

走鳥類の足根間関節に見られるカム様メカニズムと その設計法の検討

檜田沙耶香^{*1}, 衣笠哲也^{*2}, 伊東和輝^{*3}, 奥田ゆう^{*4},

千葉謙太郎^{*5}, 高崎竜司^{*5}, 林良太^{*2}, 吉田浩治^{*2}

^{*1}岡山理科大学大学院工学研究科, ^{*2}岡山理科大学工学部, ^{*3}大阪大学大学院工学研究科,

^{*4}岡山理科大学獣医学部, ^{*5}岡山理科大学生物地球学部,

1. はじめに

走鳥類であるダチョウやエミューの脚は大腿骨が短く水平に近い姿勢で配置されるため, ほぼ長さの等しい脛足根骨と足根中足骨が足根間関節で繋がり垂直に立って体を支持する構造を持つ(Fig. 1 左).

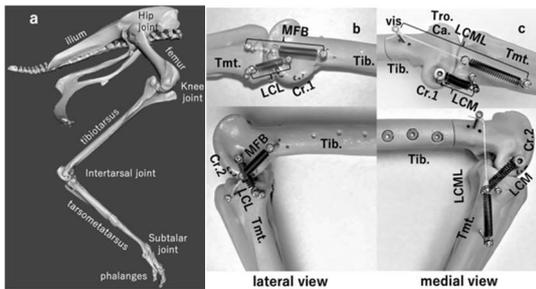


Fig. 1 Ostrich pelvic limb and intertarsal joint

そのため, 人の足関節に対応する足根間関節がロコモーションにおいて人の膝関節の機能を担う. 足根間関節は, 関節をなす足根中足骨近位端と脛足根骨遠位端の骨形状と軟組織の受動的性質から伸展状態と屈曲状態の2つの局所的平衡点を持つメカニズム(engage-disengage mechanism, EDM)を持つことが Schaller らによって報告されている¹⁾. この受動的性質は, 遊脚期に地面から足部を離脱させる屈曲と接地させる伸展や, 立脚時に地面反力を伴う足趾屈筋の牽引力とともに足根間関節を伸展状態で固定する作用に深く関わる. しかし Schaller らは, 脛足根骨遠位端の隆起などの骨形状と靭帯の役割について述べているが EDM を実現するために関節をどのように設計すればよいのか明らかにしていない. このような機能を関節のどのような形態学的特徴から得られているのか定量的に評価し, これを物理モデルで再現できれば, より詳細な機能を解明することが可能となり, さらには, ロボットへの応用が期待できる. そこで本報告は, ダチョウの骨格標本²⁾の足根間関節にバネを用いた靭帯を配置することでその機能を再現し, 骨形状が機械要素であるカム様

構造と捉えられることについて述べる. また, このカム構造を持つ関節の定量的な設計方法について検討する.

2. ダチョウの足根間関節と EDM および脛足根骨遠位端のカム形状

ダチョウの脛足根骨遠位端と足根中足骨近位端は外側 (Fig.1 中)にほぼ腱状の短い筋 MFB (m. fibularis brevis, tendinous)と靭帯 LCL (lig. collaterale laterale), 内側 (Fig. 1 右)に長めの靭帯 LCML (lig. collaterale mediale longum)と短い靭帯 LCM (lig. collaterale mediale)が配置されることで関節する. 伸展時, MFB と LCL は十字状に, LCML と LCM は脚の長手方向に平行して配置されており, これらの靭帯もしくは腱によって関節が拘束されながら運動する. このとき, 内側にある LCML が前述した EDM の運動に深く関わることになる.

2.1 EDM

足根間関節の角度を脛足根骨から足根中足骨近位端までの相対角度とする. 足根間関節は足根中足骨近位端後部の隆起が脛足根骨遠位端後部隆起 Cr.1 と物理的に接触することで約 165°以上伸展せず, 逆に, 足根中足骨近位端前部の隆起が接触することで約 40°以下に屈曲しない. 脛足根骨を固定し足根中足骨をほぼ直線上になる最伸展状態 165°から外力によって 120°付近を限度に屈曲させこれを解放すると, LCML の弾性力によって伸展状態までスナップバックする. 120°付近からさらに屈曲させると, LCML の弾性力によって逆方向 (屈曲方向)に骨端が物理的に接触する最屈曲状態 (40°)までスナップする. これを Schaller らは EDM と呼んでいる. EDM は 165°から 120°までは LCML の起始停止間距離が延長することで伸展方向へ弾性力が作用し, 逆に 120°以下では LCML が収縮するため屈曲方向へ弾性力が作用することが原因である. したがって, 165°が伸展状態, 40°が屈曲状態の安定平衡点とみなすことができる. ただし, 屈曲状態は LCML に張力が発生せず, LCM が伸長するため, 摩擦や重力の影響で平

平衡点は 70°程度まで変化する。

2.2 脛足根骨遠位端のカム形状

この EDM を作り出す LCML の作用は主に脛足根骨遠位端の下側にある隆起 Cr. 2 と前側にある滑車 Tro. Ca.によって LCML の長さが変化し実現されるものと考えられている。我々は、屈曲状態では LCML が弛み LCM が伸長するため、この時関節の運動は LCM が規定するものとする。したがって、伸展状態 165~120°付近までは LCML の起始を、屈曲状態 120~40°付近までは LCM の起始を中心とした円弧に LCML と LCM の変位を重ね合わせた曲面がある種のカムと捉えられる。関節の半径方向断面も凹状の曲線を持つため、実際の関節面は複雑な曲面となっているが、この2つの内側靭帯が構成するカム形状によって EDM を実現する関節を設計することが可能となることを次章で述べる。

3. 骨格標本を用いた実験

足根間関節の持つ EDM を構成するために、ダチョウの骨格の 3 次元モデルを 3D プリンタで造形し、実験装置を作成した(Fig. 1 中および右図)。装置はダチョウの脛足根骨、足根中足骨、足趾骨で構成される。足根間関節を構成するために内外側にある4つの腱と靭帯を解剖学的知見に基づいて配置した。腱と靭帯は引張コイルバネをナイロン糸により起始停止位置に固定したビスに結びつけることで再現している (Fig. 1)。

3.1 関節の受動的発生力と靭帯の変位

このモデルを用いて関節の靭帯による復元力を計測した(Fig. 2)。この図から、120°付近を境に 2.1 節で述べた伸展および屈曲側にスナップする力を読み取ることができる。右図は関節角度に対する LCML と LCM の変位を示している。

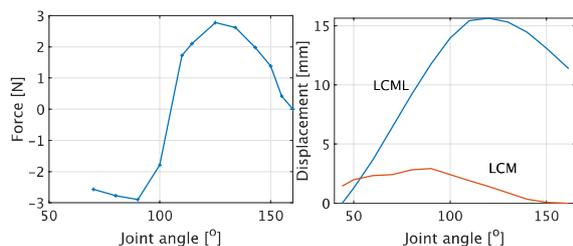


Fig. 2 Resistive force of joint and ligament displacements

LCML は屈曲伸展力と同様に 120°を頂点とする凸形状が確認できる。この隆起が LCML の伸展側のポテンシャル場を実現し平衡点を形成する。LCM の長さを見ると、90°をピークとして、伸展方向に 1.5mm、屈曲方向に 3mm 変位している。つまり屈曲側に主に張力を発

生してポテンシャル場を形成し平衡点を作り出しているものと考えられる。以上の結果から、伸展側で LCML、屈曲側で LCM が主に張力を発生することで EDM が実現されているものとする。

3.2 関節面の再構成

LCML と LCM の変位を用いて関節形状を再構成した結果を Fig. 3 に示す。

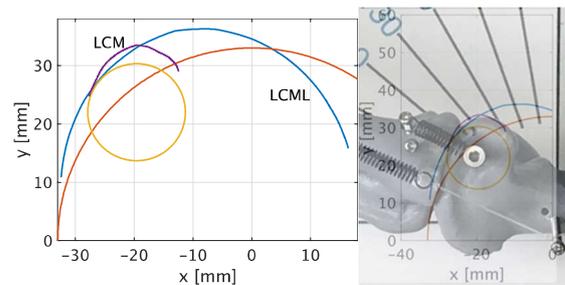


Fig. 3 Design for cam

Fig. 3 右は得られた関節面 (青 : LCML, 紫 : LCM) を脛足根骨遠位端内側に LCML の起始を LCML の基準円中心と一致させるように重ねた図である。この図から、Cr. 1 と Cr.2 の関節面(Fig. 3 右)を LCML と LCM の起始と変位によりある程度再構成できていることがわかる。しかし、LCM の起始と基準円中心がずれていることが確認できる。また、Cr.1 と Cr.2 を繋ぐ部分についても実際の関節面から外れているが、これについてはカムの中心が LCML から LCM へ関節の屈曲とともに移動しながら滑らかに繋がれるものとする。

4. おわりに

本報告では、ダチョウの足根間関節の EDM を実現するカム形状に注目し、物理モデルでこれを再現することで関節面を設計する方法について述べた。結論として、足根間関節のカム形状は EDM を実現する主要な靭帯である LCML と Cr.1 まわりで張力を発生する LCM の変位に基づいて近似的に設計可能であることが明らかとなったと言える。

謝辞 本研究は JSPS 科研費(20K04390)の助成を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) N. U. Schaller, et al., The intertarsal joint of the ostrich (*Struthio camelus*): Anatomical examination and function of passive structures in locomotion, *J. of Anatomy*, 214, 830/847, (2009)
- 2) Ostrich, Idaho Virtualization Lab., Sketchfab.com (2023.2 アクセス)