5軸マシニングセンタとVBAによる実践的な学習教材

山本 通[1]・佐藤 色波[1]・須藤 優樹[1]・中谷 賢希[1]・平山 創大[1]

[1]機械工学科

文部科学省では，「AI戦略2019」に基づいた数理・データサイエンス・AIに関する教育の強化に注力しているが，統計手法やAI手法の基礎には，数学や情報学があり，初等的な数学，表計算アプリの使い方やプログラミング能力も高めておく必要がある．一方，各専門分野や専門科目でも，Society5.0の実現に向けた対応が必要である．ここで，筆者の所属する機械工学科では，様々な製品や部品の製作時に，要求される形状，強度，精度，性能やコストなどを考慮する必要がある．そのためには，各種加工法や工作機械に関して知識や経験が必要となってくる．そこで，現代のものづくり産業における工作機械の中で，主役の一つであるマシニングセンタを題材にして，初等的な数学，表計算アプリの使い方，プログラミング能力を向上させるための実践的な教材作成に取り組んだ．本稿では，それらの詳細について紹介する．

キーワード：5軸マシニングセンタ，CAD，VBA，DXF変換，BYOD，微細溝加工試験

１．緒言

Society5.0の実現に向け，自ら問題を発見し，目的に応じて解決策を発想し，人工知能・ビッグデータ・IoTなどを適切に活用して解決できる高度情報人材を多く輩出することが求められている．また，統合イノベーション戦略推進会議が策定した「AI戦略2019」では，文理を問わず全ての大学生・高専生に対して初級レベルの数理・データサイエンス・AIを習得することが掲げられた[1)]．そのため，多くの高等教育機関で「AI戦略2019」に基づいた教育の強化に注力するために，様々な研究や教材作成等が行われている[2-6)]．本校も2021年に文部科学省から「数理・データサイエンス・AI教育プログラム(リテラシーレベル)」の認定をいただき，数理・データサイエンス・AIに関する基礎的な能力向上や，それらを自らの専門分野に応用できるように教育プログラムを実施している．

一方，各専門分野や専門科目でも，Society5.0の実現に向けた対応が必要である．ここで，筆者は工作機械メーカに勤務していた経験があり，NC工作機械，特にマシニングセンタ(以下，MCと言う)に関して実務経験が豊富にある．MCは，現代のものづくりにおいて欠かせないツールであり，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，これを利用した緻密で洗練されたものづくりは我が国の得意分野の1つである．また，通常，複雑な部品等の製作で，マシニングセンタを扱うにはCAD/CAMやシミュレーションソフトの知識やスキルも必要となる．さらに，意図する精度，加工時間や加工品位を得るには，工具，加工条件，加工パス等の選択も重要で，総合的なものづくりに関する能力が必要とされる．

そのため，筆者は，マシニングセンタを題材とすれば，機械系分野でのSociety5.0の実現に向けた特徴的な教材が作成できるではないかと考えた．そこで，マシニングセンタを動作させるためのNCプログラムを半自動で出力するための実践的な情報教育，マシニングセンタでの実加工，加工結果の測定や考察までを行える教材の検討を本年度から学生とともに開始した．本稿では，それらの具体的な内容や今後，授業を行っていくうえで予想される課題について検討した．

２．5軸MCとVBA

(1) 5軸MC

5軸MCは，直進3軸と回転2軸を有することから工作物に対して任意の方向から工具を接近させることができる．そのため，リードタイムを短縮する手段として利用されたり，インペラなどの複雑形状部品の加工にも使われたりする．本校には，**図-1**に示すテーブル旋回形5軸マシニングセンタが設置されており，主に実験実習，卒業研究，特別研究等で利用されている．しかし，5軸MCを使いこなすには，かなりの知識や経験が必要なため，本校では，この工作機械を扱える学生は，ほとんどいない状況である．

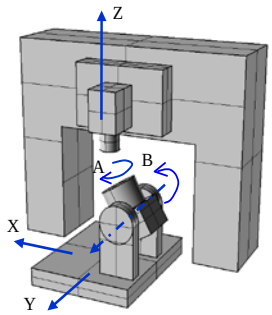


図-1　本校の 5 軸マシニングセンタ

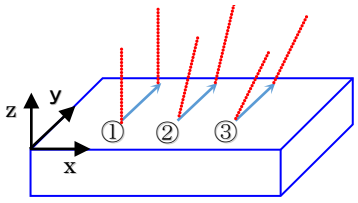


図-2　微細溝加工

(2) ExcelとVBA

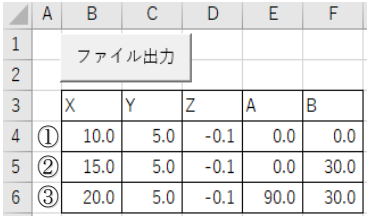
Microsoft社のExcel(以下，Excelと言う)が，代表的な表計算ソフトであることは，周知の通りで，本校でも実験データを整理したり，科学計算等に利用したりしている．一方，Excel，WordなどのOfficeアプリケーションにおいて，特定の処理を自動化するために，ユーザーはVBAと呼ばれるプログラミング言語が利用できる[7]．VBAは，比較的覚えやすくweb上の記事や入門書もとても多く，初心者向きのプログラミング言語とも言われる[8]．

本教材では，初等的な数学，表計算アプリの使い方，プログラミング能力を基礎から学べることや，Microsoft社との包括協定により本校学生が自身のPCにMicrosoft 365のインストールが可能なことから，情報教育強化ツールの1つとしてExcelが適当ではないかと考え，教材開発を行った．

3．先端点制御用NCプログラム出力

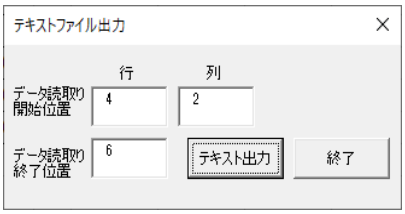
(1) 先端点制御機能と本校5軸MCの仕様

最新の5軸MCにはNCに先端点制御という機能が付加されているのが一般的である．例えば，先端点制御機能を有するテーブル旋回形5軸MCであれば，ワークをどこにセットしても同じプログラムで加工が可能となり，3軸MCを扱うのと似た操作手順で加工が行える．また，テーブル旋回形5軸MCの先端点制御用NCプログラムは，回転軸指令があっても，プログラム上はワークが回転せず工具軸が傾斜する形式(以下，ワーク座標系と言う)で出力されるため，プログラム軌跡を確認することで，どのような加工が行われるかイメージしやすい．しかし，本校に設置されている5軸MCは，導入から十数年経過しており，NCが先端点制御機能に対応していない．したがって，ワークをチャック等にセットした後，ワークや回転中心の位置を確認し，NCプログラムを作成しなければならない．



	A	B	C	D	E	F
1		ファイル出力				
2						
3		X	Y	Z	A	B
4	①	10.0	5.0	-0.1	0.0	0.0
5	②	15.0	5.0	-0.1	0.0	30.0
6	③	20.0	5.0	-0.1	90.0	30.0

(a)配布用 Excel シート



(b)フォーム

```
1 X10.0 Y10.0 Z-0.1 A0.0 B0.0↵
2 X15.0 Y10.0 Z-0.1 A0.0 B30.0↵
3 X20.0 Y10.0 Z-0.1 A90.0 B30.0↵
```

(c)出力結果

図-3　配布用 Excel シートと出力結果

```
Sub CommandButton1_Click()

Dim row1 As Integer, col1 As Integer, _
row2 As Integer
row1 = Int(TextBox1.Text)
col1 = Int(TextBox2.Text)
row2 = Int(TextBox3.Text)

Call F_OUTPUT(row1, col1, row2)

End Sub
```

```
Public Function F_OUTPUT(row1 As Integer, _
col1 As Integer, row2 As Integer)
'指定セルからのテキストデータ出力

Dim FNAME As String, path As String
Dim xx As Variant, yy As Variant, zz As Variant
Dim aa As Variant, bb As Variant

FNAME = ActiveWorkbook.path & "¥data.txt"
Open FNAME For Output As #1

For I = 1 To row2 - row1 + 1
xx = Format(Cells(row1 + I - 1, col1), "0.0")
yy = Format(Cells(row1 + I - 1, col1 + 1), "0.0")
zz = Format(Cells(row1 + I - 1, col1 + 2), "0.0")
aa = Format(Cells(row1 + I - 1, col1 + 3), "0.0")
bb = Format(Cells(row1 + I - 1, col1 + 4), "0.0")
Print #1, "X" & xx & " Y" & yy & " Z" & zz & _
" A" & aa & " B" & bb
Next

Close #1
MsgBox ("ファイル出力しました")
End Function
```

図-4　配布用 Excel シートのソースコード(抜粋)

(2) VBAによる先端点制御用NCプログラム出力

前述したように，本校の5軸MCは，先端点制御に対応していないが，この機械で加工を行う場合，最初にワーク座標系で，先端点制御用NCプログラムを作成する必要がある．加工プログラムは，**図-2**に示すように，任意の工具姿勢でボールエンドミルにより，一定の深さで3本の溝加工を行う．なお，図の点線は工具姿勢で，数字と矢印で示す線が溝加工の軌跡である．この加工はプログラムが単純で分かりやすく，加工時間も短い．また，様々な面から考察

```
O0031
G90G54
G0G43Z20.0H32
G0X0Y0
G8P1
S8000M3
G0A0.0B0.0
G0X10.0Y5.0
G0Z10.0
G1Z4.9F500
Y10.0F1600
G0Z10.0
G0A0.0B30.0
G0X15.0Y5.0
G0Z10.0
G1Z4.9F500
Y10.0F1600
G0Z10.0
G0A90.0B30.0
G0X20.0Y5.0
G0Z10.0
G1Z4.9F500
Y10.0F1600
G0Z20.0
G0Z20.0
M2
```

図-5　微細溝加工のための先端点制御用 NC プログラム

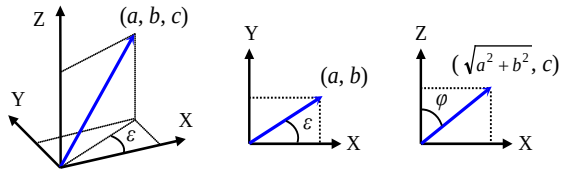


図-6　工具姿勢と AB 軸指令の関係

が可能なため，本教材では，この加工を採用した．

プログラム出力の具体的な手順は以下に示す通りで，最初に，図-3(a)に示すように，溝加工を開始する座標(x,yとz座標値)と工具姿勢(a,b指令)等が記述されたExcelシートを学生に配布する．学生は，シート内の「ファイル出力」ボタンを押し，表示される図-3(b)の「テキスト出力」ボタンを押すことで，図-3(c)に示すようにExcelのセル内の情報がテキストデータとして出力されることを体験する．その後，図-4に示すようなソースコードの説明を行い，学生にはこれをアレンジさせ，微細溝加工用NCプログラムが出力できる半自動CAMのプログラムを作成させる．例えば，R5mmボールエンドミルで，図-3(a)に示す加工開始位置と工具姿勢で，長さ5㎜の微細溝を加工するNCプログラム(ボールエンドミルの工具中心位置出力)は，図-5のようになる．これにより，VBAの基礎を復習させるとともに5軸加工時のNCプログラム作成手順を理解させる．

４．NCプログラムのDXF変換

(1) DXFフォーマット

機械系学科に所属する学生にとって，CADの知識や操作スキルも必須の修得項目である．そこで，前章で作成したNCプログラム軌跡と工具姿勢をCADで表示できる形式のデータに変換させる教材も作成し，回転変換等の基本的な数学的知識を復習しながら，VBAによるプログラミングの更なる理解を深めさせようと考えた．

なお，NCプログラムをCADで表示するためのフォーマットとしては，DXFファイルを選択した．DXFファイルは，フォーマットが公開されており，テキスト形式で比較的容易に意図するデータを作成しやすく，多くのCADがDXF形式をサポートしていることが，選択理由である．

```
Public Function NMV_TOOL(AA, BB, IJK)
Pi = 3.14159265358979
AA1 = AA * Pi / 180
BB1 = BB * Pi / 180

Select Case IJK
Case 1
NMV_TOOL = Cos(AA1) * Sin(BB1)
Case 2
NMV_TOOL = Sin(AA1) * Sin(BB1)
Case 3
NMV_TOOL = Cos(BB1)
End Select

End Function
```

図-7　AB 軸指令から工具姿勢を算出する自作関数

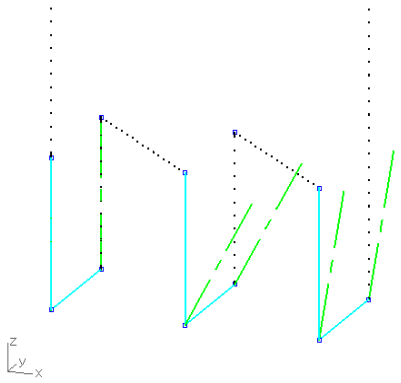


図-8　工具姿勢を付加した加工軌跡

(2) 回転軸指令から工具姿勢ベクトルの算出

工具姿勢をCAD上で，1本の線分で表現し，NCプログラムを視覚的に見せるには，図-6に示すような考え方が必要になる．つまり，本校の5軸MCで，A軸ε，B軸φの回転軸指令がNCプログラムで与えられたとすると，加工時の工具姿勢$(a,\ b,\ c)$は，以下の式(1)で算出できる．

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) \times sin(\varphi) \\ \sin(\varepsilon) \times sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

これを図-7のように関数化し，点や線をDXF出力するサブルーチンも含めて学生に配布する．その後，学生には，配布されたプログラムを活用し，NCプログラムを読取り，図-8に示すように，NCプログラムの軌跡をDXFデータ化するプログラムを作成させる．この作業には，早送り指令，切削送り指令や回転軸指令の認識をどのようにさせるかや，配布されたプログラムをどのように活用するか等，学生が自ら考えなければならない部分が多く，実践的な教材として有効ではないかと考える．

(3) DXFファイルと各種CADとの相性

本校機械工学科の授業では，主にSOLIDWORKSという名称のCADを使用している．しかし，前節で作成したDXFファイルを上記CADで開こうとすると，レイヤや線種の情報が引き継がれないことが分かった．一方，RhinocerosというCADでは，図-8に示したように，意図した通りに加工軌跡や工具姿勢の線種やレイヤが表示される．なお，図の

点線はG0：位置決め(早送り)指令，実線はG1：直線補間(切削送り)指令，一点鎖線は工具姿勢を表す．

また，最近，条件を満たせば，無料で使用できるCADとして注目されているFusion360でも，作成したDXFファイルを読み込ませたが，線種情報が引き継がれず，NCプログラムの軌跡を目視で学生に見せ，教育効果を上げるには，適当ではないという結果となった．したがって，全てのCADで確認したわけではないが，今回作成した教材は，Rhinocerosと相性が良いことが分かった．以上のように，CADにも様々な特徴がある点を理解させ，1種類のCADだけではなく，各種CADの操作性を体験させることもエンジニア育成において有効ではないかと考える．

５．非先端点制御用NCプログラム出力

(1) 5軸MCの回転中心

先端点制御機能を使用する際は，5軸MCの回転中心に関しての知識が十分でなくても加工が可能になるが，本校の5軸MCのように，そのような機能を有しない5軸MCの場合，回転中心について十分な理解が必要になる．

今回使用する5軸MCは前述したように，AB軸を有するテーブル旋回形であり，基準原点oは，**図-9**に示すように定義する．なお，**図-1**に示したように，実験に使用した加工機の回転軸のうち，360度以上回転可能な軸はC軸ではなくA軸と定義されているので，加工機の軸名称について注意されたい．一方，これらの測定方法について，本校・機械工学科所属の学生には，3年次前期・機械工作法Ⅱの授業で紹介しており，それ以降の本校機械工学科・学生であれば，比較的スムーズに内容の理解が進むと期待している．

(2) NCプログラム作成シート

図-9に示すように，ワークをセットしたとすると，基準原点oからワーク原点o'までの相対距離を**図-10**に示すシートのC3，D3とE3セルに追記し，NCプログラム出力を行う必要がある．学生には，このようなシートのイメージを説明するのみにし，作業自体は，学生らに行わせ，各自で非先端点制御用NCプログラムを出力させる．

６．実加工

(1) 微細溝加工試験

筆者らは，5軸MCの精度確認手法の1つとして，微細溝加工試験を提案している[9]．本教材で，前章までに作成したNCプログラムは，まさに微細溝加工試験用のNCプログラムとなっている．これを使って，相対工具長補正により，直方体形状のワークに対し実加工を行う．加工手順は次の通りとなる．

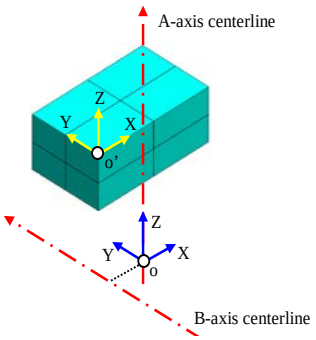


図-9　原点の定義

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		工具半径	ワーク原点			A軸中心方向ベクトル			B軸中心方向ベクトル						
2			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z		ファイル出力		
3		5	-50	-30	254.199	0	0	1	0	1	0				
4		溝長さ				A軸中心			B軸中心						
5		(Y方向)				X	Y	Z	X	Y	Z				
6		5				0	0	280	0.02	0	0				
7															
8						＊基準原点(A中心X、A中心Y、B中心Z)										
9		ワーク原点基準の座標値			A	B	基準原点からの座標値(開始点)			A軸回転後の座標値(開始点)			B軸回転後の座標値(開始点)		
10		X	Y	Z			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
11		10.0	5.0	4.9	0.0	0.0	-40.0	-25.0	259.1	-40	-25	259.099	-40	-25	259.099
12		15.0	5.0	4.9	0.0	30.0	-35.0	-25.0	259.1	-35	-25	259.099	-159.858	-25	206.876
13		20.0	5.0	4.9	90.0	30.0	-30.0	-25.0	259.1	-25	30	259.099	-151.197	30	211.876
14															
15							基準原点からの座標値(終了点)			A軸回転後の座標値(終了点)			B軸回転後の座標値(終了点)		
16							X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
17							-40.0	-20.0	259.1	-40	-20	259.099	-40.000	-20	259.099
18							-35.0	-20.0	259.1	-35	-20	259.099	-159.858	-20	206.876
19							-30.0	-20.0	259.1	-20	30	259.099	-146.867	30	214.376
20															
21															
22															
23															

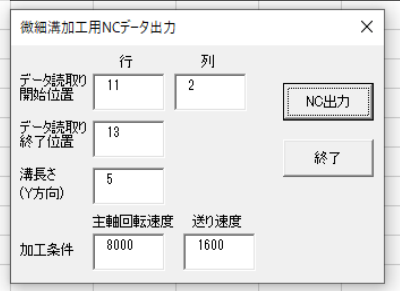


図-10　学生に作成させる Excel シート例

表-1　加工条件

Spindle speed	8000 min^{-1}
Feed rate	800 mm/min
Depth of cut	0.1mm
Tool	R5mm ball end mill (OSG 製 WXL-EBD R5×18)

1. 基準面作成のため，フライスでワーク上面を加工
2. 図-9に示す基準原点oからワーク原点o'までの相対距離を基準工具と基準ブロックにより測定
3. 前節までに作成したシートに，2で測定したパラメータを設定し，NCプログラムを作成
4. 1で製作した基準面を使って，加工に使用する工具と基準工具との相対長さを測定
5. 測定した相対長さに50を足した数値をNCの工具長補正値に設定
6. 準備したNCプログラムを起動し，シングルブロックをONにし，50mm上がった状態で意図した工具軌跡を描いているか確認
7. 6で問題がある場合は，前工程でミス等がないか確認．6が意図した通りに動作すれば，工具長補正値を元に戻し，実加工．

(2) 加工結果と考察

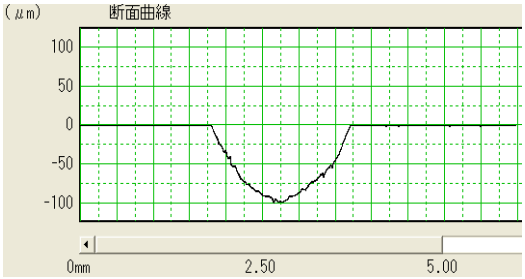
表-1に示す加工条件で，学生らとともに微細溝加工試験を行った．輪郭形状測定機による各溝の測定結果を図-11に示す．図から分かるように，100μmの加工深さで加工しているにもかかわらず，工具姿勢により，その加工深さが異なっている．これが熱変位によるものか，回転中心の設定誤差によるものか，工具の真球度によるものか等，何に起因するのか，学生に考えさせるのもこの教材の特徴の1つである．また，溝幅に関しては，機械工作法Ⅱの授業で教えている式(2)に示す理論粗さR_{th}の導出式と一致するのかについても考察が可能である．

$$R_{th} = {P^2}/{(8R)} \qquad (2)$$

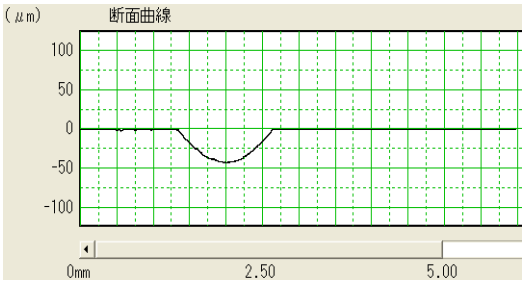
ただし，p はピックフィード，R はボールエンドミル半径である．以上のように，単純な溝加工であるが，輪郭形状測定機等で測定した深さ方向の誤差や溝幅について様々な考察が可能となる．

7．今後の予定

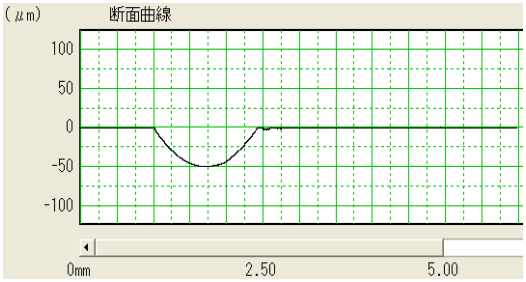
前述のように，教材のおおよその準備はでき，既に本研究室所属の学生に一部の教材を試行的に実施し，実践的な教材として使えそうな感触は得ている．しかし，これをどのように，授業に導入していくのか，この教材を実施するのにどの程度の時間が必要か，学生がどのような部分で理解に苦しむのか等，検討が十分でない部分も多々ある．まずは，全ての教材を使って，一部の学生に対し，模擬授業を行い，更なる改善等を行ってから，授業に取り入れるのが賢明かと考えている．



(a) A 軸 0 度，B 軸 0 度時の微細溝加工結果



(b) A 軸 0 度，B 軸 30 度時の微細溝加工結果



(c) A 軸 90 度，B 軸 0 度時の微細溝加工結果

図-11　実加工結果

8．結言

本稿では，機械工学科における実践的な専門教育と情報教育を行うための教材を作成し，その利用方法について検討を行った．以下に本研究で得られた成果や今後の課題等を示す．

1) 5軸MCで微細溝加工試験を行うための半自動CAMをVBAで作成する過程を学ぶ教材を作成した．

2) 微細溝加工試験用NCプログラムを視覚化するために，NCプログラムをDXF変換するための教材を作成した．また，本教材で作成したDXFデータを開くには，Rhinocerosと相性が良いことを確認した．

3) 本教材では，5軸MCによる実加工，加工領域の測定までをターゲットにしており，機械系学生に最適な教材になる

と期待できる．しかし，本稿をまとめる中で，実施や検討すべき課題も明らかになった．

4) 今回作成した教材は，社会人へのリカレント教育にも使用できると考えており，今後，その活用方法についても検討したい．

参考文献

1) 山本 章博, データサイエンス・プロセスから見るデータサイエンス・カリキュラム, 情報知識学会誌, 2021, 31, 4, pp.452-461, (2022)
2) 藤澤 修平, 吉田 秀典, 林 敏浩, 香川大学における数理・データサイエンス教育の検討, 日本科学教育学会研究会研究報告, 35, 6, pp.1-4, (2021)
3) 髙谷 将宏, 佐藤 克美, 地域企業が学生に期待する AI リテラシーについての考察, AI時代の教育論文誌, 2021, 4巻, pp. 49-54, (2022)
4) 神部 順子, 玉田 和恵, 松田 稔樹, ICT問題解決に焦点を当てた地域社会で活躍するためのAI･データサイエンス教育プログラム, 日本教育工学会研究報告集, 2022, 2, pp. 40-43, (2022)
5) 登本 洋子, 高橋 純, 表計算ソフトウェアの操作スキルの習得を目指した授業実践の成果と課題, 教育情報研究, 36, 3, pp. 37-48, (2020)
6) 平野 旭, 高専における全学的なAIスキル教育にむけた基礎分析, 工学教育, 69, 4, pp. 20-25, (2022)
7) 金城俊哉: はじめての最新 Excel VBA［決定版］Excel2019/Windows10完全対応, 秀和システム, p.12, (2020)
8) リブロワークス: スラスラ読めるExcel VBAふりがなプログラミング, インプレス, p.11, (2018)
9) 山本 通, 堤正臣: 微細溝切削による5軸制御マシニングセンタの幾何誤差推定方法の開発, 精密工学会誌, 77, 8, pp.776-780, (2011)

（2022.9.30受付）