ヒトの腓腹筋である二関節筋の装備が跳躍運動に及ぼす影響*

鳥海清司^{*1,2}, 大島 徹^{*1}, 藤川智彦^{*3}
熊本水頼^{*4}, 百生 登^{*1}Effects of the Bi-Articular Gastrocnemius Muscle of Human
on the Jump Movement of the ModelKiyoshi TORIUMI^{*5}, Toru OSHIMA, Tomohiko FUJIKAWA,
Minayori KUMAMOTO and Noboru MOMOSE^{*5} Faculty of Education, Toyama University,
3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

Robots have one motor at each joint, but animals have bi-articular muscle driving two joints simultaneously. The bi-articular muscle characterizes animals and is predicted to have special functions. To clarify these functions, a simple human model was employed. The model was a Jumping Jack without the guide rail. Gastrocnemius, the bi-articular muscle in the lower leg, was modeled simply by wire. The clarified bi-articular muscle functions will contribute to development of simple controlled robots. Model experiments and computer simulations were executed with and without the wire. Ground reaction force and jump movement were analyzed both in the model experiments and computer simulations. In addition, energy transformation was analyzed in computer simulations. The wire simulating the bi-articular muscle (1) controlled the direction of the ground reaction force, (2) inhibited transformation into rotational energy from the potential energy of the spring, and (3) stabilized airborne movement.

Key Words: Bi-Articular Musche, Jumping Jack, Airborne Movement Stability, Force Directional Control

1. はじめに

最近, 人型ロボット (ヒューマノイドロボット) が二足歩行をする姿が数多く見られるようになった。これらのヒューマノイドロボットは, 足元の凸凹や障害物を跳び越して高速移動することはできない。一方, これらのロボットの見本である人間は, 平坦でなく, 外乱の原因となる様々な障害物や起伏を含んだ面を, 「走る」という行為で高速移動できる。日本では, 「走る」ことを「跳ぶ」と呼称している地域もあり^①, 「走る」は身体の中へへの投げ出しを連続して行う, 連続的な跳躍と考えられる。そこで, ヒューマノイドロボットが人間のように「走る」という行為で高速移動を実現しようとするとき,

跳躍運動は必要不可欠な機能といえる。

これまでの跳躍ロボットは, Raibert^②モデルを基にする, 直動関節による跳躍ロボット^{③-⑥}であった。しかし, ヒトを含む動物の運動は直動関節にはよらず, 回転関節による多関節運動である。これらの回転関節での多関節運動を行う動物に特有のアクチュエータは, 二関節筋 (図 1) である。二関節筋は, 1

Fig.1 The bi-articular muscle in human lower leg

つのアクチュエータが2つの関節に同時作用するように配置されており, 単なる関節駆動以外の役割を

* 原稿受付 2002 年 11 月 21 日.

^{*1} 正員, 富山県立大学大学院 (☎ 939-0398 富山県射水郡小杉町黒河 5180).

^{*2} 正員, 富山大学教育学部 (☎ 930-8555 富山市五福 3190).

^{*3} 正員, 富山商船高等専門学校 (☎ 939-0046 新湊市海老江練合 1-2).

^{*4} 生体機構制御研究会 (NPO) (☎ 520-0027 大津市錦織 2-9-16).

E-mail: toriumi@edu.toyama-u.ac.jp

Fig.2 Definition of the model

H: Hip joint, K: Knee joint, A: Ankle joint, T: Toe
 mi: Segment mass ($i=0-3$), li: Segment length ($i=1-3$),
 θ_i : Segment angle ($i=1-3$), θ_{ij} : Joint angle,

有すると考えられる。二関節筋の腱が持つ弾性を模して2つの関節に作用するバネを装備した跳躍ロボットも報告のされているが、その機能解析については、エネルギーの伝達に関してのみ行われていた。

二関節筋の機能について大島ら⁹⁾は、系先端での出力制御機能を明らかにした。また、二関節筋が跳躍動作に与える影響について、Soest et al.¹⁰⁾やPandy et al.¹⁰⁾はコンピュータ上に筋-骨格モデルを構築し、筋電図を入力情報として、二関節筋と等価の単関節筋と置き換えるなどの条件でコンピュータシミュレーションした。Bobbert et al.¹¹⁾は、膝関節に配置されたバネのみを駆動源として装備するジャンピングジャックモデルをガイドレールに沿って跳躍させて実験を行った。その際の条件として、ワイヤで置き換えた二関節筋としての腓腹筋を装備する条件と装備しない条件を設定して、モデルの跳躍高の違いから、二関節筋の動力伝達機能を証明した。しかし、ジャンピングジャックは二関節筋機能の動力伝達機能にのみ着目して作成されたため、跳躍方向を制限するためのガイドレールが装備されていた。したがってジャンピングジャックでは、ガイドレールが二関節筋のもつ動力伝達機能以外の機能を隠す可能性があった。

本研究では、ガイドレールをなくしたジャンピングジャックをもちいて、二関節筋を模したワイヤの装備がモデルの跳躍動作に与える影響を明らかにする。

2 コンピュータシミュレーションによる解析

二関節筋としてのワイヤ装備の有無が、モデルの跳躍運動に与える影響について、跳躍姿勢の安定性、姿勢変化に伴うエネルギーの推移、床反力と重心位置との関係の3つの観点からコンピュータシミュレーションによる解析を行った。

2-1 コンピュータシミュレーションモデル

図2はコンピュータシミュレーションに用いたモデルとその定義が示されている。モデルは3リンクで構成された。それぞれのリンクは、第1リンク(l_1)、第2リンク(l_2)、第3リンク(l_3)とされ、人体における大腿、下腿、足に相当した。 l_1 と l_2 で形成する関節部(θ_{12})、すなわち人体における膝関節部は、駆動源としてのバネ(弾性係数 5.3[N/mm])が配置された。 l_2 と l_3 で形成される関節部(θ_{23})は、人体における足関節部に相当した。このように定義されたモデルをコンピュータ上に構築した。

人体における二関節筋としてのワイヤを装備するモデルと装備しないモデルが用意されて、その両者が比較された。二関節筋としてのワイヤは駆動源を有していないので、ワイヤ装備の有無は、跳躍のためのエネルギー生成に影響を与えない。また、ワイヤを装備しないモデルは、以下に示す初期姿勢が保持できるように足関節部を固定した。

Fig.3 Initial posture conditions

踏切動作開始時の姿勢を初期姿勢とした。初期姿勢の重心と床反力の作用点との位置関係は3種類設定された。3種類の重心位置は、床反力の作用点を通る垂線に対して、垂線上と垂線より前方と後方であり、それぞれ垂直、前傾、後傾とした。前傾と後傾は、重心位置が垂線に対してそれぞれ $\pi/6$ [rad]前方および後方であった。(図3)

2-2 コンピュータシミュレーション

シミュレーションには、数式処理ソフト(Wolfram Research 社製 Mathematica)を用いて、ラグランジュの運動方程式を解いて動作の生成をした。 $m_0 \sim m_3$ の質点について、それぞれ位置エネルギー(U_g)および

並進の運動エネルギー(T_v)を算出した。また、 $l_1 \sim l_3$ について、それぞれ回転の運動エネルギー(T_w)を算出した。ここでの T_v と T_w の和を運動エネルギー(T_E)とした。これから、ラグランジアン(L)を $T_E - U$ として、下式を用いて $\theta_1 \sim \theta_5$ に関する運動方程式を構築し、連立方程式として解いた。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_r} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_r} = Q_r \quad (r=1 \sim 5)$$

$\theta_{1 \sim 3}$: リンク角度 (図3)

θ_{45} : 系先端 (T) の座標

L: ラグランジアン

D: 散逸関数

$Q_{1 \sim 5}$: 一般力

このとき床とモデルの系先端(T)との間に水平方向の拘束力が θ_4 に関係して作用し、垂直方向の拘束力が θ_5 に関係して作用するとした。また、二関節筋としてのワイヤを装備するモデルには、 l_1 と l_3 をつなぐワイヤの長さが一定となるように拘束力を定義した。

2・3 跳躍姿勢の安定性

モデルの重心の跳躍高は、初期姿勢の条件が垂直、前傾、後傾の順にそれぞれ二関節筋としてのワイヤを装備する場合で 0.55, 0.6, 0.55 [m] で、装備しない場合で 0.2, 0.25, 0.2 [m] であった。二関節筋としてのワイヤを装備するモデルは、装備しないモデルよりも高く跳躍した。

図4には、全ての初期姿勢の条件について、跳躍の空中姿勢が示された。二関節筋としてのワイヤを装備するモデルは、跳躍初期に3つのリンクが直線

Fig.4 Airborne movements in computer simulation

的になり、回転運動を伴わずに上方に跳躍した。一方、装備しないモデルは、跳躍初期に3つのリンク

Fig.5 Energy transformation during take-off movement in computer simulation

($\ast$): Total energy, ($\times$): Elastic energy of spring, ($\odot$): Translational energy, ($\blacksquare$): Rotational energy, ($\triangle$): Potential energy, G: Center of gravity, R: Ground reaction force.

が直線的になり、激しい回転運動を伴って跳躍した。初期姿勢が前傾と後傾の条件についても、垂直の場合と同様に、二関節筋としてのワイヤを装備するモデルは回転を伴わずに跳躍し、装備しないモデルは回転を伴って跳躍した。

二関節筋としてのワイヤは、跳躍高を増大させ、空中でのモデル全体の回転を生じさせずに安定した姿勢を保持させた。

2・4 姿勢変化によるエネルギーの推移

図5のグラフには、初期姿勢条件が垂直について take-off までのエネルギーの推移を示した。ここで示した位置エネルギー、運動エネルギー、弾性エネルギーは運動方程式中に計算される U , T_E , U_g であり、トータルはその合計値である。take-off 時の回転の運動エネルギーは、二関節筋としてのワイヤを装備する

モデルが装備しないモデルのおよそ 0.48 倍であった。一方, take-off 時の並進の運動エネルギーは, 二関節筋としてのワイヤを装備するモデルが装備しないモデルよりおよそ 1.59 倍であった。初期姿勢が前傾と後傾の条件についても垂直の条件と同様に, 二関節筋としてのワイヤを装備するモデルは回転の運動エネルギーが少なく, 装備しないモデルは回転の運動エネルギーが多かった。

二関節筋としてのワイヤは, バネのエネルギーを並進の運動エネルギーへ変換することを促進し, 回転の運動エネルギーへ変換することを抑制した。

2・5 床反力と重心との位置関係

踏切時間は, 二関節筋としてのワイヤを装備するモデルでおよそ 0.022[sec], 装備しないモデルでおよそ 0.012[sec]であった。力の発生源であるバネの持つエネルギーは同一であったが, 床反力が作用する時間は, 二関節筋としてのワイヤを装備したモデルのほうが長かった。

図 5 の線画には, 初期姿勢条件が垂直について take-off までの姿勢変化, 床反力, 身体重心位置を示した。二関節筋としてのワイヤを装備するモデルでは, 床反力の作用線は θ_{12} が増大しても常に第 1 リンク近位端 (H) 方向に向かっており, 重心付近を通った。一方, 装備しないモデルでは, 床反力の作用線は常に第 2 リンクに対して直角に近い角度を保ち, θ_{12} の増大に伴って重心から離れたところを通った。初期姿勢が前傾と後傾の条件についても垂直の条件と同様であった。

二関節筋としてのワイヤは, 床反力の作用線と重心との距離が短くなるように制御していた。

3. 実験的解析

腓腹筋を模した二関節筋としてのワイヤ装備の有無が, モデルの跳躍運動に与える影響を跳躍姿勢の安定性, 床反力と重心位置との関係の 2 つの観点から試作したモデルによる実験的解析を行った。

3・1 試作したモデルでの実験

図 6 は試作したモデルで表 1 は仕様である。モデルはコンピュータシミュレーション解析で用いたモデルを具現化したものである。二関節筋としてのワイヤを装備しないモデルは, 初期姿勢を保持するために足関節部を固定した。図 7 に実験概要を示す。実験では, 動力計の上でモデルを図 3 に示した初期姿勢になるまで手で押し縮め, 膝関節部に配置されたバネを伸張し, 跳躍のための弾性エネルギーを蓄えさせた。この状態から手を離して拘束を解除するこ

Fig. 6 Experimental model

H: Hip joint, K: Knee joint, A: Ankle joint, T: Toe

Table 1 Specification of the model

Length of l_1 and l_2 [mm]	125
Length of l_3 [mm]	25
Elastic coefficient of spring [N/mm]	5.3
Radius of pulley [mm]	14
Total mass [g]	150

Fig. 7 Schema of Experiment

H: Hip joint, K: Knee joint, A: Ankle joint, T: Toe

とでモデルを跳躍させた。モデルが跳躍までに床に作用させる力を動力計(キスラー社製 9257-B)を用いて床反力として測定した。同時に, 跳躍までの動作と空中での跳躍姿勢を高速ビデオカメラ(フォトン社製 FASTCAM-Rabit mini2)で測定した。

3・2 跳躍姿勢の安定性

モデルの重心の跳躍高は, 初期姿勢の条件が垂直, 前傾, 後傾の順にそれぞれ, 二関節筋としてのワイ

やを装備する場合で 0.5, 0.7, 0.4[m]で、装備しない場合で 0.25, 0.3, 0.2[m]であった。二関節筋としてのワイヤを装備するモデルは装備しないモデルよりも高く跳躍した。

Fig.8 Airborne movements in model Experiment

図 8 には、全ての初期姿勢の条件について、跳躍の空中姿勢が示された。二関節筋としてのワイヤを装備するモデルは、跳躍初期に 3つのリンクが直線的になり、回転運動を伴わずに上方に跳躍した。一方、装備しないモデルは、跳躍初期に 3つのリンクが直線的になり、激しい回転運動を伴って跳躍した。初期姿勢が前傾と後傾の条件についても、二関節筋としてのワイヤを装備するモデルは回転を伴わずに跳躍し、装備しないモデルは回転を伴って跳躍した。

これらの結果は、コンピュータシミュレーションによる解析結果と同様で、二関節筋としてのワイヤは、跳躍高を増大させ、空中でのモデル全体の回転を生じさせずに安定した姿勢を保持させた。

3.3 床反力と重心との位置関係

床反力が作用する踏切時間は、二関節筋としてのワイヤを装備するモデルでおよそ 0.03sec、装備しないモデルでおよそ 0.025secであった。力の発生源であるバネの持つエネルギーは同一であったが、床反力が作用する時間は、二関節筋としてのワイヤを装備したモデルのほうが長かった。

図 9 には、初期姿勢条件が垂直について take-off までの姿勢変化、床反力、身体重心位置を示した。二関節筋としてのワイヤを装備するモデルは、床反力の作用線が、重心の近くを通り、その方向は、関節が伸展してもほぼ一定であった。一方、装備しないモデルは、床反力の作用線は、重心から離れたところを通り、その方向は、関節が伸展するにつれて垂直に近い方向から、水平に近い方向へと変化した。

Fig.9 Take-off movements, ground reaction force in model experiments

G: Center of gravity, R: Ground reaction force

初期姿勢が前傾と後傾の条件についても、垂直の条件と同様であった。

跳躍モデルが、二関節筋としてのワイヤを装備することは、床反力の作用線が重心近くを通るように力ベクトルの制御を行い、弾性エネルギーの回転の運動エネルギーへの変換を抑制する。その結果、離地後の空中姿勢の安定性を確保していた。

これらの結果は、コンピュータシミュレーションによる解析結果と同様で、二関節筋としてのワイヤは、床反力の作用線と重心との距離が短くなるように制御していた。

4. 考 察

4.1 二関節筋の動力伝達機能

コンピュータシミュレーションと試作したモデルによる解析から、重心の跳躍高を比較すると、二関節筋としてのワイヤを装備したモデルが高く跳躍していた。また、床反力の作用時間は二関節筋としてのワイヤを装備したモデルが長かった。この結果は、Bobbert et al.⁽¹¹⁾の報告と一致した。彼らは、跳躍高の違いの原因を二関節筋としてのワイヤの動力伝達に求めた。しかし、本研究のエネルギーの変化からは、バネのもっていた弾性エネルギーを回転の運動エネルギーに変換するのか、並進の運動エネルギーに変換するのかがその差であった。Bobbert et al.⁽¹¹⁾のモデルは、ガイドレールを有しており、このガイドレールが回転の運動エネルギーを消したため、結果的に並進の運動エネルギーのみを評価した。そこで、二関節筋は動力伝達機能をするという結論を得たと考えられる。

4.2 二関節筋の力の方向制御機能

コンピュータシミュレーションと試作したモデルによる解析結果から、二関節筋として装備されたワイヤが、床反力の方向を制御していることが明確になった。床反力の方向が制御されることによって、床反力の重心に関するモーメントアームが小さくな

り、その結果として、バネの持つ弾性エネルギーの回転の運動エネルギーへの変換を抑制した。回転の運動エネルギーへのエネルギー変換の抑制が、踏切動作後の空中姿勢の安定性を生み出した。ここでは、二関節筋としてのワイヤが、床反力の方向の制御に寄与することに関して考察を進める。

大島ら⁸⁾の報告した3対6筋による系先端の出力分布を参考に、本研究での系先端での出力を表現した(図10)。 f_1 によって系先端で発揮される力ベクトル(F_{f1})は l_3 と同じ方向であり、 e_3 によって系先端で発揮される力ベクトル(F_{e3})は l_2 と同じ方向である。これに重力(g)を加えると、系先端が床に加える力

Fig.10 Output force at the endpoint of the system
H: Hip joint, K: Knee joint, A: Ankle joint, T: Toe, f_i , e_i :
Functional Effective Muscle ($i=1-3$), F_{fi} , F_{ei} : Force vector
generated by each functional effective muscle ($i=1-3$).

となり、その反力が床反力になる。二関節筋としてのワイヤが装備された場合、ベクトル F_{f1} と F_{e3} の大きさの比率は明らかではない。しかし、二関節筋としてのワイヤが装備されると装備されていない場合のベクトル F_{e3} の方向より明らかに合成されたベクトルの方向がリンク l_1 の近位端(H)に向かうことが理解できる。本研究では、二関節筋としての e_3 をワイヤで置き換えたが、これを制御可能なダンパやアクチュエータに置き換えることで、ベクトル F_{f1} と F_{e3} の大きさの比率を意図的に変化させることができ、意図的な方向制御が可能になると考えられる。

5. おわりに

ガイドレールを装備しない跳躍モデルへの、腓腹筋である二関節筋の装備が、跳躍動作に与える影響について検討した。その結果、二関節筋としてのワイヤは、床反力の方向を制御して、バネの持つ弾性

エネルギーの回転の運動エネルギーへの変換を抑制し、踏切動作後の空中姿勢の安定性を生み出した。

謝 辞

本研究を進めてくれた金山英樹君(元、富山県立大大学院生、現、日平トヤマ)に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 松井秀治, 人間の跳運動—人間研究としての Biomechanics 研究の視点から—, Jpn. J. Sports Sci. 2-8 (1983), 584-589.
- (2) Raibert, M. H., Legged robot that balance. The MIT Press, (1986).
- (3) Koditscheck, D. E., and Buehler, M., Analysis of a simplified hopping robot, The International Journal of Robotics Research, 10-6 (1991), 587-605.
- (4) Vakhakis, A. F., Burdick, J. W., and Coughney, T. K., An interesting strange attractor in the dynamics of a hopping robot, The International Journal of Robotics Research, 10-6 (1991), 606-618.
- (5) M'Closkey, R. T., and Burdick, J. W., Periodic Motions of a hopping robot with vertical and forward motion, The International Journal of Robotics Research, 12-3 (1993), 197-218.
- (6) Francois, C., and Samson, C., A new approach to the control of the planter one-legged hopper, The International Journal of Robotics Research, 17-11 (1998), 1150-1166.
- (7) 玄相昊, 上條敏, 美多勉, 動物の脚構造をモデル化した1脚走行ロボット—Kenken, 日本ロボット学会誌, 20-4, (2002), 453-462.
- (8) 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 (1999), 1772-1777.
- (9) van Soest, A. J., Schwab, A. L., Bobbert, M. F., and van Ingen Schenau, G. J., The influence of the biarticularity of the gastrocnemius muscle on vertical-jumping achievement, Journal of Biomechanics, 26-1 (1993), 1-8.
- (10) Pandy, M. G., Zajac, F. E., Sim, E. U., and Levine, W. S., An optimal control model for maximum-height human jumping, Journal of Biomechanics, 23-12 (1990), 1185-1198.
- (11) Bobbert, M. F., Hoek, E., van Ingen Schenau, G. J., Sargeant, A. J., and Schreurs, A. W., A model to demonstrate the power transporting role of biarticular muscles, Journal of Physiology, 387 (1987), 24.