

# 機械語で動作するプログラミングロボットにおける道具の利用の効果

布施 泉<sup>1)</sup>, 野口 孝文<sup>1)</sup>

1) 北海道大学 情報基盤センター

ifuse@iic.hokudai.ac.jp

## The Effect of Tool Use on Learning to Program the Programming Robot in Machine Language

Izumi Fuse<sup>1)</sup>, Takafumi Noguchi<sup>1)</sup>

1) Information Initiative Center, Hokkaido Univ.

### 概要

本稿では、機械語やアセンブリ言語で動作するプログラミングロボットを用いた授業実践について報告する。直感的な機械語命令を用いる等、適切な足場かけを行うことで、初学者を含め、知識習得状況に幅を持つ学習者全体に興味関心を喚起する授業実践を行うことが可能である。さらに適切な道具を用いることで、グループ学習時のプログラミング実施時間を増やし、条件分岐や反復のジャンプ命令での表現理解につながることを確認した。

## 1 はじめに

筆者らは、大学の共通教育の枠組みの中で、機械語（またはアセンブリ言語）によって動作する独自のロボット[1]（図1）を用いたプログラミング授業を2018年度から継続して開講している。主に大学1年生が履修する選択科目で、最大23名が受講する。希望多数の場合は抽選により履修者が決定される。当然ながら、授業開始時における履修者のプログラミングに関する知識習得状況には幅があるが、毎年の授業最終回で行うアンケート結果では、9割以上の学生がロボットを用いた学習に関し、興味関心を持っていることが確認されている[2]（後述）。本稿では、知識習得状況に幅を持つ学習者が、その知識状況に関わらず興味関心を持つ理由について、ロボットの特徴を示し考察するとともに、その特徴を生かす授業設計ならびに道具を用いることによるプログラミングスキルの向上について検討することを目的とする。



図1 プログラミングロボットの基本外観（透明の専用スケールを装着している）

## 2 使用するロボットの特徴

### 2.1 機械語命令を用いた直感的理解：順次処理

授業で使用するロボットの外観を図1に示す。2つのギヤドモータに直結した車輪で移動する。マイクロコンピュータ上に作成した仮想コンピュータのプログラムを書き換えることで制御する。前述の通り機械語命令で動作する。命令セットには、演算命令等の他、モータ制御やセンサ入力を読み取る命令を用意している。ロボットへの命令は、8bitの番地内に格納する（一部は予約済みのため学習者が使用できる番地は200程度である）。

命令は、8個の赤LEDの点灯(1)/消灯(0)に対応した8bit列で表現し、これを左右4bitに分け、左4bitに動作内容、右4bitに動作量を指定することを基本とする。左4bitのうち、上位2bitは左モータの動作（順回転01/逆回転10）、下位2bitは右モータの動作（順回転01/逆回転10）を表す。

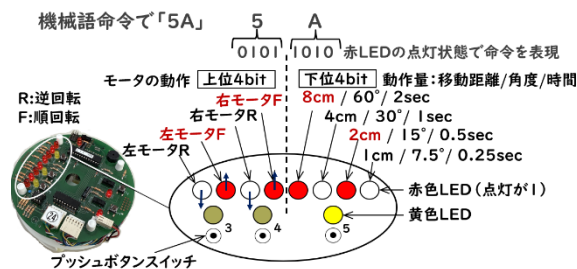


図2 プログラミングロボットの基本動作命令の説明図（10cm前進させる命令の例示）

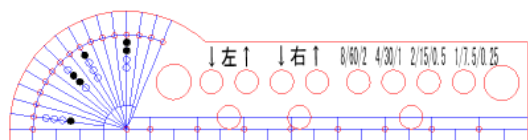


図3 専用スケール（回転方向，動作量を可視化）

図2に示す上位4bitの点灯パターン(0101)では、左右モータとも順回転であり、ロボットは前方に進む命令となる。ここで例えば、左2つのLEDの点灯を逆にすると、左4bitは(1001)となり、左モータは逆回転、右モータは順回転となる。結果として、ロボットを左回転させる命令となる。

右4bitは動作量を表す。2進法に準じた重みをつけ、ロボットの前・後進/左・右回転/停止に応じ、それぞれ距離/角度/時間に割り当てる。これら移動、回転、停止の動作量は、図3に示す専用スケールを装着し、点灯した箇所に対応する数値を加算することで簡便に確認することができる（移動距離は1cm単位、回転角度は、7.5°単位、停止は0.25sec単位のため、専用スケールの目盛は、上位bitから「8/60/2」「4/30/1」「2/15/0.5」「1/7.5/0.25」の数値を記載している）。例えば図2の命令(0101 1010)では、左4bit(0101)が前進命令のため、右4bit(1010)は前進の移動量を示し、8+2=10cmの移動命令となる。左4bitが左回転命令(1001)の場合は、右4bit(1010)は角度(60+15=75)に対応した動作量となり、左75°回転の命令となる。

このようにロボットの8個のLEDの点灯/消灯(1/0)の並びにより命令が表現され、それがロボットの移動・回転・停止等の基本動作に直接対応する設計とすることで、単純な命令を並べること（順次処理）で、ロボットを目的に応じて動かすことができることを学習者が直感的に理解できる。

学習者にはロボットの利用マニュアルを提供しており、表1のような命令一覧表を確認させる。2進法と16進法を列記するとともに、記述欄においてアセンブリ言語も併せて表記している。

## 2.2 動作の可視化：2Byte命令と繰り返し処理

左右のモータの前進・後退の移動量を別々に指定し、円弧軌道上を移動させる命令(2Byte命令)、繰り返し命令(機械語には通常存在しないが本ロボットでは便宜上FOR/ENDFOR命令を利用できるようにしている)を利用できる。例えば、次の4つの命令の記述(5つの番地を利用)で、円弧命令を7回繰り返し、ロボットに半径25cm

表1 命令一覧表の抜粋（説明表記も適宜抜粋）

命令	記述	機械語	例, 説明
前進	FWD n	5n: 0101 n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	54,4cm 前進
後退	REV n	An:1010 n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	A4, 4cm 後退
右回転	RGT n	6n: 0110 n <sub>6</sub> 0n <sub>3</sub> 0n <sub>15</sub> n <sub>7,5</sub>	68, 60 度右に回転
円弧	ARC xnxm	8/4n 2/1m (R/Fn R/Fm): rf00 n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub> 00rf m <sub>8</sub> m <sub>4</sub> m <sub>2</sub> m <sub>1</sub>	4413, 左車輪が4cm 前進, 右車輪が3cm 前進して円弧を描く
繰返	FOR n	Cn:1010 n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	C3,終了まで3 回繰り返す
繰返 終端	ENDFOR	F0:1111 0000	繰り返しの終端を示す
無条件ジャンプ	JMP nn	D0 nn:1101 0000 n <sub>128</sub> n <sub>64</sub> n <sub>32</sub> n <sub>16</sub> n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	D0 07, 7番地へジャンプ
条件ジャンプ	JMP SW <sub>sn</sub> nn	Ds nn:1101 0S <sub>4</sub> S <sub>2</sub> S <sub>1</sub> n <sub>128</sub> n <sub>64</sub> n <sub>32</sub> n <sub>16</sub> n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	D3 08, スイッチ3が押されているとき8番地へジャンプ
条件ジャンプ f	JMP f nn	Df nn:1101 1f <sub>0f-0f</sub> n <sub>128</sub> n <sub>64</sub> n <sub>32</sub> n <sub>16</sub> n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	DB 0B,前のレジスタ命令でAやIXが正か0のとき11番地へジャンプ
数値ロード	LDI nn	B7 nn: 1011 0111 n <sub>128</sub> n <sub>64</sub> n <sub>32</sub> n <sub>16</sub> n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	B7 55,レジスタAに55(10進85)が代入
ロード	LD nn	B8 nn: 1011 1000 n <sub>128</sub> n <sub>64</sub> n <sub>32</sub> n <sub>16</sub> n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	B8 04,レジスタAに4番地の値が代入
ストア	ST nn	B9 nn: 1011 1001 n <sub>128</sub> n <sub>64</sub> n <sub>32</sub> n <sub>16</sub> n <sub>8</sub> n <sub>4</sub> n <sub>2</sub> n <sub>1</sub>	B9 05, 5番地にレジスタAの値が代入
1増	INC	B2: 1011 0010	レジスタAの値を1増やす
1減	DEC	B3: 1011 0011	レジスタAの値を1減らす
終了	END	FF: 1111 1111	プログラムの終了位置

の円周上を移動させることができる。実際に想定した動作をするかは実行することで確認できる。

```
FOR 7 //7 回繰り返す 機械語では C7
ARC FFFA //左 15cm 右 10cm 前進による円弧
//機械語では 4F1A 2Byte 命令
ENDFOR //繰り返し終端 機械語では F0
END //プログラム終了 機械語では FF
```

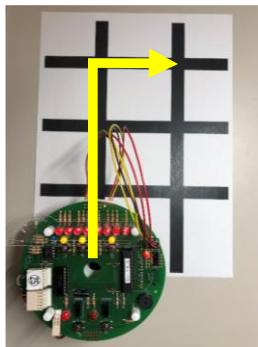
なお表1では記載できなかったが、指定の音を鳴らす命令、乱数を発生させる命令等がある。

## 2.3 動作の可視化：条件分岐とセンサ利用・反復プログラムの基本構造として、条件分岐と反復

があるが、機械語では本来ジャンプ命令により表現する。本ロボットでは、表 1 に示す 3 種のジャンプ命令を持つ。また、レジスタ (A) の値と指定された番地の値との比較や演算、等がある。

図 2 に示すロボット上にある各プッシュボタンスイッチ押下により対応した条件分岐命令 (JMP SW) の処理ができる。これはまた、ロボットに装着したセンサで代用させるようにした (図 4 (上) に示すロボットは、スイッチ 3,4 とそれぞれ並列に接続した 2 つの光センサをロボット下部に装着させ、センサの設置面が白か黒かで ON/OFF が変わるように調整している。これにより、ライトレースができる)。また、演算結果として生じるフラグの正・負・ゼロに対応したジャンプ命令 (JMP f) は、レジスタ値と組み合わせることで意図した反復処理を行わせることができる。

例えば、ロボットが、図 4 (上) の舞台上で 3 つ目の黒い交差点を横切ったときに、右折し 8cm 前進して止まるような、矢印に示す移動をするアセンブリ言語によるプログラム例を、格納される番地とともに図 4 (左下) に示す。黒線を 2 つの



address:0x00	書込み開始番地の指定
00 SPD A	ロボットのスピード設定
01 LDI 03	レジスタAへの値03を代入
03 FWD 1	1cm前進
04 JMP SW3 15	SW3センサ白判定で15番地へ
06 JMP SW4 12	SW4センサ白判定で12番地へ
08 DEC	レジスタAの値を1減
09 JMP EQ 0E	フラグの値が0の時0E番地へ
0B FWD 1	1cm前進
0C JMP 03	03番地へJUMP
0E FWD 2	2cm前進
0F RGT C	右回転90°
10 FWD 8	8cm前進
11 END	終了
12 LFT 1	左回転7.5°
13 JMP 04	04番地へJUMP
15 JMP SW4 03	SW4センサ白判定で03番地へ
17 RGT 1	右回転7.5°
18 JMP 04	04番地へJUMP

図 4 舞台上のロボット移動の模式図(上)と、プログラム例 (左下) ・各命令の概要 (右下)

光センサがまたぐ度に、レジスタの値を 1 減じ、レジスタの値が 0 になった際に、終了処理を行うことで、3 回の繰り返しを表現している。図 4 (右下) に命令の概要説明を付す。このように、本ロボットでは、比較的短いプログラムで、光センサを利用した各種プログラムが実行可能である。

以上のとおり、本ロボットでは、プログラムの基本構造である順次処理、条件分岐、反復処理を、機械語 (アセンブリ言語) にてプログラムし、実行することで結果の成否を視覚的に簡便に確認することができる。

## 2.4 学習支援: PC を用いたロボット操作と学習者のプログラムの蓄積

本ロボットへのプログラムの入力、ロボット単体でも可能であるが、命令を一つずつ 01 の並びで手入力することは手間がかかる。そのため、PC を用いてプログラムをロボットに転送することができるソフトウェアを Python で開発している。図 5 に画面例を示す。画面の右側の欄内に、各学習者がアセンブリ言語でプログラムを入力し、「assemble」ボタンで機械語へ変換、それをまた転送データとして変換し、ロボットへシリアル通信にて転送する流れとしている。

画面例では、アセンブリ言語に番地が振られているが、これは「assemble」ボタンを押すことで、自動的に番号が振られる。その自動で振られた値に従って、学習者がジャンプ命令におけるジャンプ先の番地を適切に設定できるような学習支援としている。また、試行錯誤によりジャンプ命令を修正した場合、ジャンプ先の変更忘れや変更の誤りを回避するために、ジャンプ命令の修正に伴うジャンプ先の番地を自動対応させる機能も有する。いずれも機械語やアセンブリ言語を利用する際の短所として知られるデバックの困難さがある程度軽減する目的で行う支援である。

また、ロボットへプログラムを転送するたびに、dataFolder 内にアセンブリ言語と機械語の両方の

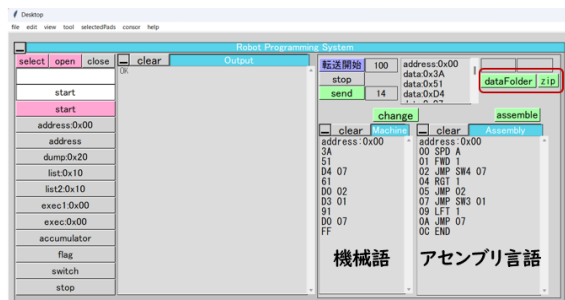


図 5 ソフトウェア画面例 (USB 起動)

プログラムがそれらを転送した日付のついたフォルダが作成されその中に蓄積されるように設計している。学習者は必要に応じ、過去に転送したプログラムに戻してプログラムを実行することができる。また当該ソフトウェアの画面上には「dataFolder」「zip」というボタンを付け、「zip」ボタンを押下することで、dataFolder内の当日のフォルダをzip化する機能をつけた。これは、学習者の授業時の実行ログを、教授者らが毎回把握するためのものでもある。

ソフトウェアでは、ロボットへの転送の他、ロボット内のプログラム確認 (dump/list)、アドレスの確認、プログラム実行(exec)、レジスタの値の確認、フラグの値の確認、スイッチのON/OFF状態の確認(switch)等のメニューを持つ。

本ソフトウェアは、授業で用いる大学のPC上に、USBメモリを挿入することで立ち上げることができるようにWindowsマシンに対応しており、個人PCを用いた自宅での学習にも利用できる。

### 3 授業設計と授業実践

#### 3.1 個別学習+ペア学習+グループ学習を組み合わせた授業設計

授業は、筆者らの所属大学で実施する大学1年生向けの演習科目で、後期半期15回2単位で構成する(2018年度のみ、授業にロボット以外も構成要素に入れており、本ロボットの実践は9回で実施した)。筆者らは、大学1年生に対するこのような演習授業は、初年次教育としても位置付けることが望ましいと考えており、センサを利用できるようにした2021年度後期以降、授業のシラバスでは、到達目標として以下の3点をあげている。

- (1) 機械語命令でプログラミングするロボットを用い、ロボットの動きを制御する中で、プログラミングとその背後にあるコンピュータの仕組みを知ることができる。
- (2) センサ等の仕組みを用いて複数のロボットの動きを全体企画する中で、目的に応じてロボットを動かすプログラムを作ることができる。
- (3) グループでの学習活動を通し、円滑で効果的な協調活動を行うスキルを獲得する。

つまり、グループでの協調活動を授業内に組み込むことを想定し、前半に個別学習、後半にグループ学習にてグループでの作品発表を行う授業設計としており、これは2018年度から変わっていない。グループ構成員は、教授者が決めている。

表2 授業構成の概要

回	2022		2023	2024	備考		
1	基本操作	個別学習	個別学習	個別学習	基本操作		
2	繰り返し				繰り返し		
3	PC利用等				PC利用等		
4	条件分岐・音				センサ		
5	センサ						
6	グループ形成、グループワーク	グループ学習	学習	ペア学習	個別・ペア課題(ペアで相談)		
7							
8							
9					グループ学習	グループ学習	グループ形成、グループワーク
10							
11							
12							
13	発表会1	1件					
14	発表会2	5件	5件	4件	発表会		
15	振り返り・リベンジ・達成度確認・その他まとめ等						

概ねグループ形成時点での課題達成状況に応じ、知識習得状況が高い学習者らを相応に分散させるようにしている。また、2021年度からセンサを利用しているが、センサを利用したプログラムは難易度が比較的高いため、グループ作業時のプログラム分担が特定の学習者に偏る傾向が2021, 2022年度に見受けられた。そのため、2023年度以降は、ペア学習をさらに授業構成に加えることとした。ペア学習の期間にて、ロボットに関する様々なプログラム例を学ぶ機会を増やし、学習者間の知識習得の差異をできるだけ小さくすることを期待してのことである。表2に2022から2024年度までの授業の全体構成を比較・参考のために示す。

ペア学習の回では、まずは個別の課題3種を行い、それが終わればペア課題に取り組むこととし、

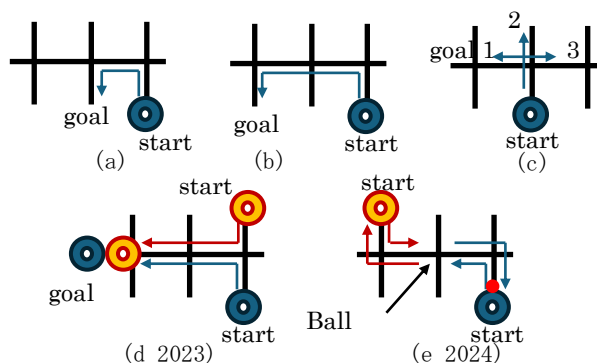


図6 ペア学習

当該の個別課題の間でも、ペアで適宜相談してよいこととした。図 6 に、各課題におけるペアのロボットの動きの概要を図示する。個別課題 3 種 (a)(b)(c)はいずれも、図 4 に示したようなレジスタ値を用い、それを増減する (c は乱数等も用いる) ことで、条件分岐をさせるプログラムである。

### 3.2 ペア学習における道具を利用した授業実践

2023 年度のペア課題は、図 6 で (d 2023) と示したもので、2 台のロボットが同時にスタートして交差点で出会ったのち乱数で順番を決め並んでゴールする課題である。本課題は難易度が高く、クリアが難しかった。そのため 2024 年度は、図 7(a)に示すボール (直径 6cm, 重さ 17g, 材質 PLA ; 3D プリンタにより制作) を運ぶ道具 (図 7(c)参照) をロボットに取り付け、図 6(e)のスタート位置からスタートして、中央付近で、一方の運ぶボールを他方が受け取り元の位置に戻るという課題に変更した。当該道具には、前後の長さが異なるくぼみがついており、そのくぼみの左右を、ロボットを回転させ、小規模に前後移動をすることで切り替える。ボールを持ったまま移動し、くぼみを切り替えて、ロボットを前進させることで、ボールを前に押し出すことができる。

この 2024 年度のペア課題は、ボールの受け渡しという成否が明らかな課題のため、ペアでの試行錯誤が見受けられた。ロボットを置く位置、2 台の移動タイミングにより、同じプログラムであ

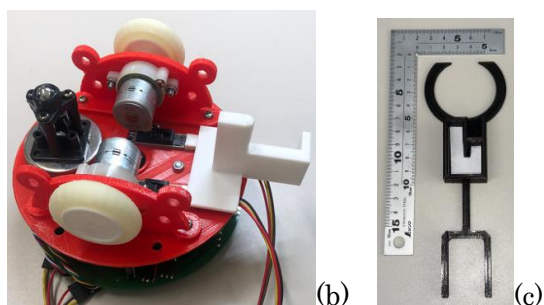


図 7 装着道具を装着したロボット (a). (b) の丸で示した白い突起が (c) のみぞ内 (みぞの形状は白紙で示した) を移動する

っても成否が分かれる場合が多い。成功の精度を高める方策の検討も各ペアで行うこととなる。

### 3.3 2023 年度と 2024 年度のグループ作品の違い

グループ作品は、グループメンバー分のロボットを用いて、ロボットの動きで何かを表現する作品を企画するが、2022 年度以降は、主に以下の条件を課している。

- ・ 1 台以上は音を鳴らす
- ・ 各ロボットは 1 個以上のセンサを用いる
- ・ ボールを 1 個は用いる
- ・ メンバー分のロボットを全て用い、各ロボットは各自でプログラミングする

例年グループ課題としてサッカーをモチーフとしたボールの受け渡しを行うものが多いもののボールの受け渡し機構を適切に作ることは難しい。例えば図 8 上に示すように、ボールを支え移動でき、またボールを受ける「手」をロボットに作る、テープを使いボールの移動を誘導する、等の方略を用いるものが多いが、受け渡しの再現性は低い。

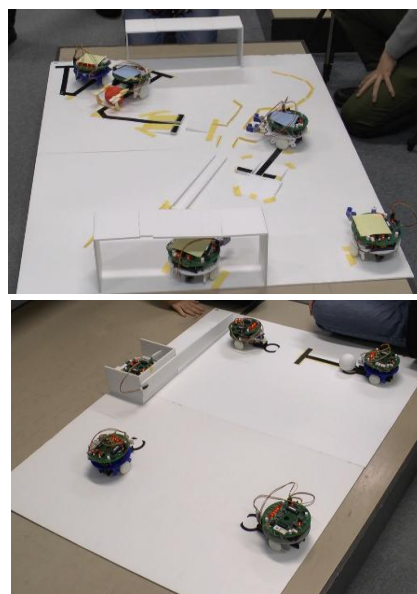


図 8 ボール受け渡し例 (上 2023, 下 2024 年度)

先の図 7(c)の道具は、これらグループ作品の制作状況を踏まえ、教授者がグループ課題にも使える道具を設計し、学習者に提供したのものでもある。グループ作品を企画する前のペア課題にて、実際のボールの受け渡し課題を課すことで、グループ作品にてペア課題の経験を生かした企画を行うことが可能になると考えた。この道具を使ったペア課題後、2024 年度は 4 グループにて作品企画を行ったが、結果として以下の傾向が見受けられた。

- ・ グループ作品に図 7 の道具を用いたロボッ

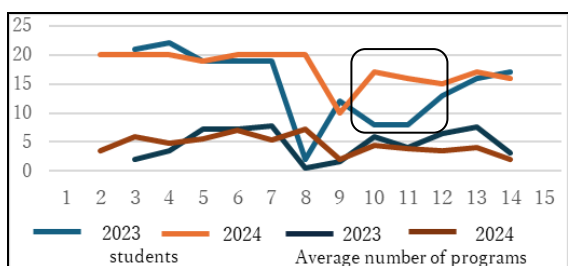


図9 プログラムを転送した学生数と転送数

トは7割（20名中14名）と多かった（図8下のグループでは5台中4台が道具装着）。

- 2024年度は2023年度と比較し、グループ作品制作中にプログラミングを行う学生数が多かった。図9の横軸は授業回、縦軸は数を示し、第10回、11回では、2023年度に比べ、倍の学生がプログラムを各自のロボットに転送していることがわかる。第14回が発表会であり、2024年度は十分な時間がある中でプログラムの試行錯誤を行ったことが推察される。

2023年度までの作品企画では、ボール授受を含む舞台装置に係る準備作業に要した時間が、2024年度は道具を提供により削減され、その分、グループ作品に係るプログラミングに注力できた可能性が高い。

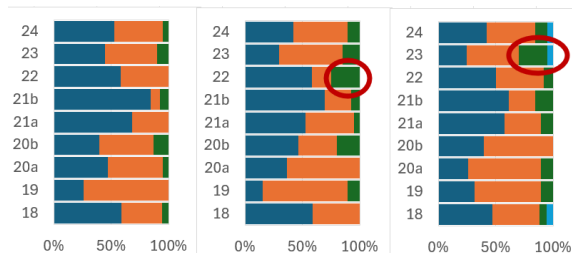
## 4 授業終了時のアンケート結果と考察

### 4.1 アンケート結果

授業終了時に行っている学習者へのアンケート結果を図10に示す。「ロボットの動作をプログラムすることは面白いと思う」「プログラミングに対する興味が増したと思う」「もっと複雑なプログラムを作りたいと思う」の設問に対する回答結果の2018年度からの年次変化である。2020・2021年度は2クラスで実施したため、a/bの別を付けた。センサを利用した授業は21b以降である。回答数は概ね19-20名であるが、20aが15名、22年度が14名と少ない。これはコロナ禍での事情(20a)、発表会での失敗を最終授業時に再実施したため、授業後の調査となった影響(22年度)である。

縦軸は年度、横軸は各回答の割合である。全体として、年度に依らず殆どの学習者が肯定的回答をしていることがわかる。履修者は、様々な知識レベルを持つ学習者で構成されているが、学習者集団全体に対し、ロボットプログラミングに対す

- (a) ロボットの動作をプログラムすることは面白いと思う
- (b) プログラミングに対する興味が増したと思う
- (c) もっと複雑なプログラムを作りたいと思う



- 肯定的回答 ■ 強くそう思う ■ そう思う
- 否定的回答 ■ あまり思わない ■ 全く思わない

図10 各設問に対する回答の年次変化

る興味関心を深化させていることが示されている。但し、ここで、2022・2023・2024年度の結果を比較し2022年度と2023年度の懸念点をあげる。

- 2022年度において、「プログラミングに対する興味が増したと思う」に対する否定的回答の割合が他年度に比べ高い（図10(b)：否定的回答部分を図では丸で囲っている）
- 2023年度において、「もっと複雑なプログラムを作りたいと思う」に対する肯定的回答が、他の年度（9割前後）に比して低いように見受けられる（図10(c)：否定的回答部分を図では丸で囲っている）

2022年度は、グループ活動においてプログラミングが得意な学習者が集中的にプログラムを作ることで、プログラミングを行わない学習者が少数ながら発生した。その少数者を含めた結果であり、全体としての肯定的回答は多いものの、プログラムに対する興味を持てなかった学習者が出た可能性が考えられる。但し、2022年度は回答数が少ないため、確定的な結果とは言えない。

2023年度では、「もっと複雑なプログラムを作りたいと思う」設問に対する肯定的回答が低いが、2023年度のペア課題の難易度が高く、学習者の理解の限界に近いものであったことを示していると考えられる。2024年度で傾向が改善していることから、ペア学習の課題設定の難易度とそれにつながるグループ課題にてプログラミングに注力できる環境（道具の提供）が、さらに複雑なプログラムを作りたいとの欲求につながった可能性がある。

### 4.2 習熟度に応じたロボットへの興味

前節のアンケートには、「ロボットのハードウェアに対する興味が増したと思う」との設問もあ

る。ペア学習を取り入れた 2023 年度と 2024 年度の結果では、年度の違いではなく、授業以外のプログラミング経験の有無で傾向が明確に異なった。

表 3 ハードウェアに対する興味の回答結果

	年度	肯定(人)	否定(人)
経験あり	2023	4	0
	2024	8	1
経験なし	2023	8	7
	2024	6	4

つまり、プログラミング経験がある学習者は、経験の無い学習者に比べ、課題となるプログラムのみならず、その背後にあるロボットのハードウェアに興味を持って取り組んでいる可能性がある。表 1 の命令表には含めなかったが、シフト演算や比較演算等の演算命令も学習者はマニュアルを確認しながら利用することができる。ペア学習における個別課題(c)では、乱数ではなく、ある番地の値とレジスタの値との比較演算、シフト演算等を用いても課題を遂行可能である。各課題に具体的に取り組む際に、どの命令をどのように使うかを考え、その中でコンピュータアーキテクチャに関する興味を高めている可能性が示唆される。また、普段 Python や C 等の高級言語に触れている学習者が、if 文による条件分岐や for ループによる反復ではなく、JMP 命令による制御を具体的に行うことで、高級言語における抽象的な制御構造の実際の内部処理について考える機会を与えている可能性もあると考える。

### 4.3 機械語で動作する本ロボットの優位性

一般に機械語命令を用いたプログラミングは、学習の難易度が高いと考えられており、プログラミング初学者を含む学習用プログラミング言語として、機械語命令を用いるものは筆者らの知る限り確認できていない。しかし、本ロボットを用いた授業では、学習者の知識習得状況に依らず、ロボットへのプログラミングに対する興味関心は継続的に高いことを示した。この理由は、大きく以下の 3 点によると考える。

- 初学者への機械語やアセンブリ言語に対する足場かけが適切に行われている。例えば、LED の点灯消灯による 2 進法ベースの移動回転命令を通じて機械語命令を理解すること。アセンブリ言語では本来存在しない for ループを利用可能にし、まずは for を使ってプログラム

を理解した上で、本来の JMP 命令を理解するように学習できること。JMP 命令で指示する番地の値はソフトウェアの支援を用いることができること。等があげられる

- ロボットが現実世界で動作することにより、プログラムの成否が視覚的に直接確認可能である。これはロボットを利用する長所として従来知られているものである[3]
- 知識習得状況が高い学習者に対しては、前述したハードウェアに関する興味を喚起することに加え、本ロボットを用いたプログラミングは、個別課題に対し、別解や、より少ない番地での表現等、より適切なプログラム作成に関し考える余地が多いことが特徴と言える。特に 2024 年度の道具を用いたプログラミングでは、より精度を上げて他のロボットとボールの受け渡しをするために、回転方向、動作スピード等、様々なプログラム案を想定してプログラムをする学習者が見受けられた。

つまり、初学者も対応可能な直感的理解が可能な機械語（アセンブリ言語）命令にて動作するロボットを用いることで、学習者の知識習得状況に幅があっても、学習者個々の知識習得状況に応じたプログラミングを行いながら、学習者間での協調学習を実施できている可能性が示唆されていると言える。また、実際のグループでの協調学習を行う中で初学者も JMP 命令を適切に理解している状況が把握できている。JMP 命令を適切に理解するには、プログラミングの試行錯誤が必要であり、2024 年度で用いた道具の利用など、グループ学習においてプログラミングに注力できる学習環境を整えることが重要である。

### 4.4 道具の改善

2024 年度に道具の効果があることを示したが、図 7(c)の道具は、坂道での利用で、道具が浮く不具合があり、道具を削ることで暫定対応したが、そのために若干の時間を使った。プログラミングに注力する時間確保の重要性を鑑み、その後、道具の改善を試みている。2025 年度は、道具を 3 つのパーツで構成することで、坂道でも浮かない道具を用いて実践する予定である（図 11 参照）。



図 11 3 パーツで構成した道具（改善版）

## 5 まとめ

本稿では、機械語命令で動作する独自開発したプログラミングロボットを用いたプログラミングの実践が、大学1年生の幅広い知識習得状況にある学習者に適応していること、具体的には学習者集団全体に対し、ロボットプログラミングに関する興味関心を喚起していることを経年データから確認した。また本ロボットの特徴から、この効果をもたらす要因として、以下の3点があげられることを考察した。

- ・ 直感的に理解できる機械語命令の設計等、初学者に対する適切な足場かけがなされている。それにより順次処理、条件分岐、反復といったプログラミングの基本構造を機械語でどのように表現するかを順次理解できる
- ・ プログラムの実行結果を現実世界でのロボットの動作として確認することでその成否を容易に確認できる(参考文献[4]におけるプログラムと動作の関係を視覚的に「顕在化」することにも対応する)
- ・ 知識習得状況の高い学習者に対しては、ロボットの背後にあるハードウェアに対する興味の喚起に加え、各課題に対して多様なプログラムが作成可能であることから、学習者自身の興味関心の度合いに応じたプログラムの難易度設定が可能である

授業設計として、2018年度の開講初期から、授業前半の個別学習、授業後半のグループ学習の構成を行ってきたが、グループ作品の発表機会は学習者の満足度を高めることに効果があると考え。一方、センサ利用でプログラムの難易度が上がり、グループ作業が過度な役割分担にならないよう、グループ形成前に学習者集団のスキル差を減らす意図で、2023年度からペア学習を導入し、課題の種類を増やし、ロボットを動作させる経験をさせた。さらに2024年度は、道具を利用させることで、ペア学習の難易度を調整するとともに、道具の利用が、グループ学習時にプログラミングに注力ができる環境準備にもなっていることを確認した。学習者へのアンケート調査結果が、2023年度より2024年度が良好であることを示したが、単なる自己評価のみならず、最終授業時の小テストにより、2024年度の学習者はJMP命令を適切に理解していることも確認している。

初等中等教育段階でのプログラミング教育の推進により、今後さらに学習者の知識レベルの幅が広がるとしても、本ロボットを用い、適切な学習構成を検討することで、効果的な授業実施は可能であると考え。授業実践と適切な道具を工夫することで、学習者全体のプログラミング能力の育成と向上をはかることを目指していきたいと考えている。

## 謝辞

本ロボットに装着する道具ならびにロボットの台座はすべて3Dプリンタによる制作を行っている。これらの制作は研究支援推進員の伊藤恵理さんの寄与によるものであり、深く感謝する。

## 参考文献

- [1] T. Noguchi, H. Kajiwara, K. Chida and S. Inamori, “Development of a Programming Teaching1-Aid Robot with Intuitive Motion Instruction Set”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.29 No.6, pp.980-991, December 20, 2017.
- [2] 布施泉、野口孝文、“プログラミングロボットを用いた協調学習手法の検討”、大学ICT推進協議会2023年度年次大会、pp.567-573、2023.
- [3] Hwang, S., Jho, G. D., & Yu, S. H., “The Effectiveness of Educational Robots in Improving Learning Outcomes: A Meta-Analysis”, *Sustainability*, 15(5), 4637, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15054637>
- [4] 岡本雅子、村上正行、吉川直人、喜多一、“「視覚的顕在化」に着目したプログラミング学習教材の開発と評価”、日本教育工学会論文誌、37(1)、pp.35-45、2013.