

自律型二足歩行ロボットの開発

～応用課程 開発課題の一事例～

北海道ポリテクカレッジ 生産システム系
(北海道職業能力開発大学校)

恩田邦夫・上村友弘・仁部比斗史・柴田清孝

1. はじめに

平成12年に応用課程を新設し、大学校として再スタートした本校では、平成13年から、応用課程のカリキュラムの目玉ともいえる開発課題に取り組むことになった。開発課題は、専門課程からの進学者にしてみれば、それまで3年間学んだ知識・技術の「総まとめと実践的応用の場」であるとともに、応用課程生産システム系3科（機械、電子、情報）の学生がグループで1つのものを作り出す過程を通して、各科の作業手順や形態、考え方の違いを相互理解し、組織の一員としての各自の役割と責任を自覚するという「社会人・職業人としての人間形成の場」でもある。

本稿では、平成13年度、筆者らが標題のテーマで指導を行った開発課題について、技術的な側面と教育・訓練的な側面から成果と反省点を報告する。

2. テーマ設定の経緯

開発課題には「製品企画ができる技術者の養成」という教育訓練目標も含まれている¹⁾。そこで本校では、4月からの当初1ヵ月間を、開発課題で何を作るかを企画する時間に充てることとしている。

専門課程では「卒業制作」のテーマを教員が指示する 경우가多く、他大学校の応用課程でも同様なテーマ設定を行った例も聞いていたので、本校の開発課題ではあえて、教員側からは、開発予算の制約と

3科が連携できる課題が望ましいという条件だけを提示し、なるべく自由な発想を引き出そうと考えた。

企画グループは、3科（機械、電子、情報）学生の混成とし、人数は6、7名で計12グループとした。

この製品企画に充てた期間は、他科学生とのグループワーキング学習法に慣れさせるという意味もっており、その後の本格的な3科連携の開発課題に入る準備期間として妥当だったと考えている。

13年度は結果的に学生から14課題があがり、5月初旬にそれらの企画発表会を実施した。一方、教員側からも8課題を提案しており、計22課題のなかで、内容が類似したものを統合したうえで、内容の妥当性や学生の希望に基づいて絞り込みを行い、結果として8課題を決めている。内4課題が主に学生の企画を重視した課題、残りが教員提案の企画である。

本報告の「自律型～」は、教員側から提案された企画の1つで、開発に当たる学生メンバーは、機械、電子、情報各4名の12名で編成された。また指導は、機械（上村）、電子（仁部、柴田）、情報（恩田）の教員4名で担当した。

特に、開発課題のような長期間の製作実習において、しかも教員側が複数のテーマを掛け持ちして担当している状況で、常にグループの進捗状況を把握し、細かな指示を出すことは困難であり、学生が主体的に行動できることが重要である。そのためには、まずテーマ自体が完成時の姿やそれにどう近づけるかを具体的にイメージできるものでなければならない。単に「おもしろそう」というだけで、その具体的実現方法を、学生のみならず指導する教員さえも

が見い出せないようなテーマでは高い完成度は到底期待できない。

問題解決に向けた模索や試作過程もまた教育訓練の1つという見方もあるが、外部の者からは最終的な完成度でしか評価されず、学生自身の達成感、満足度も完成させてこそ得られるのではないと思われる。その意味で、開発課題におけるテーマ設定は非常に重要である。開始時点での学生の知識・技術レベルを踏まえつつ、約1年間の教育訓練のなかで学生個人個人の潜在能力を引き出し伸ばすためには、簡単すぎず、難しすぎないテーマでなければならないからである。

この点からいえば、本課題は以下の点で適材であったと考えている。

- ・昨今の各種の「自律型ロボット」の製品化にみられるように、ロボットは将来的にも有望な製品として認知されはじめており、「製品開発」という目的にかなう。
- ・機械、電子、情報の高度な技術要素が、密に連携された融合体であり、かつ各種の技術的アイデアを盛り込むべき部分が多い。
- ・3科の技術要素の連携が密な故に、意思疎通や協力・協調関係が不可欠である。
- ・成果物の「完成度」が、「歩く」という、だれが見ても明らかな結果として評価されるため、ごまかしがきかない。
- ・目的どおりに動作しない場合、各担当分野のどこが問題なのか、また改善目標が何か明確であるため、各学生が自立的に行動できる。

一方、本テーマの具体的実現方法について、指導する側は必ずしも全体像が見えていたわけではなかった。ただ、企画時点でいわゆるアマチュアによる同様の製作物が、雑誌やインターネット上で紹介されており、本校学生の技術レベルに鑑みて実現不可能なテーマではないという確信はあった。

3. 製作の経緯と教育・訓練成果

5月中旬の開発グループ編成後、概要設計に入り、基本仕様、各科学生（以下、班という）の役割分担、長期日程計画、予算案などを決め、6月末に概要計画発表会を実施している。

役割分担では、機械班は機体の設計・製作、電子班はマイコンインタフェース、モータドライブ回路などの設計・製作、情報班は動作ソフトおよび動作確認のためのシミュレータソフトの作成を担当することとした。

製作は、6月上旬頃から機械班、電子班の順に進んだが、当初の日程計画どおりには進捗せず、情報班のプログラムがマイコンに搭載され、ロボットが統合的に動作を始めたのは12月に入ってからであった。

機械班が、機体の設計・部品加工、組立を進めている間、電子、情報の各班では、予備実験など並行的に作業を進めていたものの、機体が完成するまでは身が入らないという時期もあった。これは、機械製作→電子回路の取り付け→プログラムの搭載の順で進行する他の課題でも共通的な現象となっており、本開発課題のような長期間の実習では、志気や規律の維持、担当分野間の負荷バランスの調整、日程管理のための指導法の確立が重要であると実感した。

本課題のテーマは、今年度も2号機の製作として受け継がれているが、今年度は1号機という見本があるため、各班ともその問題点の洗い出しが明確となり、また課題の取り組み当初から1号機を使って予備実験を行うことができ、各班の作業が並行的に進んでいる。開発課題では、このように自分たちが製作しようとするもののプロトタイプがあったほうが、自らが何をすべきかが明確になり自立的な学習に効果的である。

開発課題の成果は、中間発表会（10月末）、最終発表会（2月中旬）での口頭報告のほか、年度末に報告書としてまとめている。各発表会ではプレゼン

用ソフトを使用し、事前に発表予稿集を作成している。特に、最終発表会は、当初は、学外での発表とする予定であったが、予算の都合等で本校体育館を使用し、本校全学生（専門課程、アビリティ訓練生）・教職員のほか、企業へも案内を出し、会場内で製作品の展示も行った。13年度の開発課題製作品は、応用課程実習棟内に現在も展示している。

本課題を通して、機械学生は機械設計や加工技術で、電子学生はマイコン周辺回路の設計・製作技術で、情報学生は制御系プログラムやシミュレーションソフト開発技術で多くのことを学び、また協働作業の進め方を体得していったと考えており、一定の教育・訓練効果はあったものと思われる。

4. 二足歩行ロボットの技術的概要

4.1 基本仕様

本課題に際して、教員側から指示した基本仕様は

- ・人型ロボット（下半身モデル）とし、二足で歩行すること。
- ・外部からの支持や電力供給を受けないこと。
- ・自らの姿勢を判断し、歩行のために各関節を自律的に制御すること。

の3点である。学生は、すでに雑誌などで紹介されている事例から全体的なイメージを理解し、表1のような基本仕様を決定するにはさほど時間を要さ

表1 主な仕様

大きさ	全高約600,全幅約250 [mm]
重量	約5Kg(電池を含む)
機体主材料	アルミニウム合金(A2017,A5052)
関節自由度	12(股関節3,ひざ関節1,足首2)
主動力	DCギヤドモータ
動力伝達	歯車,タイミングベルト
センサ	各関節ポテンショメータ
モータ駆動	PWM制御Hブリッジ型IC
制御CPU	日立H8S/2633F(19MHz,16bit)
開発環境	日立統合開発環境(C/C++)

なかった。しかし、企画時点ではその具体的な実現方法についてはほとんどわからなかったというのが実状である。

4.2 機体設計

機体設計は、各関節の機構設計とモータの選定に時間を要した。自律動作のためにマイコン、電池を搭載することは明確で、ほかにモータと機体材料の荷重を支えて各関節を動かすためには、モータの高出力化が必要となる。一方、そのためにモータが重くなれば、さらに機体強度を上げ、モータの高出力化が必要になるという矛盾が生じる。

そのため、機械班はモータ選定も担当し、理論設計と予備実験を相当行っており、図1および図2に示すような機体を完成させている。

デザイン的には、一部のモータや配線が機体外に露出するなど不満はあったが、歩行のための基本的な機構は実現している。

4.3 マイコンおよび制御回路

ロボットの制御部は、日立H8S/2633F CPUを搭載

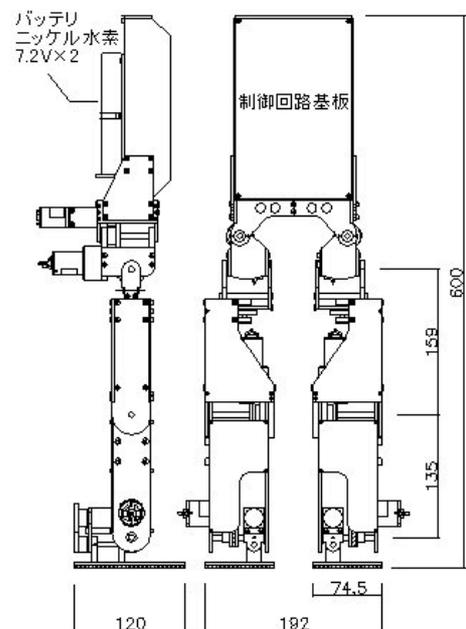


図1 機体の概要設計図面

載したマイコンボード（北斗電子製HSB8S2633F）を中核とし、図3に示す構成となっている。左右6個の関節に配置されたDCモータは、CPU内部のタイマによって発生したPWM信号とPIOからの正逆転（CW/CCW）信号をゲート回路で組み合わせ、モータドライブIC（東芝TA7291P）を介して制御している。一方、各関節に配置したポテンシオメータからの関節角に比例した電圧を、CPU内部のA/D

D変換器によって角度データへと変換している。

4.4 歩行動作制御アルゴリズム

本ロボットは、自己の姿勢や周囲の環境情報を得るにはセンサが不十分で、歩行動作制御プログラムは「歩行らしく見える」動作を実現することとしている。歩行動作の基本となる動作データは $S \times 12$ の2次元配列 $M(i, j)$ ($i = 1, 2, \dots, S$, $j = 1, 2, \dots, 12$)に固定値として設定してある。ここで、 $M(i, j)$ は、時刻 i における j 番目の関節角の目標値であり、 $i = 1 \sim S$ で歩行の1基本動作となる。

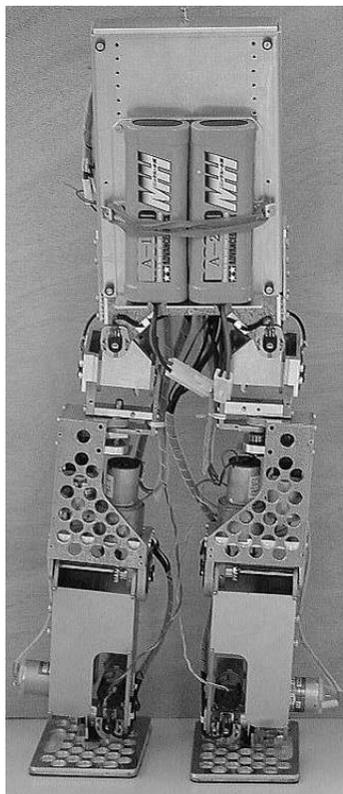


図2 完成した機体

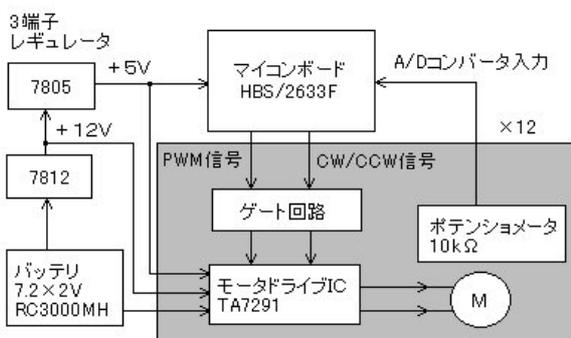


図3 制御部の構成

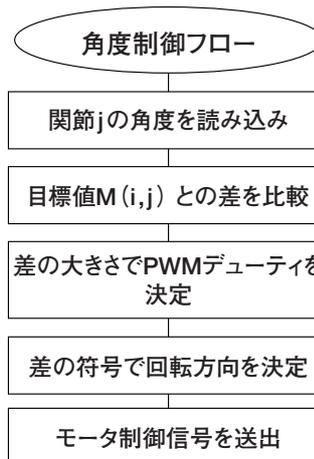
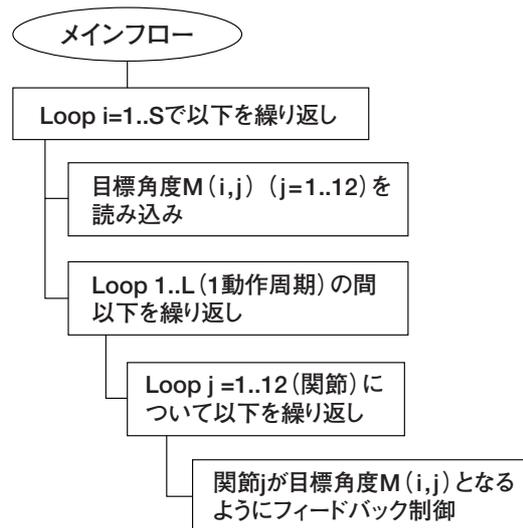


図4 歩行制御プログラムの流れ

各関節の制御は図4に示すフローで行っており、関節角センサから得た実際の角度と、上述した目標値とを比較して、各関節のモータに正／逆転の指示信号を生成するという単純なものである。

モータの位置決め、角度センサ値は共に精度が高くなく、正確に目標角度で姿勢の保持をすることは困難であったため、目標値に完全に一致しない場合でも、一定時間（ループL）経過後に次の目標値に設定し直すという方法を採用している。 $M(i, j)$ に設定している目標値は、画像計測技術の応用として実際の人間の歩行動作を画像解析して求めたものをベースとし、実際のロボットの動きを見ながらこれを修正した値としている。プログラム開発言語はC言語、プログラム開発環境には日立H8統合開発環境ソフト（HEW）と北斗電子製FlashROMライターを使用した（図5）。

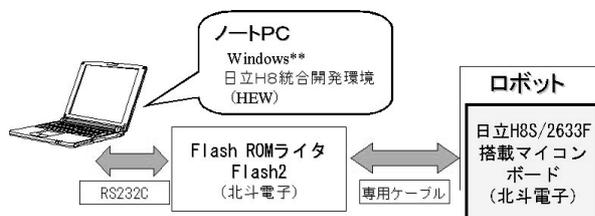


図5 ソフトウェア開発環境

4.5 結果と14年度での改善

結果として、機体、回路、プログラムとも一応完成はしたが、「歩かせる」という最終目標を達成させることはできなかった。原因としては、モータの選定ミス（トルク不足）、関節のバックラッシュ、ロボットの姿勢把握用のセンサ不足などがあげられ、この経験は平成14年度から開始された開発課題の2号機開発へと受け継がれている。

2号機での主な改善点としては、

- (1) トルク不足によるモータの大型化を避けるために、トルクが必要な3箇所関節に小型モータ複数個を内歯車で連動させる方式を採用したこと。
- (2) モータをすべて外装内に納め、歩行に伴う重心

点移動を少なくしたこと。

- (3) ポテンショメータの素子を変更して機械的強度を高めるとともに、歯車を介することによって角度分解能を3倍に高めたこと。
- (4) 軽量・高出力なギヤドモータを採用したこと。
- (5) これに合わせてモータドライブICも変更し、IC内部の過熱保護回路が勝手に働かないよう放熱対策を十分に施したこと。
- (6) 制御回路にPLDを採用し、マイコンボードの省電力化、省スペース化、信頼性の向上を図ったこと。
- (7) マイコン用電源の生成にスイッチングICを採用し、電池の消耗を抑えたこと。
- (8) 基板レイアウト、コネクタ、スイッチ類の配置を改善し、機体の修理・保守を行いやすくしたこと。
- (9) 姿勢把握のため傾斜角センサを追加したこと。
- (10) マイコンボードと開発用PC間でRS232Cによる通信機能を持たせて、マイコン動作時の内部状況を把握しやすくし、ソフト開発の効率化を図ったこと。
- (11) 通信機能を用いて、動作データテーブルの変更をPCから対話的に行えるようにしたこと。
- (12) 姿勢制御に角度とその移動速度（トルク）を考慮したPID制御を取り入れたこと。

などがある。このように多くの改善策が出てきた背景には、1号機の教訓があり、この点でもテーマを継続して行うことの意義は大きかった。

図6に今年度製作中の2号機の概要設計図を示す。

5. まとめ

全国の能力開発大学校で実施されている開発課題は、応用課程の教育訓練期間の約半分を費やす総合的応用課題実習であり、「ものづくり教育」のモデルともいえるものである。この点を意識して指導する側からの反省点をあげる。

- (1) 製作物を「とりあえず形のあるもの、動くもの」

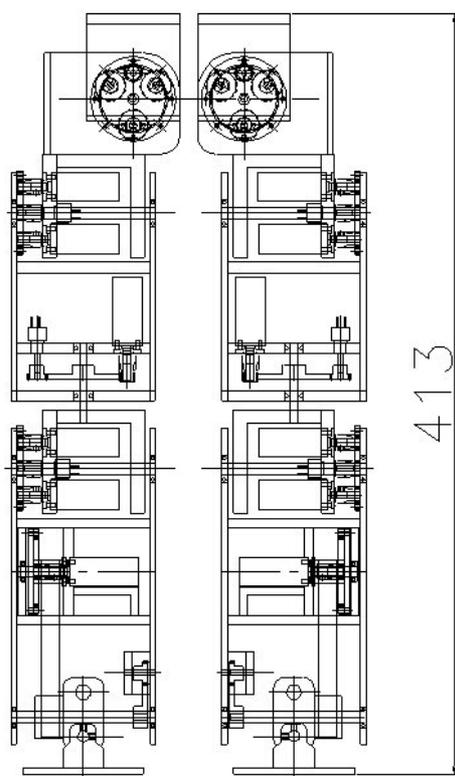


図6 2号機機体の概要設計図面

にするという意識が先行して、工学的な視点（安全性、強靱性、保守性、低コスト化、省電力化、性能評価など）や製作についての職人的こだわり（無駄のないデザインや配線レイアウトなど）に欠けた感があった。開発課題は、まさに「技能と技術」の融合を目指したものと考えているが、そのどちらもが中途半端だと、単なる「工作」に終わってしまう危険がある。今年度の2号機開発グループでは、この点を反省して、たとえ全体的な完成に至らずとも、部品レベルでは納得できるものを製作するという方針で臨んでいる。

- (2) 社会人教育という一面が希薄であった。学生の学習・生活面での指導は、当初の応用課程全教員の打ち合わせでも統一的な指導規準を確立するに至らず、各グループの指導教員の考え方に依存している部分が多い。考え方は大きく、四国能開大の報告²⁾にあるように出欠・時間管理を重視する意見と、時間的には多少ルーズでも結果を出

すことを重視する意見に分かれる。この2年間の試行では断定できないが、在校時間と学習姿勢は必ずしも相関しておらず、どこまでを学生の自己管理に期待するかは結論が出ていない。筆者らのグループでは、出勤簿、日報、朝の定例会議などを取り入れて、企業人としての規律や責任感を持たせるための工夫をしていたが、この継続が難しかった。

まだ2年間の試行途中ではあるが開発課題で約1年間もの訓練期間と少なからぬ製作費用を投入している割には、「高度な教育訓練」と呼ぶにふさわしい成果がでていいるとはいいがたい、というのが率直な感想である。指導する側として、開発課題が目指すものづくり教育がどうあるべきかを、応用課程の前段としての専門課程教員の意見、学生を受け入れる地場企業の意見を踏まえて、もう少し議論すべきであろうと感じている。

最後に、13年度本課題に取り組んだ古澤、圓山、安田、山下（機械）、鈴木、萩浦、三浦、渡辺（電子）、佐藤、菅原、沼田、渡部（情報）の学生諸君の名を記してその労に報いたい。

〈参考文献〉

- 1) 谷口忠勝：「職業能力開発大学校における『応用課程』の教育訓練理念とカリキュラム編成」、『技能と技術』, 5/1999.
- 2) 北村、羽原、稲益：「四国能開大開校2年間の実践報告」、『技能と技術』, 6/2002.

