

第13回 投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、桜井伸二編著、投げる科学、大修館書店

13.1 投動作の種類

投動作にはスポーツ種目固有の動き、目的や状況に応じていくつかの種類を見出すことができる。

速く投げる

正確に投げる バスケットボールのシュート、ダーツ、ボールゲームのパス動作

速く正確に投げる 野球の投球、クリケット、ボウリング、

遠くに投げる 陸上競技(やり投げ、砲丸投げ、ハンマー投げ、円盤投げ)、遠投

スポーツの場合、投げた物体(ボールなど)を受け取る側がいたり、あるいは決められた場所へ投げることが試合結果に結びつくことがあるため、速く投げるだけを目指にする投動作はスポーツでは存在しない、ともいえる。

13.2 投動作の発達

動物としてのヒトがものを投げるためにはいくつかの条件がある。

- 二足歩行
- 体幹の直立
- 拇指対向性
- 肩関節の可動性

上の条件はすべて二足歩行により発達したものであると推測されているが、はたして手を使うようになったから二足歩行が発達したのか、はわからない。サルでもものを投げる様子が観察されているが、多くは下手投げ(アンダースロー)であって、上手投げ(オーバースロー)によってもものを投げるとことはヒトだけがもつ特徴である。

13.2.1 幼児期の投動作発達

幼児期からの投動作を観察すると成長に伴ってそのパターンが変わってくるということが知られている。Wild[26]による分類では

1. 上体の前後方向の動きと手と肘の進展だけでボールを投げる

2. 1 の段階に肘と肩を後方に引く動作と隊幹部の回転を加えて投げる
3. 1,2 の段階に投げて側の脚の投方向へのステップが加わり、体重を移動して投げる
4. 投げ手と反対側の脚の投げ手方向へのステップがあり、体重移動をしながら隊幹部を捻転させて投げる

とされている。宮丸 [17, 18] はさらに細かく投動作の発達を 6 つに分類した。

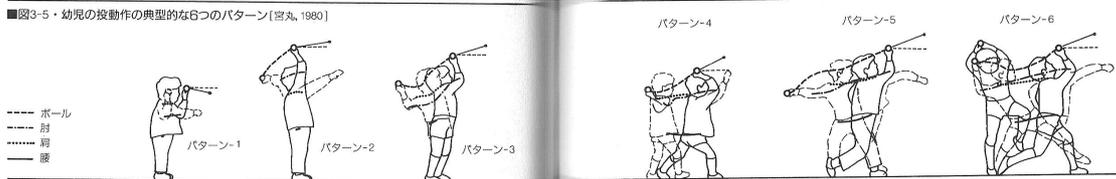


図 13.1: 宮丸による投動作の発達過程分類

ヒトがものを把持しているときには、通常拇指とその他の指は対向しているがこの状態では上肢の屈筋群が活性化している。投動作初期の肘関節屈曲においてはごく自然な動作といえる。しかしものを投げるには適切なタイミングで対向した指を離すというタイミング制御が必要だが、投動作の後半上肢の筋群が伸展するのと同じくして、手を離すという技能の獲得には幼児期における繰り返しの練習が必要である。

13.3 投動作のキネマティクス

投動作を研究するうえでは、動きを観察しその位置・速度・加速度、あるいは角度・角速度・角加速度のパラメータによって考察を行うキネマティクスと、力やトルク等を観察し考察するキネティクスの二通りの方法があることはすでに述べたが、投動作でも両方のアプローチで研究が進められている。ここでは、投動作のなかでもボールの速度が速く、且つ正確性も同時に要求される野球の投手における投動作を中心に解説を行う。

オーバースローで投げる野球の投手のもつボールの軌跡を側方および上方から観察した様子が、図 13.2 に描かれている。ワインドアップしてから後方に一旦動かされるボールは投手の体の後方に直線的に引き寄せられたのち、弧を描きながら体側に移動し前方へと放り出されていることがわかる。図からわかるように投動作は三次元的な運動として行われていることから、その分析も三次元で行うことが望まれている。

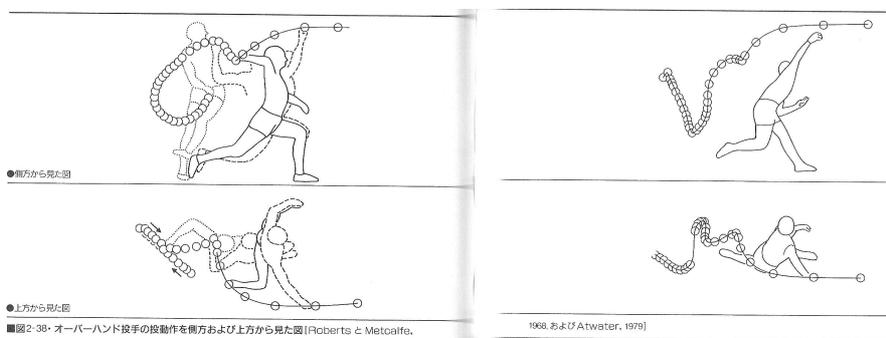


図 13.2: 野球投球時のボールの軌跡

現在は投球動作の運動計測はカメラや光学式モーションキャプチャが用いられることが多い。野球の投球動作のように非常に速い場合にはモーションキャプチャでは追い切れないときも生じるために、高速度カメラを複数台用いた DLT 解析が多く用いられているようである。図 13.3 には投球において用いられる関節角度の定義を示している。複雑な三次元運動である投球動作を分析・議論しようとする場合には、定義を明確にしておく必要がある。

問題 → 試験に出るよ

各自でどちらの方向が、回内・回外、内転・外転、内旋・外旋、といった方向なのかを図に記入せよ

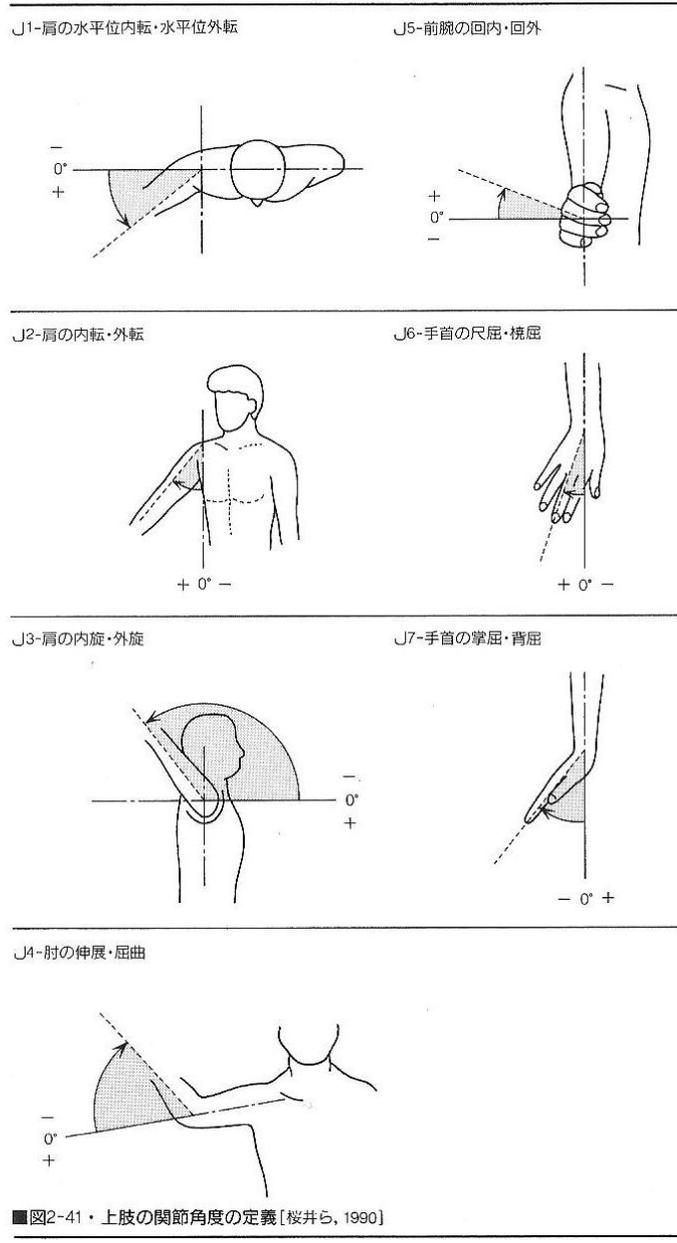


図 13.3: 上肢の関節角度定義

リリース時の前腕回内・回外など身体セグメントの長軸周りの回転運動を捉えるには、若干の工

夫が必要であり桜井らのように長軸に対して交差する外部マーカークラスを利用する。長軸を規定する遠位・近位端を結ぶベクトル (\vec{x}_1) と、外部マーカの両端を結ぶベクトル (\vec{x}_2) で作られる面に、直交するベクトルを両者の外積によって求め (これを \vec{x}_3)、さらに \vec{x}_1 と \vec{x}_3 の両者に直交するベクトル (\vec{x}_4) を求める。このようにして前腕部に局所座標系を設けることで前腕部の運動を評価する。

■図2-40・分析を容易にするための手首と腰のマーク [桜井ら, 1990]

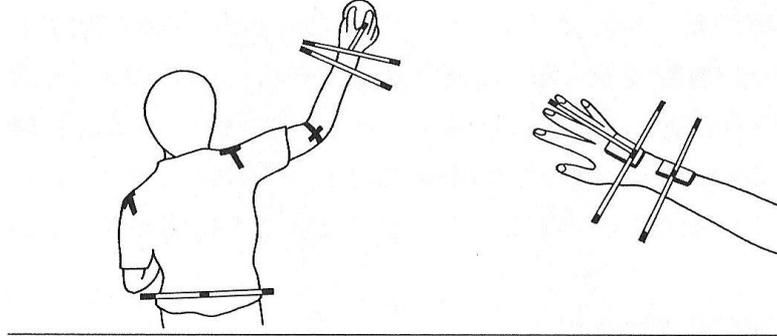


図 13.4: 野球の投球動作計測のための治具

手に保持した物体を加速して遠くへ飛ばす、あるいは大きな初速度で投げだすには当然ながら投動作中に加速されることが必要である。投射体、ここではボールとする、の質量を m とし初速度を v_0 とおくと投げ出される瞬間、ボールは運動量 mv_0 をもつ。動作開始時にボールは止まっていると仮定すると、動作中に与えられる力積とこのボールが手から離れる瞬間の運動量との関係は $\int_0^t f(t)dt$ である。大きな力をどれだけ長い時間作用させるのか、がボールの初速度に影響する。ボールに直接的に与えられる力 $f(t)$ は把持している手からボールに作用しているわけだが、手首に作用している力を $F(t)$ とおくと (手+ボール) の系には、外力として作用しているのは $F(t)$ だけである。ボールが手と接している場所でボールに作用している力 $f(t)$ は手に対して反作用である、 $-f(t)$ を手に及ぼす。したがってボールに作用する力 $f(t)$ は、

$$f(t) = \frac{m}{M+m} F(t) \quad (13.1)$$

となる。式からわかることはボールの質量が小さい場合には手から作用した力はほとんど手を加速するために用いられてボールの加速には活かされないということである。逆にボールの質量が大きい (砲丸のような場合) には手首で作用した力はほぼすべてボールの加速に用いられる。手の質量を仮に 550g、硬式野球ボールの質量を 150g とすると 21.4% の力しかボールには伝達しないことが明らかになる。残りはすべて手を加速するために用いられる。バスケットボール (質量 620g) では 52.9% がボールに伝わり、ゴルフボール (47g) では 7.8% しかボールに伝えることはできない。

投球においてボールや槍、円盤などを遠くに、あるいは速く投げだそうとするならば身体のもつエネルギーをいかにして投射物体に伝達するのか、という問題に帰着する。図 13.6 には、野球とバスケットボールの投球動作における身体各部位の速度を示している。図によれば下半身から徐々に速度ピークを迎え、最後に投球腕の手部分の速度がリリース直前にピークを迎えていることがわかる。こうした一連の動きの流れは、運動連鎖 (Kinetic Chain) と呼ばれている。投動作に限らずヒトが短時間で大きな力を発揮しようとする運動、たとえば打撃動作や、格闘技における突き技などでも同様に下半身から体幹、そして上肢と身体下部から上肢に向けて徐々に加速していく様が報告されている。

野球におけるピッチングでは、リリース直前のわずかな時間に大きな速度達成がなされるが同時に関節各部位においてその関節周りの力学量が大きく変化する。図 13.7 は投動作における関節角速度の変化を示している。リリースにかけて肩関節の内旋、肘関節の伸展、手首関節の掌屈角速度

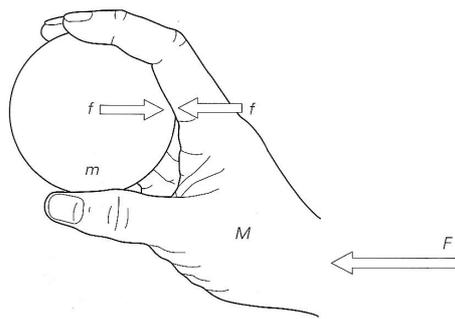


図 10-4 ボールおよび手首に作用する力
(吉福康郎：スポーツ上達の科学，講談社，1990)

図 13.5: 吉福によるボール加速のモデル

が顕著に増加することが確認されている。肩の内旋では、約 5000~8000 deg/s にも達する。肘関節については 2000~2500 deg/s。手首関節における掌屈角速度は、2000~3000deg/s であることもわかっている。特に野球のピッチャーにおける投球動作の中心となるのは肩関節の外旋と肘関節の伸展であるということがわかっている。

■図2-36・野球ボールとバスケットボールをオーバーハンドで投げるときの身体各部の水平速度変化[星川, 1982]

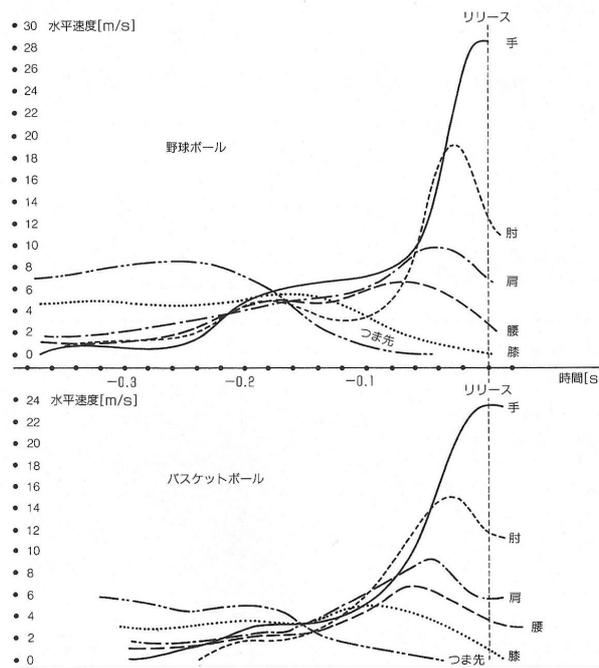


図 13.6: 野球とバスケットボールの投球における身体速度の変化

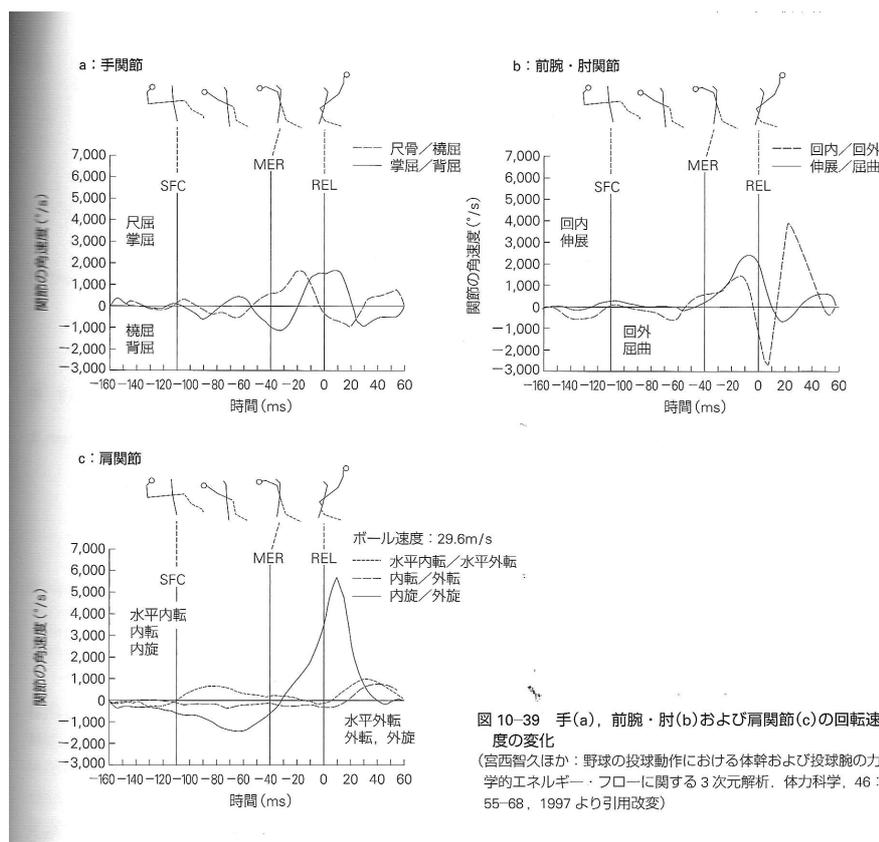


図 13.7: 野球投球時の関節角速度変化

13.4 投動作のキネティクス

三次元映像解析によって関節座標を捉えることができれば、関節に働く関節間力、および関節トルクを計算によって求めることができる。図 13.8 は、野球の投手がボールを投げる際に上肢関節に作用する関節力、および関節トルクを示している。投球動作（ピッチング動作）は通常 4 つの局面で考察されることが多い。すなわち、

ウィンドアップ（準備）期 投球開始からボールがグローブを離れるまで

コッキング期 ボールがグローブから離れてから肩関節最大外旋位まで

コッキング前期（アーリーコッキング期）グローブからボールが離れ、踏み出し脚が接地するまで

コッキング後期（レイトコッキング期）踏み出し脚の着地から肩関節最大外旋位まで

加速期 肩関節最大外旋位からボールリリースまで

フォロースルー期 ボールリリースから投球動作の終了まで

なかでも、加速期に関する研究が最も多い。なぜならばピッチャーが投げだすボールの速度は主にこの局面において加速されているからである。加速局面の後期、リリース直前の 0.02 秒間に手の速度は秒速 20m/s から秒速 29m/s にまで加速されることも報告されている。ボールの速度と手の

速度を同じとしてみると、ボール質量 150g にこれだけの速度を与えようとするれば、そのパワーは

$$\begin{aligned}
 P &= \left(\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2\right)/(t_1 - t_0) \\
 &= (0.5 \times 0.15 \times (29^2 - 20^2))/0.02 \\
 &= 1653(W)
 \end{aligned}$$

となる。1 馬力は 745(W) なので、約 2.2 馬力となる。これは競輪選手が全力でペダルを漕いだときよりも大きなパワーであり、瞬間的に大きなエネルギーがボールに流れこんだことを意味している。

ピッチングにおける局面わけでは、肩関節最大外旋位がひとつの重要な転換点であるが、このとき肩関節内旋トルクの最大値が観察される。興味深いのは肩関節は大きく外旋しているにも関わらず外旋トルクはほとんど見られないということである。大きく引き伸ばされる筋はストレッチショートニングサイクル (SSC:Stretch Shortning Cycle) の効果によってより大きな収縮力を発揮することが可能である。

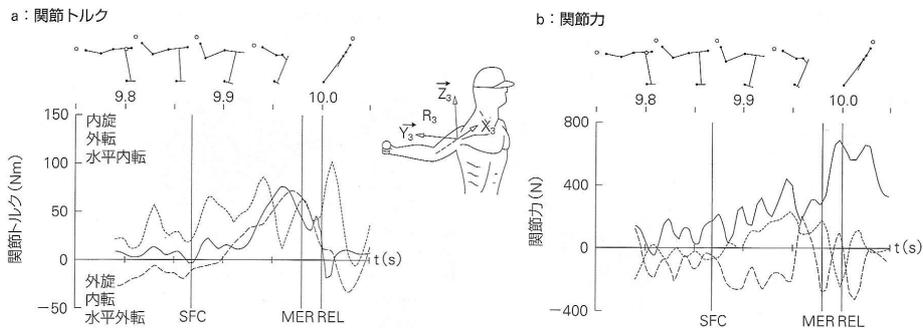


図 10-40 肩関節の関節トルク(a)および関節力(b)の変動
 関節トルクの実線は内外旋、破線は内外転、点線は水平内外転トルクを、関節力の実線は X_s 、破線は Y_s 、点線は Z_s 方向の力を示す。中心に肩関節に設定された直交運動座標系 (R_s) を示す。
 (Feltner M and Dapena J: Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. Int J Sport Biomech, 2: 235-259, 1986)

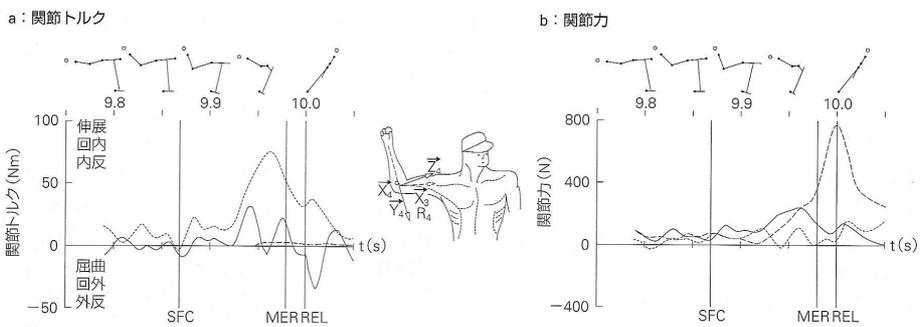


図 10-41 肘関節の関節トルク(a)および関節力(b)の変動
 関節トルクの実線は屈伸、破線は前腕回内外、点線は内外反トルクを、関節力の実線は X_e 、破線は Y_e 、点線は Z_e 方向の力を示す。中心に肘関節に設定された直交運動座標系 (R_e) を示す。
 (Feltner M and Dapena J: Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. Int J Sport Biomech, 2: 235-259, 1986)

図 13.8: 野球投球時の関節力・関節トルク変化

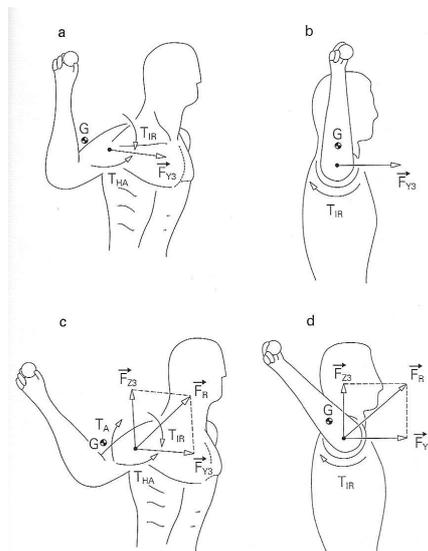


図 10-42 肩関節の外旋メカニズム

(Feltner M and Dapena J: Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. Int J Sport Biomech, 2: 235-259, 1986)

図 13.9: 野球投球の投球メカニズム

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] M.J. Adrian, M. Singh, and P.V. Karpovich. Energy cost of leg kick, arm stroke and the whole crawl stroke. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 21, pp. 1763–1766, 1966.
- [3] 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.
- [4] James E. Counsilman. *Competitive swimming manual for coaches and swimmers*. Counsilman Co. Inc., 1977.
- [5] Robertson D., Gordon E., Caldwell Graham, E., Hamill Joseph, Kamen Gary, and Whittlesey Saunders, N. *Research Methods in Biomechanics*. Human Kinetics, 2004.
- [6] 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.
- [7] F. Gazzani. A new algorithm for calibrating stereophotogrammetric systems devoted to motion analysis. *Human Movement Science*, Vol. 12, pp. 403–425, 1993.
- [8] 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 on Close-Range Photogrammetric Systems*, pp. 420–476, 1975.
- [9] 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.
- [10] A. Peter Hollander, Gert de Groot, Garit Jan van Ingen Schenau, Roel Kahman, and Huub M. Toussaint. Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming. In *Swimming Science V*, pp. 39–43. 1987.
- [11] S. Ito. A fluid dynamical consideration for armstroke in swimming. In *Book of abstract IXth World Symposium Biomechanics and Medicine in Swimming*, p. 93. 2002.
- [12] 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.
- [13] Watkins James. *An introduction to biomechanics of sport and exercise*. Elsevier, 2007.
- [14] Rose Jessica and Gamble James, G. *Human Walking*. Lipricott Williams & Wilkins, 2006.
- [15] 金谷健一. 画像理解 - 3次元認識の数理 -. 森北出版, 1990.

- [16] 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.
- [17] 宮丸凱史. 投げの動作の発達. 体育の科学, Vol. 30, pp. 464–471, 1980.
- [18] 宮丸凱史, 平木場浩二. 幼児のボールハンドリング技能における協応性の発達 (3)–投動作様式の発達とトレーニング効果–. 体育の科学, Vol. 32, pp. 111–124, 1982.
- [19] R.E. Schleihauf. A hydrodynamic analysis of breaststroke pulling efficiency. *Swimming Technique*, Vol. 12, pp. 100–105, 1976.
- [20] R.E. Schleihauf. A hydrodynamic analysis of swimming propulsion. In J. Terauds and E. W. Bedingfield, editors, *Swimming III*, pp. 70–109. 1979.
- [21] Robert E. Schleihauf. A biomechanical analysis of freestyle. *Swimming Technique*, Vol. 11, pp. 88–96, 1974.
- [22] Dawson T., J. and Taylor C., R. Energetics cost of locomotion in kangaroo. *Nature*, Vol. 243, pp. 313–314, 1973.
- [23] 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.
- [24] 高木英樹. 泳者周部の表面圧力分布計測による推進力の定量. 体育の科学, No. 51, 2001.
- [25] 高木英樹. 人はどこまで速く泳げるのか, 岩波科学ライブラリー, 第 89 巻. 岩波書店, 2002.
- [26] M.R. Wild. The behavior pattern of throwing and some observations concerning its course of development in children. *Research Quarterly*, Vol. 9, No. 3, 1938.
- [27] 吉福康郎. ボートの力学. 別冊数理科学 「力とはなにか」, 1995. サイエンス社.
- [28] 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.
- [29] 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.