

## 自律型知能ロボットの開発

川上 誠 魚住 董

沼津工業高等専門学校 電子制御工学科

自律型知能ロボットを題材として、システム開発の基礎習得のための教育を行っている。このロボットはMIRSと呼ばれ、2台のロボットで「おいかけっこ」をするものである。このロボットの開発を通して、トータル・システムの概念設計、基本設計、詳細設計、インテグレーション、運用などの考え方を身に付けることを目的としている。また、開発工程ごとに作業内容や成果をドキュメントにまとめ、技術報告書の形でチームごとに保管している。ここでは現在実施している自律型知能ロボットの開発について、教育の視点からその内容を報告する。

## Development of Autonomous Micro Intelligent Robot System

Makoto Kawakami Tadashi Uozumi

Department of Electronics and Control Engineering, Numazu College of Technology

3600 Ooka, Numazu-shi, Shizuoka 410, Japan

We give our students an education to acquire the elementary knowledge of system development, using the autonomous micro intelligent robot system. It is called MIRS, two of which play a tag game. The aim of this research is to make the students realize such ideas as preliminary conceptual design, logical design, detailed design, integration, operational implementation of the total-system. Each process produces documents, they are kept as technical reports. In this paper, we report the development of autonomous micro intelligent robot system from the educational view point.

## 1. はじめに

沼津工業高等専門学校の電子制御工学科は昭和61年に設立された比較的新しい学科である。本学科は近年のマイクロ・エレクトロニクスの発展にともない必然的に生じた機械工学、電気・電子工学、情報・通信工学および制御工学の各分野にまたがる学際的な工学の領域を担う技術者の育成を目指している。

そこで、電子機械システムをメカニクス、エレクトロニクス、ソフトウェアおよび運用体制からなる総合的な複合体、すなわちトータル・システムとして取り扱い<sup>1)~4)</sup>、実際にシステム開発を体験する機会を学生に与えることが重要であると考えた。

このようなシステム開発をどのような形で教育に取り入れたらよいか検討した結果、題材として自律型の知能ロボット(MIRS: Micro Intelligent Robot System)を選び、一連の開発過程を3学年後期から4学年前期後期の1年半にわたり授業の中で体験させることとした<sup>5)</sup>。

この自律型知能ロボット(以下MIRS)の開発も本年度で5回目を数え、これまでに蓄積されたノウハウをもとに毎年改良が加えられ、ハードウェアに関してはかなり完成度の高いものが作られるようになってきた。本稿では、システム開発の基礎を習得させるために行っているMIRS開発の内容について報告する。

## 2. MIRSの概要

MIRSは、16ビットのマイクロ・プロセッサ、超音波センサ、光センサ、タッチ・センサ等を搭載し、2輪独立駆動方式によって移動する自律型の知能ロボットである。

このロボット後部には、自分の存在を知ら

せるために光源が取り付けられている。2台のMIRSがお互いにこの光源を捜しながら高さ15cmのフェンスで囲まれた2m四方の競技場内を動き回り、光源下部に設置されたパネル・スイッチ(勝敗判定装置と呼ぶ)を押す動作を行う(パネル・スイッチが押されると光が消えて負けとなる)。すなわち、どちらが先に相手のパネル・スイッチを押すかを競うロボットがMIRSである。

標準的なMIRSの外観および主要諸元を図1および表1に示す。

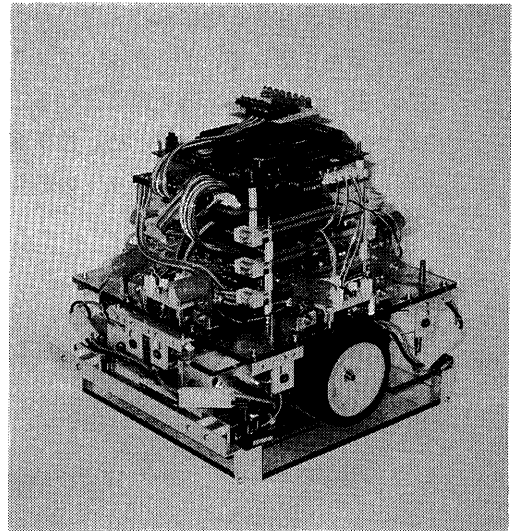


図1 標準的なMIRSの外観

### 2.1 MIRSのシステム機能

このMIRS競技では、スタート・ボタンが押されてから競技が終了するまで、オペレータはロボットの動作に関与することが禁止されているため、MIRSは自律的に行動しなければならない。このようなシステムには基本機能として、情報収集機能、状況判断機能、行動制御機能、行動計画・指令機能などが要求される。以下に、これらの基本機能について簡単に説明する。

表1 M I R Sの主要諸元

本体重量	3.5 kgf (バッテリー2個含む)	
本体寸法	長さ24cm, 幅22cm, 高さ24cm	
MPU	MC68000 (モトローラ, 8MHz)	
メモリ	RAM 64KB, ROM 128KB	
本体 駆動部	駆動輪 (直径8cm, ゴム製)	2個
	補助輪 (自在キャスタ)	2個
	ギヤボックス (減速比 1/80, アルミ製)	2個
	DCモータ (マブチ RS-380PH)	2個
	ロータリ・エンコーダ (サンセイ OMB-200-2T)	2個
	デジタルPWM制御 FETパワー変換	
光センサ	フォトダイオード (浜ホト 1133)	6個 (3対)
超音波 センサ	空中超音波センサ (ムラタ MA40A5S/R 40kHz)	4対
電源部	Ni-Cd バッテリー (タミヤ 7.2V, 1700mAh)	2個

(1) 情報収集機能

相手M I R Sの位置および自己位置・姿勢などに関する情報を計測・収集し、状況判断や行動計画に必要な形式のデータに変換する機能である。

(2) 状況判断機能

情報収集機能で得られたデータに基づいて状況判断を行い、適切なシステム動作モードを選択する。

なお、システム動作モードについては後述する。

(3) 行動制御機能

状況判断機能から与えられた動作モードに基づき、行動計画・行動指令機能を制御する命令を下す。

(4) 行動計画・指令機能

行動制御機能から与えられた制御命令およ

び情報収集機能で得られたデータに基づいて行動計画を立て、駆動機能へ指令を出す。

(5) 駆動機能

走行用モータの駆動指令に基づき、本体の移動および姿勢変更を行う。また、これ以外に回転テーブルなどアクチュエータを必要とする機能を有する場合はその駆動を行う。

(6) その他の機能

マン・マシン・インタフェース機能、勝敗判定機能、システム・テスト機能がある。

上記(2)から(4)の機能はM I R Sに搭載されたMPUのプログラムによって実現され、ロボット自身の意思によって自律的に行動するところが本システムの特徴である。

そのシステム機能関連図を図2に示す。

2.2 システム動作モード

前述のように、M I R Sは自分自身で意思決定し自律的に行動するが、その動作は図3に示すようなシステム動作モード遷移図に従って行われる。図中の各動作モードの内部はさらに詳細な動作モード遷移図によって規定されるものであるが、ここでは各動作モードの概要を簡単に説明する。

(1) システム初期化モード (M0)

必要な初期設定の後、あらかじめ設定されたコマンド・スイッチの状態を解析する。コマンド・スイッチにより相手M I R Sを探索する行動パターンが決定され、スタート信号を受け取るまで待機する。あるいは、システム・テストが要求された場合にはシステム・テスト・モードに遷移する。

(2) 超音波搜索モード (M1)

超音波センサ系を駆動して相手M I R Sまでの距離を計測し、搜索行動パターンに従い走行軌道を演算しながら移動を行う。また、四方のフェンスまでの距離を計測することで自己の現在位置を補正する。

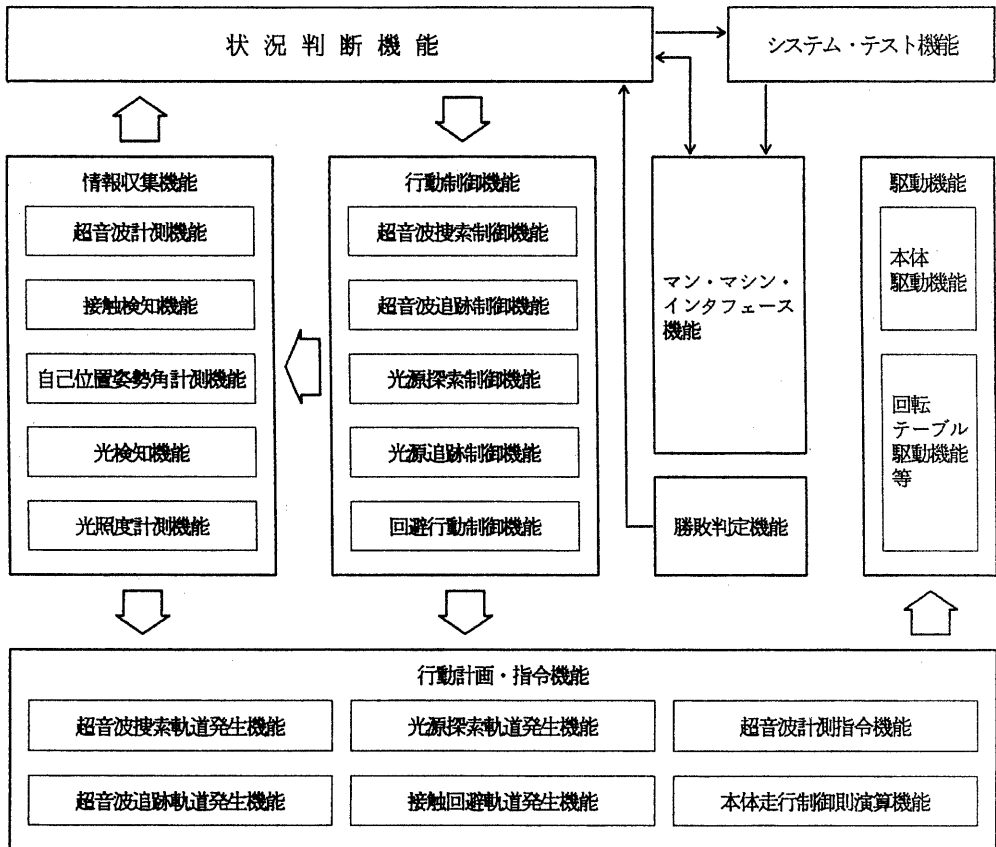


図2 システム機能関連図

(3) 超音波追跡モード (M2)

超音波センサ系を用いて相手の位置を計測し、相手の移動速度ベクトルと自己の現在位置の関係に基づいて追跡軌道を決定しながら移動する。

(4) 光源探索モード (M3)

相手MIRSの光源探知が可能な領域(約30cm)において、超音波センサによる追跡を行いながら相手の周囲を旋回し、光センサ系を駆動して相手の光源を探索する。

(5) 光源追跡モード (M4)

相手MIRSの勝敗判定装置を作動させる(パネル・スイッチを押す)ために、追跡用光センサ対が相手の光を探知するまで自己の

姿勢を修正する。その後、この光センサ対の照度信号を用いて光源を追跡し接近する。

(6) 回避モード (M5)

フェンスや相手MIRSとの接触を避けるために回避行動をとり、回避完了後その直前の動作モードに遷移する。

(7) 停止モード (M6)

勝敗判定装置が作動したとき、システムはホールド状態になりその場で停止する。

(8) システム・テスト・モード (M7)

競技に入る前にシステムのメンテナンス・テストを行い、テストが完了するとその結果をモニタLEDに表示する。

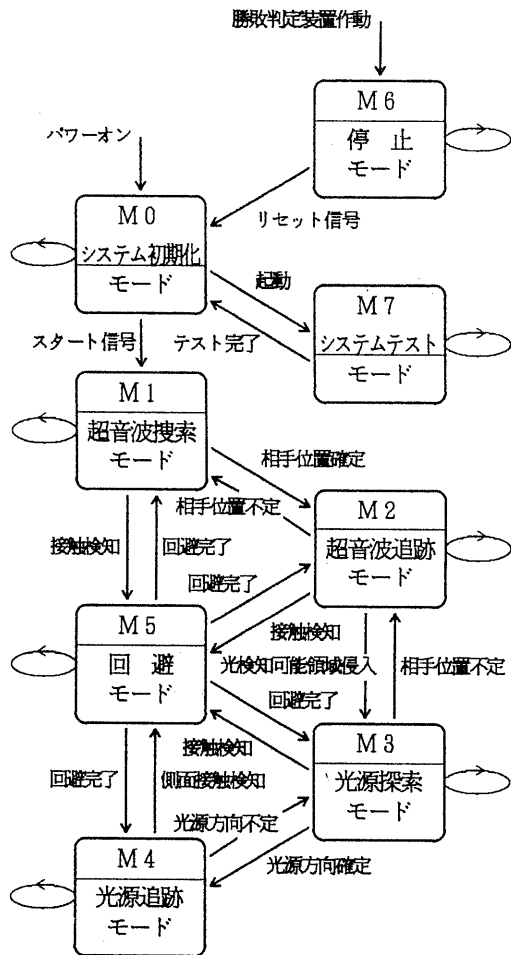


図3 システム動作モード遷移図

### 3. M I R S の開発手順

システム開発の一連の流れは、開発に関連する文書の構成によって端的に示すことができる。図4にM I R S開発工程とその関連文書の構成を示す。図中、破線より上の部分が仕様書・設計書の系統図（設計段階）で、下の部分が試験成績書の系統図（インテグレーションおよびテスト段階）である。両者の接する部分が製造段階に対応する。以下、図に従って一連の開発の流れを説明する。

#### 3. 1 ミッション要求事項の提示

開発を始めるにあたり、学生（3年生）に「M I R S開発実施要領」および「M I R S競技規定」を提示する。この中には開発すべきロボットのミッション（任務）要求事項が明記されている。それは、「M I R S競技において、相手より先に相手の勝敗判定装置を押しすること」であり、以後全ての開発は、このミッションを達成するロボットを作ることを目的として実施される。

#### 3. 2 システム概念設計

システム概念設計はシステムの実設計の工程ではなく、システム・コンセプトを中心に、開発体制や開発計画といったシステム開発の枠組みを設計する工程である。

##### (1) システム提案

与えられた要求事項を満たすロボットのシステムについてアイデアを募集する。この中から5件のアイデアを選び、そのシステム・コンセプトを実現するべく5つの開発チーム（各チーム約8名）を編成する。

##### (2) 開発体制

各チームからチーム・マネージャとドキュメント・マネージャを1名ずつ選出し、チーム内の役割分担などの開発体制を決定する。各マネージャはそれぞれ、チーム管理および文書管理にあたる。

##### (3) 概念設計

各チームでシステム・コンセプトについて再検討を行う。特に競技のシナリオとシステムの基本構造との関連に重点を置き、基本的な構成要素を決定する。これをもとに、開発に際して必要な要素技術を分析する。チーム内に対応できる人材がないときは、技術習得計画として開発計画に盛り込む。また、技術的に達成困難なシステムであると思われるときは、システム・コンセプトの見直しを促す

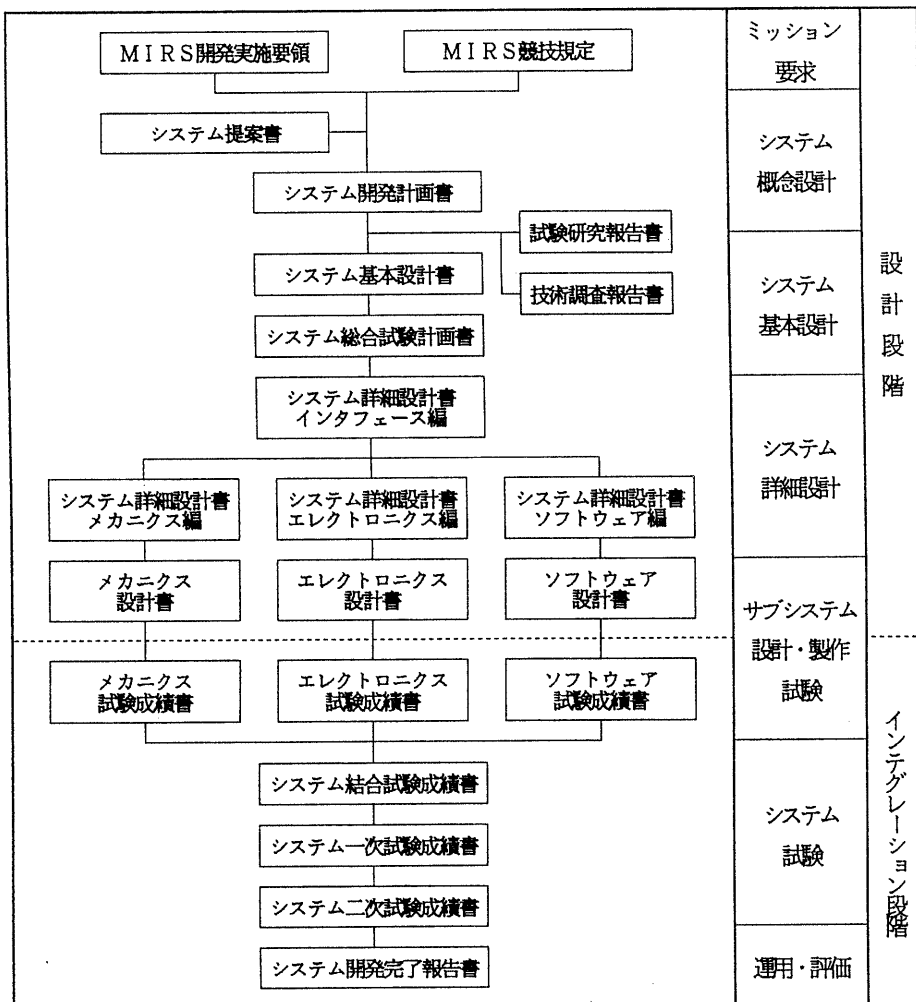


図4 MIRSの開発工程と関連文書

こともある。

(4) 開発計画

各開発工程に対して必要な作業項目を洗い出し、その内容（作業内容、成果物、予想工数、担当者等）を検討する。

(5) システム開発計画書

開発体制、システム・コンセプトおよび開発計画について、チーム内で合意した内容を「システム開発計画書」としてまとめる。これ以後の開発は、ここに示された基本計画に沿って実施する。

3.3 システム基本設計

この工程の成果物である「システム基本設計書」は、MIRSをトータル・システムとして取り扱った上で、その機能および構造を具体的な設計仕様として厳密に規定する文書である。ただこの段階では、サブシステム・レベルでの実現が可能であることが明らかであれば、末端の項目の全てに至るまで設計の対象とするわけではない。ここで規定される内容はトータル・システムとしての機能および構造に関する設計仕様であり、各サブシ

テム・レベルでの独立した設計を可能とするものである。

#### (1) システム機能設計

システム開発計画書に示されたシステム・コンセプトに関して、さらに詳細な競技シナリオを検討する。あらゆる競技状況においてロボットが取り得る行動を探り、入手可能な情報を用いてどのような行動の選択が可能かを調査検討する。検討の結果は、システムの動作モードの定義および各モード間での遷移条件として、動作モード遷移図にまとめる。この動作モードおよびモード遷移を可能とする機能を、システム機能として定義する。

#### (2) システム機能配分

上記(1)で定義された各システム機能について、それを実現する構造体を決定する。メカニクス、エレクトロニクスおよびソフトウェアといった質的に異なる構造体に、機能のどの部分をどう配分するかを決定する作業である。

#### (3) 技術的実現可能性研究

適切な機能配分を実現するには、そのような配分が可能であるか否かが示されなければならない。これを検討する作業が実現可能性研究である。末端の項目の全てを設計しなければ、システム・レベルの設計が完了しないという状況を回避することを目的とする。

#### (4) トレード・オフ研究

機能配分が全て完了した後、各構造体ごとに設計上の制約条件が満たされているか否かを検討する。メカニクスではロボットの大きさ、重量、駆動トルク、部品点数等、エレクトロニクスではI/Oポート数、電源容量、回路基板数等、ソフトウェアでは実行速度、ステップ数、メモリ容量等である。制約を満たさない場合、もしくは費用対効果が低いと判断される場合は各機能間で機能配分のトレード・オフを実施する。

#### (5) システム基本設計書

これまでのシステム検討の結果を設計書としてまとめる。

#### (6) システム総合試験計画書

システム・レベルの全ての機能について、その検証手順を規定するとともに合否の判定基準を規定する。

### 3.4 システム詳細設計

トータル・システムとして規定されたシステムの基本設計仕様を、各サブシステムごとの基本設計仕様に規定し直す作業である。この工程以後、開発はサブシステムごとに独立して実施される。この工程における成果物は「システム詳細設計書」である。この設計書は、インタフェース編、メカニクス編、エレクトロニクス編、ソフトウェア編の4部構成としており、インタフェース編が3つの構造体間の全てのインタフェースを規定する。

### 3.5 サブシステム設計・製作・試験

システム詳細設計書に示された内容を直接の要求仕様として、サブシステムの設計、製作および試験を実施する。この設計の段階において要求仕様の不備、不足等が発見されると、トータル・システム・レベルでのシステム検討を再び要求することがある。必要ならば、システム基本設計書の改訂およびシステム詳細設計書の関連部分の改訂を行い、他のサブシステム設計に対する仕様変更も実施する。製作終了後、各設計書で規定された項目について、サブシステム単体での試験を実施し、試験成績書を作成する。

### 3.6 システム・インテグレーション

サブシステム・レベルの試験完了後、システム結合試験を行い、システム詳細設計書に規定された内容を確認する。次に、システム

総合試験計画書に基づき、システム試験を実施する。この工程で発生する不具合の原因は、システム設計段階の不備・不足にあるのか、サブシステム設計段階の不備・不足にあるのか、あるいは製作段階にあるのか判断しかねる場合もある。このような場合は、システム・インテグレーションの担当者を中心に開発チーム全員で検討会を開く。その結果によっては、システムの改善設計を実施する。

### 3.7 システム運用・評価

MIR S 競技会において、開発されたシステムを運用し、評価を行う。その内容をふまえ、これまで実施してきた開発について開発計画書に記載した内容との相違点などを検討し、その内容を「システム開発完了報告書」としてまとめる。

### 3.8 開発支援体制

一連のシステム開発を円滑に行うために、設計、製作、試験、技術開発等に対する支援体制を整備している。

#### (1) 設計支援体制

設計関連文書、技術検討資料等の一括管理を行い、原則的にこれらの閲覧は常時可能としている。文書量は年間約5000ページにおよぶ。また、開発効率の向上と信頼性確保のために、設計の標準化および部品の標準化を推進している。

#### (2) 製作・試験支援体制

2000点におよぶ機械・電子部品の一括管理を実施している。また、電子回路CADを用いた回路のプリント基板(両面基板)化やプログラムの部品化など、製作の効率化を支援している。また、専用試験機材の整備にも力をいれている。

#### (3) 技術研究・開発支援体制

必要に応じてテーマを決め、技術開発プロ

ジェクトを実施している。また、MIR S に関連する卒業研究の成果は、大きな技術的支援になっている<sup>9)</sup>。

## 4. おわりに

以上、本校電子制御工学科における自律型知能ロボットMIR Sの開発について報告した。現在、教育としてのMIR S開発はほぼ軌道に乗り、学内外の協力を得ながら実施している。今後、設備や支援体制の一層の充実を図り、開発に関わる負担を少しでも軽減したいと考えている。本稿に関し、御意見、御批判等をいただければ幸いである。

## 参考文献

- 1) NASA-N-68-19096 : Voyager Spacecraft System Study, Final Technical Report, Phase B, Task D, Volume II Mission / System Requirements and Analyses, 1967.
- 2) NASA-N-68-19101 : Final Report, Voyager Spacecraft, Phase B, Task D, Volume II (Book 1 of 5) System Description, 1967.
- 3) NASA-CR-66863-1 : Integral Launch and Reentry Vehicle System, Volume I, Book 1, Configuration Design and Subsystems, 1969.
- 4) W.P.Chase : Management of System Engineering, Robert E.Krieger Publishing, 1974 (Reprint 1985).
- 5) 榎本, 舟田, 森井, 澤 : 自律型小型知能ロボットMIR Sの開発, 沼津高専研究報告, No.26, 1991.
- 6) 辻村, 森本, 大山, 土屋, 天野, 美濃部 : MIR Sの走行制御方式の研究—Ⅲ, 沼津高専卒業研究報告書, NCT—電子制御 9207/9208/9214, 1993.