医工連携新時代を拓く二関節筋力学体系と、リアルヒューマノイド*

Bi-articular Muscle Biomechanics for Bioengineering Revolution, and Real Humanoid

熊本水頼**

Minayori KUMAMOTO

Key words

bi-articular muscle, Inter-muscular coordination, coordination control model, humanoid, human simulation model, functionally different effective muscle, biomechanics, bioengineering

1. はじめに

何故、生体機構制御に関する専門委員会を精密工学会に作ったのか。その最も大きな理由は、いかに精密なマンマシンインターフェース機器を作ろうと、その力学座標系がヒトの力学座標系と一致しなかったら深刻な問題が生じかねないことを危惧するからである。

幸か不幸か、現状でのマンマシンインターフェース機器はまだ深刻な状況に遭遇するほどの使われ方はしていない。最新のヒト型ロボットも愛嬌を振りまく程度で、ヒトと深く関わることはない。Motion capture base ヒューマンシミュレーションモデルやスポーツ力学はヒト側の低い再現性にカバーされて、深刻な問題が浮き彫りにされるに至っていない。しかし日常身近に運動障害を持つ患者に接しているリハビリ臨床現場の研究者は、従来の運動学では解釈できない現象に遭遇し、従来の力学体系と生体のそれとの差違を深刻に受け止め、本専門委員会の一員として解決の道を探り始めている。

ヒトや動物の四肢には二関節筋、文字通り隣り合った2つの関節に跨って着き、2つの関節を同時に駆動する筋が拮抗するペアとして、極めて普遍的に存在している。現行の機械機構学に二関節筋、二関節同時駆動の概念はない。ところが拮抗二関節筋の存在が四肢リンク機構の剛性制御、軌道制御、出力・出力方向制御に貢献し、ヒトや動物特有の滑らかで、系先端からの位置のフィードバック情報なしで、ファジーながら正確かつ素早い動きを実現していることが理論的、実験的に確かめられてきた^{1) 2)}。

実際に二関節筋を装備し協調制御理論に基づいて製作された基本ロボットアーム（沖電気モデル）はヒトと同じ制

御機能特性、出力特性を再現し、現行のヒト型ロボットが達成できていないヒトらしい運動特性を、彼らより遙かに簡単な制御即で成し遂げてしまった³⁾。

精密工学的医工連携新時代を革命的に切り開くKeywordは拮抗二関節筋である。拮抗二関節筋を組み込んだ協調制御モデルを新時代生体力学体系の基本概念とする当専門委員会の設立経緯、ここまでの活動の成果と展望について概説する。その前に、二関節筋を組み込んだリンク機構の力学体系は、関節トルクだけから論じられてきた従来の機械工学力学体系とどこがどう違ってくるのか、既に論文化している内容をreviewし、その概要を明記しておきたい。

2. 二関節筋力学体系の機能的特性

拮抗二関節筋は四肢リンク機構の3次元自由空間の運動制御に関わるのだが、鍵を握る拮抗二関節筋の起始、付着は上肢、下肢共に第1リンク（上腕骨または大腿骨）と第2リンク（前腕骨または下腿骨）が第二関節（肘または膝関節）を挟んで作る2次元平面内に局在することが確かめられた。拮抗二関節筋はこの2次元平面運動のためだけに準備され配置された筋であると言って差し支えない。また第2関節は一義的に蝶番関節である。従って、拮抗二関節筋の両端の関節周りの筋配列は複雑ではあるけれども、拮抗二関節筋と共にリンク機構先端の機能的特性に有効に参画できる一関節筋群は、第1、第2リンクが作る2次元運動平面内に在る筋あるいは筋束に限られることになる。そこでこれらの筋あるいは筋束を二関節筋であるか一関節筋であるか、一関節筋であれば屈筋か伸筋かで機能別実効筋と定義した。この実効筋概念の導入によって四肢リンク機構の複雑な筋配列も図1上段に示すように、3対6筋の拮抗筋群配列として機能的にまとめることが可能となり、力学的、数学的解析を容易にした。かつ上肢と下肢と機能別実効筋配列は鏡像的に同一となり、上肢、下肢共に同一の実効筋力評価Programの適用を可能とした。

2.1 系先端出力特性

個々の実効筋の筋出力を測定することはできないが、リ

*原稿受付 平成17年7月11日

**正会員 (株)計算力学研究センター顧問
(品川区戸越1-7-1 戸越NIビル)

熊本水頼

1949年九州大学農学部卒、1960年京都大学講師、医学博士、助教授、教授を経て1990年退官、京都大学名誉教授、同年富山県立大学教授、02年(株)計算力学研究センター顧問、筋電気生理学、バイオメカニクス、生体機構制御論。

図1 個々の実効筋の作業座標系での出力（上段パネル）と6筋による最大出力分布図（下段パネル）

図2 同一実効筋力配分のモデルにおいて関節トルクで計算された系先端出力分布（A）と二関節筋を計算に組み込んだ場合（B）の出力分布の差

リンク機構先端の作業座標系での出力を計測することは可能である。この関係を図示したのが図1である。上段パネルには個々の実効筋（ f_i ： e_i ， $i=1,2,3$ ）はそれぞれ単独にそれぞれ特定の方向に（ Ff_i ： Fe_i ， $i=1,2,3$ ）の出力を発揮できることを現している。下段パネルはこの6筋によって360°全方位にわたって最大出力を発揮したときの出力分布を示している。六角形となっている。

実際にヒトを対象に最大努力下で出力分布を計測、描記してみると上肢、下肢共に六角形に近似できている⁴⁾。

図3 2関節リンクモデルの系先端剛性
拮抗二関節筋が存在するモデル（右パネル）では外部負荷の方向に関わらず系先端剛性の楕円の形状に変化はない。ところが拮抗二関節筋が存在しないモデル（中央および左パネル）では外部負荷の方向によって系先端剛性の楕円の形状が変化した。描線の重複を避けるため剛性の逆数 compliance で表現している

図1の下段パネルに示す六角形の出力分布図は、その合成過程からも特徴的な性質を持っているが、その性質を利用して富山県立大 Group は機能別実効筋力の簡便評価法の開発に成功した⁴⁾。Prototype を1999年国際バイオメカニクス学会において展示公開したが、さらに（株）計算力学研究センター（RCCM）がFEMS Programとして商品化に成功し、整備を進めている。

従来、生体出力特性としては関節トルクを計測し、関節トルクから論じる以上のことはなされていない。現行の生体力学体系は機械工力学体系をそのまま導入して始められたので二関節筋、2関節同時駆動の概念は導入されていなかった。致し方ないが、関節トルクから計算される系先端出力分布は四角形である（図2パネルA）。同じ筋力配分で二関節筋を計算に組み込んだ場合（図2パネルB）と明らかに違ってくる。

生体出力特性は二関節筋力学体系によって解析されなければならないことを、最も基本的な問題点の1つとして注意を喚起しておきたい。

2.2 系先端剛性制御

2関節リンクモデルの先端剛性の楕円は拮抗二関節筋を含む3対の拮抗筋群の存在で多少の外部擾乱にも安定した姿勢制御を可能とした（図3）¹⁾。沖電気工業のレッグロボットはジャンプして着地したとき、一切のフィードバック制御なしで、ゆらゆらとしながらも、機構自体で安定した姿勢制御を全うし、二関節筋装備協調制御モデルの剛性制御機能を立証してくれた。

図4 2関節リンクモデル系先端への外力と変位

左パネル: 拮抗二関節筋装備協調制御モデル. 右パネル: 拮抗一関節筋のみのモデル

C1, C2: それぞれ第1, 第2関節回りの拮抗一関節筋によるコンプライアンス

C3: 拮抗二関節筋によるコンプライアンス

2.3 系先端軌道制御 (外力と変位の関係)

拮抗二関節筋装備協調制御モデルでは系先端に加えられた外力とそれによる変位の軌跡は一致するが (図4左) 拮抗二関節筋を欠き、拮抗一関節筋のみの従来型リンクモデルでは両者は一致しない (図4右)。

この点についても沖電気工業のレッグモデルはいわゆる Contact task が解消されたことを立証してくれた。

なお、二関節筋機能の詳細は <http://www.mathforum.jp/> を参照されたい。

3. 本専門委員会設立の経緯と活動の経過

まず、当研究グループは1999年に当学会の生体機構制御研究分科会として活動を開始し、次いで2001年より電気学会「医療関連社会福祉支援型ロボット応用技術調査専門委員会」として2ヶ年間の活動を行った。そのような継続的な活動を背景として今回、2004年10月、新メンバーを加え、充実した体制を整えて「生体機構制御・応用技術専門委員会」の設置が認可された。

本専門委員会の第1期の活動期間は2005年2月より5ヶ年間であるが、初年度 (実質的に2004年10月30日-2006年2月) の活動は以下の通りである。開催済み研究例会の結果の詳細及び例会予定については <http://air-dawn.net/> にアクセスしていただきたい。

1) 2004年10月30日、本専門委員会設立総会兼第1回「二関節筋実利用 Workshop」を学士会館本館にて開催した。二関節筋装備、東京電機大 Gorilla model, 沖電気工業基本モデルが披露された。

2) 2005年2月19日、第1回研究例会を故藤井澄二先生追悼記念会を兼ねて、担当斎藤之男委員 (東京電機大) にて東京電機大学神田キャンパスにおいて開催し、主とし

て二関節筋装備動力装具、災害救助ロボットに関する発表が行われた。

3) 2005年3月16日、精密工学会春季大会 (慶應義塾大学矢上キャンパス) において「生体機構制御シンポジウム」- Animal Inspired Technologies - を開催した。

4) 2005年6月25日、第2回研究例会「ヒトと機械の協調動作」を担当小田高広委員 (沖電気工業 (株)) にて東京電機大学神田キャンパスにおいて開催、特に沖電気レッグモデルの成功が注目を集めた。

5) 2005年8月27日、第3回研究例会、担当熊井規委員 (RCCM) にて東京電機大学神田キャンパスにおいて「二関節筋発生過程、6億年のときを通じて考えよう、その存在意義を」を主題にして開催予定。

6) 2005年9月15-17日、精密工学会秋季大会 (京都大学吉田キャンパス) において「制御の生物進化とリアルヒューマノイド」を統一主題として、本専門委員会の会員大学研究室並びに会員企業グループにより、古生代生物の運動制御の機構が現世の協調制御モデルへと進化する過程を検証し展示する予定。

7) 2005年11月、第4回研究例会、担当田島孝光委員 ((株) 本田技術研究所) 開催予定。

8) 2005年12月、第2回 Workshop, 2006年2月第2回総会兼研究例会の予定。

4. 関連する領域における開発展望と社会的影響

見た目の模倣の域を出ない現行のヒューマノイドロボット、外見的映像解析のみに頼るシミュレーションモデル、関節トルクを計るだけの運動解析、これらの領域に二関節筋という内部筋配列に起因する特異的機能、生体には極めて普遍的でも、従来の機械力学体系にはなかった機能的特

図5 出力分布とそれを構成する実効筋力配分の関係
同一出力分布を構成する ($f_i : e_i, i = 1, 2, 3$) の組み合わせは無限に存在する

性を導入して“ヒトらしさ”を実現しようというのである。関連する領域は広く、社会的に影響するところも深刻と言わざるを得ない。

まず第1に、二関節筋の存在自体が隣り合った関節の拘束条件であること、この事実を明確に理解しておく必要がある。すなわち、拮抗二関節筋を組み込んでリンク機構の制御を論じるとき、従来の自由度の概念は適用できない。基本概念の見直しがまず求められる。

1) ロボット工学領域：真のヒューマノイドのプラットフォームとして二関節筋装備協調制御モデルを提供する。沖電気工業グループは独自に工夫した電磁モーターを装備して既に基本型ロボットモデル（上肢、下肢共）を完成している。このままでも福祉介護支援ロボット、スペースアーム、海中探査マニピュレータなどへの応用が考えられるが、4脚搭乗型移動ロボット（Quadruped (QP) Locomotor）として、車椅子に替わる障害者用移動ロボット、災害救助ロボット等々への幅広い応用開発の段階を迎えている。

特に協調制御モデルは極限作業ロボットの領域でその真価を発揮することになる。すなわち図5はたとえ1つのモーターが故障して出力が低下しても他のモーターの出力調整で全体の出力特性は維持できることを示している。食うか食われるか、過酷な自然環境の中を生き延びてきた動物たちである。3対6筋の協調制御モデルには自然の叡智が秘められている。

2) ヒューマンシミュレーションモデル領域：国内外で開発されている現行のヒューマンシミュレーションモデルは全て Motion capture base であり、二関節筋機能の導入は考えられていない。従ってヒトの四肢先端出力特性を現すことはできていない。富山県大 Group と RCCM が開発した FEMS Program は東大生産技研 Group が研究開発を進めている歩行モデルに搭載可能で、これによって四肢先端出力特性を備えたモチベーションベースヒューマンモデル開発への途が開けてきた。

3) 工業デザイン領域：従来の工業デザインは人体形態計測値、作業領域などを基準資料として設計されている。

図6 上肢先端出力分布

近年関節トルク計測値の収集が計画されていると聞かす、関節トルクが四肢先端出力特性を現し得ないことは既に指摘した通りである。

本専門委員会の担当 Group はこの領域に姿勢変化に伴う四肢先端出力分布特性（図6）を提供し、生活機器設計、作業環境設計、車両運転環境設計などにその成果を上げつつある。本年11月開催の研究例会ではその成果が披露される予定である。

また FEMS により障害者個人の出力特性評価が可能となり、個人個人の出力特性に応じた生活機器・環境設計が可能となった。Human friendly Design と呼んでいる。バリアフリーデザイン、ユニバーサルデザインなど、その理念は素晴らしいが、デザインの根拠となる力学的背景を持たぬ。HF Design は二関節筋力学体系に基づく設計基準を与えるものである。

4) 身体運動学関連領域：リハビリ科学、スポーツ科学領域共に現在は映像資料を逆運動学的に解析するのが主流である。ここに重大な陥穽が潜むことは図2で指摘する通りである。両領域共に FEMS Program を適用して二関節筋力学体系に基づく解析手法が示されてきた。

5) 人類学領域：霊長類の筋配列と生活様式との関係を FEMS で解析した研究手法と成果が論文化されている⁶⁾。

6) 神経生理学領域：Ia pathway 脊髄反射経路は重力環境下での再検討を必要とするであろう。

等々、影響するところ従来の学問領域を超えて広範にわたる。

5. 国内外の動向

1987年、van Ingen Schenau (VIS) と熊本はアムステルダムで開催された国際バイオメカニクス学会の席で、国際二関節筋研究グループを結成、1992年 Rome において二関節筋に焦点を絞った国際シンポジウムを開催した。その成果が1994年 Human Movement Science 誌二関節筋特集号として出版されたが、熊本らは拮抗二関節筋の存在が2関節リンク機構の剛性制御、軌道制御に貢献し、ヒトや動

物特有の制御機能特性を実現していることを世界に先駆けて理論的、実験的に明らかにした¹⁾。

一方、二関節筋の power 伝達機能に着目していた VIS はスラップスケートを開発し、1998 年長野冬季オリンピックにおいて金メダルラッシュに結びつけた。

米国、MIT の Bizzy, Hogan のグループは拮抗二関節筋のインピーダンス制御機能に着目し Equilibrium point control model (1993) を提唱しているが、拮抗一関節筋群を含む拮抗筋群の協調制御による全方位出力方向制御にまで言及できるに至っていない。

二関節筋を含む拮抗筋群による協調制御モデルに基づいて、ハード、ソフト共にリアルな人型ロボットおよびモデルの開発を可能にしているのは本専門委員会を除いて国内外にない。

6. 今後の展開

「科学の先端での連携では良い物は生まれぬ、基礎における学問的フュージョンが鍵を握る」とは西島安則元京大総長の言葉だが、精密工学的医工連携における二関節筋は正にその典型的な例である。この二関節筋は生物進化の途

中、原始魚類が陸地への上陸を果たし原始両生類へと進化した時点で現れたものである。さらに古生代にまで目を向けるとき、数億年を背景にして現世に至るまでの進化の流れの中で一貫して生物の運動制御を支えてきた現実が見えてくる。すなわち拮抗筋制御が生体機構制御の統一理論となる予感を覚える。精密工学におけるナノテクノロジーなどにしても同じであろう。進化史的視点から、また根源的基礎の視座から生物に学び、今後の展開を考えると、壮大な夢が描けそうである。

参考文献

- 1) Kumamoto, M. et al., Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles-Mechanical engineering model analyses. Human Movement Science. **13**, (1994) 611.
- 2) 藤川智彦ら. 拮抗筋群による協調制御機能. 日本機械学会論文集 (C 編) **63**, 607, (1997) 135.
- 3) <http://www.air-dawn.net/> (すべての参考文献・資料).
- 4) 大島徹ら. 一関節筋および二関節筋を含む筋座標系における機能別実効筋力評価. 精密工学会誌 **65**, 12, (1999) 1772.
- 5) <http://www.mathforum.jp> (二関節筋機能解説資料).
- 6) 藤川智彦ら. 筋力と筋配列の違いによる霊長類の歩行形態の力学的解析. 日本機械学会論文集 (C 編) **69**, 688, (2003) 117.