

機械工学科におけるメカトロニクス一貫教育の構築

中野 壽彦¹・山本 通¹・軽部 周¹

¹機械工学科

産業界では従来の技術に高度IT技術を融合させて新たな価値を創出する「デジタルライゼーション」が必要とされており、経済政策や情報教育強化の取り組みが促進されている。そこで本プロジェクトでは、「産業のデジタルライゼーション」対応型人材育成のためのメカトロニクス一貫教育の構築を目標とし、現在の一部のメカトロニクス関連科目に、デジタルツイン環境の導入、情報・実験スキル向上に向けた教材開発、電気系スキル向上のカリキュラム構築、高度機械システム制御実験の計画と実施を行った。本稿では、本プロジェクトで構築を目指す一貫教育カリキュラムの目的と内容について説明し、構築した教育環境や教育実践について述べる。

キーワード：メカトロニクス教育、シーケンス制御、CAM、デジタルツイン、SLAM

1. 緒言

本校機械工学科では、2001年に、工場自動化やロボットなどメカトロニクス技術に精通し、機械工学と電子工学という異なった分野についてバランスの良い知識を持った技術者を養成するために、大々的な実習環境を導入しメカトロニクス実習を開始した。ラック&ピニオン、平カム、偏心クランク、レバースライダなどの機械モジュール、モーターおよびそれを制御するためのPLCとプログラム作成用ソフトウェア、オルゴールの生産ラインを模擬したミニメカトロ実習装置を導入し、機構・アクチュエータ・センサの基礎的な知識の取得、およびPLCによるシーケンス制御の理解を目的とした実習が計画され実践された¹⁾。以降、学生の創造性を育てることを目的として、試行錯誤で実習内容を変更しながらも、2年生機械実習Ⅱ、3年生工学実験Ⅰにおいて、これら実習装置は今も現役でメカトロニクス教育に活用されている。

一方、ここ数年の社会動向に着目すると、内閣府が定める「Society 5.0」、あるいは経済産業省が策定している「デジタルトランスフォーメーション推進ガイドライン」で述べられている通り、今後の産業界はデジタル技術との融合による新たな価値の創出が必要とされている。今後は高度IT技術の活用による「産業のデジタルライゼーション」が急速に進むことが予想される^{2,3)}。また文部科学省は情報教育の推進のため学習指導要領を改訂した。本校においても、「数理・データサイエンス・AI教育プログラム」が実施されており、令和4年度の入学生から低学年における情報教育強化のためのカリキュラムとして「情報Ⅰ」「情報Ⅱ」の科目が開始された。このような背景から、高等専門学校に

おける機械系技術者教育においても、情報技術を理解し、かつ既存技術と融合して応用できる素養を備えた技術者の育成が必要である。前述の通り、これまでの本校機械工学科の教育では、機械工学と電気・電子工学を融合したメカトロニクス教育を実践してきた。一方で、メカトロニクス技術の本質である、機械・電気・情報の融合による技術を実践する教育機会は、他科目との兼ね合いから時間数に制限がある。特に前述した情報技術応用力を持つ人材育成のためには、情報技術を扱う実践教育を強化する必要がある。

そこで、本校機械工学科のメカトロニクス教育について、「産業のデジタルライゼーション」対応型人材育成のための一貫教育カリキュラムの新規構築を目指し、令和3年度から実験実習環境の導入、実施計画を行い、一部科目は令和4年度前期から実践を開始した。本稿では、各科目・実験自習のカリキュラム構築の状況について報告する。第2章では一貫教育カリキュラム全体について説明し、第3章以降は各科目・実験自習での実践内容の詳細を述べる。

2. メカトロニクス一貫教育

本プロジェクトで構築を目指す「産業のデジタルライゼーション」対応型人材育成のための一貫教育カリキュラムのイメージを図-1に示す。令和4年度から開始した情報教育との連携も意識しながら、低学年から段階的に基礎を積み上げ、高度なメカトロニクス技術の知識と理解を深める一貫教育を目指している。

この一貫教育を構築するにあたり、既存の講義・実験・



図-1 提唱するメカトロニクス教育

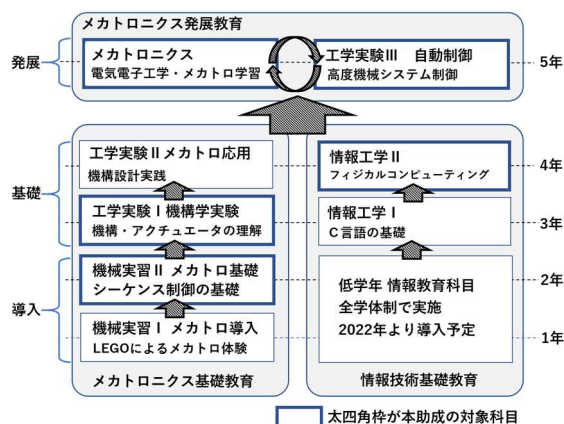


図-2 科目間連携のイメージ

実習科目を見直したうえで、具体的には以下の教育実践を新たに導入することとした。

- ① 仮想空間上に機構・アクチュエータを再現できるデジタルツイン教育環境を活用した応用力育成
- ② 機械システム制御を題材とするフィジカルコンピューティング実践教育によるプログラミング応用実践力の育成
- ③ 座学による電気電子工学の学び直し機会の充実による専門基礎力の強化
- ④ 高度デジタル技術の融合による機械システムの知能化・自動化の体験学習

科目間連携の全体イメージを図-2に示す。1～4年生までメカトロニクス基礎教育と情報技術基礎教育を段階的に進めていき、5年生では総まとめとして、座学と実験を同時並行で実施して総合的に理解を深めることを目指す。図中の太四角枠で示す実験実習・講義科目に対して、前述①～④の教育実践の導入を目指す。

3. 電気回路によるリレーシーケンス制御実習

2年生の機械実習Ⅱでは、「メカトロ基礎」というテーマを通年で実施しており、シーケンス制御による機械制御技術を理解することを目的とした実習を行っている。2001年に導入した小型機械モジュールとPLCを用いて、制御プログラムをPCで作成し、エスカレーター、天井クレーン、ベルトコンベヤーと空気圧シリンダを用いた部品輸送・ピックアップ作業などを題材としたシーケンス制御実践を行っている。実体配線と電磁リレーを用いた電気回路ベースでのシーケンス制御を学習する機会を提供できていない。本校機械工学科のカリキュラムでは、電気回路を自分の手で扱う実習機会が少ない。そこで電気回路技術に触れる機

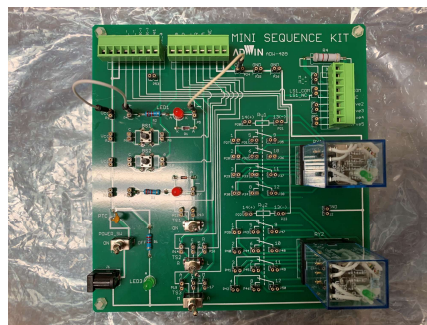


図-3 シーケンス実習キット

会を提供するため、新規に図-3に示す、(株)アドウィン製の実習教材を導入した。メーカーのHPで紹介されている導入実績を見ると、既に全国で何校かの高専でも本時実習キットを利用しているようである。本キットは卓上サイズの実習キットで、学生毎にキットを使用して実習を行うことが可能である。LEDのON回路から始まり、AND・OR回路、電磁リレーを用いた自己保持回路、小型DCモーターの駆動・自動停止・回転方向切り替え、インターロック回路といったシーケンス制御の基礎を、配線作業を行いながら体験することができる。これらを段階的に効率よく学ぶための実習テキストも準備されている。

機械実習Ⅱでは、令和4年度前期に本キットを用いて実習を行った。まずシーケンス制御とは何かを簡単に紹介したのち、一週目と二週目で本キットによる実習を行い、三週目でPLCによる制御を体験するというように構成した。従来の実習はPLCでのシーケンス制御のみであった。しかし本来、PLCにおけるリレー制御のプログラムの概念を理解するためには、まず電磁リレーによるリレーシーケンス制御を知っておく必要がある。そこでまず電気回路ベースのシーケンス制御を体験してから、PLC制御へのステップアップにつなげるようにした。

当初、電気回路配線は特に機械工学科の学生には敷居が高いのではないかと懸念があったが、実際に始めてみ

ると、やや苦戦する学生も一部見られたが、全体的には実習時間内に十分余裕をもって、指定の課題を終えることができた。次年度以降も継続できる実習内容を構築できたと考えている。

4. 情報スキルと実験スキルを向上させる新たな授業と教材の検討

産業界では、従来の技術に、高度IT技術を融合させて新たな価値を創出するデジタルイゼーションが必要とされており、高専でも更なる情報教育強化の取組みが必要となってきた。ここで、現在、本校・機械工学科の各学年で実施されている主な情報教育に関する内容を表-1に示す。表を一見すると、普通高校等と比べ、実験実習的な要素が多く、情報教育が充実されているように見えるかもしれない。しかし、実際には、本校の他学科に比べて情報関係の授業が苦手という学生の割合が多いのが現状である。例えば、筆者は、表内の情報工学ⅠとⅡを担当し、主にC言語でプログラミングを教えているが、プログラミングが苦手な授業の内容が全く分からないと言う学生も受講しており、そのような学生に、プログラミングの重要性の理解や授業に対するモチベーションアップをさせるのに苦労している。また、情報工学ⅠとⅡの授業で、現在使用しているCコンパイラでは、コマンドプロンプトに、コマンドを打ち込む作業が多く、実践的な授業を提供するという面では、物足りない部分があると感じていた。

(1) 自作CAMによるプログラミング教育

表-1 大分高専・機械工学科の情報教育(抜粋)

学年	内容	授業名
1	レゴを使ったプログラミング	機械実習Ⅰ
2	IoTゲームの製作競技会	機械実習Ⅱ
2	Microsoft Officeリテラシー	機械実習Ⅱ
2	3DCADリテラシー	機械実習Ⅱ
2	搬送ロボット組立・プログラミング	機械実習Ⅱ
3	C言語の基礎	情報工学Ⅰ
3	CAE	PBL
4	C言語の応用	情報工学Ⅱ

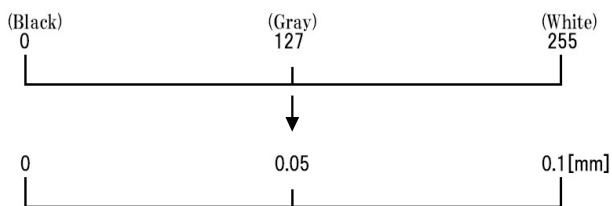


図-4 濃淡情報から深さ情報への変換例

NC 工作機械は、現代のものづくりにおいて欠かせないツールの1つであり、機械系の学生が、その特徴や操作方法を修得しておくことは重要である。そこで、代表的なNC工作機械であるマシニングセンタのNCプログラムを自動で生成できるCAMを自作させ、それにより作成したNCプログラムで実加工まで行うことで、実践的なプログラミング教育が可能になるとともに、実験スキル向上にも効果があるのではと考えた。

(2) 自作CAMの詳細

学生に自作させるCAMは、任意画像を読み込み、その濃淡情報を高さ情報に変換し、NCプログラムとして出力させる。その変換方法は、例えば、図-4に示すように、単純な方法で、その変換式は、以下の式(1)で表すことができる。

$$Z_t = (Z_H - Z_L)(S_t - N_c) / S_t + Z_L \quad (1)$$

ただし、 Z_H は画像部加工パスのZ座標最高設定値、 Z_L はZ座標最低設定値、 S_t はグレースケールの分解能、 N_c は各ピクセルから得た色情報である。

なお、無料で開発環境を容易に構築できることや、画像から濃淡情報等を容易に得られることから、開発用プログラミング言語は、Pythonを使用した。実際のコードの一部を図-5に示す。また、そのプログラムに、図-6(a)の画像を読み込ませ、出力されたNCプログラムの軌跡を図-6(b)に示す。残念ながら、図-5のようなコードを見せると、本校・機械工学科学生の多くは理解に苦しむ可能性が高い。しか

```

1 import cv2
2
3 def header(input_file): # NCプログラムのヘッダー部分
4     file.write("%n")
5     file.write("00031n")
6     file.write("G90G54G1F1000n")
7     file.write("G0G43Z200.0H32n")
8     file.write("G0X0Y0n")
9     file.write("G8P1n")
10    file.write("S7000M3n")
11
12 def footer(input_file): # NCプログラムのフッター部分
13    file.write("G0Z200.0M5n")
14    file.write("M30n")
15    file.close()
16
17 #最大Z高さ, 最小Z高さ, 1ピクセル間距離, アプローチ高さ
18 Zmax,Zmin,Pik,Ap_Z=0,-1,1.0,80.0
19 img=cv2.imread('onsen_100_140.bmp') # 画像の読み込み
20 gry=cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_RGB2GRAY) # グレースケールに変換
21 height1,width1= gry.shape # 画像の高さと幅を変数にセット
22 file=open('output.NC', 'w') # 書き込みファイルを設定
23 header(file) # NCプログラムのヘッダー部分をファイルに書き込み
24 for i in range(width1): # X方向のループ
25     C1=["X",str(round(i*Pik,3)),',Y0',',n']
26     file.writelines(C1)
27     C2=["G0Z",str(Ap_Z),',n']
28     file.writelines(C2)
29     file.write('G1')
30     for j in reversed(range(0,height1)): # Y方向のループ
31         color1=(gry[j,i]) #各ピクセルの濃淡情報を変数にセット
32         Z1=(Zmax-Zmin)*(255-color1)/255+Zmin
33         j1=height1-1-j
34         C3=["Y",str(round(j1*Pik,3)),',Z',str(round(Z1,3)),',n']
35         file.writelines(C3)
36         file.writelines(C2)
37
38 footer(file) # NCプログラムのフッター部分をファイルに書き込み
39

```

図-5 学生に配布するプログラム

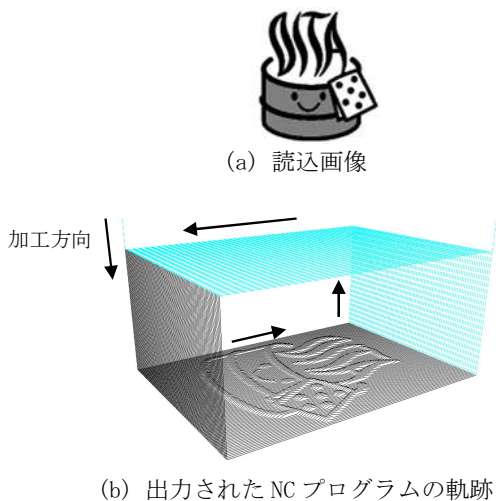


図-6 NCプログラム例

し、まずは、それぞれの学生にあらかじめ好きな画像を準備させ、このコードを配布し画像から容易にNCプログラムが作成できる経験をさせる。その後、各自が作成したNCプログラムを市販のシミュレーションソフトに取り込み、ボールエンドミルにより加工されていく過程を見せる。このような過程が、これまでの教育方法よりプログラミングに関する学生の興味を惹き、学習意欲の向上につながるのではないかと期待する。

(3) 加工機

現在、本校には、図-7に示すようなマシニングセンタが2台設置されているが、この2台だけでは、加工できる数に限りがある。そこで、図-8に示すような数万円で購入できるデスクトップCNCルータを手始めに1台購入し、問題ないようであれば、複数台購入し、なるべく多くの時間、学生に実加工させる機会を与えたいと考えた。しかし、実際に使用してみると、購入したデスクトップCNCルータでは、金属の加工は剛性的に難しく、値段相応の品質のようで、導入後、10回程度加工しただけで修理が必要になった。したがって、複数台導入するとなると、維持管理が難しいことが容易に想像できたため、デスクトップCNCルータを複数台導入することは断念した。そのため、本校に設置されているマシニングセンタ2台のみを使用することを想定し、どのように教材を導入するか検討を行った。ここで、本校・機械の各学年の実験実習は、40人のクラスを10人ずつ4グループに分けて行っている。学生は、それぞれの担当教員の実験実習を3週間、時間数にすると合計9時間の実験実習を行い、ローテーションしながら受講している。今回、作成する教材も実験実習に導入することを想定し、1回の実験実習で10人が受講すると想定して準備を進めた。

(4) 実加工

前述したように、1度の実習で10人に対し教材を展開する計画のため、学生を2班に分け、実加工は5人の学生でマ



図-7 本校のマシニングセンタ



図-8 デスクトップCNCルータ

シニングセンタ1台を使用することになる。ここで、ただ単に、それぞれが作成したNCプログラムで実加工を行い観察するだけでも、それなりの教育効果はあるかもしれないが、以下の制約を設けて実加工をさせる。つまり、実加工時は、時間の制約もあることから、加工範囲をあらかじめ決めて、学生にNCプログラムを作成させる。例えば、横20mm×縦25mmの領域に、各班でデザインを決めさせる。学生は、各自が選んだ画像を、画像処理ソフト等を使用して、決められた縦横比に入る画像に調整しなければならない。また、加工時間も評価の対象とすることとして、必要に応じてCAMをアレンジし、NCプログラムを作成させる。次に、加工シミュレーションを行い、問題が起らなかったNCプログラムを使って、実加工を行う。また、実加工は準備から片付けまでを、例えば90分以内にするという条件もつけ、終了後は、加工品位、デザイン、加工時間(準備時間も含む)等の項目別に得点を与え、2つの班で競わせる。このような方法であれば、実践的に情報科目や専門科目を学べるうえ、協調性やリーダーシップ等の分野横断的能力も育成できるのではないかと考えた。なお、最終的には実験実習のローテーションが全て終了した時点で、全班の結果を評価する機会を設ければ、学生も全ての班の状況が確認でき、授業の振り返りやモチベーションアップにもつながるのではと考えている。

(5) 予想される課題と今後の予定

以上のように、教材開発のおおよその目途はついたが、実際に実施するとなると、様々な課題が発生することが予想される。例えば、限られた時間内に、どれだけのチーム

が加工サンプル作成まで至ることができるのか、加工機を安全に使用できるか等の不安がある。また、マシニングセンタの違いによる加工時間差が、どの程度あるのかも事前に確認し、もし大きく異なるようだと、何かしらの工夫が必要になる。ただ、方向性としては、有益な手法であると考えているので、まずは有志学生に対し、試験的に授業を行い、課題の確認と、その解決方法を考え、実験実習で、本教材が行えるように準備を進めていきたい。

5. デジタルツイン環境を活用した教育

3年生は座学として「機構学」、また工学実験Ⅰのテーマの一つとして機構学実験を行っている。リンク機構、クラック機構、カム、歯車などの機械要素について座学で学ぶとともに、小型機械モジュールを用いた実験を通して、体験的に理解を深める教育を行っている。今回、これら機械要素をバーチャル空間上で再現し、動作に加えて各部に作用するトルクなどもシミュレーションすることで、機構・アクチュエータを動力学の観点で理解を深められるのではないかと考え、数値計算ソフトウェアによるデジタルツイン環境を準備することにした。ソフトウェアとしてMathworks社のMATLABの教育用ライセンスを新規購入した。デジタルツイン環境の構築には、Toolboxの一つである「Simscape Multibody」を採用した。これは仮想空間上に3DCADと似たような感覚で様々な機械システムの物理モデルを構築して、動作をグラフィカルに表示することができるものである。座学の「機構学」および工学実験Ⅰへの活用については、本年度中に試行的に取り入れてみて、効果の検証を行う予定で準備を進めている。一方、5年生の工学実験Ⅲにおいて本ソフトウェアを用いたシミュレーションベースの実験を実施したので、簡単に紹介する。

工学実験Ⅲの自動制御のテーマでは、三週のうち一週分を、PID制御実験に充てている。機械工学科では4年生後期(令和5年度より5年生前期に変更)に「制御工学Ⅰ」として座学で講義を行っている。伝達関数、過渡応答、周波数応答、安定性など制御工学の基礎を扱っているが、時間の都合上、フィードバック制御の手法そのものを取り上げるまでには至っていない。一方で、産業界で広く利用されているPID制御を理解しておくことは、機械系エンジニアとして重要であると考えている。そこで工学実験の時間で、PID制御の座学+演習という形態で補完する形をとっている。これまで様々な実験装置やシミュレーション環境を用いてきたが、今回導入したデジタルツイン環境で新たにシミュレーションモデルを作成して実験を行った。図-9にシミュレーションモデルを示す。1自由度の垂直駆動アームを題材として、アームを任意の角度に駆動するためのモータトルクをPID制御則によって与えるものとした。PID制御ゲインを設定して実行すると、出力のグラフが生成される

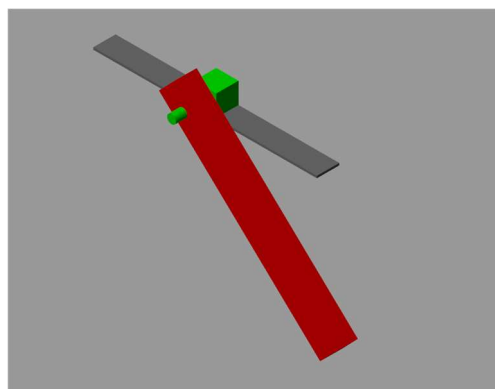


図-9 垂直駆動アームの仮想空間モデル

とともに仮想空間上のアームが動作する。各ゲインを変更したときの制御特性の変化が、グラフだけでなく物理モデルの実際の動作として再現されるため理解しやすくなっている。シミュレーションの実行プログラムは、ライブエディターという、ソースコードや入出力を対話型環境で統合したプログラムで作成した。これにより学生は、数回のマウスクリック操作のみでシミュレーション実験を進めることができるようにした。

視覚イメージを用いて動作を説明できるようになり、効率のよい実習ができるようになったと考えている。

6. メカトロニクス発展教育

図-2で示す通り、5年生では座学・実験を通じて発展的なメカトロニクス教育を行う。本章では講義、実験で構築した教育環境、および実施内容について説明する。

(1) 座学での電気工学学習機会の提供

機械工学科では従来から「メカトロニクスⅠ」という必修科目を5年生で実施して、センサやアクチュエータの基礎を学ぶこととしていた。一方、メカトロニクス技術の要素の一つである電気電子工学の学習機会は多く確保できていなかった。特に座学で電気工学を学ぶ機会は、物理系の科目以外ではなかった。学科内の議論で、電気系の学習機会が不足気味であることが課題として挙がっていた。そこで令和3年度から科目名を「メカトロニクス」に変更し、学修単位化した。そして自主学習時間を活用して、講義演習を主軸として電気電子工学の基礎力強化を図る講義を開始した。直流回路解析、交流回路解析、交流電力、さらに三相交流の基礎などを講義内容に盛り込んだ。

令和3年度および4年度と二年間実施したが、授業アンケートなどを見ると、半期科目で時間があまりない中で多くの内容を盛り込んだこともあり、学生にとってはやや負担が大きくなってしまったことが感じられた。また自主学習

を前提として課題の模範解答を与え学習環境を整えたが、「講義中に解説してほしい」という声も聞かれた。講義内容の取捨選択や、課題や定期試験のレベル設定など、今後も試行錯誤が必要であると考えている。

(2) 高度機械制御技術の体験

5年生「工学実験Ⅲ」の自動制御のテーマでは、機構・アクチュエータ・センサ・プログラム技術を融合したメカトロニクス技術の学習機会として実験を行っている。従来は、マイコンと環境センサ(気温,湿度,気圧)によるIoT環境計測システム,カメラと赤外線センサによる監視システム,台車ロボット自動走行のデモ実験などを取り上げて実験を行ってきたが,情報処理技術との融合によるより高度な機械システム制御を体験できる実験として改変することにした。Raspberry Piを使用したマイクロマウスを教材とし,LiDARによるSLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術を扱う実験を計画し,実施した。図-10に実験の様子を示す。複数毎のプラダンの仕切りを準備し,学生に自由に配置させてテストコースを作る。その後,マイクロマウス上でROSのサンプルプログラムを起動し,ゲーム패드からマウスをコース上で操作してもらう。LiDARで取得した情報はリモートPCに転送され,それを基に環境地図が生成される。実際に作成された地図を図-11に示す。

環境地図が逐次更新されていく様子を見せると学生からは感嘆の声が上がり,反応は悪くなかった。一方で,一週分2コマで実施しなければならない都合上,SLAMを実現するための具体的な理論や技術,ROSの扱い方などを説明する時間は確保が難しく,それらは概略の説明のみとして,デモ実験を試しに行ってみる,という程度の実験にとどまった。次年度に向けては,自動制御実験の内容を再構成し,実験機会を二週分確保するなどして,SLAMやROS自体の理解をより深められるような実験内容へ変更することなどを検討している。

7. 結言

本稿では「産業のデジタルイゼーション」対応型人材育成のための一貫教育カリキュラムの構築として,複数の講義科目・実験実習テーマに教材を導入,一部について実践した教育内容について報告した。現在機械工学科では,ここで紹介した取り組み以外でも,メカトロニクス教育の環境整備,改善を進めている。例えば4年生の工学実験Ⅱにおいて,教育用の卓上ロボットアームを新たに導入して,ハンド設計・制作・評価を題材としたPBL形式の実験を計画し準備している。今後も継続して教育改善に取り組み,社会ニーズに応える人材輩出を行う教育カリキュラム構築を目指したい。

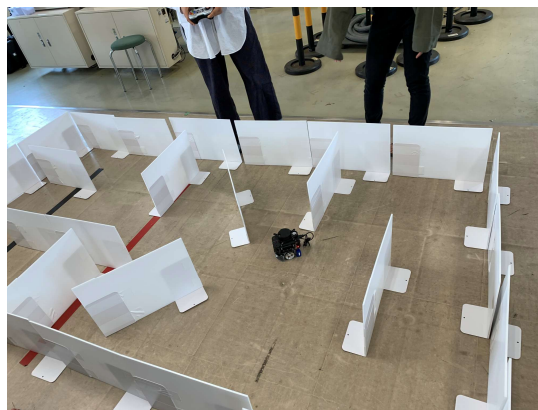


図-10 SLAM実験時の様子

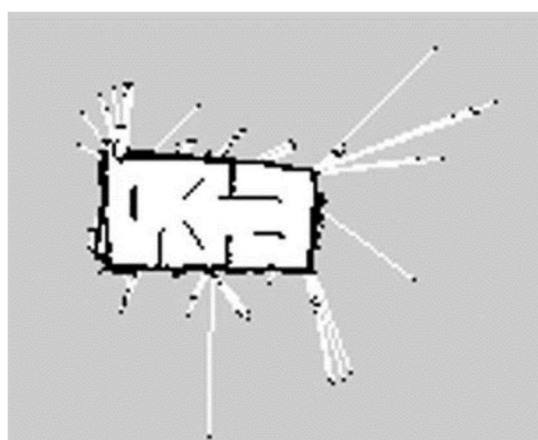


図-11 作成された環境地図

謝辞

本プロジェクトは,公益財団法人NSKメカトロニクス技術高度化財団の助成金交付(2019年度教育助成)により遂行されたものです。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高石伸一, 那賀修二, 小西忠司, 松本佳久, 菊川裕規: 創造性を伸ばすためのメカトロニクス教育(技術教育(2)), 公開研究会・講演会技術と社会の関連を巡って: 技術史から経営戦略まで:講演論文集, 2001巻, (2001).
- 2) 林 和弘, 吉本 陽子, 佐藤 遼, 鈴木 羽留香, デジタルイゼーションとイノベーション政策, 研究 技術 計画, 34, 3, pp. 270-283, (2019).
- 3) 金井 啓一, 世界の製造業におけるデータ活用のベストプラクティス, システム/制御/情報, 62, 8, pp. 328-335, (2018).

(2022.9.30受付)