

# ドミノ並べロボットを題材としたロボット教育 ～ マニピュレーション戦略とLEGOによるロボット実装の教育～

## A Robot Education on a Subject of Domino Aligning Task

-Discussion of Manipulation Strategy and Implementation of LEGO Robots.-

正 福井 類 (東京大学) 学 門脇 啓太 (東京大学)  
山田 隆基 (東京大学) 正 森 武俊 (東京大学)  
正 佐藤 知正 (東京大学)

Rui FUKUI, Keita KADOWAKI, Takaki YAMADA, Taketoshi MORI and  
Tomomasa SATO. The University of Tokyo.

This paper reports a robotics educational trial for 3rd grade undergraduate students in Intelligent Cooperative Systems Laboratory, the University of Tokyo. In the trial, we discussed with the students about strategies to realize automatic domino aligning robot comparing with existing manipulation robots. Then the students produced prototype robots to confirm the validity of their strategies. By these processes, it was possible to make the students feel significant to adopt the best strategy to realize a target mission with least effort.

*Key Words* : Robot education, Manipulation, LEGO MINDSTORMS, Strategy, Design optimization.

### 1 緒論

●機械工学ゼミナールとは？ 東京大学工学部、機械系2学科(機械工学科、機械情報工学科)では学部3年生の冬学期の週1コマ(1.5時間)を利用して「機械工学ゼミナール」という講義・演習の時間を設けている(以降、「ゼミ」と記述する)。このゼミでは、各教員(教授、准教授、講師:合計26名)が1つずつテーマを設定し、3~4人程度(最小1名、最大6名)の少人数で各テーマに沿った勉強・作業を進めるということになっている。

研究室を運営する側としては、このゼミは各年度の学部生の学力・スキルを把握する機会でもあり、またテーマの設定によっては、学部3年生に研究室の存在を広く認知してもらうチャンスとも言える。一方の学部3年生にとっては、一年後に卒業論文生として正式に研究室に配属される前に、研究室内部の様子を知る機会といえ、教員・学生ともに本ゼミナールには力を入れて取り組んでいる。

本年度は合計91名の学生がゼミを受講した(教員毎の平均受講者数3.5名)。また製作・実装などの実習を含むゼミは、規定の週1コマ(1.5時間)のみで作業が完了するのは困難であり、ゼミの該当時間終了後も学生が自主的に2~3時間程度自習をすることも珍しくない。

●2009年度のテーマとその狙い 2009年度の佐藤・森研究室では「ロボットによるマニピュレーションの戦略をデザインしよう~ドミノ並べロボットを例に~」というテーマで学生の参加を募り、4人の学生に参加をしてもらった。このテーマを設定するにあたっては次のようなことを強く意識した。

昨今ロボットの実用化が求められる一方で、実際のロボット研究でその実用に耐えるロボットはほんの一握りであり、ロボット研究のあり方について疑問視されることが多くなっているように感じる。これは我々ロボット研究者が社会のニーズを適確に汲み取り、それを最適な手法により具現化するという姿勢が不足しているからだと言わざるを得ない。

そこで、ゼミに参加してもらう学生に1つの課題を与え、その課題を克服するのに最適な戦略を導入することで、ロボットのニーズとシーズを適合させるというプロセスを学んでもらうということを目指した。ここでテーマにある「デザイ

ン」とは、外装・見た目を良くするスタイル・デザインのことではなく、見た目も含めてあらゆる側面を”最適化する”という意味で、この単語を選んでいる。英語のdesignはStyleにもMechanismにも適用される言葉であり、日本語の狭義のデザインとは敢えて異なる意味をテーマ名に含ませたのも、本ゼミの特徴であると言える。

以上のように本ゼミの目標は、目的を達成するには要求仕様を満たすための戦略が重要であり、その戦略の優劣によって出来る上がるロボットの完成度に差異が出来ることを、学生に体験してもらうことである。

本論文の構成は次の通りである。第2章では、学生に与えたミッション、全体スケジュール、そして試作基盤として用いたLEGOについて述べる。第3章では学生による試作実習の準備段階として行った講義について説明する。第4章ではTA(Teaching Assistant)も含めて学生が製作したロボットについて紹介し、その成果を分析する。第5章は結論である。

### 2 ドミノ並べタスクによるロボット教育

本章では本ゼミで学生に与えたミッション、全体スケジュールそして試作基盤として活用したLEGO MINDSTORMS<sup>1</sup>について述べる。

#### 2.1 学生に与えたミッション

学生に与えたミッションは次の通りである。「本ゼミナールでは、ロボットによる物体のマニピュレーションについて、実際にロボットを作成しながら考えます。課題はドミノを並べること。皆さんのミッションは如何に早く、如何に美しく、そして如何に効率的な方法・機構でドミノを並べるかの戦略を検討し、それを実装して下さい。物体を早く・確実に操作する戦略に必要なことが何かを一緒に探求しましょう。」

#### 2.2 全体スケジュール

上記のミッションに取り組むためTable1に示すようなスケジュールでゼミを行った。前半3回はロボットによるマニピュレーションの概説をする講義で、その後2回に渡ってLEGO MINDSTORMSの取り扱い入門と戦略の検討を行う、後半3

<sup>1</sup>レゴマインドストームは、レゴグループの登録商標です。

Table 1: Whole schedule of seminar

NO.	日付	概要
第一回	10/21(水)	自己紹介、ゼミ概要説明、連絡先確認。
第二回	10/28(水)	マニピュレーション戦略のグループワーク(1)
番外	10/30(金)	秋葉原見学(秋葉原の電子部品店の見学)
第三回	11/4(水)	マニピュレーション戦略のグループワーク(2)、チーム分け
第四回	11/11(水)	LEGO MINDSTORMS入門+マニピュレーション戦略の検討(1)
第五回	11/18(水)	LEGO MINDSTORMS入門+マニピュレーション戦略の検討(2)
第六回	11/25(水)	デモンストレーションマシンの設計・製作(1)
第七回	12/2(水)	デモンストレーションマシンの設計・製作(2)
第八回	12/9(水)	デモンストレーションマシンの設計・製作(3)
第九回	12/16(水)	発表会(スライドによる説明と実機によるデモンストレーション)
第十回以降	不定期	レポート(Webページ)作成

回はデモンストレーション用ロボットの設計・製作であり学生自ら手を動かして実装を行うフェーズである。

このスケジュールは初期の計画通り実施されたが、後半のデモンストレーションマシンの設計・製作は規定の講義時間だけでは完成に至らず、追加で10時間程度の作業時間を要した。

### 2.3 ロボット試作基盤としての LEGO

本ゼミでは選択した戦略に基づき、そのロボットを実装し評価・体験するところにその特徴がある。しかし、週に1時間という限られた時間の中で機械図面を引き、部品の加工をしてロボットを製作するというのは事実上不可能であるため、ロボット教育用プラットフォームとして名高いLEGO MINDSTORMS[1]を用いてロボットを製作してもらうこととした。

MINDSTORMSを利用するにあたって、ただ単にブラックボックスとして利用するのではなく、内部のメカトロニクスを理解のために回路図(schematic)の解説や、分解写真による内部構造の解説などを行った。講義で使用したスライドの一部をFig.1に示す。

LEGOをロボットの機構部品として用いる場合、その規格の制限より想定している戦略をそのままでは実現しえないところもある。しかし、容易に試行錯誤を行えるという利点も踏まえると、戦略の良し悪しを比較するためのロボット基盤としては、非常に強力な教材であるという印象であった。

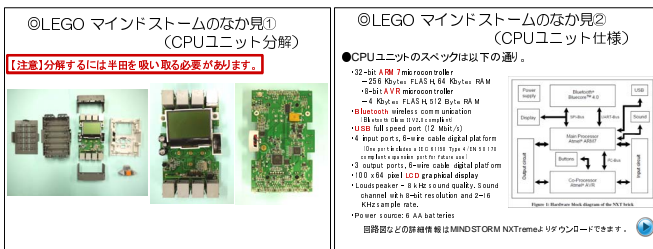


Fig. 1: Slide examples for explanation of LEGO MINDSTORMS internals (Used in 5th lesson)

## 3 前半講義の内容

本章では講義の各回テーマ、講義中で紹介をした参考書とその狙いを列挙し、またLEGOによるロボットの製作の前に肝となる構造として解説を行った回転運動を並進運動に変換する機構の例示について述べる。

### 3.1 講義の各回テーマ

本節ではロボットマニピュレーションを概説する全3回の講義テーマとその狙いについて整理する。

#### 第1回 ロボットマニピュレーションとは？

まず吉川[2]を引用し、マニピュレーションの定義を整理した。続いてロボットマニピュレーションには、人に似せた戦略を利用するもの(例: Power grip & Precision grip)[3]と、人とは異なるアプローチを採用するもの(例: パーツフィダ、パラレルマニピュレータ[4])の大きく2つの方向があり、各々の利点・欠点を示した。

#### 第2回 力のコントロールと柔らかさ

力制御に必須の力センサに関してその導入による利点・欠点を整理し、インピーダンス制御やハイブリッド制御の概念[5]について解説した。続いて機械的柔軟性(コンプライアンス)について、その実現形態をアクチュエータの有無や実装形態によって整理して紹介し、その実例としてSCARA型ロボット[6]やRCC(Remote Center Compliance)[7]について説明した。

#### 第3回 グラスプレスマニピュレーションとクロージャ

マニピュレーションの概念を広く構えてもらうためにグラスプレスマニピュレーション(Pushing, Tumbling)[8]などを紹介し、加えてケーシングの概念を説明した。ケーシングの1つであるObject Closure[9]の概念を解説しつつ、Form ClosureやForce Closureの概念[10]を併せて解説することで、力制御と幾何的な制御(位置制御)との対応を理解してもらうことを目指した。

### 3.2 講義の中で紹介した参考書

本ゼミに参加した学生が後にロボティクスの最前線に興味を持った際に、足がかりとなる5つの参考書を紹介した。各参考書の著者、タイトルとその狙いを以下に示す。

- 日本機械学会編、「機構学 機械の仕組みと運動」[11]  
ロボットによるマニピュレーション戦略を検討するためには、機械の仕組みを知ることがスタートになると言っても過言ではない。ここでは図解が豊富な本書を最初の機構学の教科書として推薦した。
- 日本ロボット学会編、「新版ロボット工学ハンドブック」[12]  
ロボットの歴史を俯瞰しつつ、基本的な技術を広く学ぶために重要なハンドブックである。講義においては、一部を抜粋して紹介した。
- 平井慎一、若松栄史「ハンドリング工学」[13]  
マニピュレーションの定式化は、機構学・制御工学への連携のために重要なタスクである。マニピュレーションの問題を学生にも理解し易い簡潔な式で表現しているという意味で、この教科書を紹介した。
- 長岡一三、「ハンドリング機器工学の基礎 - 搬送技術のすべて - 」[14]  
物流・搬送分野においてすでに実用化されているマニピュレーション技術を紹介するために紹介した書籍であるが、残念ながら絶版となっており入手が困難である。
- Matthew T. Mason. 「Mechanics of Robotic Manipulation」[15]  
Pushingを含めた、いわゆるPick and Placeではないマニピュレーションの集大成とも言える教科書である。学部3年生が容易に理解出来る内容ではないかもしれないが、将来の参照教科書と成り得るものとして紹介した。上記の教科書をこのゼミ期間中に購入している学生はいないようであったが、これは当初から期待していたことではな

いので、やむをえないであろう。

### 3.3 回転運動を並進運動に変換する機構に関する講義 (第5回目講義:LEGOによる実装を前に)

ロボットの实装に入る前にLEGOによる機構設計・実装に慣れらうための入門課題として、回転運動を並進運動に変換する機構に関する紹介を行った。これはLEGO MINDSTORMSに用意されている回転モータを活用するために用意した講義内容であったが、第4回目の講義修了時に機構を最低1つ検討・実装してくることを課題とし、翌週の第5回目で各自の回答の披露と、模範解答例の提示を行った。

Fig.2に模範解答例として提示した回転運動を並進運動に変換する機構を示す。合計で約10種類の機構を例示したが、機構設計の経験が多くない学部3年生にとっては、刺激的な講義であったようだ。実際、後の第4章で示すデモンストレーション用ロボットでも、ここで紹介した機構が活躍しているのを見ると、大きな影響を与える講義内容であった。

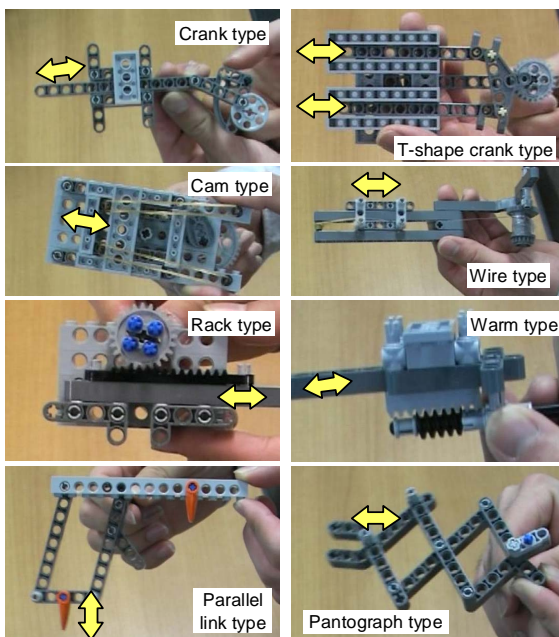


Fig. 2: Examples of convert mechanisms from rotational motion to translational motion

## 4 学生が製作したロボットの紹介とその分析

本章ではゼミの後半で学生が製作したロボットを紹介する。まずはレギュレーションの詳細を示す。デモンストレーションは参加した4名の学生を2名ずつ2班に分け、採点式の競技として行った。よって、2班各々の作品を紹介する。また本ゼミでは修士課程1年の学生にTA( Teaching Assistant )として協力してもらい、実際に学部生と同様のレギュレーションの範囲で、デモンストレーションマシンを製作してもらい、その差異を見ることで本ゼミの効果を検証した。

### 4.1 レギュレーション詳細

本ゼミで設定したレギュレーションを以下に示す。

- ドミノ20個を一行に並べるために採用した『戦略の美しさ』を競う。発表会見学者による投票によって勝敗を決める。
- その他、細則として以下を設定した。
  - 最後に人もしくはロボット自身がドミノを倒すこと。
  - ドミノの間隔は10[mm]以上。

- 途中でドミノのストッカーに人が手でドミノを追加するのは可。
- 一度に動かすドミノの数は自由。
- ドミノは最も面積の小さい面を床面に接すること。
- 参考として時間は計測することとする。
- 作業台にマーカ等の情動的なガイドをつけるのはOK。
- 作業台に物理的なガイドを使うのはNG。
- 支給された以外の部品(自作を含む)を使うのはOK。

### 4.2 学部3年生(Aチーム)

学部3年生(Aチーム)が製作したロボットの概観をFig.3に示す。本チームが採用した戦略は次の通りである。

- ラック直動機構とケーシング操作を組み合わせることにより安定したドミノ操作を実現する。
- ドミノを一定間隔に並べるための移動はタイヤ駆動。
- ドミノをケーシング状態から解放する方向は進行方向と直交させる。
- ドミノの送り出しや整列に必要なモータ動力源数を可能な限り減らす。(実際には1つのモータのみで行っている。) ⇒ これにより余剰モータ<sup>2</sup>を用いて曲線的にドミノを並べることを実現している。

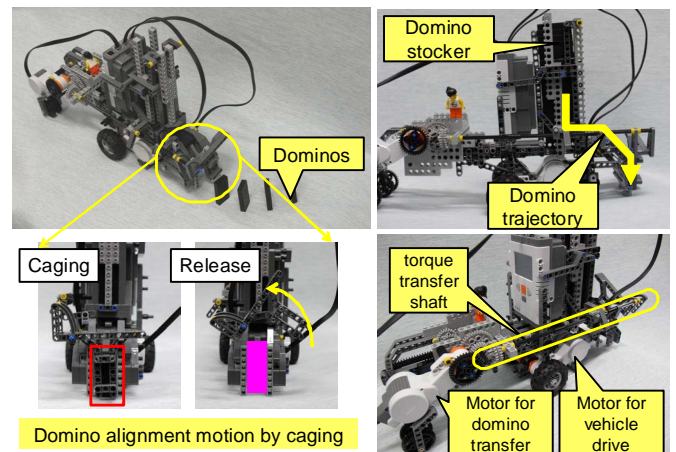


Fig. 3: Demonstrator robot produced by team A

### 4.3 学部3年生(Bチーム)

学部3年生(Bチーム)が製作したロボットの概観をFig.4に示す。本チームが採用した戦略は次の通りである。

- ラック直動機構とケーシング操作を組み合わせることにより安定したドミノ操作を実現する。⇒ ドミノの押し出し距離を短くする(ラック機構を小型化する)ためドミノの押し出し方向を工夫している。
- ドミノを一定間隔に並べるための移動はタイヤ駆動。
- ドミノをケーシング状態から解放する方向は進行方向と平行。

### 4.4 修士課程1年生(TA)チーム

修士課程1年生(TA)チームが製作したロボットの概観をFig.5に示す。本チームが採用した戦略は次の通りである。

- クランク直動機構とケーシング操作を組み合わせることにより安定したドミノ操作を実現する。⇒ ドミノの押し出し動作とケーシング枠構成動作を共通の動作とする。
- ドミノを一定間隔に並べるための移動はゴム履帯方式。

<sup>2</sup>MINDSTORMでは1つのコントローラで最大3つのモータを利用することができる。

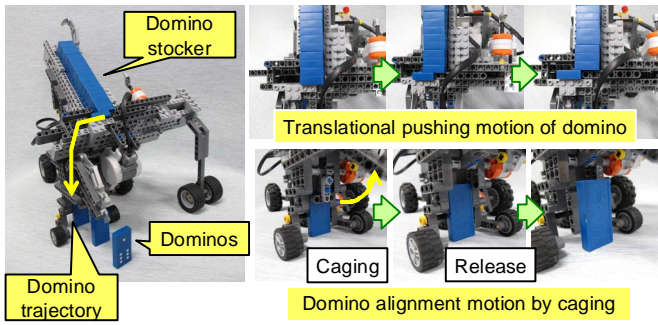


Fig. 4: Demonstration robot produced by team B

- 上記のドミノ操作と移動駆動を力伝達シャフトで連結することにより、1つのモータのみでドミノを並べる動作を実現する。
- ドミノをケーシング状態から解放する方向は進行方向と垂直にする。

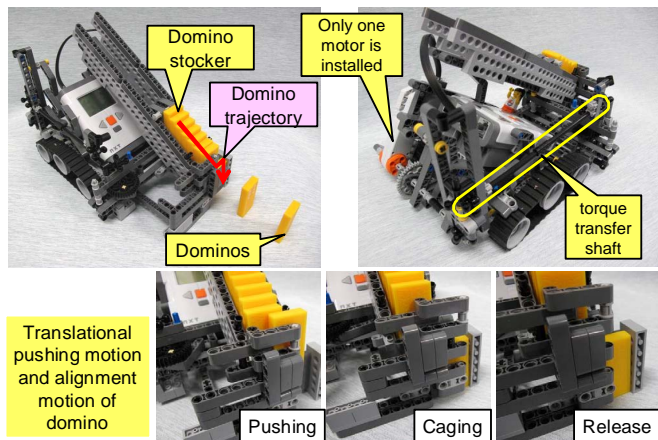


Fig. 5: Demonstration robot produced by team TA

#### 4.5 ロボットの動作結果とその分析 (講義内容との照らし合わせ)

学部3年生のA,B両チームに更にTAチームの3チームとも、要求通りドミノを並べる動作を実現出来ていた。ドミノの並べ方・早さ・ロバスト性には差異があったが、それは各々が採用した戦略やその実現機構により異なるものであった。具体的には、(1)ドミノをケーシング状態から解放する方向は進行方向垂直の方が移動時の接触リスクが低い安定かつ密にドミノを並べることが出来る、(2)動力源数の低減はソフトウェアのコーディングを容易にするが、ドミノを並べ始める初期の状態に制限が多くなり、緻密な調整が必要となる。3チームの採用した戦略を見ると、講義の中で紹介されたケーシングの概念を理解・活用し実際に動くロボットの実現までたどり着いているため、戦略の重要性を十分に伝えることが出来たと言える。

一方で講義の中でケーシング等の概念だけでなく、回転機構を直動機構に変換する具体的な構造を示した結果、どのロボットも紹介された直動機構を活用したものとなってしまったのは、誤算であった。

学生の自由な設計・創造力を引き出すという意味では直動機構の例示は1,2個に留め、ゼロベースで全体設計をする機会を与えるべきであったと言える。

学部生と修士生の差は動力源数の削減、筐体のまとまり(コンパクトさ)などであったが、これは課題に対する挑戦的意

識や設計経験の差が現れたものであると考えている。

ちなみに学部生2チームに対する見学者の投票結果はAチームが勝利するという結果になった。移動に2自由度を割くことが出来るためドミノの配列バリエーション等の発展への期待からこのような結果になったようだ。

#### 5 結論

本ゼミを通して具体的な一つの課題を実現する際に、適切な戦略を採用することにより、比較的平易な機械構造でも(ドミノ並べという)複雑な作業を実現可能であることを学生に体験してもらえた。一方で、講義中に具体的な例とその利点・欠点を示しすぎたため、採用したロボットの戦略及び実現機構が似通ってしまったことは戦略による差異を体験してもらうという目的には必ずしも沿わないものであった。

次年度への課題として、事例をどの程度まで学生に示すべきかの検討・調整が挙げられる。

#### 謝辞

2009年度の本ゼミに参加し、素晴らしい創作力を見せてくれた東京大学工学部3年生の上坂周平君、増田慎也君、松村侑磨君、渡邊匡彦君にここで感謝の意を表す。

#### 文献

- [1] LEGO. Mindstorms. <http://www.legoeducation.jp/mindstorms/>.
- [2] 吉川恒夫. マニピュレーション技術. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, pp. 408-410, 2005.
- [3] 池内克史. 人間の把持行動観察によるロボットの把持戦略の生成. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 792-797, 2000.
- [4] ファナック株式会社. ゲンコツロボット fanuc robot M-liA. [http://www.fanuc.co.jp/ja/product/new\\_product/2009/0904/0904\\_robotmlia.html](http://www.fanuc.co.jp/ja/product/new_product/2009/0904/0904_robotmlia.html).
- [5] J. J. Craig M. H. Raibert. Hybrid position/force control of manipulators. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 103, No. 2, pp. 126-133, 1981.
- [6] 牧野洋. Scara ロボットの設計思想. 日本機械学会誌, Vol. 86, No. 773, pp. 367-372, 1983.
- [7] D.E. Whitney. Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 104, pp. 65-77, 1982.
- [8] 相山康道, 稲葉雅幸, 井上博允. グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 114-121, 1996.
- [9] ZhiDong Wang and V. Kumar. Object closure and manipulation by multiple cooperating mobile robots. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 394-399, 2002.
- [10] 中村仁彦. 把持とあやつり. 計測と制御, Vol. 29, No. 3, pp. 206-212, 1990.
- [11] 日本機械学会編. JSME テキストシリーズ 機構学 機械の仕組みと運動. 工業調査会, 2007.
- [12] 日本ロボット学会(編集). 新版 ロボット工学ハンドブック. コロナ社, 2005.
- [13] 平井慎一, 若松栄史. ハンドリング工学 (ロボティクスシリーズ). コロナ社, 2005.
- [14] 長岡一三. ハンドリング機器工学の基礎 -搬送技術のすべて-. 工業調査会, 1988.
- [15] Matthew T. Mason. *Mechanics of Robotic Manipulation (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, 2001.