

人間の走行および投球動作の動画像解析

Dynamic Image Analyses of Running and Throwing Motion of Humans

菊地 吉郎・吉田 智茂^{*1}・土屋 洋^{*2}

Kichiro KIKUCHI・Satoshi YOSHIDA・Hiroshi TUCHIYA

1. はじめに

身体的弱者の生活補助具を考える場合¹⁾などを除けば、人間の日常的な動作を気にとめることはほとんどない。たとえ、意識して観察しようとしても、通常の動作でさえ速度は大きく、人間の目のみで視覚的に捕らえた現象に力学的な解釈を加えることは難しい。ましてや、スポーツをしている人間の動作の速度は遥かに大きく、目にも止まらぬ早さの表現通り、すでに目で視覚的に捕らえることすらできない。しかしながら、スポーツにおける動作はスポーツ技術の優劣に大きく関係しているので、力学的な解釈をすることにより体の動きの理解ができれば、技術の向上のヒントを得ることができる。スポーツにおける動作を機械工学的にとらえた研究例は多数知見するが、大部分が数式の扱い方に主眼を置いているため、本当に知りたい動作の秘密あるいは極意とでも言うべき姿が見えてはこない。

本報では、短距離走における走者の走行および野球における投手の投球に注目し、動作をハイスピードビデオカメラで撮影し、その映像を動画像解析することにより、動作の特徴を視覚的に表し、力学的解釈を試みたので報告する。

2. 解析装置及び方法

動画像解析装置のシステム構成を図1に示す。ハイスピードビデオカメラで撮影した映像はビデオテープに録画され、解析対象となる映像はパーソナルコンピュータの画像処理ソフト「EASY 32」により、1コマずつの連続した静止画像として取り込まれる。次に、動画像解析ソフト「MOVE Tr

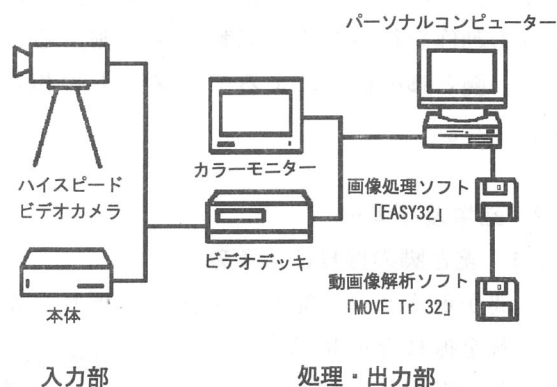


図1. システム構成

32」を用いて連続した静止画像上でターゲットを設定し、撮影スピード、スケール、動画像取り込み条件等を設定することにより、各ターゲットの座標・変位・速度・加速度等の連続した数値データが算出・表示されるとともに、各ターゲットの軌跡等の表示がなされる。

3. 走る動作

3.1 実験方法

走行動作の被験者は著者のうちの一人であり、小山高専5年の男子学生である。図2のように被験者の肩・肘・手首・腰・膝・踵・爪先の7カ所に反射テープを貼ってターゲットとし、固定したハイスピードビデオカメラの前を走り抜けるという方法で被験者の左半身を横から撮影した。上半身のねじれを観察するための撮影は、ハイスピード

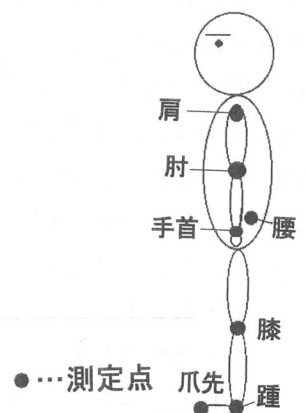


図2. 測定点

*1: 平成11年度機械工学科卒業生(現オノプラント勤務)

*2: 同上(現高圧化工勤務)

ビデオカメラを頭上に固定し、両肩上にターゲットを貼った被験者が下を走り抜けるという方法で行った。撮影スピードは240PPS（1コマ=4.17ms）とし、走行動作の一周期を動画像解析した。

体に作用するモーメントを算出するための被験者の体の各部分（手・手首―肘・肘―肩・爪先―足首・足首―膝・膝―股関節）の質量の計測は、水槽と風呂を使い、各部分を入れたときの水位の変位から体積を計測し、全身の質量と体積より平均密度を求め、平均密度と各部分の体積より各質量の近似値を算出した。

また、摩擦の少ない回転円盤を用い、その上で振りの動作を行った時の回転角を計測することにより、腕と脚の振りによるモーメントの相对比较を行った。

3.2 結果及び考察

3.2.1 腕と脚の振りによる効果

人間が走るとき、腕と脚を交互に振りながら走る。腕を振れない様に固定して走ると、肩が激しく揺れて体のバランスが崩れうまく走れない。そこで体に作用するモーメントに着目し、腕の振りが走る動作に与える影響を考察した。

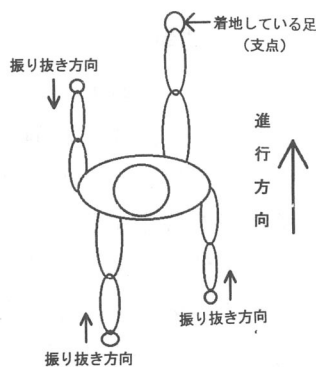


図3. 体に作用するモーメント

体に作用するモーメントを図3の様に仮定し、着地している脚を支点として両腕と片脚から発生する各モーメントを求めることとした。動画像解析の結果得られたスティック図を図4に、これを用いて算出した各部分の中間点加速度の水平成分を図5に示す。図4の各スティックの時間間隔は4/240秒であり、右から左へと進行している。ここで、各部分の中間点加速度の水平成分を計算に用いたのは、各質量が各部分の中間点に集中していると仮定したためである。手に関しては走っているときの手は握っているため、中間点は手首からそれほど離れていないとみなし、手首の加速度を用いた。加速度は、動画像解析から得られた数値データを三次関数近似して用いている。表1に各部分の質量計算結果を示す。これらのデータ

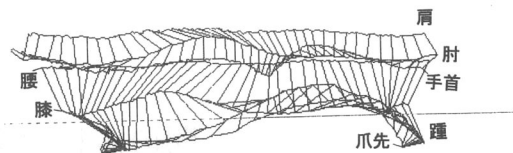


図4. スティック図

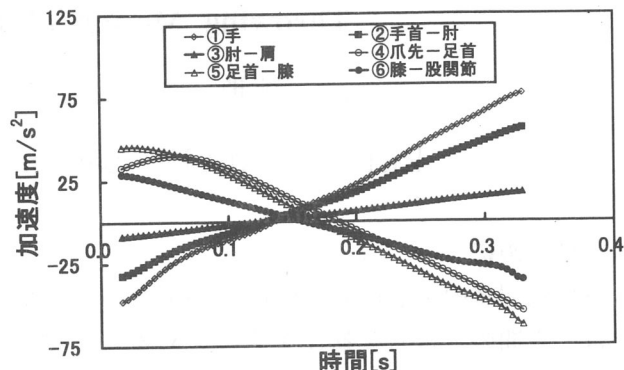


図5. 各部分の加速度の水平成分

から、運動方程

表1. 各部分の質量

式 $F = m \alpha$ (N)、モーメント式 $M = Fr$ (Nm)の二式を用い、各部位のモーメントを算出した結果を

番号	部分名	質量 [kg]
①	手	0.285
②	手首―肘	1.429
③	肘―肩	1.709
④	爪先―足首	1.139
⑤	足首―膝	3.423
⑥	膝―股関節	8.837

図6に示す。これより、腕から発生するモーメン

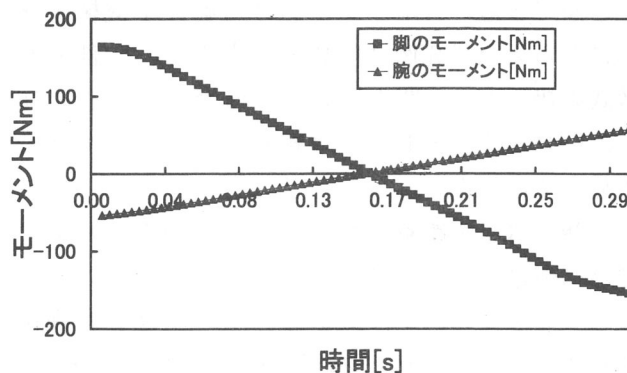


図6. 各部位のモーメント

トと脚から発生するモーメントだけでは相殺しきれないことが分かる。

そこで、頭上から撮影した映像の動画像解析結果のスティック図を図7に示す。この図のスティック時間間隔は4/240秒であり、進行方向は右から左であり、明らかに肩が前後に揺れていることが分

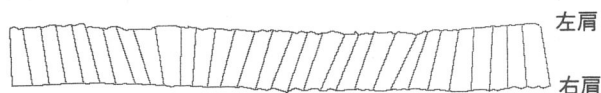


図7. スティック図

かる。すなわち、実際の走行では、側面からの撮影では捕らえにくい上半身のねじりがある。腕を振らないで走行すると、このねじりが激しくなり、体のバランスが崩れて走りにくいことは容易に体験できる。すなわち、腕の振りは走行動作を行う脚の振りにより発生するモーメントを打ち消すための上半身のねじりを軽減し、体のバランスを保つ役割を担っている。

図6によれば、脚は腕の3倍程度のモーメントを発生していることになる。この比率を確認するために、回転円盤を用いて実験を行った結果、片脚を円盤の中央に乗せて静止した状態から、上半身のねじりを伴わないように片脚だけ振ったときの円盤の回転角と両手・片脚を振ったとき（擬似走行とする）の回転角は、前者の回転角を1とすると後者は前者の約2/3であった。よって、脚から発生するモーメントが腕から発生するモーメントの約3倍と推定され、解析と大きな差はない。

3.2.2 走りにおける下半身の挙動と効果

動画像解析の結果得られた走行時の腰-膝-踵-爪先のスティック図を図8に、腰-膝を図9に示す。各スティックの時間間隔は4/240秒であり、進行方向は右から左である。これらのスティック図から走行時の下半身の移動に関して次のことが言える。

まず、着地している脚が踵から地面を離れ、膝が伸びきった状態になったときに爪先が地面から離れ、振り抜きの体勢へと移行する。このときの腰のスティック間隔は広がっており、地面を蹴って脚が離れるときに地面から斜め前向きの反力を受け、加速しているということが分かる。また、着地していた脚が地面を離れ、もう一方の脚が着地するまでの数ミリ秒間体が宙に浮いている時間

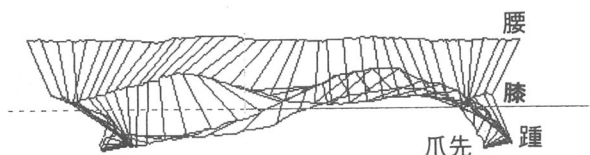


図8. スティック図（腰-膝-踵-爪先）

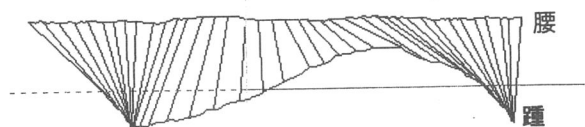


図9. スティック図（腰-膝）

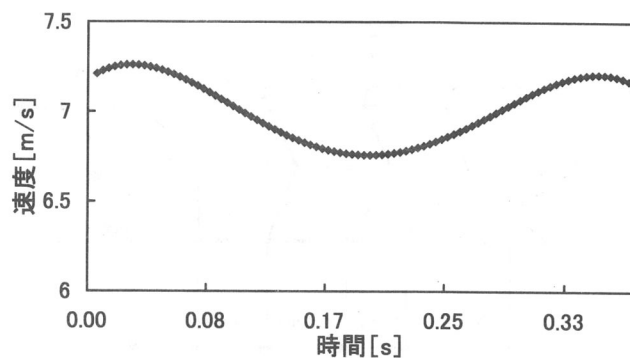


図10. 腰の速度

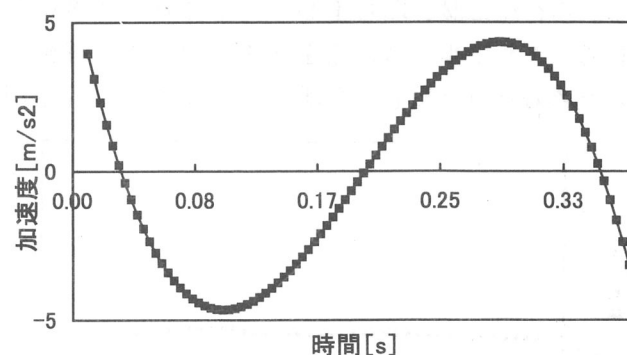


図11. 腰の加速度

があり、このときに体は放物運動をしている。腰のスティック間隔は着地する前から狭まっていることから、放物運動時の空気抵抗や着地後の地面から受ける斜め後向きの反力によって減速していることが分かる。撮影対象の脚が体の横を振りぬけ、着地体勢の膝の角度になる直前にもう一方の足が地面を蹴り、再度加速するという運動を繰り返している。図8および図9より得られた解析結果を用いて計算した腰の速度・加速度を図10・図11に示す。これらの図より、一定の速度で走っているように見える走行が、実は加速・減速の繰り返しであるということが分かる。

また、着地後の数ミリ秒間、速度の変化はあるが膝の角度がほぼ変わらない時間帯がある。これはこの時間帯だけ、腰と踵の直線距離を半径とする不等速円運動をしているということが言え、その様子を図12に示す。この図は各時間間隔に分けて各体勢への移行の様子を表したものであり、腰が踵を中心として円弧を描いている様子が示されている。この間に慣性力によって上体を前に送り出し、次の脚の蹴りの体勢へ移行していると考えられる。

図13に腰の上下運動変化を示す。走行の一周期を通してしてみると、腰の上下運動はわずかであ

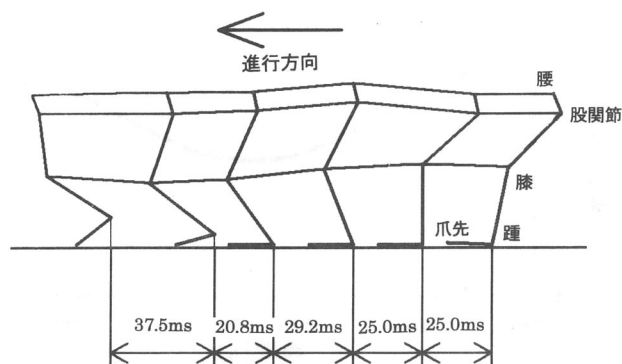


図12. 着地後の下半身の移動

る。歩行時は腰、即ち重心の上下運動が顕著に表れる。これは歩行時に膝をあまり曲げずに移動するため着地点と重心の距離が長くなり、不等速円

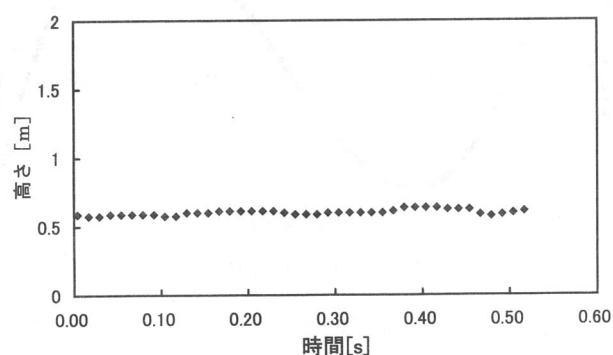


図13. 腰の上下運動変化

運動が長い間隔で行われるためである。走行の場合、ある程度まで膝を曲げ着地点と重心の距離をなるべく短くしている。放物運動や不等速円運動をしているにもかかわらず上下運動がわずかであるのは、前述のように膝を曲げ、体の重心の変動をできるだけ抑え走行をスムーズなものにしているためである。

4. 投手の投球動作

4.1 実験方法

投球動作の被験者は著者の一人である小山高専5年の野球部の投手であり、使用したボールは高校野球連盟で使用している硬式野球ボールである。本来投手はマウンドという少し高い位置から投球をするのだが、本実験では平地で投球し実験を行った。

まず、図14のように右腕の指先・手首・肘・肩・

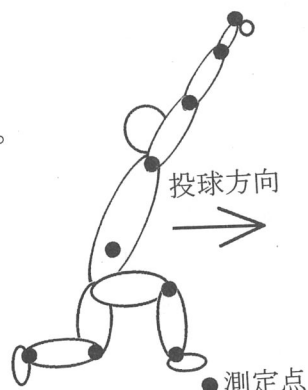


図14. 測定点

右側面の腰・両足の膝・両足の足首の計9ヶ所に反射テープで作成したターゲットを貼った被験者の投球動作を横から撮影した。遠距離からの撮影のため動画像解析しうる鮮明な映像を得ることは非常に難しく、上下白の服を着、図15のようにターゲットを貼った両側に黒のテープを貼るなどの工夫が必要であった。また、映像記憶容量の制限から

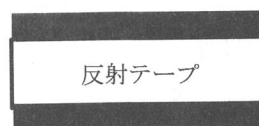


図15. ターゲット

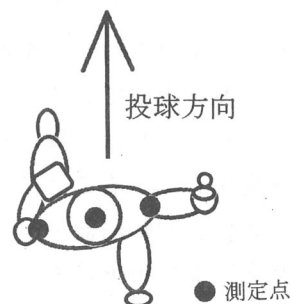


図16. 測定点

撮影速度を240PPS以上とすることが困難であった。240PPSで撮影しても、ワインドアップモーションでは動作全体を捕らえることができなかったため、セットアップモーションで撮影を行った。

次に、肩の動きが重要と考え、図16のように頭・右肩・左肩の計3ヶ所にターゲットを貼り、頭上から投球動作を撮影した。なお、横からの撮影と同様セットアップモーションで撮影を行い、撮影速度は120PPSとした。

4.2 実験結果及び考察

4.2.1 腕の振りの動作

投球に際し前に踏み出す左足（軸足）と右腕の指先とを結んだスティック図を図17に、軸足と指先の軌跡図を図18に示す。これらの図より、本投



図17. スティック図

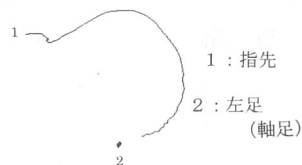


図18. 軌跡図

手は球をほぼ円運動させるように腕を動かしながら投球している事が分かる。次に肩・肘・手首・指先をスティックで結んだスティック図の時間経過を図19に示す。1つのスティックから次のスティック

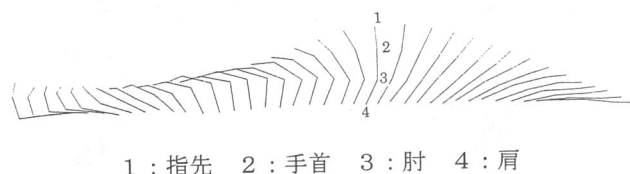


図19. スティック図

クまでの時間は $1/240$ sであり、右へ行くほど時間が経過している。これより、投手が球を投げる時の腕の各関節の動きは、まず肘が投げる方向に出

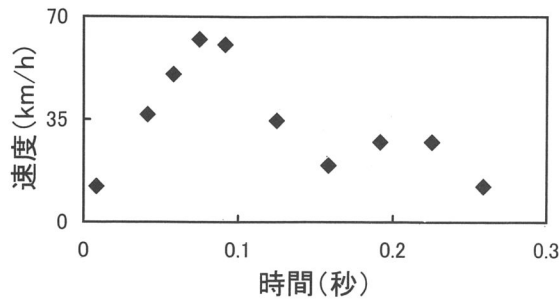


図20. 肘の速度

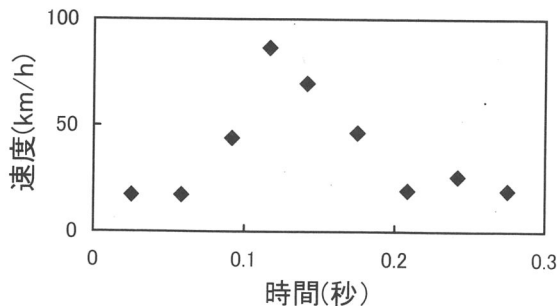


図21. 手首の速度

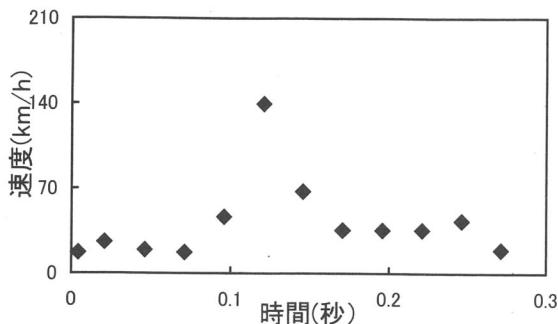


図22. 指先の速度

て行き、次に手首が投げる方向に出て行き、そして最後に指先が動いているのが分かる。肘・手首・指先の速度をそれぞれ図20、21、22に示す。これらの図より次の事が言える。投手が球を投げる際、足を踏み込んでからまず最初に速度が速くなるのは肘である。肘が腕に速度を加えて、次に肘から手首の間がしなるようにして動いていき、手首に速度を加える。手首が速度を上げて肘より前に出ると、最後に指先が今まで蓄えられてきた速度にスナップ（手首の力）を加えて速度を上げていく。すなわち、肘・手首・指先の順に速度を上げ、そして腕が肩・肘・手首・指先と一直線になった時、球を手から離している。この時、本投手の場合、両足の膝がほぼ90度になっていることが特徴として挙げられる。

4.2.2 体のひねりの動作

投手が球を投げる時、腕の振りだけで130～140km/hという速度が出るのは考えがたい。そこで投球動作の中で腕の振り以外に肩の動き（体のひねり）に



図23. スティック図

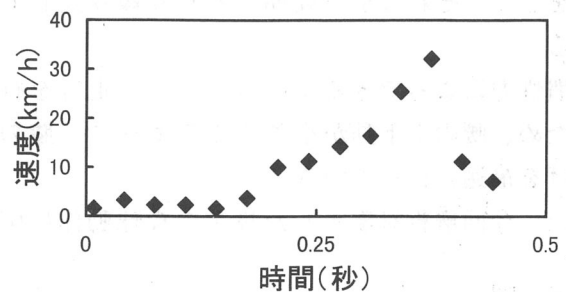


図24. 右肩の速度

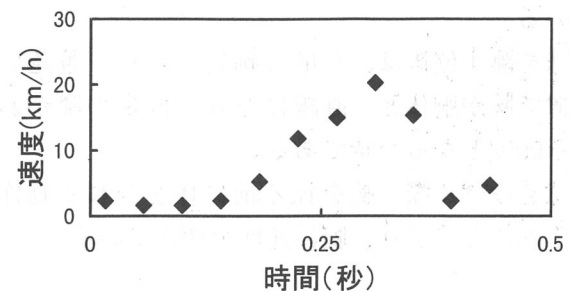


図25. 左肩の速度

注目した。頭（軸）と右肩・左肩とをスティックで結んだスティック図を図23に示す。この図より、腕が速度を上げる前に両肩の速度が上がり、体のひねりによって得た速度を腕の振りに生かしている事が分かる。

次に右肩・左肩の速度を順に図24、25に示す。これらの図より、利き肩である右肩の速度の値が最大になる前に、左肩の速度の値が最大になっていることが分かる。すなわち、利き肩でない左肩を先に引くことによって右肩の速度をより大きくさせている。

著者の一人が少年野球に関わっていた当時、投手の技術向上のための指導に際し、相当な野球経験者でさえ、このような明快な説明をなしうる者はいなかったことが記憶に新しい。ましてや、今

回の被験者は自分の投球動作を初めて理解しえたことになる。

5. まとめ

本研究の範囲内で、次のことが明らかとなった。

今回の走者の走行動作に関して、

- 1) 腕の振りは、走るために行う脚の振りにより発生するモーメントを打ち消すための上半身のねじりを軽減し、体のバランスを保つ補助的役割をしている。
- 2) 見た目には一定の速度で走っているように思われるが、地面を蹴るときや着地時に加速・減速をして、それらを一周周期にわたり繰り返している。
- 3) 慣性力によるできるだけスムーズな走行を行うため、腰の上下動が小さくなるように、膝の曲げを最適に行っている。

また、今回解析対象とした投手の投球動作に関して、

- 1) 腕の動きは、先ず肘が前に出、続いて手首・指先の順に前に出ていき、この順に速度を上げている。
- 2) 球を離す位置は、左足（軸足）から一番遠い位置で腕が胴体と一直線になり、両足の膝がおよそ90度となった時である。
- 3) 球を投げる際、腕を振る前に体をひねる動作をすることにより、腕に速度を加えている。

参考文献

- 1) 菊地・鈴木、人間の椅子に座る動作に関する研究、小山高専研究紀要、第32号（2000）、73

「受理年月日 2000年9月22日」