

本田財団レポートNo.29

「産業用ロボットに対する意見」

東京工業大学教授 森 政弘

本田財団レポート

No.1	「ディスカバリーズ国際シンポジウム ローマ1977」の報告	昭53.5	No.16	コミュニケーション技術とその技術の進歩	昭55.5
	電気通信大学教授 合田周平			MIT教授 イシエル デ ソラ プール	
No.2	異文化間のコミュニケーションの問題をめぐって	昭53.6	No.17	寿命	昭55.5
	東京大学教授 公文俊平			東京大学教授 古川俊之	
No.3	生産の時代から交流の時代へ	昭53.8	No.18	日本に対する肯定と否定	昭55.7
	東京大学教授 木村尚三郎			東京大学教授 辻村 明	
No.4	語り言葉としての日本語	昭53.10	No.19	自動車事故回避のノウハウ	昭55.10
	劇団四季主宰 浅利慶太			成蹊大学教授 江守一郎	
No.5	コミュニケーション技術の未来	昭54.3	No.20	'80年代—国際経済の課題	昭55.11
	電気通信科学財団理事長 白根禮吉			日本短波放送専務取締役 小島章伸	
No.6	「ディスカバリーズ国際シンポジウム パリ1978」の報告	昭54.4	No.21	技術と文化	昭55.12
	電気通信大学教授 合田周平			IVA事務総長 グナー・ハンベリウス	
No.7	科学は進歩するのか変化するのか	昭54.4	No.22	明治におけるエコ・テクノロジー	昭56.5
	東京大学助教授 村上陽一郎			山本書店主 山本七平	
No.8	ヨーロッパから見た日本	昭54.5	No.23	西ドイツから見た日本	昭56.6
	NHK解説委員室主幹 山室英男			電気通信大学教授 西尾幹二	
No.9	最近の国際政治における問題について	昭54.6	No.24	中国の現状と将来	昭56.9
	京都大学教授 高坂正堯			東京外国語大学教授 中嶋嶺雄	
No.10	分散型システムについて	昭54.9	No.25	アメリカ人から見た日本及び日本式ビジネス	昭56.10
	東京大学教授 石井威望			オハイオ州立大学教授 ブラッドレイ・リチャードソン	
No.11	「ディスカバリーズ国際シンポジウム ストックホルム1979」の報告	昭54.11	No.26	人々のニーズに効果的に応える技術	昭57.1
	電気通信大学教授 合田周平			GE研究開発センターコンサルタント	
No.12	公共政策形成の問題点	昭55.1		ハロルド チェスナット	
	埼玉大学教授 吉村 融		No.27	ライフサイエンス	昭57.3
No.13	医学と工学の対話	昭55.1		㈱三菱化成生命科学研究所人間自然研究部長 中村桂子	
	東京大学教授 渥美和彦		No.28	「錬金術 昔と今」	昭57.4
No.14	心の問題と工学	昭55.2		理化学研究所 地球化学研究室 島 誠	
	東京工業大学教授 寺野寿郎		No.29	「産業用ロボットに対する意見」	
No.15	最近の国際情勢から	昭55.4		東京工業大学教授 森 政弘	昭57.7
	NHK解説委員室主幹 山室英男				

講師略歴

森 政弘 (もり まさひろ)

昭和2年 三重県に生まれる。

昭和25年 名古屋大学工学部電気工学科卒

昭和28年 東大生産技術研究所

昭和34年 東京大学助教授 (生産技術研究所)

昭和44年 東京工業大学教授、現在に至る。

専 攻 制御工学、ロボット工学

著 書 ロボットーその技術と未来ー (日本放送出版協会)

「非まじめ」のすすめ (講談社)

発想工学のすすめーやわらかい機械ー (講談社)

The Buddha in the Robot (佼成出版社)

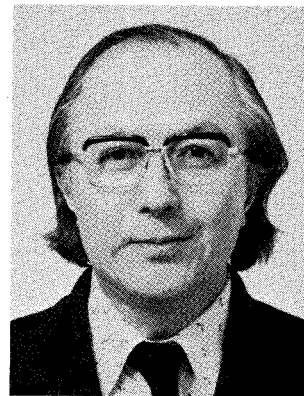
千輪車の発想 (講談社)

はじめ多くの著書がある。

このレポートは昭和57年3月23日、パレス
ホテルにおいて行なわれた第22回本田財団
懇談会の講演の要旨をまとめたものです。

はじめに

今日、産業用ロボットの技術というものは世間で話題になっている程には、実は進んではおりません。要するにやっている事というのは、シリンダーが伸び縮みして、それをマイコンでコントロールしている、と極端にいうとそれだけの事です。しかし、何についてもいえることですが、時が来た時にそれを活用するというのが本来の姿勢でしょうから、到来した時の流れを活かして、今こそ一気に産業用ロボットの技術を育てて行く時が来たと思っています。



現在のロボットの改良すべき点

●止まる時の動き

そこで一番手短かな問題から申します。

皆様方がロボットの動きをご覧になって一番怪訝に思われる所、うまくない所は、特に油圧で動かしている物に見られるのですが、動いている腕なら腕が止まる寸前にブルブルと震えて止まるという点です。あれ、なんとかならないものでしょうか。その点がまずは非常に見苦しいのです。またさらに一つの動作が終るまで次の動作に入れないという事も問題です。

たとえば手に持った物を少し先の床の上に置くというような仕事をする時、われわれ人間ですと目的の場所に近づきつつ手に持ったものを下げにかかるということをするのですが、まだ今日のロボット一般では、体が目指す場所に到着して完全に停止してから手を下げにかかるというふうに仕組まれているわけです。それで随分作業時間がのびています。

晴海などで行なわれるロボットショーで腕が止まる時の振れを見るだけで、そのメーカーはどの位ロボットについての経歴があるかという事がわかる位です。さすがにユニメート社などの製品には振れがありません。サァッと美事に止まります。我々人間の場合手を止める時に振えるという事は病気の時以外まずありません。まずこの点を何とかしなければなりません。この現象は特に油圧で動かしているものに多いのです。空気圧と違って油には圧縮性がありませんから。この点ぜひ油圧屋さんに頑張って頂きたいわけです。

電気、油圧、空圧、の3つを比較しますと、電気の領域はここしばらくの間に減法進みました。ところが油圧、空圧はおいてきぼりをくっている様な感じがします。

●重量

次に、ロボットの重さも問題です。ちょっとした産業用ロボットは、重量が500kg から1 tです。そのロボットの体重に比してそれがとり扱っている物体の重量は何と、せいぜい30kgです。そして1 m位腕を動かして止めた所の位置決めの精度がコンマ何ミリと言うような事を問題にしているのが現状です。

参考のため我々の体を振り返ってみても、手の位置決めの精度というのは1 cmにも至らない位低いのです。しかしそれでいながら精密な手作業をやっているわけです。重さにしても、我々の体では自重と同じくらいの重さのものが運べます。無理すれば人間は人間一人を運べます。弱い人でも、30kg位は持てます。ところがロボットの場合、1 tのものが30kgしか持てないと言うのはどうした事でしょうか。ですから産業用ロボットの努力目標は自重と同じ重さの物がハンドリングできるという所に置かなくてはならないと、私は思っています。

そう考えて行くと、腕を金属で作っているようでは限界があるのではないのでしょうか。もちろん軽合金を使ったり色々工夫されていますが、生きた骨と比べてみると力学的な性質が全然違います。そこで私も、特に炭素のFRP、CFRPを使ってとにかく金属からの脱却を計ろうとしています。今日一番入手しやすい炭素繊維のFRPで全部作ってみたらどうなるでしょう。全部ガラスで自動車を作ったとか、FRPだけで自動車を作ったとかいう話はよく聞きます。しかし、全部FRPで作ったロボットというのはまだ聞いた事がありません。FRP自動車は外国で作ったようですが、まず日本でとにかく一つCFRPロボットを作ろうと、私は努力しています。

●モーター

— パワー —

一方、電気モーターの制御は最近非常に楽になったので、油圧が担当していた範囲のうち力の弱い部分は、電気に換わりつつあります。そうは申しても、モーターの原理となっている力と言うのはご承知の様に電磁力です。ですからモーターは鉄の塊とたくさんの銅線でできています。われわれの筋肉と同等の力を出させようとしますと磁場の強さを今の100倍位上げたいのです。しかし、そうはいきません。そのような目標を達成するには普通の鉄ではだめなので、新しいアルニコの類とか、レアアースと言っていますが、希土類磁性体を持って来ればなんとか10倍位には上ります。更に、ローターとステーターの間のギャップをどこまで縮めうるかと言う事になって来ますが、いくら頑張ってもトルクは今のモーターの20倍位にしか上らないでしょう。

どこまでパワーをモーターに無理して押し込む事ができるかという事は、結局は温度で決まります。入れるだけでよいのならばモーターが溶ける寸前

まで入ります。だがそのような無理をさせますと、パワーをパルスのに一発ブチ込んだ後、冷えるまで次のパルスがブチ込めません。ですから連続してボンボン使うわけにはいきません。すると超伝導を持ち込んだモーターを作ろうというような話になって参りますが、今すぐには超伝導が小型になる見通しはありません。という事で、電気モーターの限界もある程度目に見えています。

— 低速性 —

しかもご承知の通り、電気モーターでは低速の大トルクというものは作りにくいのです。高速回転のものならば非常に楽にできます。ところが、高速回転のモーターを使って、手を動かす、足を動かすとなると、必ず減速機が必要になります。しかし下手をすると減速機の方がモーターより重くなってしまいます。

ところで、減速機といえば歯車を使うのが普通でしょうが、私は歯車を見るたびに妙なバカバカしさを感じないではいられないのです。それは歯車をよくよく見ると働いている歯というのはいつもたった一つだという事なのです。円周に沿って歯がぐるーっとついているわけですが、瞬間瞬間を見れば働いているのは一歯だけなのです。あとの歯は皆遊んでいるだけというよりも、その瞬間に働いている一歯の重荷になっているわけです。1グラムでも軽くしたい。ビス1本でも省略したいというくらいに軽量化で苦勞しているロボットの場合、歯車のこのような現実といいますか、事実というのは、まことに耐え難いものです。電気モーターでやる場合には、そんなものを使って減速するわけですから、それだけまた重くなってしまうのです。

— 自由状態の必要性 —

重くなるだけならまだよいのですが、さらにこういう問題が生じます。これまでのロボットや一般の機械には、普通は、「駆動」と「保持」の二つの状態しかありません。例えば、機械に電気を通すとモーターが回って、「駆動」します。電流を切っておくと、ブレーキがかかった様な状態でホールド、つまり「保持」していて、他から動かされてもなるべく動かない様になっています。ところがロボットではフリーという状態がいるのです。「自由」状態。早い話が手がブランブランの状態です。他から押された時にすんなりと従って行く状態というのがいります。

金槌で釘を打つというそれだけの動作を考えても、「駆動」「保持」に加えて「自由」という状態がいることがおわかりいただけると思います。金槌を上げて振り下す時、まずは「駆動」です。金槌に勢いをつけています。金槌が釘に当たる前には、「自由」状態でなくてはなりません。つまり、せっかくついた勢いを殺さない様に手の方が金槌について行くためです。それで釘に当たったとたんに、握りしめて「保持」というわけです。

このようにロボットにとって大切な自由状態、つまり押されたらすんなり

従うという事をするのに、減速機が付いていると押されても従わないのです。これではどうしようもありません。

ロボットの動きと構造

コッペリアというバレエがあります。プリマドンナといいますか、主役はロボットです。それを踊るバレリーナはわざわざ機械の様なぎこちない動作の練習をするのです。機械の動きというのはそれに象徴されているのですが、実は、私はこれからの機械はあの様な動きではだめだと思っています。

現在の機械の動きは普通、時間を横軸にとり、速度を縦軸にとった時に、図1の実線のようなパターンを示すのが普通です。つまり、いきなりガンと加速して（A部）、ついで一定速度で動き（B部）にわかにガチャンと止る（C部）。コンベアでも、普通の自動機械でもそうです。特にひどいのは自動車の駐車場です。力は加速度に比例し、加速度は速度の微分ですから、AとCのところで非常に大きな力がパルス的に機械にかかることになるわけです。それを構成している力学的材料のメンバーといいますか、部材にはこれに耐えるだけの強さが要求されます。この点も軽量化に反する結果をもたらしています。

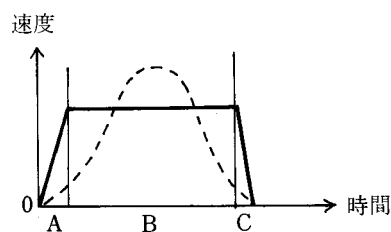


図1 これまでの機械の動きと
Cybernetic Motion

一方、われわれの体を眺めれば、そのようなスピードパターンを持ってはいないことがすぐわかります。我々はペンを持って1cm線を書くだけでも、図1の破線のように、フワーと動かします。加速度パターンはこれの微分ですから、非常に滑らかな格好で、パルス的に力がかかるというようなことはなく、部材は弱い物で十分だというわけです。

われわれの体の場合、とにかくこれだけの骨ですぐ強い事をやっているというのは、骨そのものの絶妙な構造に加えて、図の破線のようなスピードパターンで動かしているからともいえるのです。ですからロボットの高速度化、そのための軽量化のためには、ぜひこのような動きを導入すべきです。このようなスムーズな動きをCybernetic Motion といいます。

それから、Growth Factor ということも考えておく必要があります。つまり、一ヶ所を軽くすると、全体がその何倍も軽くなるということです。ロボットでは手先を1kg軽くすると、体重でほぼ100kgは軽くなります。手先の重量を減らせば肘が楽になり、さらに肩はぐっと楽になります。腕は極端なこの構造をしていますから、この楽になり方というのは大きいのです。ですから手先をちょっと軽くできれば腕全体はその何倍も軽くなり、さらにそれを動かすモーターも小さくてよくなりますから、もっと軽量化できるこ

とになるのです。

ところで、鞭打ち症というのは、直前にぶつかるといふ事を知っていてぶつかられた時は軽く、知らずにいきなり来た時は重いといわれています。そうすると腕の強度も、どうやら骨だけの強さではなさそうです。筋肉の力を含めた強さの様です。腕を例にとっても、骨の両側に筋肉は互に拮抗するようについています。当たるぞと思った瞬間に、そのどちらかがうまくパンと締まるのではないのでしょうか。これを逆に締めたら、自分の筋肉で自分の骨を折る事になるだろうと思います。筋肉はそれ位強いものですが、そういう筋肉込みで力は強くなっているようです。このような点は、現在のロボットではまるで考えられてもいません。

さらに骨を見て行くと、骨にはまん丸とか、まっすぐという形のものはどこにもありません。骨には、定規をあててピタッと合うような個所はどこにもありません。断面を見ても施盤でひいた様な丸はどこにもありません。すべて不定形です。さてその秘密を我々はどの様に読めば良いのでしょうか。これは本当に難しい問題ですが、これからの機械では円と直線からの脱却を計ったかどうかと考えています。

また、部品と部材の一体化ということもこれからの課題です。例えば、今までの様に電気のモーターというものが単独で存在し、それを腕の中に入るとか、油圧のシリンダーがあってそれを組み込むとか、そういうようなセンスでは軽くはなりません。そうではなく、例えば油圧シリンダーそのものが腕の構造材を形成している、と言う風にしないと、ロボットの動きを高速化するという事はできないと思います。

人間の動きに比べて今のロボットの動きは遅いし、独特の見苦しい動きのパターンを持っています。少なくともその点だけでも何とかしないといけないというのが、今すぐの課題だと私は思っています。

いろいろなロボットの実例と所感

（ここで、映画によるいろいろなロボットの紹介があった。以下はその）
要点です。

ー プレスへの鉄板供給ロボット ー

動きをよく観察すると、腕がパツと止った時に、手先がブルンブルンと振動する。よく研究されたロボットの手では、このような悪振動は見られない。開発がおくれているほど、振動するといえるくらいである。振動が消えるまで次の動作に移行できないから、作業がおそくなる。また、一般のシーケンスロボットについていえることだが、1つの作業（例えば腕を伸ばすなら伸ばすという作業）が完了するまで、次のステップ（例えば腕を右へ回転させる）へ移らない点が問題で、これがまた輪をかけてロボットの動作をのろまにしている。人間だと腕を伸ばしながら、右なら右へ回転させるというふうに、2つの作業を平行してやっている。この点を今後のロボットでは、真剣に考えなくてはならないと思っている。

— 初期の触覚のある指 —

10数年前に井上博允君が東大の大学院生の頃に作った触覚のある指は、組立てロボットの走りでした(図2)。穴に棒を刺すという作業です。例えばナットにボルトをはめるというものです。彼は我々がやる通りをゆっくりロボットにさせました。無理やりボルトをナットには突っ込みません。探り探り行って、はまった事を検知してからボルトを立てて押し込みます。これをじかにやろうとするとかじってしまいます。井上君は大学の研究室レベルの仕事としてやったわけですが、それが最近現場レベルでできるようになりました。棒を穴へはめるのに、ほぼねらって棒を降ろし、棒の先がちょっと穴のはしに当たりますと、すっと微調をして棒が無理なく穴に入るように押し込みます。機械の触覚のおかげです。

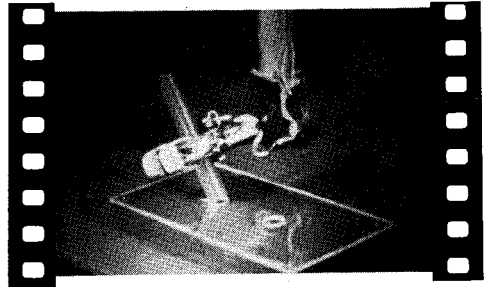


図2 井上博允君の手

— 自動糸つぎロボット —

これは製紡機の間を毎分15mの速さでパトロールし、光電管によって糸切れを発見すると、ただちに停止して糸つぎを行なう自動糸つぎロボットであります(図3、図4)。

糸つぎ動作はこうであります。

まずリングレーブに糸つぎサドルがのり、同時にスピンドルに制動をかけて減速して空気流で他の補給糸を木管に巻きつけ、次にスピンドルを停止させ、親指と人差し指の様な格好で小さな機械の指の運動と、それに加えて空気の流れでトラベラーへの糸通しを行ないます。それからスピンドルを回転させ、ピーシング装置が紡出中のフリースに糸つぎを完了させるのであります。この1サイクルは15秒で、糸つぎが完了すると、またパトロールを開始するのです。私は、これは日本が世界に誇るべき立派な工業用ロボットだと思っております。最近のものはこの映画のものよりも、もっとよくなりました。ほとんど電気を使わずに全部メカで処理しています。大変なものです。

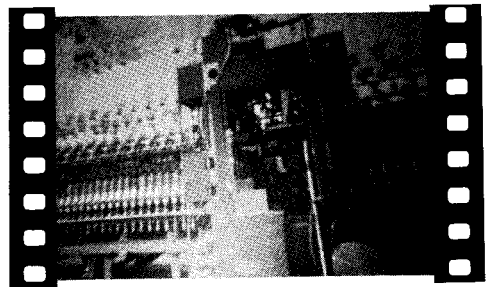


図3 糸つぎロボット全体

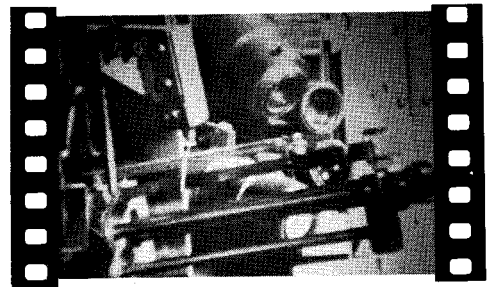


図4 糸つぎロボットのメカニズム

— 塗装用ロボット —

以下は、この秋東京でありましたロボットショーの中から2つ3つ選んで参ったものです。まずはおなじみの塗装用ロボットです(図5)。ご覧の様に、当然の事ですが、我々が今作り得るロボットでは、腕の太さは手先に行く程細くなっています。肩が一番太くてひじに行くともっと細くなり、そこから更に手首へ行くともっと細くなっています。そういう物しか我々は今では作れません。あとでスライドでお目にかけます様に、天然の物にはその逆の物があります。カニの腕の様な物です。カニの腕は付け根が細くて先のはさみが太くなっています。それで、どうしても上下方向の剛性が大事になるので、この様に横方向は薄く縦方向は厚いという形の腕が作られています。これなどは止まり方は結構上等だと思います。



図5 塗装ロボット

— LSI、IC用のロボット —

それから、これは日本電気のものとして、LSIとかICとかそういうものを取り扱う小さいロボットです(図6)。

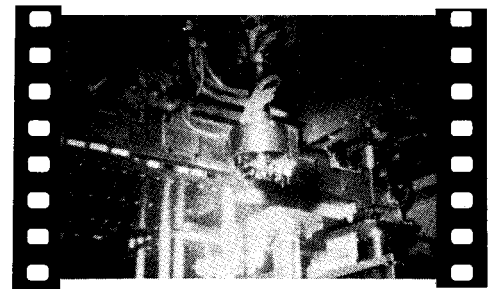


図6 LSI, IC用ロボット

— ウェイトレスのロボット —

その日電さんもショーをやっていました。これはむしろ動きそのものよりも、頭腦的な点のデモでした(図7)。どんなジュースが欲しいですか、とお客に尋ね、お客がしゃべった声を認識してお客がほしがっているジュースの種類を判断します。そして、まずコップを置いて、しかるべきジュースのある所へ腕を伸ばします。そのジュースのビンがある位置というのは、前に取り出した所の隣ですから、そこへ行かないと次のジュースは取り出せないわけで、それがやれるように前回の位置を記憶していて、それなりにプログラムしてありました。ジュースのビンの栓を抜き、コップについでから2~3回ビン振って、一滴までもついでからビンを空きビンの箱へ移すのですが、それも順番に前のとぶつからない様に置いて行きます。

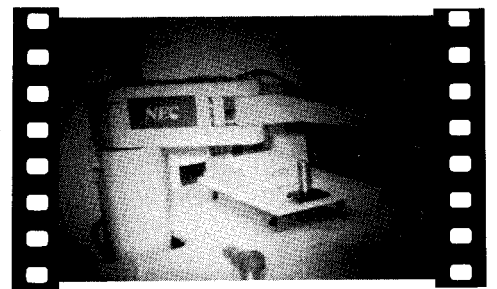


図7 ジュースサービスロボット

これはこれで非常に大変な努力ですが、どうしても今日のロボットを見ると、郵便配達の方が葉書を一枚運んでいるような気がしてしかたがありません。それはこういうことです。郵便配達さんは、たしかにはがきを運んで来るのに違いないのですけれど、力学的に見た時には、はがきを運んで来たとはいえません。では何を運んで来たのか。それは自分の体を運んで来たのです。はがきが付いていても付いていなくても目方はほとんど変わりません。自分の体重が60kgなら60kgの物を運んで来た事になります。これと同様に、エネルギーの面だけに注目してロボットの作業を眺めると、動かしている物は自分の体だけと言って良い位、手先で運ぶ物体は軽いものしか扱えていません。ところが、ロボット屋さんでない方が作ると別の物ができて来ます。それは、後で出て来ますが、豊屋さんのロボットです。

— Motoman —

こんな中でさすがに歴史があると思うのは、この安川電機のロボット Motoman です（図8）。これは電気で制御されている物のうちでは動きが一番速いのです。安川さんは電気が専門ですから、大きなモーターを動かして、これだけの見事なことをやっておられます。

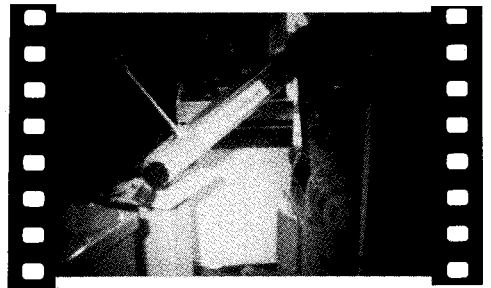


図8 安川電機 Motoman

— 掃除ロボット —

これはオートマックス社の掃除ロボットです（図9）。ビルの掃除会社から、夜中に人手でビルの中を全部掃除するのは大変だからロボットでやる所はやれないかという話がありまして、私の友人の松原季男君が試作した物です。これはでたらめに動いています。とにかくでたらめに動かしていれば、必ず全域を一度はは通るであろうという大変甘い—いや妥当な—考えに

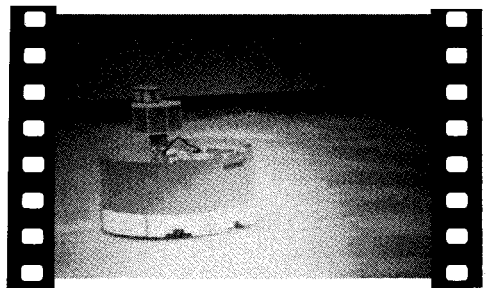


図9 オートマックス社 掃除ロボット

基いたものです。掃除部としては真空掃除機ですと、相当な勢いで、ブローアを回さなければなりません。するとバッテリーで動かしてますので、たちまちバッテリーが上がってしまいますから、ブローアを使わずにほうきで掃き寄せて行く方式を採用しています。段差のある所に落ちると危いので、たとえば階段へ来たら、それなりの検出を行なって落ちない仕組みになっています。

— 畳ハンドリングロボット —

これが先程お話した奈良の畳屋さん
中西吉光さんの作品です（図10）。これそのものはロボットではありませんが、ロボット技術者が見習うべき大切なものが含まれています。奈良の畳屋さんが奥さんでも畳作業ができる様にと作られたものです。立ててある畳にさっと針を突き刺し、重心のあたりを把握して水平に倒して奥さんの前まで持って来る。これは自重とほぼ同じ重さの物をハンドリングしているという点が素晴らしいと思います。

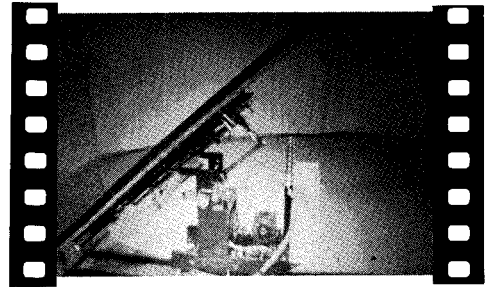


図10 中西吉光さん作の
畳ハンドリングロボット

— でこぼこを歩くロボット —

これはうちの学生が6年位前に作ったものです。でこぼこの所を歩くものを作ってみなさいといいましたら、こんなものを作りました（図11）。

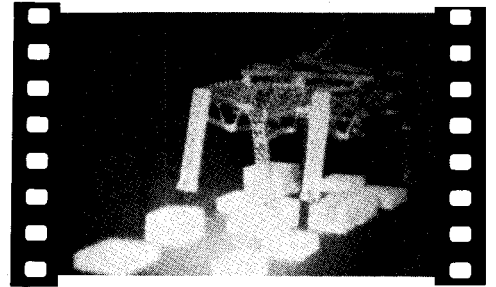


図11 両沢・山下両君の6足歩行機

— でこぼこを歩くロボット改良型 —

これはその翌年の学生が改良したものです（図12）。これは垂直の検出を持っています。体が傾いても自分で持ち直して次に進みます。この制御用コンピュータのソフトは大変でした。あんまさんが歩く様な方式で、いちいち探りながら進みます。更に面白い事に、昆虫は足が1本抜けても歩いて行く様に、このロボットも6本のうち1本の足がケガをした位では歩いて行くのです（図13）。残りの5本でどうやって歩くか。それなりのプログラムを組んで歩かせます。



図12 辻君の6足歩行機

こういうものを見ましても、パワーサプライは全部外付けです。この点も今日のロボットの大問題なのであります。自分が電源とか動力を持って動く

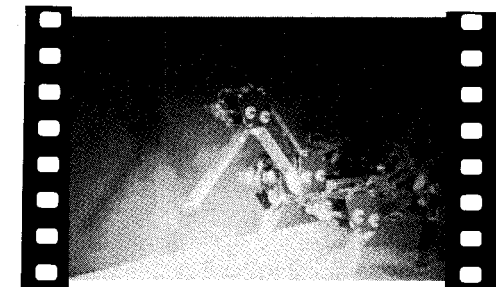


図13 辻君の6足歩行機
（足を1本怪我したところ）

わけではありません。それをさせようとするとは結局発動機しかない事になります。

— 保護色ロボット —

これは保護色ロボットです（図14）。2本の線の上に体があります。見つからない様にするには、2本の線をインターボレーションして背中に出さなければならぬので、背中にいくつかホトダイオードを置いて、そこに2本の線が現われて来るというものです。このロボットは動かないロボットですが、腹の下の模様を背中に出せる様になっています。

ロボットを手で持ち換えて角度を変えてみますと、初めは前の線が残っていますが、段々と新しい模様が変わって参ります。保護色というのは動物の特性でしょうが、何か非常に植物的な中枢のないシステムのように思われてなりません。

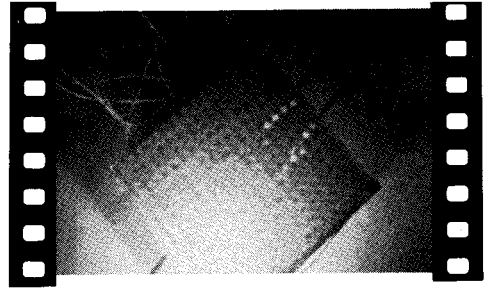


図14 谷上君の保護色ロボット

— 群れを作るロボット —

これは私が沖縄海洋博に出展した群れを作るロボットです（図15）。これは背後に大型のコンピューターがあってコントロールしているというのではありません。同じ7匹を作ったただ部屋の中に置いておくと、非常に面白い群れを作ったりパニック現象を起こしたりします。今これは震度6位できりきり舞いしています。環境を変えると

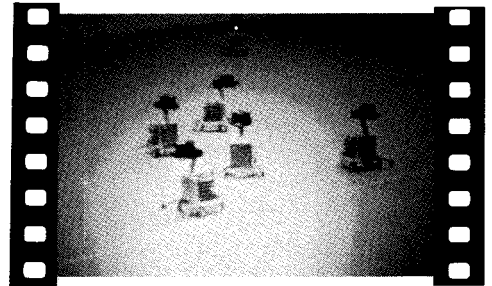


図15 三つ目むれつくり

——環境といっても高周波電流を流した電線ですが——その形で拳動が変ってきます。これは単純な社会現象を見るのに、とても面白い材料になると思っています。本当に池の中でコイが泳いでいる様なパターンです。特に外でコントロールしているのではありません。ひとりでにこうなるのです。もう一度やって欲しいといわれても、同じパターンはできません。人為的にではなく、ひとりでにこのような群が出来ていくのです。

（映画終わり）

ロボットの動きを良くするために

さて、私が今一番考えている問題を皆様に披瀝させて頂いて、ご意見を伺ったり、もしお気付きの点がありましたらお教え頂きたいと思います。これはロボットの動きを少しでも良くしたいと思って考えている事です。

●人間の感覚の仕組

人間の手に針が刺さったとします。当然痛いわけです。その針を刺すと痛いというしくみをロボットに置き換えてみます。まず、ロボットの手に針が刺さったという事を検出するセンサーがいます。センサーが感じた事をロボットの頭脳に恐らく電線で持って行くでしょう。頭脳には、最近はやりのマイコンでいうとCPU（セントラル・プロセッシング・ユニット）というコンピューターの中枢部に、RAM（ランダム・アクセス・メモリー）という記憶素子がいくつもぶら下がっていて、図16 (b) のような格好になっています。そのうちの1つに、センサーを担当しているRAMがあります。手に針が刺さると、もちろんセンサーは働きます。CPUも動き出します。そしてそのセンサーを担当しているRAMの中のメモリーが変わります。普通に考えると、ロボットではこういう仕組みになると思います。

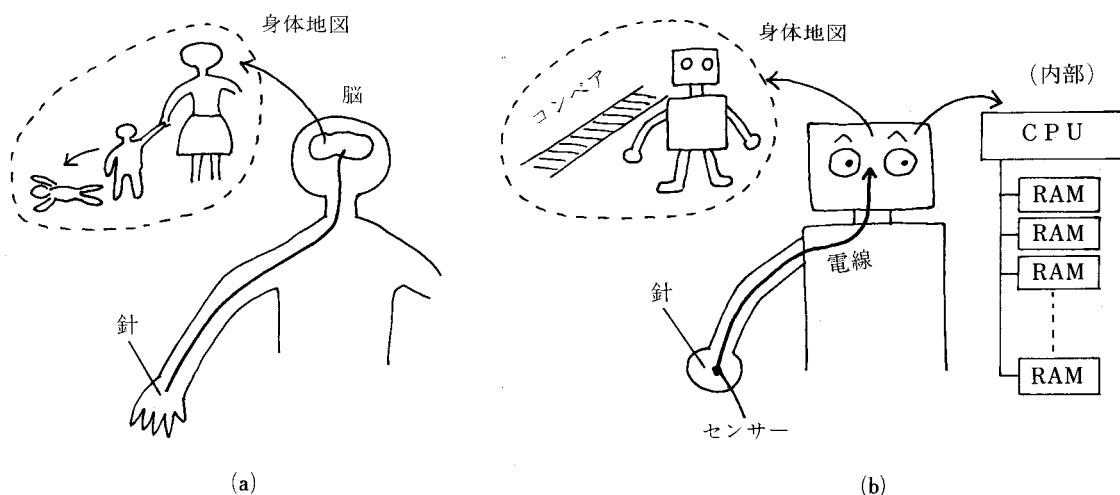


図16 身体地図

我々人間の場合は当然の事です、神経があって頭へ行って痛いと感じます。さてここで注目していただきたい点は、われわれ人間の場合痛いのは針がささった局所だけという事実です。普通は、当たり前とされていますが私に言わせれば摩訶不思議にも、針が刺さった所だけが痛いのです。ところがロボットの仕組みで考えると、センサーの局所はもちろん、そこから（脳としての）コンピューターへ行く電線も、CPUもRAMも活動します。励起するといってもよろしいでしょう。そして、その励起したところがすべて痛いのであれば、つまり我々の手に針が刺さった時に、手は当然だけれども、神経も脳の手を担当している部所もピピッと痛いのであれば、話が大幅に変わります。ところが我々の場合は不思議な事に、痛いのは刺さった所だけなのです。脳も神経もなんともないのです。これをロボットに置き換えようとすると、全然わからなくなるのです。我々の手と神経と脳の全部が痛いなら、あるいは手は痛くなくて脳の手を担当している所だけが痛いのなら事柄や仕組みは理解しやすいのであります。ところが現実には、刺さった所だけが痛いという事になっています。この仕組みは全然わけがわからないのです。前から私にとっては不思議中の不思議でした。

● 身体地図

手の病気や交通事故やその他の理由で手を切断した人が、手術のあとかなり時間がたっても まだ手が付いているような気がしているという事実があります。それを Phantom limb（幻覚肢）といいます。それから、手術のあとで時々痛む。だがその痛い場所が、切断端ではなくて、もうすでになくなっていて指先であったりすることがあるのです。取り去ってしまっていない所なのに、左から2番目の指の先が痛いという様に非常に精密に痛い場所をうったえるそうです。それを Phantom pain（幻覚痛）と言います。整形外科の学会には幻覚痛の専門委員会があって、幻覚痛を治すにはどうしたらよいかという事を真剣に議論しています。

実はこの幻覚肢とか幻覚痛という現象が、針がささった局所だけ痛いという疑問を解く鍵になってきます。我々はロボットと違って、目をつむっても自分の体がどうなっているかわかるのです。目をつむっても、自分は今右手を拳げたという様に、われわれ人間は自分の体の姿勢を知っています。背中というものはじかに見た事がないけれど後ろにあると思っています。見なくてもだいたい姿を知っているのです。それを身体地図といいます。つまり頭の中に自分のモデルが入っているのです。生身はなくなったけれど、身体地図の方にはまだ手の残っている状態の時に、幻覚肢や幻覚痛が起こります。

ところがこの幻覚痛と、逆の現象と解釈できる現象があります。インドにヨガの行者がいますが、ああいう行をすると頭がやわらかくなります。身体地図というものは一種の先入感的なソフトウェアですから、頭がやわらかくなるとこれを自由に操作できるようになります。手をなくそうと思うと、自分のソフトウェアの中だけのことです。簡単になくせるはずですが、これは私の解釈ですが身体地図の方で手がなくなって生身の手はついていてる時には、手に針を刺しても痛くないのです。こう考えると、幻覚痛とまったく逆の話です。

ロボット工学の立場といいますのは、生きものに関係はしていますが、生物学的あるいは生理学的な真実を求める必要はないのです。我々は生理学をやっているわけではありませんから、脳の働きがどうであるとか、神経の働きがどうであるとかいう事を申しても、それが実際に生理学で追求して得られた正しい結論と違っていかまわないのであります。生物を媒介にして、機械のための良いヒントを得たいというのがロボット工学の姿勢です。ですから、生理学の専門家から見ると、めちゃくちゃをいっているといわれてもかまわないが、機械工学の側から見て良い機械ができないと、我々は責任が全うできない事になります。

そこでそういうまじめにあらざる、非まじめな姿勢で幻覚肢や幻覚痛を解釈した時、今お話ししたように、逆に手があるのに身体地図の上で手をなくし得たならば、手に針がささっても痛くないであろうと考えられるのです。

母親は子供がケガをした時に、あたかも自分がケガをした様に痛がるとい

いますが、私流に解釈しますと、その時お母さんは痛がるのではなく、本当に痛いはずなのです。なぜかというと、身体地図に自分の子供が入っているからです。こう考えてきますと、痛みというものは、ほんとうに不思議なものです。意識の問題の一つですから、解くに解けないものとして、永遠のなぞとして残るのかもしれませんが。どうやら仏教的認識論のいう、感覚は本質的に幻であって実体がないということのようです。

身体地図を拡張して行くと非常に面白い事になります。

● 身体地図の応用

私はこの身体地図という考え方をロボットに応用したいと思っています。かゆい所へは手がすっと伸びて行きますが、かゆくも痛くも何ともない時に目をつむって、ここへ右手の指先を持って行けといっても、すっとは行きません。

物体を目的とする位置へ動かす場合、目的の場所と物体（指先）との距離を偏差といいます。その偏差を取りだし増幅してその出力でモーター（あるいは筋肉）を動かし、偏差があるうちはもっと近づけもっと近づけと駆動し、偏差ゼロになったら止めるのだという、そういう物の動かし方があります。これがすなわちネガティブ・フィードバックの原理を応用したサーボメカニズムという方法で、今日のロボットはこの方式で手を動かしています。しかし、自分自身の手の動きというものをつくづく観察してみるに、このサーボ方式だけで動いているのではないと思われるのです。手というものは、かゆい所へは目をつむっていても、まっしぐらに突進します。そして指先は目標を絶対に間違いません。かゆい所へ手が行くという時の動きは、フィードバックだとかサーボがどうだとか、そんなものではありません。サーボ方式ですと偏差が小さくなる程スピードが遅くなるわけですが、そのようなものではありません。かゆい所へ近付く程、余計に手のスピードは速くなるのです。そういう動かし方をロボットでできないかと考えまして、ロボットの中に身体地図を入れる事を考えています。例えば、ベルトコンベアの所で作業をしているロボットの身体地図に、ベルトコンベアも入れて作っておけば、コンベアの上をかゆくしてやると、ロボットの手はコンベアの上にまっしぐらに行くはず。そういう風な動かし方は何とかしてできないものかと思って苦慮しているのです。そうしたらこの間アメリカの視察から帰って来られた日本電気の方から、MITではポテンシャル理論を応用して制御しようとしているという情報が入って来ました。大体誰の考える事も同じで、時間的に位相は合うものです。恐らくロボットの中に身体地図が入る時が来るでしょう。そうすると面白い上手な動き方ができる様になるのではないかと考えています。

●単純化

ロボットというものはどんどん複雑になってきます。複雑なものはシンプルなものによって支えられていますから、片方ではシンプルなものを考えておく必要があります。

図17・18はヨーロッパのものです。ご承知の方も多いと思います。これは12～13年前に日本に情報が入って来たものですが、ツリー・モンキーといい、木の枝を払う機械です。森林で材木を切り出すのに、昔は手でゴリゴリひいて倒してから枝を払っていました。そうすると表側の枝は払えますが、裏側の枝は木をゴロッと180度ひっくり返さないと払えません。工程の順序を逆にすれば合理化できるかもしれないというのは誰でも考える事ですから、これも前後を逆にしました。つまり、これまでは倒してから枝を払っていたのなら、これからは払ってから倒せば良いという事になります。枝の払い方には世界中で色々な方法があり、ヨーロッパはこれで払います。これは車が斜めについていて、非常に小さいエンジンがついています。そのエンジンに連動してチェーンソー(chain saw)がついています。これはダッコチャンの一種で、この様に木にダッコさせてエンジンをかけると、車が斜めになりますから、ねじを描きながら上って行きます。チェーンソーが回っていますから当るを幸いに枝を薙倒して上まで昇って行きます。



図17 ツリー・モンキー

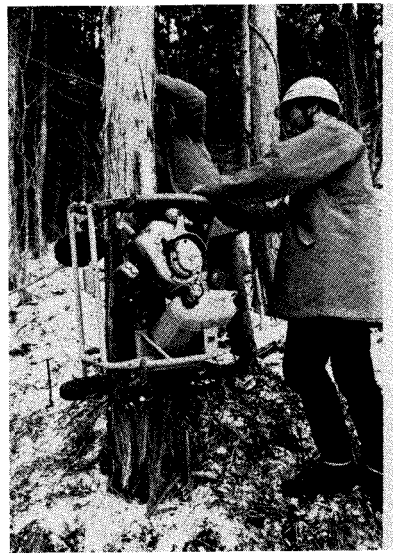


図18 ツリー・モンキー

●ロボットには難しい動作

— 自由状態の必要な動作 —

10数年前のことです。ロボットとの応用が、それまでは溶接用のロボットなどでしたが、いよいよ組み立てロボットとなって来ると色々な問題にぶつかりました。自由状態というものの必要性がその頃から問題になって来たのです。

つまり普通の感覚を持っていないロボットは、パイプの中に棒を入れるだけの作業でも、棒をくしゃくしゃにしてしまうのです。我々人間では、棒をパイプに押しこんでゆく時、棒がパイプの内面のどこかにひっかかったという事がわかりますから、上手に手加減して入れますが、その頃のロボットは何が何でも平行に押し込もうとしたわけです。もちろん、棒とパイプが完全に平行でしかも中心線が完全に一致していれば、うまく入るという理屈ですが、実際問題となると誤差が出てそうはゆきません。完全平行とか、中心線の完全一致というようなことは無理な相談で、それなのにロボットは何が何でも押し込むものですから棒かパイプをくしゃくしゃにしてしまうのでした。

ドアノブを握ってドア（開き戸）を開閉するという作業についても同じ事です。ドアをあけるという事は、ロボットには非常に難しいのです。つまり人間は位置としては相手に従いながら、力としてはこちらが力を出して駆動する事ができるのですが、普通のセンスで機械（ロボット）を作ると、その機械が駆動する時は相手の位置までをも機械に従えてしまうのです。つまりドアというのは蝶番で柱についていますから、ドアノブは蝶番を中心にした円周上しか動きようがありません。それなのに機械はドアノブを機械なりの運動軌跡に強引に従えようとするので、ドアをこわしてしまうのです。こういう問題は今日研究室レベルでは、もう解決しておりますが、これから現場への応用となると、こういう事が非常にたくさん出て来る様に思います。

— 両手を使う仕事 —

両手による作業は全く難しいのです。これは今だによく解りません。人間と違って、ロボットでは片手でやる方が楽なのです。両手でさせると、両手の効果を出すことが非常に難しいのです。人間の場合は両手ですれば、両手でしただけの効果が上ります。例えば、わたしたち人間の場合は紙一枚でさえ片手で持つより両手で持って運んだ方が何となく楽です。ところがロボットでは片手の方が楽なのです。両手でやったら互に逆らい合って、なかなかうまくいきません。人間は両手で紙を持って運ぶ時、紙を破らず、またたるませもせずに行けます。ロボットがすると、普通はくしゃっとたるませるか、ひきちぎるかのどちらかです。

それなら私自身が自分の両手を動かしているアルゴリズム（制御論理）はどうなんだと自分に問いかけてみても、解らないのです。自分の体がどうして動いているか、自分には全くわかりません。これはどうしようもない事実です。自分が自分の手や足を動かしている、そのソフトウェアは、自分にもわかっていないのです。何となく動いてしまっているのです。どうやっても解りません。右手が引っ張って行き、左手が何となくついて行くと考えると、左手が右手の負担になってしまいそれでは両手で持つ値打ちがないことになります。左手が押して右手が従うというふうでもだめです。何となく2人3脚ですうっと行くというのは大変な事で、今だにそのアルゴリズムは解けないのです。そういう問題があります。

● カニの手からのヒント

— 大きさの違うはさみ —

両手という問題を念頭に置いてこのカニを見ると(図19)、素晴らしい事を発見します。これは別のカニのハサミではありません。一匹のカニのものです。右のはさみと左とはさみでは歯の大きさが違うのです。これはつまりナイフとフォークの関係です。違った物が2つ寄るから、仕事の領域が拡大します。つまりフォークだけ2本でもナイフだけ2本でも食べにくいけれど、ナイフとフォーク1本ずつだと上手に食べられるという原理だと思います。だから粗い方で獲物をつかんで、細かい方でむしって口へ持って行くようです。

図20はシオマネキというカニですが、極端に右と左は違うのです。

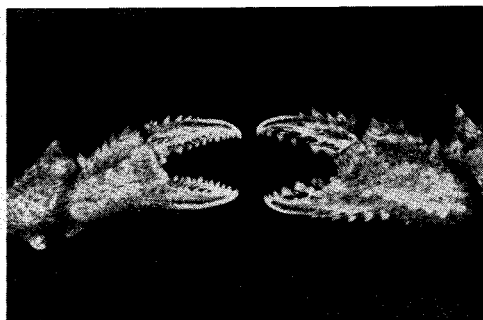


図19 カニのハサミ左右

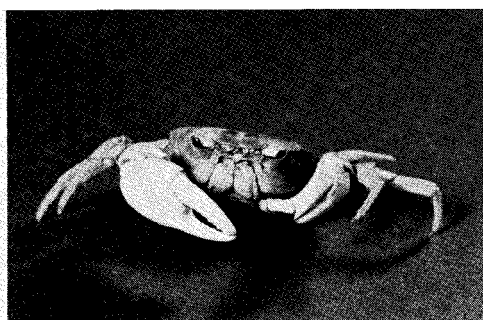


図20 シオマネキ (カニ)

— 先端ほど太く —

図21のようなカニがいるのです。これを見るとロボットをやる元気をなくしそうになります。今日の産業用ロボットはアンカーボルトでデーンと床にくっつけられ、体重は1tで、そのくせ手で持てる重量はせいぜい30kgです。このカニはこの細い足で体全体を支えていて、ちょこちょこっとからかってやると、この太いはさみ(図22)を振り上げて向かって来るのです。こんなものはとても作れません。

このカニのはさみは先へ行く程太くなっています。今の産業用ロボットはどれを見ても先へ行く程細いのです。私は何とかして先へ行く程太い手を持つロボットを作りたいと思っています。

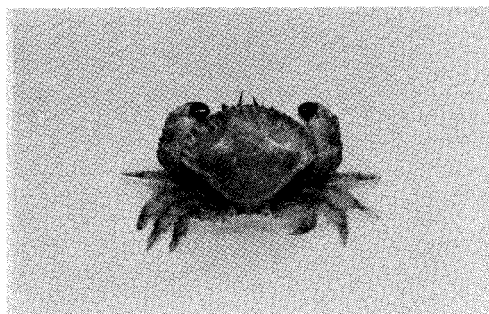


図21 足は細いが手が太いカニ

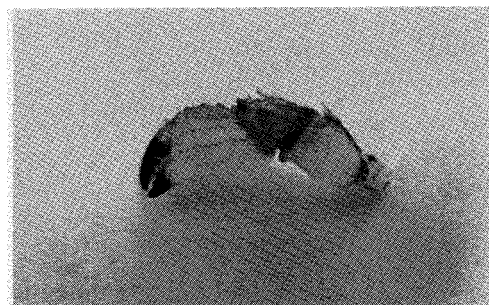


図22 図21のはさみ

●骨の成り立ちがわかる

さらにカニの腕（はさみ）の肘や手首の部分の構造を、殻を割ってしらべてみますと、図23のように、いわゆる ball and socket joint による 2 点支持になっていることがわかります。そしてさらによく観察すると、ボールやソケットの根本のところに、うまい工合にリブが入って、はさみが重い獲物

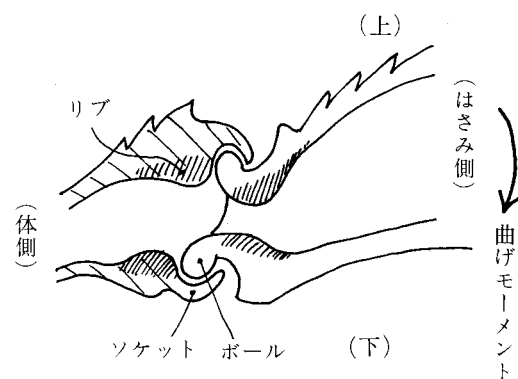


図23 カニの手の関節

をつかまえた時の、下向きの曲げモーメントに耐えるようになっており、しかもそのリブの形が力学的に見て、最適曲線をなしていることがわかります。

カニは切削加工や鍛造でできているわけではないのに、どういうからくりで、最適曲線のリブが盛り上ってくるのだという事を考えました。先ほど申しましたような姿勢で、生理学的にはめっちゃくちゃかもしれませんが、このような仮説を立ててみました。それは、「ストレス（歪力）が集中している部所には、材質がひとりでに集まってくる。そして、どこも同じストレスになった時に、材質が集まってくることは停止する」というのでした。この原理でゆくと応力集中という事がなくなって、どこも同じ応力になります。一様の応力の部材ができるに違いないのです。

さて、そこでこれをコンピューターで実験してみました。これは私自身が実験したのでなしに、以前私の助教授をしていてくれました現在東工大教授の梅谷君がやってくれました。図24 (a) のような片持梁があるとし、その先端に荷重 W をかけます。そうするとご承知の様に、肘の部分に応力が集中して、ものすごい無理が生じます。それで、コンピューターの上でこれを盛り上げて行くのです。応力集中が生じた部所にどんどん肉を盛り上げて行き、

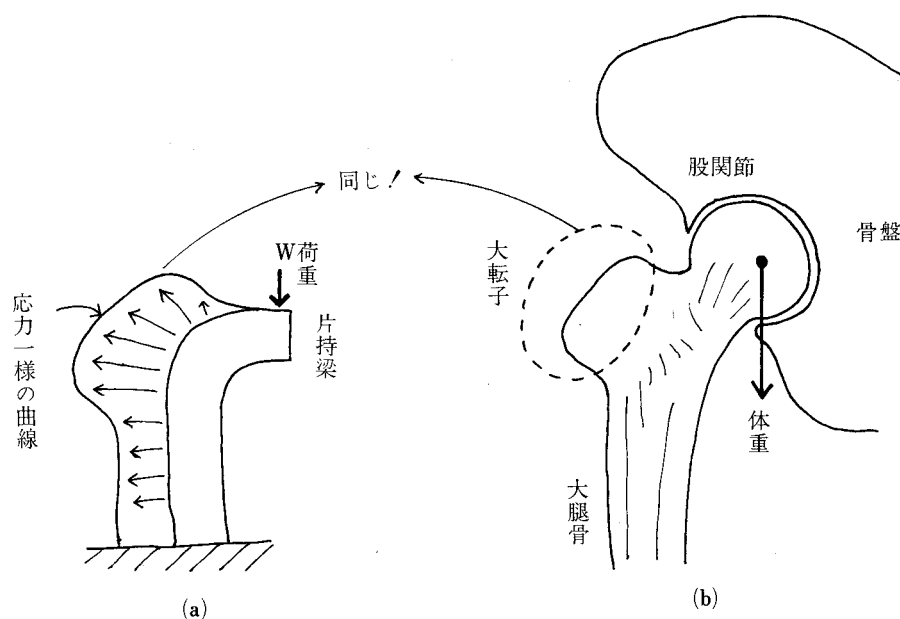


図24 ストレス利用の自動形成

応力集中がなくなった時に、肉の盛り上げを止めるというプログラムを作っ
てやりましたら、うまく収斂して図のようなカーブになりました。これでど
こも応力が一樣になるのです。これどこかで見た曲線だと思いました。そし
てよく考えましたら、われわれ人間の大腿骨の股関節の横にある大転子と同
じ形でした(図24(b))。股関節には胴体から上の体重が骨盤をとおして、ちょ
うど片持梁のかっこうでかかっているわけですから、図24の(a)と(b)とはちょ
うど同じ条件になります。それでこの曲線と大転子の形をスライドで合わせ
たら、ぴったり合うのです。これは生理学的にも正しかった様です。

鍛造などの様な金属を鍛えるということは、いちおうさておき、もしある
特殊な液(例えば電解液のようなもの)を考案して、その中に鉄の部材を入
れ、外力を加えてストレスを発生させ、応力が集中した部所へは液中から鉄
イオンがくっついて鉄が太くなり、そうやっているうちにどこも応力が一樣
になった時にこの部材はでき上る、という作り方はできないものかと思っ
ています。まだそれはアイディアだけで、研究する余裕も力もありませんで
やっております。

●すき間をなくす

ところで、いまの機械にはすき間が多すぎます。我々の腕を切断して見て
も足を切断したのを見ても、びっしり詰まっています。しかもそれが、どう
でもよい詰め物が詰めてあるわけではありません。全部機能材で詰まってい
るわけです。今日の相当に複雑に入り組んだ機械でも、輪切りにして見ると
すき間だらけです。

これからの機械というものを考えると、もっとすき間をなくして外形を縮
めたいのですが、部品の断面が丸ではそうはまいりません。自動車もボンネ
ットをあけるととても複雑で、我々が修理しようとしても素人では手が入ら
ない位ですが、あれだってすき間だらけです。さし当たりすき間のない機械
を作るのなら、ガソリントankをなくして、ボンネットの中のエンジンル
ームのすき間をガソリンで埋めてタンク代りにしたらどうなるでしょうか。

●生物から学ぶ

とにかく、生き物をちょっと相手にして深くのめり込まずに、それでいて
良いヒントをそこから得て、それを機械に応用して行くというやり方が、ロ
ボット工学の一つの醍醐味です。たとえそれが実際の生物の中身と異ってい
てもそれはかまわないと私は思います。むしろ、こちらがどの様にそこから
学び取って行くかが大切です。

生き物は人間と違って、教えてはくれるけれど語ってはくれません。その
無言の言葉を聞くのには、こちらにそれだけの目が(耳が?)ないと聞けま
せん。それなりに自分で修練をしなければいけないといつも思っているしだ
いです。

ご清聴ありがとうございました。