

組み込みソフトウェア開発における 割り込み処理を学習するための教材開発

前田 洋征^{1,a)} 安武 芳紘^{1,b)} 田中 康一郎^{1,c)}

概要: 近年、組み込みソフトウェア産業の拡大に伴って、組み込み技術者の需要が高まっている。しかし、その一方で組み込み技術不足が深刻な問題になっている [1]。その原因として、組み込み開発は難しく、若い世代の技術が育たないことが挙げられる。組み込み開発には、ソフトウェア技術やハードウェア技術やフローチャートや UML といった設計技術など広範な技術や知識が必要になり、その教育は容易ではない。そこで本研究では、学部生を対象とした組み込みソフトウェア開発が学習できる教材を作成している [2]。組み込みソフトウェア開発の特徴として、自然法則、リアルタイム制御、制約条件、品質と信頼性がある。これらのうち自然法則やリアルタイム制御を学習することで、組み込みソフトウェア開発の基礎を学習する。リアルタイム制御の実現には、割り込み処理が用いられる。そこで、割り込み処理を学習することでリアルタイム制御の理解を深める。作成した教材は、実際に本学の授業へ導入し理解度を測る。

キーワード: 教材開発、組み込み、リアルタイム制御、割り込み処理、Arduino

The Teaching Materials for Learning Interrupt Control in Embedded Software Development

HIROYUK MAEDA^{1,a)} YOSHIHIRO YASUTAKE^{1,b)} KOICHIRO TANAKA^{1,c)}

Abstract: Recently, embedded systems are used in everything with essential to daily life, but numbers of developers are not enough. Because, the embedded system development is difficult and young developers is now growing. This research develops teaching materials that can learn embedded software development for undergraduate students. We considered real-time control is important to learn the basics of embedded software development. Therefore, we develop teaching materials to can be understand real-time control by learning interrupt control. This material went of evaluated from lab reports and questionnaires before done in the coursework for experimental format in 2nd year anaphase.

Keywords: teaching materials, embedded systems, interrupt, Arduino

1. はじめに

近年、組み込みシステムが広く普及しており様々な機器に利用されている。この組み込みソフトウェア産業は、年々開発規模が拡大しており組み込み技術者の需要が高まっている。しかしその一方で、組み込み技術者の不足が深刻な問題

にもなっている。なぜ、組み込み技術者が不足しているのか、それは組み込み開発の難しさにある。組み込み開発には、ソフトウェア技術だけでなく、ハードウェアや設計技術などが広範な技術や知識が必要になる。そのため技術者育成は容易ではなく、特に若い世代の技術者が育たないという現状がある。これを受けて、本研究では学部生を対象とした組み込みソフトウェア開発が学習できる教材の作成に取り組んでいる。組み込みソフトウェア開発の特徴には、NTCR 条件として自然法則、リアルタイム制御、制約条件、品質と信

¹ 九州産業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Kyushu Sangyo University

a) k12gjk03@st.kyusan-u.ac.jp

b) yasutake@is.kyusan-u.ac.jp

c) tanaka@is.kyusan-u.ac.jp

頼性がある。組み込みソフトウェア開発の基礎を学ぶ上でこれらの特徴を理解する必要があると考えた。自然法則の基礎の学習を組み込み開発の導入として学習し特に、リアルタイム制御を学習する教材を作成する。一般的な組み込み開発ではリアルタイム OS(RTOS) が広く用いられている。この RTOS を使用する前に RTOS の動作原理を学習する必要があると考えた。リアルタイム OS の入出力制御となる割り込み処理を学習することで、リアルタイム制御の基礎を理解する教材にする。割り込み処理の学習として、ポーリングと合わせて学習することで、割り込み処理の理解度を深める。作成した教材は本学のハードウェアを学習する情報回路実験 I へ導入し、理解度の評価を行う。評価方法は、アンケートとレポートで行い、評価結果を比較し、分析と考察を行う。

2. 組み込みソフトウェア開発の特徴

組み込みソフトウェア開発には、NTPCR 条件として次の 4 つが定義してある [3]。

自然法則 組み込みシステムは、論理だけでは完結しない風や光、温度といった自然界の事象を相手に動作しなければならない場合がある。一定な変化をしないアナログな値を元に安定した動作する必要がある。

リアルタイム制御 どんな組み込みシステムにも、一定の時間的制約が課せられる。規定の処理を定められた時間内に完了させることが重要である。往々にして組み込みシステムでは、即時的な動作を求められることが多くなっている。

制約条件 組み込みシステムでは、機器の最小化や企業としてのコストを抑えるために必要最低限のハードウェアやリソースで開発されることが一般的である。そのため開発する際は、プロセッサの処理能力やハードウェアの性能など限られた開発コストを考慮して開発しなければならない。

品質と信頼性 組み込み機器に、もし機器に搭載されているソフトウェアにバグが存在した場合、製品のリコールのために莫大な費用が企業に掛かり企業や製品のイメージに大きな影響が出る場合がある。また機器の誤作動で最悪の場合、人命への影響がでる場合がある。そのため組み込みシステムには高い品質と信頼性が求められる。

本研究では、組み込み開発の基礎を学習する上で、これらの特徴を理解しておく必要があると考えた。これらのうちの制約条件、品質と信頼性に関して本学では、プロジェクトベース設計演習にて学習を行っている [4]。そこで本研究ではこれらの特徴のうち、リアルタイム制御を中心に学習できる教材の作成を行う。自然法則の基礎学習ができる教材もあわせて作成する。

3. 研究の目的

本研究では、リアルタイム制御が理解できる教材を作成する。近年の組み込みシステム開発では、リアルタイム OS(RTOS) を使用した開発が広く普及している。学部生を対象にしたこの RTOS を用いた開発の前に、リアルタイム性の動作原理を学ぶ必要があると考えた。そこで RTOS の入出力制御であるポーリングや割り込み処理を学習する。まず、それぞれの処理について説明する。

- ポーリングとは、入力信号の発生を定期的に繰り返しチェックする方法である。ソフトウェアで実装できるので、簡単に実装することができる。
- 割り込み処理とは、実行中の処理を中断して、強制的にあらかじめ指定した別の処理を行うことである。割り込み処理は、CPU 外部から信号に動作するハードウェア割り込みと CPU 内部からの命令で動作するソフトウェア割り込みに分けられる。

特に割り込み処理は、リアルタイム制御の実現するために用いられる技術である。この割り込み処理だけでなくポーリングから学習することでより理解度を深める教材を作成する。

4. 教材で使用するデバイス

今回作成する教材では、マイコンボードと専用の開発環境が備わったイタリア製の Arduino を用いて作成する。本章では、Arduino について説明する。Arduino とは、次の要素から構成されている。

Arduino 基板 実験で使用している基板は、Arduino Uno(R3) (図 1) である。Arduino Uno は、Atmel 社純正の AVR マイコン Atmega328p を搭載し開発に必要な入出力ポートや USB 端子、AC 接続端子などが装備されている。入出力ポートには、デジタルピン 13 本、アナログピンが 5 本用意されている。電力の供給は、USB 経由して行うことができる。また、プログラムの書き込みもこの USB と PC を繋ぐことで行うことができる。



図 1 Arduino Uno R3

Arduino 言語 Arduino 言語とは、Arduino 開発専用の C/C++言語風の言語である。この言語の特徴は、C/C++言語の文法は記述できることに加えて開発

に便利なライブラリが備わっているため、プログラミング初心者にも簡単にプログラミングが可能になっている。

Arduino IDE Arduino IDE (図 2) は、Arduino 専用の統合開発環境である。開発の際に必要な、エディタ、ファイルの保存、コンパイル、マイコンへの書き込みなどを行うことができる。また、Arduino と PC を通信して受け取ったデータを Arduino IDE のシリアルモニタへ表示することもできる。

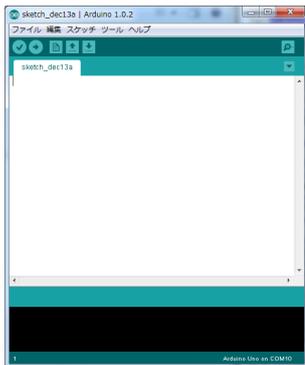


図 2 ArduinoIDE

Arduino を用いて、センサや出力デバイスを組み合わせた回路を開発する教材を作成する。

- センサとしてタクトスイッチ、光センサ、可変抵抗器、距離センサ、圧電スピーカを使用する。
- 出力デバイスとして LED、フルカラー LED、7 セグメント LED、圧電スピーカを使用する。

4.1 Arduino におけるポーリングと割り込み処理の実現

● ポーリングの実現

Arduino 言語では、通常の処理は、loop 関数に記述する。この関数内に処理を記述することで、繰り返し処理が実行される。そのため、以下の関数を利用し指定したピンの状態を繰り返し読み取ることができる。

- digitalRead(pin) では指定したピンの状態を 0 か 1 で読み取ることができる。
- analogRead(pin) では、指定したピンの状態を 0 1023 の範囲で読み取ることができる。

● 外部割り込み処理の実現

外部割り込み処理とは、Arduino 外部からの入力信号をトリガに別の処理を実行できる処理のことである。スイッチなどの入力をトリガとすることができる。Arduino では、この外部割り込み処理が標準のライブラリを使用することで実現することができる。

- attachInterrupt(interrupt, function, mode)
interrupt : 割り込み番号 0 または 1 を記述する
function : 割り込み発生時に呼び出す関数名を記述する

mode : 割り込みを発生させるトリガを次の中から選択する

LOW : ピンが LOW の時に発生する

CHANGE : ピンの状態が LOW から HIGH もしくは、HIGH から LOW へ変化した時に発生する。

RISING : ピンの状態が LOW から HIGH に変化した時に発生する。

FALLING : ピンの状態が HIGH になら LOW に変化した時に発生する。

5. 教材を導入する本学の科目

本学には、ハードウェア設計を実験形式で学習する科目として情報回路実験 I がある。この科目では、IC トレーナーを用いて IC 実験、CAD ソフトを用いた CAD 実験、Arduino を用いた組み込み実験の 3 つの実験を学習を行っている。各実験の最後には、統一のシステムをそれぞれの実装手法で作成し、それぞれの実装手法のコストを比較することで各実装手法の理解を深める。今回、作成した教材は組み込み実験へ新たに導入する。組み込み実験には全 4 コマ割り当てられている。そこで、この 4 コマを次のような内容を学習する。

表 1 2013 年度 情報回路実験 I 組み込み内容

講義回数	内容
1	導入・自然法則の学習
2	割り込み処理・ポーリングを学習
3	割り込み処理・ポーリングの使い分けを学習
4	情報回路実験 I の統一課題

6. 自然法則を学習する教材

組み込み開発における自然法則とは、自然界の事象を扱うことである。温度などの自然界からの事象をセンサで取得し扱う必要がある。これらの事象はアナログな値であるため、安定しないアナログ入力を元に安定した出力を行うシステムを作成する教材とする。

今回は、距離センサを用いたシステムを作成する。作成するシステムの概要は、距離センサから障害物との距離が 20cm 以上のとき、デバイスを出力させるものとする。

(1) 手順 1 センサで取得した値をグラフにする

5cm から 30cm の間で 5cm 毎に物体を遠くしていき、各距離でどのような値が取得できるか測定する。各値は精度を高めるために 10 個以上の値を取り平均を出す。各距離とアナログ値の関係をグラフに表す。

(2) 手順 2 閾値を設定の設定とアクチュエータの出力

物体との距離が 20cm の時に出力として 1 つのアクチュエータを動作させる。そのために、ステップ 1 で作成したグラフを元に閾値を決定する。その際、取得

したアナログ値から距離へ変換するようなプログラムは省略し、取得するアナログ値をそのまま閾値とする。出力に使用するアクチュエータは、LED、圧電スピーカ、フルカラーLED、振動モータ、7セグメントLEDの中から学生が選択できるものとし、課題としての自由度をもたせた。

距離センサから取得される値を変化をグラフに表すことで、距離の変化が一定でも取得する値の変化が一定ではないことを理解することができる。また、値を測定する上で値が安定しないことやデバイスによって個体差があることを理解することができる。入力の値は安定しないが、基準を設けて安定して出力させることの基礎を学習する。ここでは一例として、LEDを点灯させるプログラムのフローチャートを図3に示す。

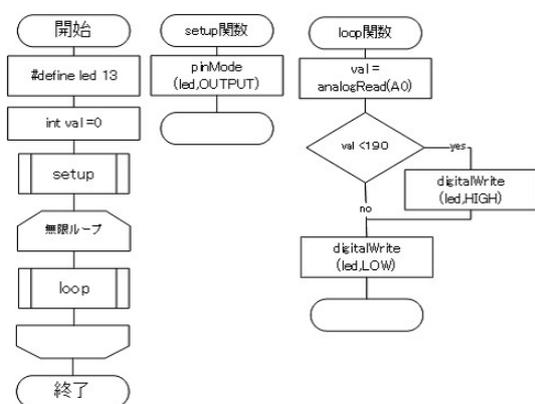


図3 距離センサを制御するプログラム

6.1 ポーリングと割り込み処理を学習教材

(1) ポーリングと外部割り込み処理学習のための導入課題

- 本課題の目的：同一の動作仕様をポーリング、外部割り込み処理で実装する。課題の作成を通して、Arduinoにおけるそれぞれの処理の実現方法を学習し処理の内容を理解する。そして作成した課題を実際に動かし動作の違いを確認、処理の違いを理解する。
- 動作仕様：スイッチによりLEDの光量を5段階に変化させる。
光量の変化にはPWM制御を用いる。
- 入力仕様：スイッチの押された回数をポーリングもしくは外部割り込み処理で変数を加算する。
- 出力仕様：変数の値に応じて、光量を変化させる。
- 配布資料：学生に学習させたいポーリング、外部割り込み処理についてよく考えて貰うために、出力に係る部分についてフローチャートにして配布した。そのため、PWM制御やチャタリング対策について学生は考える必要がないようになっている。
- 動作確認：以下の手順で作成した課題の動作を確認

する。

- (a) 動作確認の内容は、スイッチを1回ずつ押した場合と押しっぱなしにした場合の2パターン行い、実装手法による動作の違いを確認する。
- (b) ポーリングでは1回ずつ押した場合では、1回の光量の変化に遅延が生じてしまう。また押しっぱなしにした場合では、スイッチの入力を繰り返しチェックしているため、次第に光量が増える。以上の動作確認によって、入力のチェックを繰り返し行っていることやそのままの実装では遅延が発生してしまうことを理解する。
- (c) 外部割り込み処理で実装では、スイッチを1回ずつ押した場合では、光量を遅延なく即時的に変化させることができる。また押しっぱなしにした場合では、トリガの発生時にしか光量は変化しないため、押しっぱなしにしても1回分しか光量は変化しない。以上の動作確認によって、割り込み処理を用いることでリアルタイム制御の即時的な動作を実現できることを理解する。

- 模範解答：本課題の模範解答として、ポーリングと割り込み処理で実装した際のフローチャートを図4と図5に記す。

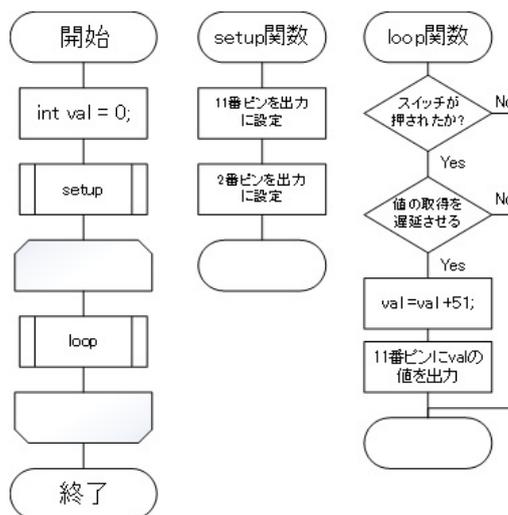


図4 ポーリングで実装

(2) ポーリングと割り込み処理学習のための発展課題1

- 本課題の目的：通常処理を増やしポーリング、外部割り込み処理の実装を行う。入力とは関係ない出力を増やす。通常処理が増えた中で入力に対して即時的に出力を行うためには、どうすれば良いか考える。
- 動作仕様：圧電スピーカからメロディーを鳴らしながら、スイッチが押された時LEDを点灯させる
- 入力仕様：スイッチの入力をポーリングもしくは外

部割込み処理で検知する

- 出力仕様：メロディーを繰り返し鳴らす。LED を点灯させる。
- 配布資料：メロディーを鳴らすための関数やその実用方法に関するプログラムは配布し、ポーリングと割込み処理についてのみ学生が考えるようにした。
- 実験手順：以下の手順で課題の作成に取り組む。
 - (a) メロディーを鳴らすプログラムの作成：圧電スピーカから音を鳴らすためのプログラムを作成する。鳴らすメロディーは「ドレミファソラシド」を 300ms ごとに繰り返し鳴らすようにする。
 - (b) スwitchの入力検知プログラムの作成：スウィッチの入力信号の検知として、ポーリング、外部割込み処理どちらで実装した方が良いか学生は考える。
 - (c) 動作確認：本課題をポーリングで実装した場合、メロディーを鳴らしながらスウィッチの入力信号のチェックを行うため、LED を点灯させるのに遅延が生じてしまう。外部割込み処理で実装した場合は、スウィッチの入力に対して遅延なく即時的に LED を点灯させることができる。
- 模範解答：本課題の模範解答として、フローチャートを図 6 に示す。

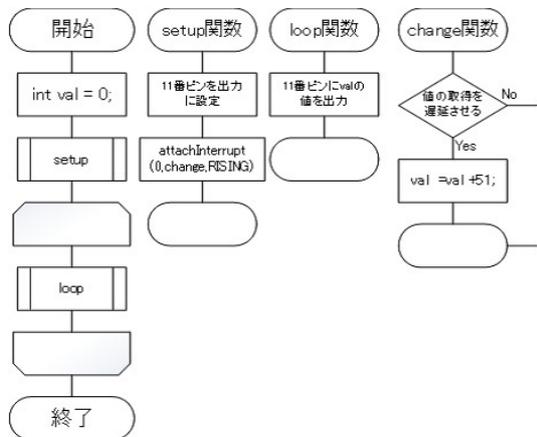


図 5 割込み処理で実装

(3) ポーリングと割込み処理学習のための発展課題 2

- 本課題の目的：入力仕様をスウィッチと可変抵抗器の 2 つに増やし、それぞれの入力に対してポーリングと外部割込み処理を用いて実装を行う。本課題を通して、ポーリングと外部割込み処理の使い分けを理解する。
- 動作仕様：スウィッチの押された回数に応じて、フルカラー LED の光り方を変える (3 パターン)。可変抵抗器のアナログ値に応じて、点滅する速さを変える (3 パターン)。
- 入力仕様：スウィッチの入力を外部割込み処理で行う。

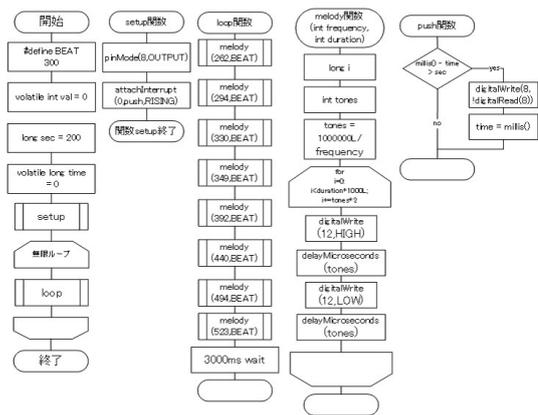


図 6 メロディーを鳴らしながらスウィッチで LED を点灯させるプログラム

可変抵抗器 (0~1023 の範囲) の値をポーリングでチェックする。

- 出力仕様：スウィッチの押された回数が 0 回目赤が点灯、1 回目青が点灯、2 回目緑が点灯するようにする。可変抵抗器に値に応じて、2000ms で点滅、1000ms で点滅、500ms で点滅といったように 3 パターンの点滅を行う。
- 実験手順：以下の手順で課題の作成に取り組む。
 - (a) フルカラー LED の光り方を変えるプログラムの作成：スウィッチの入力に対する処理を外部割込み処理で実装し、点灯する色が変わるようにプログラムを記述する。
 - (b) フルカラー LED の点滅速度を変えるプログラムの作成：可変抵抗器から得られる値をポーリングで検知する。得られる値である 0 1023 から閾値を 2 つ設定し値に応じて点滅するパターンが変わるプログラムを記述する。
- 模範解答：本課題の模範解答として、図 7 にフローチャートを示す。

7. 評価

作成した教材の評価の行う。評価の方法として、実験後に実施したアンケートとレポートに用いて行う。ここではまず、それぞれの評価方法について説明する。

- アンケート：アンケートは、全ての課題を作成した学生を対象に実施した。このアンケートでは、今回学生へ理解させたかった「ポーリング」「割込み処理」「リアルタイム制御」に関する質問を設けた。学生は、4：よくできた 3：少しできた 2：あまりできてない 1：全くできてない、の 4 つの答えから 1 つを選択する。このアンケートでは、122 人の学生から解答を得ることができた。
- レポート：レポートでは、今回作成した課題に対する設問を設け、自由記述形式で答えさせた。このレポー

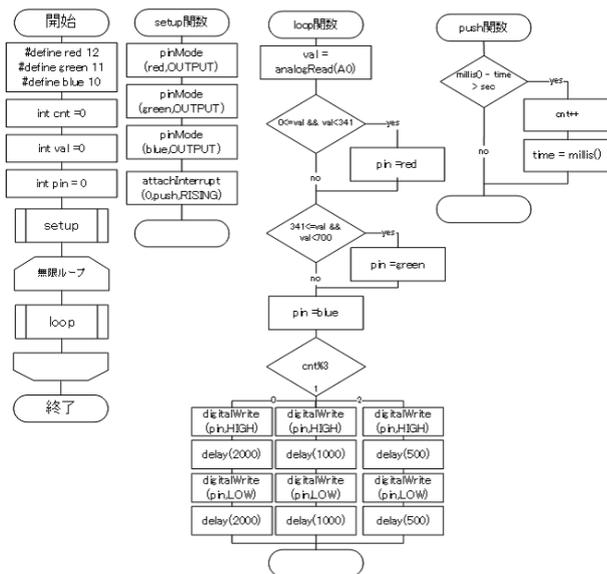


図 7 フルカラー LED を制御するプログラム

トで今回作成した課題で、学生達にどのようなことを理解させることができるかを測る。このレポートでは、101 人の学生から解答を得ることができた。

次からアンケートによる評価結果から説明する。

問 (1) ポーリング (入力信号を繰り返しチェックする) を理解できましたか?

問 (2) 外部割り込み (入力信号の発生時に通常処理を中断して、別の処理を呼び出し実行する) を理解できましたか?

問 (3) 割り込みを用いることで即時性に優れた (入力の変化に短い時間に対応して動作する) システムが実現できることを理解できましたか?

以上の質問を設け、「ポーリング」「割り込み処理」「リアルタイム制御」に関する理解度を調査した。調査の結果が図 8 になる。

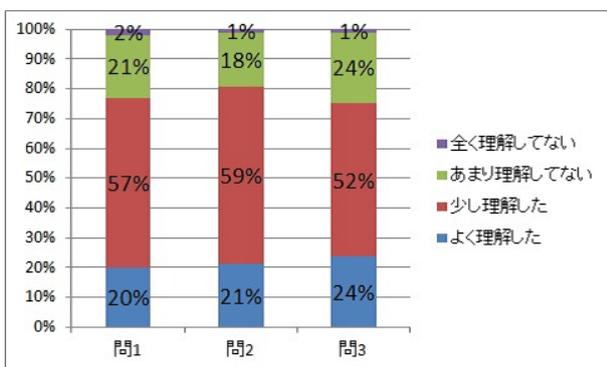


図 8 アンケート集計結果

どの結果も、理解したと答えた学生の割合が、70%を超えている。本研究の目的は、達成できたと考える。

続いて、レポートの評価結果について述べる。レポートでは、「ポーリングと割り込み学習の発展課題 2」の内容に関

する設問になっている。各設問に対する解答を以下で説明する。

問 (1) この課題の作成の際に可変抵抗器の入力確認をポーリングで実装した理由を述べよ。

この設問で得られた解答の種類の割合は以下ようになった。

- 可変抵抗器から取得される値はアナログ値であるため、繰り返し入力チェックを行うポーリングを選択した。
 - 38%
- 可変抵抗器から取得される値はアナログ値であるため、割り込み処理の発生のトリガにできないためポーリングを選択した。
 - 10%
- ポーリングで実装する方が記述が容易だと考えたから。
 - 6%
- その他 (無回答、テキスト内容のコピーなど)
 - 21%

ポーリングの処理内容を意識して解答した学生は、約半数の 48% となった。

問 (2) この課題の作成の際にスイッチの入力確認を割り込み処理で実装した理由を述べよ。この設問で得られた解答の種類の割合は以下ようになった。

- 即時的な処理が可能となるため。
 - 22%
- スイッチの入力があった時だけ、処理すれば CPU の無駄にならないため。
 - 12%
- 割り込み処理で実装する方が記述が容易だと考えたから。
 - 5%
- その他 (無回答、テキスト内容のコピーなど)
 - 19%

問 (3) 割り込み処理で実装するのに適している場合を述べよ。

- 即時的な処理を実現した場合に割り込み処理を用いる。
 - 23%
- CPU の無駄にならない処理を実現した場合に割り込み処理を用いる。
 - 8%
- 複数の処理を同時に行いたい場合に割り込み処理を用いる。
 - 12%
- 優先度の高い処理を行いたい場合に割り込み処理を用いる。
 - 11%
- その他 (無回答、テキスト内容のコピーなど)

– 45%

割込み処理の内容を意識して解答した学生は、約半数の55%となった。今回の課題は、リアルタイム制御の即時性をメインで学習できる教材としていたが、その他の並行動作や優先度についても理解した学生がいることが判明した。

8. おわりに

本研究では、学部生を対象に組込みソフトウェア開発の特徴であるリアルタイム制御に着目し教材を作成した。対象しているのが学部生のためRTOSは使用せず、割込み処理とポーリングの動作や処理の違いが理解できるような教材を作成した。作成した教材は、本学の情報回路実験Ⅰの組込み実験へ導入した。実験後は、アンケートとレポートで理解度の評価を行った。アンケートの評価結果では、「ポーリング」「割込み処理」「リアルタイム制御」に関する理解度を7割超えることができた。

9. 今後の課題

現状の問題点として、演習時間がかかりすぎていることがあげられる。そこで、学生が短い手順で課題に取り組み学習させたい内容が、しっかり身につけられるように改良が必要である。もう一つの課題として、テキスト内容を充実されることが挙げられる。今回作成したテキストでは、学生が取り組む課題内容や取り組む手順を載せていた。また、Arduinoに関して初心者の学生のために、開発に必要なArづIの言語の説明やArduinoIDEの使用法、配線方法について解説を行っていた。しかし、これだけの情報では、switch文や関数の使い方など、C言語の文法に関する知識がまだ十分ではない学生が多くいることが判明した。そこで、C言語の基本文法を解説するページを新たに追加することが必要である。

最終的な目標として、組込み系企業の抱える問題の技術者不足に貢献するために、学生達に組込み開発に興味を持ってもらえる教材を作成していきたいと考えている。

参考文献

- [1] 経済産業省：2010年版組込みソフトウェア産業実態調査報告書(2010年度).
- [2] 前田洋征：組込みソフトウェア開発におけるリアルタイム性を考慮したI/O制御を学習するための教材開発,九州産業大学大学院情報科学研究科情報科学専攻(2014).
- [3] Design WaveMagazine 編集部編：組み込みソフトウェア開発スタートアップ ITエンジニアのための組み込み技術入門, CQ出版社(2005年).
- [4] 稲永健太郎：「プロジェクトベース設計演習」(社)情報処理学会情報システム教育コンテストISECON2011”審査委員特別賞”を受賞,九州産業大学情報学会誌, Vol. 11, No. 1, pp. 9–14(2012).