

原著：秋田大学保健学専攻紀要23(2)：115 - 120, 2015

## 三軸加速度計を用いたリサーチ指数による体幹部加速度の対称性の評価

小川 美矢子<sup>\*, \*\*</sup>      小野崎 彩可<sup>\*\*, \*\*\*</sup>      新田 潮人<sup>\*\*, \*\*\*\*</sup>  
 佐藤 瑞騎<sup>\*\*, \*\*\*\*\*</sup>      岩倉 正浩<sup>\*\*, \*\*\*\*\*</sup>      照井 佳乃<sup>\*\*, \*\*\*\*\*</sup>  
 上村 佐知子<sup>\*\*</sup>      佐竹 将宏<sup>\*\*</sup>      塩谷 隆信<sup>\*\*</sup>

### 要 旨

[目的] 四種類の歩行を行い、三軸加速度計のデータから得られたリサーチ図形及び体幹対称性の指標であるリサーチ指数 (LI) の有用性を検討することを目的とした。[対象及び方法] 健常学生18名を対象とした、対象者の体幹に三軸加速度計を装着した状態で四種類の歩行 (快適歩行速度重錘無 (SS), 快適歩行速度重錘有 (LSS), 低速歩行速度重錘無 (S), 低速歩行速度重錘有 (LS)) を行った。四種類の歩行条件下で、LI をそれぞれ比較した。[結果] 快適歩行速度・低速歩行速度ともに、重錘有の場合が重錘無の場合よりも LI は有意に高くなった。さらに、SS・LS では、SS の方が LI は有意に高かった。[結語] リサーチ図形は、体幹部加速度を視覚的に表すことができる。リサーチ指数は、体幹部加速度の前額面上における対称性を表せる可能性が示唆された。

### はじめに

近年、加速度計を用いた歩行評価が数多く行なわれるようになってきている<sup>1)~3)</sup>。三軸加速度計システムでは、垂直方向・前後方向・左右方向の三方向での加速度を計測することが可能である<sup>3), 4)</sup>。三軸加速度計システムは、小型であり持ち運びが容易で、計測にかかる時間が短い<sup>5), 6)</sup>。長所がある一方で、データの解釈が難解であることが短所としてあげられる<sup>5)</sup>。三軸加速度計から得られるデータの分析法として、体幹の動揺性を表す root mean square (RMS)<sup>1)</sup>、左右の対称性の指標である自己相関分析<sup>7)</sup>、正常からの逸脱を示す相互相関分析など、様々な分析方法がある<sup>3), 7), 8)</sup>。しかし、これらの指標は対象者の実際の体幹部の動きが示すものではなく、定量的な評価を行っているに過ぎないとされる<sup>9)</sup>。

これに対し、香川ら<sup>5)</sup>は、体幹部に装着した加速度計から得られたデータをリサーチ図形によって可視化し、わかりやすく表示する方法を提案している。リサーチ図形とは、互いに直交する二つの単振動運動を合成して得られる平面図形を指す<sup>10)</sup>。さらに、Yamaguchi ら<sup>9)</sup>は、作成されたリサーチ図形から得られる、リサーチ指数 (Lissajous index; LI) を歩行の対称性を示す新たな指標として提案している。

歩行の対称性を検討した研究として、Kavanagh ら<sup>11)</sup>の様々な歩行スピードで歩行を行った時の対称性の変化をみた研究、Kodesh ら<sup>12)</sup>の片側の下肢疾患などを想定し下肢に重錘を付けて歩行した際の加速度の変化をみる研究が報告されている。しかし、三軸加速度計システムから得られたリサーチ図形および LI について、歩行速度を変えたり、重錘を片脚に装着したりし際の変化をみた論文は検索した限りではない。

\* 新潟県はまぐみ小児療育センター・診療部リハビリテーション室

\*\* 秋田大学大学院医学系研究科保健学専攻理学療法学講座

\*\*\* 社会医療法人明和会中通リハビリテーション病院・リハビリテーション科

\*\*\*\* JA 秋田厚生連能代厚生医療センター・リハビリテーション科

\*\*\*\*\* JA 秋田厚生連大曲厚生医療センター・リハビリテーション科

\*\*\*\*\* 市立秋田総合病院・リハビリテーション科

\*\*\*\*\* 秋田県立病院機構リハビリテーション・精神医療センターリハビリテーション科

Key Words: リサーチ波形  
 リサーチ指数  
 三軸加速度計システム  
 対称性

本研究の目的は、歩行速度や、片脚への重錘の装着の有無など、歩行の条件を変えた際に、歩行の対称性を示すとされているリサージュ図形およびLIの変化を観察することである。

## 対象と方法

### 1. 対象

秋田大学医学部保健学科に在籍する健常学生（以下、健常学生）18名（男性9名、女性9名）を対象とした。本研究においては、ヘルシンキ宣言を遵守し、対象者には事前に本研究の趣旨を十分に説明し、研究への参加の書面での同意を得たうえで研究を実施した。

対象者の平均年齢は $21.3 \pm 1.3$ 歳、平均身長 $165.4 \pm 8.1$  cm、平均体重 $59.5 \pm 8.8$  kgであった。対象者の利き脚はすべて右脚であった（表1）。

### 2. 方法

#### 1) 計測装置

加速度の計測には、三軸加速度センサー付き歩行分析計 MG-M1110™（株式会社 LSI メディエンス、東京）（以下三軸加速度センサー）<sup>(13), (14)</sup>を用いた。寸法は $75 \times 50 \times 20$ mm、質量は約120gで、専用ベルトを用い、第三腰椎棘突起部に固定する。三軸加速度センサーは、10msごとに加速度を検知する。また、加速度は $100\text{m/s}^2$ ごとに検知できる。

#### 2) 波形の取得

歩行時に加速度計から得られたデータを、解析装置ゲイトビュー MG-M1110-PC™（株式会社 LSI メディエンス、東京：以下ゲイトビュー）<sup>(13), (14)</sup>を用い取り込んだ。この解析ソフトでは歩数、歩行率、歩行速度を自動で検出することができる。また、読み取った加速度を数値として図表ソフト Microsoft excel に書き出し、加速度のデータの数的処理を行うことが可能である。

表1 対象者の特性

人数	男性9人	女性9人
年齢(歳)	$21.3 \pm 1.3$	
身長(cm)	$165.4 \pm 8.1$	
体重(kg)	$59.5 \pm 8.8$	
利き脚	全員右脚	

数値は平均  $\pm$  SD

### 3) 計測方法

三軸加速度センサーを装着し、10mの歩行を以下の四種類で行った。各歩行条件を示す。

快適歩行速度重錘無（以下 SS (self-selected speed)）：被験者自身が快適と感じる歩行速度  
 快適歩行速度重錘有（以下 LSS (self-selected speed with the attached load)）：右脚に重錘を付けた状態で、被験者自身が快適と感じる歩行速度

低速歩行速度重錘無（以下 S (slow speed)）：被験者自身の快適歩行速度の半分程度と感じる歩行速度

低速歩行速度重錘有（以下 LS (slow-selected speed with the attached load)）：右脚に重錘を付けた状態で、被験者自身がの歩行速度の半分程度と感じる歩行速度

歩行の順番は、  
 （重錘未装着）、  
 （重錘装着）の順に行い、各歩行の間には十分な休憩時間を置いた。重錘は対象者の体重の5%の重さ<sup>(15)</sup>として利き脚の下肢遠位部に装着した。

### 4) リサージュ図形の作成方法

三軸加速度センサーから得られた加速度のデータの計測開始時の一番最初のステップと、計測終了時の一番最後のステップを除外したデータで行った。

Y軸（上下方向）の加速度を縦軸にとり、X軸（左右方向）の加速度の値を横軸にとって、

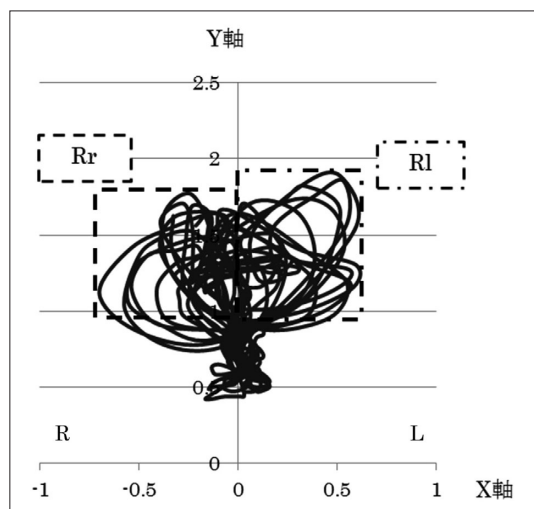


図1. 加速度計から得たリサージュ図形

Rr：図中の破線部 - - - - の面積

Rl：図中の破線・点線部 - · - · - の面積

エクセルを用い散布図を描くことによってリサージュ図形を描く。加速度計から得たリサージュ図形を示す(図1)。

#### 5) リサージュ指数 (LI) の求め方<sup>9)</sup>

図1の破線部の四角形の面積を Rr, 破線・点線部の四角形の面積を RI とし, 面積をそれぞれ求めた。Rr, RI の求め方を以下に記す。

- ・四角形の縦の長さ: Y 軸の最大値 - 0.98 (縦軸は重力加速度  $0.98\text{m/s}^2$  が Y 軸の値に影響しているため)
- ・四角形の横の長さ: X 軸の最大値の絶対値以上より四角形の面積 R は,

リサージュ指数 (LI) を求める式を以下に示す。

$$LI = \left| \frac{2 \times (Rr - RI)}{(Rr + RI)} \times 100 \right|$$

LI は, 数値が大きいほど歩行時の体幹部加速度の前額面上での左右対称性が低く, 数値が小さいほど歩行時の体幹部加速度の前額面上での対称性が高いことを意味する。

#### 6) 統計解析

全ての数値は, Shapiro-Wilk 検定によって正規性を確認後に統計処理を行った。歩行速度, LI の四条件下での差を比較するために, 歩行速度には一元配置分散分析後に Turkey の多重比較法, LI には Kruskal-Wallis 検定後に Steel-Dwass の多重比較法を使用した。検定には統計解析ソフト R for windows を使用し,  $p < 0.05$  または  $p < 0.01$  をもって有意差ありとした。

#### 結果

各条件下での歩行速度・リサージュ図形の変化と LI の値を以下に示した。

歩行速度はそれぞれ, SS は  $1.26 \pm 0.15\text{m/s}$ , LSS は  $1.20 \pm 0.19\text{m/s}$ , S は  $0.69 \pm 0.16\text{m/s}$ , LS は  $0.66 \pm 0.15\text{m/s}$  であった。重錘の有無に関わらず, 快適歩行速度と低速歩行速度間で, 快適歩行速度が有意に高い値を示した ( $p < 0.01$ )。

今回の実験で得られた四条件下でのリサージュ図形の一例を, 図2に示した。図2のa)とb)は, 快適歩行速度の重錘なしa)と重錘ありb)の図である。

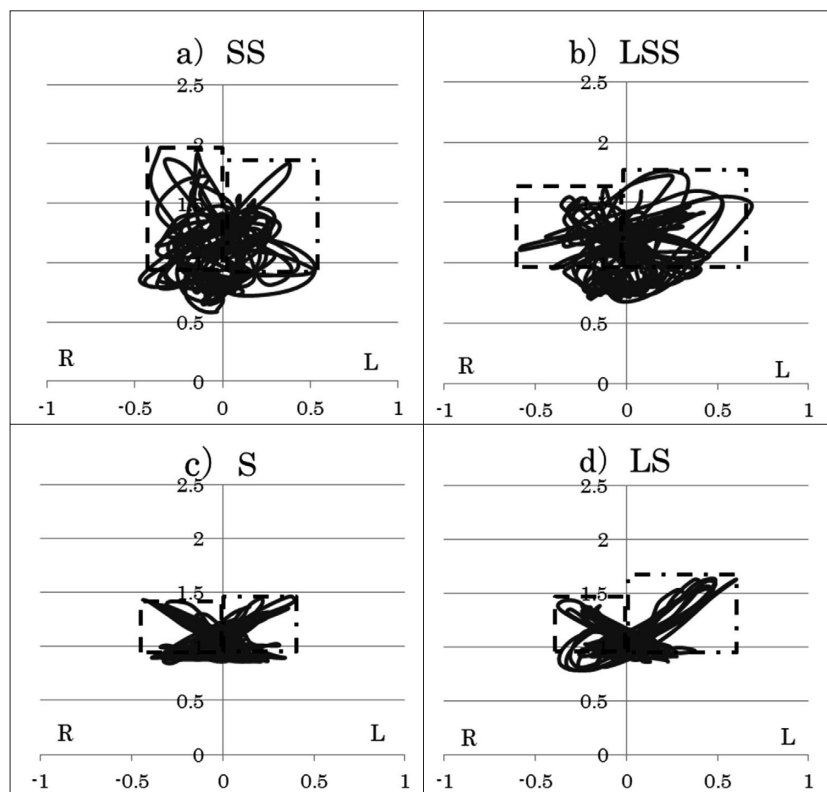


図2 四条件の歩行から得られたリサージュ図形

略語 SS: 快適歩行速度重錘無 LSS: 快適歩行速度重錘有  
S: 低速歩行速度重錘無 LS: 低速歩行速度重錘有

重錘ありと重錘なしでは、重錘ありの場合に体幹部加速度の左方向への偏移が見られる。図2のc)とd)は、低速歩行速度の重錘なしc)と重錘ありd)の図である。重錘ありと重錘なしでは、重錘ありの場合に体幹部加速度の左方向への偏移が見られる。

四条件の歩行におけるLIの値の結果を表2に示す。LIは「SS」・「LSS」間で、「LSS」のLIが有意に高く( $p < 0.05$ )、「S」・「LS」間で、「LS」のLIが有意に高かった( $p < 0.05$ )。また、「SS」・「LS」間で、「LS」のLIが有意に高かった( $p < 0.01$ )。

## 考 察

本研究の目的は、「歩行速度の変化・右脚重錘負荷の有無」により、歩行の条件を変えた時の、体幹部加速度の前額面上のリサージュ図形、およびリサージュ指数の変化を検討することである。

### 1. リサージュ図形について (図2)

今回の実験では、四種類の歩行から四つのリサージュ図形が得られた。これらの図形で、LIの値に有意差があったものは「SS」 a) 重錘なし)と「LSS」 b) 重錘あり)、「S」 c) 重錘なし)と「LS」 d) 重錘あり) 、最後に「SS」 a) 重錘なし)と「LS」 b) 重錘あり)であった。

この図形で特徴的な点は、重錘装着側である右脚とは反対側の、左方向への大きな軌道の偏移である。Auvinetら<sup>9)</sup>は、歩行周期中にY軸の最大値をとる部分は歩行周期におけるfoot flat、つまり荷重応答期であると述べている。今回の実験で得られたリサージュ図形上では、Y軸の最大値をとる点が左方向へ大きく偏移している。したがって、重錘装着時には、重錘非装着時と比較して、左荷重応答期に体幹部の左方向の加速度が生じているものと考えられる。

ここで、反対側の足、つまり重錘を装着している右脚の状態を考えると、左脚が荷重応答期～立脚中期の場合、右脚は前遊脚期～遊脚中期<sup>6)</sup>、つまり右脚の振出動作を行っているともみなすことができる。このことから、右脚に重錘を付けた際には、右脚の振出時に体幹部で代償動作が生じているといえる。

今回の実験の結果では、「右肢振出動作時に、左へ体幹を側屈し、重さの増した右脚の振出動作を代償している」と考えられる。従って、左方向への加速度が増加したリサージュ図形が描かれたといえる。香川<sup>5)</sup>らは腰背部中央につけた三軸加速度計では体幹部・骨盤の運動を捉えやすいと報告しており、今回の実験においても、体幹の代償動作を三軸加速度センサーが捉

え、そこから得られたリサージュ図形およびリサージュ指数で変化が観察されたと考えられる。Swinskiら<sup>17)</sup>は、Hip OA患者では単脚支持期よりも両脚支持期で歩容の異常が生じやすく、短脚支持期での骨盤能力を補うには両脚支持からの準備が必要であることを報告している。さらに、山田ら<sup>18)</sup>は、Hip OA患者における歩容の異常に対する代償動作としての体幹の動きが、前後方向・上下方向の加速度に変化を生じさせたと報告している。以上より、本実験において、右脚重錘装着時に左脚両脚支持期から単脚支持に変わる際に体幹の左方向への側屈すなわち加速度が生じており、その動きを三軸加速度計でリサージュ図形の変化としてとらえられたと考えられる。

### 2. リサージュ指数 (Lissjous index ; LI) について

LIの値は、快適歩行速度において、重錘ありとなしの場合では、重錘ありで有意に高い値を示した。低速歩行速度においても、重錘ありとなしの場合を比較すると、重錘ありで有意に高い値を示した。さらに、SSとLSの場合、LSが有意に高いLIの値となった。(表2)。Kavanaghら<sup>11)</sup>は、三軸加速度計のデータから得られる、歩行の対称性の指標であるApproximate Entropy (以下、ApEn)は、低速での歩行において上下・前後で高値を示すことを報告している。ApEnは、その値が高いほど対称性が低いことと意味することから、低速の歩行では、上下の対称性が低下することを示唆していると考えられる<sup>11)</sup>。以上のことから、重錘を付けた状態で、低速の歩行を行うと、より正常の歩行から逸脱した歩行になると考えられる。結果、「LS」・「SS間」でLIの有意な値の差が生じたと考えられた。

本研究は、健常者において歩行条件を変えた際の三軸加速度計によるリサージュ図形およびLIの値を検討した。その結果、重錘装着時と非装着時において、LIに有意差が見られた。この結果より、リサージュ図形およびLIは、体幹部に代償動作が生じる歩容を捉えることができる可能性が示唆された。今回の

表2 四条件の歩行におけるLIの値

	リサージュ指数(LI) % mean ± SD
快適歩行速度重錘無 (SS)	17.6 ± 3.33
快適歩行速度重錘有 (LSS)	37.29 ± 5.29
低速歩行速度重錘無 (S)	28.98 ± 4.93
低速歩行速度重錘有 (LS)	58.21 ± 8.43

SS と LSS  $p < 0.05$

SS と LS  $p < 0.01$

S と LS  $p < 0.05$

研究対象は健常者であったが、体幹・骨盤を中心とした代償動作が起こりやすい変形性股関節症患者の異常歩行<sup>5)</sup>や、脳卒中片麻痺歩行でみられやすい分回し歩行に伴う体幹側屈<sup>9)</sup>など、体幹部に代償動作が生じる異常歩行をリサージュ図形による評価が有用である可能性が示唆された。三軸加速度計によるリサージュ図形およびリサージュ指数は、歩容異常の定量的な評価の一つであり、歩容異常の原因の検索を意図したものではないが、今後は、脳卒中片麻痺、人工股関節全置換術などの経時的変化を追うことで、治療効果判定などに応用できる可能性も示唆された。

### 参考文献

- 1) Kobsar D, Olson C, Paranjape D, et al.: Evaluation of age-related differences in the stride-to-stride fluctuation, regularity and symmetry of gait using a waist-mounted tri-axial accelerometer. *Gait Posture* 39:553-557, 2014.
- 2) Senden R, Savelberg HHCM, Grunn B, et al.: Accelerometry-based gait analysis, an additional objective approach to screen subjects at risk for falling. *Gait Posture* 36:296-300, 2012
- 3) Mentz HB, Lord SR, Fitzpatrick RC, et al.: Acceleration patterns of the head and pelvis when walking on level and irregular surfaces. *Gait Posture* 18:35-46, 2003.
- 4) Kavanagh JJ, Barrett R S, Morrison S, et al.: Upper body accelerations during walking in healthy young and elderly men. *Gait Posture* 20:291-298, 2004.
- 5) 香川真二, 千田廉, 木村愛子・他: リサージュ図形を用いた歩行加速度データの可視化評価の開発と臨床的有用性. *理学療法学* 36:18-23, 2009.
- 6) Auvinet B, Berrut G, Touzard C, et al.: Reference data for normal subject obtain with an accelemetric device. *Gait Posture* 16:124-134, 2002.
- 7) Mentz HB, Lord SR, Fitzpatrick RC, et al.: Age-related differences in walking stability. *Age Ageing* 32:137-142, 2003.
- 8) Moe-Nilssen R, Helbostad JL, et al.: Trunk accelerometry as a measure of balance control during quiet standing. *Gait Posture* 16:60-68, 2002.
- 9) Yamaguchi R, Hirata S, Doi T, et al.: The usefulness of a new gait symmetry parameter derived from Lissajous figures of tri-axial acceleration signals of the trunk. *Phys Ther Sci* 24:405-408, 2012.
- 10) Steven A, Eric H, Dudley S, et al.: Two-dimensional representation of three-dimensional pelvic motion during human walking: an example of how projections can be misleading. *J. Biomech* 29(10):1387-1391, 1996.
- 11) Kavanagh JJ: Lower trunk motion and speed-dependence during walking. *J NeuroEngin Rehabil* 2009
- 12) Kodesh E, Kafri M, Dar G, et al.: Walking speed, unilateral leg loading, and step symmetry in young adults. *Gait Posture* 35:66-69, 2012.
- 13) Yoneyama M, Mitoma H, Okuma Y, et al.: Accelerometry-based long-term monitoring of movement disorders: from diurnal gait behavior to nocturnal bed mobility. *J Mechan Med Biol* 13:2013
- 14) Yoneyama M: Accelerometry-based gait analysis and its application to Parkinson's disease assessment. Part 2: A new measure for quantifying walking behavior. *Tran Natural Syst & Rehabil Engin* 21-6:999-1005, 2013.
- 15) 古川順光, 中俣修, 竹井仁・他: 加速度計付歩行計と三次元動作解析装置による定量的歩行評価に関する研究. *理学療法学* 31-Suppl.2:111, 2004.
- 16) Neumann KG: 観察による歩行分析 月城慶一, 山本澄子, 江原義弘・他 (訳) 医学書院 (東京), 2005, pp9-22
- 17) Sliwinski MM, Sisto SA, Batavia M, et al.: Dynamic stability during walking following unilateral total hip arthroplasty. *Gait Posture* 19:141-147, 2004.
- 18) 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 歩容指標の変形性股関節症患者と健常者の比較, および基準関連妥当性. *理学療法学* 33-1:14-12, 2006.
- 19) Perry J: ペリー歩行分析正常歩行と異常歩行 (第一版) 弓岡光徳, 森彩子, 村田伸・他 (監訳) 医歯薬出版株式会社 (東京), 2008, pp141-152

## The evaluation of trunk symmetry accelerometer using the Lissajous index with a tri-axial accelerometer

Miyako OGAWA<sup>\*, \*\*</sup> Ayaka ONOZAKI<sup>\*\*, \*\*\*</sup> Shioto NITTA<sup>\*\*, \*\*\*\*</sup>  
 Mizuki SATO<sup>\*\*, \*\*\*\*\*</sup> Masahiro IWAKURA<sup>\*\*, \*\*\*\*\*</sup> Yoshino TERUI<sup>\*\*, \*\*\*\*\*</sup>  
 Sachiko UEMURA<sup>\*\*</sup> Masahiro SATAKE<sup>\*\*</sup> Takano bu SHIOYA<sup>\*\*</sup>

\* Nigata Prefecture Hamagumi Medical Rehabilitation Center for Disabled Children, Department of Rehabilitation

\*\* Akita University Graduate School of Health Sciences, Department of Physical Therapy

\*\*\* Social Medical Corporation Meiwakai, Nakadori General Hospital, Department of Rehabilitation

\*\*\*\* Noshiro Kousei Medical Center, Department of Rehabilitation

\*\*\*\*\* Omagari Kousei Medical Center, Department of Rehabilitation

\*\*\*\*\* Akita City Hospital, Department of Rehabilitation

\*\*\*\*\* Akita Prefectural Center for Rehabilitation and Psychiatric Medicine, Department of Rehabilitation

(Purpose) The purpose of this study was to evaluate the usefulness of Lissajous waveform and Lissajous index (LI) as a new gait symmetry index using a tri-axial accelerometer under four different walking conditions. (Subjects & Methods) A tri-axial accelerometer was attached in the trunk of 18 healthy young subjects while walking at four different conditions (self-selected speed [SS], self-selected speed with the right leg loaded, slow speed, and slow-selected speed with the right leg loaded). The subjects' LI values were measured and evaluated at four different walking conditions. (Result) The LI values were significantly higher in the subjects who were walking with a leg loaded than in those waling without a leg loaded at both the self-selected and slow speeds. The LI values of the subjects at the self-selected speed were higher than those at the slow-selected speed with the right leg loaded. These data suggest that unilateral lower limb loading significantly affects the trunk symmetry as measured by a tri-axial accelerometer at both self-selected and slow speeds.

(Conclusions) These results suggest that Lissajous waveform is a suitable method of visual evaluation and that the LI can be used to assess trunk symmetry during walking.