〔解 説〕

未来のロボットの移動技術*

田 口 幹**

1. は じ め に

人間のように自由に動き、人間のかわりに働いてくれるものとしてのロボットは、古来からの人間の夢であった。そして夢は文学という形で後世へ伝えられた。もちろんそれはその各時代の夢であり、そのものがその時代の世界観、人間観、科学技術を反映したものであることはいうまでもない。これら文学に登場するロボットについては、本特集および文献 1) で石原氏が詳しく解説されているのでここでは文学作品に表れたロボットと、これまでに実際に開発された移動ロボットについてその移動という側面から眺めてみよう。

さて、文学や映画に登場するロボットが単なる機械と異なる点は、

- 1) ロボットが自らの行動を決定できること、
- 2) 自由に移動できること、
- 3) なんらかの作業のできること

にあるのは異論のないところであろう。

つまり、ロボットは、

- 1) 外界を認識するためのセンサーと知能、
 - 2) 移動のためのメカニズムと動力源、
 - 3) 手や足など外界へ働きかけるなんらかの効果器
- を持っていることが必要である。もちろん、いわゆる SF の中には宇宙船全体が 1 台のロボットであるものから、1つの惑星全体が 1 台のロボットであるものまであるが、ここではもっと狭い意味にロボットを限定し、その移動方式を考察しよう。

ロボットというものが文字どおり人間にとって代わって働いてくれる機械であるならば、もし、人間とまったく同じディメンションで同じ機能を持つロボットができれば、そのまま人間と置き換えることができる訳であるからロボットの理想像は文学や映画に現れる人間型のロボットであるといえよう。そのようなロボットは移動という機能に限っても、ロボットの活躍する舞台が人間と

同じであるから、人間とまったく同じ場所を移動できないはず、また、ロボットの形態が人間型であるということは、その移動形態は 2 足歩行型でなければならないことになる。

これに対し、これまでに開発されてきた機械は材料、アクチュエータ、情報処理の各面で人間（あるいは生物）とはまったく異なっている。東工大の森政弘教授はロボットの有すべき 3 条件として、自動性 (Autonomous)、自立性 (Independent)、移動性 (Mobile) をあげておられる。したがって、機械部品で構成されたロボットは、外見にこだわらず、人間に代わって自律的に働く機械で移動機能を持つものと規定した方が自然であろう。つまり、ロボットの移動形態は 2 足歩行型である必要はなく、その移動環境に応じた形態を採れば良いことになる。もちろん、移動といってもその環境は水中、地表、空中から宇宙空間までにわたる訳で、それぞれの環境で最適な移動形態があるはずであるが、ここでは地表における移動に限って議論を続けよう。

2. 文学作品の中のロボット

文学作品の中に登場するロボットは、その時代背景によって次の 3 つに分類することができる。

1) 神話伝説のロボット

レイジャールトの ROBOTS²⁾ という本のロボットの歴史の章の一番始めには、

作者：神、作品：アダム

と書かれている。人間は神にとってのロボットなのかもしれない。

この時代の、人間ではないが人間とそっくりであるものとしてのロボットは、神もしくは魔法によって生命を与えられた人形であり、材質が人間と違うというだけである。この中で興味深いのはユダヤの伝説に基づくゴーレムの物語である。ゴーレムは粘土で作られた人形であるが頭の部分にセムという神秘的な言葉（プログラム言語？）で命令が書き込まれることによって生命が吹き込まれ、人間の命令を聞き、与えられた仕事を処理したという。ところが、その書き間違いでゴーレムが暴れるという

原稿受付 1986 年 2 月 19 日

* Locomotion of future Robots

** 幾徳工業大学

最近のロボットのプログラムミスのような話まである。

2) 生体の合成によって生まれたロボット

19 世紀には科学の進歩によって生体に関する知識が増えたことと科学に対する万能性の期待から科学者（人間）が生体からロボットを作る話が書かれている。最も有名なシェリー夫人の「フランケンシュタイン——近代のプロメテウス」（1818 年）の怪物もこのようなロボットである。

この時代までのロボットはすべて、材質や由来が人間と異なる以外は人間と同じに扱われており、物語の中では人格が与えられ、知能や感情を持ち、2本の足で歩行するのは特に記述するほどのことではなかった。

これに対し、ロボットという言葉を作ったチャベックの「R. U. R.」（1920 年）のロボットは合成された有機質で作られ、人間型ではあるが人格は持たず、初めから使用できる知能は持たず、種々の作業を行うために教育をしなければならなかった。また、感情も持たないが、人間と同じように作業したり歩いたり是可以することになっている。このロボットがそれまでの人造人間と決定的に違うのは労働力として工場で大量に生産されていることである。

3) 機械部品によって構成されたロボット

茶運び人形で有名なからくり人形は人間と同じようなものを作りたいという夢の現実の表れであるが、文学の中でも機械装置としてのロボットが登場する。そして機

械であるためにその機構や動力などにも記述が及んでくる。歌劇「ホフマン物語」のオリンピアやバレエ「 Coppélia」の Coppélia はそれまでの“生きた人形”とは異なり、その動作の原理が魔法ではなく、機械技術によっているという意味でロボットの先駆と言えるだろう。もちろん、これらのロボットはメカニズムについては考慮されておらず、外見が人間型であることによって2足歩行が可能であるとされている。また、動力源はゼンマイということになっている。

現代的な意味の機械ロボットが文学中に登場するのはやはり 19 世紀末である。特にリラダンの「未来のイヴ」（1879 年）はその最も初期のものであり、また有名なものである。この作品はロボットに人間にそっくりなものという意味でアンドロイドという言葉を用いたことでも知られるが、この作品に登場するアダリー（図 1）というアンドロイド（ロボット）は人間の理想像として絶世の美女の外観をもっている。リラダンは作品の中で発明者のエジソンにその内部構造や動作原理を詳しく説明させている。また、動力源は電気であることになっている。

一方、アメリカのセナレンズの「フランク・リード」シリーズでは蒸気機関を動力として西部の荒野を走りまわる機械人間が活躍する。この物語は荒唐無稽ではあるが、1893 年カナダのムーアによってガソリンを燃料と

図 1 「未来のイヴ」に登場するアンドロイド、アダリー、挿絵：ジャック・ノエル

図 2 ジョージ・ムーアの「蒸気人間」

図 3 「メトロポリス」のマリア

する半馬力の蒸気機関によって両足のリンクを動かして、腰の部分につけられた鉄棒に拘束されて円を画いて歩く「蒸気人間」(図2)が実際に作られたのは注目できるだろう。

20世紀になると文学は映画という表現手段を得るが、映画にも多くのロボットが登場する。これらのロボットは外見は様々であるが、すべて機械部品によって構成されているのが特色である。初期の作品の中で最も有名なロボットは、昨年テレビでも放映された、「メトロポリス」(1926)のマリア(図3)であろう。そのデザインは最近の映画の「スター・ウォーズ」シリーズ(1977～)で人気あるロボットC3POにも影響を与えていると言われている。マリア以後も多くのロボットたちが文学や映画に登場するが、詳しくは他の解説に譲ろう。

3. これまでに開発された移動ロボット

地表移動機能に関する人類最大の発明は車輪であることに異論はなからう。車輪は移動のためにある程度平坦さを要求するが、平坦地では車体の上下動によるエネルギーの損失は少なく、かつ高速移動が可能であることは今日の自動車文明の発達により明らかである。

地表がすべて高速道路のような堅牢な平坦地であれば、移動体の移動方法としては車輪型が有利であることは言うまでもない。(そのような世界を想定した石原氏のしゃれたSF短編がある。)しかし、オハイオ州立大学のマギー教授によれば、地球上の陸地の5割以上が車には適さない荒地である。ここでいう荒地とは、かならずしも山岳地帯のような凹凸の激しい地形だけを指すのではなく、砂漠や沼沢のような足元の不安定な地帯をも意味している。山岳地帯だけでなく砂漠などにおいても歩行の方が有利な移動法であることは、今日でも砂漠地帯ではラクダによるキャラバンが利用されていることを考えれば明らかである。

移動ロボットの研究は1960年代後半から本格化した。初期に実現されたものの移動のためのメカニズムは車輪型であった。世界で最初の移動ロボットと言われる有名なSRIのShakeyもそうで、ミニコンで無線操縦されていたが、エネルギーも搭載した自立型ロボットの原型でもある。また、月面で1年以上も移動しつつ観測を続けたソ連の月面探査機ルノホートは実用的な移動ロボットとして記念すべきものであろう。さらにアメリカの火星探査機マーズローバーは、より自律的なロボットといえよう。

歩行機械が真剣に研究されだしたのは、アメリカの宇宙計画の一環として月面探検車の設計を始めた時であったと言われている。実際に作られたのは有名な4輪の車

図4 OSUのHexapod

輪を持つ月面車であるが、その後も研究は続けられいくつかのタイプの歩行ロボットが試作されてきた。GEがアメリカ陸軍のために試作した4足歩行機械は4本の足をオペレータが両手両足で操縦するものであったが、実用化できなかったのはその操縦が一人の人間の能力を越えていたからであるという。

コンピュータ制御の発達によって様々な歩行ロボットが試作されるようになったのは1970年代後半である。中でも有名なのはオハイオ州立大学のマギー教授らの6足歩行ロボットOSU Hexapod(図4)であろう。このロボットはその後より大型のASV-84に発展しているはずであるが、筆者はまだその完成の報を聞いていない。

一方、わが国でも移動ロボットの研究はさかんに行われてきた。産業用の移動機械としての搬送ロボットの研究は1960年代後半から行われており、多くの製品が実用化されている。人間型の2足歩行ロボットに関してはメカニズム、バイオメカニズム、制御理論的に多くの研究課題があり、数多くの研究機関で研究されている。詳しくは本学会誌で1983年10月号に「2足歩行ロボット」の特集が組まれており、早稲田の加藤一郎教授がその歴史と課題についてまとめておられるのでそちらを参照されたい。その後、昨年の筑波科学万博には2足歩行ロボットWL-11が展示され、半年にわたって歩き続けたことは記憶に新しい。一方、2足以外の多足ロボットも盛んに研究されており、同じ筑波科学万博では東工大の広瀬茂男助教授らの開発した4足歩行ロボットも展示されていたし、掃除ロボットを始めとして多くの車輪型移動ロボットも楽しいショウを行っていた。本学会誌1984年6月号には「車輪型移動ロボット」の特集が組まれており、車輪型やクローラ型、脚と車輪やクローラとのハイブリッド型などの移動ロボットの研究の最先端がまとめられている。さらに、1985年8月号では科学万博のロボットたちが特集されている。

図5 移動ロボットの位置づけ

4. 未来のロボットの移動技術

これまでにロボットに関する夢と、その具体的な現れである移動ロボットについて眺めてきたが、ここで未来のロボットの移動技術の位置づけについていささか独断的にまとめてみよう。

先にも触れたように、人間とまったく同じディメンションで同じような知能を持ったロボットは究極の姿であろうが、ここではその前段階として今後20年程度の間に解決されるべき問題に限るとしよう。

移動ロボットのニーズは現在の産業用ロボットに移動機能を付加して作業効率を上げようというものから、第1次産業や第3次産業のように必然的に移動機能が必要な分野にまでわたるが、その移動環境は様々である。

昨年日本産業技術振興協会ですらまとめた「新時代をめざすバイオニクス技術」の報告書³⁾の中で筆者らは、移動ロボットの移動機能を図5に示すような3つの座標軸でとらえている。この3つの座標軸はロボットの移動技術を考える上で重要であると考えてるので紹介しよう。

第1の軸は移動環境である。これは単純な空間的な広さや質だけではなく、対人間関係環境ともいべき人間との関わりを程度を表わす軸である。この軸はまず大きく人工環境と自然環境とに分かれるが、ここで人工環境とは移動機械のために整備された環境という意味で、移動のための補助施設(例えば、軌道やランドマークなど)を設定できる環境を意味する。人工環境はさらに人間との関係によって

- 1) 最も個人的な対人間関係である家庭内の環境
- 2) 工場内やオフィス内のような特定の人間だけが関与する環境
- 3) 不特定多数の人間が利用する環境
- 4) 病院など特殊な立場の人間が利用する環境

図6 極限作業ロボットのイメージ

などに分類される。

第2の軸は移動ロボットの目的をその移動性と作業性とを尺度として表わす。われわれにとって最も身近な移動機械である自動車に様々な作業用自動車があるように、移動ロボットは人間の移動性の向上だけでなく、作業空間の拡張にも使用される訳でこの軸はその程度に対応している。

第3の軸は移動ロボットとその操作者との関係を表わす軸で、ロボットの知能に対応する軸である。この軸では自動車のように操縦者が自ら搭乗して操縦するレベルから、逐一リモートコントロールによって操作するレベル、大局的な命令によって自律的に行動するレベルまでがある。

この報告書では第1の軸に従って、他の軸のそれぞれの組合せの状況においての技術的問題点や必要となる要素技術について移動ロボットの安全性や周囲の人間への心理的影響も含めて、動力系、センサ系、知能性という観点から調査した結果をまとめている。結論的には、環境の相違によって必要とする技術は異なり、特に、移動方式としては人工環境内ではクローラを含めた車輪型、自然環境内では4足以上の脚式の方が有利であろうとしている。

早稲田の加藤一郎教授のいわゆる「ホームロボット」は、人間との関わりを程度では最も個人的なものである。ホームロボットは産業用のロボットと異なりあくまでも主役は操作者たる人間であり、その目的はその人間の生活活動の補助であるため、ホームロボットの機能はハードウェア及びソフトウェア両面とも非常に高度なものが要求される。特に日本の家庭内ではホームロボットは狭

い環境内を移動しなければならず、ハードウェアだけでなく、感覚と知能の面で人間に匹敵するような繊細さと緻密さが要求されるのでその実現は相当未来になろう。また、家庭電化品がそうであるように機能だけでなくその外観も性能の一部であり、東工大の森政弘教授のいわゆる「不気味の谷」に入らないように設計には配慮が必要である。ただし、エネルギーに関しては家庭内では電力を比較的簡単に利用でき、騒音などの点でも有利である。現状の技術では、例えば、掃除を行うというような特定の機能のみをはたすホームロボットを開発していくステップバイステップの進歩が現実的であろう。ホームロボットは、ホームオートメーションの効果器として、高齢化社会の介護機器として今後大いに普及していくであろう。

もう一方の極である自然環境内での移動では、多足の歩行ロボットが踏破性や安定性の面から有利であることは明らかであるが、脚式移動法はまだ確定していない。脚のメカニズムには移動エネルギー効率を向上させるために東工大の広瀬助教授の提案している GDA（重力場方向駆動分離）方式が主流となろう。しかし、その制御は、たとえ操縦型の歩行機械であっても、経路決定や最適歩容注の決定法などの人工知能的な制御ソフトウェアの確立が最も重要である。

以上、移動ロボットを実現させるという立場から技術的な面を眺めてきたが、移動ロボットを完成させるまでには

- 1) 状況を把握するためのセンサー
- 2) 自律化のための人工知能、特に環境や対象の認識、移動経路の決定とナビゲーション、操縦者とのマンマシンインターフェイス、脚の歩容制御など
- 3) エネルギーと情報処理の自立化
- 4) 軽量で強度のある構造材料
- 5) 効率の良いアクチュエータ
- 6) 移動のためのメカニズム

など開発するべき問題が山積している。

5. お わ り に

文学に登場するロボットは人間の代わりということではほとんどが人間型である。慶応大学の山崎信寿助教授が指摘しておられるように⁴⁾、人間は発生学的に2本の腕と2本の足という制約があるが、もし人間がギリシャ神話のケンタウロスのように2本の腕と4本の足であればマニピュレーションや移動の安定性は2手2足型よりも

有利であることは明らかである。ロボットには発生学的な制約はないので機能に最も適した形状を採用するべきであろう。図6は極限作業ロボットプロジェクトで発表された想像図であるがこのロボットがケンタウロス型であるのは上記のマニピュレーションや移動の安定性と可搬力の面で有利であるからであろう。

ロボットという「鉄腕アトム」を連想するのはもう古いのだそうである。しかし、アトムは人間型ロボットの理想像であろう。人間に匹敵するような人工知能が完成するのはいつになるかさだかでないが、時計を分解したり組み立てたりするような器用な手と歩いたり走ったりするような足を持ったアトムのようなロボットは、まさに人類の昔からの夢の姿である。手塚氏はアトムのなかで「ロボットは人間をしあわせにするために生まれたもの」とであるとして、人間とロボットが共存共栄する社会とそこに発生する多くの問題について問題提起されている。正義感の強く心やさしいところは森政弘先生にお願いするとしても、人間とロボットとの関わりあいにはや SF の専売特許ではなくなろうとしている。

参 考 文 献

- 1) 石原：SF ロボット学入門，早川書房，(1971年) 261p.
- 2) Reichardt, J.: ROBOTS: FACT, FICTION+PREDICTION, THAMES AND HUDSON, (1978) 168p.
- 3) バイオニクス研究推進協議会編：新時代をめざすバイオニクス技術——生体機械機能編——，(1985年) pp. 47-87
- 4) 山崎：生物から見た二足歩行，ロボットピア，第3号，(1982年) pp. 31-35

田口 幹 (Kan TAGUCHI)

昭和 47 年東京工業大学工学部機械物理工学科卒。昭和 49 年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修了。同年同大学院博士課程中退。東京工業大学工学部助手。昭和 60 年幾徳工業大学機械工学科助教授。昭和 61 年同大学機械システム工学科助教授工学博士。

当初よりのパターン認識の研究に加えて、生物工学、ロボット工学の立場からロボットの知能に関心を持っている。日本機械学会、電子通信学会、計測自動制御学会、日本ME学会、日本ロボット学会などの会員。

注) 歩容とは脚をどのような順序でどのように動かすかということ。外部から見ると脚の運動のパターンということになる。