

## Original Article

## リサーチ概観図によるトレッドミル歩行表現法

大塚 圭,<sup>1</sup> 才藤栄一,<sup>2</sup> 加賀谷齊,<sup>2</sup> 伊藤慎英,<sup>1</sup> 田辺茂雄,<sup>1</sup>  
松田文浩,<sup>1</sup> 谷川広樹,<sup>1</sup> 山田純也,<sup>3</sup> 青木健光,<sup>4</sup> 金田嘉清<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 藤田保健衛生大学医療科学部リハビリテーション学科

<sup>2</sup> 藤田保健衛生大学医学部リハビリテーション医学I講座

<sup>3</sup> 藤田保健衛生大学病院リハビリテーション部

<sup>4</sup> キッセイコムテック株式会社

## 要旨

Ohtsuka K, Saitoh E, Kagaya H, Itoh N, Tanabe S, Matsuda F, Tanikawa H, Yamada J, Aoki T, Kanada Y. Application of Lissajous overview picture in treadmill gait analysis. Jpn J Compr Rehabil Sci 2015; 6: 33-42.

【目的】本研究の目的は、トレッドミル歩行の三次元動作分析で表現できるリサーチ図形を用いたリサーチ概観図（LOP）の有用性を検討することである。

【方法】健常者19名、片麻痺患者2名、変形性股関節症患者1名を対象に三次元トレッドミル歩行分析を実施し、LOPを作成した。また、歩行分析に熟練した理学療法士3名が患者3名の歩行を視診で評価した。健常者のリサーチ図形は平均化し、作成した健常者グランドアベレージLOPと患者3名を比較した。

【結果】患者のLOPは、片麻痺で遊脚期の分回し、トゥクリアランス低下、骨盤挙上、立脚期の内側ホイップを、変形性股関節症患者では両側性デュシェンヌ徴候、立脚期の過剰な膝関節の屈曲など視診で認めた所見に加え、視診のみでは観察できなかった多数の所見を表していた。

【結論】各肢節の運動パターンだけでなく肢節間の位置関係から姿勢や対称性といった歩行の全体像を理解できた。

**キーワード：**三次元動作分析、トレッドミル歩行、リサーチ図形、リサーチ概観図

## はじめに

近年、三次元動作分析装置、筋電図計、大型床反力

著者連絡先：大塚 圭  
藤田保健衛生大学医療科学部リハビリテーション学科  
〒470-1192 愛知県豊明市掛掛町田楽ヶ窪 1-98  
E-mail: ohtsuka@fujita-hu.ac.jp  
2014年11月18日受理

本研究において一切の利益相反はありません。  
本研究は、平成21～24年度科学研究助成費補助金（21700553）の助成を受けたものである。

計、呼気ガス計測器など多岐にわたる歩行に関連する種々の分析機器を用いて運動学、運動力学、生理学的指標を用いた歩行の研究が数多く報告されるようになってきた。特に、三次元動作分析装置は、時間・距離因子、運動学因子の分析に優れ、歩行分析ではもっとも使用されている機器の一つである。しかし、臨床では三次元動作分析は、ほとんど活用されておらず、未だに視診による歩行分析が行われている。この原因は、計測・解析に長時間かけられない、専有の空間が確保できない、低歩行能力者の計測が困難である、動作解析の非専門家にとっては得られる結果の解釈が必ずしも容易でない点にあると考えられる。

視診は、簡便で即時的といった利点がある一方、評価者間信頼性の問題が指摘されている。実際、視診による評価者の信頼性は、対象疾患、評価内容、評価者の経験年数などによって大きく異なると報告されている[1-5]。したがって、歩行分析においては視診に代わる客観的で実用的な評価法の確立が急務と考えられる。

われわれは、トレッドミル歩行の三次元動作分析で得られるマーカの運動軌跡で表現したリサーチ図形を用いた歩行の表現法（リサーチ概観図：Lissajous' overview picture, 以下LOPと略す）を考案した。

本研究の目的は、健常者におけるLOPのグランドアベレージを作成するとともに、歩行障害者例と比較し、その有用性について検討することである。

## 対象と方法

## 1. 対象

対象は、健常男性19名（年齢64±4歳、身長166.3±5.8cm、体重63.9±6.5kg）と歩行障害者3名とした。歩行障害者の内訳は、片麻痺患者2名（症例1, 2）、変形性股関節症患者1名（症例3）とし、詳細を表1に示す。本実験の実施にあたり、藤田保健衛生大学疫学・臨床研究倫理審査委員会にて承認（No.09-028, 09-055）を得て、対象者からは書面で同意を得た。

表 1. 歩行障害者の内訳

	性別	年齢	身長	体重	診断名	障害側	歩行の自立度 <sup>1</sup>	歩行速度 <sup>2</sup>	視診 <sup>3</sup>
症例 1	男性	73	170	56	脳梗塞	左側	6	1.4	立脚終期における内側ホイップ 遊脚期におけるトゥクリアランス低下
症例 2	男性	65	168	74	クモ膜下出血	左側	6	1.8	遊脚期における麻痺側の分回し 遊脚期における麻痺側の骨盤挙上 体幹の前傾
症例 3	女性	59	131	52	変形性股関節症	両側	6	1.5	両側のデュシェンヌ徴候 立脚期における膝関節の過度の屈曲

<sup>1</sup>Functional Independence Measure

<sup>2</sup>平地歩行における快適速度 (km/h)

<sup>3</sup>理学療法士 3 名がビデオ画像を観察し評価した。

## 2. 方法

### 2.1. ビデオ画像を用いた視診

歩行分析に熟練した理学療法士 3 名に歩行障害者 3 名のビデオ画像に録画されたトレッドミル歩行の歩容を視診で評価させ、異常歩行の所見および歩行の自立度を調査した。なお、視診の所見は、理学療法士 3 名で一致したもののみ採用した。

### 2.2. 機器と計測方法

三次元動作分析の機器は、三次元トレッドミル歩行分析システム: KinemaTracer<sup>®</sup> (キッセイコムテック株式会社, 松本市, 日本) を使用した。KinemaTracer<sup>®</sup> は、1 台の収録・解析用コンピュータとトレッドミルの周囲に配置する 4 台の CCD カメラで構成されている。なお、KinemaTracer<sup>®</sup> の計測精度は、先行研究によって報告されている [6]。

マーカ (直径 30 mm) の貼着は、対象者の両側の肩峰、股関節 (上前腸骨棘と大転子を結んだ線上で大転子から 1/3 の位置)、膝関節 (大腿骨外側上顆の前後径中点)、足関節 (外果中央)、第 5 中足骨骨頭の計 10 個とした。

対象者にトレッドミル歩行を行わせ十分に慣れさせた後、三次元トレッドミル歩行分析をサンプリング周波数 60 Hz、計測時間 20 秒で実施した。歩行速度は、健常者で 5 km/h、歩行障害者で平地の「主観的快適速度」、または「主観的快適速度の 70%」、もしくはトレッドミルの「主観的快適速度」のいずれかとした。また、症例 2 には手すりや装具の使用を許可した。

トレッドミル歩行における運動軌跡では、二種類の運動のばらつきが生じると考えられる。一つは、各肢節間におけるばらつきである。もう一つは、身体がトレッドミルのベルト上を前後、側方に移動した結果生じるばらつきであり、リサーチ図形の特徴を歪ませる原因となる。また、この二種類の他に KinemaTracer<sup>®</sup> では、特有な技術的問題として高周波のノイズ成分が生じる。本研究では、これらの問題を解決する目的で、生データに FFT スムーザ処理を施した [7]。

リサーチ図形は、各マーカの座標を関節中心位置に補正したデータで作成した。また、10 個のマーカを合成して仮想重心を求めた [8]。

### 2.3. LOP の作成

リサーチ図形とは互いに直角方向に振動する二つの単振運動を合成した図形のことである。LOP は、10 点のマーカと仮想重心の軌跡を用いて水平面、矢状面、前額面上に描いたリサーチ図形で構成されている。各マーカの 3 成分 (側方: x, 前後: y, 鉛直: z) の軌跡の生データを歩行周期毎に切り出し、歩行周期で正規化し、加算平均処理を施した。次に、仮想重心の x 成分と y 成分の振幅平均値を算出した。そして、すべての x 成分と y 成分は仮想重心の振幅平均値との差とし、振幅平均値が原点となるよう補正した。健常人のグランドアベレージは、被験者間の身長差を補正する目的で 19 名のすべての軌跡を股関節から床までの距離で正規化した後に平均し、再度、単位を変換したデータで作成した。

歩行障害者 3 名の LOP と健常者グランドアベレージ LOP を比較し、異常パターンについて検討した。

### 2.4. ビデオ画像と LOP を用いた視診

視診で評価した理学療法士 3 名に LOP の所見を参照させながら、再びビデオ画像を観察し視診で評価させた。視診の所見は、理学療法士 3 名で一致したもののみ採用した。

## 結果

健常者の LOP の代表例を図 1a に示す。図 1a は 19 歩行周期で平均し、平均値 (実線) と標準偏差 (暗部) で表している。健常者グランドアベレージ LOP を図 1b に示す。水平面で膝・足関節、第 5 中足骨骨頭は前後方向の直線的な周期運動を呈していた (a)。矢状面で足関節、第 5 中足骨骨頭は前方から後方へ直線的に移動した後、曲線的な軌道で挙上し、再び緩やかに下降しながら前方に移動していた (b)。膝関節は直線状の軌跡の後、緩やかな弧を描きながら下降し、その後上昇していた (c)。肩峰、股関節の動きはわずかであり、床面と重心を結ぶ線上に位置していた (d)。前額面で膝・足関節、第 5 中足骨骨頭は上下方向の周期運動を呈していたのに対し、肩峰、股関節、重心は U 字を二つ組み合わせた形の「蝶型」を呈していた (e)。また、いずれの面においても左右の運動軌跡は、対称

的であった。

症例1は、日常では短下肢装具を使用し、杖は使用せず歩行していた。視診では、麻痺側の立脚終期に内側ホイップと遊脚期のトゥクリアランス低下を認め、今回の計測では短下肢装具および手すりは使用しなかった。症例1のLOP(図2)の特徴を以下に示す。水平面で麻痺側の足関節は内側に弧を描く軌跡を呈していた(f)、矢状面で麻痺側の足関節と第5中足骨骨

頭は非麻痺側に比べ低い軌道を呈していた(g)、前額面で麻痺側の股関節は、非麻痺側に比べ挙上していた(h)、また、水平面や矢状面でみると麻痺側の足関節と第5中足骨骨頭の軌跡は、相対的に非麻痺側の前方に変位していた(i)。

症例2は、日常で杖と短下肢装具を使用しており、今回の計測では短下肢装具と手すりを使用した。視診では、麻痺側の遊脚期に分回し、骨盤挙上、歩行周期

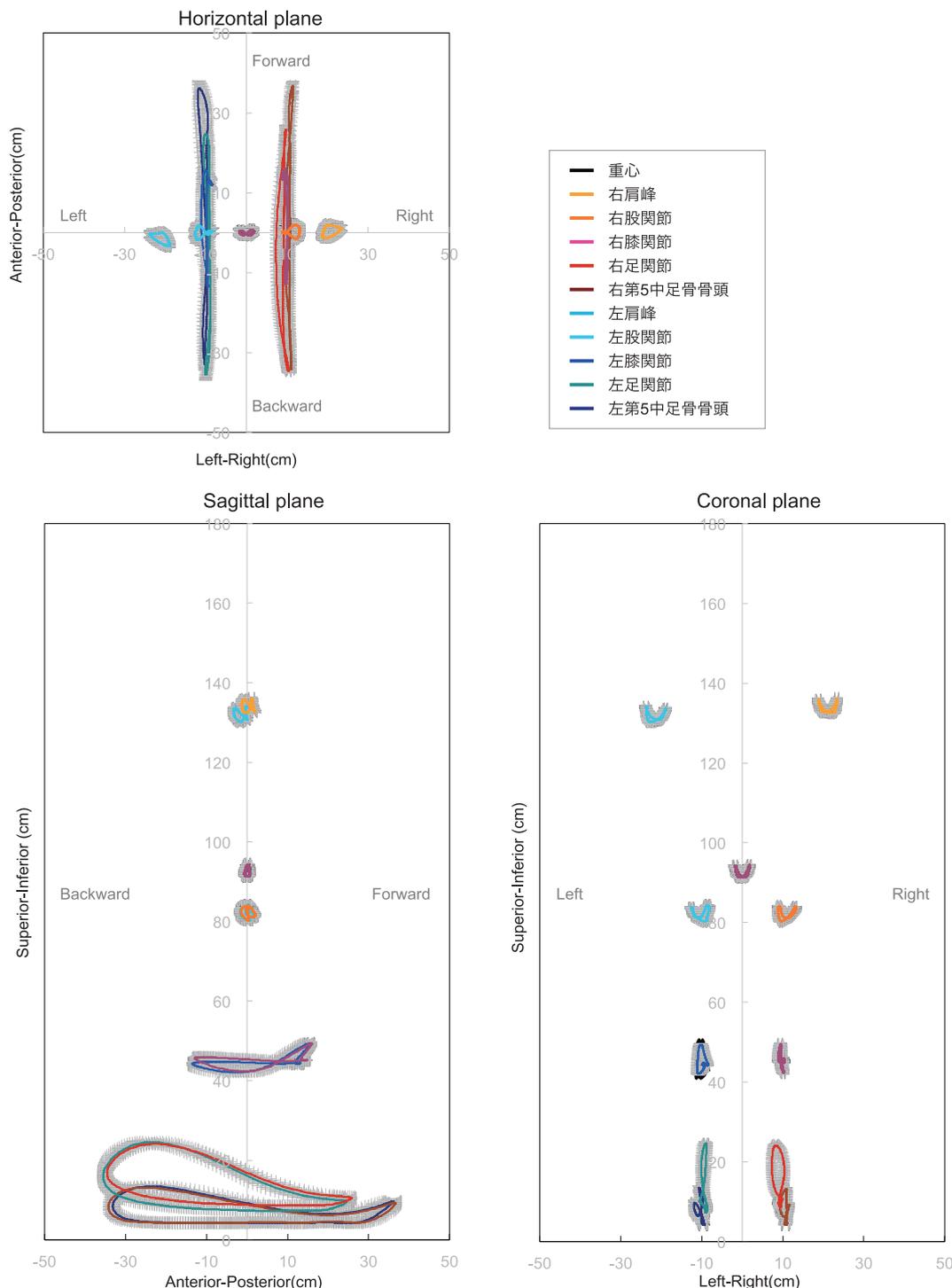


図1a. 健常者のLOP

67歳男性, 身長165cm, 体重66kg. リサーチ観図形は19歩行周期のデータを平均化し, 平均値を実線, 標準偏差を暗部で示した。

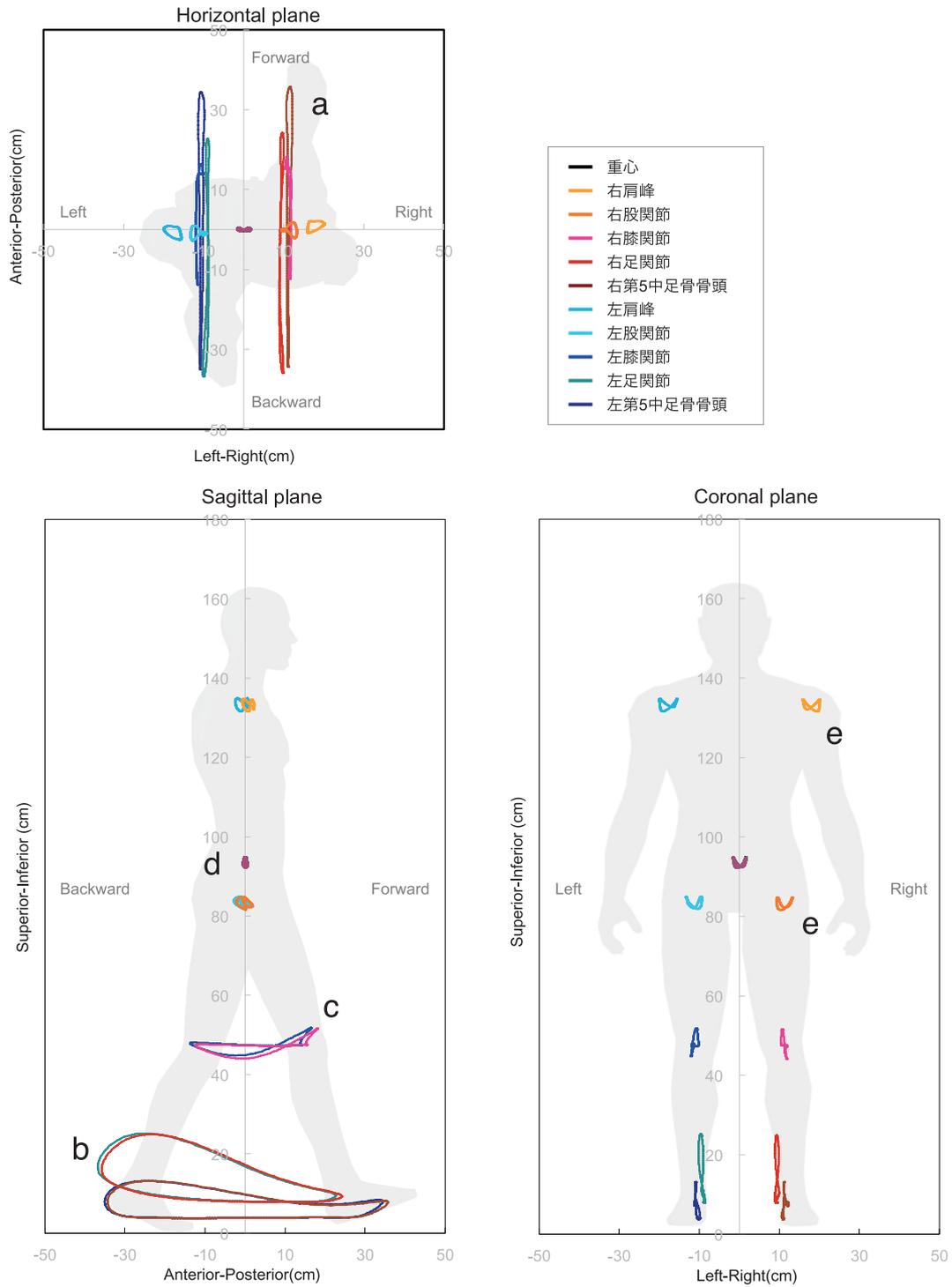


図 1b. 健常者グランドアベレージ LOP  
 健常者 19 名 (年齢  $64 \pm 4$  歳,  $166.3 \pm 5.8$  cm, 体重  $63.9 \pm 6.5$  kg) で作成した。

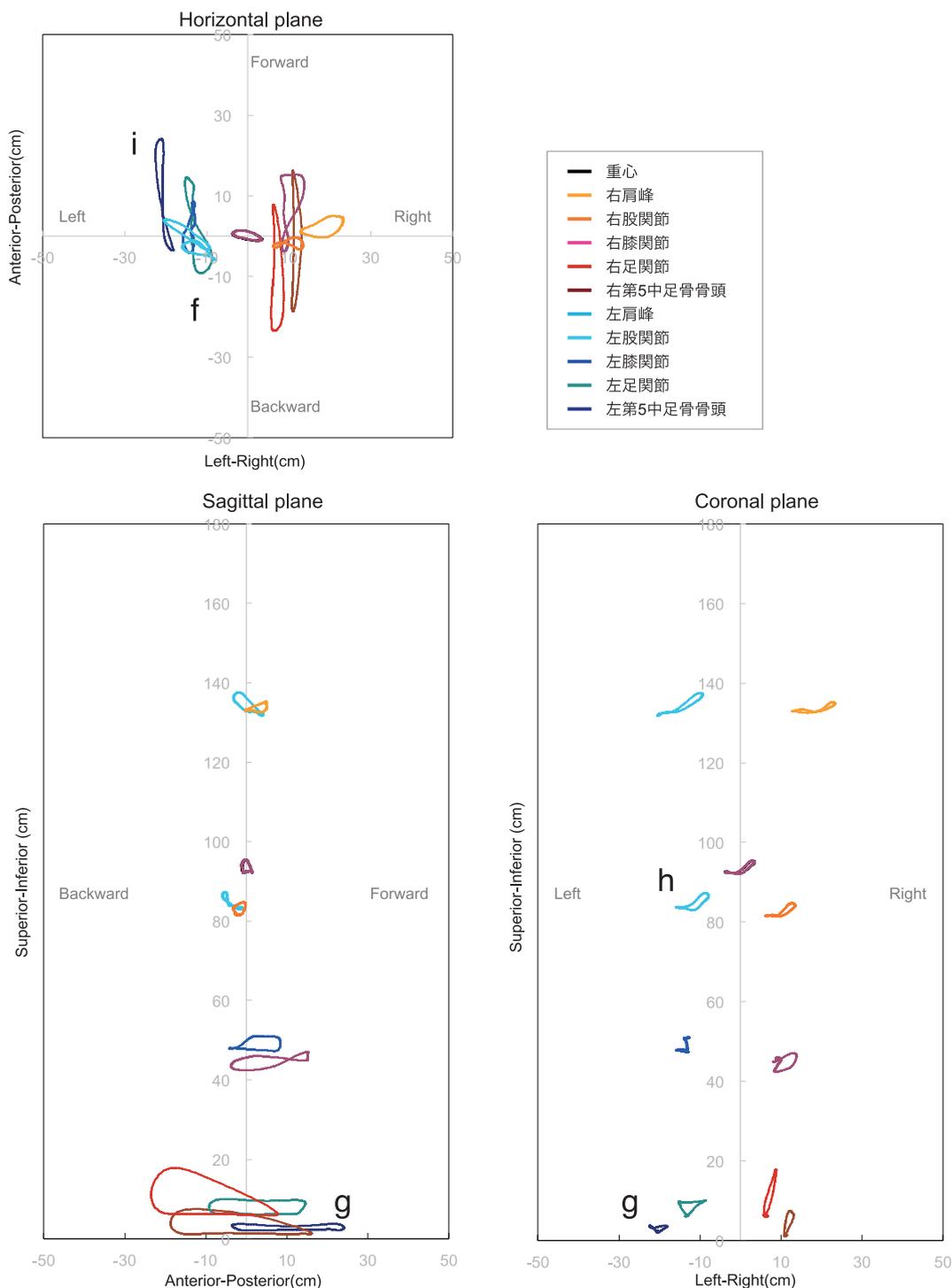


図2. 症例1（脳梗塞患者）のLOP

障害側：左側.

視診の結果，立脚終期で麻痺側の内側ホイップを，遊脚期で麻痺側のトゥクリアランス低下を認めた．水平面で麻痺側の足関節は内側に弧を描く軌跡を呈していた．矢状面で麻痺側の足関節と第5中足骨骨頭は非麻痺側に比べ低い軌道を呈するとともに，非麻痺側より前方に変位していた．前額面で麻痺側の股関節は非麻痺側より挙上していた．

全般に体幹の前傾を認めた。症例2のLOP(図3)の特徴を以下に示す。水平面で麻痺側の足関節, 第5中足骨骨頭は外側に大きく弧を描く軌道を呈していた(j)。また, 非麻痺側の膝関節, 足関節, 第5中足骨骨頭は前後方向の直線的な周期運動を呈しているのに

対して, 股関節と肩峰は円運動を呈していた(k)。前額面で麻痺側の股関節は非麻痺側に比べ挙上し, 両側の肩峰の軌道は, 側方への移動が増加していた(l)。矢状面で両側の肩峰は, 股関節に対して相対的に前方に変位していた(m)。また, 麻痺側の膝・足関節, 第

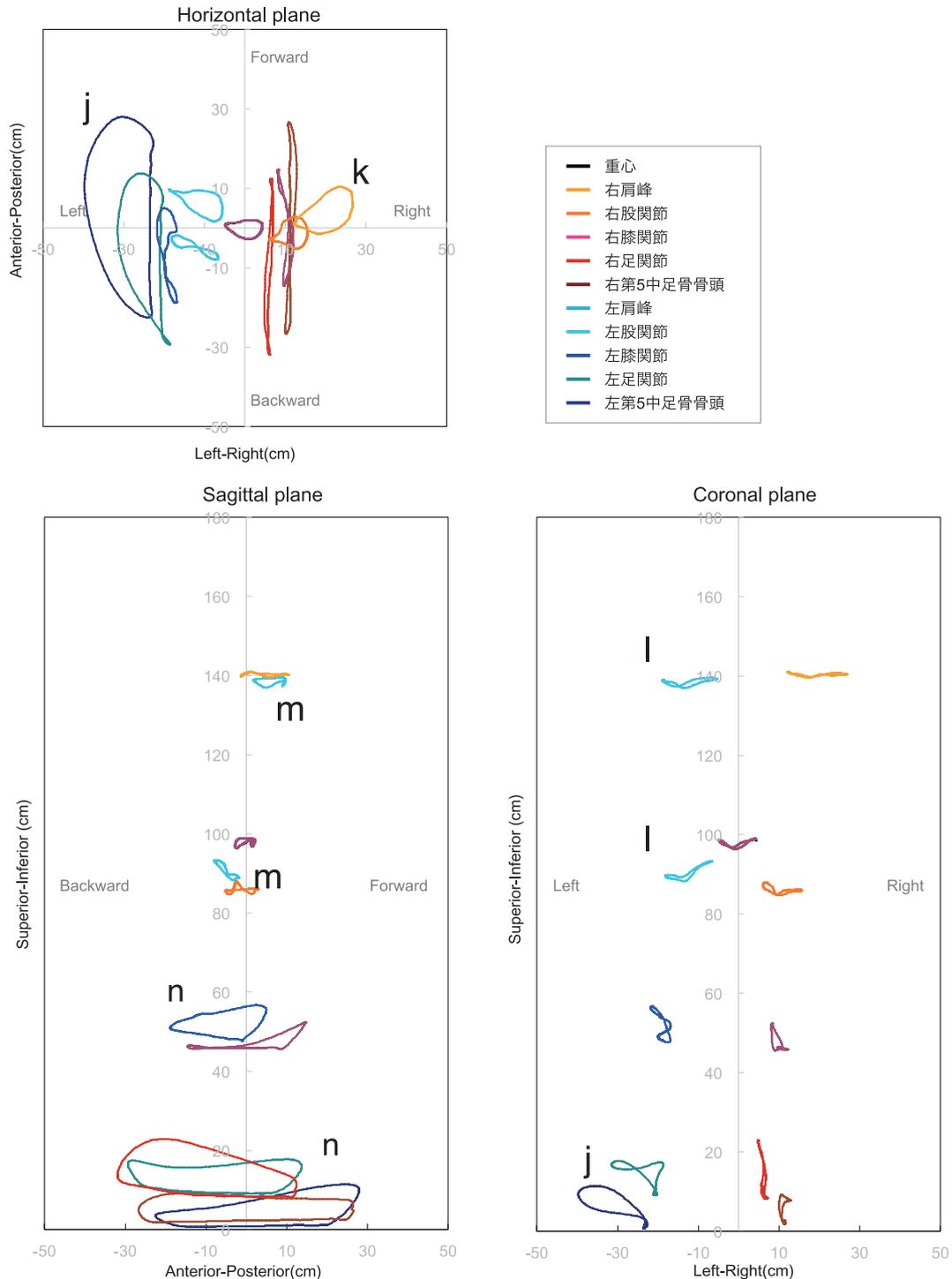


図3. 症例2(クモ膜下出血患者)のLOP  
障害側: 左側.

視診の結果, 遊脚期で麻痺側の分回しと骨盤挙上, 体幹の前傾を認めた。水平面で麻痺側の足関節は外側に弧を描く軌跡を, 麻痺側の股関節と肩峰は円運動を呈していた。前額面で麻痺側の股関節が非麻痺側より挙上し, 両側の肩峰の側方への運動が増加していた。矢状面で両側の肩峰は股関節より前方に変位し, 麻痺側の膝・足関節, 第5中足骨骨頭は台形状の軌跡を呈していた。

5中足骨骨頭は台形状の軌跡を呈しており、健常者グランドアベレージ LOP と異なっていた (n).

症例3は、日常では杖も装具も使用しておらず、今回の計測でも補助具は何も使用しなかった。視診では、両側のデュシェンヌ徴候と立脚期の膝関節の過度の屈

曲を認めた。症例3の LOP (図4) の特徴を以下に示す。前額面上で両側の股関節の周期運動は、蝶型を呈していた健常者グランドアベレージ LOP に比べ、鉛直・側方方向の運動が減少していた。両側の肩峰は、外側へ下降する軌跡を呈し、蝶型の健常者グランドア

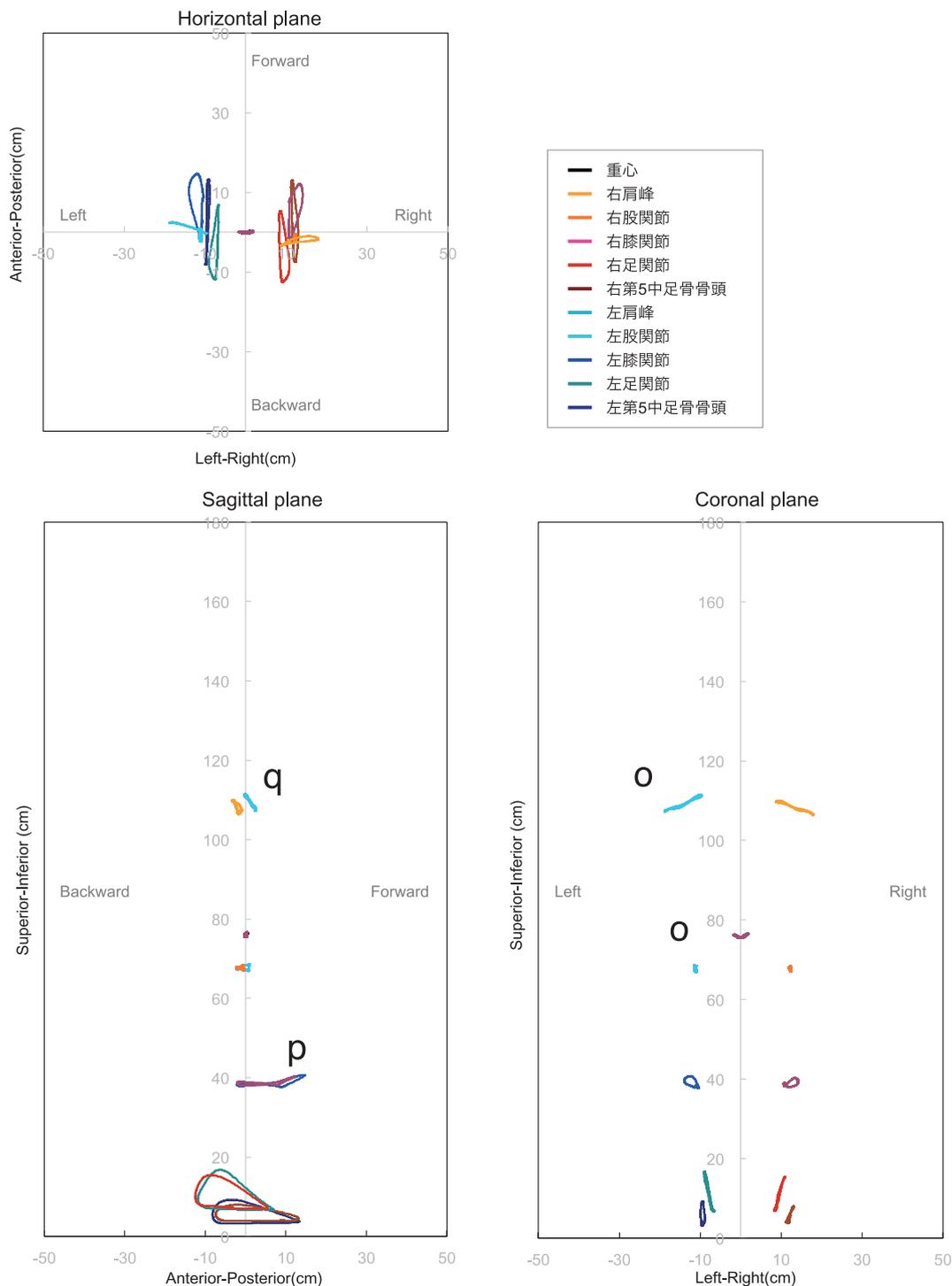


図4. 症例3 (変形性股関節症患者) の LOP  
障害側：両側.

視診の結果、両側性のデュシェンヌ徴候と立脚期の過剰な膝屈曲を認めた。前額面で股関節の運動は減少し、両側の肩峰は側方に下降していた。矢状面で膝関節軌跡は股関節と足関節より前方に変位し、両側の肩峰は上下の軌跡を呈していた。

ベレージ LOP と異なっていた (o), 矢状面で膝関節の軌跡は, 重心と足関節に対して相対的に前方に変位していた (p), また, 両側の肩峰は上下方向の軌跡を呈していた (q).

理学療法士 3 名に LOP の所見を参照させながら, 再びビデオ画像を観察し視診で評価させた結果, ビデオ画像のみで評価した視診の所見に加え, 症例 1 は遊脚期における麻痺側の骨盤挙上を, 症例 2 は, 水平面における体幹の回旋運動, 体幹の側方動揺, 遊脚期における麻痺側下肢の過剰な挙上運動を, 症例 3 は体幹の前傾運動を認めた.

### 考察

本研究では, 健常者のリサーチ観図を用いて健常者グランドアベレージ LOP を作成し, 歩行障害者 3 名の LOP と比較した.

個々の健常者の LOP をみると, 運動パターンや肢節間の位置関係も対称的であった. 矢状面や水平面では膝・足関節と第 5 中足骨骨頭は前後方向に運動し, 肩峰や股関節は, 前後にほとんど動いていないことが理解できた. 前額面で重心とともに肩峰や股関節は, 蝶型を呈していた. これらの特徴は, 健常者の正常歩行を表したものであると考えられた.

症例 1 の前額面で内側に弧を描いていた麻痺側の足関節の軌跡は, 視診で認めた内側ホイップを表し, 矢状面の麻痺側の足関節と第 5 中足骨骨頭の低い軌道は, トウクリアランスの低下を表していると考えられた. また, 前額面で麻痺側の股関節の軌跡は, 非麻痺側よりも挙上位であることが確認できた. これは, 遊脚期における骨盤挙上を表していると考えられた. さらに, 本症例は, 麻痺側の下肢が非麻痺側よりも相対的に前方にであったことから, 非対称的な姿勢を呈していたと考えられた.

症例 2 は, 水平面で外側に弧を描いていた麻痺側の足関節と第 5 中足骨骨頭の軌道は, 視診で認めた遊脚期における分回し運動を表していると考えられた. また, 麻痺側の肩峰と股関節の円運動は, 体幹の回旋運動を表し, 分回しの代償運動と推察した. 麻痺側の股関節は非麻痺側より挙上し, 肩峰と股関節の距離が短縮していた. これは視診で認めた骨盤挙上を表すとともに, 立脚期で麻痺側の体幹を短縮させていたことが推察できた. 両側の肩峰の側方移動の増加は, 体幹の側方への動揺を表しており, 本症例の場合, 手すりを使用した影響も考えられた. 矢状面で肩峰が股関節に対して相対的に前方に変位していたのは, 視診で認めた体幹の前傾を表していると考えられた. また, 麻痺側の膝関節, 足関節, 第 5 中足骨骨頭の台形状の軌跡は, 遊脚期における下肢の過剰な挙上運動を表し, 骨盤挙上と分回しとともにトウクリアランスを確保するための運動と推察できた.

症例 3 では, 前額面における両側の股関節の軌跡は, 健常者グランドアベレージ LOP よりも小さく, 両肩峰は外側方向に下降する運動を呈していた. これは股関節を支点とした体幹の側方への動揺と推察でき, 視診で認めたデュシェンヌ徴候を表していたと考えられた [9]. また, 膝関節の軌跡が股関節や足関節に対して相対的に前方に位置していたことは, 視診で認め

た立脚期の膝関節の過度の屈曲を表しており, 膝関節を屈曲しながら歩行していたことが推察できた. さらに肩峰の上下方向の軌跡は, 股関節の軌跡がほとんど動いていないことをふまえると, 歩行中における体幹の前傾運動を表していたと推察できた.

平地歩行で得られるリサーチ観図は前額面のみである. しかし, トレッドミル歩行では定位置にて歩行を繰り返すため, 前額面に加えて水平面と矢状面のリサーチ観図を描くことが可能となる. また, トレッドミルは, 定速度にて容易に多数歩を計測できるので, 結果の再現性が高くなり, 統計手法の導入が容易になる. さらにトレッドミルを用いた歩行分析は, 狭い空間における計測の実現や手すりや懸垂装置を活用した低歩行能力者の計測が可能になる点において, 臨床における三次元動作分析の導入に有利になると考えられる.

今回, 歩行障害者 3 名の LOP は, 視診で認められた所見に加えて, 視診のみでは観察できなかった多数の所見も確認できた. リサーチ観図のように運動軌跡による各肢節の運動パターンの可視化は, 「軽度」や「中等度」といった言語表現に比べ, より病態を的確かつ容易に理解できる. そして, LOP は, 各肢節の運動パターンだけでなく各肢節間の相対位置関係から姿勢や対称性といった歩行の全体像の理解に有用であると考えられる. また, 歩行は, 多関節が連動した周期運動である. この周期運動は, 健常者では約 1 秒以内であり, 歩行障害者でも遅くとも 2 秒程度である. したがって, 視診ですべての運動を正確に観察することは難しい. LOP のような軌跡データによる運動パターンの可視化は, 視診で見落とすような異常所見も判定し易くなり, 正確な病態理解に役立ち, さらに動作分析の非専門家でも容易に解釈することができる.

LOP の限界として, 歩行の時間的要素の表現が失われるという欠点がある. したがって, LOP の臨床応用は, LOP を単独で活用するのではなく, 三次元動作分析で得られる時間・距離因子や, 関節角度の分析を併用することが望ましいと考えられる.

今後は, 健常者の年齢別や速度別のグランドアベレージ LOP を作成するとともに, LOP で表現できた運動パターンの定量化を試み, 臨床指向的な分析法を開発していきたい.

### 文献

1. McGinley JL, Goldie PA, Greenwood KM, Olney SJ. Accuracy and reliability of observational gait analysis data: judgments of push-off in gait after stroke. *Phys Ther* 2003; 83: 146-60.
2. Eastlack ME, Arvidson J, Snyder-Mackler L, Danoff JV, McGarvey CL. Inter-rater reliability of videotaped observational gait-analysis assessment. *Phys Ther* 1991; 71: 465-72.
3. Hughes KA, Bell F. Visual assessment of hemiplegic gait following stroke: pilot study. *Arch Phys Med Rehabil* 1994; 75: 1100-7.
4. Brunnekreef JJ, van Uden CJ, van Moorsel S, Kooloos JG. Reliability of videotaped observational gait analysis in patients with orthopedic impairments. *BMC Musculoskelet Disord* 2005; 6: 17.

5. Krebs DE, Edelstein JE, Fishman S. Reliability of observational kinematic gait analysis. *Phys Ther* 1985; 65: 1027–33.
6. Teranishi T, Ohtsuka K, Muraoka Y, Saitoh E, Itoh N, Kanada Y, et al. Accuracy assessment of the three-dimensional treadmill gait analysis equipment. *Sogo Rehabilitation* 2009; 37: 939–44. Japanese.
7. Tanabe S, Saitoh E, Ohtsuka K, Teranishi T, Tomita Y, Muraoka Y. Simple method to reduce the effect of patient positioning variation on three-dimensional motion analysis during treadmill gait. *Clin Pract* 2013; 3: e30: 84–6.
8. Yamamoto S, Ehara Y. *Introduction to Body-Dynamics – Hemiplegic Gait and Ankle Foot Orthosis*, 1st ed. Ishiyaku Publishers Inc., 2005. p. 169–70. Japanese.
9. D’Angelo MG, Berti M, Piccinini L, Romei M, Guglieri M, Bonato S, et al. Gait pattern in Duchenne muscular dystrophy. *Gait Posture* 2009; 29: 36–41.