

協調制御モデル

-Animal Inspired Technologies-

熊本水頼

(京都大学名誉教授)

Coordination Control Model
-Animal Inspired Technologies-
Minayori Kumamoto. (Prof. Emeritus of Kyoto Univ., Ph.D.)

We have revealed that the existence of antagonistic pair of bi-articular muscles, which is very commonly seen in all quadruped and biped animals, demonstrated perfect intermuscular coordination with two antagonistic pairs of mono-articular muscles and contributed to perform animal like smooth, rapid and precise movements without positional feedback signal from the endpoint (open loop control) and extremely stabilized postural control. A two-joint link mechanism installed with one antagonistic pair of the bi-articular actuators and two pairs of the mono-articular actuators could demonstrate perfect output force direction control with single command signal informing output force direction and could dissolve contact task which has never been dissolved in the conventional, but most sophisticated robot arm. Application of bi-articular muscle based on the coordination control model, not only to robotics, but also to biomechanics, simulation soft field and so on, augur well in future.

Key words: bi-articular muscle, out-put force control, stiffness control, trajectory control, coordination control model.

1. 緒言

そもそもロボットという言葉は Karel Capek(1920)が戯曲 R.U.Robots の中で創造した化学的人造人間に由来することは周知のことである。神話の世界から Homeros (前 8 世紀)は「イリヤス」の中で登場させ、我が国でも西行(1183)の「撰集抄」に人骨を集めて人間を創る術がでてくる。このあたりに出てくる人造人間はみなクローンの人造人間で、外見は勿論、内部構造・機能も完璧な模倣でヒト並みに動き働く。すなわち本来の語源的ロボットは無機的なギスギスした物ではなくて極めて人間的なのである。ところが機械的リンク機構を持ったロボットを作り始めたとき、外見的模倣を出なかつたために、一見自由に動くように見える各関節毎にモーターを装備させるに止まった。最新の人型ロボットもこの域を出るものではない。

ところがヒトには隣り合った二つの関節に跨って着き、両端の関節を同時に駆動できる筋、いわゆる二関節筋が存在する。解剖学的には古くから周知の筋で(C.Galen, 131-201 AD)、哺乳類から両棲類に至るまで極めて普遍的に存在し、昆虫にさえ存在する。このような二関節同時駆動モーターの概念は従来の機械工学界、ロボット工学界には未だ導入された例がない。

しかも、この二関節筋は特殊な筋ではなくて、普通の一関節筋と収縮機能特性は何ら変わらない。ただ隣接する二つの関節に跨って着き、両端の関節を同時に駆動するだけでなく、両端の関節の一関節筋群と共に見事に協調した活動をする。この協調活動によってヒトや動物特有の四肢先端に於ける出力制御・剛性制御・軌道制御に貢献している

ことが理論的、実験的に明らかになった。このことは機械工学力学体系を base とする身体運動力学体系に二関節筋座標系を新たな計算座標系として導入することを余儀なくさせる。本 Workshop は人型、動物型ロボットの運動リンク機構を始め、身体運動に関わる広範な領域に二関節筋座標系を導入する手法を探ることを目的とする。

2. 二関節筋の特徴と実効筋概念の導入

2.1 拮抗二関節筋の配置の特徴

上肢では上腕前面にある上腕二頭筋、後面にある上腕三頭筋長頭が、また下肢大腿部前面の大腿直筋、後面全部を占めるハムストリングスが拮抗二関節筋群である。これらの拮抗二関節筋が起始、付着を持つ上肢、下肢の 2 関節リンク機構の第 2 関節(肘関節或いは膝関節)は蝶番型で、基本的に屈伸運動に対応した構造である。もっとも、第 2 リンク(前腕或いは下腿)の回内・回外動作にも対応出来る構造ではあるが、リンク機構の系先端(手根関節部或いは足関節部)の 3 次元空間での自由な運動に対しては屈伸運動しかできない。しかも上肢、下肢共に拮抗二関節筋群の起始、付着は何れも狭い範囲に纏まっていて、殆どこの屈伸運動面内にあること、さらに屈伸運動面が第 1 関節周りで少々回転しても拮抗二関節筋群の起始、付着が屈伸運動面から大きく外れることはない。

このことから拮抗二関節筋は第 2 関節を含む 2 次元屈伸運動平面内の運動のためにだけ準備され、配置された筋であると極言して差し支えない。しかも日常の生活動作では上肢での押し引き、最も基本的な歩行、走行動作など、

上肢、下肢共に主要な動作は殆ど第2関節を含む2次元屈伸運動平面内で行われていることが指摘できる。

2.2 実効筋、実効筋力概念の導入

拮抗二関節筋が関わる両端の関節には拮抗一関節筋群が在り、その筋配列は複雑である。しかし、拮抗二関節筋が関わる主要動作に有効に参画できる一関節筋群は、この2次元屈伸運動平面内に在る筋或いは筋束に限られる。そこでこれらの筋或いは筋束を、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であるか伸筋であるかによって、機能別実効筋(Functionally different Effective Muscle, FEM)と定義した。図1に第1関節(肩関節:S、股関節:H)周りの拮抗一関節筋ペア(f1,e1)、第2関節(肘関節:E、膝関節:K)周りの拮抗一関節筋ペア(f2,e2)、拮抗二関節筋ペア(f3,e3)の実効筋配置を示す。

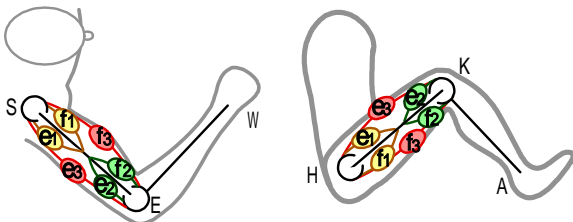


図1 上肢下肢の実効筋配置図

先に述べたように上肢、下肢共に f3,e3 は実在する拮抗二関節筋そのもので、姿勢が変化しても殆ど実効的影響は受けない。ところが拮抗一関節筋の中でも特に上肢肩関節周りの f1,e1 を構成する筋及び筋束は、肩関節の可動範囲が大きいので姿勢変化に伴って実際の筋及び筋束の構成は著しく変わる。これによって実効筋の出力にどの様に影響するかは今後の研究課題である。また第2関節については第1関節ほどの可動域はないが、第2リンクすなわち前腕或いは下腿の二関節筋群が f2,e2 に実効的に影響を及ぼすかどうか、これも今後の研究課題である。

何れにせよ、これら3対6筋の実効筋($f_i, e_i, i=1, 2, 3$)の出力を直接計測することは出来ないが、実効筋が四肢2関節リンク機構の系先端の作業座標系に発揮できる出力は計測可能である。系先端の作業座標系で計測できる実効筋出力を機能別実効筋力(Functionally different Effective Muscle Strengths: FEMS)と定義した。個々の実効筋が系先端の作業座標系に発揮できる個々の実効筋力($Ff_i, Fe_i, i=1, 2, 3$)を示したものが図2左パネルである。3対6筋の実効筋が系先端に最大出力を発揮するための協調活動パターンは理論的、実験的に求められており、それによって系先端に発揮される出力分布は幾何学的に描画可能で、

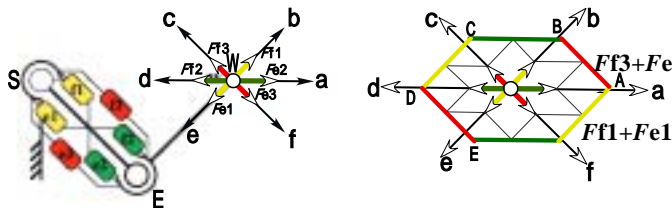


図2: 実効筋出力と作業座標系の関係(左)及び3対6筋の実効筋力による出力分布(右)

図2右パネルに示すように六角形となる[1]。

3, 出力・出力方向制御

3.1 動作筋電図学的検証

まず、二関節筋が一関節筋群と共にどのような協調活動を演じているのか、ヒトの上肢を対象に、動作筋電図学的な検証を行った。被験筋として上肢二関節筋の拮抗するペアとして上腕二頭筋長頭(Blo)および上腕三頭筋長頭(Tlo)、肩関節屈曲一関節筋として三角筋前部(Da)および大胸筋鎖骨部(Pc)、これに拮抗する肩関節伸展一関節筋として三角筋後部(Ds)および大円筋(Tm)、さらに肘関節屈曲・伸展一関節筋ペアとして上腕筋(Br)および上腕三頭筋外側頭(Tla)の拮抗筋群を選び、肘関節をほぼ直角に曲げた姿勢で、手根関節部位に等尺的に最大努力で、360°全方位に亘って力を発揮させた(図3)。

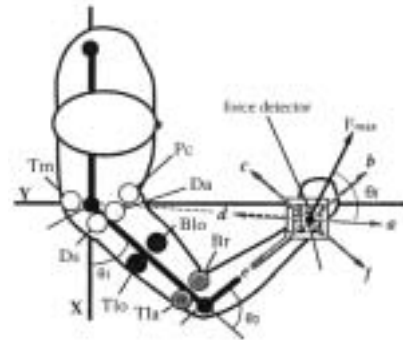


図3 被験筋および実験姿勢

Fig. 3. Muscles tested and postural condition.

Upper body of the subject was tightly fixed on an iron frame and the wrist joint was fixed to a force detector attached on the frame. Abbreviations of muscle name, see in the text.

この間、通常の皮膚表面電極誘導法によって前記8筋より筋放電を記録した。8名の被験者について、それぞれ上肢をやや屈曲した姿勢、肩関節角度約45°肘関節角度約90°、及びやや伸展した姿勢で記録した筋電図は全て殆ど同様な放電パターンを示していた。また、電極貼付位置は変えていないに拘わらず、水平面動作でも矢状面動作でも筋電図所見に殆ど差違は認められなかった。水平面動作中の筋電図の代表例を示したものが図4である。

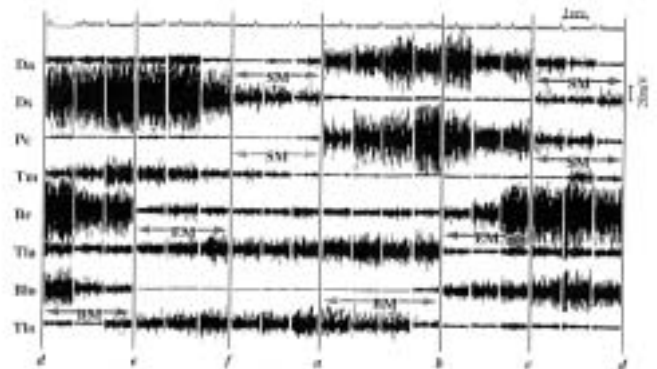


図4 筋電図記録の代表例

Fig.4 A representative example of raw EMG recordings.

Output force direction, a-f, are the same as shown in Fig.1. Detailed explanations, see in the text. .

図4において拮抗筋相互の間で、ある出力方向の間は一方の筋がフル活動をしているのに他方の拮抗筋には殆ど放電が認められないこと、また、拮抗二関節筋の Blo, Tlo は方向 $a-b$ 及び $d-e$ の間で、肘関節拮抗一関節筋の Tla, Br は方向 $b-c$ 及び $e-f$ の間で、肩関節拮抗一関節筋の Da, Ds 及び Pc, Tm は共に方向 $c-d$ 及び $f-a$ の間で活動レベルを交替していることが認められた。

この傾向を明確にするために上記拮抗筋群の筋放電の積分値を求め、百分率表示し、8名の被験者のそれぞれ異なった3つの姿勢に於ける全記録を、殆ど同様な放電様相であったので重複描記したのが図5である。

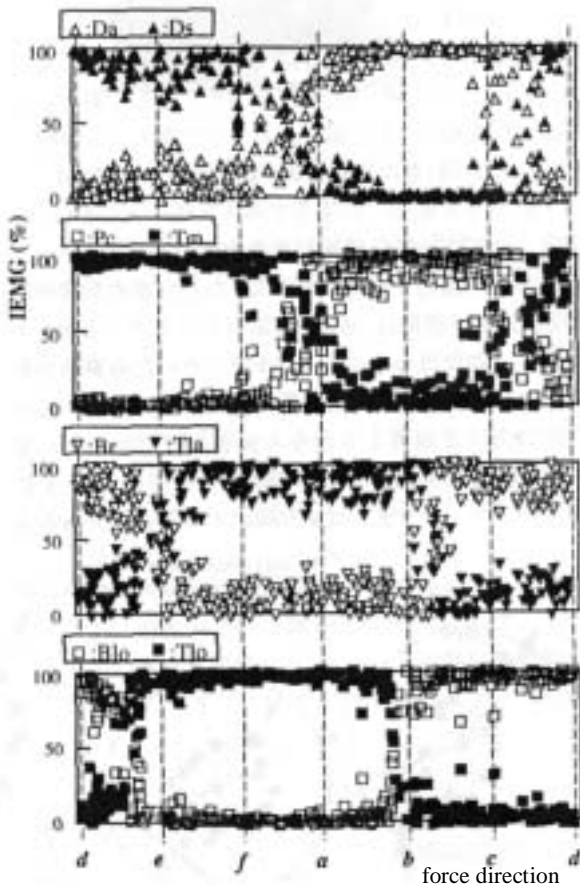


図5 積分筋電図 (IEMG)
Fig. 5. IEMG.

All IEMG recordings of all subjects, regardless of their postural changes, were superimposed. Force directional rages were normalized. Ordinate: IEMG in %, abscissa: output force direction.

この図において、各拮抗筋ペアはそれぞれ特定の出力方向領域でその放電活動レベルを交代し、2巡して 360° をカバーしていることが判る。

3.2 筋骨格系モデルによる理論的検証

ヒト四肢の筋配列は複雑であるが、先に述べたように拮抗二関節筋の配置の特徴から実効筋概念を導入することによって四肢運動リンク機構は拮抗二関節筋を含む3対6筋

のアクチュエータ配列を持つ機械的リンク機構としてモデル化が可能となる(図6)。

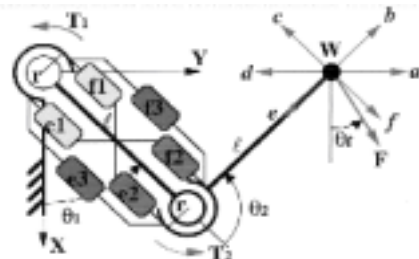


図6. 機械的二関節リンク機構モデル

Fig.6 Mechanical two-joint link model.

Complex muscle arrangement of human extremities could be simplified into 3 antagonistic pairs, 6 muscles based on the concept of "Functionally different Effective Muscular Strengths" (FEMS).

その系先端に、全方位に亘って最大出力を発揮出来るための各筋の出力レベルを理論的に求めた。その結果を示したものが図7である。筋電図所見(図4)と極めて類似した結果が得られた。

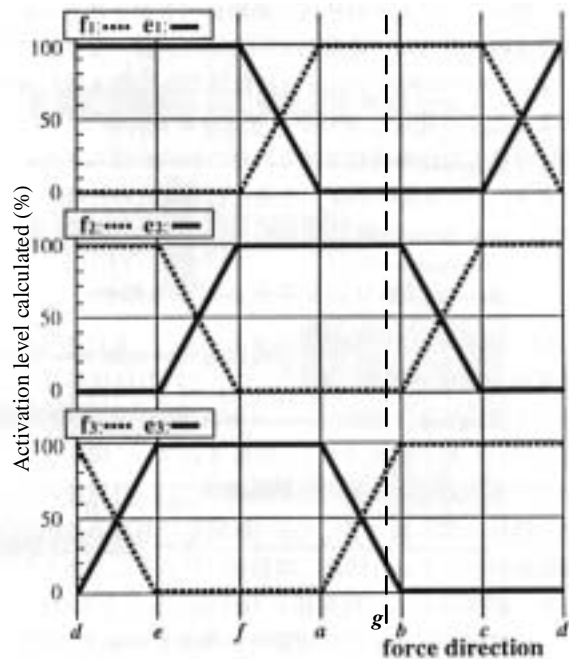


図7 図4の系先端(W)に全方位に亘って最大出力が発揮出来るための各actuator活動レベルの理論的計算値。

Fig.7 Theoretically calculated activation level of every actuators to develop the maximum output forces in all round direction, 360° , at the endpoint W shown in Fig. 4.

3.3 ロボットアームによる実験的検証

次に、空気圧制御ゴム人工筋を使って二関節筋を含む3対6筋の拮抗筋群を装備したロボットアームを制作した。

この図8に示すロボットアームの各人工筋を図7に示す活動レベルによって駆動したところ、 360° の全方位に亘って完璧に出力方向制御を行っていることが検証できた(図9)。

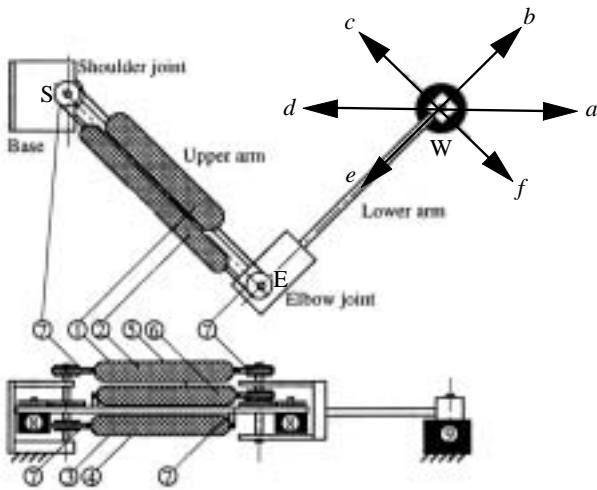


図8 実験的解析用ロボットアーム

Fig. 8. Robot arm employed for experimental analysis

- :Bi-articular actuator f3 :Sprocket and chain
- :Bi-articular actuator e3 :Rotary encoder
- :Mono-articular actuator f1 :Load cell and
- :Mono-articular actuator e1 Position sensor
- :Mono-articular actuator f2
- :Mono-articular actuator e2

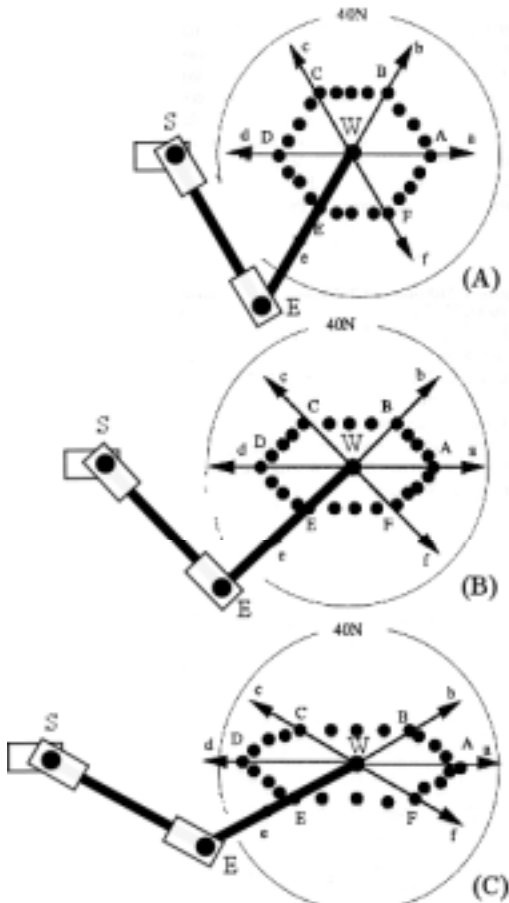


図9 ロボットアーム系先端出力分布図

Fig. 9. Output force distribution developed at the endpoint of the robot arm.

- (A) : $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=120^\circ$
- (B) : $\theta_1=45^\circ$, $\theta_2=90^\circ$
- (C) : $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=60^\circ$

すなわち、ヒトでは四肢の3対6筋に実効的に配置された拮抗筋群の協調した活動によって出力・出力方向制御を行っているのである [1]。我々はこれを「協調制御モデル」(Coordination Control Model)と提唱している。

ヒト四肢のリンク機構モデルについて、E. Bizzi, N. HoganらのグループはEquilibrium Point Control Modelを提唱している[2]。しかしながら彼等のモデルでは全方位に亘る出力方向制御、さらには、後述するように、脊髄レベルでの神経筋支配様式を当て嵌めて単一の入力信号で拮抗筋群の協調活動を再現することは殆ど不可能に近い。

3.4 神経回路網の提案とその工学的応用

図4に示す拮抗筋群の協調活動様相は、図10に示す脊髄レベルの神経回路網で再現可能である。上部に描かれたスイッチボードは上位中枢からの出力方向 command を具象化したものである。この場合、a方向とb方向の間で筋活動レベルを交替しているのが拮抗二関節筋のためのものである。このスイッチボードを3個それぞれ60°回転して1つに纏めるとき、出力方向を示す単一の入力信号で3対6筋の協調活動を再現可能とすることが示された[1]。

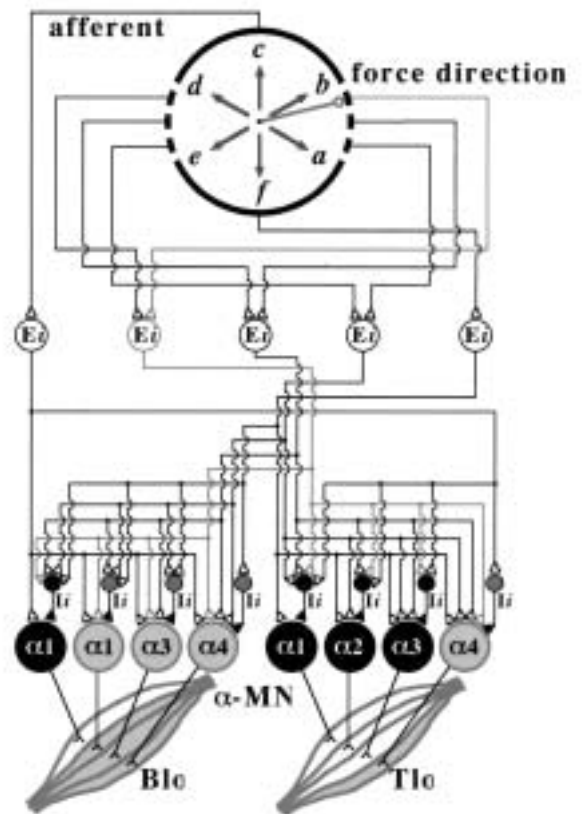


図10. 図2の筋放電パターンを再現できる脊髄レベル神経回路網

Fig.10. Neural network proposed at a spinal level to reproduce the EMG pattern shown in Fig. 2.

Ei:Excitatory interneuron, Ii:Inhibitory interneuron.

1-4: -Motoneuron; at least 4 motor units are enough to reproduce alternation of activity levels of antagonistic muscles.

B10:Biceps brachii long head, T10:Triceps brachii long head.

このことは脊髄レベルで歩行、走行の如き基本的な運動の支配中枢を十分に可能とし、昆虫の小さな神経節でも単独の脚の自由支配を可能に出来る構造的・機能的背景をなすものと考えられる。

このような神経回路網は、極めて簡単な電気回路で代替可能である(図11)。図11の矢印で示されたスイッチの位置 g は図7に破線 g で示された拮抗アクチュエータ群の駆動レベルを示している。この程度の電気回路はPC上でも簡単に組めるのでロボットへの応用を容易にする。我々の協力企業の一つは既に二関節アクチュエータ装備協調制御基本アームを製作し、この制御器が支障なく順調に作動することを検証済みである。

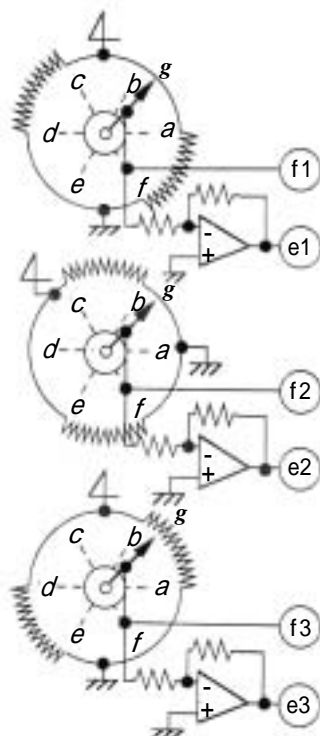


図11 出力方向制御器

Fig.11. Output force direction controller. Each potentiometer is equivalent to the neural network shown in Fig.10. When three actuators are rotated 60° each from the other and are built in one apparatus, only single command signal informing output force direction could reproduce perfectly coordinating activity pattern of 3 pairs, 6 actuators as shown in 7. A switch position showed by arrow g , could reproduce the activity pattern of 3 antagonistic pairs, six actuators which is indicated by the broken line as shown in Fig. 7.

4 , 剛性制御

二関節リンク機構の系先端の剛性の楕円は長軸、短軸、傾斜の3要素で制御できる。拮抗二関節筋の存在は他の2対の一関節拮抗筋群と共に系先端の剛性の楕円の制御に貢献していることが理論的に、かつ図8のロボットアームを使って実験的に確かめられた[3,4]。さらに図12に示すように、モデルの系先端に外力が加えられたとき、二関節筋が

なくて一関節筋だけのモデルの場合、剛性の楕円は形を変えているが、二関節筋が装備されたモデルでは剛性の楕円の形状に変化は起こらなかった。すなわち、如何なる外部擾乱にも、卓越して安定した姿勢制御を可能としているのである。(この図12では描線の重複を避けるため剛性の逆数、コンプライアンスで描いてある)

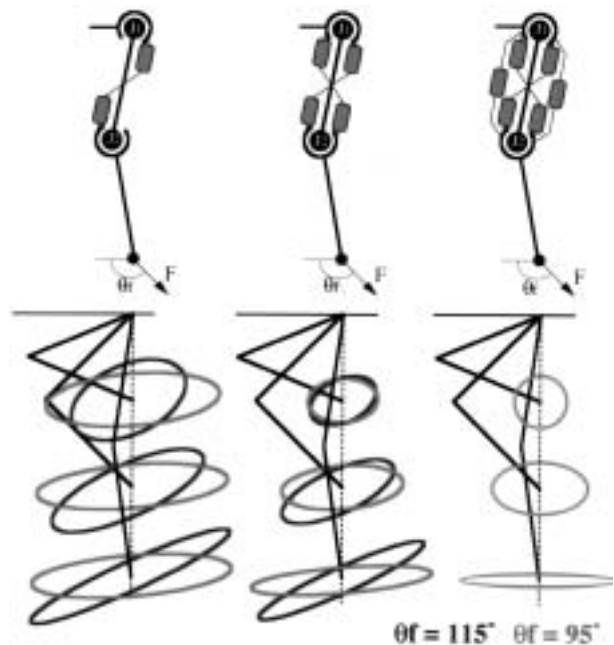


図.12. 二関節筋の有無が系先端剛性に及ぼす影響
Fig.12. Effects of existence of bi-articular muscles on stiffness of the two-joint link mechanism. Stiffness ellipse was drawn by its reciprocal, compliance, to avoid overlapping of lines.

5 , 軌道制御(力と変位の関係)

二関節リンク機構の系先端に加えられた力と変位の関係も、系先端の剛性の楕円から論じることが出来る。すなわち拮抗二関節筋の存在が他の2対の拮抗一関節筋群と共に系先端の軌道制御に貢献し、動物界では Contact task は問題にならないのである[3,4]。

図8のロボットアームを使い、リンク機構の先端に様々な方向から外力を加えた場合の系先端の変異を、理論的、実験的に詳細に調べた。その結果を示したのが図13である。

パネルAは2対の拮抗一関節筋群と共に1対の拮抗二関節筋が存在するモデルの場合であるが、外力を加えた方向と、系先端の変異の方向は理論値に対して実験値がほぼ一致していることが判る。それに対してパネルBは拮抗二関節筋を欠き、2対の拮抗一関節筋のみが装備されたモデルの場合である。理論値と実験値は大きく所定方向から外れていた。この場合系先端からの位置の情報をフィードバックして軌道修正を行う必要が生ずるのである。これに対して二関節筋の存在は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で素早い動作を可能としている。

ヒトや動物が情報の伝達、処理演算機能の致命的遅延を

補って、open loop 制御で素早く正確な動作で生き延びてきたのは二関節筋の存在に負うところが大きいと考えられる。

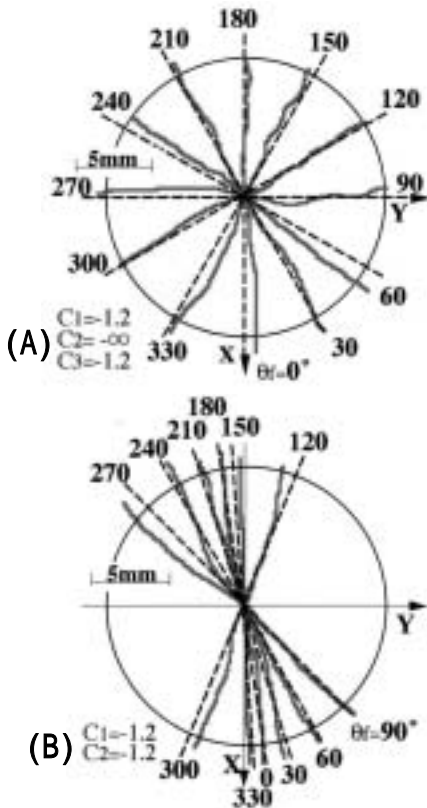


図13 二関節筋の有無が系先端の軌道制御に及ぼす影響

Fig.13. Effects of existence of bi-articular muscle on trajectory control of the endpoint of the two-joint link mechanism.

A: with bi-articular muscle.
B: without bi-articular muscle.

-- Simulation
— Robot arm

Detailed explanation, see in the text.

詳細な実験結果[4]の他にも、線形弾性バネを使って簡単な協調制御モデルを作り Contact task 実験を行ってみた(図14)。

このモデルの系先端部 W を滑らかな床面に着け、基底部 S を床面の方向に押しつけてみた。図 14 に示すように、二関節バネを装備したモデル A では先端部 W の位置は変化しなかったが、二関節バネを欠き、一関節バネのみのモデル B では基底部 S を押しつけるに従って先端部 W の位置は W W' W'' と遷移した。単純な線形弾性バネでも協調制御モデルでは Contact task が解消されることが実験的に証明された[5]。

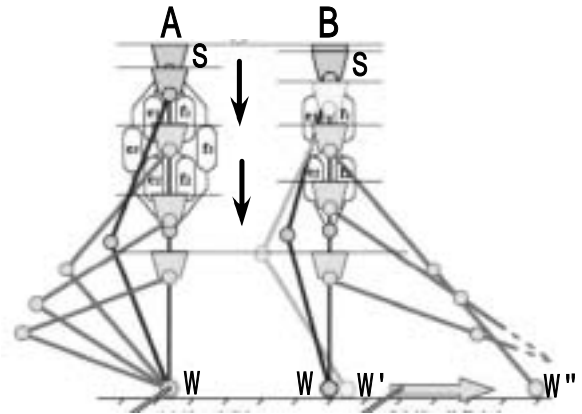


図14. Contact task 実験

Fig.14. Contact task experiment.

A: Coordination Control Model equipped with one antagonistic pair of bi-articular springs as well as two antagonistic pairs of mono-articular springs.

B: Joint coordinate system model equipped with only two antagonistic pairs of mono-articular springs, without bi-articular springs.

When the basement S was pushed down to the endpoint W, no change in contact point occurred in model A, whereas, contact point sifted away from the original position, W W' W'', in model B.

6, 総括論議及び将来展望

動物特有の絶妙な運動制御が拮抗二関節筋と拮抗一関節筋群の協調活動に由来することが明らかになると、この協調制御モデルは人型或いは動物型ロボットの基盤技術として革新的展望を開くに止まらず、身体運動に関わる広範な領域に革新的概念導入を余儀なくする。現在、研究開発が急がれる問題点について具体的論議を試みる。

6-1、“一発制御”

拮抗二関節筋が装備された協調制御モデルでは単一の入力信号で全方位に亘って任意の方向に出力出来る。我々はこれを“一発制御”と称しているが、これは高速演算処理機能で解決出来る問題ではない。手、hand は大脳皮質直接支配で、哺乳類だけが任意の制御を可能としており、高速演算処理機能が威力を発揮出来る部位である。これに対して手根関節部から肩関節に至るリンク機構の筋配列は哺乳類から鳥類、爬虫類、両生類に至るまで基本構造を斉しくしており、脊髄レベルでの単純な神経回路網を介して一発制御を可能としている。昆虫の小さな神経節でも高速演算処理を回避して一発制御の可能性を見いだしたのが協調制御モデルで、自然の知恵の結晶である。

6-2、協調制御モデルに基づく基本モデルアームの開発

現在協力企業の一つ沖電気工業グループが prototype の開発を進めているが、所謂一発制御を可能とすることが確認され、出力制御、剛性制御等の評価実験結果も協調制御モデル理論の正当性を裏付けるものとなっている。

このモデルの実用化は4脚極限環境作業ロボット、4脚搭乗型移動ロボット、Master-Slave 手術支援ロボット、福祉介護ロボット等が適していると考えている。

また基本モデルアームはリンク運動単位(Link Motor Unit, LMU)としてモジュール化することが可能と考えてお

り、実用化の開発研究が望まれる。

6-3、ヒューマンインターフェイスと協調制御モデル

医療福祉支援ロボットのようにヒトと直接関わるロボットの出力特性は重要であるが、特に Master-Slave 手術支援ロボットなどは出力・出力方向制御機能特性を重要視する必要がある。すなわち図 9 に示すように協調制御モデルでは系先端出力分布は六角形を示す。ヒトの四肢先端出力分布も六角形に近似されることが報告されている[6]。ところが現行の従来型関節座標系ロボットの系先端出力分布は4角形であってヒトの四肢先端出力分布とは異なるのである。系先端で精緻な作業が要求されるような状況下では Master 側と Slave 側の系先端出力特性が一致することが望ましいのは当然で、協調制御モデルの適用が望まれる所以である。

6-4、六角形出力分布の特異性

3対6筋の拮抗筋群から構成される協調制御モデルが系先端の作業座標系に描く出力分布は図 15 に示すように六角形となる。この六角形の辺 A-B, D=E は上腕に平行でありその長さは拮抗二関節筋 f_3, e_3 の出力の和に等しい。辺 B-C, E-F 歯肩関節 S と手根関節部 W を結ぶ線に平行で、その長さは肘関節拮抗一関節筋 f_2, e_2 の出力の和に等しい。また辺 C-D, F-A は前腕に平行で、その長さは肩関節拮抗一関節筋 f_1, e_1 の出力の和に等しい。この特徴を利用すると実行筋力の計測を可能とする[7]。

ところがこの時、図 15 に示すように六角形の出力分布図から ($f_i, e_i: i=1, 2, 3$) の組み合わせを求めようとすると無限の解があることが判る。このことはヒトや動物では仮令1つの筋が deteriorate しても他の筋の出力調整で全体の出力特性を保つことが可能であることを示している。ヒトや動物の高い順応性を示すものである。

協調制御型ロボットであれば、1つのモーターが故障して出力低下しても他のモーターの出力調整で全体の出力分布特性は維持出来ることを示す。極限環境作業ロボットなどに適した特性である。従来型関節座標系ロボットには期待出来ない特性である。

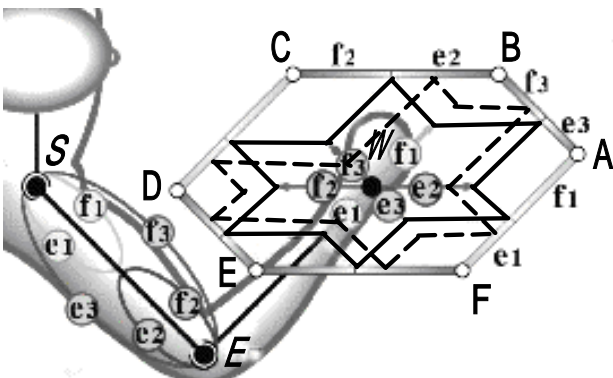


図15 出力分布の特徴
Fig.15. Unique characteristics of output force distribution.

6-5、協調制御モデルに基づく Human Simulation Model 開発

現行の Simulation Model は市販のものも、政府主導で研究開発中のものも含めて全て Motion Capture Base である。これはロボット工学界の人型ロボット開発の軌跡と同じであって、外観的模倣の域を脱していない。すなわち二関節筋の存在を無視した関節座標系モデルであって、ヒトの四肢先端出力特性を再現することは不可能である。

我々は既に(株)計算力学研究センターの協力を得て協調制御モデルに基づいて、3対6筋の実効筋力評価を可能とした解析プログラム、FEMS program ver.1.5 を開発し、臨床検証実験を進めている。さらにこの program をベースにして Motivation base Simulation Program を開発中である。

6-6、協調制御モデルに基づく Human-friendly Design 開発

現行の Ergonomics Design は人体形態計測データベース、作業領域データに基づくに止まり、四肢出力特性を反映出来ていない。図 16 は姿勢変化に伴う上肢出力分布の変化を示しているが、このような出力特性資料を生活機器・環境設計、機器操作環境設計、車両運転環境設計などに適用することが可能となっている。協調制御理論に基づいた HF Design を進めているが、この分野でも協力企業の1つは目覚ましい成果を挙げつつある。



図16 姿勢変化に伴う出力分布の変化

6-7、リハビリ力学体系、スポーツ力学体系の再構築

身体運動力学体系は機械工学力学体系を導入して解析が進められ、理論体系が構築されてきた。二関節筋の存在は無視され、関節トルクの計測に基づくより他、手立てのない状態にある。日常生活レベルの出力状況下では何ら問題は起こり得ないし、現実には起こっていない。しかし極限に近い患者のリハビリ現場、トップクラスの選手の出力解析には従来の運動学は役に立たない。Motion capture のデータを従来方式の reverse dynamics で解析するとき二関節筋は計算座標系に組みこまれていない。拮抗二関節筋を強力に使っている現実の身体運動と齟齬を起こしても当然であ

る。幸か不幸か顕著な差とならないところに、寧ろ問題が起き得る。図 17 に矛盾点を示してみた。

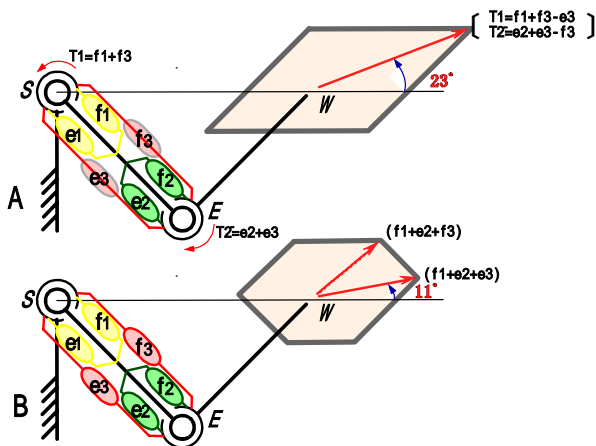


図17 人体出力を関節座標系として計算した場合の矛盾点
A:関節座標系 B:二関節筋座標系

6-8、神経生理学領域、人類学領域などへの適用

図 4 の筋電図所見や図 10 の神経回路網の可能性は、従来の stereotype な I-a pathway の概念、それに関連する脊髄反射の問題などは、負荷環境条件を変えながら協調制御モデルに基づいて精査し直す必要性を示唆するものである。

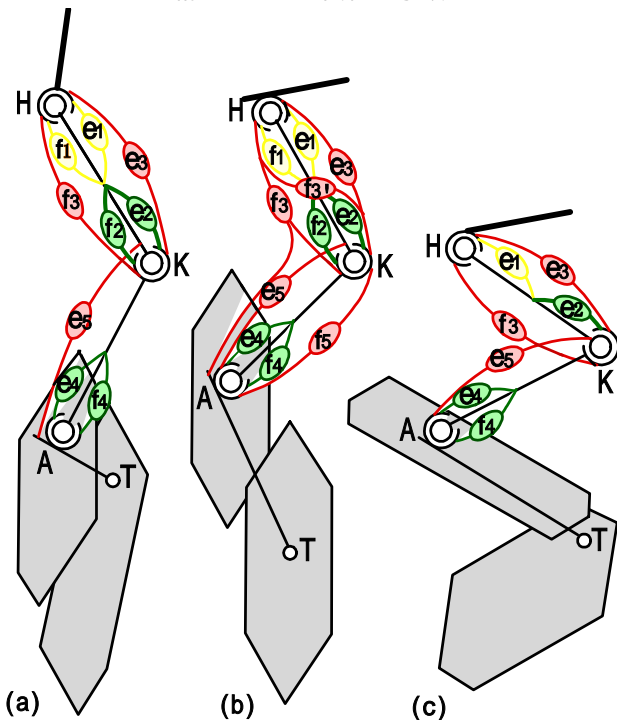


図18 動物の筋配列の特徴

- (a) 霊長類、ヒトから原猿に至るまで同じ筋配列
- (b) 有蹄類、イヌ、ネコ類、f2の分枝が特徴的
- (c) 両生類、f1, f2, f5を欠く

霊長類の筋配列を協調制御理論から整理解析するとき彼等の生活行動様式に密接に関連していることが判ってきた[8]。協調制御モデルの根源を探り、自然に学ぶ手懸かりを示唆している。

6-9、協調制御の概念

二関節筋の存在自体が、当然のことながら隣り合った関

節の拘束条件であり、見た目に自由に動く生体のリンク運動解析に適用されてきた自由度の概念を否定するものである。実際、生体では単独に自由に運動できる関節はほとんど皆無と言って良いだろう。協調制御モデルの概念はリンク運動機構に適用されるに止まらず、生体の四肢間、体節間、さらには四肢 体節間などに適用して、最小の command signal で生体全体の協調制御を全うする基本概念となり得ると考えている。

謝辞

ここに述べた研究成果はほとんど富山県立大学工学部大島徹を首班とする研究グループおよび富山商船高専藤川智彦らの努力の結晶である。さらに東京電機大斎藤研究室、沖電気工業、計算力学研究センターおよび本田技術研究所のグループによる研究開発成果によって多大の勇気を鼓舞されていることを特に記して謝意を表す。

主要文献

- [1] 藤川智彦、大島徹、熊本水頼、横井信安．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巻, 607号 pp769 - 776、1997．
- [2] J.McIntyre and E.Bizzi: “#Servo hypotheses for the biological control of movement.” J. of Motor Behavior. Vol. 25-3, pp193-202, 1993.
- [3] M.Kumamoto, T.Oshima and T.Yamamoto: “ Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles-Mechanical engineering model analyses.” Human Movement Science, Vol.13, 611-634, 1994.
- [4]大島徹、藤川智彦、熊本水頼．一関節筋および二関節筋を含む筋座標系によるロボットアームの機能的特性．筋の収縮力とロボットアームの粘弾性．精密工学会誌、.66巻, 1号, pp141-146, 2000．
- [5] Fujikawa, T. et al. Proposal of A Human-like Two-joint Link Mechanism Provided with the Bi-articular and the Mono-articular Actuators. Part 2: Trajectory Control : Contact Task was dissolved.. Mechatronics '01, 5th Franco - Japanese Congress, Besançon (France), October 9-11, 2001.
- [6] 大島徹、藤川智彦、熊本水頼．一関節筋および二関節筋を含む筋座標系によるロボットアームの機能的特性．筋力と四肢先端の出力．精密工学会誌、.65巻, 12号, pp1772-1777, 1999．
- [7] 大島徹、藤川智彦、熊本水頼．一関節筋および二関節筋を含む筋座標系によるロボットアームの機能的特性．出力分布の簡便な測定法．精密工学会誌、.67巻,6号, pp944-948, 2001．
- [8]藤川智彦、中務真人、大島徹、熊本水頼．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巻、688号、pp117-122、2003．