

短 報

## ヒトにおける腕渡り動作の三次元運動解析の試み

### A Pilot Study for Three Dimensional Motion Analysis of Suspensory Locomotion in Humans

岡 健司<sup>1)</sup> 小森 武隆<sup>1)</sup>

**要 約**：ヒトのロコモーション機構を知る手掛かりとして、三次元動作解析装置を用いて、成人が雲梯で腕渡り動作を行う際の上下肢運動を計測した。上下肢関節の三次元角度変化から、上下肢運動を捉えた。片手サポート期におけるスイング側の上肢関節は、屈伸運動を行うことで、手が支持基体に接触する位置を調節していると考えられた。下肢では、スイング側の手と同側の股関節と膝関節が同調しながら屈伸運動を行っており、また、左右の股関節が逆相をなすような動きを示した。腕渡り動作時の下肢は身体重心を前方に送るように運動しており、サポート側の上肢を軸とした回旋を補助している可能性が示唆された。

**キーワード**：雲梯、ブラキエーション様ロコモーション、懸垂型ロコモーション、運動学的計測、三次元運動計測

## 1 序文

ヒトは直立二足歩行で移動する地上性動物である。二足歩行時の身体の支持と前進は専ら下肢に依存しており、下肢の構造・機能は様々な歩行研究の対象となってきた<sup>1-3)</sup>。しかし、二足歩行においては、上肢にも運動が生じている。二足歩行中には通常、下肢と反対側の上肢とが同調し、片方の足が振り出されるときに対側の腕が同時に振り出されるような、「腕振り」が生じる。

こうした腕振りは歩行研究において重視されないことも多いが<sup>3,4)</sup>、腕を振ることができないように処置する、下肢と同側の手が振り出されるようにするといった条件を課すと、垂直床反力や垂直角運動量が増加するといった歩容の変化が生じ、代謝エネルギーが増えることから、歩行における腕振りは歩容の安定や代謝エネルギーの減少に関与し、歩行の移動効率を高めていると考えられている<sup>5-7)</sup>。

ロコモーションにおけるヒトの上肢は、二足歩行時の腕振りのように補助的に働くだけではない。ヒトは、樹上で生活していた祖先霊長類から樹上適応の痕跡を残しており、上肢のみで懸垂し、体重を支持して移動する能力を有し

---

Kenji Oka

E-mail : okak@kawasakigakuen.ac.jp

1) 大阪河崎リハビリテーション大学  
リハビリテーション学部 理学療法専攻  
2018年9月20日受付、2018年11月13日受理

ている。例えば、公園などの遊具の雲梯で懸垂型ロコモーションをすることができる。木の枝に上肢のみで懸垂し、腕を交互に振り出しながら前進する懸垂型ロコモーションは、ヒトに近縁なテナガザルが得意とするものである。テナガザルが行うこのロコモーション様式はブラキエーションと呼ばれる<sup>8)</sup>。本邦では、ヒトが行う場合も含めて「腕渡り」とも呼ばれる<sup>9)</sup>。

ヒトの直立二足歩行とテナガザルのブラキエーションは、いずれも二肢（両下肢あるいは両上肢）で体重を支持しながら、重力を利用した身体質量中心の振り様運動によって前進するという共通点を持つ<sup>10,11)</sup>。ヒトの腕渡り動作に関する先行研究は少ないが<sup>9,12,13)</sup>、テナガザルのブラキエーション時においては下肢運動が姿勢調節に寄与する可能性が示されている<sup>14,15)</sup>。すなわち、二足歩行と腕渡りのいずれにおいても、身体の支持に関与しない二肢が姿勢調整に関与している可能性がある。ヒトの腕渡り動作は、持続性や安定性が低いなど、テナガザルのブラキエーションと異なる点があるが<sup>9,12)</sup>、ヒトにおいて下肢依存の二足歩行と上肢依存の腕渡り動作を比較することは、ロコモーション制御機構を知る手がかりの一つとなると考えられる。

ヒトの腕渡り動作は、身体を支持する上肢を軸とした回旋を伴うロコモーションでありながら、三次元的運動解析が報告されていない。ロコモーション環境の構築や動作解析システムを利用するために大掛かりな実験設備が必要となるため、腕渡り動作の三次元運動解析が進んでこなかったと考えられる。本研究では、実験室内に雲梯を設置し、三次元動作解析装置を用いてヒトの腕渡り動作時における上下肢運動を計測すること、さらに定量的および定性的に解析することを試みた。

## 2 方法

計測は大阪河崎リハビリテーション大学運動学実習室で行った。成人男性2名（20 - 21歳）を対象とし、両側の肩峰、上腕骨外側上顆、尺骨茎状突起、手背部、上前腸骨棘、大腿骨大転子、大腿骨外側上顆、腓骨外果、第5中足骨底（皮膚上）に、円形の赤外線反射マーカ（直径12mm）を両面テープで貼付した。

二足歩行時および腕渡り動作時におけるこれらのマーカの軌跡を、8台の赤外線 CCD カメラ（NAC Image Technology 社）で捕捉し（サンプリング周波数；100Hz）、三次元動作解析装置 MAC3D System（Motion Analysis 社）によって上肢・下肢の動きを解析した。

二足歩行は自然歩行で行い、足が床面に接地している期間をその足のサポート期、足が床面から離れている時期をスイング期とした。

実験室内に設置した特注のアルミニウム製の雲梯（グリップ径2.8 cm、グリップ間隔30 cm、グリップ幅53 cm；有限会社智寛）を支持基体として、ステップ長が60cmとなるように腕渡り動作を行い、雲梯に手が接触している時期をその手のサポート期、雲梯から手が離れている時期をスイング期とした。

二足歩行、腕渡り動作ともに、左サポート期に焦点を絞り、三次元空間内における肩・肘・股・膝関節の屈曲/伸展角度変化を解析した。ここでの肩・股関節の三次元屈曲/伸展角度は、一般的な屈曲/伸展角度とは定義が異なり、外転/内転の要素をも含むもので、体幹長軸と上腕・大腿の位置関係を反映する（図1）。肩関節においては、解剖学的肢位を基準とし、「屈曲」は体幹に対して上腕が前方・外方に向かう運動を、「伸展」は体幹に対して上腕が後方・内方に向かう運動を指す。股関節では、解剖学的肢位を基準とし、「屈曲」は体幹に対して大腿が前方・外方に向かう運動を、「伸展」は体幹に

対して大腿が後方・内方に向かう運動を指す。膝関節、肘関節においては、「屈曲」は前腕が上腕に近く運動、あるいは下腿が大腿に近づく運動であり、「伸展」は前腕が上腕から離れる運動、あるいは下腿が大腿から離れる運動である。



図1 関節運動の定義

体節が矢印の方向に動く運動を「屈曲」とし、その反対方向に動く運動を「伸展」とする。

本研究は、大阪河崎リハビリテーション大学研究倫理審査委員会の審査を経て承認された後、被験者への説明と同意のもとで実施された(承認番号 OKRU29-A102)。

### 3 結果および考察

二足歩行の左足サポート期および腕渡り動作の左手サポート期の四肢運動を解析した。

二足歩行の左足サポート期は、前方に位置する左足を軸にして右足が後方から前方に振り出される時期である。すなわち、左足サポート期はおおよそ右足スイング期と重なる。この左足サポート期には、右下肢が前方に振り出されると同時に、右上肢が後方に振られ、左上肢は前方へと振られる運動が起こる(図2)。

左足サポート期の股関節三次元角度は、スイング側である右側は伸展し、サポート側である左側は屈曲していた。これは、左足サポート期(右足スイング期)には、左足が接地した状態で身体全体が前方に送り出されることで体幹に対して大腿部が後方に移動すること、右下肢が

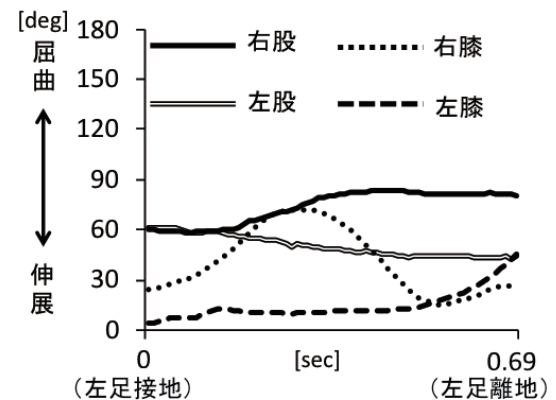
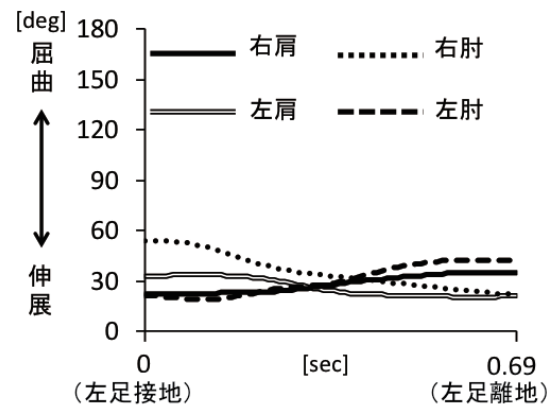


図2 二足歩行の左足サポート期における上下肢関節運動の一例

床を離れて前方に振り出されることを示すと考えられる。

二足歩行時の上肢は、左右が逆相をなすように動いていた。肘関節角度は肩関節角度より位相がやや遅れていたことから、歩行中の肘関節の動きは肩関節による腕振りに伴って受動的に動くことが示唆された。また、上肢と対側下肢がほぼ同位相で動いていた。こうした結果は、二足歩行時の腕振りは体幹の回旋に抵抗する働きをしているという先行研究を支持するものと考えられる。

腕渡り動作においては、二足歩行時と同様、上肢運動に加えて下肢運動が認められた。ただし、肩関節と股関節の変化パターンに明瞭な類似性が見られない、同側の股関節と膝関節が同調して動くなど、二足歩行とは異なる様相を示した(図3)。

腕渡り動作の左手サポート期は、左手を支点にして右手が前に振り出される時期であり、おおよそ右手スイング期と重なる。上肢の動きのパターンは、被験者間、被験者内で明瞭な差異はなかった。サポート側である左側の肩関節と肘関節では、動きが小さかった。これは、左手での懸垂時に身体が下に引かれるのに伴って関節が伸展位にあってほぼ動かなかったことによると考えられる。スイング側の右上肢では、肩関節と肘関節は類似したパターンで動いた。右手が雲梯のグリップから離れると、右上肢全体を体幹に近づけるように屈曲させ、その後、次のグリップに向けて手を伸ばした。この動きは、グリップ間隔が一定である雲梯において、手が支持基体に接地する位置を調節するために<sup>16)</sup>、全体として能動的に動いていると考えられた。

一方、腕渡り動作時の下肢運動は、上肢運動に比して被験者間、被験者内でばらつく傾向があったが、共通するパターンがいくつか確認された。左手サポート期において、右手が前方に

振り出されるときに右下肢関節が屈曲してその後には伸展していくこと、右股関節と右膝関節が同調して動くこと、左股関節と右股関節が逆相をなすような動きを示すことが、共通パターンの代表であった。

左サポート期の前半、すなわち右手がグリップから離れて身体が下降しようとする時期に、右下肢関節が屈曲するという運動は、下肢の質量を前方に移動することで身体質量中心を進行方向へ送り、かつ、体軸回旋によって体幹が前方に移動することに寄与しているという可能性が考えられる。右側の股関節と膝関節の角度変化パターンが一定の類似性を保っていたことから、この時の右膝関節運動は右股関節の動きに追従したものであったことが示唆される。しかし、右上肢が次のグリップに向けて伸展されるときには、右下肢関節の伸展が起こっていた。あたかも、右脚で蹴りながら、右腕を伸ばしているかのような動きである。

一方、腕渡り動作の左サポート期における左

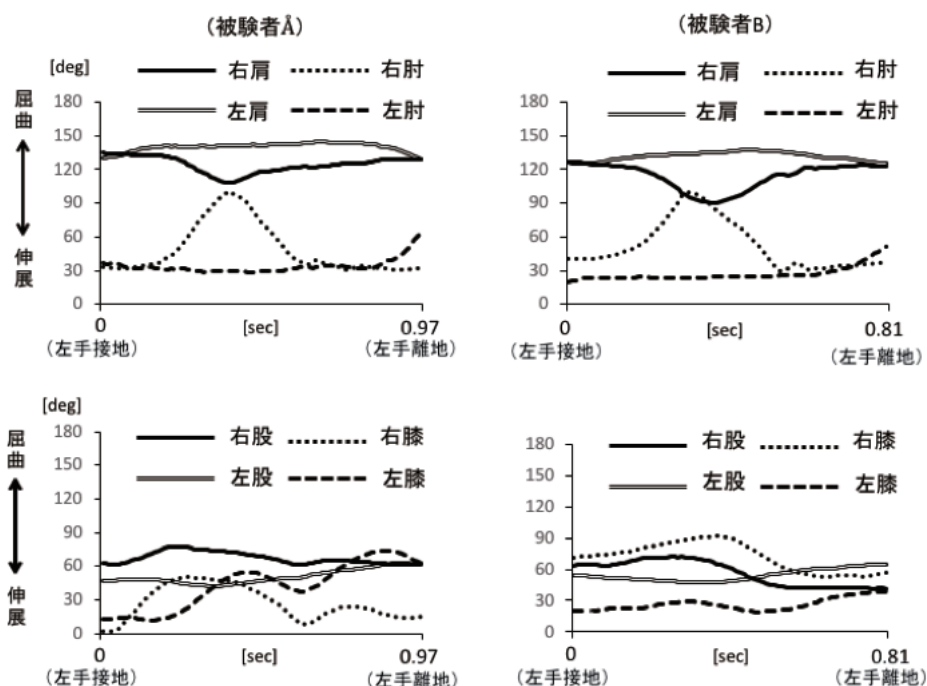


図3 腕渡り動作の左手サポート期における上下肢関節運動の例  
(左図) 被験者A (右図) 被験者B

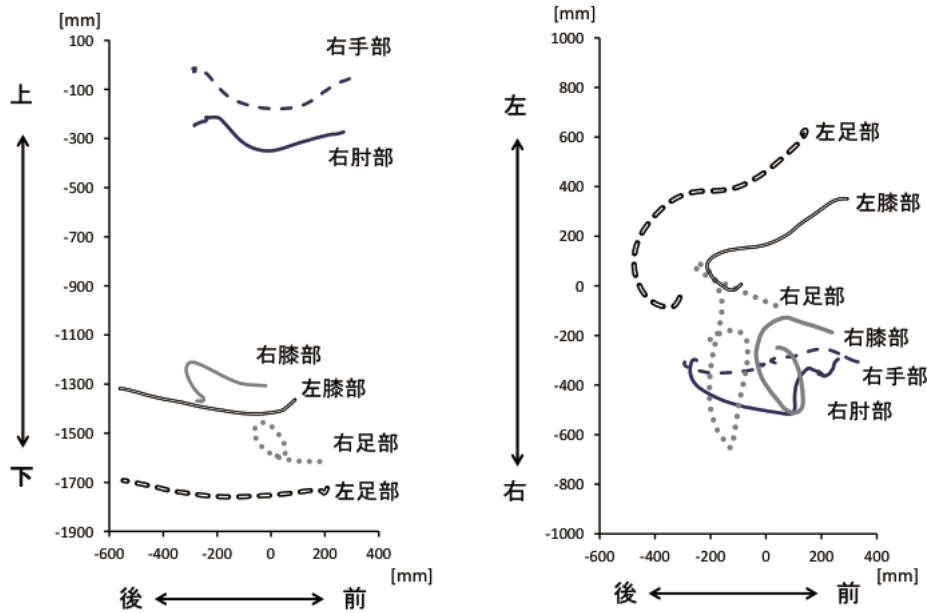


図4 腕渡り動作の左手サポート期における上下肢運動の一例  
 (左) 矢状面内の四肢の動き (右) 水平面内の四肢の動き

下肢では、股関節は右に比して動きが小さく、股関節と膝関節は連動していなかった。腕渡り動作における下肢の各マーカーの動きを絶対座標で見ると(図4)、右下肢の動きは複雑だが、左下肢の動きは単純であったことから、左下肢の動きは右下肢より小さいと言える。左サポート期の左下肢では、左下肢が過剰に動いて右下肢運動を妨げないように股関節が働いていた可能性がある。しかし、膝関節は股関節と異なるパターンで動いており、下肢重心位置の微調整に膝関節運動が関与しているとも考えられる。

二足歩行時の腕振りとは、体幹回旋に抵抗し、身体の垂直運動を抑制し、必要な代謝エネルギーが減少すると考えられている<sup>5-7)</sup>。しかし、腕渡り動作における体幹回旋は手の到達距離を増加させるものである。スイング側の上肢運動だけでなく体幹回旋による身体全体の前方移動が、前進移動距離の確保に関与していると考えられた。腕渡り動作時の下肢は、体幹回旋に抵抗するのではなく、体幹回旋を補助するために前方に振り出されている可能性がある。

#### 4 結論

本研究では、従来報告されていなかったヒトにおける腕渡り動作(ブラキエーション様ロコモーション)の三次元運動計測を、実験室内に雲梯を設置し、三次元動作解析装置を用いることで試みた。計測点を適切に絞ることで、三次元動作解析装置を用いた基本的な上肢運動および下肢運動の計測・解析が可能であることを確認した。腕渡り動作は体軸回旋を伴いながら、決まった位置にある細い支持基体に手を接地させ続けるロコモーションである。肩関節、股関節の運動は、矢状面・前額面・水平面の各平面上における運動に分解して詳細に解析するより、左右下肢の相互関係や上下肢が体幹から離れる距離あるいは近づく距離を解析するという視点が、腕渡り動作を知るためには適しているのではないかと考えられた。体幹回旋はヒトの歩行時に見られる大きな特徴であり、腕渡りにおいても、マーカー貼付部位を工夫するなどして<sup>17)</sup>、さらに詳細に分析する必要がある。

本研究の解析結果から、ヒトの二足歩行における上肢は体幹回旋を打ち消すような方向に動くが、腕渡り動作時の下肢運動は身体重心を前方に送って体幹回旋を補助している可能性があることが示された。

上下肢の振り出される順序とタイミングにおいては、二足歩行と腕渡り動作に類似性があり、いずれのロコモーション時にも、上肢と下肢が協応して運動することで推進や姿勢保持に関与していると考えられた。

本研究は少数例による定性的解析を中心とした予備的研究であるが、カメラ位置およびマーカー貼付部位の再設定や主要関節周囲筋あるいは体幹筋の筋電図計測を組合せた運動実験を進めることで、ヒトのロコモーション時の上肢と下肢の関係をさらに追求できると考える。

本研究の内容の一部は、第38回バイオメカニズム学術講演会で発表した。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP 17K07590 の助成を受けて行われた。

## [参考文献]

- 1) Hardt DE: Determining muscle forces in the leg during normal human walking—an application and evaluation of optimization methods. *J Biomech Eng. American Society of Mechanical Engineers*, 100:72–78, 1978.
- 2) 伊藤幸太, 藤原育海, 細田耕, 名倉武雄, 荻原直道: デジタル画像相関法を用いたヒト二足歩行中の足部3次元動態計測. *バイオメカニズム*, 23:31–41, 2016.
- 3) Winter DA: Overall principle of lower limb support during stance phase of gait. *J Biomech*, 13:923–927, 1980.
- 4) Anderson FC, Pandy MG: Dynamic Optimization of Human Walking. *J Biomech Eng*, 123:381–390, 2001.
- 5) Bruijn SM, Meijer OG, Beek PJ, van Dieen JH: The effects of arm swing on human gait stability. *J Exp Biol*, 213:3945–3952, 2010.
- 6) Collins SH, Adamczyk PG, Kuo AD: Dynamic arm swinging in human walking. *Proc R Soc B Biol Sci*, 276:3679–3688, 2009.
- 7) Meyns P, Bruijn SM, Duysens J: The how and why of arm swing during human walking. *Gait Posture*, 38:555–652, 2013.
- 8) 平崎鋭矢, 岡健司: テナガザルのブラキエーション. *体育の科学*, 65:491–495, 2015.
- 9) 岡秀郎, 岡田守彦, 木村賛, 葉山杉夫: ヒトの腕渡り動作における喉頭動態と筋活動様式. *霊長類研究*, 12:207–220, 1996.
- 10) Kuo AD: The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy: A dynamic walking perspective. *Hum Mov Sci*, 26:617–656, 2007.
- 11) Bertram J, Ruina A, Cannon C, Chang Y, Coleman M: A point-mass model of gibbon locomotion. *J Exp Biol*, 202:2609–2617, 1999.
- 12) Hayama S, Honda K, Oka H, Okada M: Air trapping and arboreal locomotor adaptation in primates: a review of experiments on humans. *Z Morphol Anthropol*, 83:149–159, 2002.
- 13) Gabbard CP, Patterson PE: Movement Pattern Analysis on the Horizontal Ladder among Children 4 to 9 Years. *Percept Mot Skills*, 52:937–938, 1981.
- 14) Oka K, Hirasaki E, Hirokawa Y, Nakano Y, Kumakura H: Brief communication: Three-dimensional motion analysis of hindlimb during brachiation in a white-handed gibbon (*Hylobates lar*). *Am J Phys Anthropol*, 142:650–654, 2010.
- 15) 岡健司, 熊倉博雄: シロテナガザルのブラキエーション時における大腿直筋の活動. *大阪河崎リハビリテーション大学紀要*, 7(2):67–76, 2013.
- 16) Usherwood JR, Bertram JEA: Understanding

- brachiation: insight from a collisional perspective. *J Exp Biol*, 206:1631-1642, 2003.
- 17) Thompson NE, Demes B, O'Neill MC, Holowka NB, Larson SG: Surprising trunk rotational capabilities in chimpanzees and implications for bipedal walking proficiency in early hominins. *Nat Commun*, 6:1-7, 2015.