

砲丸投げ突き押し動作における最適な上肢関節トルクの配置

末吉靖宏*・辻尾昇三**

(1998年10月15日 受理)

A consideration of joint torque in the upper limb in shot putting movement.

Yasuhiro SUEYOSHI*, Showzow TSUJIO**

1 はじめに

打つ、跳ぶ、投げる、蹴るといった加速動作は、全身あるいは身体の一部を使って対象物体を加速し物体に速度を与える動作である。このような加速動作は、陸上競技の投てき、跳躍種目を始め、様々なスポーツ種目にみられる。このような加速動作は throwlike movement (投球型動作) と pushlike movement (突き押し型動作) に分類される¹⁾。加速動作の駆動力源の主なものは筋力に基づく関節のトルクである。throwlike movement では、トルク発揮力の適切な関節間配置に関して中枢側の関節ほど、より大きな負担がかかるという記述があるが²⁾、pushlike movement に関してはそれがない。

これまでの砲丸投げの研究は、競技会での運動をビデオ等で撮影して、動きの違いを成績上位者と下位者との間で比較したものが多³⁾⁴⁾⁵⁾。記録に関係する要因として、砲丸加速中の砲丸移動距離や力の作用距離³⁾、あるいは砲丸加速中の力ベクトルと速度ベクトルの方向の一致度をあげている⁴⁾⁵⁾。しかし、被験者数が少ないため、これらの要因が成績に関連をもつ普遍的な要因か、被験者個々の問題か明確でない。また、身体全体の動作をみているので、身体の部分の動きと成績との関係はわからない。

本研究では、投てき動作における上肢の役割を調べる。なかでも、トルク発揮の大きさが関節間で異なるときの成績(投射速度)の違いを調べる。身体の一部の動きであるが、腕の伸展による砲丸の変位は比較的大きい。このような部分の動きのメカニズムの解明が加速動作全体の理解に役立つものと考えられる。

本研究では、上肢だけによる砲丸投げ動作における関節トルクの最大値の異なる配置と、作業成績(投射速度)の関係を明らかにするために、最適制御を使った上肢モデルの計算機シミュレーションを行う。

以下、2章で運動軌道の生成手法について述べ、3章で砲丸投げの上肢モデルを示す。4章でシ

*鹿児島大学教育学部

**鹿児島大学工学部

シミュレーション結果を述べ、5章でその結果の考察を行う。最後に6章でまとめを行う。

2 運動軌道生成法の定式化と解法

2.1 運動方程式

上肢のモデルの運動方程式は、 n 次元関節角ベクトルを θ とすれば、次式で与えられる。

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) \quad (1)$$

ここに、 $M(\theta)$ は、 $n \times n$ 慣性行列、そして $h(\theta, \dot{\theta})$ と $g(\theta)$ は n 次のベクトルであり、それぞれコリオリ・遠心力および重力を表す。なお、ここで、モデルは水平二次元平面のみで考えるため、重力の影響は考慮せず、 $g(\theta) = 0$ である。

2.2 逆動力学に基づく運動軌道生成手法

身体は多くの自由度をもち、本来多様な運動が可能である。しかし、実際には、日常的な多くの運動は定型的なパターンをもって行われている。また、熟練したスポーツの動作も、その熟練度が増すにつれて一定の運動パターンに収束していく。これらの身体運動は、最適性をもってしていると考えられる。

工学では、評価関数(目的関数)がある問題について解を唯一に選ぶための基準として頻繁に使われる。これは最適制御の基本的な概念である⁶⁾。最適制御の概念は、身体運動の運動制御を研究するためにも活発に用いられてきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾。一般的に、このような最適制御による運動発生手法では、制御量として、筋力やトルクなどの駆動力を定め、状態量を身体の運動変位、速度とする。

身体運動のシミュレーションに最適制御を適用する場合の問題点として、モデルや生成する運動の条件によっては、制御量のわずかな変動に対しても、運動変位が急激に変動する場合のあることが指摘されている¹⁰⁾。このとき、探索は局所解に陥りやすく、適切な運動変位が求まらない。

長谷ら¹⁰⁾は、この問題を避けるために、逆動力学に基づく運動軌道の生成手法を提案している。本研究でも、この方法に基づいて投てき動作を生成した。

具体的には、以下の手順で求めた。

- (1) 関節角変位を以下に示すマクローリン級数で表す。

$$\theta_j(t) = \sum_{i=0}^8 a_{ij} t^i \quad (2)$$

ここに、 θ_j は、第 j 関節の関節角度、 a_{ij} は係数、 t は時間である。この a_{ij} が探索パラメータである。

- (2) 式(2)を微分することにより、関節角速度、角加速度を求める。
 (3) 関節角変位、角速度、角加速度を式(1)に代入し、逆動力学問題を解くことによって関節トルクを求める。
 (4) 拘束条件を満たし、かつ評価関数の値を減少させるように関節角変位のパラメータ a_{ij} を最適化手法により微小変更する。

(5) 評価関数が充分小さくなるまで上記(1)~(4)を繰り返す。

なお、ここで用いた最適化手法は、修正 Powell 法である。

2.3 評価関数

本研究のシミュレーションでは、一定の関節トルクの範囲内での砲丸投射速度を調べることを目的としている。従って、評価関数は、動作終端時間における投射速度最大を設定した。用いた最適化法は評価関数最小問題を解く。時刻 t における座標系 y 方向速度を $v_y(t)$ として、評価関数は以下のように定める。

$$J_1 = \frac{1}{v_y^2(t_f)} \quad (3)$$

ここに、 t_f はシミュレーションの終端時間を表す。

2.4 拘束条件

トルク最大値と砲丸投射速度の関係を調べるために、肩、肘関節トルクの屈曲-伸展両方向に対してトルク最大値の拘束を与えた。また、前項で示した評価関数で、 $v_y(t_f)$ の値が負になってしまう場合もある。これを避けるために、 $v_y(t_f) > 0$ の拘束を与える。

これらの拘束条件をモデルに加えるため、ペナルティ関数法¹¹⁾を用いる。トルクの最大値拘束の場合、ある関節回りのトルクの最大値および最小値が、その関節に与えた屈曲、伸展トルクの最大値を越えた場合に、ペナルティ値 E_1 を与えた。また、シミュレーション終端時の投射目標方向速度 $v_y(t_f)$ が負になった場合にはペナルティ値 E_2 を与える。このようなペナルティ値を評価関数に加えることによって、関節トルク最大値と砲丸終端速度非負の拘束条件を与えた。

したがって、プログラム上の評価関数 J は

$$J = J_1 + E_1 + E_2 \quad (4)$$

とし、最適化プログラムは J の値が最小となるような上肢の運動を探索する。

3 上肢による砲丸投げシミュレーション

3.1 上肢の動力学モデル

人体上肢の砲丸投げに関する動力学モデルを導入するにあたって、以下の仮定をおく。

- 1 砲丸を投げるための上肢の運動は、水平面内の二次元運動である。重力の影響は考えない。
- 2 上肢の動力学モデルは2リンクからなり、上腕と前腕とする。
- 3 各関節には駆動トルクが作用し、摩擦抵抗は働かないものとする。
- 4 上肢の運動のみを取り扱い、肩から中枢側の身体運動については考えない。

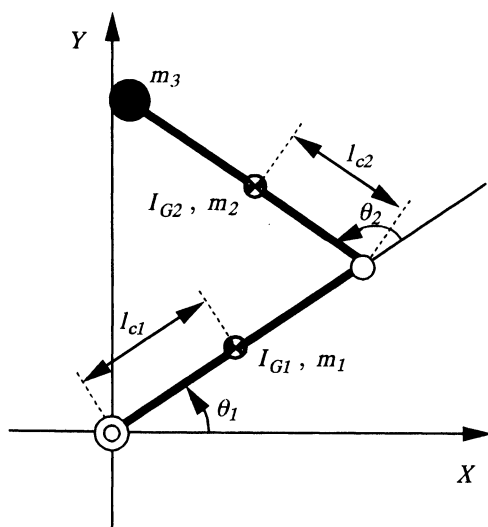


Fig.1 Two-link upper limb model in a horizontal plane

Table 1 Parameters of upper limb and a shot

Segment	m_i	l_{ci}	l_i	I_{Gi}
Upper Arm	2.0	0.15	0.3	0.014
Forearm	1.4	0.15	0.3	0.009
Shot	5.0	-	-	-

以上の仮定のもとに得られた人体上肢の動力学モデルを Fig. 1 に示す。このモデルの関節角 θ_1 , θ_2 はそれぞれ肩, 肘の各関節に対応するものである。手は省略しており, 投てき動作中, 砲丸は前腕端点の手首部分に固定されているものとする。それぞれの関節には, 筋力によってトルクが独立に作用するものとする。

シミュレーションは Table 1 に示した身体パラメータを用いる。表中の m はリンク質量, l はリンクの長さ, l_c はリンク中枢端からリンク重心までの長さ, I_G はリンクの重心周りの慣性モーメントである。

3. 2 シミュレーションの条件

シミュレーションの条件として, トルクの最大値, 初期姿勢, 動作姿勢を次のように設定した。

(1) トルクの最大値

本研究では, 肩および肘の最大トルクを変えたときの砲丸投射速度の違いを調べる。このため, 1つの初期姿勢に対して肩, 肘それぞれのトルクの最大値を3段階に変化させ, その組み合わせ9通りのシミュレーション結果を比較した。

ここで, トルクの最大値は, 屈曲-伸展両方向に同じ値をとるものとした。たとえば, 「肩のトルク最大値10Nm」とは, 肩のトルクの範囲が $-10\text{Nm} \sim +10\text{Nm}$ であることを意味し, 以後, このように表現する。このとき, 左回り(屈曲)のトルクが正である。

シミュレーションの各関節のトルクの最大値の設定は, 10, 30, 50Nm の3段階とした。

(2) 初期姿勢

シミュレーションを行うにあたり, 砲丸投射速度を大きくするための最適な初期姿勢は未知であった。このため, 2つの初期姿勢についてシミュレーション計算を行った。Fig. 2 に設定した

初期姿勢を示す。腕を投射目標方向に完全に伸展した姿勢 ($\theta_1=90^\circ, \theta_2=0^\circ$) に対して、2つの初期姿勢では(a)が肘の変位がより大きく、(b)は肩の変位がより大きい。(a)は肘関節の伸展を主に使う姿勢であり、砲丸を肩の前方に構える姿勢である。(b)は肩関節の屈曲を主に使う姿勢であり、砲丸を肩の側方に構える姿勢である。

(3) 動作時間

本研究のシミュレーションでは、終端時間固定で計算を行う。これを投てき動作の動作時間とみると、その時間が短すぎると砲丸の加速が十分に行われず、逆に長すぎると、加速前の姿勢変化が大きくなり、初期姿勢との関連がなくなる。本研究では、動作時間を0.5秒に固定して、すべての計算を行った。

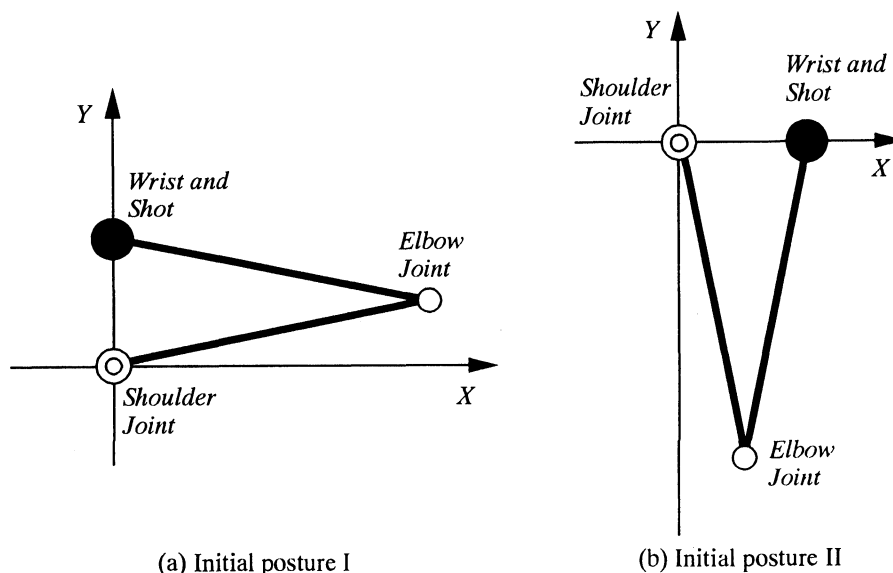


Fig.2 Two types of initial postures of upper limb. Shot is thrown for Y-direction.

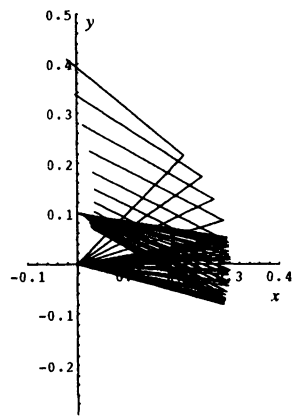
4 シミュレーション結果

4.1 上肢の軌道とトルク

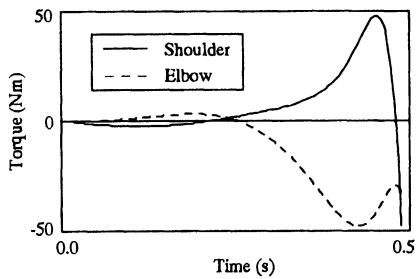
Fig. 3～6は、初期姿勢、関節トルク最大値を変えたときの最大速度達成解の上肢運動軌跡とトルクの変化パターンである。

Fig. 3, 4は初期姿勢だけが異なり、各関節トルクの最大値は同じに設定して得た最適解の結果である。トルク最大値の設定は、肩、肘関節とも50Nmである。このときの砲丸投射速度は、初期姿勢Iのとき (Fig. 3) が4.77m/s, 初期姿勢IIのとき (Fig. 4) が4.20m/sであった。

前半の姿勢変化は異なるものの、後半はどちらも手先の軌跡は、投射方向に向かいほぼ直線的になっている。また、トルクの図をみると最大値は、ともに50Nm近くに達しており、設定した拘束条件を満たしていることが確認できる。また、初期姿勢は異なるものの、Fig. 3, 4の肩、肘関節の後半のトルクの変動パターンは極めて類似していた。

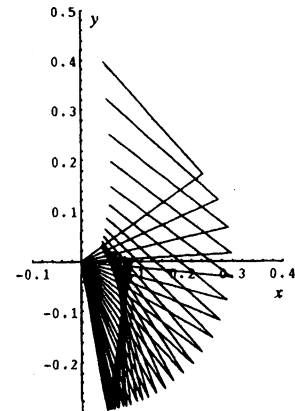


(a) Arm path

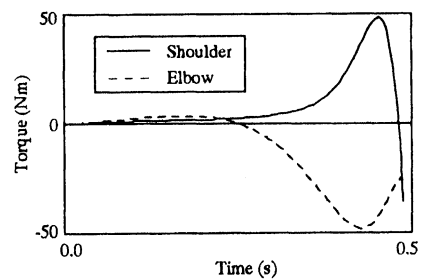


(b) Joint torque

Fig.3 Trajectory and joint torque (Initial posture I)
Maximum torque:Shoulder 50Nm
Elbow 50Nm

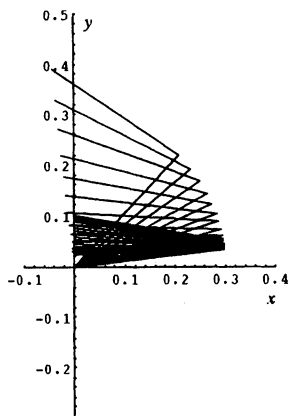


(a) Arm path

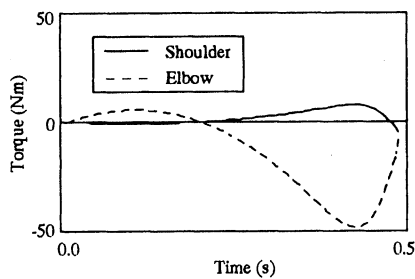


(b) Joint torque

Fig.4 Trajectory and joint torque (Initial posture II)
Maximum torque:Shoulder 50Nm
Elbow 50Nm

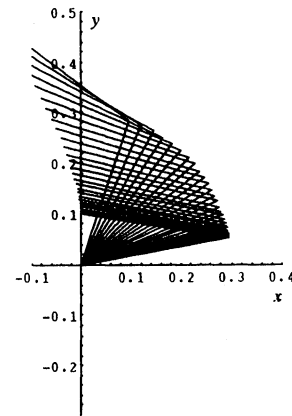


(a) Arm path

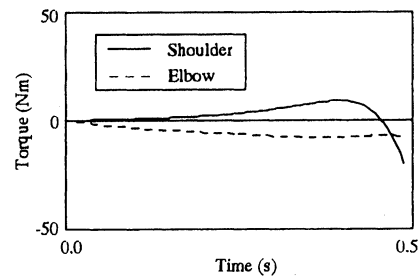


(b) Joint torque

Fig.5 Trajectory and joint torque (Initial posture I)
Maximum torque:Shoulder 10Nm
Elbow 50Nm



(a) Arm path



(b) Joint torque

Fig.6 Trajectory and joint torque (Initial posture I)
Maximum torque:Shoulder 50Nm
Elbow 10Nm

Fig. 5, 6 は、同じ初期姿勢から始まり、関節トルクの最大値を50Nm と10Nm の組み合わせで設定して計算した結果である。Fig. 5 が肘関節トルクの大きい場合（肩10Nm, 肘50Nm）、Fig. 6 が肩関節トルクの大きい場合（肩50Nm, 肘10Nm）である。この最大トルクの関節配置の変更により、投射速度、運動軌跡、トルクパターンが大きく異なった。

投射速度は、Fig. 5 の肘トルクが大きい場合で4.17m/s、Fig. 6 の肩トルクが大きい場合で1.91m/s と大きく異なっている。手先の移動軌跡も Fig. 5 (a) の場合は、比較的直線軌道に近いが、Fig. 6 (a) の場合は曲線的になっている。また、トルクの変化も Fig. 5 (b) では、設定したトルク最大値に近い値を示しているが、Fig. 6 (b) では、肩トルクの最大値は50Nm であるのに、これに達していない。この結果は、肘のトルクの最大値を低く抑えられたために、肩のトルクを充分発揮できない状態とみることができる。

4. 2 関節のトルク最大値と砲丸投射速度

Fig. 7, 8 は肘と肩のトルクの最大値を変えたときの投射速度の計算結果を示している。Fig. 7, 8 では、初期姿勢が異なり、Fig. 7 の結果は初期姿勢 I、Fig. 8 の結果は初期姿勢 II についてのシミュレーション結果である。

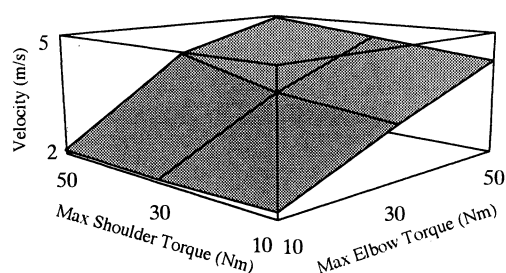


Fig.7 Optimal velocity of the shot released for each pair of maximum joint torque.
(Initial posture I)

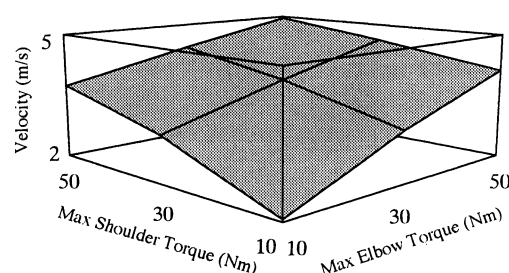


Fig.8 Optimal velocity of the shot released for each pair of maximum joint torque.
(Initial posture II)

全般的には、拘束条件として与えた関節トルクの最大値が大きいほど、投射速度は大きくなった。ここで、トレーニングによって肩、もしくは肘のどちらか一方の関節トルクの大きさを大きくする場合を考える。Table 2 は、このことを想定して、肩と肘関節回りの最大トルクが10Nm, 30Nm の組み合わせのときに、肩と肘のどちらか一方のトルクを大きくしたときの投射速度の変化率を示している。例えば、トルクの最大値が肩10Nm, 肘30Nm のときに肘のトルクだけが大きくなったときの投射速度の変化率は、この組み合わせのときの速度と、トルク最大値の組み合わせが肩10Nm, 肘50Nm のときの速度の値との差を、肘トルクの差である20Nm で除して求めた。各欄の上段が肩トルクを変化させた場合の値、下段が肘トルクを変化させた場合である。

この表によると、初期姿勢によらず、いずれの肩、肘のトルク最大値の組み合わせの場合でも、

肩関節よりも肘関節回りのトルクを大きくする方が投射速度が大きくなることを示した。

Shoulder max torque	10 Nm	30 Nm
Elbow max torque		
10 Nm	-0.005 0.055	0.000 0.074
30 Nm	0.013 0.053	0.033 0.055

In each column,

Upper number: only SHOULDER torque changed

Lower number; only ELBOW torque changed

Table 2 Change rate of shot velocity when only one of joint torque was changed

4. 3 各関節のトルク最大値とトルク2乗積分総和およびエネルギー効率

各関節のトルクが全体としてどのくらい活動したのか評価するために、トルクの2乗積分総和 J_2 を導入した¹²⁾。

$$J_2 = \sum_i \int_{t_0}^{t_f} \tau_i^2(t) dt \quad (5)$$

ここに、 $\tau_i(t)$ は関節 i のトルクの時間変化である。

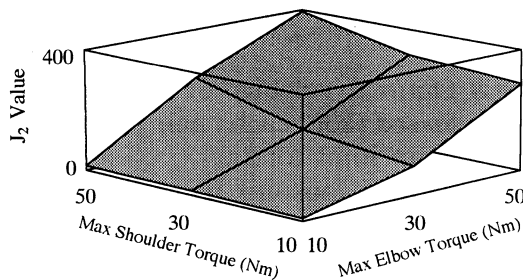


Fig.9 Sum of integral in squared torque for each pair of maximum joint torque. (Initial posture I)

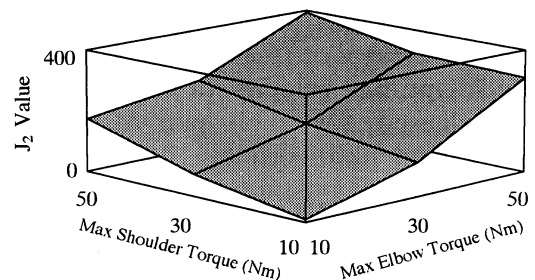


Fig.10 Sum of integral in squared torque for each pair of maximum joint torque. (Initial posture II)

Fig. 9, 10は、それぞれ初期姿勢 I, IIにおける J_2 の計算結果である。いずれの初期姿勢の場合も関節トルクの最大値が肩と肘で対照的な組み合わせ（例えば、肩50Nm, 肘10Nmの場合と肩10Nm, 肘50Nmの場合の組み合わせ）で比較すると、肘トルクの最大値の大きい方が J_2 の値は大きくなっている。特に、初期姿勢 I の場合 (Fig. 9) の肩30Nm, 肘10Nmの場合および肩50Nm, 肘10Nmの場合の J_2 はかなり小さなものとなった。実際、この2つの組み合わせの場合は、肩関節

トルクは拘束条件で定めた最大値（30Nm および50Nm）に達していなかった。このように、動作時間とともに、肘関節トルクの大きさの制限が肩関節トルクの大きさに拘束を与えてしまう場合があることが示された。

このようなトルクの発揮のされ方に対するそれぞれのトルク最大値の組み合わせにおける動作効率を調べた。動作効率は次の式によって求めた。

$$E_f = \frac{\frac{1}{2} m_s v_y^2(t_f)}{\sum_i \int_{t_0}^{t_f} \tau_i(t) \omega_i(t) dt} \quad (6)$$

ここに、 $\omega_i(t)$ は関節*i*の動作中の角速度、 m_s は砲丸質量である。

Fig. 11, 12は、それぞれ初期姿勢(a), (b)における E_f の計算結果である。これらの図によれば、いずれの初期姿勢の場合においても、最大関節トルクの組み合わせが肩10Nm, 肘50Nm の場合で動作効率が最大となっている。また、全体的な傾向として、肘のトルクが大きくなるほど効率は高くなり、逆に肩のトルクが大きくなるほど効率は下がっている。

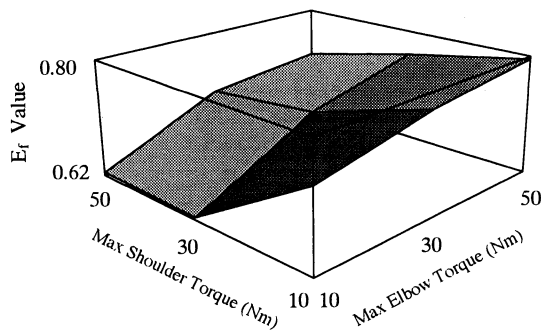


Fig.11 Energy Efficiency of put movement for each pair of maximum joint torque. (Initial posture I)

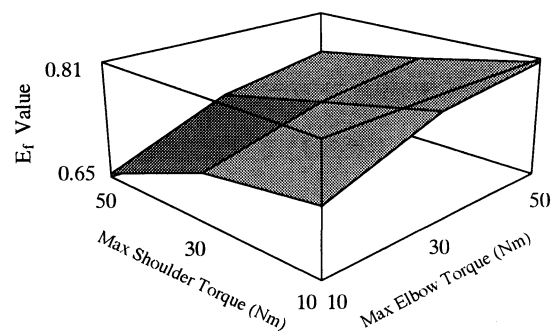


Fig.12 Energy Efficiency of put movement for each pair of maximum joint torque. (Initial posture II)

5 考察

吉福²⁾は、野球のピッチングやバドミントンのスマッシュのような腕のスウィングを伴う動作では、脚や体幹など質量の大きな身体部分から手先へのパワーの伝達が重要であり、このような動作では中枢側の関節ほど大きなトルクやパワーを負担すると述べている。しかし、本研究でみるような投射対象物を直線的に加速するような動作における関節トルクについては述べていない。

一方、Kreighbaumら¹⁾は、投げる、蹴る、打つなどの全身を使って物体を加速する身体運動を throwlike movement と pushlike movement に分類している。このうち、throwlike movement は、野球の投手の投球のように比較的軽い投射対象物に大きな速度を与えることをねらいとし、動作中の対象物（手先）は曲線軌道をたどることを特徴とするとしている。また、pushlike movement は、バスケットのフリースローやダーツのように的をねらうための正確さや、砲丸投げのように重量のある投射対象物の慣性に抗して大きな力を加えて投球するときに表れる動作で、対象物（手先）が加速時に直線軌道を描くことを特徴とするとしている。ほとんどの物体加速動作

はこの2つの動作の混合型であり、砲丸投げは、かなり pushlike movement よりの動作であるとしている。しかし、このような動作の分類は行っているものの、この分類による適切な関節トルクの配分に関する記述はなされていない。

本研究で行ったシミュレーションの動作は、上肢のみによる砲丸投げである。これは、Kreighbaum らの分類によれば、pushlike movement に属する。

シミュレーション結果をみると、肩よりも肘の関節トルクを大きく発揮できる方が投射速度が大きくなる傾向を示した。また、トルクの最大値が大きくなるほどトルクの2乗積分総和 J_2 の値は大きくなっていったが、肩と肘のトルクの最大値が対照的な組み合わせで比較すると、肘のトルクが大きい場合の方が J_2 も大きかった。さらに、投てき動作のエネルギー比の値 E_f は、肘トルクが大きく肩トルクが小さいほど高い値を示した。すなわち、肘トルクが大きいほど動作効率のよい投げ方となっていた。

以上のことから、本研究のシミュレーション結果は、上肢だけによる砲丸投げ動作では、肩の関節よりも肘の関節のトルク発揮能力を高めた方が、物体加速動作の作業成績（投射速度）および動作効率が高まることを示した。この結果は、throwlike movement のトルクの適切な配置に関する吉福の指摘とは反対の結果であった。このような結果が砲丸投げ以外の他の pushlike movement にもあてはまるかについては、今後の検討が必要である。

本研究では、関節トルクが大きさが変わってもリンクの慣性パラメータは不変とした。しかし、生体においては、トルクの発揮能力が大きくなる場合には、筋量も増大し、慣性パラメータが変動することが考えられる。また、上肢のみのモデルであるので、その他の身体部位の動きに伴う肩の変位と上肢運動との関連はみていない。これらの点の検討についても今後の課題である。

6 おわりに

加速動作は様々なスポーツで結果の成否に重要な影響を与える。この加速動作の中でも突き押し型動作に分類される砲丸投げに関して、記録向上のための関節トルクの最適な配置について検討した。

上肢2リンクモデルの関節トルクの大さの配置を変える最適化シミュレーションを行い、次の知見を得た。

- 1 2つの関節のトルク最大値が大きいほど、投射速度は大きくなる。
- 2 2つの関節のうち肘関節トルクの最大値が抑制されると肩を含めた全体的なトルク発揮の大きさも制限される。
- 3 このため、2つの関節で比較すると、肘関節トルクを大きくする方が投射速度はより大きくなる傾向にある。
- 4 運動中の関節トルク、パワーによるリンク全体の消費エネルギーに対する砲丸の投射方向速度による運動エネルギーとの比を動作効率として求めた。この効率は、関節トルク最大値が肘で大きく、肩で小さいほど大きかった。

参考文献

- 1) Kreighbaum, E. and Barthels, K. M. : Biomechanics, Allyn & Bacon, 335-369, 1996.
- 2) 吉福康郎：スポーツ上達の科学，講談社，48-64，1990.
- 3) 植屋清見，中村和彦，麻場一徳，池川哲史：砲丸投のフォームとパフォーマンス，日本バイオメカニクス学会第11回大会論集，437-443，1992.
- 4) 阿江通良，篠原邦彦，野友宏則，只左一也：日本一流砲丸投げ選手の技術に関する研究，日本体育協会スポーツ科学研究報告集，145-148，1995.
- 5) 篠原邦彦，阿江通良，藤井範久：一流砲丸投選手が砲丸に発揮したパワーの変化と上肢の機能，身体運動のバイオメカニクス，第13回バイオメカニクス学会大会編集委員会，288-293，1997.
- 6) 川人光男：脳の計算理論，産業図書，236，1996.
- 7) Audu, M. L. and Davy, D. T. : The influence of muscle model complexity in musculoskeletal motion modeling. Trans. ASME J. Biomechanical Engineering, 107, 147-157, 1985.
- 8) Davy, D. T. and Audu, M. L. : A dynamic optimization technique for predicting muscle forces in the swing phase of gait, J. Biomechanics, 20, 187-201, 1987.
- 9) Pandy, M. G., Anderson, F. C. and Hull, D. G. : A parameter optimization approach for the optimal control of large-scale musculoskeletal systems, Trans. ASME J. Biomechanical Engineering, 114, 450-460, 1992.
- 10) 長谷和徳，井上剛伸，木塚朝博，金子誠喜，廣瀬秀行，数藤康雄：介助作業負担の事前評価を目指した身体動作のシミュレーション，バイオメカニクス学会誌22，115-120，1998.
- 11) 室津義定，大場史憲，米沢政昭，藤井進：システム工学，森北出版，197-203，1980.
- 12) 望月義幸，天野晴雄，手塚一志，松元剛，山下伸一，大村皓一：逆ダイナミクスと準 Newton 法による上肢の最適化投球動作シミュレーション，身体運動のバイオメカニクス，第13回バイオメカニクス学会大会編集委員会，305-311，1997.