



# 人間型ロボットへの挑戦

## ——舟橋研究室～機械工学科——



### テーマ——機構と機械要素——



舟橋宏明教授

今回我々は、機械工学科で機械要素講座を担当しておられる舟橋教授の研究室をお訪ねした。案内された実験室では、研究室の15人（総勢16人）の方々に温かく迎えられ、実験を見せていただきながらの取材となった。

舟橋研究室では機械運動系・機械要素の研究を行っている。機械運動系とは、エネルギー源から運動を得て、その運動を物体間の接触によって実際に仕事をする作業端まで伝える一連の系のことである。（以後この系を機構と呼ぶ。）機械要素とは、機

械に共通して同じ目的で使用される部品のことで、具体的にはねじ、歯車、軸といったものがあげられる。即ち、機構における入力端から出力端までの運動の伝達、様々な作業をさせるための運動の制御、変換の要素について、逆に、ニーズに応じた機構の設計、更には複数の機構を用いた全体の運動システムの設計、開発、応用、こういったことが、舟橋研究室で行われている数多くの研究に一貫したテーマである。では具体的にどのような研究が行われているのかを順次述べて行きたい。



### 複雑な運動を可能にする非円形歯車

はじめに非円形歯車機構について述べよう。非円形歯車機構とは読んで字の如く円でない歯車で構成された機構である。非円形歯車は、入力側の運動と出力側の運動の角速度比が回転中に変化するという特徴を利用して、複雑な不等速回転運動をさせることができる。その上すべり率が小さく、運動の伝達が確実で、高速時での信頼性が高く、寿命が長いという点でも優れている。何よりも機構自体が小型ですむために応用範囲が広い。このような利点があるため、19世紀半ばには工作機械に組み込まれたりした。しかし、設計・製作上の制約が多かったために用途も

限定され、広くは普及しなかった。1950年代になって、非円形歯車の研究が数多く行われるようになり、遊星歯車機構を用いれば、動いては一時休止を繰り返す間欠運動や逆転運動の可能性が示された。そういった中で本研究室でも遊星歯車機構の研究が始められたのである。その遊星歯車機構は、1対の円形歯車ともう1対の非円形歯車からなる4枚の歯車を1組として構成されるものである（図1）。現在では、コンピュータの発達の結果、数値計算が速く多量にできるようになったために従来あった設計・製作上の制約が、大幅に軽減、解決され、間欠回転や揺動だ

けでなく、たとえば60°回転、30°逆回転、再び60°回転、30°逆回転といった複雑な運動のできる機構も設計されるようになった。そして今は、円形歯車用工具によって歯切りされる非円形歯車の歯形の強度等の特性を解析し、非円形歯車の歯形設計、歯車そのものの設計基準を明確にしようとして研究されている。





## コンピューターでリンク機構を解析する

次に不等速運動をさせる機構の代表といえるリンク機構に関連した研究について述べたい。リンク機構は何本かの節（リンク）を連結したもので、簡単な例としてはエンジンのピストンクランク機構や蒸気機関車の車輪を動かすためのクランク機構がある。この機構の特徴は、負荷能力、運動の確実性に優れ、製作コストが安価で、その上、単純な構造で複雑な運動が得られることである。しかし機構を設計するときに必要な解析（既知の拘束下での運動を調べること）及び総合（必要な運動をさせるための拘束を決めること）の手法は複雑ですべての設計者が使いこなせるものではなかった。そこでリンク機構の解析・総合の組織的手法

をコンピュータを用いて確立しようとしている。これが自動解析・総合システムの研究である。解析・総合のさいには、機構を数学モデルで置き換え、そこから得られた方程式を解く、あるいは新たに関数を創り出すことが必要である。自動解析システムについては、平面リンク機構を複数の2、3、4節のリンク機構から成ると考える手法により、ある程度見通しがついている。そこで現在は、複数の2連節を中心とする基本モデルごとに総合を繰り返し、所要の入出力関係を満足する機構を創る自動総合システムを開発中である。同じことが複数の機構を用いた運動システム全体、すなわち機構系の概念設計についてもいえる。設計過程

の後半に位置する詳細設計や実装設計等のレベルでは、CADシステムがあるが、前半に位置する概念設計に関するCADシステムは殆んど未開発である。そこで知識工学を活用して人間の行ってきた機構系の概念設計にまでコンピュータを使用する知的CADの研究も行われている。



## リンクから生じる欠点を除去する

一方、リンク機構を実際に用いるさいの問題についての研究も行われている。リンク機構の高速化のために構成要素を軽量化すると剛性が低下し、リンクに弾性変形が生じて、機構の運動周期が弾性節の固有振動周期の整数倍になったとき共振をおこす。又、機構の対偶（軸受）内に遊び（微小な隙間）があると、軸と穴の間で分離、衝突が起こる。このため入力軸にパルス状の急激なトルクの変化が起こり、出力側にも誤差

が生じる。更に機構の寿命、騒音にも大きく影響する。そこでリンクの運動方程式から理論的に上記の現象の解析を行った結果、節の弾性変形については、積層構造の節を用いれば共振のさいの変形の振幅を減少できることが分かった。一方対偶については、丁度、地面の上においたテニスボールをラケットでポンポンと2回小突くとボールがハネて取り上げられるのと同じように、軸と穴の急激な相対運動によって発生する力

が働くことによって分離・衝突が生じることが分かった。その結果、分離・衝突が起こらない限界の隙間の決定が理論的に可能になり、更に、節の質量分布を変えることにより分離・衝突が抑制されることもわかった。これらの成果によって優れた特性を持つリンク機構が設計されるようになり、騒音レベルも十数dB低下した。これらは、ロボットアーム等の高精度化にも著しい効果をあげている。



## シリアルからパラレルのアクチュエータへ

さて、現在生産現場では、ロボットとしてシリアルマニピュレータを用いている所がほとんどである。シリアルマニピュレータとは、人間の片腕のように、肩口に当る入力端から手先に当る作業端まで、各リンクを直列に連結した作業機械である。その欠点は、アクチュエータ（動力源）に出力／重量比の小さい回転モ

ータを各関節に配置しているためモータ自体が大きな慣性負荷となり、また細長いリンクの曲げ及びねじり応力によって荷重が支えられるので剛性が低く、高負荷作業に適さないということである。そこでアクチュエータを並列に配置したパラレルマニピュレータの運動特性に関する研



究が行われている。パラレルマニピュレータは、そのリンクの連なり(連鎖)をたどると閉回路となっている閉ループ機構である。閉ループ機構は構造が複雑で、設計、解析が困難

であるが、剛性、パワー、精度の点で開ループ機構に優っている。現在6個のモータを静止節に置き、6本の連鎖により構成される試作リンク機構を用いて変位解析を行い、作動

領域の大きい機構形式の選択、作動中に自由度の変化する特異点の分布の把握を可能にして、優れた特性を持つ6自由度パラレルマニピュレータの開発を行っている。

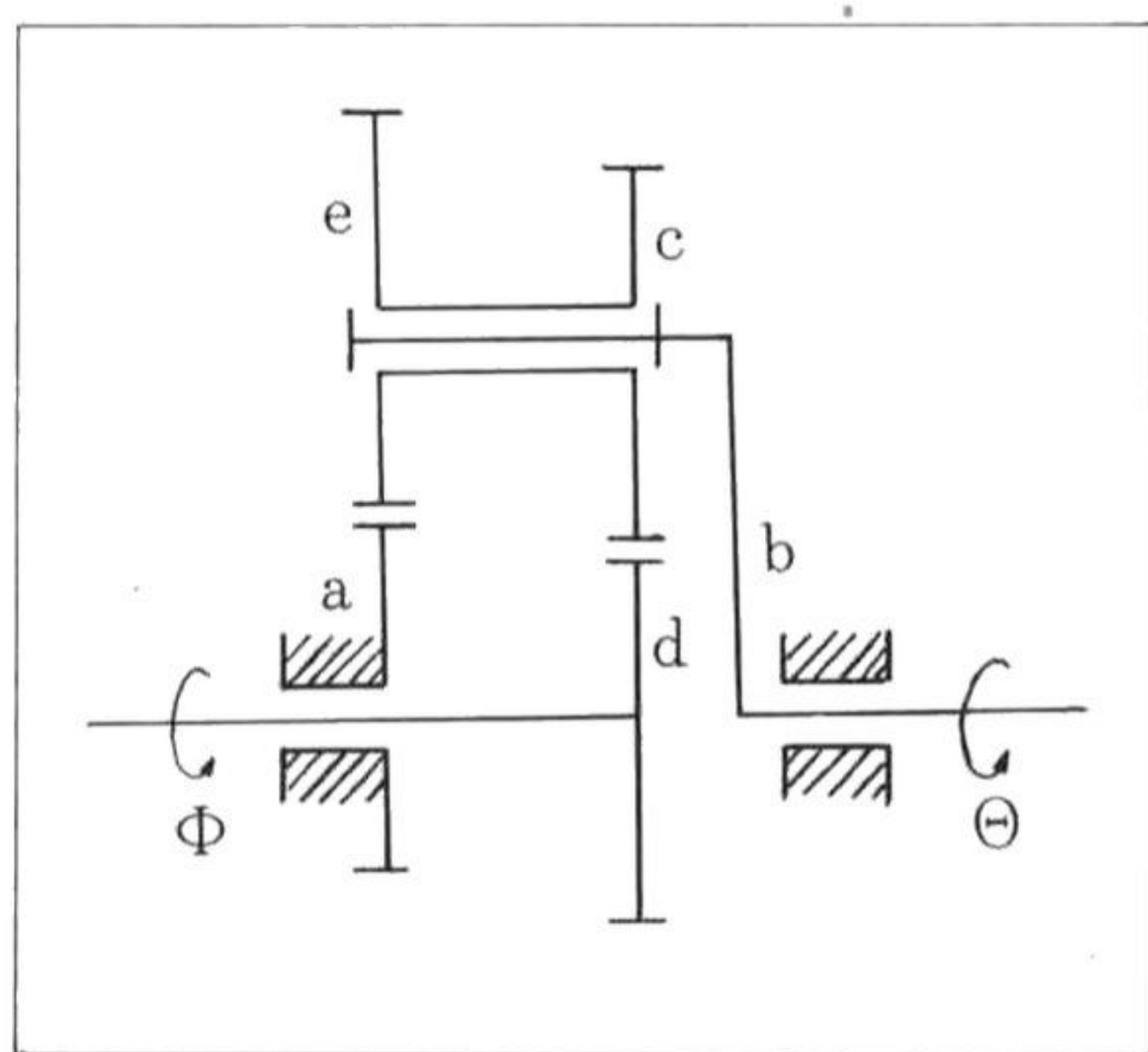
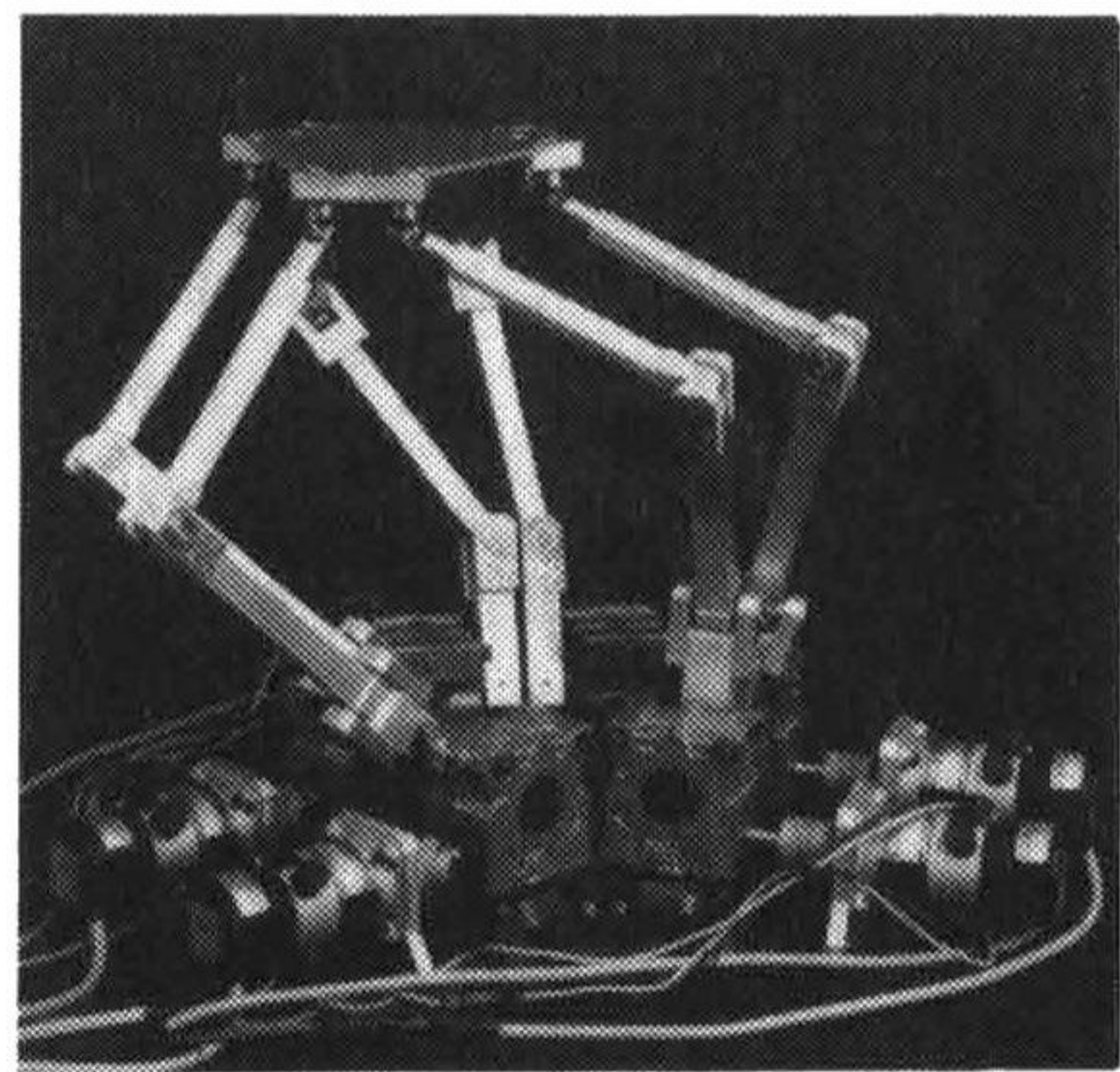


図-1



パラレルマニピュレータ

## 「歩く機械」を製作する

次に応用面でのテーマについて述べたい。その内のひとつが4年ほど前から取り組んでいる、福祉用歩行機械「歩行椅子」の研究である。現在我が国だけでも約40万人の下肢障害者がいる。そしてその人達の多くは移動の際に車椅子を用いている。しかし車椅子では階段、凹凸のある道などの段差のある所での移動が困難である。又、便利な電動車椅子は大変高価でもある。そのため、段差のある所でも安定な状態で自由に移動できる福祉用歩行椅子の研究開発を行っている。この歩行椅子も車椅子同様人間の力で動く。人間が駆動用ハンドルを回し、その力を脚機構に伝えるのである。水平直進方向に必要な運動を得るためのリンク機構と、段差の昇降のときに脚部の上げ幅、歩幅を変えるためのリンク機構の2つをパンタグラフ機構の入力部に結合して脚機構を構成している。パンタグラフ機構は2自由度平面機構で、しかも閉ループ機構であり、アクチュエータを静止節に配置できるという特徴をもったリンク機構である。さらに通常の歩行だけでなく階段や坂道の昇降の際にも、椅子本

体を水平に保つ機能が付けられている。今後も改良を重ねて、最終的には自転車並みの単純な構造、操作のしやすさ、軽さ、低価格を実現し、一般に普及できるものにしようとしている。この研究は先生御自身も最も期待しておられるものの一つである。

もうひとつの研究が2足歩行ロボットに関するものである。一般の歩行ロボットは各関節にもモータを置き、それらの協調により、足の運動を創り、姿勢の制御をしている。しかし舟橋研究室では、脚機構と姿勢制御機構を連動はするものの別の機構で構成し、又、脚機構を閉ループリンク機構としている。前者の利点は脚機構の運動を決めるときにバランスのことを考えずにすむため、脚機構の運動とロボットの歩行運動が直結することである。又後者の利点は、各関節の情報(ソフトウェア)をリンク機構(ハードウェア)に置き換えているため制御が容易であることと、モータを腰部上に置けるため運動部分が軽量になるという2点である。



## 改良されつつあるロボット製作

本研究室のロボット製作も人間の歩行の解析から始まった。人間が直進するとき各関節が一定周期の変化をすることが分かり、これを基にロボットの各関節の動きを決め、機構総合して、各脚に2つの6節機構からなる脚機構を作り、又、人間が

歩行時に上体の重心を8の字状に移動させていることから、8の字運動をする姿勢制御機構を作った。こうして出来たMEG-2という名の歩行ロボットは、未だに世界トップクラスである一定歩幅26cm、速度75~120歩毎分(20~30m/min)という高速



で安定な直進歩行を実現した。このMEG-2は連動する脚機構と姿勢制御機構及び、外乱に対する副姿勢制御機構で構成され、わずか2つのモータで駆動されている。定常歩行については成果のあったMEG-2だが、歩行開始、終了動作ができない。そこで歩幅変更機構を有し、両足を揃えた状態から歩行を開始して定常歩行に至り、再び両足を揃えて歩行を終了することのできるMEG-3が試作された。MEG-3に付与された歩幅変更機能は、本研究室で開発された原動節長調整機構によって実現された。この機構はリンク機構の原動節の長さを回転中に変化

させ、必要な運動の変化を実現するものである。この機構のため、足部の運動軌跡をほぼ相似形に拡大・縮小することが可能になった。このためにMEG-3は全部で5個のモータが必要となったが、他で研究されているものよりもかなり少ない。しかし、それでも制御部はかなりの大きさになっている。これを将来的にはロボットの上に置き、人間型ロボットにしたいそうだ。現在は、坂道や階段の昇降機能、旋回歩行機能を持つ脚機構の研究、歩行中の外乱に対する姿勢制御の研究を行っている。



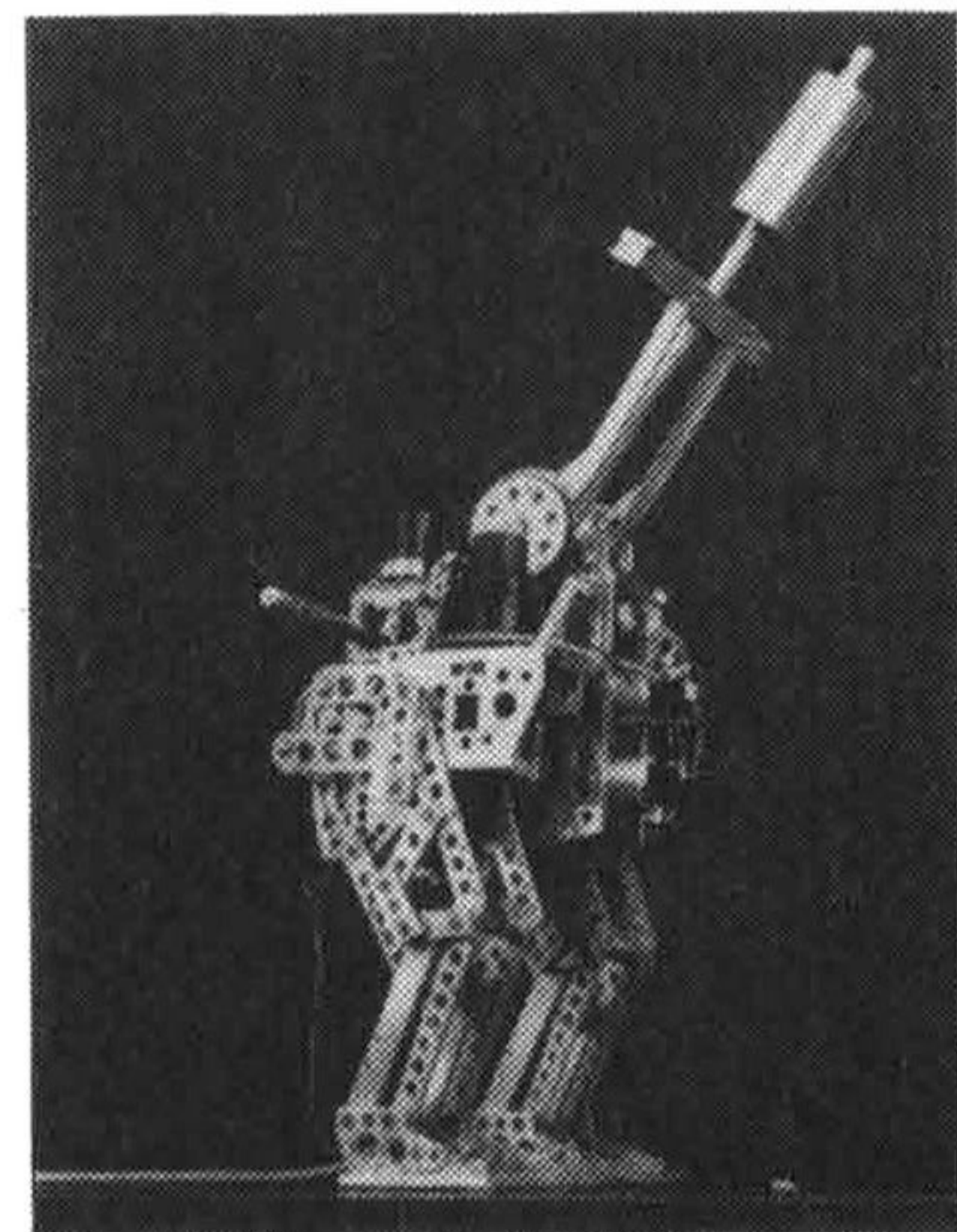
## 新しい機械を開発する

他に本研究室では、リニア誘導モータによる位置決めの研究もしている。誘導モータは他のモータに比べて位置決めが困難といわれていた。しかし、誘導モータの位置決め特性を解析し、摩擦特性、推力特性を算出し、安定した位置決めを確認した。現在はリニア誘導モータを使って平面板の位置決めの研究を行っている。平面板を置く台にハの字型にリニア誘導モータを2つ取り付け、あらゆる方向に平面板を移動させ位置決めをしようとしている。

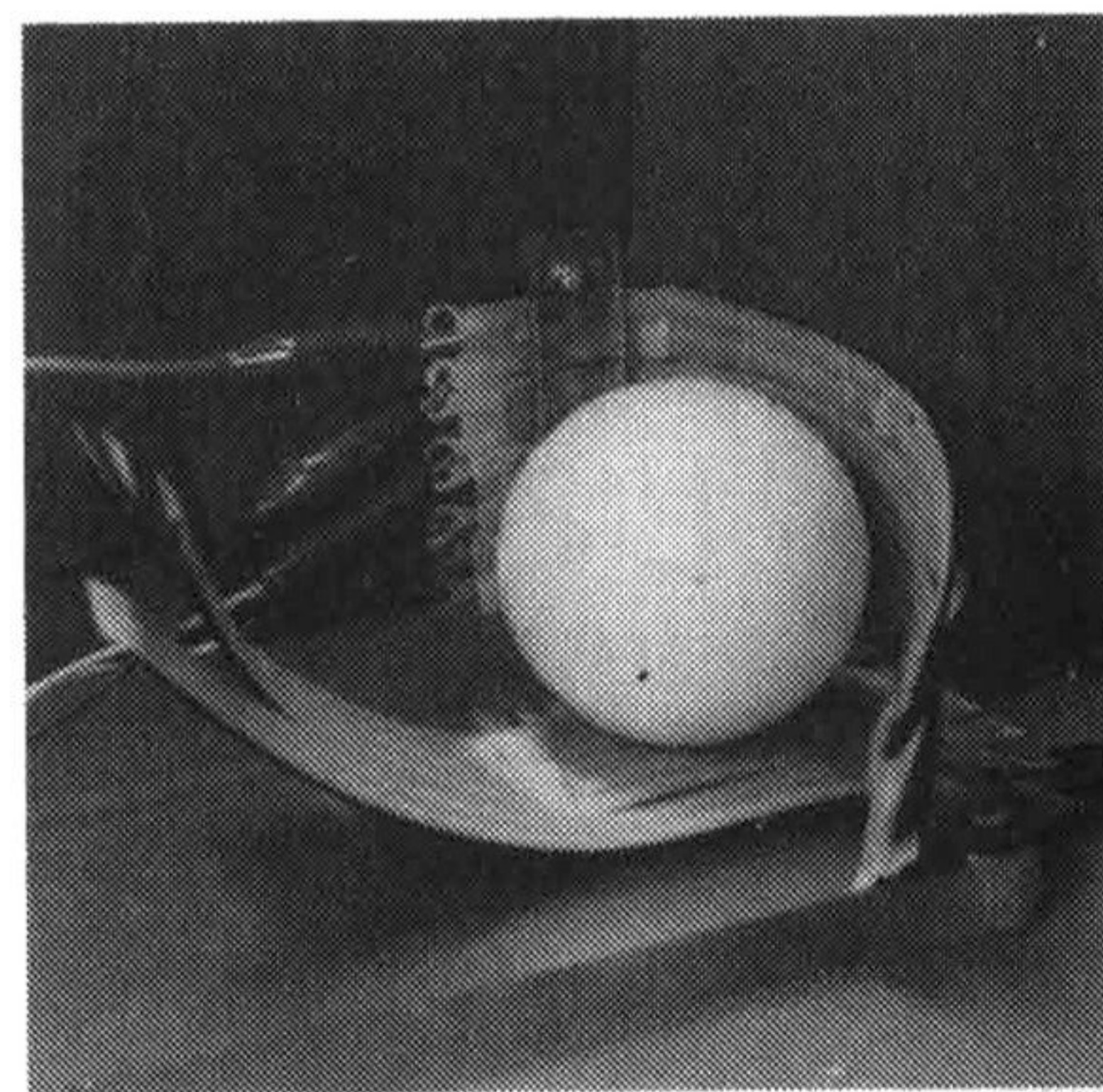
最後に最近始められたばかりの柔軟ロボットの研究について述べたい。従来のロボットは骨に当るリンクと

筋肉に当るアクチュエータを持つものが一般的であった。しかし、実際のアクチュエータは出力/重量比が小さく、リンクを多くすると自重のため動けなくなる。そこで軟体動物のように骨のない、アクチュエータ自体が構造体となっているロボットの開発をしようとしている。このロボットは文字通り柔軟なため、暴走などをしていても安全であり、更に、多自由度ロボットも実現できる可能性もあり、将来が期待されている。まだその端緒であるが、ゴムに形状記憶合金を貼り、それをアクチュエータとして人間の手指のようなロボットの開発を試みている。

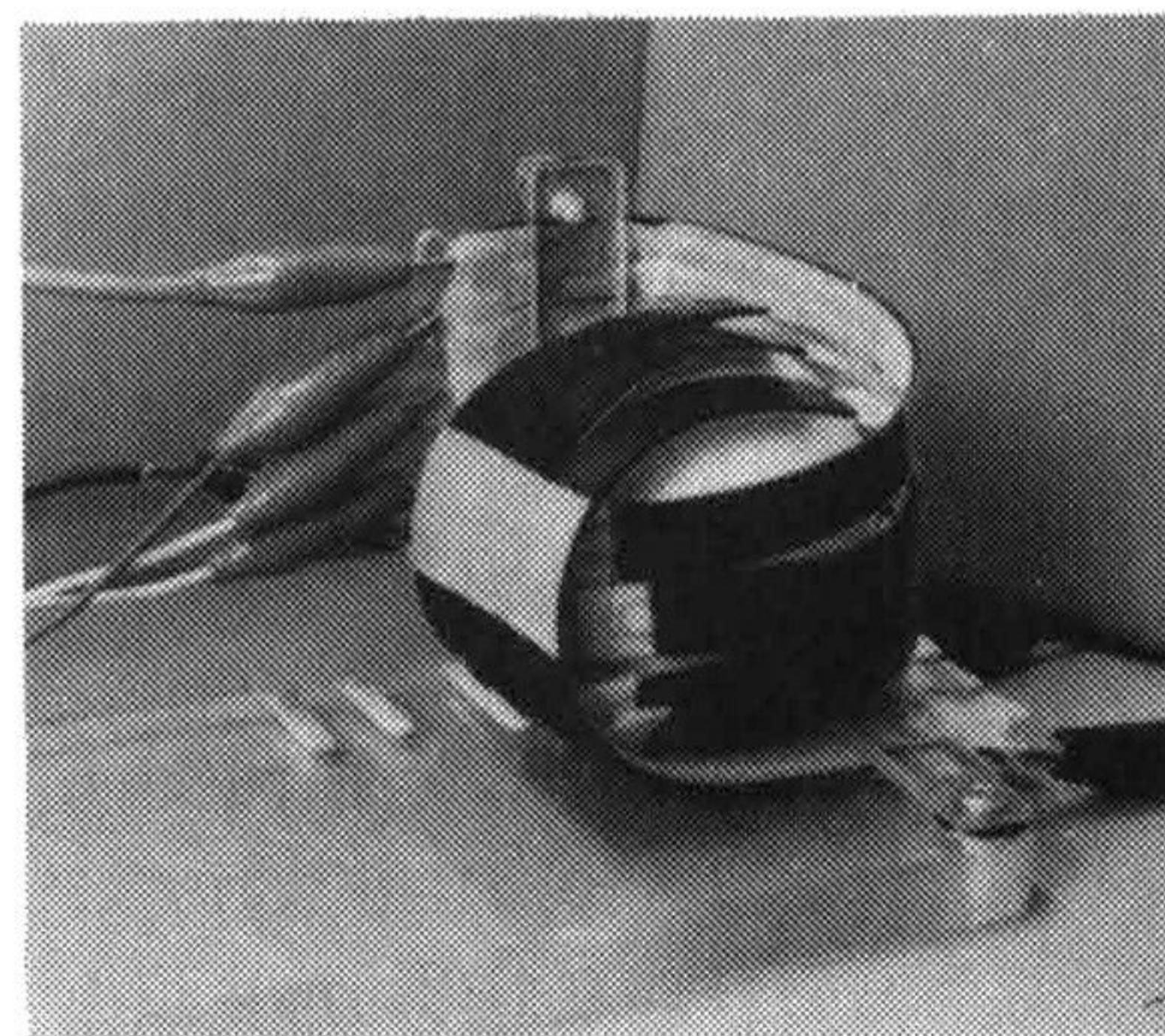
(鳴崎)



MEG-3



柔軟ロボット ①



柔軟ロボット ②