

力ベクトル制御課題における 二関節筋活動度決定機序の解明

国立身体障害者
リハビリテーション
センター研究所

野 崎 大 地

(共同研究者) 同

中 澤 公 孝

Principle Determining Activation Level of Biarticular Muscles in Controlling End-Point Force Vector

by

Daichi Nozaki, Kimitaka Nakazawa
*Department of Motor Dysfunction,
Research Institute of National Rehabilitation
Center for the Disabled*

ABSTRACT

We investigated how the central nervous system distributes joint torque among mono- and bi-articular muscles. Various combinations of knee and hip joint torques (T_k and T_h , respectively) were realized by requesting seven subjects to pull the cable attached to the ankle joint in various directions. The muscle activation level of major lower limb muscles was evaluated by the surface electromyogram. The activation level of each muscle was able to be uniquely described as a linear combination of T_k and T_h , indicating that each muscle has “preferred direction”(PD) on joint torque coordinate (T_k , T_h) along which its activation level increases most steeply. The PD of bi-articular muscle (e.g., Rectus Femoris: -37.8 degree, Biceps Femoris Long Head: 154.3 degree) agreed well with the torque direction which it can generate (eigen-vector direction). On the other hand, the PD of mono-articular muscle (e.g., Gluteus Maximus: 38.9 degree, Vastus Medialis: 16.4 degree) did not agree with the direction of its eigen-vector which is parallel to either T_k or T_h axis. This result was unexpected because

it indicates that mono-articular muscle is maximally activated when it accompanies the torque around the other joint. We demonstrate that a simple principle can explain these experimental results: the activation level of biarticular muscle is proportional to the orthogonal projection of torque vector (T_k , T_h) to its eigen-vector, and the remaining part of torque vector is compensated by the activation of mono-articular muscles.

要 旨

中枢神経系が関節トルクをどのような機序で単・二関節両筋群に分配しているのかについて検討した。7名の被験者について、足部に付けたワイヤを等尺性に引っ張る課題を用い、膝・股関節に様々なトルク（それぞれ T_k , T_h ：伸展を正、屈曲を負とする）を課したときの、下肢筋の活動レベルの変化を表面筋電図により評価した。その結果、筋の活動レベルは両関節トルクの線形和として一意的に表されることから、各筋は、トルク座標系 (T_k , T_h) において活動レベルが最も急峻に増加する「至適方位」を持つことが分かった。二関節筋の至適方位（大腿直筋:-37.8度、大腿二頭筋長頭:154.3度等）は、筋の活動によって生じるトルク方向（固有ベクトルの方向）と一致していた。単関節筋が生成するトルク方向はトルク座標系の軸に平行であるが、実験で得られた至適方位はそれとは異なる値（大殿筋:38.9度、内側広筋:16.4度等）を示した。これは、単関節筋の活動レベルが、自ら関与しない関節のトルクを伴うときに最も急峻に立ち上がるという直感に反する現象が生じていることを意味する。われわれはこれら一連の実験結果が、下肢にトルク (T_k , T_h) が課されたとき、まず二関節筋にベクトル (T_k , T_h) からその固有ベクトルへの正射影に比例した量が分配され、残りの部分が単関節筋によって補償される、という簡単な原理によって説明できることを示した。

緒 言

われわれの筋骨格系は、一つの関節を複数の筋が跨いでいるという冗長性を持つ。このような冗長性のため、理論的には、ある関節トルクを実現する各筋の貢献度の組み合わせは無限に存在する。中枢神経系がどのようにこの冗長性の問題を解消しているのかという問題は、運動制御の分野では古典的な問題であり¹⁾、解決のための様々な規範（拘束条件）が提案されてきた⁴⁾。ところで、この問題を検討する場合、一つの関節まわりのトルク発揮のみを考慮していたのでは不十分であることに注意せねばならない²⁾。これは、二関節筋の存在によって、隣り合う関節におけるトルク発揮の間には相互作用が生じるためである。たとえば、膝関節のみについてトルクが各筋にどのように配分されるかを決定したとしても、大腿直筋などの二関節筋を通じて股関節トルクが発生し、再び股関節についてもトルクが各筋にどのように配分されるかを決定しなければならない。逆の見方をすれば、二つの関節に同時にトルクが生じるような課題を課したときの単関節筋・二関節筋の活動パターン変化の差違を調べることで、運動神経系の冗長性解消の問題にアプローチできる可能性がある^{3), 5)}。本研究でわれわれは、膝・股関節に様々なトルクを課したときの単関節筋・二関節筋の活動レベル変調パターンを調べ、実験結果を説明する筋活動レベル決定原理を提案する。

1. 方法

1.1 実験方法

被験者は健常者7名(年齢22-33才;身長 $172.6 \pm 5.2\text{cm}$;体重 $63.1 \pm 8.2\text{kg}$)であり, 研究の目的を説明したうえで測定参加の同意を得た. 被験者は左肩を下にしてベッド上で横になり, 右脚の膝関節および股関節が90度程度になるような姿勢をとった(図1). 右脚の下腿は吊り包帯に

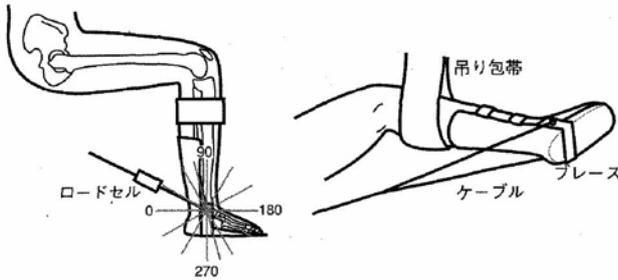


図1 本研究の実験系

よってベッドに平行に保たれるようにした. 右足の足関節はブレースで固定した. ブレースの足関節部分にはワイヤが取り付けられ, 被験者は図に示すような様々な方向(14方向: 0-330度まで30度刻み, 75度, 255度も実施)に抗して力を発揮する課題をおこなった. ワイヤにはロードセル(竹井機器)を取り付け, 張力を測定した. 引っ張る力はおおよそ3段階(20-30, 40-50, 60-80 N)に設定し, 少なくとも3秒間は一定の力を保ってもらうようにした. 被験者は各々の力レベル, 方向について3回の試行をおこなった. 筋電図は大殿筋(GM), 大腿二頭筋長頭(BFL), 大腿二頭筋短頭(BFS), 大腿直筋(RF), 内側広筋(VM), 外側広筋(VL), 内側腓腹筋(GAS)から導出した(DELTA SYSTEMS, The Bagnoli 8 EMG System: 増幅周波数帯域は20~500Hz). 測定データは1kHzでA/D変換しコンピュータに取り込んだ. ワイヤ張力のデータのうち最も変動の少ない1秒間部分の力の大きさ, 筋電図量を算出した. 筋電図の評価には筋電図の根二乗平均を用いた. 各被験者の

大腿長, 下腿長, 膝関節角度, 発揮した力の大きさ・角度を元に, 下肢を剛体セグメントと仮定したモデルを用いて膝関節, 股関節に加わっているトルクを算出した.

1.2 解析方法

実験結果の章で示すように, 膝関節トルク, 股関節トルク, 筋電図量を3次元プロットすると, データは各筋に固有の平面上にのってることがわかった. この平面を, 主成分分析を用いて第一・二主成分ベクトルを算出することにより求めた(図3a). ただし, 筋電図量が最大値の5%以下(すなわちほとんど活動していない試行)のものは主成分分析から除外した. データが平面で記述できるということは, 筋電図量が最も急峻に立ち上がる方向(至適方位)を持つことを意味する. 本研究では, 平面の方程式そのものではなく, この至適方位を各筋について求めた. また, データの平面への適合度の指標として第一・二主成分による寄与率を算出した.

2. 結果

単関節筋は, それが跨ぐ関節のトルク量とともに増加するが, もう一方の関節トルクとは明確な関係を有していなかった. たとえば, 膝関節伸筋である内側広筋の活動レベルは膝関節伸展トルクとともに増加するが, 股関節トルクとは無関係のようにみえた(図2a,b). 一方, 二関節筋では, 両関節のトルク量に依存した関係が観察された. たとえば, 膝関節伸筋であると同時に股関節屈筋である大腿直筋は股関節伸展トルクおよび膝関節屈曲トルクとともに増加していた(図2d,e).

これらの傾向は各筋の活動とそれによって生成されるトルクを考えれば容易に想像できることであるが, 実は両関節トルクと筋活動レベルの間には, 以下に示すように, より強固な関係が存在した. 図2fは大腿直筋活動レベルと両関節トルク

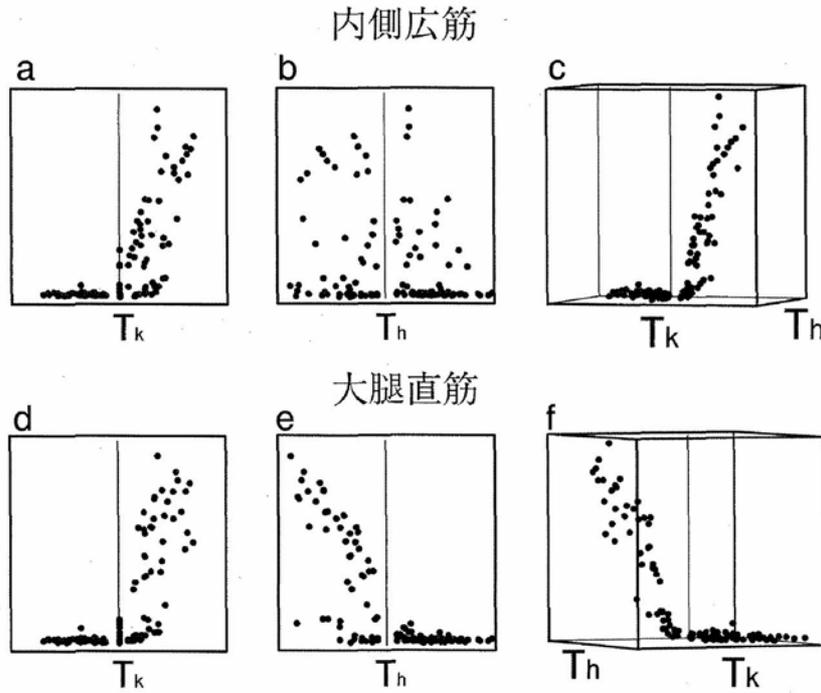


図2 筋活動レベルと関節トルクの関係

との関係を3次元表示したものであり、筋活動レベルが最もばらつきなく直線上に乗ってくる方向から見ているように回転してある。このときの筋活動レベルのばらつきは、各関節トルク軸に対してデータをプロットしたときのばらつき(図2 d, e)よりも小さい。この結果は、筋の大腿直筋の活動レベルが、股・膝関節トルクの線形和として一意的に表現できることを示す。常識的には単関節筋はそれが跨ぐ関節のトルクのみ依存するはずであり、横軸にその関節トルクを取ったときに最も有効に筋活動レベルの変化を記述できる(たとえば図2 a)はずである。ところが、興味深いことに、単関節筋の場合も、筋活動レベルが最も少ないばらつきで直線上に乗ってくる方向は別の角度を向いていた。(図2 c)。

図3 aのように主成分分析を用いて平面を同定してやると、第一・二主成分の寄与率は全ての筋

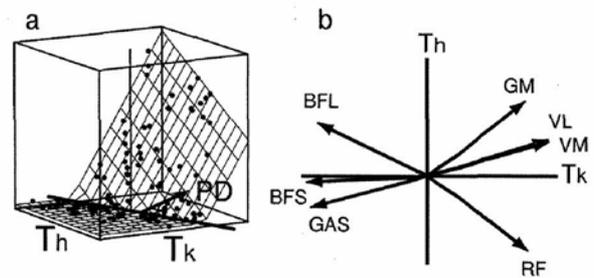


図3 主成分分析による至適方位の算出 (a) と実験より得られた至適方位 (b)

で94%以上であり(表1)、確かに3次元プロット上でデータは第一・二主成分ベクトルが張る平面上に乗ってくるのがわかった。各筋が最も活動レベルを急峻に増加させる至適方位を図3b、表1に示す。二関節筋の至適方位は、たとえば大腿直筋の場合には、股関節屈曲・膝関節伸展方向(-37.7度)であり、その筋の作用を考慮すると妥当な方向を向いていた。ところが、一方、単関節筋の至適方位は予想とは異なる方向に向いていた。

表1 主成分分析の結果

	GM	RF	BFL	VL	VM	BFS	GAS
至適方位	38.9 ± 13.5	-37.7 ± 13.7	154.3 ± 15.4	17.4 ± 3.9	16.4 ± 3.6	-177.4 ± 6.0	-164.1 ± 9.3
寄与率 (%)	97.2 ± 2.6	96.4 ± 0.5	94.3 ± 3.7	99.0 ± 0.4	99.2 ± 0.4	97.0 ± 2.0	96.7 ± 1.4

たとえば、内側広筋は膝関節伸展にしか関わらないが、その至適方位は膝関節トルク軸の方向に一致しておらず、やや股関節伸展トルク方向を向いていた(16.4度)。すなわち、内側広筋の活動レベルは膝関節伸展トルクとともにその30% ($\approx \tan(16.4^\circ)$) 程度の股関節伸展トルクを同時に発揮するとき最も急峻に活動レベルが立ち上がることを示す。股関節伸筋である大殿筋や膝関節屈筋である大腿二頭筋短頭、腓腹筋の至適方位も、同様に、膝・股関節トルク軸に平行にはならなかった(図3b, 表1)。

3. 考察

3.1 筋活動レベルと関節トルクの関係と効果的な筋力トレーニング方法の提案

本研究の実験結果から、筋の活動レベルは両関節トルクの線形和として一意的に表現できることが明らかとなった。また、その帰結として、各筋がトルク平面上で最も急峻に活動レベルを高める「至適方位」があることもわかった。この至適方位の分布の結果(図3b)は、従来の常識とは若干異なるような重要な知見をいくつか含んでいる。まず、単関節筋の活動レベルが最も急峻に立ち上がるのは、それが関与しない関節トルクが同時に発揮されているときであるという結果は、通常の単関節筋に対する認識とは大きく異なっている。また、たとえば外側広筋の至適方位は17.4度であるため、活動する範囲は-72.6~107.4度にも及ぶ。90度以上の方向は膝関節屈曲トルクの範囲であるから、外側広筋は膝関節伸筋であるにも関わらず、膝関節屈曲トルクが働いている場合においても活動しうることを意味する。最後に、通常、膝伸筋として働く内側(外側)広筋と大腿直筋は協同筋として捉えられるが、その至適方位はトルク平面上でみると60度近くも乖離している。したがって、膝関節トルクが一定に保たれていても、股関節トルク状況によってそれぞれの貢献度は

大きく異なってくる。これらの結果は、ヒトの力発揮を考える場合、二関節筋が存在している以上、単一の関節のトルク発揮を考えるのでは不十分で、少なくとも二つの関節のトルク発揮を同時に考慮しなくてはならないことを強く示唆している²⁾。

広く行われている単一関節まわりの筋力トレーニングを本研究の結果と照らしあわせて考えてみたい。「最大膝伸展力の何%でトレーニングする効果がある」というのは指導書によく見られる記述であるが、膝伸展力をたとえば70%と規定したとしても、単・二関節筋の双方が70%の活動を行っているとは限らない。すでに述べたとおり、無視されている股関節のトルクに依存して、単・二関節膝伸筋群の貢献度が変化するためである。したがって、従来の単関節のみに着目した筋力トレーニングは単・二関節筋への負荷のかかり方に偏りを生じさせている可能性が高い。本研究の結果を基にわれわれが提案したいのは、膝・股関節の双方でトルク発揮をおこない、単・二関節筋それぞれへの負荷を自在にコントロールするトレーニング方法である。この方法により、単・二関節筋への負荷の偏りをなくすることができるだけでなく、それぞれの筋群に特異的に負荷をかけることが可能になるはずである。

3.2 筋活動レベル決定の機序

最後に、本研究で観察されたような各筋群の活動レベルと関節トルクの関係が生じる機序について検討する。横軸に膝関節トルク、縦軸に股関節トルクをとったトルク平面を考える(図4a)。

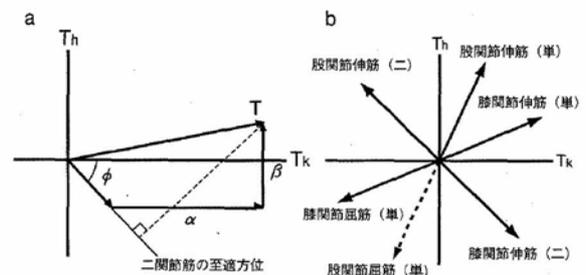


図4 筋活動レベルを決定する原理(a)と原理によって予測された各筋群の至適方位(b)

被験者が発揮した様々な両関節トルクの組み合わせはこの平面上でベクトルとしてあらわされる。単関節の膝伸筋は固有ベクトル $\mathbf{e}_k = (1, 0)$ を、股関節伸筋は固有ベクトル $\mathbf{e}_h = (0, 1)$ を持つ。これらの筋が活動するとそれぞれの軸に平行な成分のみを生成するからである。それに対し、二関節筋が活動すると、両方の軸の成分を両関節におけるモーメントアームの比率に応じて変化させるため、固有ベクトルは $\mathbf{e}_b = (\cos \phi, \sin \phi)$ と表される。本研究で検討した問題を定式化すると、ある任意のベクトル \mathbf{T} が与えられたとき、この \mathbf{T} を \mathbf{e}_k , \mathbf{e}_h , \mathbf{e}_b を用いて $\mathbf{T} = \alpha \mathbf{e}_k + \beta \mathbf{e}_h + \gamma \mathbf{e}_b$ と表すとき、 α , β , γ をどのように決定すればよいか、ということになる。

実験結果 (図 3 b) によれば、二関節筋の至適方位は固有ベクトルの方向にほぼ一致していた。筋活動度が膝・股関節トルクの線形結合として記述できることを考えあわせると二関節筋の活動度 γ はトルクベクトル \mathbf{T} とその固有ベクトル \mathbf{e}_b の内積に比例しなければならない (図 4 a)。すなわち、

$$\gamma = C (\mathbf{e}_b \cdot \mathbf{T}) = C (T_k \cos \phi + T_h \sin \phi). \quad (1)$$

ここで C は二関節筋固有の定数である。二関節筋によって賄われない部分は単関節筋によって補償されなければならない (図 4 a) ので、

$$\begin{aligned} \alpha &= T_k - C (\mathbf{e}_b \cdot \mathbf{T}) \cos \phi \\ &= (1 - C \cos^2 \phi) T_k - C \sin \phi \cos \phi T_h. \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= T_h - C (\mathbf{e}_b \cdot \mathbf{T}) \sin \phi \\ &= -C \sin \phi \cos \phi T_k + (1 - C \sin^2 \phi) T_h. \quad (3) \end{aligned}$$

これらの式より、 $C \cos \phi \sin \phi$ が 0 でないかぎり、 α , β も膝・股両関節トルクに依存することが導かれる。図 4 b は二関節筋において $C = 0.6$, $\phi = -45$ 度 (二関節膝伸筋群), $\phi = 135$ 度 (二関

節股関節伸筋群) としたとき、上記の原理によって予測される各筋群の至適方位を示す。単関節筋群の至適方位が両関節トルク軸に平行にならないこと (図 3 b) を良く再現できている。

4. まとめ

足関節部に働く力の大きさ・向きを変えてやることにより、膝・股関節トルクをコントロールしたときの下肢の主要な筋群の活動パターンがどのように変化するかを検討した。実験結果を元に、単・二関節筋の活動レベルが決定する機序として非常に簡単な原理を提案した。本研究は、二つの関節においてトルクを同時に発揮する新しい筋力トレーニング法の生理学的基盤を与えると同時に、中枢神経系が関節トルクを複数の筋群に配分する機序についても新しい視点をもたらすはずである。

文 献

- 1) Bernstein, N. A. The Coordination and regulation of movements. Pergamon Press, London (1967)
- 2) Binding, P., Jinha, A., and Herzog, W. Analytic analysis of the force sharing among synergistic muscles in one- and two-degree-of-freedom models. *J. Biomech.*, **33**, 1423-1432 (2000)
- 3) Prilutsky, B. Coordination of two- and one-joint muscles: Functional consequences and implications for motor control. *Motor Control*, **4**, 1-44 (2000)
- 4) van Bolhuis, B. M. and Gielen, C. C. A. M. A comparison of models explaining muscle activation patterns for isometric contractions. *Biol. Cybern.*, **81**, 249-261 (1999)
- 5) van Ingen Schenau, G. J. From rotation to translation: constraints on multi-joint movements and the unique action of bi-articular muscles. *Hum. Mov. Sci.*, **8**, 301-337 (1989)