

自律走行ロボットを用いたIoT開発PBLに向けた教材開発

細合 晋太郎^{1,a)} 石田 繁巳^{1,b)} 亀井 靖高^{1,c)} 鷗林 尚靖^{1,d)} 福田 晃^{1,e)}

概要: 近年, IoT を始め多くの組込みシステムがネットワークに接続され多様化してきている。また, 家庭用のロボットも多く導入され始めている。次世代の組込みエンジニアには, 組込みシステムの知識のみならずロボティクスやネットワーク, ウェブアプリケーションなどの多分野に渡る技術的知識と, 新たなサービス提案や問題解決を行うデザイン力が求められる。本稿では, 本年度より開始した自律走行ロボットを用いた IoT 開発 PBL に向けた教材と教材を用いて実施した PBL の報告について述べる。

1. はじめに

近年, Internet of Things (IoT: モノのインターネット) [1] が大きな注目を集めている。IoT では身の回りの全てのモノにネットワーク機能を具備させ, モノとモノを連携動作させることによって多様なサービスを実現する。IoT の発展に鑑みるに, IoT 技術を活用した新たなサービスの提案・実装を行える人材の育成が今後ますます重要になる。

IoT を活用するためには, 組込みシステムに関する技術だけでなく, 組込みシステムで精度良く実環境の状態を取得するセンシング技術, 取得したデータを処理するためのクラウドシステムの技術や, 組込みシステムとクラウドシステムを繋ぐネットワーク技術の習得が必要となる。また, IoT では取得したデータに基づいて現実世界へのフィードバックを行うアクチュエータも制御する必要がある。このため, IoT の活用に向けてはアクチュエータの動作に向けた制御理論なども含めた幅広い知識が要求される。

アクチュエータの一例としてロボットを活用する IoT 開発のためのフレームワークを開発し, 人材の技術レベルに合わせた自由度を与えてサービスの提案・実装を行わせる。このような活動の中で IoT に関する技術と IoT サービスの提案を体得させることを目指す。

九州大学 大学院システム情報科学府 情報知能工学専攻 社会情報システム工学コース (QITO コース) では, これまでも Web アプリケーションを題材とした Project Based

Learning (PBL)[2] や IoT を題材とした PBL[3] を実施してきた。これらの PBL で培ってきた成果を集約させることで, IoT を活用できる人材の育成に向けた教材を開発する。本稿では開発した教材及びこれを用いた PBL 演習の成果について報告する。

本稿の構成は以下の通りである。2章では IoT とロボットを活用できる人材に求められるスキルと教材について述べる。3章では提案する教材について詳細を示す。4章は4月から現時点まで実施した PBL について報告を行う。5章では教材の評価方法の提案について述べる。6章で総括とする。

2. 準備

2.1 IoT 開発

IoT は多数の組込み機器をネットワークで接続し, さまざまなデータを取得, 分析することで新たなサービスを行うものである。IoT ではセンサからデータを取得し, 組込みソフトウェアで必要であれば加工し, ネットワークを介してデータの転送を行う。データの転送では数多くの機器が接続されることが懸念されるため, 省リソースの通信技術が重要となる。取得したデータはクラウド上のアプリケーションやデータベースに保存し, 分析や制御に用いられる。IoT を実現するためには, 組込みハードウェア, 組込みソフトウェア, ネットワーク, Web アプリケーションなど多岐に渡る知識とスキルが要求される。

2.2 到達目標

本教材はロボットを活用した IoT を実現できる隣接領域のスキルを持った人材の育成を目標とする。このような人材には IoT やロボット, ソフトウェア開発など多岐にわたるスキルの習得が必要となる。表に本教材の対象とするス

¹ 九州大学 大学院システム情報科学府 高度 ICT 人材教育開発センター

QUTE:Kyushu University Research Center for Advanced Information and Communication Technology Education

a) hosoi@qito.kyushu-u.ac.jp

b) ishida@f.ait.kyushu-u.ac.jp

c) kamei@ait.kyushu-u.ac.jp

d) ubayashi@ait.kyushu-u.ac.jp

e) fukuda@f.ait.kyushu-u.ac.jp

表 1 スキル項目と到達目標レベル

大項目	小項目	到達目標レベル			
		1	2	3	4
組み込みハードウェア開発技術の習得	モジュール化されたハードウェアの接続	○	○	○	
	IoTに必要なハードウェア回路の作成	○			
組み込みソフトウェア開発技術の習得	基本的な組み込みソフトウェアの開発	○	○	○	
	IoTに必要なデバイスドライバやネットワークプログラムの設計開発	○			
省リソース通信技術の習得	MQTT等のクライアントを用いたデータ取得	○	○		
	組み込み, Webを考慮した通信プログラムの作成	○			
Webアプリケーション開発技術の習得	簡易なWebアプリケーションの開発	○	○		
	組み込みシステムから取得したデータの利用	○			
ロボット制御ソフトウェア開発技術の習得	ロボットAPIを用いた簡易制御	○	○	○	
	制御理論を用いた制御	○			

スキル項目の一覧を示す。(表1左)組み込みソフトウェアに関するスキル標準としてETSS*1があるが、本教材で対象とするIoTやロボットに関する項目は含まれていないため独自に作成した。

教材を用いた演習の実施方法により到達目標のレベルは異なるが、一例として本学で教材を用いたPBLを実施した際に定めた到達目標を示す。(表1右)

到達目標レベルは「1.指導者のもとでできる」「2.独学でできる」「3.指導できる」「4.新技術を開発できる」とし、教材は基本的に「1.指導者のもとでできる」を達成できるように作成している。今回のPBLでは重点的に教えたい部分について「2.独学でできる」「3.指導できる」も達成できるように教材や指導を追加した。

IoTに関するスキルとして、組み込みハードウェア、組み込みソフトウェア、省リソース通信技術、Webアプリケーションが必要となる。また加えてロボット制御のスキルも定めており主に制御ソフトウェアに重点をおいているが、ロボットのメカトロニクスやハードウェアのスキルに関しては習得を課していない。

2.3 求められる教材

PBLを通じてIoTを実現できる人材の育成には、前項で挙げたスキルを習得できる教材が必要となる。PBL演習では、課題や実装方法が決まった教材では、自ら問題を考え実装方法を検討する自由度がなくなってしまう。この

*1 <http://www.ipa.go.jp/sec/softwareengineering/std/etss.html>

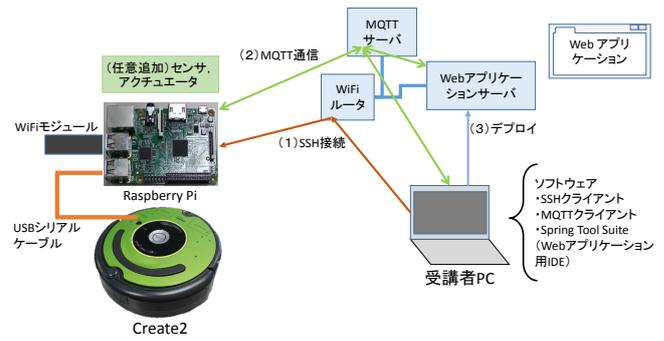


図 1 演習教材の構成

ため、自ら問題を発見し、要求を定義し、実装できる自由度を持たせた教材が望ましい。

このような自由度を持たせるため、本教材で扱うIoTシステムとロボットのそれぞれで以下のような要件を求める。

- IoTシステム
 - 組み込みハードウェアの組み換えの自由度が高い
 - 組み込みソフトウェアの開発が容易
- ロボット
 - ハードウェアとの接続が容易
 - ソフトウェアからの制御が容易

IoTシステムの様々な要求を検討できるよう、ハードウェアの自由度を持たせ、かつ要求を実現するソフトウェア開発も容易である事が望ましい。一方ロボット教材では、メカトロニクスのカスタマイズは本教材の要件に含めず移動体としての利用に留めるため、組み込みシステムから制御しやすい事を主な要件とする。

図1に提案する本教材の構成を示す。大きくロボット(Create2)、組み込みボード(Raspberry Pi)、サーバ(MQTTサーバ、アプリケーションサーバ)で構成する。受講者は受講者PCからRaspberry Piにログインして開発を行い、Create2を制御するプログラムを作成する。Create2で取得したデータはMQTTサーバを介し、アプリケーションサーバと受講者PCで受信する。教材の詳細については3.3で取り上げる。

2.4 関連する教材と技術

本項では本教材と関連するIoT教材とロボット教材について取り上げる。表2にIoT教材の一覧を示す。littleBitsは、センサやアクチュエータのついた小さな基板を自由に組み合わせることでハードウェアを構成できるIoT向けの教材である。基板には磁石付きのコネクタが搭載されており、ハンダ付けや配線を行わずにハードウェアを構築でき、接続間違いも起こらない。このためハードウェアの知識が少なくとも任意のハードウェアを構築できる。またソフトウェアは必要とせず、基板の組み合わせのみでシステムを構築できる。習得は容易な教材であるが、基板の組み合わせ以上の自由度がなく、初等向けであるためハードウェア

表 2 組込みシステム関連教材

名称	ハードウェア開発		ソフトウェア開発	
	自由度	開発容易性	自由度	開発容易性
Little Bits ^{*2}	△	○	-	-
Adafruit ^{*3}	△	○	△	○
Raspberry Pi ^{*4}	○	△	○	△

やソフトウェアに関するスキルの習得もあまり望めない。

Adafruit は規格化されたセンサやアクチュエータの基板 (以下モジュール) を多く提供しており, 制御は Arduino や Raspberry Pi など主要な組み込みボードから行う。littleBits に比べ, より多くのモジュールが用意されており自由度が高いが, 制御のためのライブラリが用意されていないものも多く, 実質独自にセンサやアクチュエータを追加する場合とソフトウェア的な難易度はあまり変わらない。

Raspberry Pi は小型の組み込みボードで比較的安価で高機能な Linux OS で動作させることができ, ネットワークにも容易に接続できる。littleBits や Adafruit はセンサやアクチュエータもセットとなった構成となっているが, Raspberry Pi ではセンサ・アクチュエータを追加するには, 汎用の部品を選択し, 回路設計やデバイスドライバの開発が必要となる。

IoT 向けの省リソース通信技術として, MQTT^{*5} がある。MQTT は TCP/IP 上のプロトコルで, HTTP 等と比べ軽量である。Publish/Subscribe 形式の通信で, 特定のトピックに対して Publisher がデータを送信すると, そのトピックを購読している全ての Subscriber に配信される。

MQTT のデータはすべて MQTT ブローカー (MQTT サーバ) に送られ, その後に Subscriber に配信されたため, Publisher は Subscriber の宛先を知らなくても, データの送信を行うことができる。このため, Raspberry Pi から送信したデータを Web アプリケーションで受け取るとともに, PC の MQTT クライアントでも確認できる。また Web アプリケーションサーバにアプリケーションをデプロイした際でも, Raspberry Pi, Web アプリケーションのどちらのコードも変更する必要はない。

表 3 に関連するロボット教材を示す。Mindstorms は, Lego のブロックとして制御用の組み込みボード (インテリジェントブロック) やセンサ, アクチュエータをモジュール化したもので, Lego のブロックを組み合わせることで, 任意の形状のロボットやシステムを作成できる。制御はインテリジェントブロックにソフトウェアを書き込むことで行い, センサやアクチュエータには専用のライブラリも用意されているため, 容易にソフトウェア開発が行える。ただ littleBits や Adafruit に比べると提供されているモジュール

^{*2} <http://littlebits.cc/>

^{*3} <https://www.adafruit.com/>

^{*4} <https://www.raspberrypi.org/>

^{*5} <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html>

表 3 ロボット関連教材

名称	拡張性	開発容易性
Mindstorms ^{*6}	○	△
Create2 ^{*7}	△	○
Pepper ^{*8}	×	○

ルは少なく, Mindstorms 以外のモジュールを使うことも難しい。

iRobot Create2 は, 市販の掃除用ロボットである Roomba を教育用にカスタマイズした製品で, 上面のポートにシリアルケーブルを接続し, コマンドを送信することで制御できる。制御用のコマンドは API として公開されており, PC や組み込みボードから制御できる。市販の Roomba と比べ, 掃除機能が除かれているが, その他の機能はほぼそのまま利用できる。

Pepper はソフトバンクから販売されている人型ロボットで, 音声や胸部のタブレットでコミュニケーションできる。移動は 3 つの球状のタイヤで行い二足歩行ではない。このため複雑な姿勢制御などは必要としない。SDK が公開されており, Java や Python 等の各種言語で制御できる。

2.5 関連研究

本 PBL と関連する研究として, Jay ら [4] は本教材と同様にロボットを用いた自由テーマの PBL を実施している。個人向けロボットの作成を課題としており, ロボットに様々なセンサや装飾を追加する自由な課題を取り入れている。

Gartsev ら [5] は, 本教材で用いている Create2 の前バージョンである iRobot Create を用いた PBL 向けの教材を開発している。この教材ではロボットとメカトロニクスに特化しており, Matlab/Simulink によるモデルベース開発を取り入れたものとなっており, 本 PBL よりもロボットの制御に特化した内容となっている。本教材ではロボットを用いたサービス提案を主目的としており, 特にソフトウェアに特化している。

沢田ら [6] は地上ロボットよりもさらに制御の難しい飛行船ロボットを題材とした PBL を実施している。主に飛行船ロボットの制御を対象としており, IoT やエンタープライズシステムに関する拡張は行われていない。

また, IoT やロボットをターゲットとした PBL ではないが, IoT のエンタープライズシステム側の教材作成や PBL 教材の評価に関するものとして, 以下がある。駒谷ら [7] はエンタープライズ系システムを題材とした PBL を行っている。佐伯ら [8] はソフトウェア開発 PBL に向けた開発環境の提供方法について DaaS を用いることを提案してい

^{*6} mindstorms.lego.com

^{*7} <http://www.irobot.com/About-iRobot/STEM/Create-2.aspx>

^{*8} <https://www.aldebaran.com/en/robots>

表 4 講義と演習

講義・演習	コマ	使用教材	習得できるスキル
組込みチュートリアル	1	スライド教材, Raspberry Pi, センサボード	組込みハードウェア, 組込みソフトウェア
ロボット制御チュートリアル	1	スライド教材, Create2	ロボティクス
Web アプリケーションチュートリアル	2	スライド教材, Spring Tool Suite ツール (以下 STS) *8, MQTT	Web アプリケーション, 省リソースネットワーク
チュートリアル総合演習	3	スライド教材, Raspberry Pi, センサボード, Create2, STS ツール, MQTT	IoT 全般, ロボティクス
ICONIX 要求モデリング演習	2	スライド教材, Astah ツール *9	モデリング
ICONIX 実装設計演習	2	スライド教材, Astah ツール	モデリング
制御理論によるロボット制御	2	スライド教材, Create2, Raspberry Pi	ロボティクス, 制御理論
チーム演習	21 (7 × 3)	Create2, Raspberry Pi, 各チームの追加ハードウェア	IoT 全般, ロボティクス

る。眞鍋ら [9] は, DaaS 環境を用いることで, 受講生の動向を計測し, PBL のプロジェクトの動向や受講生の習熟度を測ることを提案している。

3. 自律走行ロボットを用いた IoT 開発 PBL

3.1 教材の目標

本教材では, 自律ロボットと IoT を組合わせた新たなサービスの提案と実装を課題とする。そのために自律ロボットの制御, 組込み開発, エンタープライズアプリケーション開発, 通信のフレームワークを提供し, その上で自由にテーマを実装することで, ロボティクスと IoT に関する知識, スキルの習得を目標とする。

今回は 5 コマ × 15 回 (半期) を想定して作成しているが, 演習内容や課題を変更することで, 短期合宿形式での実施やより長い期間での実施が可能である。例えば, Web 側の実装を予め提供し, 組込みボードによるロボット制御にのみ注力すれば, 少ないコマ数でも実施できる。

今回の PBL では, ロボットと IoT システムを組合わせた新たなサービス提案と実装を課題とした。受講生は本 PBL を通じて 2 章で挙げたスキルセットを習得する。

*9 <https://spring.io/tools>

*10 <http://astah.change-vision.com/ja/>

3.2 講義と演習

本教材を用いて実施した講義と演習の一覧と割当てているコマ数, 使用教材, 対応するスキルについて, 表 4 に示す。

組込みチュートリアルでは, Raspberry Pi に光センサを接続する方法の解説と現在の光量を取得しネットワークを介し送信するソフトウェアの作成を行う。ロボット制御チュートリアルでは, Raspberry Pi から Create2 を制御するソフトウェアの作成を行う。Web アプリケーションチュートリアルでは, 簡易な Web アプリケーションの作成方法の習得と, Raspberry Pi から送信された光量のデータを Web アプリケーション上で表示するソフトウェアの作成を行う。総合演習ではこれらを踏まえて, より光量の大きい方へ向かって進むソフトウェアを各チームで作成させる。

ICONIX 要求モデリング演習と ICONIX 実装設計演習では, 書籍 [10] を題材に主に Web アプリケーションの作成を対象に講義と演習を行う。

制御理論によるロボット制御では, 制御理論を用いたロボットの制御方法について, 講義と演習を行う。ロボット等の移動体は, 様々な外乱やモータの特性によって, 指示した通りには動かない。誤差を見越したフィードフォワード制御やセンサ等を用いるフィードバック制御により, 意図した通りの動作を行うように制御を行う必要がある。演習では機体の特性の計測やエンコーダによるフィードバック制御を行う。

チーム演習ではチームごとに課題であるロボットと IoT システムを組み合わせた新たなサービス提案と実装を行う。チーム演習は Scrum [11] に則り, 開発期間を 3 つに区切り, 1 スプリントを 1.5 週間として実施する。スプリント毎に行う作業の決定と成果物の確認, 振り返りを繰り返し, 反復的な開発手法の習得を行う。

これらの講義と演習に加えて, PBL を実施する上で必要となるチーム開発に関する講義と演習も実施している。Github による版管理, Redmine によるチケット管理, アジャイル開発手法の一つである Scrum, プロジェクトファシリテーション, アイデア創発のためのロジカルシンキングを講義と演習で提供している。

3.3 演習教材

図 1 に示した通り, 本教材は教育用ロボットである iRobot 社の Create2, 組込みボードの Raspberry Pi Model B+ (または Raspberry Pi2 Model B), Web アプリケーションサーバ, MQTT サーバで構成する。また通信には WiFi を用いており, 受講者 PC から WiFi を介し Raspberry Pi に SSH 接続する。

Create2 と Raspberry Pi は USB シリアルケーブルで接続し, Raspberry Pi 上のソフトウェアから制御を行う。ま

た Raspberry Pi にはセンサやアクチュエータを追加できる
よう拡張基板を接続している。Create2 の制御ソフトウェアは Raspberry Pi にログインして開発する。(図 1 (1))

Raspberry Pi で取得したデータは MQTT にて MQTT
サーバに送り、購読している各種ソフトウェア(PC 上の
MQTT クライアントや Web アプリケーション)に配信される。(図 1 (2))

Web アプリケーションはフレームワークとして Spring4
Framework を用いており、受講者 PC 上の Spring Tool
Suite IDE にて開発を行う。作成した Web アプリケーションは IDE 上でも実行しテストができ、完成後に Web アプリケーションサーバにデプロイする。(図 1 (3))

iRobot Create2

自律走行ロボットとして、iRobot 社の教育用ロボット
である Create2 を用いる。Create2 は、シリアルケーブル
でコマンドを送信することにより、ロボットの制御やセンサ類から情報を取得できる。今回は制御ボードとして Raspberry Pi を使い、USB-シリアルケーブルで接続し、Raspberry Pi 上のプログラムから制御を行う。

Raspberry Pi Model B+

今回は Raspberry Pi Model B+ (CPU ARM11 1 コア
700MHz, メモリ 512MB) または、Raspberry Pi2 Model
B (CPU ARM Cortex-A7 4 コア 900MHz, メモリ 1GB)
を用いる。

Raspberry Pi とネットワークの接続には USB 接続の
WiFi モジュール (バッファロー WLI-UC-G301N) を用い
た。Raspberry Pi は自律走行するロボットに搭載して稼働
するため、有線のネットワークケーブルではなく WiFi 経
由で接続できるようにした。電源さえ供給すれば WiFi 経
由で Raspberry Pi に接続できるため、ソフトウェア開発
やデバッグが容易となった。

OS として Ubuntu Linux をベースとした Raspberry Pi
用 OS である Raspbian^{*11} を使い、必要なライブラリ等をイン
ストールした SD カードを提供した。ソフトウェア開発
は、WiFi 経由で Raspberry Pi に SSH 接続し、Raspberry
Pi 上のエディタで開発を行う。5,6 名程度のログインであれば、性能的な遅延は発生しない。全員が同様の環境で開発できるため、開発環境のインストールや環境による差異を考慮しなくてもよい利点がある。

Create2 の制御は Python 言語を用いて行う。Create2 の
通信仕様は公開されており^{*12}、この仕様に沿った Python
のライブラリを作成し提供した。受講者はライブラリを用
いて制御を行う。

また MQTT の利用には、既存の MQTT ライブラリで



図 2 スプリングスクールの様子

ある Paho^{*13} の Python 用ライブラリを用いた。

Web アプリケーション

Web アプリケーションは、Java の Web フレームワーク
である Spring Framework 4 (以下 Spring4) を用いて開発
を行う。Spring4 では、Web アプリケーションに必要な多
くの機能がライブラリとして用意されているとともに、ア
ノテーションを用いた自動コンフィギュレーションや DI
コンテナなどにより、少ないコード量で Web アプリケー
ションを構築できる。また、Spring Boot と呼ばれる実行
技術で、Web アプリケーションを通常のアプリケーション
のように実行でき、動作確認やデバッグが行い易い。

Spring4 開発環境として Eclipse をベースとした Spring4
用 IDE である STS が提供されている。アプリケーション
のひな形の生成や、コード補完、実行、デバッグなど開発
のほとんど作業が統合されている。

4. 実施

本教材を用いて実施した PBL は修士 1 年 19 名が受講
しており、4 名ないし 5 名を 1 チームとして 4 チームを作
成した。本 PBL は水曜 2 コマと金曜 3 コマの週 5 コマを
14 週行う。加えて 5/8,9,16 に他校も交えた短期合宿の形
で PBL やロボット制御に必要な演習と講義も行う。

4.1 チュートリアル

チュートリアルでは、3 章で挙げた IoT, ロボティクスの
チュートリアルに加え、PBL に必要となる基礎的な講義も
実施した。Git による版管理の方法と、オンラインの Git
サービスである Github の利用方法について講義と演習を
行った。

タスク管理には Redmine によるチケット開発を用いる。
基本的にカンバンと同様の使い方をしているが、実際のホ
ワイトボードと付箋では、タスクの履歴を追うことは難し
い。Redmine を用いることでオンライン上でタスクの把握
や割当てが行えらるとともに、過去のタスクのログを永続的

^{*11} <https://www.raspbian.org/>

^{*12} <http://www.irobot.com/About-iRobot/STEM/Create-2/Projects.aspx>

^{*13} <http://www.eclipse.org/paho/>

に残すことができる。また、RedmineにはScrumのプラグインを導入しており、Redmine上でScrumのタスク管理を行うことができる。

4.2 スプリングスクール

スプリングスクールはPBLに必要な基礎知識を習得する短期合宿で、PBLの受講生に加え他校の受講生も交えて実施した。図2にスプリングスクールの様子を示す。合宿の前半ではScrumやプロジェクトファシリテーション、ロジカルシンキング、制御理論などの講義と演習を行う。一週間後の後半に向け、ペットボトルを載せた状態でCreate2で規定コースを走行する課題が課せられており、最終日の合宿では、各チームの取り組みを発表する場を設けた。

5. 教育効果分析に向けた情報取得

教材と講義、演習による教育効果を分析するためには、受講者の習得度を計測する必要がある。しかしながら、2章で取り上げた評価項目を客観的に評価する指標が確立していない。またチーム開発であるため、成果物に対する個々の貢献度は様々であり、受講生によって担当分野も異なる。このため、2章で取り上げた各項目に対して、アンケートを実施し、自己評価を行う予定である。

また、アンケートとは別に受講者の習得度を測定するために以下の項目を取得している。

- 記述したコード行数総数
- スプリント毎のコード行数の推移
- 開発成果物の総コード数における受講者の割合
- Githubへのコミット回数
- コミット粒度
- チケットの完了数
- チケット状態の推移

これらの項目は、受講者ごとに取得しており、個別のソフトウェア開発の習得度の指標となるよう検討している。

6. おわりに

本年度よりロボットとIoTを活用できる人材の育成のために、新たに教材を作成しPBLを実施した。受講した学生のモチベーションも高く、現時点で全チームが提案したサービスの実装を行い、発表会にてデモが行えるレベルの成果物を作成できた。

今後の課題として、本教材を用いたPBLを他拠点でも実施できるようにパッケージ化することと、ソフトウェア以外のスキルの達成度を計測するための評価基準を定めることである。しかしながら、チーム開発を行う場合、どうしても役割分担が決まってしまう特定のスキルにのみ偏ってしまう事が多々見受けられる。今回はチュートリアル形式の演習を行うことで最低限のスキルの習得は平滑化でき

たが、チーム演習はまだチーム任せとなってしまう。今後、今回実施したPBLで得られた知見を元に教材の改善を行っていく。

謝辞 本プロジェクトは、「分野・地域を越えた実践的情報教育協働ネットワーク」の補助金により文部科学省情報技術人材育成のための実践教育ネットワーク形成事業の一環として実施したものである。

参考文献

- [1] Ashton, K.: That ‘internet of things’ thing, *RFiD Journal*, Vol. 22, No. 7, pp. 97–114 (2009).
- [2] 細合晋太郎, 亀井靖高, 大迫周平, 井垣宏, 鶴林尚靖, 福田晃: PBLへのDaaS開発環境の導入事例, 電子情報通信学会技術研究報告. SS, ソフトウェアサイエンス, Vol. 113, No. 159, pp. 103–108 (2013).
- [3] 細合晋太郎, 石田繁巳, 亀井靖高, 大迫周平, 井垣宏, 鶴林尚靖, 福田晃: IoTシステムを題材としたPBLの導入提案, 情報処理学会研究報告. ソフトウェア工学研究会報告, Vol. 2014, No. 7, pp. 1–6 (2014).
- [4] Summet, J., Kumar, D., O’Hara, K., Walker, D., Ni, L., Blank, D. and Balch, T.: Personalizing CS1 with robots, *ACM SIGCSE Bulletin*, Vol. 41, No. 1, ACM, pp. 433–437 (2009).
- [5] Gartsev, I. B., Lee, L.-F. and Krovi, V. N.: A low-cost real-time mobile robot platform (ArEduBot) to support project-based learning in robotics & mechatronics, *Proceedings of 2nd International Conference on Robotics in Education (RiE 2011)*, R. Stelzer and K. Jafarmadar, Eds. INNOC Austrian Society for Innovative Computer Sciences (2011).
- [6] 沢田篤史, 小林隆志, 金子伸幸, 中道上, 大久保弘崇, 山本晋一郎: 飛行船制御を題材としたプロジェクト型ソフトウェア開発実習, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 11, pp. 2677–2689 (2009).
- [7] 駒谷昇一: 実践的PBLによるエンタープライズ系システム企画設計開発の授業実践”, 研究報告情報システムと社会環境 (IS), Vol. 2009, No. 32, pp. 177–184 (2009).
- [8] 佐伯幸郎, 井垣宏, 福安直樹, 本真佑, 楠本真二: ソフトウェア開発PBLのためのDaaSを利用した開発環境の構築, 電子情報通信学会技術研究報告. SC, サービスコンピューティング= IEICE technical report. SC, Services Computing, Vol. 112, No. 299, pp. 13–18 (2012).
- [9] 眞鍋雄貴, 井垣宏, 福安直樹, 佐伯幸郎, 楠本真二, 井上克郎: 細粒度プロジェクトモニタリングのためのDaaSを利用したソフトウェア開発PBL支援環境の提案, 電子情報通信学会技術研究報告. SS, ソフトウェアサイエンス, Vol. 112, No. 164, pp. 73–78 (2012).
- [10] : ユースケース駆動開発実践ガイド (OOP Foundations), 翔泳社 (2007).
- [11] Sutherland, J. and Schwaber, K.: The scrum guide, *The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game* (2011).