

# 小型ヒューマノイド二足歩行ロボットの開発 — 開発課題実習指導における実践報告 —

四国職業能力開発大学校 稲 益 悦 夫  
大 本 豊  
神 田 健 一

Educational Training Practice using Development of Biped Walking Robots

Etsuo Inamasu, Yutaka Ohmoto, Kenichi Kanda

**要約** 人間と同じ生活空間の中で人間の生活を支援することのできる機械の究極の姿の一つとして、二足歩行可能なヒューマノイドロボットが考えられる。現在、多くの企業や研究所等で開発が進められ、将来の実用化が期待されている。エンターテインメントの分野では、既に有名企業から数種類のヒューマノイドロボットが発表され注目を浴びている。工科系大学や高等専門学校等でも、研究テーマとして数多く取り組まれている。近年では、高性能マイクロプロセッサや制御が容易なサーボモータ等のキーパーツが入手し易くなってきており、小型ヒューマノイドロボットの製作に取り組みやすい環境になってきている。

四国職業能力開発大学校（以下、当校）では、2001年度より開始された応用課程における開発課題実習テーマの一つとして専門課程と応用課程のカリキュラムで学ぶメカトロニクス技術を結集して実現できる小型二足歩行ロボットの製作に取り組んでいる。

本稿では、当校において2001年度から2003年度にかけて取り組まれた上記テーマにおける実習経過や作品・成果物の評価及び学生指導における教育訓練の実践に基づき、開発課題実習テーマとしてのロボット開発の指導結果について紹介している。

## I はじめに

ヒューマノイドロボットは人間の生活を支援する機械の究極の姿の一つである。日本はこの分野で世界に先行しており、人間と共存するロボットの研究成果（Open HRP等）<sup>(1),(2)</sup>も公開され、将来の実用化が期待されている。また、近年では小型ヒューマノイドロボットも多数発表され注目されている。

当校では職業能力開発大学校で学ぶメカトロニクス技術の範囲で実現でき、人による簡単な指示や操縦で自由に歩き回ることができる競技参加向けの小型二足歩行ロボットの完成を目指している。

第1期の目標は、最初の3年が二足歩行できるロボッ

トの開発であり、次の2年を知能情報化への取り組みとし、合計5年の計画としている。既に3年が経過した。今回これまでの経過を整理し、ロボット開発の実践経験を通じた指導結果としてまとめてみたので報告する。

## II 二足歩行ロボットの製作概要

### 2.1 ロボットの製作状況

当校では、応用課程開設時の入校第1回生の開発課題実習のテーマより二足歩行ロボットの製作を開始している。これまでに3台のロボットが製作されている。

1号機と2号機が2001年度に製作され、3号機が2002年度に製作された。いずれも脚部のみの二足歩行ロボットであったが、2003年度には3号機に上部胴体が搭載され、実質上の4号機である人の姿をした小型ヒューマノイドロボットが完成した。

以下に、これまでの3年間のロボット製作の取り組みの状況について述べる。

## 2.2 ロボットの開発目標

開発・製作するロボットは小型ヒューマノイドロボットであり、実習テーマの目標は各年度ごとに前年度の成果を評価して設定している。第1期の5年間の主な目標はヒューマノイドロボットの競技会やイベントに参加できる競技ロボットの製作である。表1に3年間のテーマ目標の推移を示す。

表1 テーマの目標

年度	テーマ目標
2001	ロボカップ参加可能なロボット
2002	動歩行が可能なロボット
2003	ヒューマノイド型のロボット

競技ロボットの製作目標は、「無線操縦により二足歩行による静歩行や動歩行ができ、上部胴体の腕や頭部を自由に動かすことができる小型ヒューマノイドロボット」としている。

2003年度は上記目標に対して、イベントへの参加も視野に入れ、「頭部にパン・チルト機構を有するワイヤレスCCDカメラの搭載」を付加し、画像処理による歩行支援を行えるようにした。

今後、第1期の残り2004年度と2005年度において小型ヒューマノイドロボットとしての完成度を高め、第2期のヒューマンインタラクティブなロボットの開発への継続発展が期待される。

## 2.3 ロボットの仕様

これまでに製作されたロボットは

- (1) 2001年度 1号機(A班製作)、2号機(B班製作)
- (2) 2002年度 3号機
- (3) 2003年度 3号機改造

の3台であり、それぞれのロボットの主要諸元を表2に示す。仕様はロボカップにおけるヒューマノイド・リーグが基本になっている。3号機改造は上部胴体が搭載されたので全長、重量共に大きくなっている。

表2に於いてロボットの歩行動作に関する仕様は競

技参加を目標に屈伸、足踏み、前進、後進、横歩き、左右旋回ができ片足立ち、キックができることとしている。また、10秒以内で5歩を歩くことを目標としている。これらロボットの歩行動作は制御プログラムで直立静止状態に初期化した後に開始する。

歩行制御は予め作成された歩行パターンに基づいて行うが、加速度センサや足裏タッチセンサを利用し、約8ミリ秒の周期で胴体を垂直に維持する姿勢制御を行いロボットの転倒を防止することとしている。

表2 ロボットの主要諸元一覧

項目	1号機	2号機	3号機	3号機改造
全長 (mm)	420	450	350	540
重量 (kg)	2.4	1.8	2.5	4.1
センサ	加速度センサ+足裏タッチセンサ			
CPU	H8/3048F		SH2/7045F	
関節自由度	12			20
歩行動作	静歩行、動歩行			
制御方式	有線通信		無線通信	
電源	外部供給		内蔵バッテリー	

## 2.4 ロボットの要素技術

小型ヒューマノイドロボットを製作するに当たっては、機械、電子、情報の3分野の技術を結集する必要がある。これまでに着手した要素技術としては、

- (1) ロボット機体デザイン、筐体部設計
- (2) 精密関節機構、動力伝達機構設計
- (3) センシング技術 (加速度センサ、加圧センサ等)
- (4) 姿勢制御技術 (デジタル制御、最適制御)
- (5) マイコン制御プログラミング技術
- (6) パソコンインタフェース技術
- (7) 歩行制御技術 (静歩行、動歩行パターン生成)
- (8) 3次元シミュレーション (OpenGL3Dなど)
- (9) 画像認識技術 (目標物抽出、距離・寸法計測)
- (10) モーションコントロール技術 (ビデオ支援)

などがあげられる。機械、電子、情報の3科の人員で構成されるチームで上記10項目のそれぞれの技術分野を分担し、小型ヒューマノイド二足歩行ロボットの製作に取り組んでいる。

自由に歩行できるロボットの実現には軽量で堅固な機体の完成と併せて、歩行制御技術の確立が必要である。制御工学や運動学、動力学に基づくプログラミングの習得が今後の課題となっている。

## 2.5 設計製作の状況

2001年度の1号機と2号機の製作はA班、B班共に人員9名のチームで製作された。ロボカップ出場を目標として動歩行が可能な二足歩行ロボットの製作が試みられた。2002年度は、8名のチームで1号機と2号機を分析し、歩行テストを繰り返し行い、動歩行が可能な改善を目標として3号機を製作した。

2003年度は、3号機に上部胴体を設け、腕や頭部を搭載し小型CCDカメラを頭部に収納し画像情報による歩行支援を導入し、ヒューマノイド型ロボットの外観をした二足歩行ロボットを製作した。1号機や2号機は脚が長くモータの駆動トルクが不足するため、3号機では脚を20%ほど短くするという対策を行った。踵（ロール軸）や膝の関節用モータの所要トルクは脚の長さや重量に比例して増大するが、3号機改造版では上部胴体の搭載により重量が更に増加したので、股関節部（ロール軸）のモータにも減速ギヤを設け、全体的に関節駆動トルクの強化を図った。

3号機改造版の特徴は脚部にギヤによる減速・動力伝達機構を設けたことと腕と頭部の駆動に小型直流モータを採用したことがあげられる。図1に脚部と腕部の写真を示す。腕は片方で3自由度である。

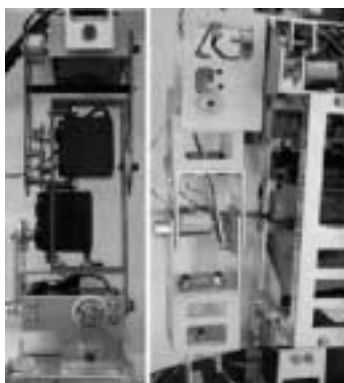


図1 ロボットの脚部及び腕部（3号機）

頭部のカメラ部の機構はパンとチルトの2自由度となっている。図2に頭部のリンク機構を示す。



図2 頭部のリンク機構

2001年度は制御用に汎用マイコンやPICマイコンを使用した。モータ制御回路や歩行制御プログラムの作成が複雑になった。2002年度は高性能でサーボモータ制御用の32ビットマイコンを採用し、制御回路の簡素化とプログラミング作業の改善を図った。

2002年度より、ロボットは無線ユニットを搭載し、電源は内蔵バッテリーを使用することにより完全なワイヤレス化による無線操縦を実現している。

2003年度の3号機改造版を以って、概ねヒューマノイドの姿をした小型二足歩行ロボットが完成した。図3に製作されたロボットの外観写真を示す。

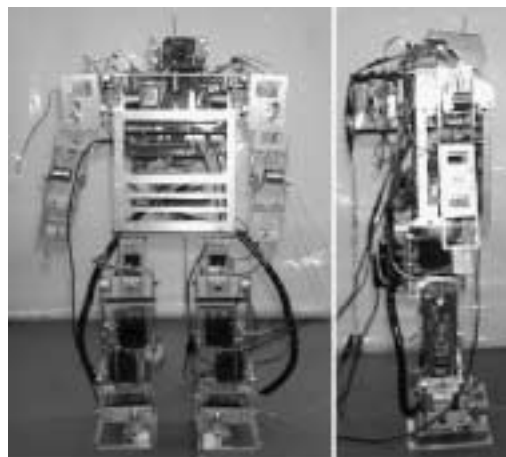


図3 2003年度のロボット（3号機改造）

2003年度に搭載したCCDカメラの画像についてはパソコンに無線伝送し、GUI操作画面の中央に表示してロボットのカメラからの映像を監視しながら操縦できるようにしている。また、画像処理により、色付きのボールを検出し、カメラからボールまでの距離を計測できるようになっている。図4にGUI画面におけるボールの位置計測の様態を示す。



図4 ボールの位置・距離計測の様態

図5はヒューマノイド型二足歩行ロボットの制御システム全体の概念図を示す。制御用パソコンはカメラ画像をNTSCのビデオレートで受信し、RS-232C無線送受信ユニットでロボットを操縦できる。

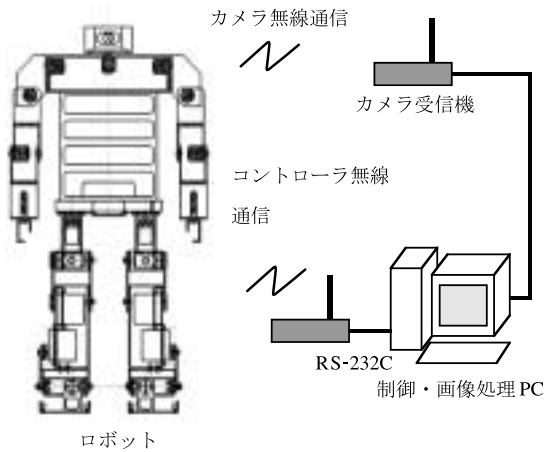


図5 ロボットの制御システム

図6はロボット制御回路のブロック図である。制御用のマイコンを中心として、バッテリーからカメラやマイコン制御部の電源をつくる電源回路やセンサによる外部情報観測部、頭部や腕部の位置制御ユニット、脚部用パルス信号整形回路からなっている。

## 2.6 完成状況及び評価

これまでに製作されたロボットは、いずれも一年間という限定された期間での完成を目指したものであり、

ロボット機体完成後にロボットの歩行パターンの作成や歩行テストに充分時間が確保できていないが2号機と3号機にて静歩行が可能になっている。

ロボット機体についても機構的に脆弱な個所や、部品の重量のバランス、関節の可動範囲の制限等に多くの改善の余地を残している。

歩行制御においては歩行パターンをデータベース化し、パターン生成し易い環境を構築しつつあるが、パターンの作成自体は試行錯誤的に行っている現状にある。重心移動による静歩行パターンの作成ノウハウは蓄積されてきているが、動歩行のパターン生成はこれからの状況である。また、動歩行の実現には加速度センサ等によりロボットの姿勢制御を行い、ZMP規範等による歩行制御アルゴリズムを導入する必要があるが、現在はまだ検討段階にある。

2003年度におけるロボット開発の評価は、チームワーク85%、各個人課題達成度は70%としたい。目標のROBO-ONE競技への参加に間に合わなかった点もあり、ロボット機体の完成度は60%とする。今後軽量、堅固な機体と歩行制御プログラミング技術の完成が望まれる。

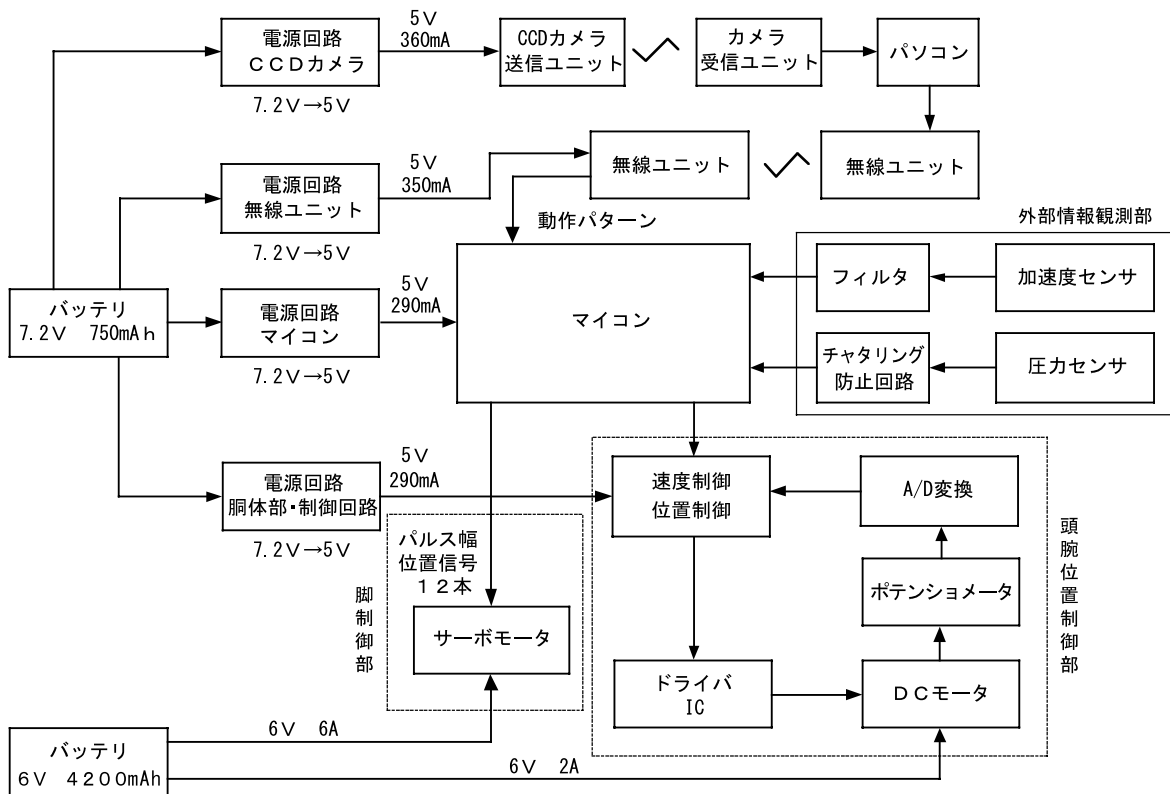


図6 ロボット制御回路ブロック図

### III 開発課題実習指導状況

#### 3.1 開発課題としてのテーマ設定

当校では開発課題実習テーマについては、年度初に企業ニーズや社会的ニーズが高く、教育訓練ニーズに応えるものを中心に、自由な発想で提案されたテーマから選定する形をとっている。二足歩行ロボットの製作は、機械、電子、情報の3分野の技術を連携して実施する開発課題実習のテーマとして教育訓練効果をあげられるとの判断から、当校応用課程第1回生のテーマ選定時から採用されている。

以下に、主として2003年度におけるロボット開発の各指導員による教育訓練指導の実施状況を示す。

#### 3.2 ロボット機構部設計製作指導

機械科の学生はロボット機体の構造や機構、動力伝達機構等の設計が主となる。材料選定や部品の加工工程設計、組立て手順の考案等も重要である。

2003年度は機体強度や所要トルク等の実験データに基づく設計を指導した結果、減速ギヤ機構採用によるトルク強化案が提案され、実施された。

動作試験段階でネジの緩みやギヤのがたつき、嵌合不具合等のトラブルが目立った。ロボットの製作には、細部の機構や構造に細心の注意が必要である。

ロボット機体の製作は上流工程になるので機体が未完成であれば電子科や情報科の学生は制御回路や歩行制御プログラムの確認が困難になる。また、打合せミス等による設計変更を最小限に留めるよう、加工開始前に電子科や情報科の学生と十分に打合せを行い、日程管理に努めるよう指導した。

#### 3.3 マイコン制御回路設計製作指導

電子科の学生はロボット全体を制御するマイコン制御回路を担当する。特に、2003年度は上部胴体の腕や頭部を駆動する制御回路が大きな課題であり、PICマイコンやCPLD等を活用し高密度回路設計を指導した。専門誌や雑誌等に数多くの事例が見えるが、マイコン制御部には学生独自のアイデアを求め調査、実験等を基にした回路設計を指導した。

加速度センサ回路はA/D変換器の入力段に高周波ノイズを除去する2次ローパスフィルタを実装し性能改善を図った。姿勢制御の実験は、機体完成待ちで着手できなかった。歩行制御プログラムの作成は情報科の学生と密接に連携する必要があり、いずれが主導して進めるのか難しいところがあった。

#### 3.4 歩行制御プログラム設計開発指導

情報科の学生はロボットを制御するホストコンピュータ側のプログラム作成が主である。実機テストにおいて機械科、電子科の進捗状況に左右されるが、2003年度は2号機を用いて予備テストが可能であった。インタフェース仕様を充分確認しあいホスト側で処理すべきかマイコン側で処理すべきかの切り分けに留意してプログラム作成を進めるよう指導した。

2003年度はマイコン側で使用される歩行制御プログラム用のパターンのデータベース化を図り、静歩行のパターン作成環境が改善できた。しかし、動歩行の制御プログラムの作成には運動学や逆運動学の知識が必要になり、プログラミングの難易度が高くなる。これらの指導が今後の課題である。

視覚情報処理には画像処理開発支援ツールとしてHALCON<sup>(3)</sup>を採用し順調に進んだが、実装テストでは照明の変化等への対応が課題となった。

表3 日程計画線表

		5月	6月	7月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
機 構 部	機体設計			→						
	加工				→	→	→	→	→	→
	組み立て・調整									→
制 御 回 路 部	システム設計			→	→	→	→	→	→	→
	製作				→	→	→	→	→	→
	検査・調整									→
情 報 処 理 部	動作パターン									→
	システム設計	→	→	→	→	→	→	→	→	→
	コントローラ									→
	画像処理									→
	テスト・調整									→

(上側矢線は計画、下側矢線は実績)

#### 3.5 ワーキンググループ方式による実習指導

開発課題実習ではグループ活動による協調性やコミュニケーション能力、折衝力、行動力、判断力等が養えるように留意し指導する必要がある。毎週金曜日のコアタイムに学生リーダーの司会進行のもとに機械、電子、情報各科の進捗状況報告会を実施し、生産現場を模したミーティングや口頭報告を随時実習活動の中に取り入れて指導するようになった。

ロボットの製作は多岐にわたる作業をグループで如何に分担し、効率よくまとめるかが鍵となる。完成度は学生個々人の技能や技術の水準や感性にも依存するところが大きい。2003年度は、設計報告会や中間報告会、成果報告会、ポリテックビジョンへの対応以外に、ROBO-ONE競技への参加目標があり、全員の意欲が高かったが、今後、集団指導体制の中での学生の個人指導を工夫する必要がある。

## IV テーマとしての将来性

### 4.1 ヒューマノイドロボットの将来

人間の生活空間で活躍するヒューマノイドロボットは過去にはSFの世界のものであったが、科学技術が発展した今日においては将来の実用化が期待されている。既に国家的プロジェクトとしてのOpenHRPの成果等も公開され始めている。また、エンターテインメント系の小型ヒューマノイドロボットも多数発表され注目されている。現時点では、研究用のプラットフォームとしてのヒューマノイドロボットはまだ高価であるが、安価な学習用キットや愛好家向けの競技用ロボットも多く販売され始めている。今後、ヒューマノイドロボット技術は愛好家から一般の技術者まで広く普及することが期待されている。

### 4.2 開発課題実習のテーマとしての考察

小型ヒューマノイドロボットは社会的にブームとなっている側面もあるが、IT産業に次ぐRT産業創出が期待されており<sup>(4)</sup>、長期的な観点からもロボット製作のテーマは開発課題実習の目的に適うものと考えられる。しかし、過去3年間の実習指導の実践経験から以下の項目について議論する必要がある。

- (1)ロボット製作に必要な技能や技術知識
- (2)カリキュラムや指導体制、実習環境
- (3)学生に求める技能や技術知識

本テーマを継続するためには、これらの水準の維持向上が求められるものと考えている。開発課題実習は一年単位であり、年度毎の成果を如何に継承し、積み上げていくかが課題となっている。

### 4.3 今後の方向性

二足歩行ロボットを開発課題実習テーマとして3年間継続することにより、テーマとしての方向性が確認されてきた。今後表4に示すような目標でロボットの開発指導に取り組みたいと考えている。

表4 今後のロボット製作目標

	目標のロボット
第1期	競技ロボット
	学習教材用ロボット
	音声画像認識研究用プラットフォーム
第2期	自律型知能ロボット
	インタラクティブロボット

## V まとめ

3年間の開発課題実習指導の実践経験や成果を踏まえて、今後のヒューマノイドロボット製作のテーマにどう向き合っていくべきかについて検討した。

応用課程では創造的ものづくりが標榜されているが、これと研究との間に境界などは存在しないであろう。学生諸君は開発課題実習では自由に積極的に活動し、幅広い技術知識を吸収しながら自分が精通すべき分野を確認し、成長を図ってもらいたい。そして、対外的にアピールできる作品を完成させてもらいたい。「ものづくり」実技指導を担当する我々も常に先端的研究を調査研究しながら日々の研鑽に励む必要があることを痛感している。今後とも引き続き、第1期の競技ロボットを完成し、第2期の知能ロボットの開発に向けて小型ヒューマノイドロボットの開発テーマを発展させていきたい。

## 謝辞

本稿をまとめるに当たり、日頃テーマの内容について議論して頂き、テーマの継続にご理解頂いている当校応用課程の教員各位、並びに日頃ご指導頂いている中村喜代次校長に感謝の意を表します。

また、本テーマを熱心に取り組んで頂いた学生諸君の報告資料や実習レポートを多く参照させて頂いたことを付記し、併せて感謝の意を表します。

## [参考文献]

- (1) H.Hirukawa et.al., "OpenHRP: Open Architecture Humanoid Robotics Platform," Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automations, pp.24-30, 2002.
- (2) 井上, 比留川: "人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.2-7, 2001.
- (3) HALCON: マシンビジョンシステム構築用対話型開発ツール、株式会社リンクス
- (4) 平成12年度「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書」(要約版) 日本機械工業連合会、日本ロボット工業会