

第11回 走のバイオメカニクス

教科書 金子公宥、福永哲夫編、バイオメカニクス、杏林書院 第8章

参考書 宮下充正監修、小林寛道編著、走る科学、大修館書店

11.1 走記録の変遷

スポーツにおいて、走るといってもそれは単純に走るだけの陸上競技からボールを持って走るラグビーや、ボールを蹴って走るサッカーというようにきわめて幅が広い。人類が速く走ることに価値を見出したのは、19世紀に入ってからだと思ってよい。それ以前、速く走れることの意義はそれほどなかった。

ここでは、陸上競技の走動作を中心にして走る動作のバイオメカニクスに焦点をあてる。

11.1.1 100m 走世界記録の変遷

グラフの100m短距離走の記録変遷をみてわかるように、1912年にはすでに手動計測ではあるがすでに10秒台に突入している。

11.1.2 マラソン (42.195Km) 世界記録の変遷

マラソン競技についてはかつて走行距離が、42Kmではなく40Kmや42Kmといった距離で競われたことがあるためにかつてのデータと直接比較はできないが、1896年に行われたマラソン大会(40Km)での最高タイムが、2時間58分50秒であったのが2007年9月にはエチオピアのゲブラシラシエ選手が、2時間4分26秒という驚異的な記録で優勝している。

11.2 走運動のキネマティクス

走運動は様々な側面から研究がおこなわれてきている。映像解析法を用いたキネマティクス、フォースプレートや逆動力学計算に基づいたキネティクス研究が盛んである。ここではまず映像解析法を主としたキネマティクスに関する話題をとりあげる。

11.2.1 ピッチとストライド

走運動の状態をあらわす際に、コーチングの現場では**ストライド長 (SL: stride length)** と **ピッチ (SF: stride frequency, SR: stride rate)** という言葉が用いられることがある。ストライド長は2歩分、すなわち1周期をあらわすこともあり、1歩分は、ステップ長 (SL: step length) と呼ぶので注意が必要である。 $SL \times SF/60 = Velocity(m/s)$ という関係があるために、ピッチとストライド長との積は、走速度となる。したがって、同じ走速度を得るために異なるピッチとストライド長の組み合わせがある。

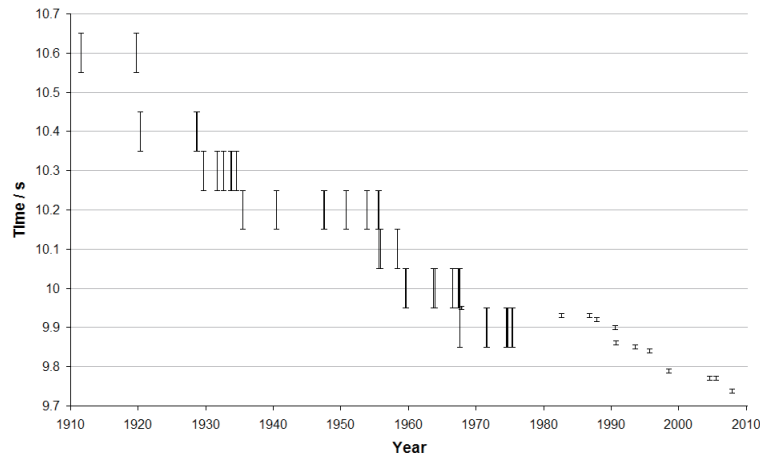


図 11.1: 男子 100m 走の世界記録変遷 (Wikipedia より)

教科書 168 ページにあるように、走行速度があがるにつれてストライド長とピッチは変化するが、最初の速度上昇はストライド長の増加に起因する。疾走状態からさらに速度を上げると、次にピッチが向上し、逆にストライド長は低下する傾向にある。また最初のストライド長の増加は非支持局面、すなわち蹴った脚が前方に振り戻されるときにストライド長が伸びたことに起因している。

11.2.2 走運動のフォーム

走運動のフォームは走行速度によって変化する。走行速度が増加すると、下肢各部の変位が大きくなる、大腿の位置・角度変化が大きくなる、離地時の下肢関節の伸展が大きくなることなどが挙げられる。図 11.2 には走行速度の変化に対する下肢の動きを大転子 (股関節) を固定した視点から見ているものである。

一般的な誤解として、「速く走る選手は大腿 (太もも) が上がっている」というものがある。図 11.3 は複数の被験者の走速度とももあげ、ひきつけにおける角度を示した図であるが、この図からもわかるように走行速度にはこれらの値は関係しない。大腿部を前方に挙上するためには鼠径部を中心として下腹部と大腿をつなぐための筋の収縮が不可欠であるが、筋電図研究からもこれらの筋活動がそれほど活発ではないことも分かっている。また筋生理学の大前提である A.V.Hill の法則を考えれば高速で疾走する為には力を入れないほうが望ましいこともうなづける。

11.3 走運動のキネティクス

11.3.1 走運動における地面反力

走運動に限らず、歩行などの運動でもヒトを前方に推進するのは地面がヒトに及ぼした力の結果である。図 11.4 は異なる走速度で走ったときの地面反力のうち前後方向と鉛直方向の分力である。走行速度の上昇にともなって、片側脚が支えている支持期の時間は短くなり、最高速度においては、約 0.1 秒程度の接地時間となる。支持期前半には前後方向ではブレーキ力、すなわち走る方向とは逆の後ろ向きの力が作用する。鉛直方向では、着地直後には大きな力 (着地時の衝撃力) が作用する。低速の場合には高速ではみられる最初のピークが消失し、持続時間も長く約 0.25 秒から 0.3 秒程度まで伸びる。鉛直方向成分は最高速度においては、体重の 4 倍から 5 倍にもなる。

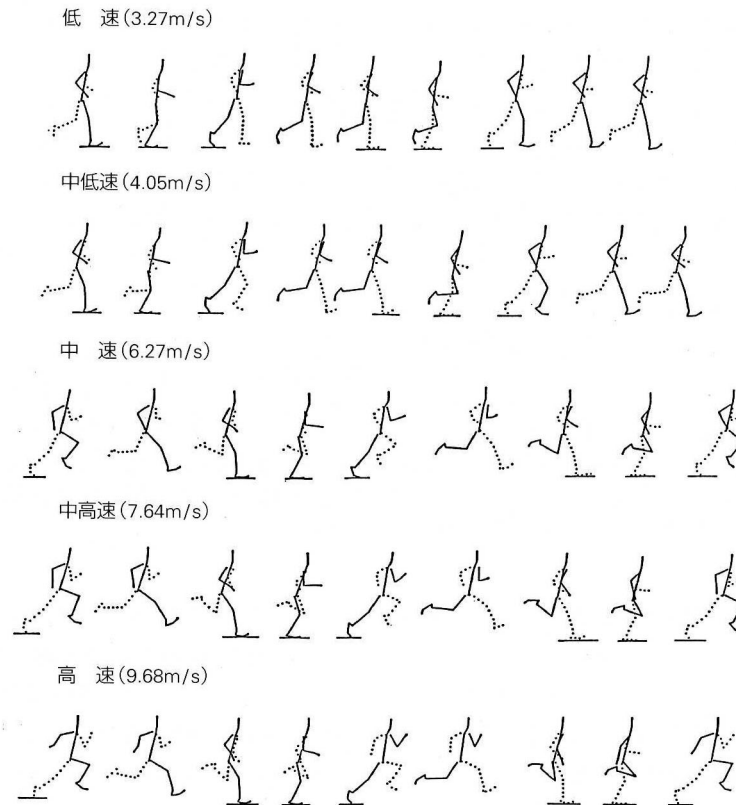


図 8-4 各種の速度による疾走動作

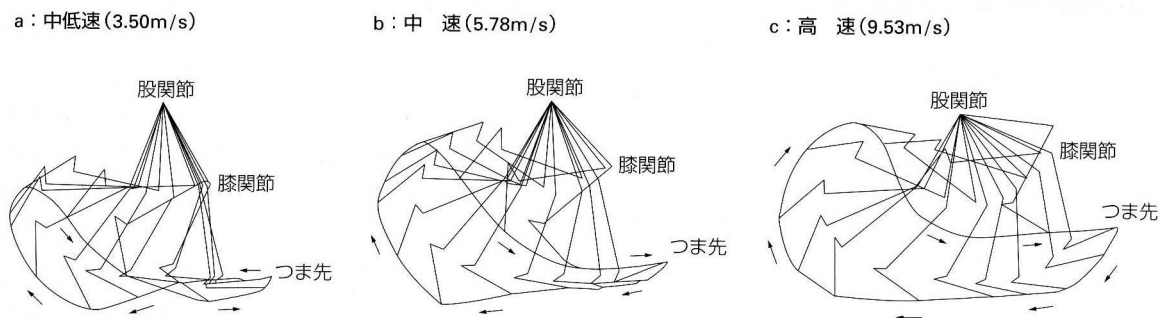


図 8-5 大転子を中心とした脚の動き

(阿江通良ほか：走速度の増大による下肢の動きの変化—走速度と足先および膝の速度，加速度との関係に着目して—，日本体育学会第 34 回大会，1983)

図 11.2: 速度増加に伴う走フォームの変化

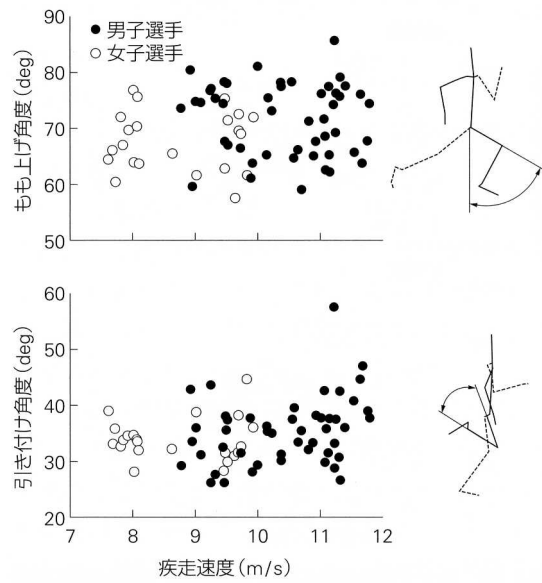


図 8-47 疾走速度ともも上げ角度、引き付け角度の関係
(伊藤 章ほか：100m 中間疾走局面における疾走動作と速度の
関係、体育学研究，43：260-273，1998 より引用改変)

図 11.3: 走行速度の変化に伴うももあげ角度・ひきつけ角度の変化

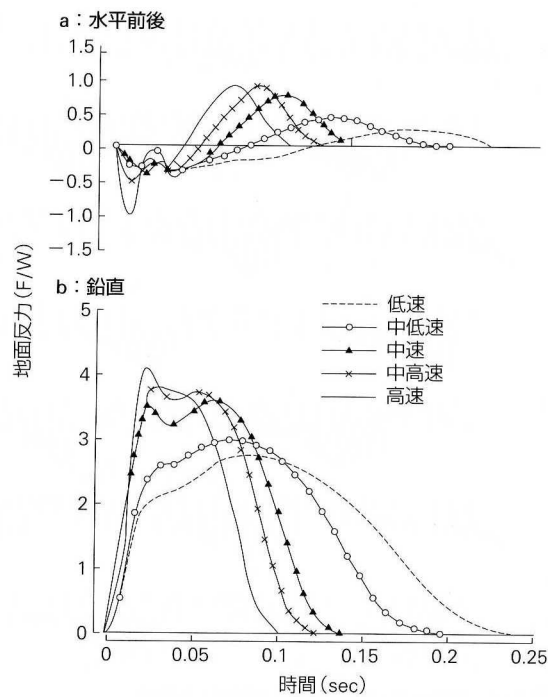


図 8-11 速度の異なる疾走における地面反力の変化(a：
水平前後方向，b：鉛直方向)
(阿江通良ほか：疾走中の地面反力の変化—疾走速度の増大による
影響、日本体育学会第 35 回大会，1984)

図 11.4: 速度増加に伴う地面反力の変化

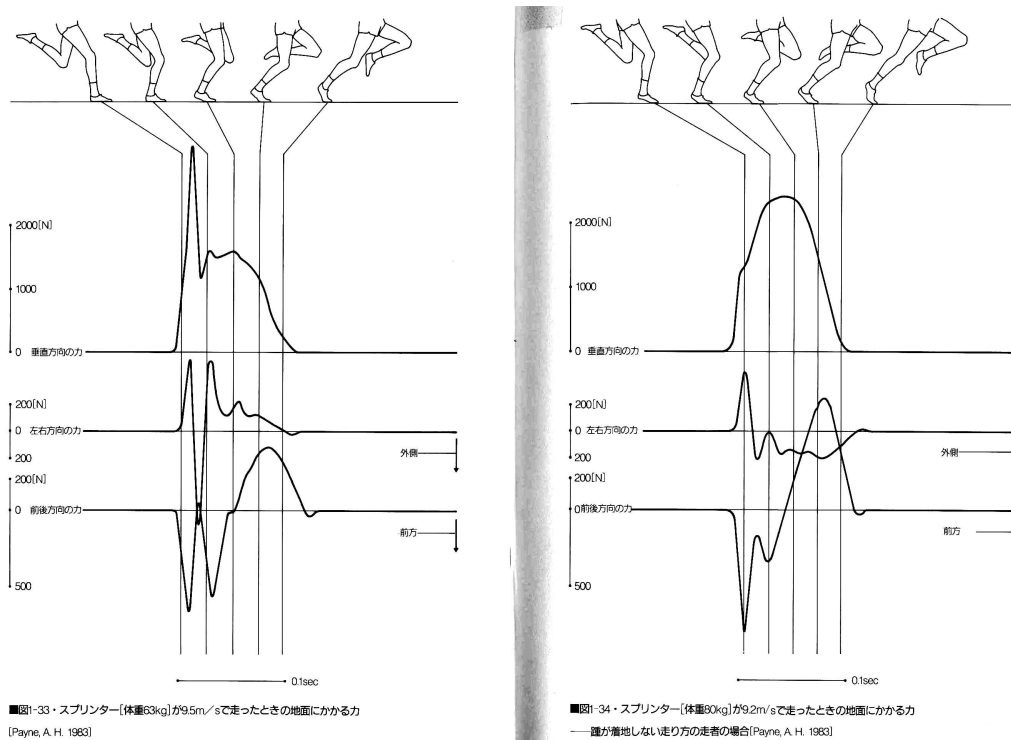


図 11.5: 異なる走フォーム選手の着地衝撃

11.3.2 着力点の移動軌跡

走行といっても、その速度は様々であるが中速度から高速度域にかけて、選手がどの部分で着地をしているのかを知ることは大変重要である。Payne(1983)はレース競技場にフォースプラットフォームを埋め込み、異なる接地によって走った2名の選手の床反力を計測した(図 11.5)。図左は、踵接地の選手であり、図右は中足部接地の選手の力発揮パターンである。

表 11.3.2 にはレース中に計測された各選手の接地がどの部位で行われていたのかを示すものである。これによればスプリンターでは拇指球または足裏全体で着地する選手が多く、長距離走選手であれば踵からの接地が多いということがわかる。

図 11.3.2, 図 11.3.2 には着地中の着力点中心の移動を示している。

表 11.1: レース中における着地のタイプ (Payne, A. H., 1983)

ランナータイプ	踵	足裏全体	拇指球または足裏全体	拇指球	サンプル数
100~200m	28	11	56	6	18
400~1500m	27	32	27	15	41
500m~	64	29	7	0	31
全体平均	40	27	26	8	90

11.3.3 走運動のエネルギー

走運動の原動力は走者の筋活動にほかならない。下肢を中心とする筋活動によって動かされた下肢が地面との接触により前方への推力をうける。図 11.7 は、疾走中における関節角速度と関節トルク

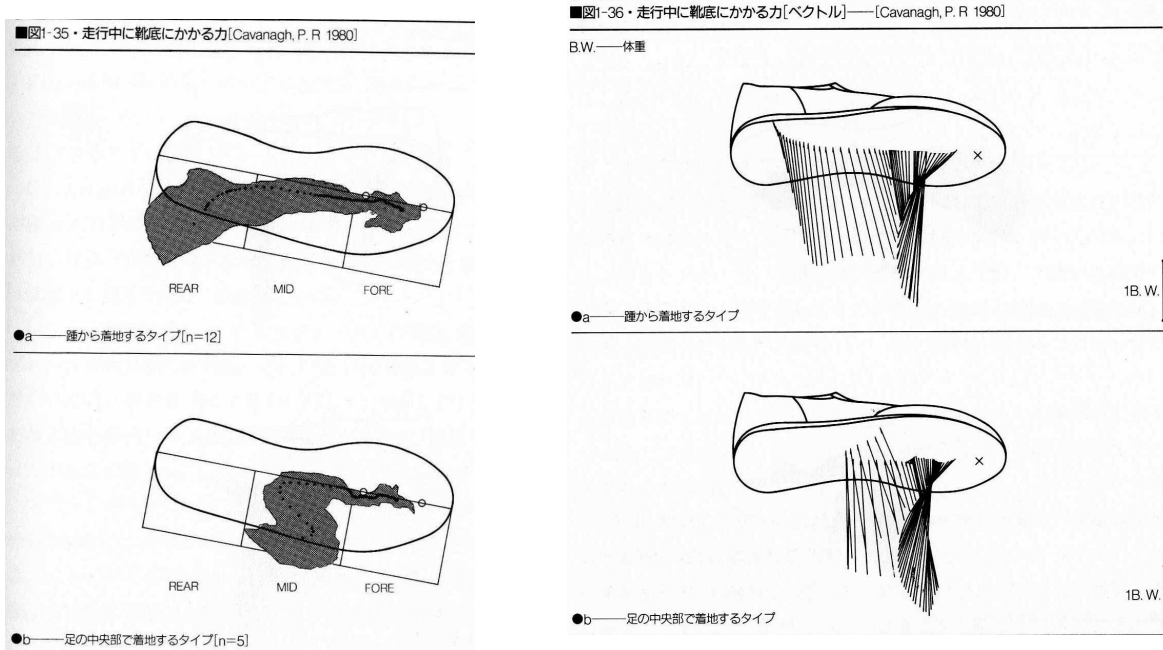


図 11.6: 異なるフォームにおける走運動中の着地点の軌跡

を示している。図 11.8 には 1 周期中の**筋腱複合体 (muscle-tendon complex)** の長さ変化とこのときの EMG の活動を示している。筋腱複合体とは筋の終端にある腱をも含めたものを指す。

股関節トルクの正方向、すなわち股関節を屈曲させる方向のトルクは非支持期前半で正の大きさを持ち、後半では負になる。図から股関節伸展トルクはすでに着地前から発揮されている。これに対して膝関節トルクは非支持局面前半では負、すなわち伸展のためのトルクが発揮されている。一見するとこれは不思議である。非支持期前半、すなわちスイング期前半では膝関節は屈曲するが、この局面では実は大腿直筋の伸展による膝関節の伸展トルクが発揮されている。つまりこの膝が曲がっている、という事象はキック後に膝関節から下部分の下腿が持っていた運動量などに起因するものである。

11.3.4 走りと身体各部の慣性モーメント

走行中の下肢動作を生み出す股関節・膝関節・足関節まわりの回転運動を考える際に、仮に同じトルクを発揮すれば慣性モーメントが小さいほうがより大きな角加速度を生じさせることができる。逆に慣性モーメントが大きければ回転角加速度を大きくすることができない。したがって、脚を前方に振りだそうとした場合、後ろにキックして伸ばしたままの下腿をそのまま前に振り戻そうとすれば非常に大きな慣性モーメントとなり、前方への振り出しが遅くなってしまう。したがって我々は膝を曲げることで小さな慣性モーメントを作り出している。

また走者の走りをよく観察してみると、その速度によって腕ふりに違いがみられることに気が付く。短距離走者では、よく腕を伸ばした選手をみかけ、マラソンや駅伝などの長距離走者では肘を曲げて走ることが多い。これは慣性モーメントと角運動量によって説明ができる。

外力を受け続ける走りにおいては、全局面を通じては角運動量保存則は働かないが非支持期においては空気抵抗 (実際には走行パワーのうちいくらかを消費している。約 0.15 馬力程度) のみしか働かないために、角運動量保存則がきいてくる。短距離走のような高速疾走においては、質量の大きな脚が回転運動を行った場合には、これらの角運動量が大きい状態となる。空中期においてはこれはほぼ保存されるために、体幹の軸をぶれさせないようにするため (バランスをとる、といった

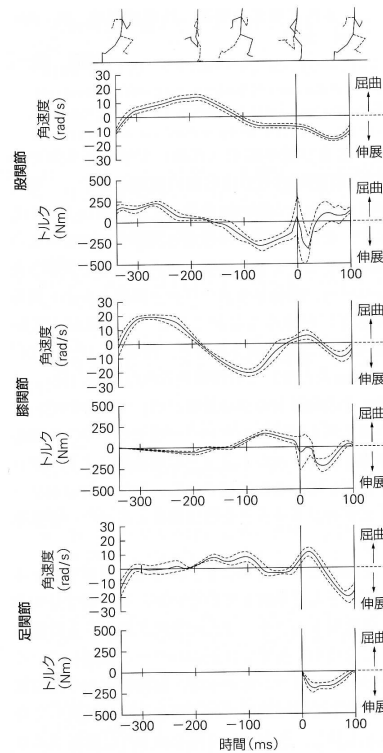


図 8-28 短距離疾走における下肢関節の角速度および関節トルク(5名の平均値)
(馬場崇豪ほか：短距離走の筋活動様式. 体育学研究, 45 : 186-200, 2000)

図 11.7: 走運動中における関節角度および関節トルク

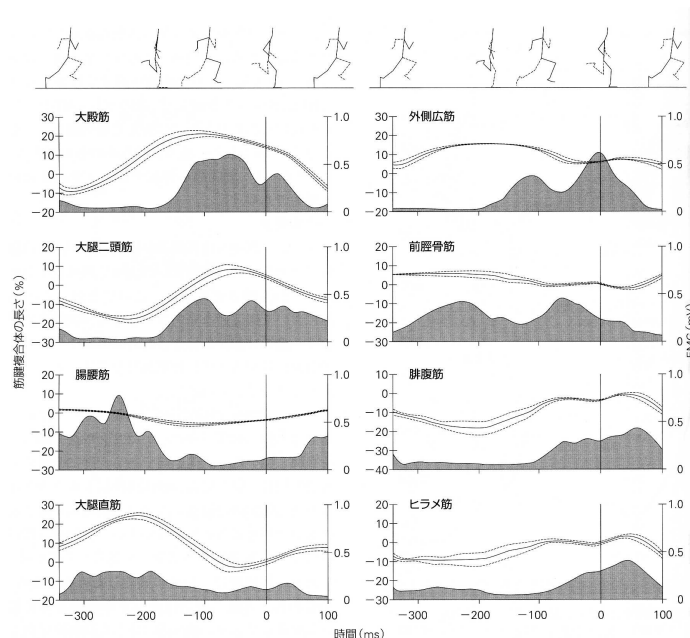


図 8-52 中間疾走 1 サイクルにおける筋腱複合体の長さ変化と EMG (網かけ部分)
(馬場崇豪ほか：短距離走の筋活動様式. 体育学研究, 45 : 186-200, 2000 より引用改変)

図 11.8: 走運動中における筋腱複合体の長さ と 筋電図

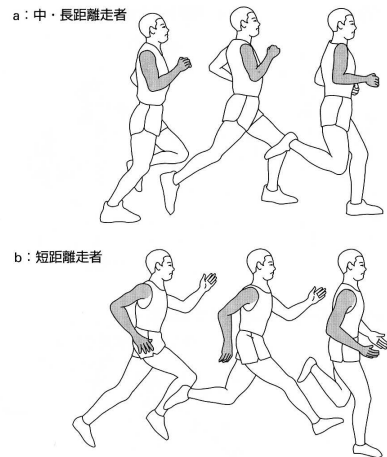


図 8-42 中・長距離走者と短距離走者における腕振りの違い

図 11.9: 短距離走・長距離走における腕ふりの違い

方がわかりやすいかもしれない) に、て逆方向の角運動量を大きくしなければならない。このために腕を大きく伸ばして腕ふりを行うわけである。100m スプリンターのようにこれが顕著になると、上肢の質量をつけなければならなくなり上半身の筋力トレーニングが欠かせなくなってくる。

11.4 走りに影響を及ぼす外部要因

高速で疾走するランナーにとって走動作以外にも、走動作の結果である速度や記録に影響を及ぼす要因が多数存在する。いくつか列挙すると以下のようなものが挙げられる。

1. 空気の影響
2. シューズ
3. 走路

参考文献

- [1] Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 1–18. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.
- [2] Kingston Bernard, 足立和隆訳. よくわかる筋の機能解剖. メディカルサイエンス・インターナショナル, 2000.
- [3] Robertson D., Gordon E., Caldwell Graham, E., Hamill Joseph, Kamen Gary, and Whittlesey Saunders, N. *Research Methods in Biomechanics*. Human Kinetics, 2004.
- [4] Thompson Floyd, 中村千秋, 竹内真希. 身体運動の機能解剖 (Manual of Structural Kinesiology). 医道の日本社, 1997.
- [5] F. Gazzani. A new algorithm for calibrating stereophotogrammetric systems devoted to motion analysis. *Human Movement Science*, Vol. 12, pp. 403–425, 1993.
- [6] H.M. Karara G.T. Marzan. A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity, and some application of it. *Proceedings of the Symposium in Close-Range Photogrammetric Systems*, pp. 420–476, 1975.
- [7] H. Hatze. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified dlt-approach. *J. Biomechanics*, Vol. 21, No. 7, pp. 533–538, 1988.
- [8] Perry Jacqueline. ペリー歩行分析、正常歩行と異常歩行. 医歯薬出版, 2007. 武田功監訳.
- [9] Watkins James. *An introduction to biomechanics of sport and exercise*. Elsevier, 2007.
- [10] Rose Jessica and Gamble James, G. *Human Walking*. Lipricott Williams & Wilkins, 2006.
- [11] 金谷健一. 画像理解— 3次元認識の数理—. 森北出版, 1990.
- [12] 金子公宥, 福永哲夫 (編). バイオメカニクス, 身体運動の科学的基礎. 杏林書院, 2004.
- [13] Dawson T., J. and Taylor C., R. Energetics cost of locomotion in kangaroo. *Nature*, Vol. 243, pp. 313–314, 1973.
- [14] Martin T., P. and Stull G., A. Effects of various knee angle and foot spacing combinations on performance in the vertical jum. *Res. Quart.*, Vol. 40, No. 2, pp. 324–331, 1969.
- [15] 江原義弘, 山本澄子. ボディダイナミクス入門、歩き始めと歩行の分析. 医歯薬出版, 2002.
- [16] 佐伯由香, 黒澤美枝子, 細谷安彦, 高橋研一編訳 (編). トートラ 人体解剖生理学 原書 6 版. 丸善, 2004.