

3Kロボットの 可能性と展望

ハードな作業環境から人を解放する技術

これまで産業用ロボットは、おもに大量生産用の反復作業に適しているとされてきた。しかしここへ来て、人に代わって過酷な仕事をこなしてくれる3Kロボットや、人が活動できない場所で作業が可能な極限作業ロボットなど、より複雑な環境に適応し、活動できるロボットの開発が進んでいる。人に代わってハードワークに挑むロボットたちの現況と将来の可能性を概観してみる。

写真：スパナを使って仕事をする原子力施設用極限作業ロボット

ロボット大国の次世代を占う

極限作業ロボットの潮流

1990年に終了した通産省の大型プロジェクト「極限作業ロボット」では、原子力発電所や海底油田、石油生産施設での火災時に活躍するロボットの実証モデルが作られた。プロジェクトでは、多くの技術的成果を得ながらも、実用性の高い極限作業ロボットは完成できなかったようである。しかし極限作業ロボット開発ムードの中で、建設土木など、これまでロボットが入りこめなかったジャンルへの導入が進展した。さらに宇宙開発の進捗とともに、衛星軌道上など宇宙空間でもロボットの実用化が始まろうとしている。

バーチャルリアリティ感覚で操作できる作業代替ロボット

現在日本国内で稼働しているロボットは、世界中で使われているものの約6割をこえるといわれている。人口比率ではわずかに2%の日本人が、半分以上のロボットを占有しているわけで、確かに日本はロボット大国といえるかもしれない。

これまでロボットの守備範囲といえば、大量生産を前提とした単調な反復作業が、その主なものだった。しかしロボット技術の発達とともに、人にしかできないと考えられてきた一度きりの複雑な作業も自動機械に代替させたいという要請が高まっている。とくに労働としては、ハードな「3K」といわれる部類の仕事で、その声が強い。背景には、かつてない急速な高齢化の進展とともに、若年労働力が減少し、危険や過酷さをとまう、いわゆる「3K」労働の担い手が不足しつつあるという現状がある。将来、建設土木や林業などで、「現場」の労働力不足が深刻化することも、必然的に予想される。

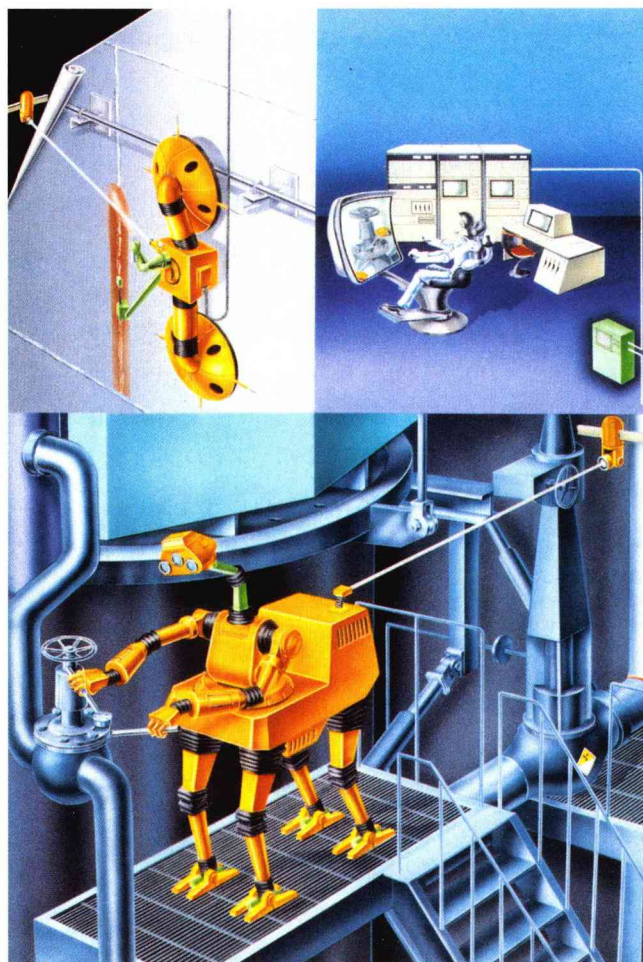
そうした不足分の労働力を補うために、また、建設土木や林業などの労働環境、ひいてはイメージそのものを変革していくうえでも3Kロボットの実現が望まれているのである。

過酷な環境での作業を代替するロボットの研究ということでは、通産省の大型プロジェクトで200億円の予算をかけて研究された「極限作業ロボット」を思い起こす必要があるだろう。1983～1990年までの8年をかけて実施された同プロジェクトでは、「原子力ロボット」「海洋ロボット」「防災ロボット」の主に3つの視点から、極限環境下で、人に代わって作業をするロボットの研究・開発が行われた。

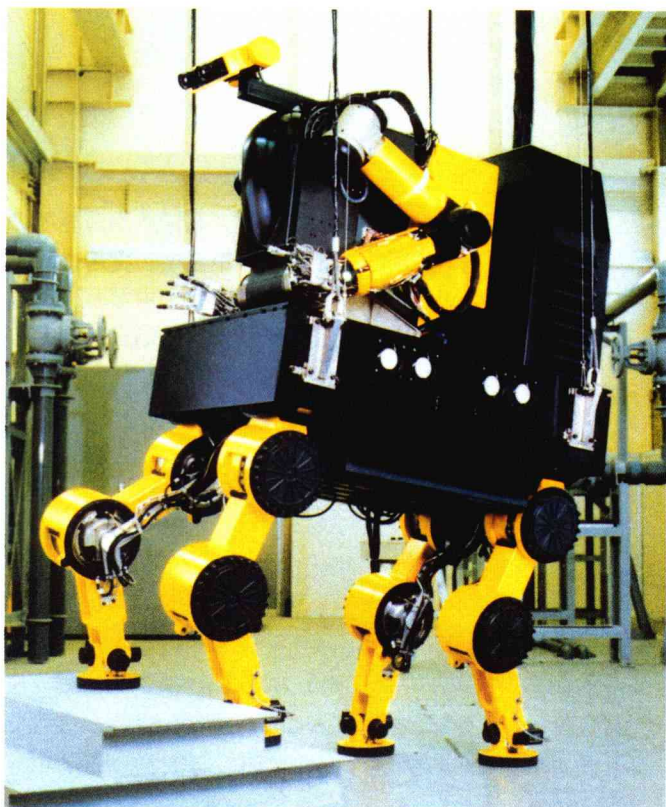
第1の「原子力ロボット」(写真)は、原子力発電所での放射線環境下で装置の点検・補修作業を行うためのもので、4脚移動式のボディに2本の腕と運動立体視システムの目を備え、ちょうどギリシア神話に出てくる半人半馬のケンタウロスを連想させるような外見をしている。腕の先には人の手そっくりの4本指のマニピュレーターがあり、テレグジスタンスとよばれる遠隔操作で手先を使ったかなり器用な作業を代替させることができる。指先には触覚を操縦者にフィードバックする

ための触覚センサーが取り付けられており、VR（バーチャルリアリティ）感覚で操作ができる。ネジの取り付け作業など、細かな作業などもお手のものだ。コントロールのためのデータ伝送は、光ビームによって空間を介して行う「光空間伝送システム」が採用されている。

この4脚式のものに加え、原子力発電所用には、吸盤を使って壁面を這うように移動するロボットも開発された。高所での作業を想定したもので、吸盤で壁面に張り付いたまま車輪を使って移動をするため、いわゆる吸盤部分には低摩擦高気



原子力ロボットの作業イメージ図



密タイプのシールが採用されている。壁の段差や配管などは、2つある吸盤を交互に用いて「しゃくとり虫」のようにまたぐことで通過するしくみである。

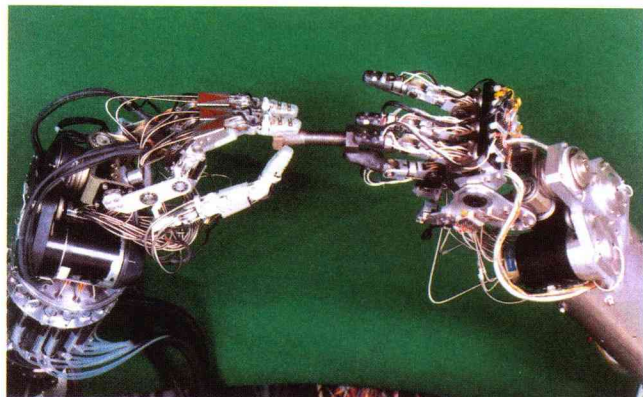
海洋開発に期待される海中作業ロボット

第2の「海洋ロボット」は、海底での石油生産を支援することを主な目的とするもので、海中での3次元走行を制御するために、独自のバリベック・プロペラと小型で信頼性の高い光ファイバージャイロを開発・搭載している。水中での作業に際しては、固着脚といわれる吸着盤のついた支持脚を作業対象物にくっつけて自らを固定し、多指ハンドのついた2本のマニピュレーターを駆って仕事をする。固着脚は海中生物が付着した面にも吸い付けなくてはならないことを想定し、独自の技術が開発された。

プロジェクトでは海底油田の開発に利用することを前提としていたが、海底で使用されるロボットという概念は将来、海底資源の調査や開発という場面でも必要とされるであろうことは、想像に難くない。よくいわれるように海底には陸に比べけた違いに豊富なマンガン団塊やコバルトリッチクラストなどの鉱物資源、メタンハイドレード（シャーベット状メタン）などの有用資源が眠っているといわれる。メタンでいえば、日本近海だけでも推定で約100年分の天然ガスに相当する量が埋蔵されていると考えられる。こうした海洋資源の開発には、いずれ「極限作業ロボット」が必要とされてくるだろう。



原子力ロボットの本体（左）と操縦装置（右）

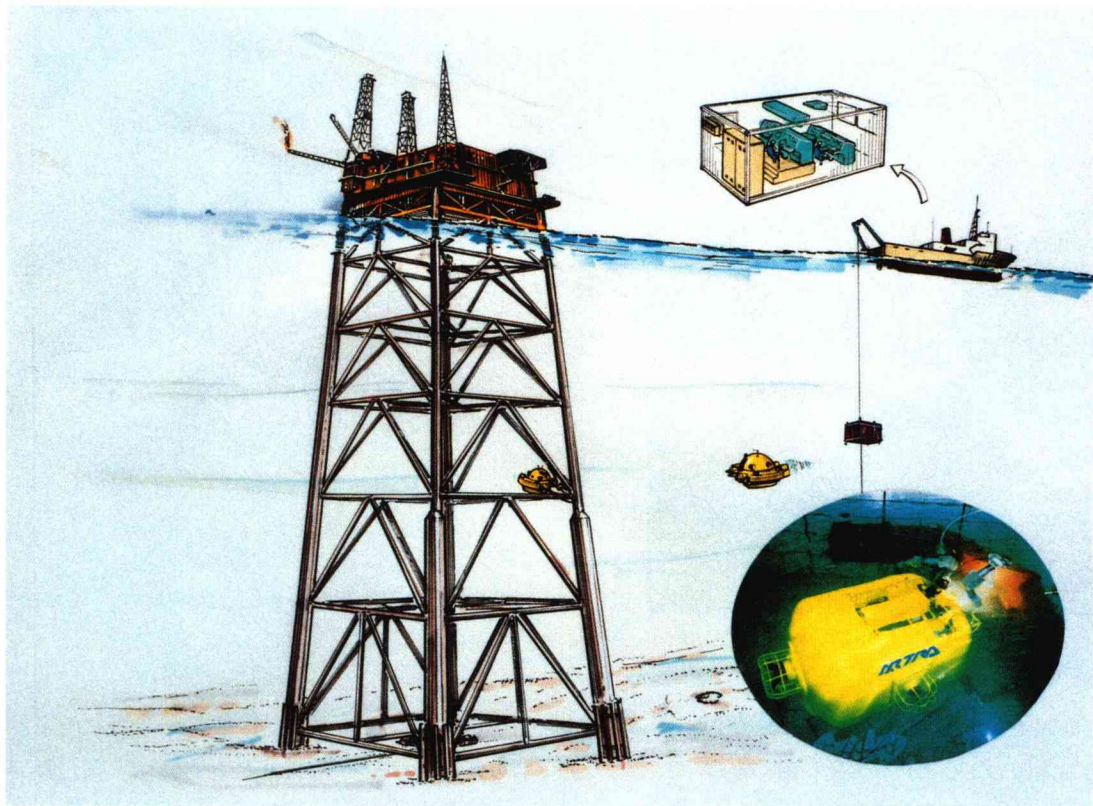


ボルトを回す原子力ロボットの手

1995年、科学技術庁・海洋科学技術センターの無人探査機「かいこう」は、マリアナ海溝のチャレンジャー海淵に潜航し、10,911.4mという深度では世界で初めての写真撮影と標本採取に成功した。遠隔操作によって2本のマニピュレーターを動かす「かいこう」のピークル（作業船）は、一種の極限作業ロボットといえるだろう。先端的な調査・研究レベルの話ではあるが、極限作業ロボットの先駆けといえるものが、すでに実用化されていると考えることもできるだろう。将来の資源利用という観点からすれば、調査研究用のマシン以上に、より自由自在に作業ができ、事業としての採算性を満たすものが必要になってくるだろう。

不可欠ないっそうの技術革新

第3の「防災ロボット」は石油生産施設での災害を想定したもので、火焰の立ち上る中で、被害状況を把握し、災害拡大の防止活動等を行おうという目的で構想されたものである。他の2種と同様、立体視覚と操作のためのマニピュレーターを備え、6脚6輪の移動機構を駆使して障害物を「またぐ」



海洋ロボットの実証モデルと
作業イメージ図

ことができるように設計された。

以上3種のロボットがそれぞれに研究され、最終的には実証用の試作品が製作されたわけだが、結果からいうと、人間に代わって作業ができるほどのロボットを完成させるところまでは到達できなかったというのが実情のようである。ただし、研究にともなってさまざまな要素技術が開発されており、それは基礎技術の蓄積へとつながった。

たとえば、プロジェクト関係各社ではロボットの動力源となるアクチュエーターの開発に力を注いだが、その結果従来のものより大幅に小型化された効率のよいアクチュエーターの技術が生み出されたし、ロボットを操作するための遠隔臨場制御技術（テレグジスタンス）も研究が進んだ。またプロジェクトの8年間で、特許約500件、実用新案約60件が得られた。

プロジェクトそのものの成果はあったものの、人間の労働に代わることのできる実用的な「極限作業ロボット」の実現には、さらに動力装置や各種システムなどの小型化、操作性の向上など、さまざまなブレイク・スルーが必要とされそうである。

宇宙空間という極限環境で活躍するロボット

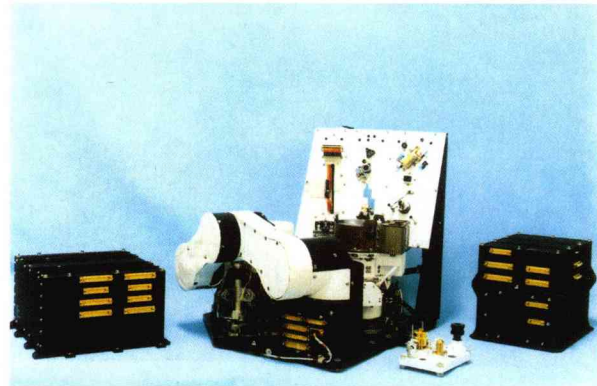
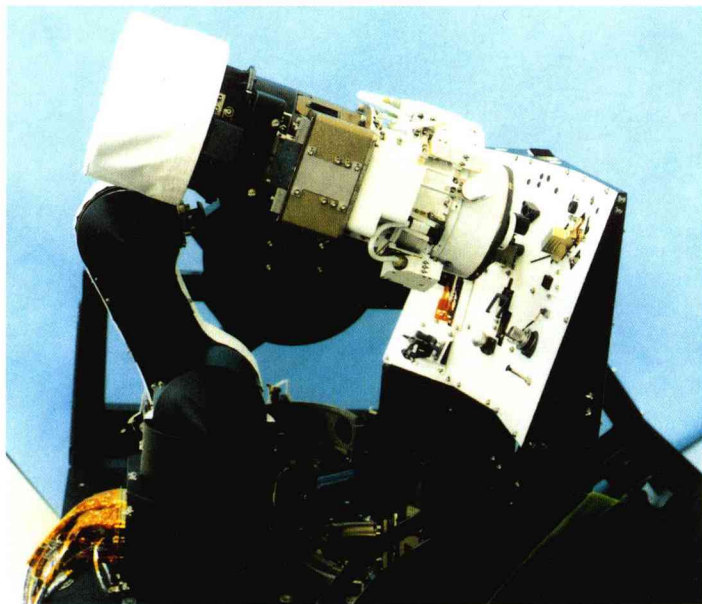
将来、極限環境の大きなジャンルとして浮上してくるものといえば、やはり宇宙開発だろう。宇宙空間で使われるロボットの実例ということでは、NASDA（宇宙開発事業団）が今年11月に打ち上げ予定のETS-7（技術試験衛星Ⅶ型）には、ETL（通産省・電子技術総合研究所）の宇宙ロボット用高

機能ハンド（ARH＝The Advanced Robotic Hand System）の実証実験用モデルが積み込まれる。

ARHはアームの先に筒状のハンドが取り付けられたもので、親指に当たる直動指と2本の回転指の計3本の指を持ち、これまでは「人の手」で行われてきた宇宙空間での精密作業を、代替することができる。

実証実験では、ボルトの着脱、電気コネクターの付け替え、浮遊部品の捕獲、太陽電池セルとMLI（断熱材）の展開、ワイヤー操作が行われる。宇宙空間で滞りなく仕事ができるかどうかを試すわけである。さらに以上に挙げたハンド単独の実験の後、より大型のアームの先にハンドを装着しなおし、試料交換、電気コネクタ着脱といった実験が行われる。

ARHの操作は、地上から主にキーボードとマウスを使って行われるが、カメラを見ながらの遠隔操作となるため、指令から作動まで、加えて作動状況が地上に写し出されるまでの間に電波の往来や中継による遅延が出る。ARHの特徴はこの種の遅れをカバーするため、システム自体にある程度の自律性を持たせている点にある。はるか宇宙空間にあるロボットが指示に対してリアルタイムに対応していたのでは、タイム・ラグが大きすぎて、スムーズな作業はおぼつかないからだ。さらに地上では、カメラからの映像と並行し、地上から送った指示に対して、現在ロボットがどう動いているかをプログラムにより画像化する装置も併設している。そうしたいわば3重のシステムのフォローによって、距離による時間差を埋めようというわけである。



ARHのシステム構成

ETS-7で打ち上げられる宇宙ロボット用高機能ハンド（ARH）

「80 Wという限られた太陽電池の電力で作動する省電力型・軽量設計、しかも打ち上時の20Gという振動に耐えるものとしなければなりません」ARHの開発に当たった富士通宇宙開発推進室の三上龍男課長は、開発時にこえねばならなかった技術的なハードルについてそんなふうに語る。ARHは無重力下で、きわめて少ない電力で作動するように設計されているため、地上では重力が妨げになって、補助用の糸などで吊り上げなければ動かしてみることもできない。宇宙空間に行って「ぶっつけ」本番で動かしてみるのが、本格的な使用環境下での最初の作動テストになるわけだ。また真空に近い地球軌道上では、潤滑油は蒸発してしまい、使うことができないため、ロボットの稼働部分には二硫化モリブデンによる個体潤滑技術が採用された。素材は軽量化への要請から、アルミとマグネシウム合金が主体となっている。

「この前、アメリカでハッブル望遠鏡の保守の際に、宇宙飛行士を送って行いましたね。ああいう場合にも、わざわざ人を行かせるようなことをしなくても、ロボットで代行できるようになればそれだけリスクも少なくなりますね」（前出・三上課長）

現状、人工衛星の寿命切れは、ほとんどが燃料がなくなっ軌道が下がってしまうことによるという。もし宇宙ロボットを乗せた補給衛星が、燃料切れになった衛星を次々に回って、燃料を補給できれば、衛星の寿命をもっと延ばせる可能性がある。採算を取るためには1基の保守衛星で多数の衛星をカバーする必要があるが、今後通信用などの目的で急速に衛星が増えていくことを考えると、ありえない話ではないかもしれない。

3K ロボットは人を苦役から解放する手段となる？

ロボットという言葉はチェコの国民的作家カレル・チャペック

ク（1890～1938年）が書いた『R.U.R.』という戯曲に由来する。戯曲では人が自分たちの労働を代替させるために海の成分から造り出した人造人間たちが活躍する。その人工有機体たちの名前—Czech robotnik serf—が転訛し、ロボットという呼称が生まれた。最初の概念が生まれた時から、ロボットは人が労働からのがれるために作り出した何者かであったわけだ。

日本では、国民的漫画家ともいべき手塚治虫が、ロボットを一般に広く知らしめることに貢献した。『鉄腕アトム』の副主題歌である『ロボットマーチ』には、「飲まず、食わず、働く」「暑さ、寒さ、平気」なものとしてロボットが謳われている。エネルギーを消費するという意味で「飲まず、食わず」とはいえないにせよ、人に代わって過酷な労働をしてくれる者がロボットだという発想は、ここでも変わっていない。そうしたロボットの本来的なコンセプトの延長上に、極限作業ロボットに代表されるような3Kロボットが登場してくることは、必然といえるのかもしれない。

失楽園の物語の中で「労働」は、人への「罰」として描かれている。神は言い付けを破ったアダムに「（罪を犯したので）あなたは、額に汗をして大地から食物を得なければならない。大地にはいつくばって、土から食物を得、そうして最後は自らも土に帰る」のだと言ひ渡す。人が自らの過失によって楽園を追い出され、懲罰として、飢えと死とに脅かされながら労働を続けてきたのだというなら、3Kロボットとは、さしずめそうした苦役としての労働から人を解放してくれる救世主というべきだろうか。

【取材協力・写真提供：日本産業用ロボット工業会、富士通株式会社】

動物の動きをヒントに 極限環境に適応可能なメカニズムを創造

——広瀬研究室のロボットたちを訪ねて

「人でなければ動まらない」仕事には、悪路や高所など、機械的な推進力では移動が困難な場所での作業が少なくない。東京工業大学・広瀬茂男教授の研究室では、バイオメカニカル（生物機械工学的）な視点から、そうした条件の悪い地上面や壁面などを移動するためのメカニズムを研究している。3Kロボット、極限作業ロボットの実現に欠かせないロボット創造学の実態を追って、広瀬研究室を訪ねてみた。



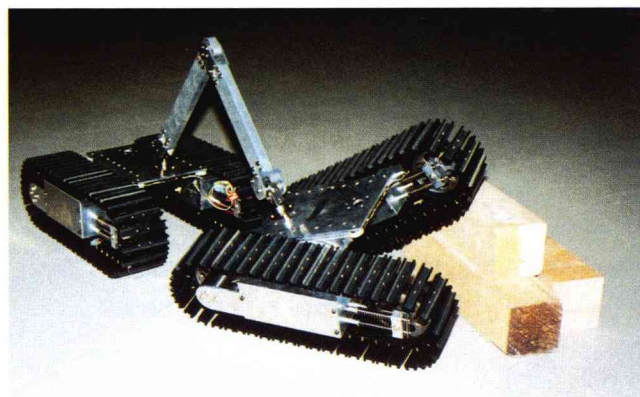
蛟龍2号機

ヘビに学んだ悪路走破技術

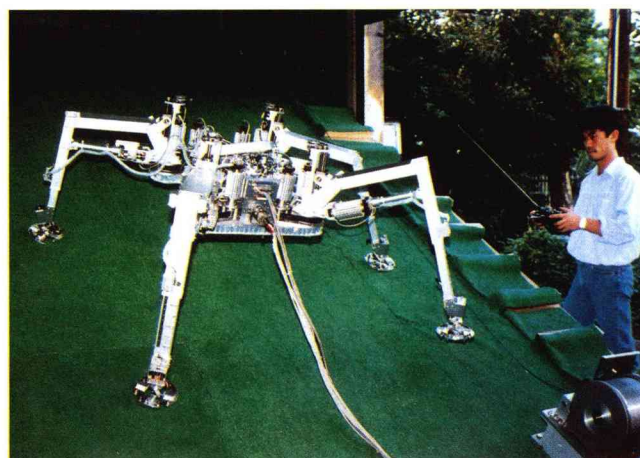
東京工業大学の広瀬教授らは、防災や災害救助といった切り口からさまざまなタイプのロボットを開発してきた。より実用的な極限作業ロボット開発の先駆である。

出発点は、バイオメカニカル（生物機械工学）な視点でロボットの動きを模索することからだった。まず着目したのは、ヘビの動きで、その運動原理を研究し、機械的な構造に生かす方法が試行錯誤された。その結果が反映されたのが「蛟龍」シリーズである。ヘビの動きを合理的に取り入れた節体幹型の移動ロボットである同シリーズは、原子炉内、火災現場、林間部などを動き回ることができ、何体もの体幹の連結によって構成されるボディは、狭隘な場所をすりぬけ、障害物を乗り越えるのに適している。1単位では越えられない障害も、前後のサポートによって、ラクにパスすることができるというのが、「蛟龍」の持つ機動性の原理である。「自動車がぬかるみにはまった時、もう一台で牽引してやると抜け出せるでしょう」と広瀬教授。

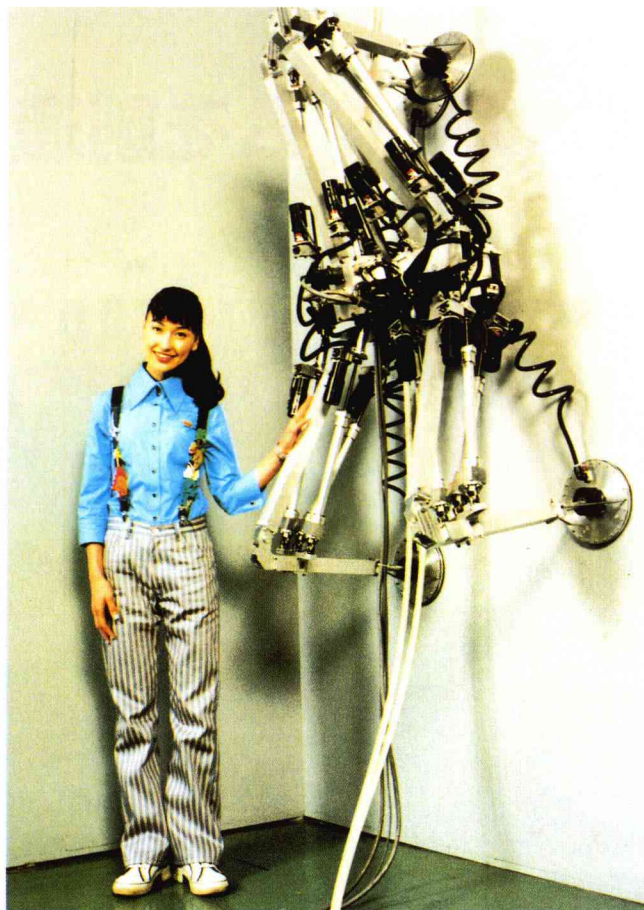
この発想をさらに発展させることで「群龍」が生まれた。「群龍」の1単位は左右のキャタピラと1本のマニピュレーターから構成される。この1単位がマニピュレーターで前の1単位と接続される。同様にして複数単位を1列につなげ、蛇が凹凸面をのたうつように、起伏の大きな悪路を越えていく。災害救



群龍のプライマリーモデル



4足歩行機タイタンの歩行実験

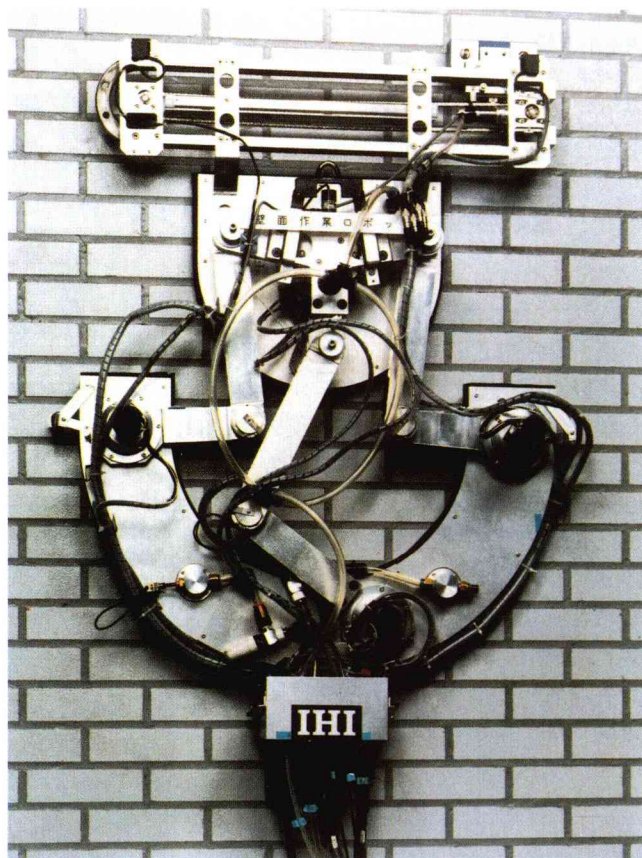


吸盤で壁面歩行をする忍者2号機

助の現場や、林業、さらには将来の惑星探査に応用が可能な技術だという。ポイントは各機が備えているマニピュレーターがそのまま連結装置に使われるところで、群れを解いた時には、連結装置は即、腕になって作業に用いることができる。群れで進む場合は先頭の1機だけが腕を使えるというわけだ。

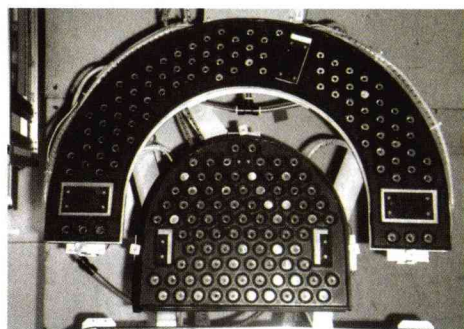
合理的な4足歩行をロボットに

車輪やキャタピラを使った推進方式では、「連結」が悪路を踏破するために有効なノウハウだった。しかし凹凸面でもっと安定して作業のできるメカニズムも欲しい。4足歩行機械は、その要請に応えるものとして研究が始まった。4足歩行は障害物を接触せずに乗り越えられ、地表を轍で痛める割合も小さく、さらに足の角度を動かしながらマニピュレーターの動きを補助できるなど、さまざまなメリットを持っている。映画『スターウォーズ』にも雪上を4足歩行する戦車が登場してきたが、この方式は上のようなメリットを考えてみると、理にかなったものだったといえるのかもしれない。4足歩行ロボットは「タイタン」シリーズとして、現在までにいくつかの実験機が製作されており、階段や坂道など、凹凸面での活動を想定した歩行テストが繰り返されてきた。そのうち「タイタン8号機」は文



壁面タイルの剥離等チェックするロボット（東急建設）。吸盤による壁面昇降技術が採用されている。

ロボットの壁面昇降用吸盤。小さな多数の吸盤からなり、それぞれには気密モレ防止の弁がついている。



部省の科研費重点領域研究の一環として一般の研究者も購入できるようにした（価格は150万円）。現状、広瀬教授らが有望と考えている適用ジャンルのひとつには、地雷撤去作業などがある。足の裏に火薬センサーを取り付け、自動歩行しながら地雷探査を行い、見つけたら遠隔操作で掘りだそうというものだ。いずれは国際会議などの場でも発表を考えているという。現在地雷撤去に難渋している国でやがて使用されるようになり、将来国際貢献をするかもしれない。

4足歩行をさらに垂直壁面にまで拡大したのが「忍者」シリーズだ。足の裏に真空ポンプにつないだ多数の吸盤を備え、壁面にピタリと張りついて上っていく。この技術によってビルや陸橋の外壁検査、塗装など、高所での危険を伴う作業の代替が可能になる。一種の3Kロボットと考えられるだろう。足場組みがいらない分、コストダウンにもつながる。複数の吸盤に



火星探査をターゲットに開発された
3輪式惑星探査ロボット



吸盤による壁面昇降技術を
採用した東京消防庁のレス
キュー用ロボット



東工大・広瀬茂男教授

いる。タイムリーなものとしては、昨年サンタモニカで開催された惑星探査車の展示会「ローバーランドアップ」にNASDA（宇宙開発事業団）と協力して出展した3輪式の惑星探査ロボットなどがある。現在、生物の有無をめぐる火星に注目が集まっているが将来日本が火星へ足を延ばす日には、こうした惑星探査機が必要になってくると考えられる。

宇宙開発にロボットが走り回るというアイザック・アシモフの小説に描かれた世界を、徐々に現実のものとしつつあるかのような広瀬教授の研究だが、教授自身は「ロボットに過大な期待をかけるのは考えもの」とであるという。例えば阪神大震災のような災害時に、停電と燃料切れの中で、現実役に立つのは人の力なのだと広瀬教授はいう。ただし人はいてもその力を有効に集積できないために効率的な救助活動ができない場合も少なくない。「現場で危険な場所まで近付けるのは、どんなに大勢の人がいてもその中の1人か2人です。でもその他の人のエネルギーも有効に集めることができれば、かなりのことができるはず」そんな発想から教授はロボット研究と併せて、災害救助などを前提に「人の力をいかに合理的に使うか」の研究も進めているという。3Kロボット創造の原点にあるのは、ヒューマニズムなのかもしれない、と感じさせられた。

[取材協力・写真提供：東京工業大学・広瀬研究室]

は弁が設けられていて、タイルの継ぎ目や壁面の割れ目などの上に来ると、その部分だけは弁が閉じて気密もれを防ぐ仕組みを持つ。この吸盤の技術はすでに建設会社の外壁タイル調査用のロボットや、消防庁の高層ビルでの救助用ロボットにも採用されている。

惑星探査にも不可欠なロボット創造技術

ここに紹介した代表的なもの以外にも、広瀬教授の研究室ではさまざまな極限環境でのロボット技術の研究開発を行って