

UDC 62-231.221.23: 62-503.2.
612 766.2

不安定リンク機構の姿勢制御

村上 公 克

多自由度不安定リンク機構の姿勢を自動的に制御する方法について理論的解析を試み、さらに1ないし2自由度の場合に関するモデル実験を行ない、理論通りに、位相進み回路を挿入することによって、制御が可能であることを実証した。一方、人間も不安定リンク機構の一部とみなし、その姿勢制御に関する従来の研究を展望し、かつ筆者自身の考え方にもとづいて、筋電図による実験を行なった。

1. ま え が き

今日における工業文明の高度の発展によって、われわれ人間の生活環境は著しく改善されるに至ったが、その反面、生活の規格化、人間疎外、公害などというゆゆしい問題が発生しつつあるのも無視することはできない。

すでに40年程以前に、フランスの生理学者アレキシス・カレルは「人間は、人間を知らずして今日の文明を作りあげた。したがって、そのような文明は人間にとって有害である」という痛烈な文明批判を行なっているが、このような見地に立って、本格的に問題に対処しようという動きが見えはじめたのは、第二次大戦以後のことである。すなわち、人間と機械との関係をより密接なものにしようという目的のもとに誕生した「人間工学」(Human Engineering, 英国では Ergonomics) が、その主流をなす。しかし、人間工学は、その性格上、機械側からみた人間、機械を操縦する人間を研究対象とする場合が多い。

人間に適した生活環境、人間の操縦しやすい機械をつくりあげるためには、これまで以上に人間自体の特性を見極めるのでなければ、本当の意味での「人間工学」は成り立ち得ないと筆者は思う。

また人間を総合的に研究する学問は現在のところあまり見受けられないが、工学的な立場からみた人間研究は、その意味で将来に大きな期待がかけられるものである。

「人間機械工学」——人間を工学的センスで研究する学問という意味で、かりに、このように呼ぶことにするが、その内容としては、人体構築の材料力学、機械力学的研究(人工内臓はその一部)、循環器系の流体力学的研究、ホメオスタシスをはじめとする各種の自動制御機構の総合的研究などが含まれる。

とくに、人体の自動制御機構に関する研究は非常に立遅れており、これが、カレルをして「現代文明が人間にとって、有害だ」と言わしめた最大の原因になっているものと思う。筆者が、「不安定リンク機構の姿勢制御」というテーマを選んだのも、ただ単に不安定なものを自動的に直立させようという動機によるのではなく、「一体、人間はいかにして直立歩行が可能なのか」という素朴な疑問にすら十分に答えられない現状に強い不満を抱

いたからである。しかし、いざとりかかろうとすると、事態はそれほど簡単ではないことに気づく。筆者の最初の目的は、『直立の条件、すなわち、不安定リンク機構が直立するには、どの程度の制御が必要か』を追求することにあつたのだが、かんじんの対象(人間が主体)の制御機構がほとんどわかっておらず、筆者の試作したモデルとの比較実験を行なうには、あまりにもほど遠いことが判明したので、当初の目的を十分に達成したとは言い難い。しかし人間やその他の2足動物も含めて不安定リンク機構という概念を打出し、それに関する基礎的な研究を行なうことは決して無駄にはならないと確信する。

そこでまず、ここでは、不安定リンク機構の最も基本的な例として、2自由度の場合の理論的解析とその実験を取り上げ、ついで、多自由度不安定リンク機構としての人間に関する姿勢制御の実際を述べることにする。

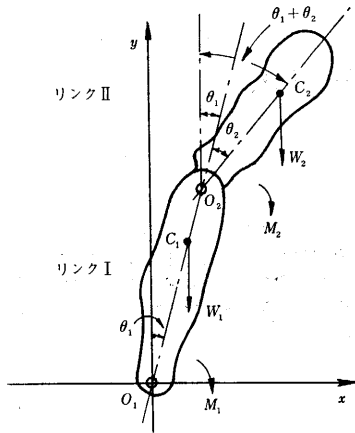
2. 定義および理論的解析

機構学においては、機素(機械を構成する個々の部分品)が互に対偶(二つの機素が相接して相互に運動する場合を言う)をなして、つぎつぎとつながり、その最後の機素が、また最初の機素と対偶をなすように環状につながったものを連鎖と名付け、その一つ一つの機素をリンクと言う。したがって、連鎖を構成するリンクには必ず二つ以上の対偶があることになるが、ここで取り扱う不安定リンク機構は、最後の機素がこの条件を満足しない。すなわち、最後の機素の一端は隣接する機素と対偶をなすが、他方は自由端である。しかし、その他の点では、全く上述の定義に適合しているので、この場合の最後の機素もリンクとみなすことにする。

このように定義されたリンク機構が、図・1のような状態にあるときには静的不安定となる。したがって、目的になつた姿勢(直立その他)を保持するためには制御が必要であるが、このような系の制御可能性については、すでに Liapunov や Kalman らの安定問題に関する理論を適用することによって証明されている。

ここでは、モデル実験に使用した2自由度系の安定問題を根軌跡法にしたがって述べることにする。

まず、図・1に示されるような2自由度系の運動方程式を求め、 $\theta_1 = \theta_{i1} + \varphi_1$, $\theta_2 = \theta_{i2} + \varphi_2$ (ただし、 $\varphi_1, \varphi_2 \ll 1$,



図・1 2自由度倒立実体振り子

θ_{i1}, θ_{i2} は任意の定数) なる場合の線形近似を行なうと、

$$\alpha_{11}\ddot{\phi}_1 - \beta_{11}\phi_1 + \alpha_{12}\ddot{\phi}_2 - \beta_{12}\phi_2 = M_1 - M_2 + \delta_1 \quad (1)$$

$$\alpha_{21}\ddot{\phi}_1 - \beta_{21}\phi_1 + \alpha_{22}\ddot{\phi}_2 - \beta_{22}\phi_2 = M_2 + \delta_2 \quad (2)$$

となる。ただし、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{11} &= I_1 + I_2 + (W_1/g)a_1^2 + (W_2/g)(l_1^2 + 2l_1a_2 \cos \theta_{i2} + a_2^2) \\ \alpha_{12} &= \alpha_{21} = I_2 + (W_2/g)(a_2^2 + l_1a_2 \cos \theta_{i2}) \\ \alpha_{22} &= I_2 + (W_2/g)a_2^2 \\ \beta_{11} &= (W_1a_1 + W_2l_1) \cos \theta_{i1} + W_2a_2 \cos(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ \beta_{12} &= \beta_{21} = \beta_{22} = W_2a_2 \cos(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ \delta_1 &= (W_1a_1 + W_2l_1) \sin \theta_{i1} + W_2a_2 \sin(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ \delta_2 &= W_2a_2 \sin(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \end{aligned} \right\} (3)$$

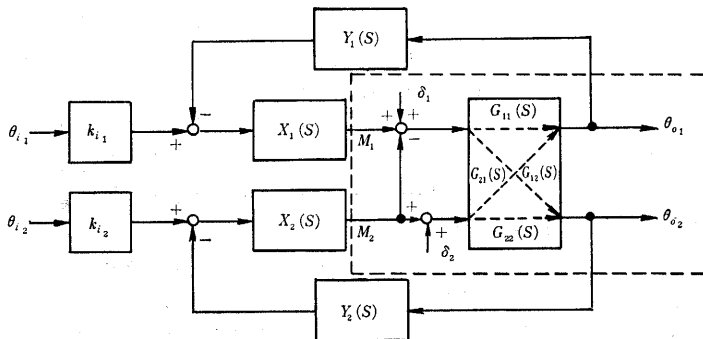
W_1, W_2 : それぞれ剛体 (リンク) I, II の重量
 M_1, M_2 : それぞれ I, II に作用するモーメント
 I_1, I_2 : それぞれ重心 C_1, C_2 まわりの慣性モーメント

$$\overline{O_1O_2} = l_1, \quad \overline{O_1C_1} = a_1, \quad \overline{O_2C_2} = a_2.$$

(1), (2) から制御対象の伝達関数を求めると (図・2 の点線でかこまれた部分が制御対象に関するブロック線図)

$$G_{11}(S) = (\alpha_{22}S^2 - \beta_{22})/|A| \quad (4)$$

$$G_{21}(S) = -(\alpha_{12}S^2 - \beta_{12})/|A| \quad (5)$$



図・2 2自由度制御系

$$G_{12}(S) = -(\alpha_{21}S^2 - \beta_{21})/|A| \quad (6)$$

$$G_{22}(S) = (\alpha_{11}S^2 - \beta_{11})/|A| \quad (7)$$

ただし、

$$|A| = (\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2)S^4 - (\alpha_{11}\beta_{22} + \alpha_{22}\beta_{11} - 2\alpha_{12}\beta_{12})S^2 + (\beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}^2) \quad (8)$$

この系の安定化をはかるために、図・2 のような制御系を考え、 $X_1(S) = k_1(T_1S + 1)$, $X_2(S) = k_2(T_2S + 1)$, $Y_1(S) = k_{01}$, $Y_2(S) = k_{02}$ として、制御系全体の伝達関数を求めると、

$$D_{11}(S) = k_1k_1(\alpha_{22}S^2 + K_2T_2S + K_2 - \beta_{22})(T_1S + 1)/|A| \cdot |D| \quad (9)$$

$$D_{21}(S) = -k_{i2}k_2\{(\alpha_{12} + \alpha_{22})S^2 - (\beta_{12} + \beta_{22})\}(T_2S + 1)/|A| \cdot |D| \quad (10)$$

$$D_{12}(S) = -k_{i1}k_1(\alpha_{21}S^2 - \beta_{21})(T_1S + 1)/|A| \cdot |D| \quad (11)$$

$$D_{22}(S) = k_{i2}k_2\{(\alpha_{11} + \alpha_{21})S^2 + K_1T_1S + K_1 - (\beta_{11} + \beta_{21})\}(T_2S + 1)/|A| \cdot |D| \quad (12)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} |D| &= 1 + (A_1S^3 + A_2S^2 + A_3S + A_4)/|A| \\ A_1 &= K_1T_1\alpha_{22} + K_2T_2(\alpha_{11} + \alpha_{21}) \\ A_2 &= K_1K_2T_1T_2 + K_1\alpha_{22} + K_2(\alpha_{11} + \alpha_{21}) \\ A_3 &= K_1K_2(T_1 + T_2) - K_1T_1\beta_{22} - K_2T_2(\beta_{11} + \beta_{21}) \\ A_4 &= K_1K_2 - K_1\beta_{22} - K_2(\beta_{11} + \beta_{21}) \\ K_1 &= k_1k_{01}, \quad K_2 = k_2k_{02} \end{aligned} \right\} (13)$$

(9)~(12) の特性方程式 $|D|=0$ を

$$1 + K \cdot (Q_1S^3 + Q_2S^2 + Q_3S + 1)/|A| = 0 \quad (14)$$

なる形に変形し、 Q_1, Q_2, Q_3 に適当な数値を与えると (13) より、 $A_1/A_4, A_2/A_4, A_3/A_4$ が一定となるので、 K_1, K_2, T_1, T_2 は、見掛けの一巡伝達ゲイン $K (= A_4)$ の関数として与えられる。そこで、上述の系について

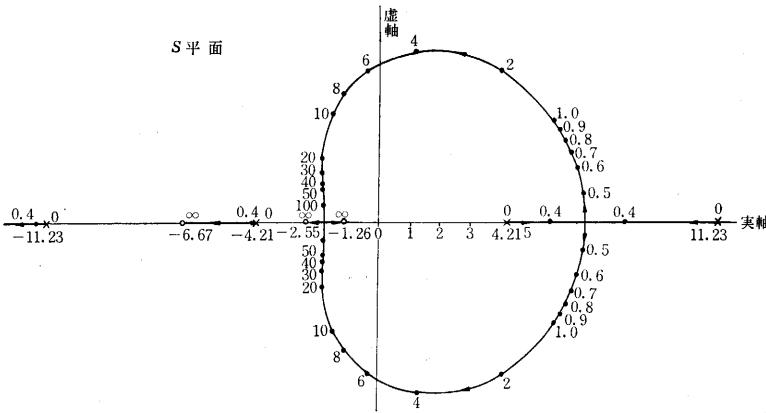
(イ) 具体的な例についての根軌跡と、それに対応する各補償要素のゲイン (K_1, K_2)、時定数 (T_1, T_2) の特性曲線を求めて、系の動特性を調べ、また

(ロ) (K_1, K_2, T_1, T_2) の一変数のみを変動させた場合の過渡応答特性と

(ハ) (K_1, K_2, T_1, T_2) を固定し、制御対象に課する

設定値 θ_{i1}, θ_{i2} を変化させた場合の過渡応答特性を根軌跡によって調べる。なお、ここで用いる (3) の数値は、モデル実験に使われた装置の寸法から決定したものである。

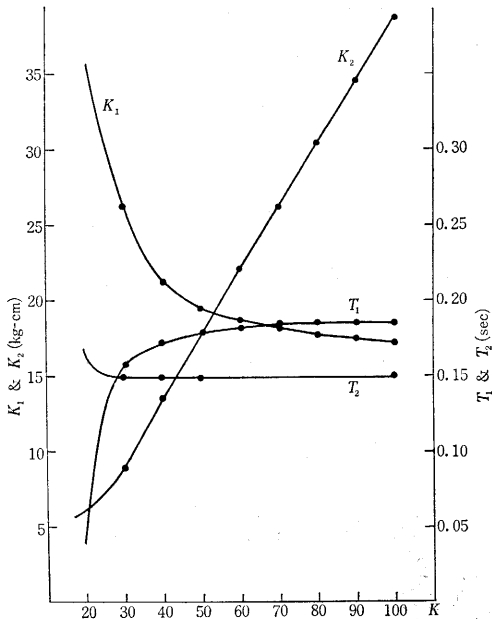
まず、(イ) の場合、(14) の (Q_1, Q_2, Q_3) の値によって決定される根軌跡のパターンは無数にあるが、ここでは、代表的な一例として、 $Q_1=0.047, Q_2=0.489, Q_3=1.335$ なる場合を採用する。そのときの根軌跡は、図・3 によって与えられ、また K に対応する (K_1, K_2, T_1, T_2) の特性曲



図・3 $1 + K \frac{(0.047 S^3 + 0.489 S^2 + 1.335 S + 1)}{0.01 S^4 - 1.383 S^2 + 21.527} = 0$ の根軌跡

図・5 から、 T_1 または T_2 のみを変化させた場合の制御系は、それらの変数が小さくなるにつれて不安定の傾向を示し、 K_1 または K_2 のみを変化させたときには、その値の増加とともに振動性を増し、減衰性もわずかに増加することがわかる。

一方、図・6 は、 $K_1=28$ (kg・cm), $K_2=8$ (kg・cm), $T_1=T_2=0.05$ (sec) (図・5 の基準点 P) なる場合の制御系に関する根軌跡である。これによると、リンク I の設定値 θ_{i1} (支点 O_1 を通る垂直軸とリンク I の中心

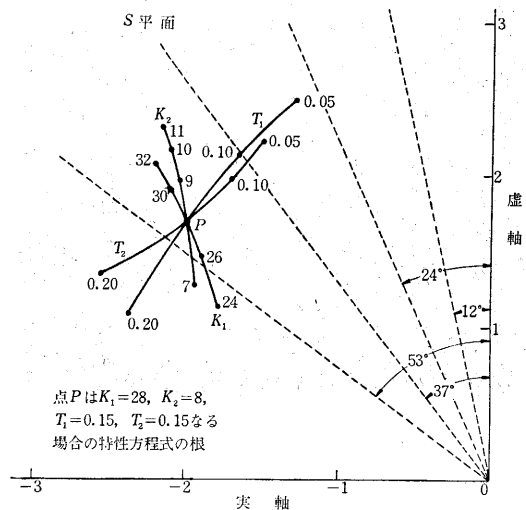


図・4 図・3 の K に対応する K_1, K_2, T_1, T_2 の特性曲線

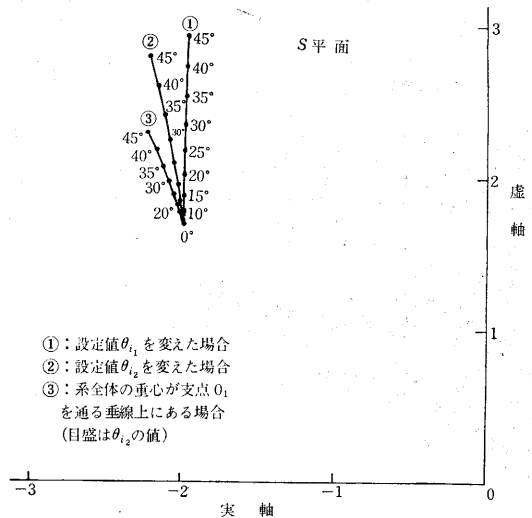
線は図・4 のようになる。

この他の種々のパターンについても調べてみると、一般に根軌跡上のゲイン K の増加とともに、 K_1, T_1, T_2 は収束する傾向を示すのに対して、 K_2 はほぼ K に比例して増加することがわかる。一方、図・3 より、制御系は、 K の増加とともに非振動性を示し、減衰性が強まるので、2 自由度制御系の場合、 K_1, T_1, T_2 に、その系に特有の収束値を与えるならば、 K_2 (リンク II のゲイン) の増加とともに、非振動性を増し、安定化するという結論を得る。

つぎに、(ロ)、(ハ) の場合、図・5、図・6 は、特性方程式の根のうち、いずれも減衰性の最も悪い応答成分についての根軌跡(の上半分)を示したものである。



図・5 4 変数 (K_1, K_2, T_1, T_2) のいずれか一つを変化させたときの根軌跡

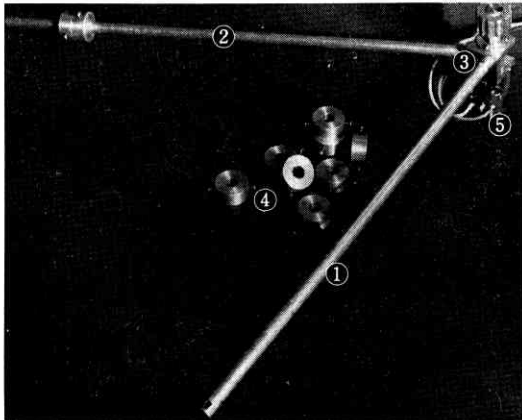


- ①：設定値 θ_{i1} を変えた場合
- ②：設定値 θ_{i2} を変えた場合
- ③：系全体の重心が支点 O_1 を通る垂直線上にある場合 (目盛は θ_{i2} の値)

図・6 根軌跡

軸のなす角度)のみを変化させたときには、その角度が大きくなるにつれて振動性を増していくが、リンクIIの設定値 θ_{12} (リンクIの中心軸とリンクIIの中心軸のなす角度)のみを増加させていくと、振動性の増加割合が前述のものより小さくなると同時に、減衰性が強まる傾向を示す。一方、系全体の重心が、たえず、リンクIの支点 O_1 を通る垂直軸上付近に維持されるような制御系にあっては、前二者にくらべて、その振動性が著しく低下すると同時に、減衰性が一層強まることわかれる(図・6の③参照)。

以上、2自由度系に関する解析を、比例要素と比例微分要素に限った場合について行なったが、これを位相進み要素(上で論じた比例微分要素はこの近似とみなす)に拡張した場合の系の安定化も同様にして論ずることが



① リンクI, ② リンクII, ③ ジョイントII, ④ おもり, ⑤ ポテンシオメータ

図・7 2自由度リンクとおもり

できる。

しかし、自由度が増したり、リンク間の連結が3つ以上になると、運動方程式や特性方程式が複雑になるので、これまでのような制御方式を採用することが理論的には可能であっても、一方では任意の姿勢をとり、他方では重心をあやつるというような装置の実現化は一層困難なものとなる。

3. 2自由度不安定リンク機構モデルによる実験

(1) 実験装置の構成 本実験のために試作した装置の構成は、つぎの通りである。

(イ) 制御対象 2自由度不安定リンク機構(重量軽減のために、リンクとしてパイプを使用——図・7参照)

(ロ) 操作部 機械的な部分と電気的な部分からなる機械的な部分…ギヤ、タイミング・ベルトおよびギヤ

電気的な部分…磁気粉体(MP)クラッチ、サーボモータ

操作部の配置は、図・8によって示されているが、その右側がリンクI操作部、左側がリンクII操作部である。両者は、共にサーボモータ1基とMPクラッチ2基を備えているという点では一致しているが、その動力の伝達機構に関しては相異なり、前者が、クラッチの従動側の動力をギヤを介してジョイントIに伝えるのに対し、後者はギヤの回転をさらにタイミング・ベルトを通して、ジョイントIIに伝達する。

(ハ) 検出部 ジョイントI, IIに取り付けられたポテンシオメータによって、リンクの角変位を検出する(図・7, 図・8参照)。

(ニ) アンプおよび補償回路 (図・9参照)。

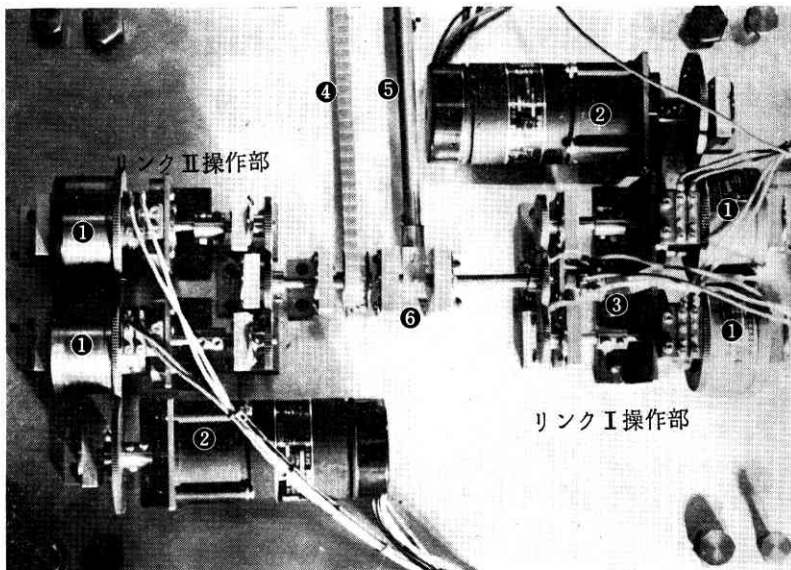
以上の構成要素からなる制御系のブロック線図は、図・10によって示される。

(2) 実験および結果 2自由度に関する実験の場合、二つの制御量として、(イ)ともに角度、(ロ)角度と重心のずれ、を選ぶが、今回の実験では、(イ)を採用した。なお(ロ)に関しても目下のところ実験中である。(イ)の場合の実験は、設定値(目標値)の変化の与え方によって、つぎの三つに分けられる。すなわち、

(i) リンクIの目標値を変えた場合

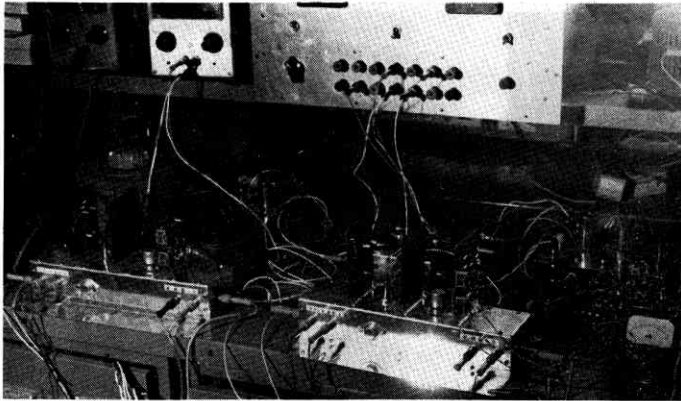
(ii) リンクIIの目標値を変えた場合

(iii) リンクI, リンクIIの

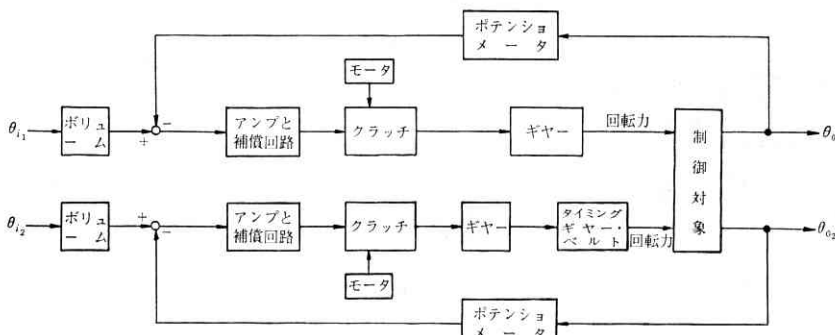


① MPクラッチ, ② サーボモータ, ③ ポテンシオメータ, ④ タイミングベルト, ⑤ リンクI, ⑥ ジョイントI

図・8 操作部および検出部



図・9 アンプおよび補償回路



図・10 2自由度制御系のブロック線図 (検出部: ポテンシオメータ)

目標値を変えた場合

図・11 は (iii) に関する実験を行なっているところである。

(i) の場合の応答 (角変位) を見ると、リンク I の目標値をランプ状に変えることによって、リンク I は減衰振動を行ない、また、リンク II もその影響をうけて、同様な減衰振動を行なう。ただ、両者に加わるモーメントは互に反作用的な働きをするので、振動方向が逆向きになることはいうまでもない。図・12 はリンクの動きを 1/2 秒間隔でとらえた写真であるが、これは、目標値を連続的に変えているので、かならずしも上述の応答を示していない。

(ii) の場合、目標値変化に対するリンク II の応答に顕著な遅れのあることが認められるが、これは試作したリンク機構の構造上の欠陥 (機械的な部分の遊びなど) によるものと思われる。図・13 は、目標値を変え、ふたたび元にもどした時のリンクの動きである。(この写真によって微少な減衰振動を認めることはできない)。

(iii) の場合のリンクの動きは、図・14 に示される。

以上の実験により、2自由度不安定リンク機構の姿勢制御は、理論通り、位相進み補償回路を挿入することによって可能であり、減衰振動または過減衰を行なうことが示された。また、各補償要素のゲインおよび時定数を一定に保ち、非線形である制御対象の目標値変化に対す

る応答を調べた結果、目標値の急激な変化に対しては、バランスをくずし、不安定になりやすいが、徐々に変化させると、かなりの範囲まで追従し、理論的解析 (図・6 参照) に対する実験的な裏付けを示すことができた。

なお、本実験では行なわれなかったが、差動変圧器によって重心のずれを検出する場合には全長約 70cm のリンク機構に対して、32cm という大きな足 (図・11の上の台) が重要な役割をはたすことになる。

4. 不安定リンク機構としての人間

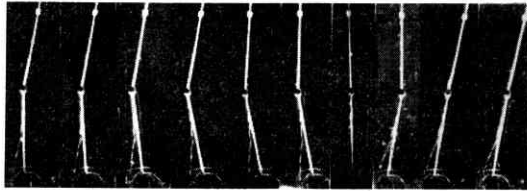
以上の理論と実験を通して、多自由度不安定リンク機構の制御可能性に対する確証を求めたが、そのより複雑な場合に対する実際の解答は、すでに人間その他の二足動物によって示されている。なかでも、人間は直の真立歩行が可能な唯一の動物であり、この能力獲得の時期を塚として、他の動物とは明確に区別される進化 (すなわち、前足から手への進化、さらにそれに伴う大脳半球の進化) がはじまったとみられている。

(1) 人体リンク機構 機構学で取り扱われるリンクは、1本のまっすぐな棒であり、またリンク間の連結は、1本の回転軸によってなされるので、連結すべきリンクは互に重複した部分をもつ。一方、図・15(a)に

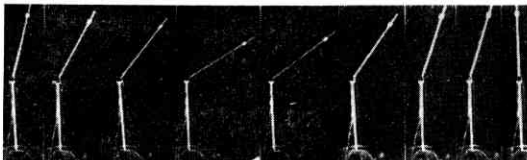


図・11 実験中の2自由度不安定リンク機構

示されるように、人間の骨格を構成する個々の骨の形態は種々雑多であり、その連結部も工学的に考えられるものとは、かなり異っている。だが、Dempster は、この複雑な形態をもつ人間の骨格を力学的に取り扱う場合には、図・15(b) のようなリンク機構に置き換えることを示



図・12 リンク I の目標値を変えた場合の動き (1/2 秒間隔)



図・13 リンク II の目標値を変えた場合の動き (1/2 秒間隔)



図・14 リンク I, リンク II の目標値を変えた場合の動き (1/2 秒間隔)

した。このような単純化によって、人体は、前後方向に対しては7自由度の、また、左右方向に対しては6自由度(膝関節は関与しない)の不安定リンク機構とみなすことが可能である。しかも、機構学におけるリンク機構は、ある定められた運動を行なうだけであるが、人間を含む不安定リンク機構は、多種多様な運動を行なうことができる。

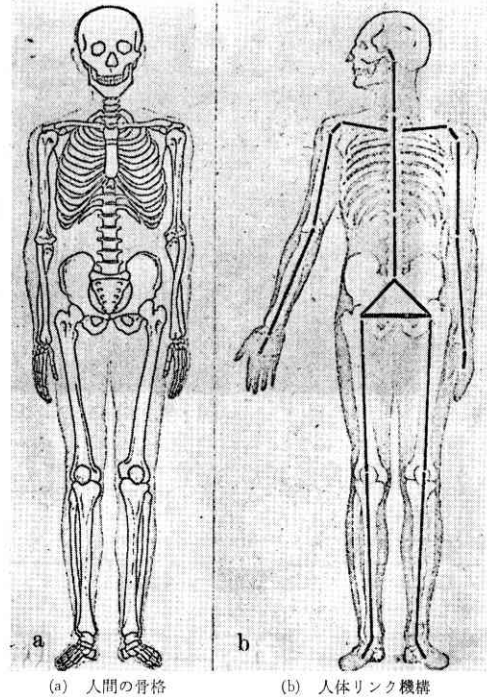
(2) 人体姿勢制御機序 不安定リンク機構の自由度がふえるにしたがって、その機能も増加するが、それと同時に操作を行なうべき制御装置も、次第に複雑なものとなる。

ここでは、多くの自由度をもつ人体リンク機構に調和のとれた運動を与えている、制御装置としての中枢系—末梢系—筋系の構成要素について述べ、あわせて現在までに判明している各要素の特性について簡単に触れることにする。

姿勢制御に関与する感覚器官(検出部)としては、前庭迷路(平衡感覚器)、視覚、深部感覚(筋紡錘、腱受容器)、皮膚感覚(足底の圧覚など)がある。

人体姿勢制御機序は、これらの感覚器官の種類によって、二つに大別される。すなわち、一方では、前庭迷路や眼からの情報をフィードバック量として、制御対象である骨格を制御しているが(図・16 参照)、他方では、筋紡錘や腱受容器からの情報をフィードバック量として、操作部である筋肉の張力を制御している。

筋紡錘に急激に一定の張力を加えると、その初期には、活動電流の頻度は高いが数秒以内に減少し、やがて放電間隔が一定になる。すなわち、筋紡錘は一種の比例微分動作を行ない、運動神経細胞の興奮を促進する役目



図・15 人間の骨格とそのリンク機構への単純化

をはたすと同時に、放電間隔を一定に保持しようとする働き(負のフィードバック)をもっている。

一方、腱受容器は、かなり大きな張力が加わったときに瞬間的に活動電流を出すので一種の微分動作を行なっていることになるが、この活動電流は運動神経細胞に抑制的に作用する(自己抑制作用)ことがわかっている。

これら筋紡錘、腱受容器を含む閉回路は、さらに(Ⅰ)脊椎レベル、(Ⅱ)旧小脳レベル、(Ⅲ)大脳レベルの閉回路に分けられるが、(Ⅰ)は、比例微分動作にもとづく自己制御性をもった系であり、これに対して、(Ⅱ)は旧小脳の比例微分動作によって、オフセットを除去する役目を果している。また、(Ⅲ)は主として意識的な姿勢をとる場合に働くループである。T. C. Ruch は、これら(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)の閉回路を output-informed feedback circuit と呼び、一方、図・16 に示した新小脳レベルの閉回路を input-informed feedback circuit と呼んでいる。とくに後者の場合、「大脳皮質→脳幹→新小脳→視床→大脳皮質とかけ回る命令とインフォメーションこそ、一方では運動、動作の計画をたてつつ、他方では旧小脳レベルの閉回路と接触、交渉しつつ脊椎レベルの閉回路に合目的の興奮を送っている」と考えられる点で人間の姿勢制御に最も重要な役割を果しており、少なくとも今日までの自動制御の知識では実現し得ないものである。

(3) 人体姿勢の「筋電図」学的研究 人間が自分自身の直立姿勢を制御する場合、最初はその体重を両足に均等に分配し、重力線(重力中心を通過して垂直な)が、

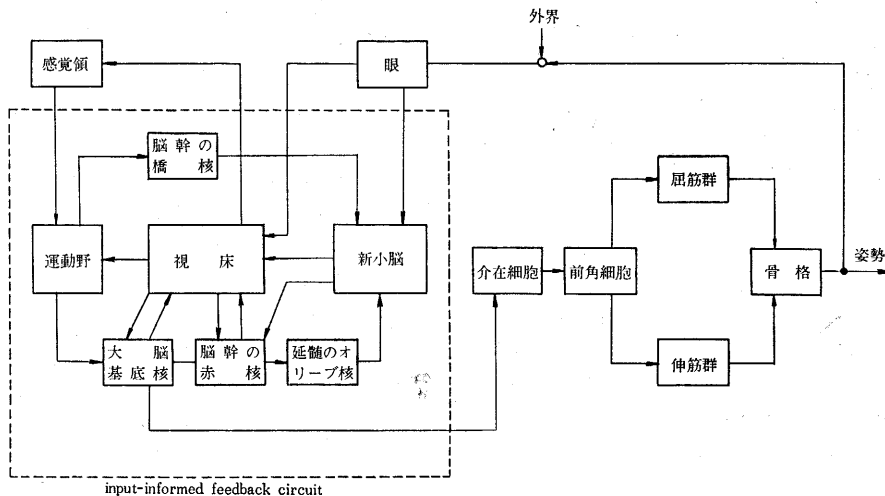
距腿 (Ankle), 膝 (Knee) 股 (Hip), 脊椎の各関節の前後を交互に通る, その位置が屈筋, 伸筋の交互の収縮によって維持されるものと考えられた. しかし, 筋肉の活動状況を調べる手段として, 筋電図 (以下, EMG と記す) が用いられるに至り, 以上のような考え方は全く間違っていることが示された. すなわち, 直立姿勢 (standing at ease) 時の各抗重力筋の活動電位を調べると, 下腿後部のヒラメ筋 (m. soleus), 腓腹筋 (m. gastrocnemius) の内側頭 (caput mediale) および外側頭 (caput laterale) 以外の筋肉はほとんど活動していないことが, 多くの研究者によって示された. さらに距腿関節 (Ankle joint) の横軸を中心として前後へ 5° の傾斜を与えたり, 上肢を前方へ持ち上げたりした場合の各部位の EMG の変化状況から, 直立に近い姿勢時に活動するのは, 主に, 上述の筋に限られ, 大腿部, 殿部, 脊椎部における姿勢保持は, 靭帯その他の非収縮要素の受動的な作用に依存しており, その部位の筋肉は伸張の強さに応じて反射的な収縮を行なうことが明らかになってきた. 人体姿勢の筋電図による研究は, この他にも, 歩行時や各種の運動時の場合について, 多くの研究者が行なっているが, そ

joint), 距腿関節 (Ankle joint) の動きと, その運動に關与する筋肉 (抗重力筋) の働きを観察した.

1, 3 は人体を 1 自由度系として, また 5, 6 は 2 自由度系として取り扱うことを意図したものである. 2, 4 および 7 の姿勢制御は人間に特有のものであり, 単純なリンク機構とみなすことはできないが, その局所的な制御動作を観察するという意味で採用した. とくに 7 は普通の人間にとっては制御のしにくい姿勢であり, そのときの操作部である筋肉の活動状況を観察することは興味深い

以上の実験を通して, 人間の姿勢制御に関する若干の知見を得たが, 測定データがわずかであるために客観的な結論を引き出すまでにはいたらなかった. しかし, この種の実験は人体の制御機構を解明する上に不可欠のものであり, 今後とも根気よく続けねばならないことを痛感した.

最後に, 本研究の発案はもとより, あらゆる点で終始ご指導をいただいた森政弘助教授, 脳波計使用の便宜をはかって下さった日本女子体育短期大学の佐藤方彦助教授, それに森研究室と試作工場の各位に心から御礼を申し上げます. (1966 年 4 月 6 日受理)



図・16 人間の姿勢制御ブロック線図の一例 (視覚の伝導路 検出部: 眼)

れらは, あくまでも運動と筋肉の働きの関係を調べるものであり, いわゆる制御工学的研究はほとんどなされていないように思われる.

そこで, 筆者は, 多自由度不安定リンク機構としての人間の姿勢制御の実際を, 筋電図と角変位測定器によって観察し, 制御工学的な解析を試みるという意図のもとに, つぎのような実験を行なった. すなわち, 実験項目を, 1. 前傾姿勢 I, 2. 前傾姿勢 II (前傾大→立直る), 3. 後傾姿勢 I, 4. 後傾姿勢 II (後傾大→立直る), 5. 上体前屈, 6. 膝関節屈曲, 7. 片足直立 (目を開いている場合と閉じている場合), の七つに分け, 膝関節 (Knee

参考文献

- 1) アレキシス・カレル, 人間——この未知なるもの 角川 (1958)
- 2) 大島正光, 人間工学入門 雪華社 (1964)
- 3) 倉田正一, 人間工学 技報堂 (1959)
- 4) 稲田重男, 森田鈞, 機構学入門 オーム社 (1961)
- 5) Wilfrid Taylor Dempster, The Anthropometry of Body Action (1955)
- 6) 時実利彦 筋運動支配の自動制御機構について (続サイバネティックスの一部) みすず書房
- 7) J. Joseph, Posture and Electromyography
- 8) S. Kondo, Anthropological Study on Human Posture and Locomotion.—mainly from the View Point of Electromyography