(19)

関節トルクからみたヒトの跳躍方向の調節

(富山県立大学, 富山大学) 鳥 海 清 司

(富山県立大学) 大 島 徹

(財団法人イメージ情報科学研究所) 熊 本 水 頼

1. 緒 言

ヒトは1つの関節を跨ぐ複数の骨格筋を収縮させて関節に関節トルクを発生させ、リンクである骨格を運動させている。一方、マニピュレータは1つの関節に1つのモータを装備して関節トルクを発生させる。しかし、ヒトもマニピュレータもその関節運動の現象は関節トルクによって生じているため、ヒトの身体はリンクが連結したマニピュレータのようにモデル化することができる。そして、ヒトの運動の場合は、関節トルクの挙動から関節トルクの発生源である骨格筋の挙動を推察することもできる。そこで、身体運動時の関節トルクをキネマティックデータから計算して、全身運動を発現させるときの各関節運動の果たす役割が検討されてきた^{1)~4)}。それらの研究結果から、垂直方向への運動では膝関節トルクが大きくなり、歩・走などの水平方向への運動では膝関節トルクが小さくなる傾向をみいだすことができる⁵⁾。このことから膝関節トルクが運動方向の調節に何らかの役割を果たしていることが予測された。そして、このメカニズムを解明することによって、ヒトの跳躍動作と筋の関係が明らかになるとともに、跳躍ロボットなどへの応用が可能となる。そこで本研究においては、その場からの跳躍を対象動作として、踏切動作時の下肢関節トルクと身体重心速度との関係を明らかにしようとした。具体的には、1. 運動方向が水平方向になると膝関節の伸展トルクが小さくなること、2. 下肢関節トルクを変化させると跳躍方

向が変化することを明らかにし、3. 膝関節伸展トルクの大きさと跳躍方向との関係を解明することを目的とした。

2. 方 法

2.1 逆動力学的アプローチ

運動方向が異なる動作において下肢関節トルクを比較し、その特徴を明らかにすることを目的とした。

2.1.1 分析対象動作

上肢を挙上して直立した姿勢から1回の反動動作を用いて行う立幅跳びと垂直跳びを分析対象動作とした。立幅跳びと垂直跳びはそれぞれ水平方向への運動と垂直方向への運動の代表としている。それらの運動は、その場から両足をそろえた状態からの跳躍であり、形態が類似している。

2.1.2 被 験 者

年齢19歳から20歳の日常的に運動していて、分析対象動作に十分なれた男性20人が被験者として実験に参加した。被験者は分析対象動作の立幅跳びと垂直跳びをそれぞれ順不同となるように3回行った。

2.1.3 実 験

実験では被験者の跳躍動作を被験者右側方からハイスピードビデオ(200 [fps])で撮影した。撮影の際、第3中手骨、茎突点、肘関節点、肩峰点、転子点、膝関節、足関節、第5中足骨の座標を取得するため、あらかじめマーキングをした。

2.1.4 分 析

3回ずつ実施した立幅跳びと垂直跳びから、それぞ

図1 逆動力学的アプローチの身体モデル

れ1つを分析の対象とした。分析は踏切動作中の身体重心が最も低くなる時点から離地までとした。撮影された画像から1コマおきに第3中手骨、茎突点、肘関節点、肩峰点、転子点、膝関節点、足関節点、第5中足骨の座標を取得し、デジタルフィルタを用いて平滑化した後、数値微分によって速度、加速度、角速度、角加速度、関節角度、関節角速度を算出した。関節角度は、関節が屈曲して関節を構成する体節が重なった状態を0 [rad]として、伸展方向を正とした。さらに、図1に示すように身体をリンクでモデル化して運動方程式を構築し、自由端側から方程式を解いて、関節トルクを計算した。関節トルクは伸展方向を正とした。計算の際に用いた身体部分係数は、Winter⁶⁾とDempster⁷⁾を参考にした。また、パワーと仕事も図1に示した計算式によって計算した。

2.2 順動力学的アプローチ

下肢関節トルクの大きさを変化させることによって、運動方向に変化が生じることを確認し、その特徴を明らかにすることを目的とした。関節トルクを意図的に操作する必要性から、ヒトを用いた実験で

は不都合であり、コンピュータ上でのシミュレーション実験で行うこととした。

2.2.1 シミュレーションモデル動作

手を腰に当ててスクワットした姿勢から反動動作を用いずに行う垂直跳びの動作開始から離地までの踏切動作を分析対象動作とした。手を腰に当てた反動動作のない垂直跳びは、動作としても身体をモデル化するにあたって単純である。単純なモデルを用いることにより、コンピュータ上でのシミュレーションを容易にすることができる。

2.2.2 動作分析によるデータの取得

日常的に運動をしていて、実験の動作に十分になった年齢20歳の男性(身長1.713 [m]、体重61 [kg])を被験者にして、モデル動作を行わせた。被験者によるモデル動作をハイスピードビデオ(200 [fps])で撮影した。撮影された踏切動作のスティックピクチャーを図2に示した。動作時間は240 [ms]であった。撮影された画像から1コマおきに肩峰点、転子点、膝関節点、足関節点、第5中足骨点の座標を取得し、数値微分によりリンクの速度、加速度、角速度、角加速度を算出した後、全てのデータをデジタルフィルタによって平滑化した。平

図 2 垂直跳び踏切動作のスティックピクチャ
(○は身体重心)

滑化されたキネマティックデータをもとに、逆動力学的手法によって下肢関節トルクを算出した。同時に身体重心位置、速度も算出した。これらの動作分析においては、図3に示したモデルとその定義を用いた。また、身体部分係数はWinter⁶⁾とDempster⁷⁾を参考にした。

2.2.3 関節トルク操作によるシミュレーション

シミュレーションへの入力値である関節トルクは、動作分析から計算された踏切動作時の各関節トルクを、0.0から1.9まで0.1間隔で変化させた値を乗じて、振幅を操作して入力した。この操作で振幅に乗じた値を関節トルクの倍率とし、その8000通りの組み合わせを表1に示した。踏切動作のシミュレーション終了条件は、計算された地面反力が0[N]以下になった時、または動作時間がモデル動作の踏切動作時間である240[ms]を過ぎた時とした。踏切動作シミュレーションの結果、その後続く跳躍が成功したか否かの評価条件は、シミュレーション終了時の垂直身体重心速度が $0.981[\text{ms}^{-1}]$ 以上であることと踏切動作中に体節角度と関節角度があらかじめ決められた範囲内にあることとした。評価条件とした垂直身体重心速度の値は、以下のように設定された。Bobbert et al.⁸⁾の報告では垂直跳びの踏切動作時間が約300[ms]であり、一方、本研究のモデル動作を基にした動作時間は240[ms]であった。シミュレーション終了時点で地面反力が0[N]に達していないものでも、先行研究で報告された動作時間300[ms]付近まで動作時間が延長されて踏切動作が

図 3 順動力学的アプローチの身体モデルと各変数の定義

表 1 関節トルクの倍率の組み合わせ

股関節	膝関節	足関節					
0.0	0.0	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	0.1	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	0.2	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	.						
	1.9	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
0.1	0.0	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	0.1	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	0.2	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	.						
	1.9	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
0.2	0.0	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	0.1	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	0.2	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	.						
	1.9	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
1.9	0.0	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	0.1	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	0.2	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9
	.						
	1.9	—	0.0,	0.1,	0.2,	...	1.9

行われれば、地面反力が0[N]になる場合を考慮し、シミュレーション終了後の延長時間100 [ms]を仮定し、延長時間中に地面反力0 [N]を達成できるための条件としてシミュレーション終了時の垂直身体重心速度の条件を設定した。また、あらかじめ決められた体節角度と関節角度の範囲は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} 0 [\text{rad}] &< \text{足の体節角度} < \pi [\text{rad}] \\ 0 [\text{rad}] &< \text{足関節角度} < \pi [\text{rad}] \\ 0 [\text{rad}] &< \text{膝関節角度} < \pi [\text{rad}] \\ 0 [\text{rad}] &< \text{股関節角度} < 5/4\pi [\text{rad}] \end{aligned}$$

3. 結 果

3.1 逆動力学的アプローチ

図4に股関節、膝関節、足関節の全身に対する仕事量の割合を立幅跳びと垂直跳びそれぞれについて示した。立幅跳びにおいて、膝関節の仕事の割合が

図4 立幅跳びと垂直跳びにおける下肢関節の全体に対する仕事の割合

小さかった。

図5に立幅跳びと垂直跳び踏切時の股関節、膝関節、足関節での関節角速度と関節トルクの一列を示した。関節角速度は立幅跳びと垂直跳びとで類似しており、時間と共に漸増していた。関節トルクは、立幅跳びでは股関節と足関節に比べて膝関節で低い値

図5 立幅跳びと垂直跳びにおける下肢関節トルクと関節角速度の経時的変化の一例

を示しており、垂直跳びでは股関節、膝関節、足関節ではほぼ同じくらいの値を示していた。

3.2 順動力学的アプローチ

図6にシミュレーションで跳躍の評価条件を満たした動作の全てについて、離地時の身体重心速度ベクトルを示した。関節トルクの大きさを変化させることで跳躍の方向が変化していた。

股関節と足関節トルクの倍率に対する膝関節トルクの倍率の割合と身体重心速度の方向との関係を図7に示した。決定係数が0.762であり、膝関節トルクの倍率が股関節、足関節トルクの倍率と比較して大きくなると身体重心速度方向が大きくなっていく傾向があった。

各関節トルクの倍率と水平および垂直身体重心速度との関係を図8から図10に示した。股関節トルクの倍率が大きくなると水平身体重心速度および垂直身体重心速度ともに大きくなる傾向があった。膝関

図6 シミュレーションで成功条件を満たした跳躍の身体重心速度ベクトル

図7 膝関節トルク倍率の股関節と足関節トルク倍率に対する割合と身体重心速度方向との関係
(横軸は [膝関節トルク倍率] × 2 / ([股関節トルク倍率] + [足関節トルク倍率]) で計算)

図8 股関節トルク倍率と水平および垂直身体重心速度との関係

図9 膝関節トルク倍率と水平および垂直身体重心速度との関係

節トルクの倍率が大きくなると水平身体重心速度が小さくなる傾向があった。足関節トルクの倍率が大きくなると垂直身体重心速度が大きくなる傾向があった。

表2に各関節トルクの倍率相互の相関マトリックスを示した。股関節トルクの倍率と足関節トルクの倍率とは正の相関があった。膝関節トルクの倍率と股関節および足関節トルクの倍率は負の相関があった。

図 10 足関節トルク倍率と水平および垂直身体重心速度との関係

表 2 各関節トルクの倍率相互の相関関係

	Hip	Knee	Ankle
Hip	1		
Knee	-0.354***	1	
Ankle	0.794***	-0.496***	1

n=142

***: $p < 0.001$

4. 考 察

4.1 関節トルクと身体重心速度

水平方向へ運動するためには、膝関節のトルクを小さくすることが必要十分な条件といえるであろう。このことについて本研究では、以下の結果が支持している。すなわち、1. 逆動力学的アプローチで立幅跳びでは垂直跳びよりも膝関節トルクが股関節や足関節トルクよりも小さくなったこと、2. 順動力学的アプローチでコンピュータ上のシミュレーションを行い、垂直跳びをするときのトルクを股関節や足関節に比べて膝関節を小さくすることで跳躍の方向が前方向に変位したことである。

逆動力学的アプローチでは図 4 にみられるように、立幅跳びで膝関節の仕事の割合が股関節と足関節に比べて小さかった。関節での仕事は、関節トルクに関節角速度を乗じて算出している。したがって、関

節での仕事小さくなる原因としては、関節角速度が小さくなることと関節トルクが小さくなることが要因として挙げられる。そこで、図 5 に示された踏切動作中の関節角速度と関節トルクの経時的变化をみると立幅跳びと垂直跳びとで関節角速度の変化に大きな違いは見られなかった。特に膝関節の関節角速度には大きな違いは見られない。したがって、図 4 において立幅跳びにおける膝関節角度の仕事の小さくなることは、膝関節トルクが小さくなっているためといえるであろう。図 5 においても立幅跳びと垂直跳びとで膝関節トルクの絶対値には大きな差がなくても、立幅跳びでは膝関節トルクは股関節および足関節トルクに比べて小さい値をしていた。これらのことから、運動方向が水平方向になると膝関節トルクが股関節や足関節トルクと比べて小さくなることが明らかといえる。

逆動力学的なアプローチで水平方向への跳躍である立幅跳びは、垂直方向への跳躍である垂直跳びに比較して膝関節トルクの大きさが股関節や足関節トルクよりも小さくなった。これは、運動方向の違う運動をした結果、膝関節トルクが小さくなるという結果を得たことになる。逆に順動力学的アプローチでは、図 7 に示したように膝関節トルクを股関節トルクや足関節トルクよりも小さくした結果、運動方向が水平前方に変位した。これは、図 8 から図 10 に示されるように、股関節では関節トルクを大きくすると垂直および水平身体重心速度が大きくなること、膝関節では関節トルクを小さくすると水平身体重心速度が大きくなるが垂直身体重心速度とは関係がないこと、足関節では膝関節とは反対に関節トルクを大きくすると垂直身体重心速度が大きくなるが水平重心速度とは関係がないことによる。各関節トルクの大きさと身体重心速度の関係は、股関節および足関節はエネルギー発生器であり膝関節は吸収器であるとする Robertson and Fleming⁵⁾ の主張とは、股関節と垂直方向の足関節については一致するが、膝関節については異なるようである。

足関節トルクは垂直身体重心速度と非常に高い相関関係があった(図 10)。このことは、垂直身体重心速度を大きくするためには足関節トルクを大きくす

ることが必要であることを意味している。Ingen Schenau et al.⁹⁾ や Fukushima et al.¹⁰⁾ は垂直跳びにおいて、股関節や膝関節周りの筋の収縮力は二関節筋を介して足関節へ伝達されることを報告している。これらの報告は、二関節筋が単に力を伝達する役割を持つことを示している。その一方で、垂直な方向へよりよく運動するために、身体の機構である筋が足関節トルクを大きくするように働いていると考えることもできる。つまり、跳躍方向を垂直方向へ調節するために、足関節トルクを増大するように二関節筋が働いていると考えられる。

4.2 小さい膝関節トルクと二関節筋

水平方向への運動と膝関節トルクを小さくすることの関係は明らかにされた。しかし、このことは膝関節周りの骨格筋が活動していないことを意味しているわけではない。なぜなら、逆動力学および順動

力学的アプローチで得た関節トルクは、関節周りの屈筋群と伸筋群とが同じ割合で収縮をした場合に関節トルクが発揮されていないと計算されるからである。そこで、立幅跳びと垂直跳びに関して、これまでに行われてきた筋電図学的研究とあわせて考えることで、関節トルクを発揮している骨格筋の挙動を推し量ってみる。

立幅跳びで膝関節トルクが小さくなるのは伸展筋と屈曲筋の co-contraction によると考えられる。立幅跳びおよび垂直跳び踏切時の筋電図学的研究^{11,12)} によると、股関節伸展筋としての大殿筋、膝関節伸展筋の内側広筋、外側広筋、足関節の伸展筋であるヒラメ筋、股関節屈曲筋と膝関節伸展筋として同時に働く大腿直筋、股関節伸展筋と膝関節屈曲筋として同時に働く大腿二頭筋と足関節伸展筋と膝関節屈曲筋として同時に働く腓腹筋も同時に収縮していると報告されている。二関節筋は3筋のうち2筋は膝

図 11 機能別実効筋力の筋活動と出力分布の関係
(大島らの報告¹⁴⁾より筆者改変)

関節において屈曲筋として働くため、膝関節では co-contraction が起きている。特に立幅跳びと垂直跳びとでは二関節筋である大腿二頭筋と腓腹筋での筋活動のタイミングや大きさに違いが報告されている。このことは、大腿二頭筋や腓腹筋という二関節筋が、運動方向の異なる運動において、異なる役割を担っていると考えられる。本研究における表2では、膝関節トルクを大きくすると股関節と足関節トルクが小さくなり、膝関節トルクを小さくすると股関節と足関節トルクが大きくなる傾向があった。このことは、膝関節と股関節および足関節の2つの関節を同時に跨いで付着している二関節筋が効果的に働けることを示唆していると考えられる。

Kumamoto et al.¹³⁾ は、拮抗二関節筋が系先端での力の発揮方向を決めるために欠かすことのできない存在であることを示唆している。これらの二関節筋に関する知見から、身体運動において、二関節筋は運動の方向を決めることに対して重要な役割を果たしていることが予測される。大島らの報告¹⁴⁾ している実効筋のモデルを跳躍動作に合うように描き改めたものを図11に示した。スクワットの姿勢で静止した状態から、水平方向へ運動をするためには系先端で発揮される力の方向が斜め後方でなければならない。図11で表現するとB方向へ力の発揮が必要である。B方向へ力を発揮するためには実効筋f1とe2とf3が活動する必要がある。一方、垂直方向へ運動をするためには系先端で発揮される力の方向が真下でなければならない。図11で表現するとA方向へ力の発揮が必要である。A方向へ力を発揮するためには実効筋f1とe2とe3が活動する必要がある。水平方向の運動と垂直方向への運動の違いはf3とe3である。f1とは大殿筋をはじめとする股関節伸展筋、e2とは内側広筋や外側広筋をはじめとする膝関節伸展筋、f3とは大腿二頭筋をはじめとする股関節伸展と膝関節屈曲に作用する二関節筋、e3とは大腿直筋をはじめとする股関節屈曲と膝関節伸展に同時に作用する二関節筋を表している。水平方向への運動をする場合e2に対してf3が拮抗的に働くため co-activation が起きて膝関節トルクは小さく計算されると考えられる。このことは、本研究における立幅跳

びでは垂直跳びよりも膝関節トルクが小さくなり、また、膝関節トルクを小さくすると運動方向が前方向に変わることと一致する。

5. ま と め

本研究では、ヒトの跳躍の踏切時における関節トルクと跳躍方向を示す身体重心速度方向との関係を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 水平方向の運動である立幅跳びは、垂直方向の運動である垂直跳びに比べて、膝関節トルクが股関節や足関節トルクよりも小さくなること。
2. 垂直跳びの下肢関節トルクを基にその大きさを変化させると、身体重心速度方向が変化したこと。
3. 垂直跳びの下肢関節トルクを基にその大きさを変化させると、股関節と足関節トルクに比べて膝関節トルクを小さくすることで、身体重心速度方向が前方に変位したこと。

膝関節トルクが水平方向の運動をするときに股関節や足関節と比較して小さくなるのは、大腿二頭筋や腓腹筋などの二関節筋が膝関節で co-activation を起こすためと考えられ、二関節筋による運動方向を調節する機構が働いたためと考えられた。

参 考 文 献

- 1) Cappozzo, A., Figure, F., Marchetti, M., & Pedotti, A.: The interplay of muscular and external forces in human ambulation. *J. Biomechanics*, 9, 35-43, (1976).
- 2) Robertson, D. G. E. & Winter, D. A.: Mechanical energy generation, absorption and transfer amongst segments during walking. *J. Biomechanics*, 13, 845-854, (1980).
- 3) Hubley, C. L. & Wells, R. P.: A work-energy approach to determine individual joint contributions to vertical jump. *Eur. J. Appl. Physiology*, 50, 247-254, (1983).
- 4) 桜井伸二, 池上康男, 矢部京之助: 垂直跳びの踏み切り動作における下肢関節の役割. 第8回日本バイオメカニクス学会論集, 98-101, (1987).
- 5) Robertson, D. G. E. & Fleming, D.: Kinetics of standing broad and vertical jumping. *Can. J. Sports Science*, 12, 19-23, (1987).
- 6) Winter, D. A.: *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons, (1990).

- 7) Dempster, W. T.: *Space requirements of the seated operator*. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio (WADC TR 55-159), (1955).
 - 8) Bobbert, M. F., Huijing P. A., & van Ingen Schenau, G. J.: An estimation of power output and work done by the human triceps surae muscle-tendon complex in jumping. *J. Biomechanics*, 19, 899-906, (1986).
 - 9) van Ingen Schenau, G. J., Bobbert, M. F., Huijing, P. A., & Woittiet, R. D.: The instantaneous torque-angular velocity relation in planter flexion during jumping. *Med. Sci. Sports Exercise*, 17, 422-426, (1985).
 - 10) Fukashiro, S. & Komi, P. V.: Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *Int. J. Sports Medicine*, 8, 15-21, (1987, suppl.).
 - 11) 辻野昭, 岡本勉, 後藤幸弘, 橋本不二雄, 徳原康彦: 発育にともなう動作とパワーの変遷について～跳躍動作(垂直跳び, 立幅跳び)～. *身体運動の科学 I*, 203-243, 杏林書院, (1974).
 - 12) 小野三嗣, 高橋泰光, 木村一彦, 原田邦彦, 生田香明, 宮本洋子, 笹部桂子: 垂直跳及び立幅跳の練習効果に関する筋電図学的研究. *体力科学*, 16, 45-56, (1967).
 - 13) Kumamoto, M., Oshima, T., & Yamamoto, T.: Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles — Mechanical engineering model analyses. *Human Movement Science*, 13, 611-634, (1994).
 - 14) 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼: 一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による機能別実効筋力評価～筋力と四肢先端の出力～. *精密工学会誌*, 65(12), 1772-1777, (1999).
- ~~~~~

CONTROL OF JUMPING DIRECTION FROM THE VIEWPOINT OF JOINT TORQUE

Kiyoshi TORIUMI*, Toru OSHIMA**, and Minayori KUMAMOTO***

**Toyama Prefectural University and Toyama University*

***Toyama Prefectural University*

****Image Information Science and Technology Laboratories*

The purpose of this study was to clarify the relationship between jumping direction and torque of the hip, knee, and ankle joints. Two methods were employed: an inverse dynamic approach, and a direct dynamic approach. The small degree of knee joint torque in the horizontal movement coincided with the report of Oshima et al. on output force distribution of the functional effective muscle system.

Using the inverse dynamic approach, joint torque and work were compared between a standing broad jump and a vertical jump. The standing broad jump is a horizontal movement task, whereas the vertical jump is a vertical movement task.

The ratios of work at the hip, knee, and ankle joints to total work were compared between the standing broad jump and vertical jump. Less work was done at the knee joint for the standing broad jump than for the vertical jump. The work was calculated as the product of joint angular velocity and joint torque. The time curve of joint angular velocity was similar for the standing broad jump and vertical jump. Knee joint torque for the standing broad jump was less than that for the vertical jump and was also less than were hip and ankle joint torques. For the vertical jump, the amplitude of knee joint torque was the same

as that for the hip and ankle joints.

Using the direct dynamic approach, a computer simulation was run in which the hip, knee, and ankle joint torque amplitudes for the vertical jump were modified by predecided magnifications. The relationship between magnification of the modified joint torque and the body's center of gravity was examined. The predecided magnifications for each joint torque were from 0.0 to 1.9, at intervals of 0.1. There were thus 8000 patterns of magnification sets. The smaller the magnification of the modified torque of the knee joint in comparison with that of the hip and ankle joints, the greater was the forward velocity of the body's center of gravity. It became clear that a small degree of knee joint torque is necessary and sufficient for generating horizontal movement. It was predicted that such a small degree of knee joint torque was caused by co-contraction between the knee joint extensor muscle and the bi-articular muscles.

Oshima et al., in reporting on output force distribution of the functional effective muscle system, stated that the mono-articular hip extensor, mono-articular knee extensor, and bi-articular knee flexor must be activated in order to push the foot against the ground both backward and downward. If these muscles are activated, knee joint extension torque will be small.