斜旋回機構を用いた索状能動体とその制御†

広瀬 茂 男*・織田 春 太**・梅谷 陽 二*

Active Cord Mechanism with Oblique Swivel Joints and Its Control

Shigeo HIROSE*, Shunta ODA** and Yoji UMETANI*

Active Cord Mechanism (abbreviated as ACM) in this paper is the newly proposed bio-mechanical element with long and slender body and executes flexible winding motion such as a snake being in the natural world. The authors have been interested in ACM and have been making successive investigations on its mechanisms and control problems as a locomotor and a manipulator. In this paper some fundamental considerations as to the problems to realize the industrial applications of ACM are performed and shown that the designing of effective actuator system is crucial. As a results of these considerations, a mechanism named "Oblique Swivel Joints" is proposed to be suitable especially for ACM as a locomotor. The control problems of oblique swivel joints are then analyzed by tensor calculus, and basic control principles are derived. To verify these considerations an ACM mechanical model with oblique swivel joints is constructed. The mechanical model is 1.6 m in length, 61 mm in diameter and consists of 16 segments. It is controlled by micro-computer. By this ACM model, 3 dimensional posture formation and its successive transformation is demonstrated. The ACM model also demonstrates smooth locomotion like a centipede or milliped on a rugged surface or over a ditch by installing powered wheels along the ACM trunk and supplied cooperative control of the rotation of the wheel and the bending motion of the ACM trunk. Thus the authors believe that this study showed one of the ways for ACM to be utilized in various industrial applications.

1. ま え が き

索状能動体 (Active Cord Mechanism, 以降 ACM と略称する) とは「ヒモ状の細長い体幹を有し、体幹に沿って直列に装備されたアクチュエータ群でその体幹形状を能動的かつ柔軟に屈曲変形し種々の動作を遂行する機能体」と定義したものである¹⁾。筆者らはこの ACM という生物形機能体を工学的に応用していくため、従来より一連の研究を続けてきた^{1)~11)}。

本研究では、まずそれら従来からの研究を再検討し ACM の工学的応用上の問題点を明らかにする。ついで ACM に適する一つの駆動機構として「斜旋回機構」と名付ける機構を導入し、その特徴、制御原理などを示す。これらの考察の妥当性は実際に試作した機械モデルによる実験により検討していくことにする。

2. ACM の工学的応用上の問題点

2.1 ACM に関する問題の分類と検討

ACM (索状能動体) という機能体は生物界には多く観察されるが、工学的にはまだ応用されていない。その主な原因は、以下の 3 点であるといえよう。つまり、

- (1) 多自由度の運動制御の問題、
- (2) 触覚等感覚受容器群からの信号処理問題、
- (3) 多節体幹の関節部駆動機構の設計問題、

である。このうち(1)は多自由度の ACM の制御が複雑化する問題である。各節ごとの制御原理は在来の関節形マニピュレータと本来同一であるが、量的にかなり膨大な拡張となるため、従来と異なるいくつかの特別の制御原理が ACM には必要となろう。すでに考察した ACM 関節角度信号の、体幹隣節へのシフト制御方式^{6), 8)}もこの一つの例であるが、これ以外にも ACM 特有の制御原理を考えていくべきである。つまり、ACM の制御についてはまだかなりの問題点が残されていると考えられるが、現在までの計算機技術の進歩を考慮すれば、これは必ずしも ACM の実用化を阻害

† 第 19 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 55・8)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 東京芝浦電気(株) 青梅市末広町 2-9-1

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

** Toshiba Corp., Oome

(Received September 17, 1980)

(Revised March 16, 1981)

している最大の理由とはいえない。

(2)の感覚情報処理については、ACM の場合その体幹表面の触覚群からの情報が重要である。これはいくつかの具体的応用を想定すれば明らかである。この場合、非常に多数の触覚情報を処理することになるが、すでに論じた「側抑制」形の並列情報処理⁸⁾などの手段を用いることによれば現在の計算機技術でも十分対処していくことが可能であると思われる。多分最後に残される最大の問題は、高信頼性の分布形触覚センサの開発であろう。ただし、ACM に想定される応用のなかには必ずしも完全な触覚を必要としない場合も多い。そこでまずそのような用途へ ACM を適用していき順次その機能性を高める手順を考えれば、(2)の問題は ACM の目下の実用化には障害とならないであろう。

これらに対し、(3)の駆動機構の設計問題は一見些細なことのごとく思われるが、現状では ACM の実用的応用を阻害している最大の原因となっているといえよう。ACM がその本来の機能性を発揮するには、自由度の数だけのアクチュエータ群を必要とするが、現在われわれが利用できるアクチュエータシステムではまだその（出力／重量）比が低く、通常の設計ではアクチュエータ群自身を支えることも困難となる状況にあるからである。もちろん、筋肉に相当する軽量高出力のアクチュエータシステムが開発できればよいが、現状ではまだ不可能である。

筆者らは、この問題点に対処するため、開発すべき ACM の適用分野を限定し、その限定用途のなかで可能な駆動機構を探るという立場をこれまでとってきた。以下これらの立場を整理し、改めて新たな可能性を追求していくことにする。

2.2 ACM の用途と駆動機構

ACM とは、本来その用途が限定されず、単純な形態で多くの機能を遂行していくべきものである。しかし、前述のとおり、アクチュエータまわりの大きな制約があり、このような汎用性の実現はまだ困難である。そこで、ここでは ACM を(1)マニピュレータ形と、(2)自律移動体形に分類し、それぞれの場合に適する駆動機構を考察してみる。

装置やプラントの内部に柔軟な腕を伸ばし、検査や作業を行う ACM、あるいは能動的に胃カメラや大腸鏡を体内に挿入していく ACM などの応用は、(1)の分類である。この場合、ACM は基部に片持ち梁的に支持される。よってアクチュエータはその装置全体を ACM 本体に装備する必要がない。つまり大半を基部に納め、ワイヤーや油空圧でそのエネルギーを ACM

各節に伝播するという駆動機構の導入により、擬似的にアクチュエータ群の（出力／重量）比が改善できよう。ただし、このような立場での試みは、従来からいくどかなされているが^{9), 12)~15)}、まだいくつかの技術的問題点を残しており、実用的な段階には至っていない。

なお、(1)の分類中でも、ACM の機能を単に物体の把持動作のみに限定すれば、ソフトグリップと呼ぶ十分実用的な ACM 形機構を実現できることは、すでに示した^{10), 11)}。これは、単純だが特別に設計されたプーリ機構を使用することにより、1台（場合によっては1対）のアクチュエータによって多関節 ACM 形グリップに順序よい屈曲運動を起し、任意形状の物体を全把握面で均一な把握力を生じつつ掴む装置である。これは、機能性を限定すれば、現在のアクチュエータでも実的な ACM 形機能体が実現できる一つの例といえよう。

さて、これらに対し、(2)の自律移動形 ACM とは、荒地走行車や原子炉内自走検査装置などのように、自律的で自由な運動機能を発揮すべきものである。この場合には(1)のようなアクチュエータ分離による擬似的な性能の向上は期待できない。もちろん、運動面が平面に限定していれば、すでに筆者らが試作した ACM 機械モデル^{6), 8)}で示したように、現在のアクチュエータシステムを用いても、十分の運動性が得られる。しかし、一般の移動環境ではやはり3次元運動機能が必要となろう。そこで、次章では空間移動運動を行う ACM の駆動機構について検討することにする。

2.3 3次元運動体としての ACM 駆動機構

ACM を空間内で運動させるための代表的関節構造は、Fig. 1(a), (b) の二つのタイプであろう。(a)

Fig. 1 Some of the joint mechanisms for ACM to produce 3 dimensional motion

は同軸回転節 J_c と、垂直旋回節 J_v を交互に連結するものである。1 関節に 2 自由度が集中した、ディファレンシャルギアを用いる Fig. 1(c) の機構も (a) と同じ運動特性である。Fig. 1(b) は、隣接する節の旋回軸が直交するように垂直旋回節を連結するものである。これは、節長 a を短縮すれば、ユニバーサルジョイント部で 2 自由度の運動を生ずる Fig. 1(d) と同様の運動特性を示すものである。さて、これらの関節構造が 3 次元運動を行う ACM 関節構造として妥当であるか、具体的に機構設計を試みることに検討してみよう。

ACM が空間姿勢をとるとき、その関節部にはあらゆる方向からの荷重が働くと考えられ、しかもその荷

重の大半は ACM 体幹自身の自重によるものである。よって、ACM 関節構造は十分軽量でかつ全荷重条件に対して堅牢でなければならない。この立場から、Fig. 1(a) の同軸回転節 J_c を設計すると、薄肉で大口径のボールベアリングを用い、たとえば Fig. 2(a) のような外骨格的な支持駆動機構にすれば、上記条件が満足できよう。それに対し、Fig. 1(a) や (b) の垂直旋回節 J_v では、同様の考慮を行うとしても Fig. 2(b) のように外形がかさばり、軽量化もし難い。このことは、Fig. 1(c) のディファレンシャルギアを用いる方式でも同様である。

また、Fig. 1(d) ではリニアアクチュエータの両端をボールジョイントにする必要があるなど、機構的に複雑化する問題があり、このままでは実用的でない。つまり、これら従来からの構造では、必ずしも最適な ACM 駆動機構は実現しにくいことがわかった。そこで本研究では「斜旋回機構」と呼ぶ新たな機構を導入することにする。

3. 斜旋回機構の導入

斜旋回機構とは、Fig. 2(c) のように傾斜した軸（以降これを斜旋回軸と呼び、傾斜度を α とする）の回りに旋回する節（斜旋回節 J_o と以後呼ぶ）と、Fig. 2(a) のような同軸回転節 J_c とを交互に連結したものである。

このような斜旋回機構は、マスタスレーブ形マニピュレータの関節部として一時用いられたことがあるが¹⁶⁾、それ以外には利用されていない。その理由は、斜旋回節の可動範囲が $\pm 2\alpha$ 以内に制約されること、そしてその制御が一見煩雑になる点であろう。しかしながら、それらの欠点があるにもかかわらず、本研究においてあえて斜旋回機構を導入したのはつぎのような利点が考えられるからである。

最大の利点は、斜旋回機構の導入で、アクチュエータ系の（出力／重量）比性能が等価的に向上できるという点である。これは以下の二つの理由による。

その一つは、斜旋回節 J_o がその旋回軸の傾斜度 α を 30° 以内程度とすれば、Fig. 2(c) のようにほとんど同軸回転軸 J_c と同様に設計でき、堅牢で軽量の ACM が構成できる点である。

いま一つの理由は、移動体としての ACM の動作状態を考えると、斜旋回節のアクチュエータが生ずべきトルクの最大値が、通常の垂直旋回節のそれと比較して半減でき、結果的に斜旋回機構の出力が倍増できるという点である。これは Fig. 3 を用いて説明する。

ACM が Fig. 3 のようにその先端部を sagittal plane

Fig. 2 Design example of the joint mechanism for ACM

Fig. 3 The motion of ACM as a locomotor

内で上下に振る動作を考えよう。そして、図中の点*の節が垂直旋回節 J_i^v である場合、 J_i^v にはたかだかモーメント M^* を生ずる必要があるとする。このとき、点*を斜旋回節 J_i^s (ただし軸傾斜度を α) とし、両隣と同軸回転節 J_{i-1}^s, J_{i+1}^s との協調動作で同様の上下運動を生ずるときには、節 J_i^s で生ずべきトルクはたかだか $M^* \sin \alpha$ である。たとえば、 $\alpha = 30^\circ$ では生ずべきトルクは半分でよいことになる。

もちろん、このような効果はACMを端部がsagittal plane 内以外の姿勢をとる場合には、必ずしも一般的に期待することはできない。しかし、すでに述べてきたように、現在われわれは移動体としてのACMを考えており、その場合ACMが体幹を片持ち梁的に空中に浮かすのは、Fig. 3のように体幹でブリッジを形成するまでの動作がほとんどである。このことから斜旋回機構によれば、限られた出力のアクチュエータでも、通常の移動運動には支障のない程度の自由な空中姿勢がとりうるということがわかる。

斜旋回機構には、ほかに形態上の利点が考えられる。まず、その外形状は円筒を連絡したように滑らかで方向性がない。移動体としてのACMでは、環境に対し種々の姿勢で接することがあるため、これは望ましい特徴である。また、ACM全体は外骨格構造となり、体幹内部に縦走する中空部が形成される(注1)。これは気密性の点、また各節間のエネルギー、信号の伝播の点で有利であろう。マニピュレータの設計などにおいて、電線類の存在はほとんど付加的なものとして無視される。しかし、実際の装置ではこれらの存在が本体の動作を制約することが少なくない。特に多節構造のACMの場合、この影響は看過できないからである。

さてそれでは、前述した斜旋回機構の欠点と思われる問題について考察しよう。

まず、可動範囲が制約されている点は、多関節形状を本来の特性とするACMでは本質的な欠点とはいへ

まい。在来の数節からなるマニピュレータでも関節部の構造上、その可動範囲が 180° を越えることはほとんどない。まして、節間距離が節の太さに対し比較的短いACMでは、1関節でせいぜい $\pm 60^\circ$ の可動範囲までが実際の構成であるし、機能的にも十分だからである。つまり、この場合では $\alpha = 30^\circ$ の斜旋回機構を用いればよいことになる。実際のヘビも非常に柔軟な運動を行うが、200ほどある脊椎骨間の最大可動範囲は $\pm 4^\circ$ ほどである。つまり、不必要に大きい可動範囲を有する構造を捨て、用途にあった限定された可動範囲の機構を採用することにより、ACMとして望ましい構造体が構成できるといえよう。

また、斜旋回機構の制御の煩雑さについても、現在の計算機技術をもってすれば、十分対処可能であり、問題とならないと考えている。この制御原理については次章において詳しく論ずることとする。

以上のことから、斜旋回機構は移動形ACMのための駆動機構として多くの有利な点を有していることが明らかになった。よって、斜旋回機構形ACMについて以後考察していくことにする。

4. 斜旋回機構の姿勢制御

斜旋回節は $\alpha = 90^\circ$ のとき垂直旋回節となる。つまり、斜旋回機構と、Fig. 1(a)に示す通常の機構は、制御論的にはまったく等価なものである。ただし、Fig. 1(a)の機構はその屈角 ρ_i 、捩角 τ_i (注2)が同軸回転節 J_i^c と垂直旋回節 J_i^v の回転角に直接対応しており、直感的な取扱いが安易であるに対し、斜旋回機構ではこの対応が単純でない。よって本章では、斜旋回機構について、その斜旋回節の旋回角 θ_i と、同軸回転節の回転角 ϕ_i の両者が二つの姿勢パラメータ屈角 ρ_i 、捩角 τ_i といかなる関係をもつか誘導しておくことにする。

Fig. 4のように、第 i 番目の斜旋回節 J_i^s の両隣と同軸回転節を J_{i-1}^c, J_{i+1}^c とする。節ベクトル l_{i-1}, l_i 、基準ベクトル $t-n-b$ はFig. 4のようにとる。空間ベクトルの表示を牧野の方式¹⁷⁾とすれば、三つの回転節 $J_{i-1}^c, J_i^s, J_{i+1}^c$ がそれぞれ $\xi_i', \theta_i, \xi_i''$ だけ回転した後の節 l_i のベクトル $E_i(l_i)$ はつぎのように示される。

$$E_i(l_i) = E^{\xi_i'} E^{b\alpha} E^{\theta_i} E^{b(-\alpha)} E^{\xi_i''}(l_i) \quad (1)$$

ここでたとえば $E^{b\alpha}$ は、ベクトル b を回転の軸とす

(注1) 文献16)での斜旋回機構の導入は、この内部中空的な形状特性に注目し、この中空部に腕を挿入した形でマスターマニピュレータを構成したものである。

(注2) 屈角 ρ_i とは、節 l_{i-1} と l_i とのなす角度であり、連続曲線の曲率に対応するものである。捩角 τ_i とは、節 l_{i-1} と節 l_i とのなすねじれの角度であり、連続曲線の捩率に対応するものである。

Fig. 4 Oblique swivel mechanism and its nomenclature

る角度 α の回転を示す回転変換テンソルを示す。

このとき、回転節 J_i^c, J_i^o, J_{i+1}^c を協調的に旋回することにより、i) 節ベクトル l_i の屈折運動が $t-b$ 平面内で生じ、かつ、ii) 節ベクトル l_i に立てた n 軸方向ベクトルが旋回前後でその方向を変えないならば、斜旋回節 J_i^o での屈折運動はこの節が n 軸を旋回中心軸とする垂直旋回節である場合と同じである。このうち ii) の条件から ξ_i' と ξ_i'' は同一角度であることが誘導できる。そこで、 $\xi_i' = \xi_i'' \equiv \xi_i$ とする。この ξ_i は ii) の条件から

$$\xi_i = \tan^{-1} \left(-\frac{\cos \alpha (1 - \cos \theta_i)}{\sin \theta_i} \right) \quad (2)$$

と誘導できる。また、屈角 ρ_i は $E_i(l_i)$ の $t-b$ 方向の比から求まり

$$\rho_i = -\text{sgn}(\theta_i) \cos^{-1} \{ \cos^2 \alpha + \cos \theta_i \sin^2 \alpha \} \quad (3)$$

ただし

$$\text{sgn}(\theta_i) \equiv \begin{cases} \theta_i / |\theta_i| & (\theta_i \neq 0) \\ 0 & (\theta_i = 0) \end{cases}$$

である。これから逆に

$$\theta_i = -\text{sgn}(\rho_i) \cos^{-1} \left\{ \frac{\cos \rho_i - \cos^2 \alpha}{1 - \cos^2 \alpha} \right\} \quad (4)$$

も誘導される。

さらに、同軸回転節 J_i^c で生ずべき回転角 ψ_i は、その節で生ずべき捩角 τ_i だけでなく、両隣の斜旋回節のための補正回転 ξ_i, ξ_{i-1} などの和として与えられるため

$$\psi_i = \xi_i + \xi_{i-1} + \tau_i \quad (5)$$

である。

以上をまとめれば、斜旋回機構の制御変数 (θ_i, ψ_i) と姿勢変数 (ρ_i, τ_i) の関係は Fig. 5 のようになる。Fig. 5 から明らかなように変数間の関係は全て 1 次関数的に与えられる。よって実際の制御にあたっては、この変換を演算回路で行ってもよいが、数表化して補間演算的に行うことも可能である。そしてこの変換回路を挿入すれば、斜旋回機構も従来からの機構とまっ

Fig. 5 The relations between swivel angles θ_i, ψ_i and posture command angles ρ_i, τ_i

たく同様に制御できるといえよう。

5. 斜旋回機構形 ACM による移動運動

ACM の平面上での推進運動について筆者らは、すでにヘビの運動を解析し、いわゆる「ほふく（匍匐）運動」と呼ぶ推進形態が存在することを示^{2)~5), 7)}し、それを機械モデルによって具体的に実現できることも検証した^{6), 8)}。これは、体幹の屈曲運動でその屈曲力を推進力に変換することの特徴としており、工学的に見ても単純で特徴のある機能性をもつ移動方式といえよう。

斜旋回機構形 ACM でも当然同様の推進方式が可能である。だが実際には、後に述べるような全 15 節の機械モデルの推進運動を想定したところ、たとえば屈曲を生じている関節部のみで推進力を生ずることになり、推進力が不足するなどの問題があることがわかった。そこで、本研究では ACM 体幹部アクチュエータは、その姿勢を環境に適応して変形することのみを行い、推進力は外付けの駆動車輪（あるいはキャタピラ）で生ずる方式を導入する。ACM 形移動体の高い対地適応性は、その細長い体幹を適応的に変形できるということに依存するのであるから、上記のような推進手段は決して ACM の特徴を減ずるものでなく、かえって生物形の形態と工学的機械要素のそれぞれの特性を有機的に結合するものであると考えている。この推進方式をあえて生物界の推進方式と対比すれば、ヘビというより、ムカデやヤスデの方式に近いといえよう。

さて、斜旋回機構の体幹姿勢はすでに述べたように自由に変形できる。しかし、その体幹表面の向きは自由度が不足しており不可制御である。よって、体幹に

直接車輪を取り付けることはできない。もちろん、車輪のために同軸回転節を増設するのは明らかに不経済であり、この車輪姿勢調整用には別の小型アクチュエータを装備すべきであろう。後に示す試作機ではさらにこの点を簡略化し、車輪を Photo. 2 のごとく円筒形体幹の回りに自由に回転できるように取り付け、車輪自体の自重で姿勢を保つ方式としている。ただし、この場合 ACM 両端部の車輪のみは体幹に固定し、ACM 体幹の環境に対する姿勢を与えるようにしている。

なお、このような個別推進形の ACM の場合、その駆動車輪の回転速度は制御可能とすべきである。そして、ACM 体幹の変形速度に同期してこの車輪を駆動制御すれば、ACM の全体幹が空間内の同一軌跡をたどる、流れるような推進運動が実現できよう。

6. 機械モデルによる制御実験

同軸回転節 8 節と斜旋回節 7 節を交互に結合した ACM 機構モデルを試作した。全長は 1,600 mm、直径は 61 mm、全重量は 4.3 kg である。斜旋回節の旋回軸傾斜度 α は 3 章での考察をもとにここでは 25° とした。関節部玉軸受には、入手上の理由から 6900 を用いた。しかし配置や剛性上の問題が生じており、今後はやはり 2 章で論じたように軽量大口径のボールベアリングを使用すべきである。

アクチュエータとしては定格 3 W の DC モータを用いた。全減速比は 1/2083 である。インクリメンタル形エンコーダをモータ軸に取り付けてデジタルサーボ系とし、その回転角と回転速度をマイコンで直接制御可能としている。なおこのときの Fig. 5 に示す変換は、全ての関係を数表化し 1 次補間で実行する方式とした。

試作した斜旋回形 ACM とその制御装置を Photo. 1 に示す。現在まだこの機械モデルは、触覚や視覚などの感覚受容器を装備していない。そのため姿勢変形は全て指令者が望みの姿勢における各節の屈角と捩角を与え、それを次々に変えつつ指令することにより行っている。これにより Photo. 1 のような立体姿勢の形成や、その連続的変形などが実現できている。

さらに、移動体としての斜旋回形 ACM の機能性を検証するため、Photo. 2 のような超小形モータを内蔵し ACM 体幹回りに回転自在な車輪を装備した。最後節の車輪にはエンコーダを取り付け、全車輪の速度制御を可能にした。そして、体幹変形と車輪の回転速度をそれぞれ同期させることにより、Photo. 3 で示すような平地での蛇行、螺旋坂道の走行そして段差の

Photo. 1 Constructed ACM model and its controller

Photo. 2 Powered wheels installed along the ACM trunk

Photo. 3 One of the locomotion experiments of ACM on model terrain

乗り越えなど、いくつかの実用性の高い運動性能を、この ACM が有することを実験的に検証し、常時公開可能な 16 mm 映画として記録した。なお、平均的な推進速度は現在 5 cm/s ほどである。

7. あとがき

本研究では、まず ACM(索状能動体)を工学的に実現するためのいくつかの問題点を論じ、特にそのアクチュエータ系が ACM の工学的応用への最大の障害になっていることを示した。しかし、この障害も ACM の機能を限定することにより、いくつかの解決法のあることを示し、特に移動形の ACM に適するものとして斜旋回機構と名付ける新しい機構を導入し、その特性と制御上の問題点を論じた。そして、これらの考察の妥当性は実際に試作した ACM 機械モデルの制御実

験により検証した。

以上のように、本研究によって、新しいタイプの ACM が実現できたと思われるが、さらに視覚や触覚などの感覚受容器をこの ACM に付加していくことにより、自律的で適応性の高い移動形 ACM が実現されていくであろうと考えている。そして、これは原子炉内などの錯綜した環境内で自走しつつ検査、作業を行う ISI (In Service Inspection) ロボットなどにも応用できるであろう。また、斜旋回機構の気密性に注目すれば、海洋や宇宙空間用マニピュレータなどへの応用もできるのではないかと期待している。

最後に、本機械モデルの試作に御協力いただいた本学嘉戸貴志氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 広瀬：索状能動体に関する生物力学的研究，東京工業大学学位論文 (1975)
- 2) 梅谷，広瀬：ほふく(匍匐)運動の生物力学的研究一定常直進滑走のモデル解と動物実験一，8-6, 724/731 (1972)
- 3) 梅谷，広瀬：ほふく(匍匐)運動の生物力学的研究一移動様式としての評価一，バイオメカニズム 2, 東大出版会, 289/297 (1973)
- 4) 梅谷，広瀬：ほふく(匍匐)運動の生物力学的研究一定常直進滑走時の体形曲線一，計測自動制御学会論文集, 10-4, 513/518 (1974)
- 5) 梅谷，広瀬：ほふく(匍匐)運動の生物力学的研究一滑走面に対する体形の適応一，計測自動制御学会論文集, 10-6, 682/686 (1974)
- 6) 梅谷，広瀬：ほふく(匍匐)運動の生物力学的研究一ほふく推進体の操縦性と制御実験一，計測自動制御学会論文集, 11-1, 20/24 (1975)
- 7) 梅谷，広瀬：ほふく(匍匐)運動の生物力学的研究一迷路内ほふく推進の解析と実験一，計測自動制御学会論文集, 12-1, 13/17 (1976)
- 8) 広瀬，梅谷：触覚を有する索状能動体の運動制御，計測自動制御学会論文集, 12-5, 543/547 (1976)
- 9) 広瀬，高橋，梅谷：索状能動体に関する研究 (その 1, 立体化構造と姿勢力学)，第 15 回 SICE 学術講演会予稿集, 371/372 (1976)
- 10) S. Hirose and Y. Umetani: The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand, Mechanism and Machine Theory, 13, 351/359, Pergamon Press (1978)
- 11) S. Hirose and Y. Umetani: The Kinematics and Control of a Soft Gripper for the Handling of Living and Fragile Objects, Proc. of 5th World Congress of Theory of Machines and Mechanisms, ASME, 1175/1178 (1979)
- 12) V. C. Anderson and R. C. Horn: Tensor Arm Manipulator Design, ASME, 67-DE-57 (1968)
- 13) B. Roth, et al.: On the Design of Computer Controlled Manipulators, Proc. of Ro. man. sy. '73, 93/113, Springer-Verlag (1974)
- 14) W. E. Reynolds, et al.: Fiber Optic Multiple Fibersigmoidoscope, Proc. of 12th SPIE Technical Symposium, 49/53 (1968)
- 15) G. Lachiver and W. D. Seufert: Design of Endoscopic Carrier with Complete Directional Control, Annals of Biomedical Engr., 7, 345/355 (1979)
- 16) A. K. Bejczy: Distribution of Control Decisions in Remote Manipulation, Proc. of 1975 IEEE Conference on Decision and Control, Houston, Texas, 81/91 (1975)
- 17) 牧野 洋，自動機械機構学, 2/9, 日刊工業新聞社 (1976)