な問題を捉えきれないという欠点を有する [12-14]。したがって、障害構造が複雑な高齢者を対象とした歩行分析においては、問題点の正確な把握という観点から、客観的で信頼性の高い評価を行うことが望ましいと考えられている。

加速度センサは、歩行動作を捉えるのに最も適した測定機器の一つで、歩行装置としての検査の信頼性、妥当性が多くの論文で確認されている [8, 15-18]。

健常者を対象に自由歩行条件での検討を行った報告では、加速度センサを用いた歩行分析ユニット (IDEAA) が spatiotemporal gait parameter の評価において高い信頼性を有することが認められている [15]。また、歩行スピードを変化させた報告では、加速度センサを用いた歩行分析は、歩行路歩行およびトレッドミル歩行の両者で高い信頼性と妥当性を有することが確認されている [8, 16, 17]。さらに、Functional electrical stimulation への適用を目的として、自由歩行、歩行スピードの変化した歩行、片麻痺症状を模倣した歩行、の三条件を比較検討した報告では、加速度センサは Functional electrical stimulation に適用するセンサとして妥当性が高い、と述べられている [18]。

これらの報告から、加速度センサを用いた歩行分析装置は、信頼性・妥当性の高い指標を示すことが可能で、様々な障害を有する患者に対しても適用可能だと考えられている。

Ⅲ 加速度センサを用いた歩行分析から得られる指標

歩容異常の定量化は、障害構造の把握や最適なリハビリテーションプログラムの選択に欠かせないものである。加速度センサによる歩行分析は、歩行の様々な側面を定量的に評価することができ、歩容異常の潜在的な要因を明らかにする可能性を有する [3, 8, 9, 11, 19-24]。

加速度センサから得られるデータを基にした解析方法、指標には様々なものがある。加速度センサの Raw data を用いて算出される指標としては、データの散布の程度となる root mean square (RMS) が代表的で、RMS の値が大きいほど、動揺の程度が大きく、不安定な歩行であると報告されている [8, 9, 19]。

周波数解析を用いて算出される指標 (frequency domain) としては、歩行の滑らかさやリズムを示す Harmonic ratio (HR) が挙げられる [3, 11]。HR は、歩行周期と一致する加速度信号の component と、それ以外の歩行周期と一致しない加速度信号の component との比で、その値が大きいほど、歩行周期と一致した加速度波形が多く、滑らかな歩行であると報告されている。

統計学的手法を用いて算出される指標としては、自己相関係数 (auto correlation: AC) が頻繁に用いられている。加速度センサを用いた歩行解析において AC は、解析対象とするデータ系列を 1 step または 1 stride にかかる時間分ずらし、元のデータ系列との相関関係を算出するもので、AC の値が 1 に近い程、左右脚の対称性がよく、規則正しい歩行であると報告されている [3, 20]。

対数尤度解析に基づいて算出される指標としてはApproximate Entropy (ApEn) があり、ApEnの値が2に近づくほど、加速度波形の規則性が失われて、不規則な歩行であると報告されている [21-24]。

このように加速度センサを用いた歩行分析では、歩行の様々な側面の定量的評価が可能である。しかし、その方法論には議論の余地が残されており、今後の更なる検討が必要である。

IV 健常高齢者の歩行

加齢が歩行に及ぼす影響は複雑かつ多面的で、臨床では加齢に伴う歩容変化を客観的に示すことのできる歩行分析装置が必要とされている [25]。また、計測が簡便で被検者への負担が少ないことや日常生活に近い環境下での測定が可能であることなどが重要とされ、これらの条件を満たす測定機器として加速度センサが広く用いられている [3, 9, 19, 22-24, 26]。

健常者を対象に加齢および性差の影響を検討した疫学的報告では、加速度センサによって得られた歩行指標の一部 (ストライドの頻度: Stride frequency、ステップの対称性: Step symmetry、ストライドの規則性: Stride regularity、鉛直方向のpower spectrum: vertical harmonic) は性別によって影響を受けるが、年齢には影響を受けないことが示されている。他方、その他の歩行指標 (歩行速度、ストライド幅、cranial-caudal activity、raw accelerations at heel contact, mid-stance and initial contact) は、年齢および性差に依存し、男性ではこれらの指標が女性よりも有意に大きいとされている。また、これらの指標のうち歩行速度は、女性では60歳を超えた時点で、男性では50歳を超えた時点から低下すると述べられている [3]。

高齢者の歩容変化に関する検討では、高齢者は歩行スピード、歩幅、ケデンスが小さくなった歩

容、“conservative gait pattern” に変化し、歩行時の体幹と頭部における加速度軌跡の振幅を小さくしていると報告されている [3, 9, 26]。この関連性から、この歩容変化は加齢による身体機能低下、特に下肢筋力の低下によって生じる平衡機能低下を代償するための歩行戦略であることが示唆されている。また、高度な姿勢制御が要求される不整地での歩行分析では、不整地歩行では体幹の加速度軌跡の振幅は大きくなるが、頭部の加速度軌跡の振幅は整地歩行と同程度であったことが示されている [19]。この結果から、年齢に関係なく、歩行中は“頭部の安定化”を優先させた姿勢制御を行っていることが示唆されている。

高齢者の歩容変化を示す要因の一つとして、体幹機能の低下が挙げられている [22-24]。高齢者と若年者の歩行中の加速度変化を計測した報告では、体幹の加速度波形と頭部の加速度波形の間の位相差は高齢者で有意に小さいことが示されている。この結果から、高齢者では、体幹の柔軟性の低下 (体幹の剛性の高まり) により、体幹から頭部へ到達する力学的変化を体幹で減衰できず、歩行によって生じる衝撃が頭部に到達し易いと考えられている。

加速度センサを用いた健常高齢者の歩行分析を行った研究の多くは、歩行指標や身体機能低下について健常若年者との比較するに留まっている。しかし、身体機能異常や疾患を有しない高齢者にも歩容変化が見られるという報告もあり、高齢者の歩行分析では身体機能以外の要因についても考慮されるべきだと考えられている [27-29]。

身体機能以外の要因により生じる歩容変化を捉えるには、平均値から算出する歩行指標 (歩行速度や歩幅) よりもstepやstrideに注目した歩行の変動性 (variability) を表す歩行指標が有用であるとされている [30-32]。歩行の変動性を扱った報告の多くは、加速度センサを使用せずに歩行分析を行ったものが主であり、加齢とは関連しない

歩行指標の意義についての検討もなされている [33-35]。しかし、加速度センサを用いて歩行の変動性について検討を行った報告は少なく、今後、加速度センサを使用した歩行分析において同様の検討を行うことが重要である。

V 転倒リスクアセスメント

高齢者の転倒事故は歩行中に生じることが多く、歩行分析は転倒リスクアセスメントにおける重要な評価の一つと考えられている [36-38]。加速度センサを用いた歩行分析においても、転倒と歩行能力の関連性を検討した報告が見られ、転倒事故へとつながる歩容変化について様々な角度から検討がなされている [11, 39-41]。

転倒経験者を対象とした歩容変化の検討では、転倒経験者（立位や動作を行っている時に不安感を抱くものも含む）は、加速度の軌跡の振幅が小さく、smoothnessの低下した歩容となっていることが報告されている [11]。この報告から、体幹での加速度センサの測定値は、不安定性の高い高齢者を判別する指標を提供すると考えられている。

地域在住高齢者を対象に不整地での歩行分析を行った報告では、転倒リスクの高い高齢者は、より安定性を高めた歩容変化（more conservative gait pattern）による効果が不十分で、頭部と体幹の安定化が十分に図れていないと報告している [39]。この報告から、転倒リスクの高い高齢者における体幹と頭部の不規則な加速度の軌跡は、彼らが歩行、特に不整地での歩行において、体幹の制御と視野の維持が困難になっている可能性の高いことを示唆している [39]。

歩行時の体幹加速度の検討では、ACから算出されるストライド間の加速度波形の変動性、Inter-stride trunk variabilityがバランス能力低下や転倒と関連することが報告されている。また、虚弱高

齢者では側方のTrunk variabilityは健常者よりも大きく、前後、鉛直は小さくなると報告されており、側方のTrunk variabilityは、歩行姿勢制御の異なる側面を表している可能性があるとしている [40]。

糖尿病由来の末梢神経障害が歩行に及ぼす影響を検討した報告では、末梢神経症状を呈する高齢者は不整地での歩行において、身体のバランスを保つ能力が低下していることが報告されている。この結果は、歩行中の姿勢制御における末梢からの感覚情報の役割を知る手がかりを提供するとともに、末梢神経症状を呈する患者の転倒リスク増加のメカニズムを知る端緒になると考えられている [41]。

加速度センサを用いた歩行分析は、早期に転倒リスクの高い高齢者を抽出する方法として有用性が高いと考えられている。しかし、報告の多くは転倒経験を説明因子とした横断的な研究であるために転倒事故の因果関係については言及されていない。今後の課題は縦断的な研究によって、歩容異常と転倒事故の因果関係をより明らかにすることである。

VI まとめ

加速度センサは歩行分析に最も適した装置の一つである。検査の信頼性、妥当性に対する検討は十分に行われており、その適用は高齢者の医学的リハビリテーション領域において益々高まると予想されている。本邦においても、加速度センサを用いた脳卒中患者や運動器疾患を対象とした研究が散見されるようになってきている。しかし、その数は十分ではなく今後の更なる検討が期待されている。

【参考文献】

- [1] H Gage. Accelerographic analysis of human gait. American Society for Mechanical Engineers. 1964
- [2] Culhane KM, O'Connor M, Lyons D et al. Accelerometers in rehabilitation medicine for older adults. *Age Ageing* 2005 ; 34 : 556–560.
- [3] Auvinet B, Berrut G, Touzard C et al. Reference data for normal subjects obtained with an accelerometric device. *Gait Posture* 2002 ; 16 : 124–134.
- [4] Kerr KM, White JA, Barr DA et al. Analysis of the sit–stand–sit movement cycle in normal subjects. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 1997 ; 12 : 236–245.
- [5] Culhane KM, Lyons GM, Hilton D et al. Long-term mobility monitoring of older adults using accelerometers in a clinical environment. *Clin Rehabil* 2004 ; 18 : 335–343.
- [6] Uswatte G, Foo WL, Olmstead H et al. Ambulatory monitoring of arm movement using accelerometry: an objective measure of upper–extremity rehabilitation in persons with chronic stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2005 ; 86 : 1498–1501.
- [7] Moe–Nilssen R, Helbostad JL. Trunk accelerometry as a measure of balance control during quiet standing. *Gait Posture* 2002 ; 16 : 60–68.
- [8] Zijlstra W. Assessment of spatio–temporal parameters during unconstrained walking. *Eur J Appl Physiol* 2004 ; 92 : 39–44.
- [9] Menz HB, Lord SR, Fitzpatrick RC. Age–related differences in walking stability. *Age Ageing* 2003 ; 32 : 137–142.
- [10] Smidt GL, Arora JS, Johnston RC. Accelerographic analysis of several types of walking. *Am J Phys Med* 1971 ; 50 : 285–300.
- [11] Yack HJ, Berger RC. Dynamic stability in the elderly: identifying a possible measure. *J Gerontol* 1993 ; 48 : M225–M230.
- [12] Krebs DE, Edelstein JE, Fishman S. Reliability of observational kinematic gait analysis. *Phys Ther* 1985 ; 65 : 1027–1033.
- [13] Eastlack ME, Arvidson J, Snyder–Mackler L et al. Interrater reliability of videotaped observational gait–analysis assessments. *Phys Ther* 1991 ; 71 : 465–472.
- [14] Brunnekreef JJ, van Uden CJ, van Moorsel S et al. Reliability of videotaped observational gait analysis in patients with orthopedic impairments. *BMC Musculoskelet Disord* 2005 ; 6 : 17.
- [15] Maffiuletti NA, Gorelick M, Kramers–de Quervain I et al. Concurrent validity and intrasession reliability of the IDEEA accelerometry system for the quantification of spatiotemporal gait parameters. *Gait Posture* 2008 ; 27 : 160–163.
- [16] Kavanagh JJ, Morrison S, James DA et al. Reliability of segmental accelerations measured using a new wireless gait analysis system. *J Biomech* 2006 ; 39 : 2863–2872.
- [17] Moe–Nilssen R. A new method for evaluating motor control in gait under real–life environmental conditions. Part 2. Gait analysis. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 1998 ; 13 : 328–335.
- [18] Mansfield A, Lyons GM. The use of accelerometry to detect heel contact events for use as a sensor in FES assisted walking. *Med Eng Phys* 2003 ; 25 : 879–885.
- [19] Menz HB, Lord SR, Fitzpatrick RC. Acceleration patterns of the head and pelvis when walking on level and irregular surfaces. *Gait Posture* 2003 ; 18 : 35–46.
- [20] Moe–Nilssen R, Helbostad JL. Estimation of gait cycle characteristics by trunk accelerometry. *J Biomech* 2004 ; 37 : 121–126.
- [21] Kavanagh J, Barrett R, Morrison S. The role of the neck and trunk in facilitating head stability during walking. *Exp Brain Res* 2006 ; 172 : 454–463.
- [22] Kavanagh JJ, Barrett RS, Morrison S. Upper body accelerations during walking in healthy young and elderly men. *Gait Posture* 2004 ; 20 : 291–298.
- [23] Kavanagh JJ, Barrett RS, Morrison S. Age–related differences in head and trunk coordination during walking. *Hum Mov Sci* 2005 ; 24 : 574–587.

- [24] Kavanagh JJ, Morrison S, Barrett RS. Coordination of head and trunk accelerations during walking. *Eur J Appl Physiol* 2005 ; 94 : 468–475.
- [25] Andriacchi TP, Alexander EJ. Studies of human locomotion : past, present and future. *J Biomech* 2000 ; 33 : 1217–1224.
- [26] Sudarsky L. Geriatrics : gait disorders in the elderly. *N Engl J Med* 1990 ; 322 : 1441–1446.
- [27] Carlson MC, Fried LP, Xue QL et al. Association between executive attention and physical functional performance in community-dwelling older women. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci* 1999 ; 54 : S262–S270.
- [28] Tabbarah M, Crimmins EM, Seeman TE. The relationship between cognitive and physical performance : MacArthur Studies of Successful Aging. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2002 ; 57 : M228–M235.
- [29] Ble A, Volpato S, Zuliani G et al. Executive function correlates with walking speed in older persons : the InCHIANTI study. *J Am Geriatr Soc* 2005 ; 53 : 410–415.
- [30] Maki BE. Gait changes in older adults : predictors of falls or indicators of fear. *J Am Geriatr Soc* 1997 ; 45 : 313–320.
- [31] Brach JS, Berthold R, Craik R et al. Gait variability in community-dwelling older adults. *J Am Geriatr Soc* 2001 ; 49 : 1646–1650.
- [32] Hausdorff JM. Gait variability : methods, modeling and meaning. *J Neuroengineering Rehabil* 2005 ; 2 : 19.
- [33] Gabell A, Nayak US. The effect of age on variability in gait. *J Gerontol* 1984 ; 39 : 662–666.
- [34] Owings TM, Grabiner MD. Step width variability, but not step length variability or step time variability, discriminates gait of healthy young and older adults during treadmill locomotion. *J Biomech* 2004 ; 37 : 935–938.
- [35] Brach JS, Studenski SA, Perera S et al. Gait variability and the risk of incident mobility disability in community-dwelling older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2007 ; 62 : 983–988.
- [36] Tinetti ME, Speechley M, Ginter SF. Risk factors for falls among elderly persons living in the community. *N Engl J Med* 1988 ; 319 : 1701–1707.
- [37] Cali CM, Kiel DP. An epidemiologic study of fall-related fractures among institutionalized older people. *J Am Geriatr Soc* 1995 ; 43 : 1336–1340.
- [38] Norton R, Campbell AJ, Lee-Joe T et al. Circumstances of falls resulting in hip fractures among older people. *J Am Geriatr Soc* 1997 ; 45 : 1108–1112.
- [39] Menz HB, Lord SR, Fitzpatrick RC. Acceleration patterns of the head and pelvis when walking are associated with risk of falling in community-dwelling older people. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2003 ; 58 : M446–M452.
- [40] Moe-Nilssen R, Helbostad JL. Interstride trunk acceleration variability but not step width variability can differentiate between fit and frail older adults. *Gait Posture* 2005 ; 21 : 164–170.
- [41] Menz HB, Lord SR, St George R et al. Walking stability and sensorimotor function in older people with diabetic peripheral neuropathy. *Arch Phys Med Rehabil* 2004 ; 85 : 245–252.

The use of accelerometer in gait analysis

Tsuyoshi Asai PT, MS

Kobegakuin University, Faculty of Rehabilitation,

Department of Medical Rehabilitation,

Division of Physical Therapy

Takehiko Doi PT

Health Science Major, Graduate School of Medical Faculty,

Kobe University

Recent technological advancements have led to the production of various affordable miniature accelerometers. They function as reliable sensors and have been widely used in motion analyses. Gait analysis is one of the most representative motion analyses using accelerometers. They estimate various spatiotemporal gait parameters, as well as quantitative measures for gait regularity and step symmetry. These parameters can help evaluate gait disorders in the elderly from various aspects. The objectives of this study are to overview the use of accelerometers in gait analysis in medical rehabilitation and discuss the potential applications of accelerometers for future research.

Key Words : accelerometer, gait analysis, elderly