コンカレントエンジニアリングを目指した ロボット設計製作教育*

金田 忠裕^{*1}, 吉田 丈夫^{*1}, 大須賀 公一^{*2}
師玉 康成^{*3}, 和崎 克巳^{*3}

Robotics Education of Design and Making Aimed to Concurrent Engineering

Tadahiro KANEDA^{*4}, Takeo YOSHIDA, Koichi OSUKA,
Yasunari SHIDAMA and Katsumi WASAKI

^{*4} Systems and Control Engineering, Osaka Prefectural College of Technology,
26-12 Saiwai, Neyagawa-shi, Osaka, 572-8572 Japan

The Department of Systems and Control Engineering of Osaka Prefectural College of Technology in Japan has a curriculum which is called "Case Study on Design of Mechatronics Systems". This is a practical curriculum to teach our students the process from conceptual design through detailed design, production, to documentation. Especially, the characteristic of this curriculum is a parallel working to make robots. In this paper, we describes the results and its estimation of robotics education by concurrent engineering.

Key Words: Autonomous Robot, Concurrent Engineering, Case Study on Design of Mechatronics Systems, 3-Dimension Data, Parallel Work

1. 緒言

近年、コンカレントエンジニアリング (Concurrent Engineering) という言葉がよく聞かれる。計画、研究、設計、生産、販売といった工程が時間軸に直列に独立して存在するのではなく、これらが最初の計画段階から同じ基盤に立って並列に協力して進み、開発の途中では情報交換をしながら目標に向かい、最終製品を仕上げる、このような製品開発手法をコンカレントエンジニアリングと呼んでいる^(1, 2, 3)。従来の大学・高専等におけるロボット設計製作は、メカ (機構・構造) → ハード (電気・電子回路) → ソフト (プログラム) の順番でしか出来てこないことが多い。また、メカで不足している機能をハードやソフトで補うという方式が一般的であった。このように直列設計の考え方では、スケジュール通りに完成することは少なく、修正や設計変更などによって作業が遅れたり、終了しなかったりする。近年、設計教育において並列設計の概念が導入されつつあるが、実際にロボットのようなメカトロ製品を製作することを対象とした設計製作教育にそのような概念を導入している実践例はあまりない。

大阪府立工業高等専門学校システム制御工学科 (以下、本学科) は平成3年に新設された機械・生産、電気・電子、計測・制御、情報・コンピュータを基礎とする複合学科である。これらの専門を基礎として工学システムを構築することができる、解析 (analysis) よりには総合 (synthesis) 能力に重点を置いた技術者を養成することを学科の目的としている。そこで、平成6年度より第4学年に「システム設計研究 (2000年より「基礎研究」と名称が変更)」(通年3単位) という科目を設定し、グループによる自律型ロボットの設計製作を行わせている^(4, 5, 6, 7)。

本論文では、科目「システム設計研究 (以下、設計研究)」について、コンカレントエンジニアリングという観点から検討を行い、ロボティクス・メカトロニクス教育に製品開発の手法を導入する場合についての考察を行う。

2. コンカレントエンジニアリングとシステム設計研究

大輪は今後の大学工学部における設計教育のあり方を次の4点に集約している⁽⁸⁾。無論、高専も工学教育を行う高等教育機関の一つとして、この考え方を非常に重要視している。

- (1) 新しいものを生み出せる技術者の育成
- (2) 新しい技術分野を生み出すための新原理、新方法の発見

* 原稿受付 2000年11月20日。

^{*1} 大阪府立工業高等専門学校システム制御工学科 (〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町26-12)。

^{*2} 京都大学大学院情報学研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)。

^{*3} 信州大学大学院工学系研究所 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)。

E-mail: kaneda@sys.osaka-pct.ac.jp

(3) 新しいものを生み出す「設計」という作業の方法論の探求

(4) 新しいものを生み出すことができたときにそれを間違いなく人に伝え、多くの人で共有できる方法の探究である。

特に(3)では設計の体系化を、(4)では設計をすすめるための考え方や言語、環境、道具立ての研究を示唆している。

設計の段階を、希望を出す段階 (What to design) と実現手段を考える段階 (How to design) の大きく二つに分けたとき、Whatの段階は、設計の垂直展開、つまり製品のライフサイクルの時間的経過が重要で、通常のスケジューリングはこれで行われる。しかしながら、Howの段階では、従来、機械部分は機械技術者が、電気部分、ソフトウェア部分も各担当の技術者が、時間的にシリーズに行っており、仮にプロジェクトの途中で設計変更があっても、その変更は困難になっていた。

新しい考え方として、機械、電気、ソフトウェアの各作業を時間的に並列に行い、これらの間にトレードオフの関係をつくり、統合した機能設計を行う方式が出てきた。もちろん、これらの間の関係は複雑であり、決定する要因としては開発期間、開発コスト、製品コストへの影響、設計のロバスト性などが問題となってくる。本学科は、正にこれらを統合した機能設計を行うことができる技術者育成を目指して設立された学科であり、その中核となる科目「設計研究」の概念は大変重要になってくる。そこで、コンカレントエンジニアリングと呼ばれる製品開発手法—すなわち最初の計画段階から同じ基盤に立って並列に協力して進み、開発の途中では情報交換をしながら目標に向かい、最終製品を仕上げる—を科目「設計研究」に導入することを試みた。導入にあたって以下の点を考慮した。

- (1) 教員側の体制 … Team-Teaching
- (2) 学生側の体制 … グループスタディー
- (3) 対象となる製品 … 自律型ロボット

コンカレントエンジニアリングを導入するにあたり、並列設計・並列作業が必須となる。そのために、(1) 教員側の体制として Team-Teaching を組むことにより⁽⁹⁾、学生への目が行き届きやすくなり、また各専門の教員がみることができ木目細かい指導ができると考えた。(2) 学生側の体制としては、原則として5人1組のグループを組むことにより各担当分野を並列に作業が行えるように配慮した。また、(3)の対象となる製品として自律型ロボットという複合技術が必要となるものを選んだ。

Fig. 1 Autonomous mobile robot and the basic fields of our department.

Table. 2 The theme of each year.

Year	Theme
1994	Classification and collection of empty cans
1995	Over the Hill!!
1996	Wrestling robots
1997	Orienteering
1998	Musical performance robots
1999	Horseback archery robots

図1に本学科の専門分野の基礎と、対象とする自律型ロボットとの関係を示す。このように自律型ロボットの設計製作を通して、システム設計の概念を教授し、本学科の目指す総合力の育成を図ることができる。基本的に5人1組でチームを形成し、各自が機構・構造・計測制御・電気回路・マイコンのいずれか一つを担当し、共同で作業を進めていく。このとき各自はチーム内で表1に示すような関連表を用いて、互いに協力しながらシステム設計をすすめていく。成功するか否かは個人の能力だけではなく、個々の間のコミュニケーションも重要になる。

3. 製作したロボットと工数分析

設計研究では、毎年異なったテーマでロボット製作を行っている。表2に過去のテーマを示す。

ここでは、1997年度のテーマ「オリエンテーリング」を中心に述べる。これは、ラインをつたい、分岐点で空き缶を回収しながら、ゴールを目指し、ゴールすれば回収した空き缶の数を表示する競技である。空き缶回収、ライントレース、数の表示と、3つのアイデアをまとめて製作を行った。グループにおける作業分担は前述の通り、機構・構造・計測制御・電気回路・マイコンと、担当を決めて行っている。通年3単位という限られた時間での作業になるために、グループ間でのコミュニケーションが大変重要になる。ロボットの一例を図2に、コンテストの様子を図3に示す。

ロボット製作にかかる時間を工数集計表から計算し

Table. 1 Allotment of role in project and relation of mutual.

	Mechanism	Structure	Measurement and control	Electric circuit	Computer
Mechanism	Evaluation of movement, Manufacture of mechanism and structure	Shape and sizes of parts	Output torque of actuator, Speed characteristic, Weight of actuator	Weight of electric circuit	Algorithm and sequence of movement and work Weight of micro-computer
Structure	Power and torque which acts on parts	Strength design of structural parts, Selection of material and processing method, Manufacture of mechanism and structure	Shape and size of actuator and sensor	Shape and size of electric circuit	Shape and size of micro-computer
Measurement and control	Degree of freedom of mechanism, Inertia moment of mechanism, Load torque of drive system, Detection place of machine amount	Installing layout of actuator and sensor	Selection and characteristic evaluation, Design and manufacture of control system including electrical and mechanical systems	Driving method of actuator and sensor, Characteristics of electric circuit, Electric power supply for actuator and sensor	Control algorithm and sequence
Electric circuit		Installing layout of electric circuit	Electric characteristics of actuator and sensor, Measurement and control method	Design and manufacture of actuator circuit, Design and manufacture of sensor circuit	Electric characteristics of I/O port and timing, The control output data to actuator
Computer	Pattern of work and movement	Installing layout of microcomputer	Measurement and control method	Allocation of I/O port and I/O form, Measurement output signal from sensor, Electric power supply for micro-computer	Program design for control with Assembly language and programming

Fig. 2 A sample of the robot.

Fig. 3 A scene of the contest.

た. 各チームの工数分析結果を表3に示す. ミーティングや報告会などを含め, 設計研究の授業時間外の行動は全て「Overtime work」に含めている.

これより, 1台のロボットアイデアから設計・製作・ドキュメンテーションまでに要する時間は平均552時間である. これを班の人数5人で割ると1人あたり110時間必要となる. これはあくまでも並列作業を行った場合であり, 従来のメカ→ハード→ソフトの順で直列作業を行った場合は, 作業時間は110時間を単純に加算した552時間が必要となる. このように工数分析からも学生にコンカレントエンジニアリングの有効性を理解させることができる.

4. 学生たちの反応

設計研究では, 授業の最終日に学生に自己評価と感

Table. 3 Analysis of development process (man-hour).

Team	A	B	C	D	E	F	G	H
Mechanics	95	82	101	58	123	118	59	91
Hardware	38	42	38	28	31	38	57	27
Software	35	35	52	24	35	38	35	37
The other	177	145	154	216	144	129	146	110
Subject	345	304	345	326	333	322	297	265
Overtime	301	252	114	311	346	99	404	52
Total	646	556	459	637	679	421	701	317

Table. 4 The results of questionnaire (The number of students).

Student's Impression	1994	1995	1996	1997	1998
Knew the difficulty of cooperation	10	6	7	10	10
Felt the importance of cooperation	4	1	5	15	8
Debted on other members	3	1	9		
Felt the shortage of working hour	5	6	6	8	
Was a hard work	4	15	3	2	5
Regrettable because of unfinished	5	1	5	8	
Was a failure, Lost confidence	2	1	3		
Got tired, because fatigue			4	6	
Was a pleasure		11	6	2	5
Was enjoyed		1	4	6	8
Was satisfied		11	3	4	27
Had a good experience	5	5	4	1	5
Studied a lot	4	16	13	9	4
Learned practically	3	1	1	7	1
Knew my ignorance			2	1	4
Subject should be continued			1	1	2
Shorten the lecture			1	1	
Stop doing this subject	2		1		
Don't cause trouble to other subjects		2			2
I don't like this subject			1	1	
the other	3	1	1	4	2
was a useful experience of graduation research	1	4		3	

想文を義務づけている. この感想文から各項目毎に集計した学生の意見を表4に示す.

一番難しいのが, 学生の意見にもある「協調作業」である. 意義を理解したとしても, 学生同士の性格の不一致が原因でコミュニケーションすらしなくなる場合もある. それが原因でロボットが完成しなかったり, あるいは完成したとしてもほとんどロボット製作には関与しなかった場合もある. このような意味からグループ形成の仕方は大きな課題と言える.

5. 並列作業と単独作業

今回の設計研究において, 並列作業を行わせることにより, 設計・製作の途中変更に対して並列で伝達が行えることから, 従来の直列作業より効率がよくな

Table. 5 Schedule of trace-robot.

Week	Contents
1	Guidance
2・3	Machining
4・5	Circuit fabrication
6・7	Assembly
8	Programming
9・10	Adjustment
11・12	Documentation

ることを学生達に体験させることができたと考えている。この授業を受ける前に、1台のロボットを1人で製作させると、更に教育効果が増すと思われる。このような観点に立って、平成10年度より第1学年において、トレースロボットを半期（3時間×12週）で、1人1台製作させた。大まかなスケジュールを表5に示す。ガイダンスでは対象とするロボットとはどのようなものか、ロボット製作はどのようにしていくのか、授業との関わりはどうかなどについて説明する。その内容は単なる実習ではなく、学科のガイダンス的なものをも含む。現在、この実習を受けた学生が3年になっているが、4年において並列作業を体験することにより、コンカレントエンジニアリングの有効性がより理解できるのではないかと考えている。

6. 情報交換のための共通データ

コンカレントエンジニアリングと呼ばれる手法において重要なポイントは以下の3点である。

- (1) 並列設計・並列作業
- (2) 情報交換
- (3) 共通データの利用

これらについては、以下の点で実現できたと考えている。(1)設計研究においてアイデア考案から設計・製作作業まで全て並列で行わせている。これは、教員側のTeam-Teachingと学生側のグループ作業により可能となった。

(2)グループ間での情報交換は、作業日誌を活用させた。表6に作業日誌の一項目を示す。これを用いることにより、各自の作業の進行具合とグループの進行具合が一目瞭然となり、グループ内での連絡が密になった。

(3)後述するが、3次元の共通データとして、ペーパークラフトが大いに役に立った。

共通データとしてコンピュータ上の3次元データを元に作業をすすめていくことが重要であるが、7章で述べるようにCAEシステムの導入が大きな鍵となる。

設計研究では、これまで3次元共通データとしてCAEシステムを利用した3D-CAD、ペーパークラフト模型を採用している。3D-CADの一例を図4に示す。

Table. 6 Item of work diary.

	Today's Schedule	Today's Result
Mechanism		
Structure		
Measurement and control		
Electric circuit		
Computer

Fig. 4 A sample of 3D-CAD.

図内の右下がCADデータを元に実際に製作したロボットである。ペーパークラフトの一例を図5に示す。ペーパークラフトは実物大で製作させている。

3D-CADは、使いこなすためにかなりの時間を要するが、一旦データが出来あがると修正や2次元の図面への変更が容易である。ペーパークラフト模型は、簡単に作成することができる反面、修正や図面化などに時間がかかる。この3次元の共通データは、プロトタイプとして新しい設計作業の方法論の追究に重要な鍵となる。

7. 導入への課題

システム制御工学科のカリキュラムは、機械工学科に比べて、製図の時間が極端に少なく、図学や機構学の授業も少ない。本学科の製図に関するカリキュラムを表7に示す。

本学科の設立時にCAEシステムを導入し、「設計研究」において3年間利用した。確かにCAEシステムの有効性は確かめることができたが、使いこなすため

Table. 7 Curriculum for drafting

Subject	Grade	Unit	Contents
Drawing and Design of Mechatronics Systems	2	2	Acquisition of basic matter of drafting method
	3	2	Drafting of machine element and easy machine
Computer Aided Design and Drawing	4	2	Design drawing of robot
	5	2	Automatized machine system drafting using CAD

Fig. 5 A sample of mock-up.

に時間がかかり、設計研究の授業時間内で教えることに検討の余地が残った。従ってその後は、手順を踏んだ具体的な設計を教える意味で、製図とペーパークラフト作成を行っている。

一般的に学生は設計・製図能力に欠けている。そこで「アイデアを練りながら図面を描くこと」「図面を描きながらアイデアを練ること」「いつも工作することを頭に描きながら製図すること」を基本にしながら、出来るだけ図面を描かせた。アイデアを練る際にはブレインストーミング法を、それに基づいての意思決定にはAHP法を用いた。中間発表会の前には全ての図面を教師側でチェックし、再度描き直しをさせた。ほとんど全面赤ペンが入る状況であった。学生は、実際に物作りをするなかで、図面が悪いと加工が出来ないことを痛感し、そのあとで図面を直されたことの意味を知った。こうした経験を通じて製図の大切さを知った。テクニカルイラストレーションの講義もし、組立図にはイラストを描かせたが、うまく描けるようになった。このような中で、ペーパークラフト作成はロボットの完成予想を視覚的に理解させる意味で非常に役に立った。事実、電気回路やマイコンの大きさの見積もりを誤り、設計変更になったことが度々あった。

このような経験を低学年から段階的に行わせ、その後にCAEシステムを学べば、より理解が深まると考える。このCAEシステムの導入こそが、コンカレントエンジニアリング導入の大きな課題でもある。

設計時に製品ライフサイクルの各段階を考慮しながら設計をすすめることをDfX (Design for X) と総称し、Xは製品ライフサイクルの段階を意味する⁽¹⁰⁾。この製品のライフサイクルに関わる多くの情報を設計時に考慮することは、コンカレントエンジニアリングに他ならない。

設計研究においても、製造 (Manufacture)、組立 (Assembly)、分解 (Disassembly)、環境 (Environment)、再利用 (Recycle)、修理 (Repair) などを考慮

することで、ロボット製作の手法が異なることを学ばせている。例えば、演奏ロボットの時は、合奏を主たる目的とし、競技会現場でチューニングを行うために、修理がすぐに行えることを前提とした。そこで、通常はワンボードマイコンを用いていたところをプログラムがすぐに書き直せるポケットコンピュータを使用した。このように各年度で授業の始めにライフサイクルの条件を課すことで、DfXを学ぶことが可能となった。

8. 結言

以上、「システム設計研究」というロボット設計製作の授業をコンカレントエンジニアリングという観点から検討をし、ロボティクス・メカトロニクス教育に製品開発の手法を導入する場合についての考察を行った結果、以下のことが分った。

(1) 並列設計・並列作業を行わすことができる重要なポイントは、教員側のTeam-Teachingと学生側のグループ作業である。協調作業を上手に行わせるためにグループ形成の仕方は大きな課題である。

(2) コンカレントエンジニアリングを導入するために必要な3D-CADの学習は、低学年からの段階的な製図教育が不可欠である。

(3) 並列作業を行うための情報交換をできる環境をつくるのが必須である。

(4) 製品のライフサイクルの条件を課すことで、DfXを学ぶことが可能となった。

参考文献

- [1] 福田収一, コンカレントエンジニアリング, 培風館, (1993), pp.1-13
- [2] 福田収一, コンカレントエンジニアリング (CE) - 一つの視点 -, 日本機械学会誌, 第98巻第916号, (1995), pp.173-176
- [3] 佐田登志夫, コンカレントエンジニアリング, 日本電気学会誌, 第113巻, 第3号, (1993), pp.178-182
- [4] 里中直樹他, 大阪府立工業高等学校システム制御工学科におけるCAEシステムとその応用カリキュラム, 日本設計工学会・日本機械学会第13回設計シンポジウム講演論文集, (1995), pp.129-134
- [5] 金田忠裕他, 総合能力の育成を目指したロボティクス・メカトロニクス教育, 電気学会論文誌C編, 第119巻, 第3号, (1999), pp.413-418
- [6] 金田忠裕他, ロボット製作を通じた設計教育, 日本設計工学会・日本機械学会第17回設計シンポジウム講演論文集, (1999), pp.126-131
- [7] 藤澤正一郎他, 演奏ロボット達による合奏, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス'99 講演会講演論文集, (1999), pp.2P2-22-012
- [8] 大輪武司, 技術とは何か, オーム社, (1998)
- [9] 金田忠裕他, Team-Teachingによるロボット製作の実践, 日本教育工学会雑誌24(Suppl.), (2000), pp.69-72
- [10] 吉川弘之他, 設計学—ものづくりの理論—, 放送大学教育振興会, (2000), pp.99-102