

筋骨格系モデルを用いたスポーツ科学へのアプローチ

下肢動作に関するシミュレーション研究

¹長野明紀, ²深代千之, ¹姫野龍太郎

a-nagano@postman.riken.go.jp

fukashi-ro@idaten.c.u-tokyo.ac.jp

himeno@postman.riken.go.jp

¹理化学研究所 情報環境室

埼玉県和光市広沢 2 - 1

²東京大学大学院 生命環境科学系

東京都目黒区駒場 3 - 8 - 1

要旨: 本研究の目的は、スポーツ・パフォーマンス向上の助けとなる知見をコンピューター・シミュレーションの技法を用いて導く事である。具体的には(1)跳躍動作及び(2)足関節の底背屈動作に関するシミュレーション研究を行った。それぞれの成果をここに報告する。(1)ヒト身体の筋骨格系モデルを用いて、跳躍動作のパフォーマンス向上のために如何なるトレーニングを行う事が効果的であるかを評価した。スクワット姿勢からの反動の無い跳躍動作を題材として取り扱った。4つの身体分節からなる二次元のヒト身体骨格系モデルを構築し、これに6つの下肢筋群のモデルを取り付けた。これらの筋肉に神経刺激の入力を与えることで跳躍動作が生成された。跳躍高を最大化する刺激入力のパターンを数値的最適化によって求めた。その後、トレーニング効果をシミュレートするため各筋群の最大発揮張力、最大収縮速度及び最大刺激強度を規定するパラメーター値を増加させ、それぞれの変化が跳躍パフォーマンスに及ぼす影響を評価した。その結果、筋肉の最大発揮張力を増加させる事、並びに膝関節伸展筋群を強化する事が跳躍パフォーマンスの改善に大きく貢献することが導かれた。(2)ヒト足関節の筋骨格系モデルを用いて、モーメントアーム長が足関節における力学的出力(筋張力、関節発揮モーメント、パワー、仕事)に及ぼす影響を評価した。下腿部及び足部の二つのセグメントからなる足関節の骨格系モデルを構築し、これにヒラメ筋のモデルを取り付けた。ヒラメ筋の最大努力張力発揮時に、様々な角速度における足関節動作中の力学的出力を計算した。また、ヒラメ筋の停止位置を1cm後方及び前方に動かすことでモーメントアーム長をそれぞれ長く及び短く変化させ、各状況下での力学的出力も評価した。その結果、特に速い角速度での動作中に、モーメントアーム長が小さいほうが大きな力学的出力が得られることが解った。

1. トレーニングが跳躍パフォーマンスに及ぼす影響

1.1. 緒言

バレーボールやバスケットボール等数々のスポーツにおいて、選手の垂直方向への跳躍能力は重要な役割を演じる。跳躍能力は神経筋骨格系各要素のトレーニングによって改善することが可能である。ここで実験的手法を用いては、それぞれの要素のトレーニングが如何に跳躍パフォーマンスの向上につながるかを定量的に評価することが困難である。これは、実際のヒトにおいては様々な要素の特性がトレーニングを通じて同時に変化することに起因する。この問題を解決する一つの方法としてコンピューター・シミュレーションが挙げられる。本研究の目的は、神経筋骨格系のトレーニング効果が垂直跳びのパフォーマンスに及ぼす影響を、コンピューター・シミュレーションの手法を用いて定量的に評価することである。本研究では、筋肉の最大発揮張力 (F_{max})、最大収縮速度 (V_{max})、最大刺激強度 (ACT_{max}) の三つがトレーニング可能なパラメーターとして選択された。

1.2. 方法

四つのセグメント（胴体、大腿、下腿、足部）からなる二次元のヒト身体骨格系モデルを構築した (Figure 1.1)。それぞれのセグメントは摩擦の無いヒンジ関節により接合された。この骨格系が 6 つの筋肉モデルにより駆動された（臀筋群、大腿直筋、ハムストリングス、広筋群、ヒフク筋群、ヒラメ筋）。骨格系モデルは DADS (LMS-CADSI, Coralville, Iowa) を用いて構築され、FORTRAN を用いてプログラムされた神経筋モデルと USER.FORCE のオプションを用いてリンクされた。

跳躍パフォーマンスを最大化する神経刺激のパターンを、数値的最適化を用いて探索した。最適化にあたっては Bremermann (1970) のアルゴリズムを MATLAB (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts) を用いてプログラムした。最適化の目的は跳躍高を最大化することである。それぞれの筋肉の刺激パターンはオンセット時刻、オフセット時刻、刺激強度の三つの値により指定された。

トレーニングの効果は神経筋骨格系のパラメーター値をシステムティックに変化させることによりシミュレートされた。即ち筋肉の最大発揮張力 (F_{max} , 20%)、最大収縮速度 (V_{max} , 20%)、最大刺激強度 (ACT_{max} , 10%) を増加させ、それぞれに最適な刺激パターンを求めた。パラメーターの値と跳躍パフォーマンスの改善との間の線形性も評価された。全ての筋群及びそれぞれの筋群に対してこれらの評価が為された。

Figure 1.1

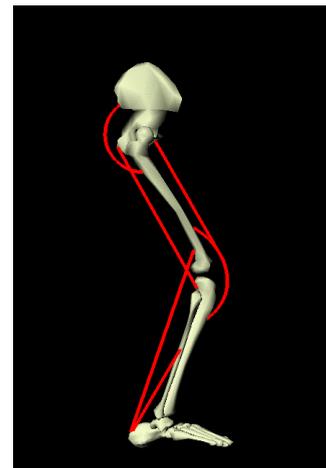
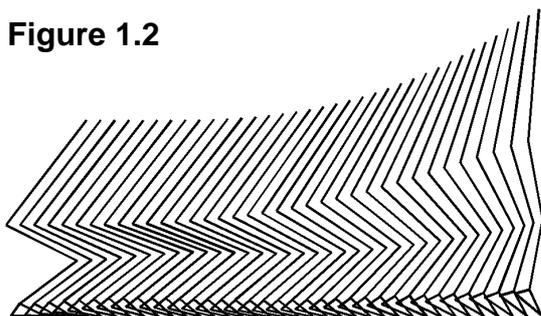


Figure 1.2



1.3. 結果及び考察

数値的最適化により滑らかな跳躍動作が生み出された (Figure 1.2)。身体重心の最高到達位置はトレーニング前のモデルについては 141.7 cm であった (Table 1.1)。最も大きな跳躍高の増加が、筋肉の最大発揮張力 (F_{max}) を増加させた際に見られた。それに対して、筋肉の最大収縮速度 (V_{max}) を増加させ

ることは最も小さな跳躍高の増加しか生みださなかった。全てのパラメーターにおいて、パラメーター値と跳躍高の増加量との間の関係は線形であった。最大発揮張力、最大収縮速度、最大刺激強度の三つを同時に増加させることは大きな跳躍高の増加を導き、この跳躍高の増加量はそれぞれのパラメーター値の増加に伴う跳躍高の増加量を単純に足し合わせた和よりも大きかった。

これら三つの要素 (F_{max} 、 V_{max} 、 ACT_{max}) が同時に改善された時の効果を股関節伸展筋群、膝関節伸展筋群、足関節底屈筋群で比較すると、膝関節伸展筋群を強化した際に最も大きな跳躍高の増加が導かれた。全ての筋群が同時に強化された際に得られた跳躍高の増加量は、それぞれの筋群の強化に伴う跳躍高の増加量を単純に足し合わせた和よりも大きかった。

これらの結果は、跳躍パフォーマンスの向上のためには筋肉の最大発揮張力を増加させることが有効であり、且つ膝関節伸展筋群のトレーニングを行うことが有効であることを示唆するものである。また各要素のトレーニングを組み合わせた上で最適化を行うことにより、個別の要素におけるトレーニング効果を単純に足し合わせた和よりも大きな効果が得られるとの知見も導かれた。全ての場合において最適な筋肉の刺激パターンはパラメーター値の変化 (トレーニング効果のシミュレーション) に伴って変更されたため、跳躍パフォーマンス向上のためには神経筋骨格系のトレーニングに加えて最適な跳躍技術をも新たに身に付ける必要が有ることが導かれた。

Table 1.1

各パラメーターの影響 (全ての筋肉)					
	トレーニング前	ΔF_{max} (20%)	ΔV_{max} (20%)	ΔACT_{max} (20%)	$\Delta F_{max} + \Delta V_{max} + \Delta ACT_{max}$
JH (cm)	141.7	148.7	145.5	145.9	158.3
ΔJH (cm)		7.0	3.8	4.3	16.6

各筋群の影響 ($\Delta F_{max} + \Delta V_{max} + \Delta ACT_{max}$)					
	トレーニング前	足関節	膝関節	股関節	全ての筋肉
JH (cm)	141.7	144.8	151.3	143.4	158.3
ΔJH (cm)		3.2	9.6	1.7	16.6

2. モーメントアーム長が関節における力学的出力に及ぼす影響

2.1. 緒言

二次元平面内の関節運動において、関節モーメント (M_{joint}) と筋張力 (F_{mus}) との関係は

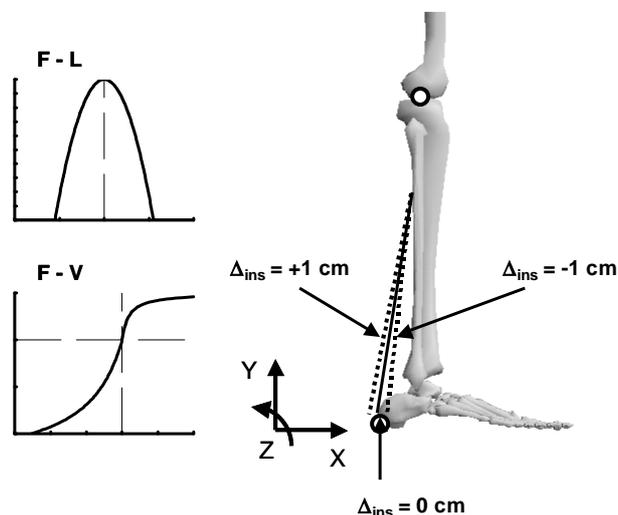
$$M_{\text{joint}} = MA \cdot F_{\text{mus}}$$

と記述される。ここで MA はモーメントアーム長である。この関係より、一般的には大きなモーメントアーム長が関節における大きな力学的出力 (関節モーメント、関節パワー等) を導く事が考察されるが、筋骨格系の運動においてはこれに加え筋肉の長さ - 長さ - 速度 - 力関係をも考慮に入れることが必要である。

2.2. 方法

ヒト足関節の筋骨格系モデルを構築した (Figure 2.1)。下腿セグメントと足部セグメントをそれぞれ剛体として、足関節を摩擦の無いヒンジ関節としてモデルした。これに Hill (1938) によって導かれた長さ - 速度 - 力関係を持つヒラメ筋のモデルを取り付けた。モデルのパラメータ値は全て Delp (1990) より導かれた。更に、ヒラメ筋の停止部を

Figure 2.1



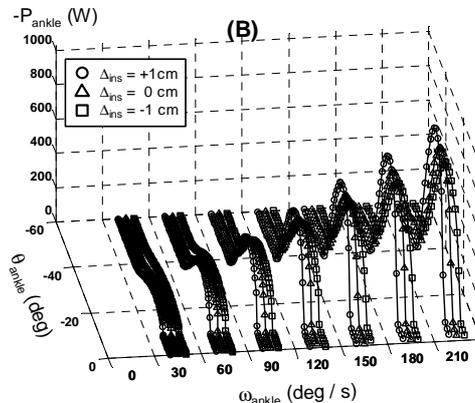
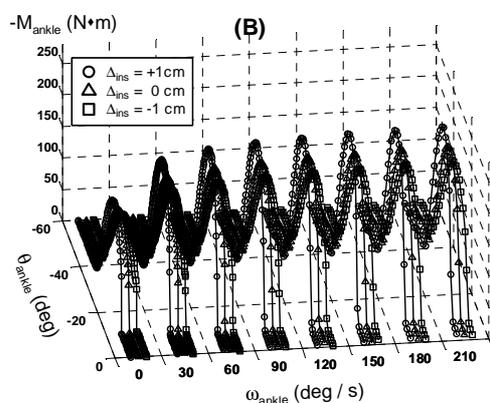
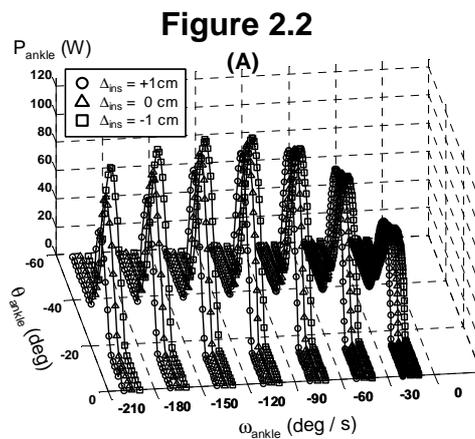
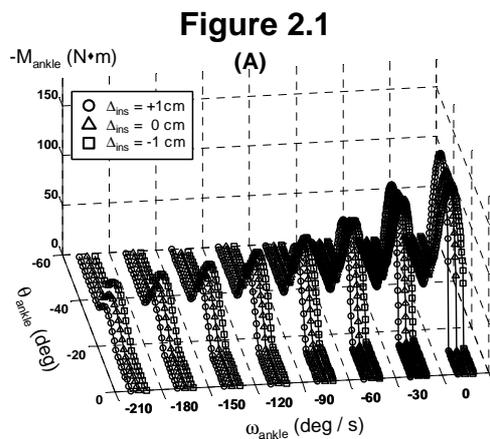
1 cm 後方 (+) 及び前方 (-) へずらすことでモーメントアーム長を変化させたモデルを構築した。最大努力張力発揮状態での、一定角速度における足関節底背屈運動をシミュレートした。モデルの構築及び積分計算は全て MATLAB を用いて行った。

2.3. 結果

コンセントリック収縮時に、モーメントアームが長い場合には一貫してより小さな筋張力が発揮されることが認められた。コンセントリック収縮時の関節モーメント (Figure 2.2) 及び関節パワー (Figure 2.3) (A:コンセントリック、B:エキセントリック) に関しては、底屈角速度が低い際にはモーメントアームが長い方が大きな出力が認められたが、底屈角速度が高い際にはモーメントアームが短い方が大きな出力が認められた。コンセントリック収縮時の仕事に関しては、モーメントアームが長い際により小さな正の仕事が為されることが認められた。

2.4. 考察

ある一定の関節角速度を実現するためには、モーメントアームが長い場合にはより大きな速度で収縮要素が収縮することが求められる。Hill (1938) により導かれた速さ - 力関係より、このことは収縮要素による張力発揮の低下をもたらす。本シミュレーション計算の結果、特に高い角速度における運動の際には短いモーメントアームがより大きな力学的出力発揮をもたらすことが導かれた。この発見は細身の運動選手が優れたパフォーマンスを発揮するという現象を論理的に説明するものである。また、より高いスポーツ・パフォーマンスを目指してのトレーニング処方に際してもこの関係を考慮に入れる必要のあることが示唆される。



3. 参考文献

Bremermann, H., 1970. *Mathematical Biosciences* 9, 1-15.

Delp, S.L., 1990. Dissertation, Stanford University.

Hill, A.V., 1938. *Proc. Royal Society of London B*, 126, 136-195.

Nagano, A., Gerritsen, K.G.M., 2001. *Journal of Applied Biomechanics* 17, 113-128.

Nagano, A., Komura, T., in press. Longer moment arm results in smaller joint moment development, power and work outputs in fast motions. *Journal of Biomechanics*.