

特集 「考証：2001年宇宙の旅」

# 「2001年宇宙の旅」の中のロボティックシステム

—工学的観点からの夢と現実—

## Robotic Systems in “2001: A Space Odyssey” Dream and Reality from an Engineering Viewpoint

浅間 一  
Hajime Asama

理化学研究所  
RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research)  
asama@cel.riken.go.jp

**Keywords:** robotics, intelligent control system, safety design, engineering embodiment, purposiveness, human interaction.

### 1. はじめに

2001年宇宙の旅を映画館で最初に見たのは、公開からかなり経ってから、多分高校生のときだったと思う。そのときの印象は強烈であったが、内容がよく理解できず、特別気に入ったわけでもなかった。しかし、回を重ねて見るたびに、次々と解釈や想像が沸き上がってきて、新たな発見もあり、何回見ても新鮮に楽しめ、見るにつれますますいろいろ考え込むといった不思議な魅力にはまっていた。

SFは、フィクションでありながら、科学的に可能性としてあり得そうだと思うべき最大の魅力である。したがって科学者にとっては、それは単なる娯楽ではなく、これから行う研究の目標にもなれば、教訓にもなる。その意味で、SFは少なからず科学の発展に影響を与えているのだろう。

日本のロボティクスの研究者には、鉄腕アトム、ガンダム、パトレイバーなどのSFアニメーションを見たことが研究の動機になっている人が少なくない。海外では、CGの発達により、SF映画の映像の迫力が飛躍的に向上し、スターウォーズ、ロボコップ、ターミネーターなど、未来のロボットのいくつかの可能性が魅力的に映像化された。そんなCG技術が生まれる前の1968年に作られた「2001年宇宙の旅」は、今でも内容かつ映像技術において古さを感じさせない名作であり、「知」を研究する世界中の科学者にとって象徴的存在である。

経済学で、モデルに基づき行った予測が、数年後に実際に正しかったかどうかを検証しないように、SFで描かれた未来像が、描かれた時代になったときに云々言うことは、作品のケチをつけるようであり、私とし

ても全く本意でない。偉大な作品ほど現実への影響が強いので、未来において現実となるはずもない。

SF映画ファンの私としては、生死、輪廻、進化、神、地球外生物など、この映画の神秘主義的な主題について、クルト・ゲーデルの神の存在論も含めて語りたところではあるが、ここでは工学の研究者に徹して、宇宙船の統括制御を行うコンピュータ HAL 9000の知的機能に焦点を絞って論じる。HALの知についてはさまざまな議論があるが[ストーク 97]、ロボティクスの観点から見ればそれは宇宙船というボディを持つロボットである。1968年にアーサー・クラークとスタンリー・キューブリックが、「2001年宇宙の旅」の中でロボティクスに対して発している多大な期待と警告を、2001年まで歩んできた現実の技術と対比しながら見直し、これからの研究の問題意識を改めて確認してみようと思う。

### 2. 知的制御システムとしての HAL 9000

HAL 9000の宇宙船の総合的制御機能は、いまだ我々の夢の技術である。人間とコミュニケーションを行いながら、宇宙船のナビゲーションのみならず、生命維持、ポッドの遠隔制御まで極めて広範な仕事をやってのける。まず、その特質すべき個々の知的機能について考察してみよう。

#### 2-1 ナビゲーション

HAL 9000の主たる機能として、宇宙船のナビゲーション機能があげられる。宇宙空間において、宇宙船の位置・姿勢を計測しながら、目標地点(木星。著書[クラーク 93]では土星)までの軌道を計画し、飛行の制御を行う。現在の移動体の制御技術に関して言えば、

飛行機の自動制御技術に代表されるように、障害物などが存在しない3次元自由空間で、特定の軌道上を移動するナビゲーション技術に関しては、実用技術として確立したと言ってよい。しかし、2次元平面上を移動する地上に目を移してみると、目的地を与えただけで自動的に移動するような高度な制御技術は、ITS (Intelligent Transport Systems) をはじめとして開発が徐々に進められてはいるものの、まだ商品化までには時間がかかるだろう。地上のナビゲーションの自動制御技術開発が遅れているのは、環境に存在する物理的制約が極めて大きく(さまざまな自然物や人工物が存在する物理的拘束下で動かなければならない)、また、予測できないファクター(路面の状態をはじめとして計測・モデル化できない状態量、障害物・外乱など動的に変化する環境要因など)が非常に多く、大変複雑で適応性の高い制御系が必要になるためである。したがって、特定の目標地、特定の軌道、限られた環境条件においてだけでなく、さまざまな環境とのインタラクションがある中で、目標地や軌道も動的に変わるようなナビゲーションについては、その本質的な技術的問題はまだほとんど解決されていないのである。

## 2.2 マニピュレーション

次に、マニピュレーションに注目しよう。宇宙船にはポッドと呼ばれる小型艇が搭載されていて、ポッドには双腕のマニピュレータが装備されていた。マニピュレータは左右の双腕であり、ポッドから正面に向かって突き出ている。各マニピュレータは、肘に回転関節があり、その先に手首の関節がある。特徴的なのは、手首から先が二股に分かれていてその先にグリップがあることである。二股部はカニのはさみのように開閉ができるので、この機構を使って大きなものを把持することもできる。原子力プラントのホットセルなどで、遠隔で操作して作業を行う双腕の機械式マニピュレータは古くから存在していたし、ユニークな自由度構成と美しいフォルムを除いては、メカ的には特筆すべきことは少ない。しかしながら、ポッドとマニピュレータを操作する制御技術ということになると話は違う。

最初にポッドが登場する場面は、HAL 9000 が故障すると予測した通信ユニット AE-35 をボーマン船長が交換する場面である。このときはポッドのマニピュレータは使われていない。ボーマンはポッドに乗り込み、マニュアルでポッドを操縦しながら故障箇所の近くまで移動して、そこから部品のところまで宇宙遊泳して手作業で部品を交換した。次にポッドが登場するのは、プール副船長が、交換した AE-35 を再度もとに戻す場面である。このときプールが交換作業のためにポッドから出た際に、HAL 9000 はポッドとそのマニピュレータを遠隔操作して、プールを抹殺する。最後にポッドが登場するのは、殺されたプールが宇宙に放り出さ

れたのを見たボーマンが、別のポッドに乗り込み、これを操縦してプールの死体を回収して戻ってくる場面である。この際、ボーマンはマニピュレータを操り、プールの死体を確保して帰ってくる。しかし、自己防衛機能を持った HAL 9000 は、ボーマンのポッドを締め出そうとし、ボーマンはポッドのマニピュレータを操作して宇宙船の非常用ハッチを開けて、突入する。

まず、2番目にポッドが登場した場面に注目してみよう。HAL が直接ポッドやマニピュレータを実時間制御してプールを抹殺したとなると、HAL はかなり高度な制御機能とポッドとの高速通信機能を持っていたことになる。実時間遠隔操作の制御のための高速通信が技術的に難しいとなると、高度な制御機能はポッド自体に組み込まれ、HAL は抹殺の指示だけをポッドに送っていた可能性もある。いずれにせよ、有線でつながれていない機器を遠隔操作することによって、コンピュータが意図的に(偶然でなく)殺人を犯すというのは、現在の技術ではとうてい無理で驚くべき情報処理・制御技術である。

次に、3番目にポッドが登場した場面では、ボーマン船長がマニピュレータを操作している。どのような操作パネルやコックピットを使い、どのようにマニピュレータを操作しているかはいっさい表れない。しかし、このマニピュレータは人間の腕と全く異なる多自由度構造をしており、これを人間が操作するには、かなり工夫された操作用インタフェース、もしくは操作する人間のかんりの熟練が必要となる。このような遠隔操作制御技術に関しては、力フィードバック制御技術、VR を用いた 3D 表示技術をはじめとするテレプレゼンス技術が飛躍的に進歩した。宇宙空間での多くの作業がマニピュレータで行われている。ただし、細かい手作業まですべて遠隔操作制御技術で行うとなるとそれほど容易ではない。ボーマンが最初に部品交換を行ったとき、マニピュレータを使わず、わざわざ船外に出て手作業で行ったのも、クランクかキューブリックがその辺の技術的フィージビリティを直感的に見抜いていたからかもしれない。

また、別の観点から注意深く見てみると、ポッドのマニピュレータを動かしたり、非常突入するシーンでは、ポッドが宇宙空間内で固定されていないにもかかわらず、静止し続けているのがわかる。本来なら、運動量保存則が働くので、ポッドは反動で動いてしまうはずだ。映画では気が配られていなかったにせよ、宇宙ロボティクス分野では、フリーフライヤーをはじめとしてこのような運動量保存則を考慮した制御に関する研究は非常に発展した。

## 2.3 生命維持

人工冬眠をしている3人の博士や、船長、副船長の生命維持も HAL の重要な機能の一つである。いわゆる

宇宙船内の温度、圧力、酸素・二酸化炭素量などのプロセス変数を制御するだけなら、技術的に確立している。しかし、冬眠している人間も含め、船内の人間の生体情報を計測し、健康状態を診断し、医療行為までもHALが自律的に行ったとなると、それは驚くべき制御技術である。微生物による発酵プロセスをはじめとして、生物や生体材料を対象とした制御は、現在でも非常に難しい技術である。プロセスのモデル化が非常に困難であり、測定できない（特にリアルタイム、オンラインで）パラメータが極めて多いことがその原因となっている。単なるプロセス変数の計測・制御でなく、対象の状態を予測しながら行う診断機能まで含めた制御機能が求められる。特に対象が人間となると、医学的知識も組み込まれていなければならない。現在まさに、医療過誤の防止、継続的・リアルタイムの生体情報のモニタリング、診断結果に基づいた速やかな処置などの技術が求められており、医療分野における知的情報処理技術は、まさに早急かつ積極的に取り組むべき課題だ。

### 3. 安全性設計

人工システムは、神によって作られた生物とは異なり、設計者がある目的のために意図して設計したシステムである。HAL 9000も、宇宙船の統括制御を行うように人工的にプログラムされたコンピュータである。しかし、どんな人工システムでも、当然設計者の意図に反した機能を持ち得る。一般設計学 [吉川 79] 的に言えば設計者の予想しなかった潜在機能を持ち得るわけだし、生態心理学 [三嶋 00] 的に言えば未知の環境とのインタラクションによって設計者が予想しなかったアフォーダンスが生まれ得る。ロボカップ（ロボットによるサッカー競技）を見てもわかるように、ロボットはなかなかそれを設計・製作した人間の思うようには動かない。まして、設計・製作した人間とユーザが別の人間なら、使い方によって設計者の意図に反した動作をするのも当然だ。

この映画は、設計者の善意で開発したシステムが、予想外の動作をして事故が起り得ることを示唆し、技術に対して警鐘を鳴らしている。現在、安全なシステムを設計するための技術開発が活発に行われている。それは、ロボット3原則のインプリメントという単純な問題ではない。

#### 3.1 ノイズ、外乱、予期しない環境条件への対応

まず、人工システムが動作する環境条件が設計者の予想を超えるという場合があり得る。産業用ロボットが、ノイズによって誤動作し、その暴走によって作業員が亡くなった事例がある。設計者がいかに環境の変動を予測し、頑健なシステム作りに努めても想定外事

象は起り得る。HALもいん石を検出すれば、その回避行動を行えるような頑健性が組み込まれていたに違いない。現在、そういった未知の外乱、ノイズをはじめとするさまざまな動作環境の変動要因に対し、頑健な制御系を構成するための適応制御・学習制御技術の開発が行われている。実現された機能はまだ限定的であるが、極めて重要な技術である。

#### 3.2 故障への対応

人工システムの運用に伴う時間的変化、すなわちシステムの劣化、機能低下、故障といった問題も避けられない。プラントや航空機など、高い安全性が要求されるシステムを中心として、さまざまな故障への対応技術が議論されてきた。設計時の技術として、できるだけ故障を生じさせない技術（信頼性設計）、信頼性設計のための故障事例解析技術、一部が故障しても耐える技術（耐故障性設計）、故障した部分を取り換えやすくする技術（保全性設計）、故障時に安全側に状態を推移させる技術（フェールセーフ技術）、故障の際のリスクを解析する技術などが開発されてきた。また、運用中の技術として、摩耗、疲労、腐食などの劣化を予測し、機能低下（故障）を予知する技術、異常検出のための点検・監視技術、異常原因を同定する技術（異常診断）などの開発も盛んである。HALやそれが制御する宇宙船も、故障や異常に対する細心の配慮がされてあったに違いないが、それにもかかわらずHALは機能不全に陥った。現在では、自律分散的なアーキテクチャ、複数のシステムによる相互的機能監視、バックアップシステムなどの機能冗長設計、異常時の切替え・段階的機能縮退（デグラデーション）など、システムに頑健性を持たせる方法論が主流である。ちなみに、AE-35は容易に交換できたので、モジュール化による保全性設計が施されていたと言えよう。

#### 3.3 ヒューマンエラー

多くの場合、設計者とは異なるユーザがシステムを運用する。運用中に生じるヒューマンエラーは、航空機や原子力関連施設の事故の要因として、非常に注目されるようになった。ヒューマンエラーは、使い勝手の悪さという設計上の問題に原因がある場合もある。ユーザインタフェースとは、設計者とユーザの乖離しないための概念でもある。しかし、人間はそもそも不完全な存在であり、ミス（思い違い）やスリップ（うっかり）は起り得るのが当然という前提で、システム設計を行う必要性も説かれている。さらに、インターネットのクラッカーのように、善意のユーザばかりとは限らないという前提での設計もときには重要である。ユーザが誤った使い方をして安全なシステムの設計論（フルプルーフ）も今や常識となりつつある。

開発段階における人間のミスや不備も、人工システムが設計者の意図どおりに動かない要因となり得る。すなわち、設計上のミス、製作工程での欠陥、プログラムのバグなどである。ロボットの研究開発は、まさにこれとの戦いである。現在では、開発環境の整備、バグ取りの効率化、ソフトウェアのラピッド・プロトタイプニングなどの重要性が認識されている。また、部品の取換え作業ミスなど、保全作業でのミスも考慮しなければならない。

人間の人工システムへのかかわり方は多様であり、現在は個々のヒューマンエラーの可能性に対して個別な検討が行われている。今後は、人工システムと人間との共生のあり方についての体系的な議論が必要である。

#### 4. 工学的知に関する考察

最後に、ロボティクスから見た HAL の工学的知について考察したい。2001年宇宙の旅で描かれているような人工システム（機械）の反乱のストーリーは SF 作品に非常に多い。これは、ロボットの原点であるカレル・チャペックの戯曲「ロッサム・ユニバーサル・ロボット会社 (R.U.R.)」に始まり、アイザック・アシモフのロボット 3 原則 [アシモフ 83] に発展する。「ターミネーター」も、人間が人間のために作り出したロボットたちの反乱により、ロボットが人間と戦争を始める話であるし、ジェームス・ホーガンの「造物主の掟」[ホーガン 85] ではロボットだけの自律した世界が登場する。工学的に作られた人工システムが、はたして生物と同じような知能を持ち得るのであるか、それには私は疑問を感じている。

##### 4.1 合目的性

設計者は、システムの設計をする際、ユーザがどのような状況でどんな目的でどのように使うかを想定し、それに基づきシステムを設計する。知能ロボットの場合、設計者はそれがどのような目的で用いられるかを網羅的に予測し、できるだけ汎用的な機能を持たせようと努力する。どんな状況でどんな目的でも使えるようにするには、学習によって適応する機能を組み込むという方策が重要だ。宇宙船、ポッド、マニピュレータ、生命維持装置などを操り、宇宙船を適応的に統括制御する HAL 9000 にも、この学習機能が備わっていた。

学習は、生物的機能である。生物は、本能的なもの（欲望とか喜びとか）に基づき行動の選択をして学習する。人工システムの場合も、何らかの評価関数 (GA における Fitness など) に基づき学習を行わせる。しかし、それは生物の本能的なものでなく、そのシステムの目的として人間が与えたものである。すなわち、人

工システムを学習させるための評価関数、あるいは評価関数を作りだす仕掛けを、前もって設計者が、あるいはそれを使うときどきにユーザが与えることが条件となる。学習の可塑性も考慮に入れなければならない。

不完全性定理によれば、システムは自己の無矛盾性を証明することはできない [高橋 99]。これは、自己保存や防衛といった自己言及的機能を論理的システムとして構築することが不可能であることを示している。人間はまさに矛盾に満ちているが、人工システムが矛盾に陥り、正常な動作が保証できなくなれば、安全面で問題になる。それを保証するにはシステムの外に出るという行動が必要になる。すなわち自律システムの場合、ユーザという外部とのインタラクションによって内部の矛盾を解決するメカニズムが不可欠ということになる。先に述べたシステムの目的を人間が与えるということは、まさに人間がコミュニケーションによって、人間が考える本来の目的に添うように、システムの矛盾に対する対応方策を示すことにほかならないのである。

システムと人間をいかに協調させるか、ヒューマンインタフェースはいかに設計すべきかといった議論は、まさに工学的システムの合目的性という重要な問題の鍵になるであろう。

##### 4.2 身体性

工学的知のもう一つの切り口は、身体性であろう。人工知能の研究は、計算機による人間の思考機能の実現のみならず、知覚・運動機能含むロボティクスにまで広がっている。そうになると、身体性は避けて通れない問題である。脳だけの生物は存在しない以上、知の形成には身体が本質的に不可欠という考え方が、ロボティクスでは主流になりつつある。HAL は、宇宙船というボディに備わったセンサ、通信手段、アクチュエータを用いて知覚し、行動した。地上の同型の HAL が、宇宙船を制御していた HAL と異なる判断をしたのは、まさに身体性の違いにより異なった知識を獲得したことを示している。

身体はいわば環境とのインタラクションにおける物理的なインタフェースである。どのような情報を知覚できるか、環境に対してどのような行動を行えるかは、身体に依存する。しかしここで重要なのは、神が作ったにせよ、進化したにせよ、生物の身体はすでに存在していることが前提だ。ロボットは人工システムなので、その身体は人間がいかようにも設計できる（しなければならない）。これまでのロボティクスにおける身体性と知能の獲得・創発に関する研究は、身体を仮定したうえでの議論が多く、設計論に関する議論は極めて少ない [浅間 97, 浅間 00]。ロボットに知的機能を獲得させるのに、どのような環境とのインタラクションが必要か、それを技術的にどのように実現するかなど、

物理的実現性を考慮したシステム技術開発が今まさに求められている。

#### 4.3 自己診断・自己修復・自己保存

ターミネーターに登場するロボットのタフさには驚かされる。一つの断線で動かなくなる現在のロボット技術に対し、壊そうとしても壊そうとしても壊れない、恐怖を感じるほどのタフな技術、それがもう一つの工学的知のように思う。

ロボットの知能が適応性と言えるなら、①環境の変化に対する適応性、②人間とのインタラクションから生じる目的の変化に対する適応性、そして③自己の状態の変化に対する適応性という三つの軸で知能を表すことができるだろう。自己診断・自己修復・自己保存という機能をいかに実現するか、それが我々ロボティクスの研究者に課せられた次なる課題である。すでに安全性の議論の中で、異常事への対応技術について述べたが、その機能をいかにシステムの内部に持たせるかが問題である。機能不全が生じた際にその診断を行う研究は、医者診断知識・推論過程をモデルに人工知能で長年議論され、いまだに実用に至っていない。まして、自己修復ということになると、自己の状態認識と状態を推移させる制御機構だけの問題ではなく、アーキテクチャ自身から考え直す必要がある。新スタートレックに登場する「ボーグ」という敵の宇宙船は、多数の均質なユニットから構成される自律分散的アーキテクチャとなっており、自己再生機能を有している。自己修復機能を持つロボットシステム [村田 97] をはじめとする自律分散型ロボットシステムは、今最もホットなロボティクスの研究分野である [Asama 96]。

## 5. おわりに

「2001年宇宙の旅」の HAL 9000 の機能について、ロボティクスの立場から分析し、それと対比しながら現実の技術、特に知的制御システム技術、安全性設計

技術について解説し、工学的知を考察しながら、今後研究すべき課題、開発すべき技術などを述べた。

最後に、本原稿を執筆するうえで、宇都宮大学横田和隆助教授との雑談が大変参考になった。ここに感謝申し上げる。

## ◇ 参考文献 ◇

- [Asama 96] H. Asama, T. Fukuda, T. Arai and I. Endo, Eds.: Distributed Autonomous Robotic Systems 2, Springer-Verlag, Tokyo (1996).  
 [浅間 97] 浅間 一, 藤井輝夫: ロボットの創発性に関する一考察, 第3回創発システム・シンポジウム, pp. 29-32 (1997).  
 [浅間 00] 浅間 一, 藤井輝夫: 情報は環境にあり, 伊藤宏司 編著: 知の創発, NTT 出版 (2000).  
 [アシモフ 83] アイザック・アシモフ, 小尾布美佐 訳: われはロボット, 早川書房 (1983).  
 [クラーク 93] アーサー・C. クラーク, 伊藤典夫 訳: 2001年宇宙の旅, 早川書房 (1993).  
 [ホーガン 85] ジェイムス・P. ホーガン, 小隅 黎 訳: 造物主の掟, 東京創元社 (1985).  
 [三嶋 00] 三嶋博之: エコロジカル・マインド, 日本放送出版協会, (2000).  
 [村田 97] 村田 智, ほか: 機械の自己組立と自己修復, 計測自動制御学会論文集, Vol. 33, No. 5, pp. 424-432 (1997).  
 [ストーク 97] デイヴィッド・G. ストーク, 日暮雅通 訳: HAL 伝説, 早川書房 (1997).  
 [高橋 99] 高橋昌一郎: ゲーデルの哲学, 講談社 (1999).  
 [吉川 79] 吉川弘之: 一般設計学序説, 精密機械, Vol. 45, No. 8, pp. 906-912 (1979).

2000年11月7日 受理

## — 著者紹介 —



浅間 一 (正会員)

1959年生まれ。1984年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986年理化学研究所化学工学研究室研究員補。生化学システム研究室研究員を経て、現在工学基盤研究部技術開発促進室長。1999年埼玉大学大学院理工学研究科客員助教授。自律分散型ロボットシステム、創発ロボットシステムの研究や複数自律移動ロボットの協調技術、知的データキャリアとその応用技術の開発等に従事。1995年日本機械学会ロボメック賞、RoboCup-98 Japan Open 人工知能学会賞 (UTTORI United Team) など受賞。工学博士。