

組み込みデバイス Arduino を用いた 割り込み制御を学習するための教材開発

樋渡 良介^{1,a)} 安武 芳紘^{1,b)} 田中 康一郎^{1,c)}

概要：近年、組み込みシステムはあらゆるものに使用され、日々の生活に欠かせないものとなっているが、開発者の数が足りていない。その原因は、組み込みシステム開発が難しく、若い世代の開発者が育たないからである。本研究は、九州産業大学情報科学部（本学部）で行われている組み込み教育を調査することから始めた。その結果、並行動作やリアルタイム処理に関する学習が不十分だと分かった。そこで、これら不十分な学習項目を学ぶための教材開発を目標とする。作成した教材は、Arduino を用いてスイッチからの外部割り込みと、タイマ割り込みを使った割り込みを学習する教材とした。この教材を 2 年次後期で行う実験形式の授業で行い、実験レポートとアンケートから評価を行った。

キーワード：教材、組み込みシステム、割り込み、Arduino

The Teaching Materials for Learning Interrupt Control with the Embedded Device Arduino

RYOSUKE HIWATASHI^{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. Its cause, embedded system development is difficult and developer of the younger generation is not growing. This research began by investigating the embedded training being conducted at the faculty of Information science, Kyushu Sangyo University. As a result, I turned out to be insufficient of learning about the real-time processing and concurrent operation. Therefore, the target to develop materials to learn these inadequate learns. Created teaching materials learn the interrupt used attach interrupt from the switch and timer interrupt. 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、組み込みシステムはあらゆるものに使用され、日々の生活に欠かせないものとなっている。そのような組み込みシステムだが、システム開発者の需要が増える中、開発者が足りておらず供給が追いついていない。開発者が不足している理由は、組み込みシステムの開発が難しく、若い世代

の技術者が育たないからである。また、組み込みシステムは基本的にメーカーが作成し、自社の技術を外部へ出すことが不可能なため、企業に就職してから勉強を始めることが多いためである。よって、教育機関でも行うことが可能なことは、一般的なセンサやアクチュエータを組み合わせる動作を確認するといった基本的な部分である。

そこで、九州産業大学情報科学部（本学部）で行なっている組み込み教育について、組み込みシステムの開発に必要な能力や企業が求めている組み込み開発者としての能力を学習できているかを調べ、教育機関として社会が求める教育が

¹ 九州産業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Kyushu Sangyo University
^{a)} k11gjk06@st.kyusan-u.ac.jp
^{b)} yasutake@is.kyusan-u.ac.jp
^{c)} tanaka@is.kyusan-u.ac.jp

行えているか調べた。その結果、組込みに必要な、自然法則に関する項目や品質や信頼性に関する項目について、ある程度カバーすることはできていたが、リアルタイム処理に関する項目が不十分であることが分かった。リアルタイム処理を学ぶ科目として、本学の授業にマルチタスクを使用して、システムを開発する演習がある。この授業を受けている学生は、並行動作がわからず、設計や実装に多くの時間を必要としている。

本研究は、並行動作やリアルタイム処理を学ぶ方法として割り込み処理を使用した学習方法を考え、実際に教材を作成し評価を行うことを目標とする。

現在、学科再編に伴うカリキュラムの変更により、本学部では平成 22 年度から情報回路実験 I に組込みのテーマを導入し、開発者育成に取り組んでいる [1]。今回作成する教材はこの情報回路実験 I 内の組込み実験で使用する。この実験で割り込みを学習するために、外部割り込みとタイマ割り込みについて学習が可能な教材を作成する。作成した教材は実際に授業で使用し評価をする。評価方法はレポートの設問と、アンケートから行う。この結果をまとめ、考察を行うことにより、教育効果を検証する。

2. 組込みシステム開発者の現状

近年、組込みシステム技術者は需要に対して供給が追いついていない。組込みソフトウェア産業実態調査報告書 [2] によると、2007 年で約 10 万人、2008 年で約 9 万人、2009 年で約 7 万人の人材不足が出ている。2010 年以降の調査では明らかな数字は書かれていないが、この調子で減少が続けば 2012 年は約 3 万人の人材不足だろう。年々不足が減少傾向になっているが、まだまだ追いついていないことが明らかである。

では、なぜ人材不足が続いているのか。それは、組込みシステム開発の特徴 (NTCR) である以下の 4 点が難しいと言われているため、若い技術者が育たないからである。

- (1) 自然法則 (Nature) : 自然現象などを人間や機会が扱いやすい信号に変換する。
- (2) リアルタイム要求 (Time) : 組込みシステムにはリアルタイム性が求められるものが多い。
- (3) リソースの制約条件 (Constrain) : 限られた条件のもと、システムを開発しなければならない。
- (4) 高い品質と信頼性 (Reliability) : 製品に組み込まれて世に出回るため、バグや誤作動が起きると多大な損害のもととなる。

2.1 企業から見た求められる能力

社団法人組込みシステム技術協会が行った調査 [3] に、新入社員に求める技術知識アンケートがある。以下の項目ごとに求められる能力を記す。

- プログラム言語のスキル : C 言語 55 %、C++ 20 %、

Java 12 % である。

- 設計知識 : フローチャート 32 %、状態遷移図 16 %、状態遷移表 16 %、シーケンス図 16 % である。
- パーソナルスキル : コミュニケーション 62 %、プレゼンテーション 21 %、ネゴシエーション 17 % である。

3. 本学部での組込み教育

本学部で行なっている授業の内、NTCR について学習が可能な授業を以下に紹介する。

- 情報回路実験 I (2 年後期) : この実験では市販の IC を組み合わせた実験と、CAD ソフトを使用した実験、Arduino を使用した組込み実験の 3 つの実験を行なっている。組込み実験は、様々なデバイスを組み合わせた実験を行なっている。実験内容は、設計から考えてもらうため、用意した入出力デバイスの内、好きなように組み合わせて自分だけのシステムを作成する実験である。この授業は NTCR の内 NC について学習が可能である。
- 情報回路実験 II (3 年前期) : この実験の前半部分は情報回路実験 I のように 3 つの実験を行い、後半部分では、モデル計算機 KERNEL のシステム設計及び、実装を Verilog 言語を用いて行なっている。この組込み実験でも使用機材は情報回路実験 I と同じだが、実験内容は他の制御との比較をするため、IC と CAD と組込みそれぞれで、同じ仕様のシステムを作成している。この授業は NTCR の内 NC について学習が可能である。
- プロジェクトベース設計演習 [4] (3 年後期) : この演習は、システム開発プロジェクトについて学習を行なっている。開発は Web システムと組込みがある。組み込み開発は、マインドストーム NXT を C 言語で実装し、マルチタスクを使用した設計を用いて開発を行なっている。あくまで、プロジェクトについて学習しているが、この授業では NTCR 全てについて学習が可能である。

4. 研究の目的

前章で NTCR について学習が可能な授業について述べた。その中のプロジェクトベース設計演習は、マルチタスクを使用して設計し、リアルタイム制御の学習が可能である。しかし、プロジェクトを学ぶことが第一のため、学生のほとんどがマルチタスクの動作である並行動作やリアルタイム要求を理解していない状態から演習を始めている。この授業を受講する前に並行動作やリアルタイム要求を実際に使用したシステムを作成する授業は本学部にはない。そこで、これらを学習するために割り込み処理を使用した教材の開発を行う。割り込み処理は通常処理と割り込み処理という最小のタスクで並行動作を行うことができ、タイマ割り込み

を使用することでリアルタイム要求についても学習が可能である。

5. 割込みを使った組み込み教育

今回作成した教材は、情報回路実験Ⅰにて課題として実施した。実施するに辺り、情報回路実験Ⅰの開発環境について説明する。

- Arduino Uno：図1はArduino Unoであり、マイコン搭載の基板である。Arduino Unoはデジタルピン14個、アナログピン6個、電源周りのGNDや5Vのピンが備わっている。電源供給はUSB接続、もしくはACアダプタで行うことができる。Arduino Unoへのプログラム転送はUSB接続で可能である。図左上の赤いボタンはArduinoへ転送されたプログラムを初期化するボタンである。
- Arduino IDE：図2はArduino IDEであり、Arduino用の統合開発環境である。このIDEでプログラムを記述し、言語はArduino言語を使用する。
- Fritzing：図3はFritzingであり、配線図を簡単に書くことができるツールである。このツールを使用して配線図を記述する。
- 入力デバイス：入力デバイスには、タクトスイッチ、光センサ、可変抵抗器、距離センサ、3軸加速度センサ、圧電スピーカを使用する。
- 出力デバイス：出力デバイスにはLED、7セグメントLED、圧電スピーカを使用する。

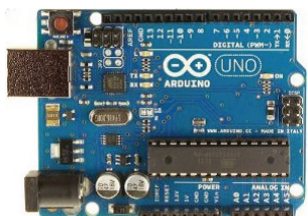


図1 Arduino Uno

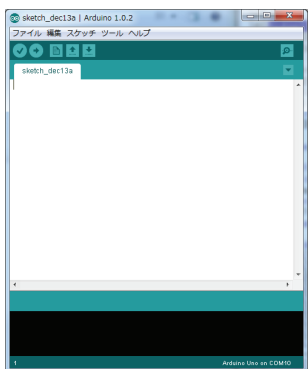


図2 Arduino IDE

今回割込みを使用して行う課題は始めて導入するため、学

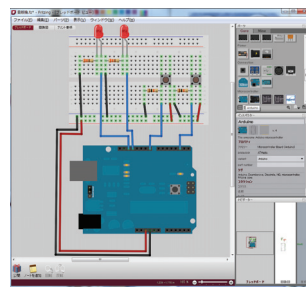


図3 Fritzing

生がどの程度理解できるか把握できなかった。そこで、この授業は3クラスに分かれて実験を行なっているため、作成した課題もクラスごとに違う課題を作成した。通常処理と割込み処理とともにそれぞれの課題について述べる。また、実施した順番に記す。

(1) スイッチによる外部割込みを使用した課題

- 通常処理：変数の値をLEDに出力する。
- 割込み処理：スイッチを押すたびに変数を加算する
- 動作仕様：LEDの光量は5段階に変化する。
光量の変化にはPWM制御を用いる
- 実験手順：以下の手順で実験を行う。

- (a) PWM制御を使用したプログラムの作成：まずはPWM制御を理解するために、簡単な動作を実行する。プログラム内容は、LEDの光量を次第に増やすものである。
- (b) LEDの光量をスイッチからの入力で変化させるプログラムの作成：次に、自動で変化していたLEDの光量をスイッチ入力によって切り替えられるように変更する。光量の変化は5段階とする。
- (c) スイッチからの入力に外部割込みを適用したプログラムの作成：最後に、チャタリング対策を行った上でスイッチ入力を外部割込みに変更したプログラムを作成する。

- 完成図：以下に課題の模範解答として図4の配線図と図5のフローチャートを記す。

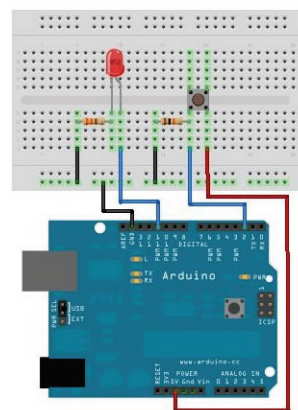


図4 スイッチによる外部割込み課題の配線図

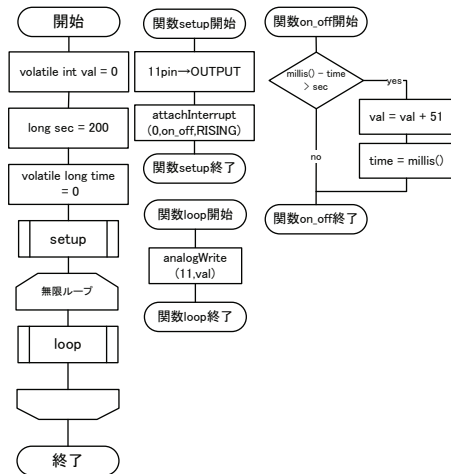


図 5 スイッチによる外部割込み課題のフローチャート

(2) タイマ割込みを使用した課題

- 通常処理：ドレミファソラシドを鳴らす。
- 割込み処理：1秒に1カウントアップするタイムカウンタ。
- 動作仕様：各音は300msずつ鳴らす。
高いドを鳴らし終わると3秒後にループする。
- 実験手順：以下の手順で実験を行う。

(a) 圧電スピーカを使用したプログラムの作成：圧電スピーカから音を鳴らすプログラムを作成する。鳴らす音は「ドレミファソラシド」を各300msごととする。なお、高い「ド」がなった後は3000ms後にループし繰り返す。タイマ割込みを使用する場合 MsTimer2 ライブラリを使用する必要がある。このライブラリを使用すると Arduino 標準で使用出来る tone 関数（音を鳴らすための関数）を使用することができない。よって、今回は別の方法で音を鳴らしている。

(b) タイムカウンタを追加する：タイマ割込みを使用して、1秒に1カウントアップするタイムカウンタを追加する。この時、1カウントするごとにシリアルモニタに現在の数値を表示し、正しく動作できているか確認を行う。

- 完成図：以下に課題の模範解答として図6の配線図と図7のフローチャートを記す。

(3) スイッチによる外部割込みとタイマ割込み（以降：2つの割込み）を使用した課題

- 通常処理：ドレミファソラシドを鳴らす。
- 割込み処理：スイッチからの割込み：LEDの点灯／消灯。
タイマ割込み：タイムカウンタ。
- 動作仕様：タイマ割込みを使用した課題と同じ。
- 実験手順：以下の手順で実験を行う。

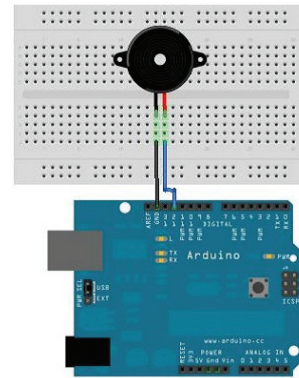


図 6 タイマ割込み課題の配線図

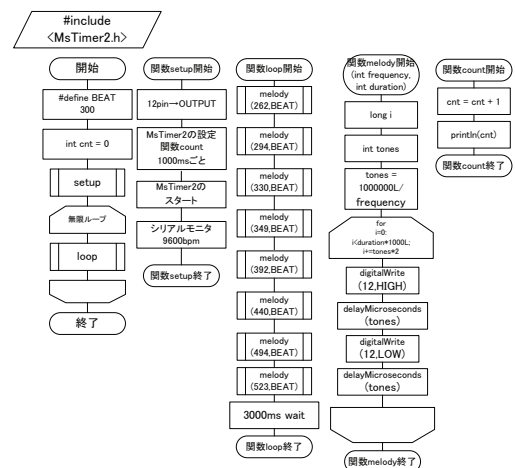


図 7 タイマ割込み課題のフローチャート

- (a) 圧電スピーカを使用したプログラムの作成：タイマ割込み課題と同様の動作を行う。
- (b) 好きなタイミングで LED の点灯/消灯を切り替えるプログラムを追加する：スイッチからの外部割込みを使用し、LED の切り替えが行えるプログラムを作成する。
- (c) タイムカウンタを追加する：タイマ割込み課題と同様の動作を行う。

- 完成図：以下に課題の模範解答として図8の配線図と図9のフローチャートを記す。

6. 評価

作成した教材を評価する。評価の方法は以下の2つであり、同時に評価結果について以下で説明する。

- (1) レポート：情報回路実験Ⅰには定期試験が無く、課題ごとに学生はレポートを提出して単位を取得する。このレポートに設問を設け、学生の理解度を図る。なお、設問にはそれぞれの課題で異なる問題を設ける。正解不正解についてはキーワードを設け、正しく使用されている場合のみ正解とする。また、キーワードはそれぞれ2つ設け、1つでも使用し回答できていれば理解していると考えられる。

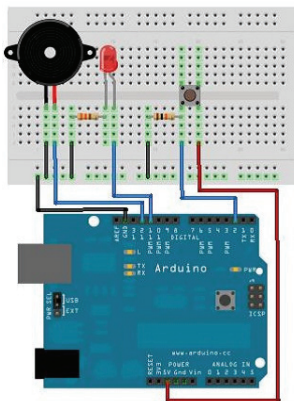


図 8 2つの割込み課題の配線図

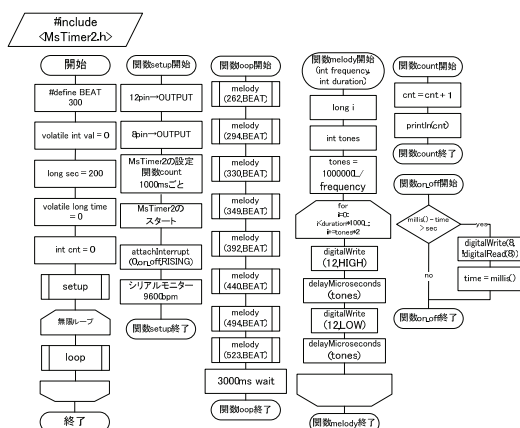


図 9 2つの割込み課題のフローチャート

- スイッチによる外部割込みを使用した課題：割込みを使用した場合と、使用しない場合の動作の違いを考える設問を設けた。解答例やキーワード、評価結果は以下の通りである。
 - － 解答例：ポーリング処理を行なっているため、スイッチの入力後は delay 関数でプログラムを止める必要がある。そのため、連続入力を行う場合は 2 度目以降の入力を受け付けられない場合がある。また、delay 関数でプログラムを止めているため、実際に動作が行われるのは指定した時間後となり、遅延が起きてしまう。
 - － キーワード：連続入力、遅延
 - － 評価結果：結果は図 10 であり、キーワードを 1 つ以上使用して正解した人数は 9 割を超えている。これは、実験順序に影響があると考え。実験順序はまず、通常処理のみで課題を作成し、動作が不完全なものを確認した後、割込み処理に変更し実験を行ったからだと思われる。
- タイマ割込みを使用した課題：タイマ割込みを使用せずに今回のプログラムを作成するとどんな不具合が生じるか考える設問を設けた。解答例やキーワード、評価結果は以下の通りである。

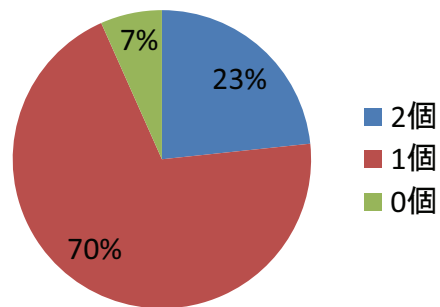


図 10 スイッチによる外部割込みを使用した課題の設問回答グラフ

- － 解答例：タイマ割込みを使用しない場合は通常処理と同時に記述する必要がある。しかし各音は 300ms ずつ鳴らしているため、1 秒に 1 回という正確な時間にカウントアップすることが難しい。また、高い「ド」を鳴らし終わると 3 秒間 delay 関数でプログラムを止めるため、自動的に 3 秒はカウントアップすることができない。
- － キーワード：正確な時間、delay (待ち)
- － 評価結果：結果は図 11 であり、キーワードを 1 つ以上使用して正解した人数は 7 割を超えている。よって、この課題を行ったクラスは概ね理解できていたと判断する。

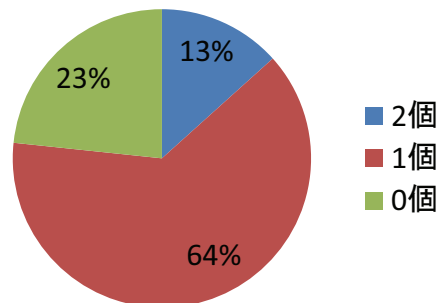


図 11 タイマ割込みを使用した課題の設問回答グラフ

- 2つの割込みを使用した課題：割込み処理がどのような場合に適しているか考える設問を設けた。解答例やキーワード、評価結果は以下の通りである。
 - － 解答例：入力回数が影響する処理の場合、入力漏れが発生しないよう応答性が高くなければならない。そこで、割込みを使用することで、優先度を上げ、確実に処理を行えるようにする。
 - － キーワード：応答性、優先度
 - － 評価結果：結果は図 12 であり、キーワードを 1 つ以上使用して正解した人数は 5 割程度だった。これは、2つの割込み処理を同課題で行ったため、1 度の授業時間に内容を詰め込みすぎて理解

できていないのではないかと考える。

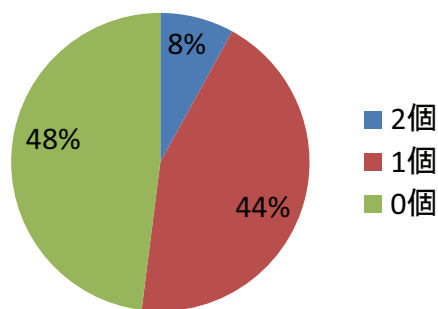


図 12 2つの割込みを使用した課題の設問回答グラフ

(2) アンケート：3 クラスすべてが課題を行った後、アンケートを取り、並行動作やリアルタイム要求の理解度、また企業が求める能力について学習が行えたか調査する。アンケートはチェック方式で行い、4：とても思う、3：やや思う、2：あまりそう思わない、1：全くそう思わないの4段階とした。なお、アンケートの結果は4と3を合わせた数で評価する。質問項目の種類ごとに以下で説明する。

- 企業が求める能力に関する質問：質問項目は以下のとおりである。

問1 能力（言語）について：Java とは違う言語だったが理解して記述できたか？

問2 能力（設計知識）について：フローチャートを理解できたか？

上記のアンケートに対する結果は図 13 である。この結果から、能力に関する項目を理解できた学生は約5割であった。今回の課題作成において、割込み処理を学習させることを第1の目的としたため、言語や設計知識に関してはあまり考えていなかったからと考える。

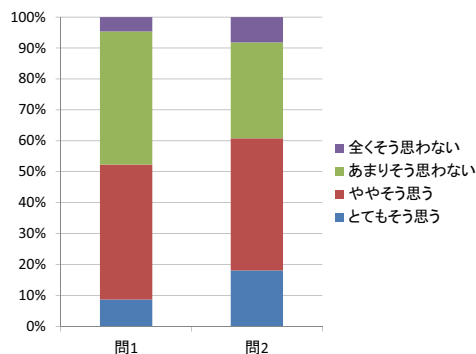


図 13 企業が求める能力に関するアンケート結果

- 組込みシステムの特徴に関する質問：質問項目は以下のとおりである。

問3 特徴（自然法則）について：事象の変化をセンサ値として確認し理解できたか？

問4 並行動作について：2つの処理が並行に動いていたことを理解できたか？

問5 特徴（リアルタイム処理）について：タイマ割込みにより正確なタイミングで処理が行われていることを理解できたか？

上記のアンケートに対する結果は図 14 である。この結果から、組込みシステムの特徴を理解できた学生は7割を超えていることがわかる。本研究の目的は並行動作やリアルタイム処理を理解させることであったため、本研究の目的が達成できたと考える。

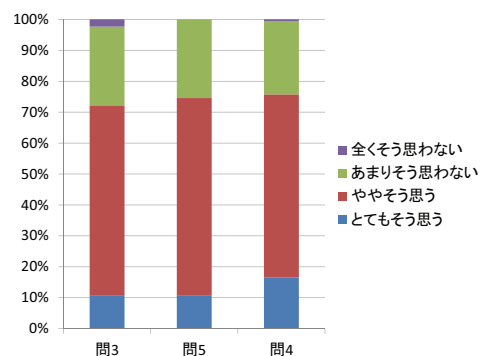


図 14 組込みシステムの特徴に関するアンケート結果

- 将来性に関する質問：質問項目は以下のとおりである。

問6 興味関心について：組込み全体の実験内容に興味を持つことができたか？

問7 需要について：組込みに関連した科目を受講したり、組み込み開発を行う企業へ将来就きたいか？

問8 資料の適正について：割込み課題の配布資料は有益だったか？

上記のアンケートに対する結果は図 15 である。この結果から、興味に関しては6割未満、需要に関しては約3割、資料の適性に関しては7割を超えたことがわかる。興味を持ってもらうことは難しかったが、今回作成し配布した資料に関しては有益だったと言える。

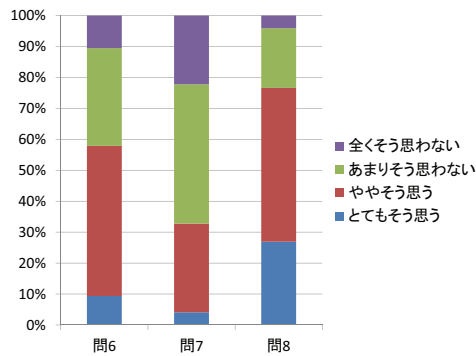


図 15 将来性に関するアンケート結果

6.1 考察

レポートの設問の回答やアンケートの結果から以下のことが言える。

- 課題内容が増えると理解度が下がった。これは、スイッチによる外部割込みの課題とタイマ割込みの課題については、動作の違いを確認して実験を行ったため、理解度が高かったと考える。しかし、2つの割込み処理を使用した課題では、時間が足りず、動作の違いを確認できなかったため、理解度が下がったのではないかと考える。
- 割込みや組込みシステムの特徴について理解してる学生は7割を超え、本研究の目的を達成することができたと言えるだろう。
- 言語やフローチャートなどの設計に関する項目の理解度が低かった。これは、学習内容が多くなるに連れ理解度が下がる傾向にあった。
- 配布した資料は有益だったが、興味を持ってくれた学生は半数で、将来の就職先に考えてくれた学生は3割と少数であった。これは、始めて組込みに触れ、新しく学ぶことが多いため、難しく感じたからではないかと考える。

7. おわりに

本研究は、まず組込みシステム開発の特徴や開発に必要な能力、企業から求められる能力について調べた。また、本学の組込みシステム開発者育成について調べ、必要とされる学習が行えているか比較した。その結果、リアルタイム処理についての学習が不十分であるとわかった。リアルタイム処理としてマルチタスクを使用したシステムの開発を行う授業はあったが、受講した学生の理解が追いついていない。そこで、本研究ではリアルタイム処理の初歩として割込み処理を学習するための教材を作成した。作成した教材は、割込みの動作がわかりやすいスイッチからの外部割込みと、並行動作について学べるタイマ割込みを使った教材を作成した。実施科目は2年次後期で行う情報回路実験Iであり、この授業は与えられた仕様を1から作成す

る実践形式の授業である。この授業で実際に割込み処理を使った課題を導入し、学生の理解度などから評価を行った。その結果、割込み処理については概ね理解できた学生は多いが、言語の理解やフローチャートの理解が不十分であった。これは、予習なしで実験という少ない時間のみで学習を行ったためだと考えられる。

7.1 今後の課題

今回は、授業回数1回で割込みの学習を行ったが、2つの割込みを使用した課題の理解度が低く、スイッチによる外部割込みの課題とタイマ割込みの課題では学生の理解度は高かったことから、1回の授業で行うのではなく、分けて学習すれば理解度は上がる考えた。そこで、情報回路実験Iだけでは授業回数が足りないため、情報回路実験IIと合わせて割込みの課題を行えば理解度の向上が図れると思われる。また、事前に学習する科目がないため、授業が開始してから新しい内容を学んでいた。そのため、学生の理解が遅れ実験時間が足りなくなっていた。そこで、事前に資料を配布し、予習を可能にすれば、より理解度を上げられると考える。これらのことを考え、新たに資料作成、課題の見直しを行う必要がある。

参考文献

- [1] 樋渡良介：ソフトウェア設計による組込みシステム構築を学習するための教材開発，九州産業大学情報科学部知能情報学科 (2011).
- [2] 経済産業省商務情報政策局情報処理振興課：経済産業省組込みソフトウェア産業実態調査報告書 (2010).
- [3] 社会法人組込みシステム技術協会研修委員会：JASA アンケートから見た組込み教育の現場と課題 (2011).
- [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，九州産業大学情報科学会誌, Vol. 11, No. 1, pp. 9-14 (2012).