動物の筋配列による四肢先端の運動学的解析*

大島 徹^{*1}, 藤川 智彦^{*2}, 熊本 水頼^{*3}

Kinematic Analyses for the Various Muscular Arrangements of Animals

Toru OSHIMA^{*4}, Tomohiko FUJIKAWA and Minayori KUMAMOTO^{*4} Toyama Prefectural University, Fac. of Engineering, Kosugi, Toyama, 939-0398 Japan

Animals have various muscular as power sources and they, living in the gravitational environments, have very similar basic muscular arrangements in their muscular arrangements reflecting differences in their locomotive life styles. We have reported that the coordinating muscular activities among the three pairs of antagonistic muscles contributed to the output force direction control, in all round (360°) direction, the force/position control and the stiffness control at the endpoint of the extremities. In the present paper, relations between the differences in the muscular arrangements in animals and the differences in the characteristic differences in their locomotive styles were analyzed in terms of functional anatomy and of control engineering. The results obtained that the muscular arrangements in animals was reflected in their locomotive styles. All animals had the essential muscular arrangements to realize the force and the stiffness properties at the endpoint of the extremities.

Key Words: Biomechanics, Muscles and Skeleton, Muscular Arrangement, Kinematic Analyses

1. はじめに

従来から歩行や跳躍など, ヒトや動物の運動をおこなわせるロボットの開発がおこなわれている。我々はこのヒトや動物の運動機構を機械工学およびロボット工学に適用することを試みてきた。その結果, ヒトの上肢の動作筋電図学的解析および二関節リンクモデルによるロボット工学的解析により, それぞれの関節における拮抗一関節筋ペアと二つの関節に同時に関与する拮抗二関節筋ペアの相互の協調的な活動様相は手根関節における出力とその方向を制御することが可能であることが明らかになった¹⁻⁷⁾。また, これらの協調活動をもとにした活動パターンはロボットアーム等に応用されつつある。しかし, ロボットを開発する上で, 様々な運動特性を付加させることを考慮に入れると, ヒト上肢の運動法則だけの効果ではなく, 様々な動物の運動法則の効果を理解する必要があると考えられる。そこで, 種々の動物の様々な運動, すなわち, 生活様式に反映する筋配列の機能的

特性に注目した。この種々の動物の筋配列の相違は解剖学的所見^{4,5)}により明らかにすることができるとは, それらの筋の活動による系先端での力および剛性に関して明確ではない。

そこで, 本研究は, 種々の動物の最も普遍的な日常動作である歩行および走行動作に注目して, それぞれの動物の下肢における筋配列を解剖学的^{8,9)}に比較検証した。また, その筋配列の相違にともなう系先端部における力, 位置および剛性調節の特性を拮抗一関節筋群および両関節にまたがる拮抗二関節筋を装備した筋骨格系二関節リンクモデルを用いて運動学的解析^{1,2,3)}をおこなった。また, 実際に筋の体積および断面積により系先端における出力を解析し, 生活様式と筋配列の関係を考察した。

2. 解剖学的解析

2.1 解剖学的比較方法 ヒトの上肢における主な筋配列の模式図を図1に示す。上肢上腕には肩関節を屈する代表的な一関節筋である三角筋前部(Da)と大胸筋(Pm), その筋群に拮抗する伸筋である三角筋後部(Dp)と大円筋(Tm), 肘関節を屈する一関節筋である上腕筋

* 原稿受付 1998年7月16日。

^{*1} 正員, 富山県立大学工学部(☎939-0398 富山県射水郡小杉町黒河5180)。^{*2} 正員, 富山県立大学大学院。^{*3} 京都大学(☎606-8317 京都市左京区吉田本町)。

E-mail: oshima@pu-toyama.ac.jp

Fig.1 Muscular arrangements at human upper extremity

Da,Dp:deltoideus anterior and posterior portion
 Pm:pectoralis major, Tm:teres major, Br:brachialis
 Tla,Tlo:triceps brachii lateral and long head
 Bsh,Blo:biceps brachii short and long head
 Fp:flexor pollicis longus,
 Ep:extensor pollicis longus and brevis
 Fc:flexor carpi radialis and flexor carpi ulnaris
 Ec:extensor carpi radialis and ulnaris

(Br), その伸筋である上腕三頭筋外側頭(Tla), 肩関節および肘関節を屈する二関節筋である上腕二頭筋長頭(Blo)と短頭(Bsh), その伸筋である上腕三頭筋長頭(Tlo)の筋群が存在する. これらの筋群が協調的に活動することで系先端(手根関節)における出力を自由に設定でき, 様々な運動を可能にしていることが筋電図学的解析および運動学的解析により明確になった. すなわち, 肩関節における拮抗一関節筋ペアと肘関節における拮抗一関節筋ペア, 肘関節と肩関節にまたがる拮抗二関節筋ペアの計三対6筋の筋群の存在が系先端での任意の力および剛性の

調節に必要不可欠であることを示している^{1,2,3}. このヒト上肢の筋配列をもとにヒトやゴリラなどの足底歩行の霊長類の下肢, ウマやウシなどの指先行の有蹄類の下肢, カエルなどの跳躍動物の下肢の筋配列を解剖学的に比較した.

2.2 ヒトやゴリラなどの霊長類の下肢の筋配列

ヒトの下肢における主な筋配列の模式図を図2(a)に示す. この図は歩行走行などの矢状面内の動作に関与する筋群を模式的に表現したものである. ヒト下肢の骨格系は骨盤骨, 大腿骨, 脛骨, 腓骨, 踵骨などにより構成される. 大腿における代表的な一関節筋は股関節における屈筋である腸骨筋(II)と伸筋である大殿筋(Gm), 膝関節における屈筋である大腿二頭筋(Bs)と膝窩筋(Pp), 伸筋である外側広筋, 中間広筋および内側広筋(Vs)が存在する. 大腿における二関節筋は股関節を屈すると同時に膝関節を伸ばす筋である大腿直筋(Rf)と股関節を伸ばすと同時に膝関節を屈する筋であるハムストリングス(Hm)が存在する. ハムストリングスは半腱様筋, 半膜様筋および縫工筋の総称である. 下腿部における代表的な一関節筋は足関節における屈筋である前脛骨筋(Ta)と伸筋であるヒラメ筋(SI)が存在する. 下腿部における二関節筋は膝関節を屈すると同時に足関節を伸ばす筋である腓腹筋(Gs)が存在するが, 膝関節を伸ばすと同時に足関節を屈する筋は存在しない.

ヒトと同じ足底歩行の動物であるゴリラの筋配列の模式図を図2(b)に示す. ゴリラの下肢の筋群はヒトの下肢の筋群と同様であり, ゴリラにも腓腹筋に拮抗する二関

Fig.2 Muscular arrangements at the animal lower extremity

II:iliacus, Gm:gluteus maximus, Vs:vastus lateralis, medialis and intermedius
 Pp:popliteus, Bs:biceps femoris short head, Hm:hamstrings, Rf:rectus femoris, SI:soleus
 Gs:gastrocnemius, Ta:tibialis anterior, Ad:adductor, Pt:peroneus tertius
 Bsa:biceps femoris sacri head, Bis:biceps femoris ischii head

節筋は存在しない。

以上より足底歩行であるヒトやゴリラは下肢大腿部には股関節および膝関節における拮抗一関節筋群ペアと拮抗二関節筋群ペアの三対6筋の筋群が存在し、下腿部先端の足関節部の力および剛性を任意に調節できる筋配列であるが、下腿部には腓腹筋に対する拮抗筋が存在しないため足の指先においては力および剛性を独立して任意に調節することが不可能な筋配列であると考えられる。

2.3 ウマやウシなどの有蹄類の下肢の筋配列

ウマやウシなどの有蹄類の下肢における主な筋配列の模式図を図2(c)に示す。有蹄類の骨格系は骨盤骨、大腿骨、脛骨、踵骨、中足骨などにより構成される。ヒトやゴリラの骨格系との大きな相違は足底の骨である中足骨にある。ヒトやゴリラにも中足骨は存在するが踵骨と指骨群との間に存在する小さな骨であり、有蹄類のように長くはない。有蹄類の大腿における代表的な一関節筋は股関節における屈筋である腸骨筋(Ii)と伸筋である大殿筋(Gm)と内転筋(Ad)、膝関節における屈筋である膝窩筋(Pp)、伸筋である外側広筋、中間広筋および内側広筋(Vs)が存在する。大腿における二関節筋は股関節を屈すると同時に膝関節を伸ばす筋である大腿直筋(Rf)と股関節を伸ばすと同時に膝関節を屈する筋であるハムストリングス(Hm)と大腿二頭筋骨盤頭(Bis)、股関節を伸ばすと同時に膝関節を伸ばす筋である大腿二頭筋骨椎頭(Bsc)が存在する。下腿部における代表的な一関節筋は足関節における屈筋である前脛骨筋(Ta)と伸筋であるヒラメ筋(Sl)が存在する。下腿部における二関節筋は膝関節を屈すると同時に足関節を伸ばす筋である腓腹筋(Gs)と膝関節を伸ばすと同時に足関節を屈する筋である第三腓骨筋(Pt)が存在する。また、有蹄類は股関節と足関節を伸ばすと同時に膝関節を屈する三関節筋が存在する。この三関節筋は大腿二頭筋骨盤頭および半腱様筋の一部の筋束により構成されており、この三関節筋に拮抗する筋は存在していない。

ウマやウシなどの有蹄類は下肢大腿部と下腿部に股関節および膝関節、足関節における拮抗一関節筋群ペアと拮抗二関節筋群ペアの三対6筋の筋群が存在することから、下腿部先端の足関節部だけではなく指先の蹄部においても力および剛性を独立に調節できる筋配列であることがわかる。また、この筋配列は蹄をもつ動物だけではなく、イヌやネコなどの指先で歩く動物にもみられる。

2.4 カエルの後肢の筋配列

跳躍動作をおこなうカエルの筋配列の模式図を図3に示す。カエルの後肢の骨格系は腸骨、大腿骨、脛骨、脛骨端付骨、腓骨端付骨などにより構成される。カエルの大腿における代表的な一関節筋は股関節における屈筋である外腸骨筋(Ie)と膝関節における伸筋である短脚伸筋(Ec)が存在するが、それらの拮抗筋である股関節における伸筋と膝関節における屈筋は存在していない。大腿における二関節筋は股関節を屈すると同時に膝関節を伸ばす筋である大殿筋(Gm)と中間広筋(Cr)、股関節を伸ばすと同時に膝関節を屈する筋であるハムストリングス(Hm)が存在する。下腿における代表的な一関節筋は足関節における屈筋である前距骨筋(Ta)と伸筋である後距骨筋(Tp)が存在する。下腿部における二関節筋は膝関節を屈すると同時に足関節を伸ばす筋である腓腹筋(Gs)が存在するが、それに拮抗する筋である膝関節を伸ばすと同時に足関節を屈する筋は存在しない。

ある外腸骨筋(Ie)と膝関節における伸筋である短脚伸筋(Ec)が存在するが、それらの拮抗筋である股関節における伸筋と膝関節における屈筋は存在していない。大腿における二関節筋は股関節を屈すると同時に膝関節を伸ばす筋である大殿筋(Gm)と中間広筋(Cr)、股関節を伸ばすと同時に膝関節を屈する筋であるハムストリングス(Hm)が存在する。下腿における代表的な一関節筋は足関節における屈筋である前距骨筋(Ta)と伸筋である後距骨筋(Tp)が存在する。下腿部における二関節筋は膝関節を屈すると同時に足関節を伸ばす筋である腓腹筋(Gs)が存在するが、それに拮抗する筋である膝関節を伸ばすと同時に足関節を屈する筋は存在しない。

カエルなどの跳躍動物は大腿部および下腿部に三対6筋の筋群が存在しないことから、足関節および指先での力と剛性を独立に調節することは不可能である。

3. 二関節リンクモデルによる解析

3.1 二関節リンクモデル 解析に用いた二関節リンクモデルと筋モデルを図4に示す^{1,2)}。筋モデルは一般的な粘弾性モデルを用いた。筋収縮力(u)、弾性要素(k)、粘性要素(b)、収縮量(x)と筋力(F_m)の関係は、

$$F_m = u - kux - b \frac{dx}{dt} \quad \text{-----(1)}$$

である。二関節リンクモデルは拮抗一関節筋および拮抗二関節筋ペアの計三対6筋の拮抗筋群により構成し、第1関節(H)における拮抗一関節筋ペアをf₁,e₁、第2関節(k)における拮抗一関節筋ペアをf₂,e₂、第1関節と第2関節にまたがる拮抗二関節筋ペアをf₃,e₃とした。さらに、解

Fig.3 Muscles arrangement at anuran hindlimb

Ie:iliacus externus, Gm:glutaeus magnus
Cr:cruralis, Gs:gastrocnemius
Hm:hamstrings, Ta:tarsalis anticus
Ec:extensor cruris brevis, Tp:tarsalis posticus
hamstrings are semitendinosus, semimembranosus,
gracilis major and gracilis minor.

Fig.4 Analysis model

T_1, T_2 : joint torque, l : length of link, r : radius of joint pulley
 F : output force, θ_1, θ_2 : joint angle, F_m : muscular output force
 x : contracting length, u : contractile force, k : elastic coefficient
 b : coefficient of viscosity, A : end point

Fig.5 Force distributions at the end point

析を容易に進めるために関節モーメントアーム(r), 関節間の長さ(l)および各筋の要素(u, k, b)は同一であるとして, 各筋の収縮力によって生じる系先端の出力を求めた^{1,2)}. ただし, $a-d$ 方向は第1関節と系先端を結ぶ方向, $b-e$ 方向は第2リンクと一致する方向, $c-f$ 方向は第1リンクと平行な方向とした. 系先端における出力は, 各筋の収縮力によって発生する力の合力としてあらわされる. それぞれの筋の1筋のみの収縮力が系先端に発生させる出力の方向は, 第1関節の拮抗一関節筋である f_1, e_1 は b, e 方向, 第2関節の拮抗一関節筋である f_2, e_2 は d, a 方向, 拮抗二関節筋である f_3, e_3 は c, f 方向である.

図5は姿勢の変化に伴う同特性の三対6筋が存在する場合の系先端における出力分布を示す. 図5(a)の実線の六角形は個々の筋の収縮力がすべて同じ場合の出力分布を示し, 図5(b),(c)は筋群の収縮力が異なる場合の例を示す. 図5(b)は第2関節の一関節筋である e_2 が2倍の収縮力である場合を示し, 図5(c)は第1関節の一関節筋である f_1 が2倍の収縮力である場合を示す. 個々の筋が同特性の場合は向かい合う辺の長さが等しい実線の六角形の出力分布が得られる. 姿勢が直立に近くなるにつれて上下方向に出力が大きくなり, 左右方向には小さくなるのがわかる. また, 個々の筋の収縮力が同じ場合は向かい合う辺の長さが等しいだけでなく, 左右対称の出力分布となることがわかる(図5(a)). これは各拮抗筋ペアの収縮力の和が出力分布の六角形の向かい合う辺の長さに比例するためである.

図6は三対6筋の同特性の筋群が存在する場合の出力に対する剛性の変化²⁾を示す. 図6(a)は第2関節(K)の一関節筋である e_2 のみが活動した場合の出力, 図6(b)は e_2

Fig.6 Stiffness at the end point

と二関節筋ペアである f_3, e_3 が活動した場合の出力, 図6(c)は e_2, f_3, e_3 と第1関節(H)の一関節筋ペアである f_1, e_1 が活動した場合の出力を示す. 図6(a),(b),(c)とも系先端における出力は同じである. しかし, 図6(a)では力と反対方向のみに剛性を設定でき, 図6(b)では剛性をすべての方向にもたせることができるが, その大きさは出力によって規制される. 図6(c)では力に関係なく剛性を任意に調節することができる²⁾. よって, 系先端における剛性を任意に調節することができるものと考えられる.

3.2 ヒトやゴリラなどの霊長類の下肢の二関節リンクモデル ヒトの下肢およびゴリラの下肢の筋配列(図2(a))をモデル化すると図7となる. 大殿筋(Gm)の役割を示す筋モデルである f_1 , 腸骨筋(II)である e_1 , 大腿二頭筋短頭(Bs)である f_2 , 外側広筋(Vs)である e_2 , ハムストリングス(Hm)である f_3 , 大腿直筋(Rf)である e_3 , 前脛骨筋(Ta)である f_4 , ヒラメ筋(SI)である e_4 , 腓腹筋(Gs)である e_5 により構成される(図7(a)). 構成された大腿部の筋群における足関節部の出力分布を図7(b)に, 下腿部の筋群における指先の出力分布を図7(c)に示す. 大腿部には三対六筋の筋群が存在するため, 足関節部における出力とその方向および剛性を自由に設定できる. しかし, 下腿部には e_5 に対する拮抗筋が存在しない. このため, 足指先における剛性の制御には規制が生じるが, 足指先における出力分布はすべての方向に出力が可能な歪んだ六角形となる. また, 下腿部に存在する e_5 は動力源およびエネルギーの伝達機能として存在している^{10,11)}と考えられる. これより, 足底歩行の動物であるヒトおよびゴリラなどの筋配列は踵部の力と剛性の調節に適した機構であることがわかる.

3.3 ウマやウシなどの有蹄類の下肢の二関節リンクモデル ウマおよびウシの下肢の筋配列(図2(b))をモデル化すると図8となる. 大殿筋(Gm)の役割を示す筋モデルである f_1 , 腸骨筋(II)である e_1 , 膝窩筋(Pp)である f_2 , 外側広筋(Vs)である e_2 , ハムストリングス(Hm)である f_3 , 大腿直筋(Rf)である e_3 , 前脛骨筋(Ta)である f_4 , ヒラメ筋(SI)である e_4 , 第三腓骨筋(Pt)である f_5 , 腓腹筋(Gs)である e_5 により構成される(図8(a)). 構成された大腿部の筋群における足関節部の出力分布を図8(b)に, 下腿部の筋群における指先の出力分布を図8(c)に示す. 大腿部および下腿部には三対六筋の筋群が存在するため, 足関節部および爪先部におけるすべての出力とその方向および剛性を自由に設定できる. また, f_3 の一部が踵部まで至る三関節筋はおもに動力伝達の役割をはたすと考えられる. これより, 指先歩行の動物であるウマおよびシカなどの筋配列は足関節部とともに爪先部の力と剛性の調節に適した機構であることがわかる.

3.4 カエルの後肢の二関節リンクモデル カエルの後肢の筋配列(図3)をモデル化すると図9となる. 外腸骨筋(Ie)の役割を示す筋モデルである e_1 , 短脚伸筋(Ec)で

Fig.7 Force distributions at the muscular arrangements in the human lower extremity

H:hip joint, K:knee joint, A: ankle joint
 f_1, e_1 :antagonistic pair of mono-articular muscles at the hip joint
 f_2, e_2 :antagonistic pair of mono-articular muscles at the knee joint
 f_3, e_3 :antagonistic pair of bi-articular muscles at the femur
 f_4, e_4 :antagonistic pair of mono-articular muscles at the ankle joint
 e_5 :bi-articular muscles at the crus

Fig.8 Force distributions at the muscular arrangements in the ungulate lower extremity

H:hip joint, K:knee joint, A: ankle joint
 f_1, e_1 :antagonistic pair of mono-articular muscles at the hip joint
 f_2, e_2 :antagonistic pair of mono-articular muscles at the knee joint
 f_3, e_3 :antagonistic pair of bi-articular muscles at the femur
 f_4, e_4 :antagonistic pair of mono-articular muscles at the ankle joint
 f_5, e_5 :antagonistic pair of bi-articular muscles at the crus

ある e_2 , ハムストリングス(Hm)である f_3 , 中間広筋(Cr)である e_3 , 前距骨筋(Ta)である f_4 , 後距骨筋(Tp)である e_4 , 腓腹筋(Gs)である e_5 により構成される(図9(a)). 構成された大腿部の筋群における足関節部の出力分布を図9(b)に, 下腿部の筋群における指先の出力分布を図9(c)に示す. 大腿部および下腿部に三対六筋の筋群が存在しないため, 足関節部および指先部における剛性を自由に設定することができないが, 全ての方向に出力が可能であることがわかる. また, 出力分布の形状から後肢を押し広げる方向の出力が大きく, 跳躍と遊泳に適した筋配列であると考えられる. これより, 跳躍動物であるカエルの筋配列は指先部および足関節部での剛性の調節よりも跳躍および遊泳に適した大きな力を発生させる機構であることがわかる.

4. 筋張力を考慮に入れた解析

4.1 ヒト下肢の筋張力を考慮に入れた出力分布

4.1.1 ヒト下肢の解剖学的筋張力 ヒト下肢における筋の断面積より各筋の筋張力を推定した. 解析には秋間らによるMRIを用いて推定した筋の断面積の数値を参照した^{12,13}. 秋間らによれば筋に含まれるすべての筋繊維の断面積の総和を筋繊維長で除したものである生理学的筋断面積(PCSA)の数値を用いた方が高い精度で筋張力を算出できるとしているため, 本解析も生理学的筋断面積(PCSA)の数値を用いた. 図10は生理学的筋断面積(PCSA)の数値に基づくヒト下肢の筋張力を模式的に表したものである. ヒト下肢において膝関節の一関節伸筋(e_2)と足関節の一関節伸筋(e_4)がそれぞれ突出した強さ

を持っていることがわかる. また, それに反して膝関節の一関節屈筋(f_2)は他の筋群と比べても非常に弱いことがわかる.

4.1.2 出力分布 図11に筋張力を考慮に入れた出力分布を示す. 股関節の拮抗一関節筋を100として比率を

Fig.10 Estimate values of muscle tensions in the human lower extremity

H:hip joint, K:knee joint, A: ankle joint
 f_1, e_1 : antagonistic pair of mono-articular muscles at the hip joint
 f_2, e_2 : antagonistic pair of mono-articular muscles at the knee joint
 f_3, e_3 : antagonistic pair of bi-articular muscles at the femur
 f_4, e_4 : antagonistic pair of mono-articular muscles at the ankle joint
 e_5 : bi-articular muscles at the crus

Fig.9 Force distributions at the muscular arrangements in the anuran hindlimb

H:hip joint, K:knee joint, A: ankle joint
 e_1 : mono-articular muscles at the hip joint
 e_2 : mono-articular muscles at the knee joint
 f_3, e_3 : antagonistic pair of bi-articular muscles at the femur
 f_4, e_4 : antagonistic pair of mono-articular muscles at the ankle joint
 e_5 : bi-articular muscles at the crus

Fig.11 Force distributions at the muscular tensions in the human lower extremity

H:hip joint, K:knee joint, A: ankle joint
 f_1, e_1 : antagonistic pair of mono-articular muscles at the hip joint
 f_2, e_2 : antagonistic pair of mono-articular muscles at the knee joint
 f_3, e_3 : antagonistic pair of bi-articular muscles at the femur
 f_4, e_4 : antagonistic pair of mono-articular muscles at the ankle joint
 e_5 : bi-articular muscles at the crus

用いて表した。破線は筋張力がすべて等しい場合を示す。足関節部では下後方に、指先部では下前方に出力が大きくなり、抗重力としての出力が非常に大きくなっていることがわかる。これにより、ヒトの筋張力を考慮に入れることで、さらに歩行や走行などの日常的な動作を繁栄した出力分布を示すことが明らかになった。

4.2 カエル後肢の筋張力を考慮に入れた出力分布

4.2.1 カエル後肢の解剖学的筋張力 カエルの後肢を解剖し、実際の筋張力を測定し系先端の出力を解析

Fig.12 Estimate values of muscle tensions

in the anuran hindlimb

H:hip joint, K:knee joint, A: ankle joint

e1:antagonistic pair of mono-articular muscles at the hip joint

e2:antagonistic pair of mono-articular muscles at the knee joint

f3,e3:antagonistic pair of bi-articular muscles at the femur

f4,e4:antagonistic pair of mono-articular muscles at the ankle joint

e5:bi-articular muscles at the crus

Fig.13 Force distributions at the muscular tensions

in the anuran hindlimb

H:hip joint, K:knee joint, A: ankle joint

e1:antagonistic pair of mono-articular muscles at the hip joint

e2:antagonistic pair of mono-articular muscles at the knee joint

f3,e3:antagonistic pair of bi-articular muscles at the femur

f4,e4:antagonistic pair of mono-articular muscles at the ankle joint

e5:bi-articular muscles at the crus

した。解剖には一般的な実験用解剖動物であるアフリカツメガエルを用いた。アフリカツメガエルの骨盤部より下体の部分を10%ホルマリン液に浸し、筋群を固定した。単筋ごとに各筋を分離させ、各筋の筋容積、筋長、筋幅、筋厚を測定し、筋中央部の断面積である解剖学的筋断面積(ACSA)を算出した。図12は解剖学的筋断面積(ACSA)の数値に基づくカエル後肢の筋張力を模式的に表したものである。カエルの後肢における二関節筋は他の筋群と比べると著しく発達していることがわかる。

4.2.2 出力分布 図13に筋張力を考慮に入れた出力分布を示す。破線は筋張力がすべて等しい場合を示す。足関節部では外後方と内前方に、指先部では内後方に出力が大きくなり、跳躍や遊泳に適した出力が非常に大きくなっていることがわかる。これにより、筋配列だけではなく筋張力を考慮に入れることにより、さらに生活行動様式に適した出力分布が得られることがわかる。

5. 考察

5.1 生活様式と筋配列の関係 様々な動物は生活様式に反映した四肢の筋配列をもっており、様々な運動を可能にしていることが明確になった。すなわち、足底歩行のヒトやゴリラおよび霊長類は足関節部における力および剛性の調節の必要性から大腿部には三対6筋の拮抗筋群が装備されていると考えられる。下腿における二関節筋である腓腹筋は剛性の調節ではなく、足底屈による推進力の獲得、上位筋群の収縮力の足底への効果的な伝達の機能を果たしているものと考えられる。一方、中足骨が長く伸びている指先歩行の有蹄類は着地する足指先部(蹄)においての力と剛性の調節の必要性から大腿部だけではなく下腿部にも拮抗二関節筋ペアが存在すると考えられる。また、大腿部後面の二関節筋の腱の一部が分岐して三関節筋化しているのは、躯幹の筋収縮力を四肢末端へ効率よく伝達しているものと考えられる。

5.2 筋配列による力学特性の効果 本解析により、動物の筋配列は生活様式を反映した機能的な駆動装置システムであることがわかった。ヒトや動物の運動特性である系先端における力と剛性の調節とその駆動システムである筋配列を理解し、それを応用することで様々な分野に新たな知見を与えられるものと考えられる。身体運動学や解剖学などの分野において、個々の筋の機能だけではなく、筋配列を考慮に入れた筋群の機能特性を考慮に入れることが重要であると考えられる。また、一般にロボットは冗長さを取り除いた構成となっている。しかし、一見冗長とみえる動物の筋配列はその動物にとって必要不可欠なものであり、決して冗長なものではない。

6. おわりに

解剖学的比較検証および二関節モデルを用いた系先端の力および剛性解析をおこなった結果、動物の四肢の筋配列の特徴はそれぞれの動物の生活行動様式の特徴を反映していると考えられる興味ある知見が得られた。すなわち、様々な動物はその生活様式に適した筋配列を獲得しているものといえる。

謝辞

この研究に協力していただいた野口雄次氏(元富山県立大学学生, 現 YKK)に深く感謝の意を表します。

本研究は日本科学協会平成9年度笹川研究助成の補助を受けておこなわれた。

参考文献

- (1) 藤川智彦他:拮抗筋群による協調制御機能, 日本機械学会論文集(C編)16巻607号, (1997), 769-776.
- (2) 藤川智彦他:上肢における拮抗する一関節筋および二関節筋群の協調活動とその機械モデルによる制御機能解析, バイオメカニズム学会バイオメカニズム 13 巻, (1996), 181-193.
- (3) Tomohiko Fujikawa et al.: Coordinating control of antagonistic pairs of mono- and bi-articular muscles (part1: EMG analyses during arm push and pull movements with maximal effort in the horizontal plane), ICMMB 9th, 497-498, (1996).
- (4) Haruo Morikawa et al.: Coordinating control of antagonistic pairs of mono- and bi-articular muscles (part2: Mechanical link model analyses), ICMMB 9th, (1996), 499-500.
- (5) Takatomi Yoshida et al.: Coordinating control of antagonistic pairs of mono- and bi-articular muscles (part3: Loose coordination under submaximal force level), ICMMB 9th, (1996), 501-502.
- (6) Toru Oshima et al.: Coordinating control of antagonistic pairs of mono- and bi-articular muscles (part4: Stiffness and force control for robot arm), ICMMB 9th, (1996), 501-502.
- (7) Minayori Kumamoto et al.: Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles (Mechanical model analyses), Human Movement Science, 13 (5), (1994), 611-634.
- (8) 加藤嘉太郎: 家畜比較解剖図説, 養賢堂, (1971), 104-179.
- (9) William E. Duellman, Linda Trueb: Biology of amphibians, The Johns Hopkins University Press, 356-364.
- (10) G. J. van Ingen Schenau: The unique action of bi-articu-

lar muscles in complex movements, J. of Anatomy, 155, (1987), 1-5.

(11) A.J. van Soest: The influence of the biarticularity of the gastrocnemius muscle on vertical-jumping achievement, J. of Biomechanics, 26, (1993), 1-8.

(12) 秋間広: MRIによるヒトの膝伸筋・膝屈筋における形態的特性および生理学的断面あたりの筋張力, 体力科学第44巻第2号, (1995), 267-278.

(13) T. Fukunaga et al.: Specific tension of human planter flexor and dorsiflexor, the American Physiological Society, (1996), 158-165.