

SDNを用いたネットワーク構築における 実習法の提案と評価

園生 遙^{1,a)} 牛込 翔平¹ 國宗 永佳² 新村 正明¹

概要：近年，SDN(Software Defined Networking)と呼ばれるネットワークの仮想化技術が注目されている．それに伴い，高等教育機関においてSDNを用いたネットワーク学習が行われている．しかし，現在SDNの学習方法に関する学術的な報告はほとんど行われておらず，SDNの効果的な学習方法も現在確立されていない．そこで，本稿では，SDNの効果的な学習方法の提案を行う．提案する学習方法は，学生が教授者の提示する条件内でOpenFlowによるネットワーク制御の課題を作成し，コンテスト形式で評価を行うものである．本稿では，本学習方法の概要を示すとともに，信州大学のSDNを用いたネットワーク学習における本学習方法の導入と評価の報告を行う．

1. はじめに

近年，ネットワークの仮想化技術としてSoftware Defined Networking (以下SDNと呼ぶ)と呼ばれるネットワーク技術が注目されている [1]．SDNはソフトウェアによりネットワーク制御を行う事で，柔軟なネットワーク制御を行う事を可能にする技術である．従来のネットワーク機器によるネットワーク構築では，ネットワークの制御機能がベンダに依存していることから，ネットワーク管理者が利用するネットワーク制御機能は，ベンダの提供する機能を利用するしかなかった．しかしながら，ネットワーク技術の複雑化やクラウド化などに伴うユーザニーズの多様化により，ベンダの提供するネットワーク制御機能だけでなく，ネットワーク管理者自身が必要な制御機能をソフトウェアによって実装する事が求められている．

SDNを実現するための技術のひとつとして普及している技術にOpenFlowがある．前述のソフトウェアによるネットワーク制御を実現するだけでなく，複数のネットワーク機器においてネットワーク制御機能とパケット転送制御を分離し，ネットワーク制御機能を一元管理する事で，ネットワーク全体の制御の一括管理を可能とする事が特徴である．ネットワーク全体の制御を一括管理する事により，柔軟なネットワーク制御を行うメリットに加え，ネットワーク管理者の管理負担を軽減する事ができるというメリット

がある．

ネットワーク全体の制御を統合する機能をOpenFlowコントローラ(OFC)，OFCによる制御を行うネットワーク機器をOpenFlowスイッチ(OFS)と呼ぶ．OFCにおいて動作させるネットワーク制御アプリケーションを開発する事により，制御下のOFSに対し柔軟なパケット制御を行わせる事が可能である．

SDNの普及に伴い，高等教育機関においてSDNの学習を目的とした講義の開講が行われている [2][3]．信州大学においても，情報工学科修士課程向けの講義を開講している．本稿では，課題解決型学習を取り入れたSDNによるネットワーク構築実習法を提案するとともに，平成25年度の前期に信州大学におけるSDNの学習を目的とした講義への導入と評価について報告する．

2. SDNによるネットワーク構築実習

2.1 SDNによるネットワーク構築学習における問題点

ネットワーク技術における学習方法，実習方法は様々なものが報告されている [4]．それらの実習方法の多くが，ネットワーク構築を行うために，ルーティングプロトコルやネットワーク機器ベンダが提供する機能から適切な選択や設定を行うことを目的としている．そのため，機器に依存した知識しか習得できない危険性を指摘されており，State Model Diagram(SMD)などの学習ツールによるネットワーク理論の学習を狙うツールの開発等も進められてきた [5]．

SDNはソフトウェアによるネットワーク制御を行うという特徴から，SDNによるネットワーク構築には従来の

¹ 信州大学大学院理工学研究系研究科
Division of Science and Technology, Shinshu University

² 信州大学工学部
Faculty of Engineering, Shinshu University

a) sono@seclab.shinshu-u.ac.jp

TCP/IP ネットワークに関する知識だけでなく、プログラミングスキルが必要とされる。そのため、SDN によるネットワーク構築においては、ネットワーク機器の設定による最適解を導出するような従来のネットワーク構築実習において求められるスキルではなく、プログラミングによる課題達成能力が求められる。しかしながら、ネットワークとプログラミングという側面を持つ SDN に適した効果的な学習法は確立されていない。

2.2 プログラミングにおけるコンテスト型学習

SDN によるネットワーク構築実習においてはプログラミングによる課題達成能力が求められる。

プログラミングによる課題解決学習のひとつとして、コンテスト型学習が広く認知されている [6][7]。

コンテスト型学習として、大西ら [8] は簡易ロボットキット LEGO Mindstorm を用いたゲームコンテスト形式のグループ学習を提案している。

さらに、富永ら [9] は、コンテスト形式のグループ学習の支援サーバ tProgrEss を開発し、対象授業の受講者 81 名に対し模擬試験として運用実験を行っている。運用実験としてのコンテストの内容は制限時間 120 分で 6 問を出題し、それぞれの出題に対して難易度順に点数の重み付けがされた 4 段階の課題を提示するものである。また、各学習者の進捗状況や成績順位などを表示し、学習者の競争意識による学習意欲の促進を狙っている。アンケートによる調査の結果、優秀な学生の意欲の促進と下位の学生への着手の支援がなされたとしている。

3. SDN 学習におけるコンテスト型学習

3.1 プログラミング学習との類似点

SDN を用いたネットワーク学習において効果的な実習方法を提案するにあたり、

- 実習実施にあたり、学習者に TCP/IP のネットワークやプログラミングの知識やスキルが求められる
- 現在 SDN を用いたネットワーク学習について学術的な報告が少ない事などから、全ての学習者が授業時間中に達成できるような課題の難易度の設定が困難である

といった問題点から、知識やスキルに差がある全ての学習者の学習意欲を喚起する事は難しい。

プログラミングにおける学生の理解度の差を解決するものとして、前章で述べた富永ら [9] は小コンテスト方式のプログラミング演習を提案している。富永らの提案する小コンテスト方式のプログラミング演習は、コンテスト形式による学生間の競争意識を刺激する事で学習意欲を高める事を期待している。また、学生間の理解度の差を緩和するために複数の予備テストおよび最終テストから成る実行テスト系列を提示し、最終テスト回答への着手への糸口とし

ている。

SDN によるネットワーク構築学習はプログラミングによる課題達成実習と類似している。また、富永らの手法は、課題の提示方法を工夫する事により SDN を用いたネットワーク学習にあるような問題点を解決している。そこで、本稿においては様々なレベルの学習者に対する学習意欲の促進を行うため、SDN によるネットワーク構築におけるコンテスト型実習を提案する。

3.2 SDN におけるコンテスト型学習

提出された OFC のアプリケーションは点数化による評価がなされ、公開される。また、以下の目的を達成するために完成度に応じて評価点が上昇するような課題を提示する。

- 学習者のレベルに応じた達成目標の提示
 - コンテスト形式の実習による学習者の学習意欲の喚起
- さらに、SDN におけるコンテスト型学習において、OFC におけるアプリケーションの開発を講義の時間内のみで行う事は難しい事から、宿題型のコンテスト実施形態を採用する。知識やスキルの不足している学習者に対しては課題に取り組むにあたって課題達成に必要な知識やスキルを補う期間を設け、優秀な学生に対しては提出する課題をより洗練する機会を与える。

3.3 SDN コンテスト実習

本研究において提案する SDN におけるコンテスト型学習（以下、SDN コンテスト実習と呼ぶ）の目的は、学習者が意図したネットワークを SDN によって実現するスキルの習得である。

SDN コンテスト実習で提示する課題は、学習者が OpenFlow によるネットワーク制御を行う事で、接続状況が変化する仮想ネットワーク内においてホスト間の通信疎通の維持を図るものである。このような課題設定をすることで、SDN による柔軟なネットワーク制御を実践することが SDN コンテスト実習の目的である。

SDN コンテスト実習の実施は 2 回に分けて行い、それぞれに取り組む期間として 2 週間程度を設定した。また、2 人 1 組で作業を行うペアプログラミングの形態 [10] を採用し、課題終了時に各グループは自身を含めた学習者の課題の評価と順位を共有する。このようにする事で課題終了時に提出課題へのフィードバックを行うとともに、学習者間での知識の交換を行う事が可能になる。

3.4 学習者に提供する仮想ネットワーク

SDN コンテスト実習において提供する仮想ネットワークは、フルメッシュ接続された 4 台の OFS と、それらを制御下に置く OFC から構成されている。また、各 OFS にはホストが接続されている。ネットワークにおける通信の

疎通の確認はこれらのホスト間で行う。

仮想ネットワーク内のネットワーク接続の変化はOFS間のネットワークの切断・再接続により行う。学習者はOFS同士の接続状況の変化に対応できるようなアプリケーションを作成しなくてはならない。

3.5 仮想ネットワーク内の接続状況の変化

接続状況の変化する箇所と変化内容は、学習者自身が指定する（以下、ネットワーク変化指定と呼ぶ）。接続状況の変化指定は、1回目の課題においては切断のみとし、2回目においては切断箇所の再接続を許可している。接続状況の変化が多様化していることから、2回目の課題の難易度はやや高くなっている。このようにする事によって、第1回の課題において高得点を取得した学習者の意欲の促進を期待している。

また、提出するアプリケーションは、図1のように、学習者自身が提出するネットワーク変化指定に完全に対応し、100%の通信の疎通率を保証するものでなくてはならない。これらのOFCのアプリケーションとネットワーク変化指定のセットの提出が学習者に要求する課題提出条件であり、この条件が、学習者の提出する課題に対する唯一の条件である。この条件により、特定の変化にしか対応できなかったとしても課題の提出が可能となり、汎用的なネットワーク制御を行う事ができなかった学習者でも提出課題を提出する事ができるようになっている。

3.6 SDN コンテスト実習における評価基準

SDN コンテスト実習における評価の基準は、仮想ネットワーク上の各ホスト間の通信疎通率である。

仮想ネットワーク上におけるホスト間の通信疎通を1点とし、接続状況を段階的に変化させる中で、各ホストにおいて全ホストとの通信の疎通の確認を行い、評価点を集計したものが得点である。そして、自分以外の他の全学習者の提出したネットワーク変化指定を適用して提出課題の得点の導出を行い、それらの合計得点が学習者の最終的な評価点となる（図2参照）。

このような評価方法を採用する事により、より汎用的なネットワーク制御を行ったOFCのアプリケーションがより高い得点を得る事ができ、あまりネットワークについての知識やプログラミングスキルのない学習者に対しても、自分の可能な範囲内で課題を達成する事が可能になる。

4. SDN コンテスト実習の導入

4.1 SDN コンテスト実習の概要

信州大学理工学系研究科2013年度前期のSDNを用いたネットワーク学習においてSDN コンテスト実習を導入した。受講者は信州大学の修士課程の学生であり、28名（14グループ）によるSDN コンテスト実習を行った。

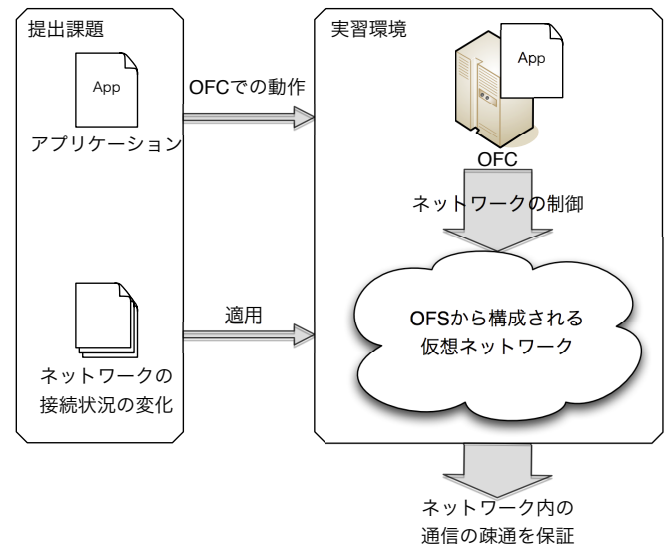


図1 提出課題
Fig. 1 Submissions

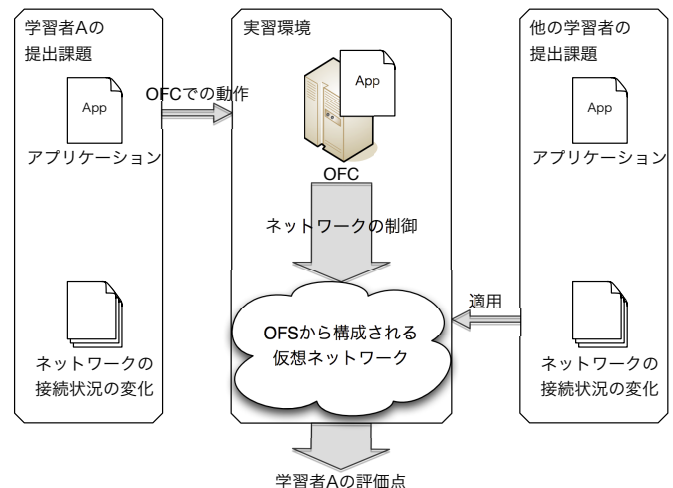


図2 評価点導出方法
Fig. 2 Evaluation point derivation method

演習を円滑に行うためには、受講者ごとの知識やスキルの差による実習における不均衡を極力緩和する必要がある。そこで、SDN コンテスト実習に先立ち、SDNの概要やSDNによるネットワーク構築に必要なTCP/IPの知識などを学習するための講義を行った。この講義には、15コマ中8コマを割り当てた。

学習者は、SDN コンテスト実習の課題である接続状況の変化に対応するOFCのアプリケーション開発を行うまでに、コンテストに必要な知識を習得するために、カリキュラムの中で4段階の講義を受ける。

- (1) TCP/IPの知識などの事前知識についての学習
- (2) OFC開発フレームワークの導入
- (3) 接続状況の変化しない仮想ネットワーク上でのパケットの経路制御

| | |
|---|--|
| 1 | ガイダンス・OpenFlowとは |
| 2 | ネットワークの構成要素・プロトコルとは・OSI参照モデル・TCP/IPとOSI参照モデル データリンク層・イーサネット・MACアドレス |
| 3 | 通信方式の種類・パケットヘッダとパケットの送受信処理 ネットワーク層とデータリンク層の関係・IPプロトコル |
| 4 | OpenFlowの概略・OpenFlowコントローラとスイッチ・フレームワークTrem ダムハブの作成 |
| 5 | ダムハブの改造(packet_in,flow_mod,ポート番号のマッチングルール) |
| 6 | ラーニングスイッチの作成(パケットヘッダのIPのマッチングルール) |
| 7 | 簡易ルーターの作成(ポート番号とパケットヘッダの複合ルール) |
| 8 | 簡易ルータの改造・課題の説明(port_statusイベントハンドラ) |

図 3 情報基礎特論第2の事前学習

Fig. 3 Advanced Information Fundamentals 2

(4) 接続状況の変化する仮想ネットワーク上でのパケットの経路制御

以後、これらの具体的な内容について説明する。また、概要を図 3 に示す。

4.2 TCP/IP の知識などの事前知識についての学習

講義の最初の 3 コマは、TCP/IP における従来ネットワークのパケットヘッダ等の前提知識の習得と、SDN および OpenFlow プロトコルについての基礎的な知識を学習する。これらの知識をもとに、OFC のアプリケーション開発フレームワークの導入を行う。

4.3 OFC 開発フレームワークの導入

4~6 コマ目の講義では、OFC 開発フレームワークのひとつである Trem を用いた基礎的なネットワークの制御実習を行う。最終的な課題である接続状況の変化する OFC のアプリケーション開発を行うために、OFC による接続状況の変化の検知や、OFS への基礎的なパケット制御ルールの書き込みなどを行う必要がある。この段階の実習では TCP/IP ネットワークにおける L2 スイッチ、ダムハブの機能をもつ OFC のアプリケーション接続状況を検知する OFC のアプリケーションを実際に作成する。これにより、最終課題において必要な OFC の機能実装の基礎が習得される。

4.4 接続状況の変化しない仮想ネットワーク上でのパケットの経路制御

講義の 7 コマ目では、最終課題において用いる仮想ネットワークにおける SDN による静的ルーティングを行う。

| チーム名 | 通信の疎通率(%) | |
|------|-----------|-----|
| | 第1回 | 第2回 |
| A | 85 | 82 |
| B | 91 | 100 |
| C | 74 | 47 |
| D | 97 | 92 |
| E | 90 | 96 |
| F | 95 | 100 |
| G | 97 | 100 |
| H | 96 | 100 |
| I | 96 | 99 |
| J | 94 | 100 |
| K | 88 | 92 |
| L | 76 | 64 |
| M | 80 | 64 |
| N | 88 | 100 |

通信の疎通率=学習者の評価点の合計/完全な通信疎通を実現した場合の評価点の合計×100

図 4 SDN コンテスト実習における得点評価

Fig. 4 Score evaluation in SDN contest training

この段階により、SDN を用いて従来のネットワークと同等な機能を実装するスキルを習得する事ができる。

4.5 接続状況の変化する仮想ネットワーク上でのパケットの経路制御

講義の 8 コマ目では、前段階において行われた静的ルーティングに加え、接続状況の変化に応じて制御ルールを書き換える事で、通信の疎通を行う事を目標として実習を行う。この段階においては、第 1 段階において習得した接続状況の変化を検知する OFC のアプリケーションの機能を応用し課題を達成する。

5. 学習者の提出課題の得点評価

今回の SDN コンテスト実習において、第 1, 第 2 課題ともに提出したのは 14 グループであった。14 グループが 2 回の SDN コンテスト実習において提出した OFC アプリケーションの通信疎通率についてまとめたものが図 4 である。第 1 課題においては、ネットワークの接続状況変化は切断のみであるが、第 2 課題においては再接続の変化を加える事を許可しているため、課題の難易度が上昇している。しかしながら、8 グループの通信の疎通率が上昇しており、5 グループが 100 %の通信疎通率を達成した。

さらに、疎通率が上昇したグループにおいては、幅優先探索などのアルゴリズムを利用し、より汎用的なネットワーク制御を行っているものも確認できた。

以上から、本提案により、学習意欲の維持が行われていると考えられる。

6. おわりに

SDN を用いたネットワーク学習において、コンテスト形式での課題達成実習を提案し、実際の授業に対し導入を行った。本稿で提案する SDN コンテスト実習は、学習者がペアを組み、2 週間程度の課題作成期間の中で、接続状況の

変化する仮想ネットワークの制御を行うアプリケーションを開発するものである。また、学習者がSDNの実習を行うにあたって必要なスキルを習得できるように、カリキュラムのデザインを行った。その結果、提出課題のパフォーマンス評価から半数以上のグループがSDN コンテスト実習において学習意欲を維持できている事が確認できた。

今後は、課題を完全に達成できている学習者と、そうではない学習者の提出したソースコードそれぞれについての傾向の分析と、分析結果からの課題内容の改善を行う予定である。

参考文献

- [1] Open Networking Foundation: Open-Flow Switch Specification(online), 入手先: <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onfspecifications/openflow> (2013.11.12).
- [2] 長谷川剛: 情報ネットワーク学演習 2(online), 入手先: <http://koan.osaka-u.ac.jp/syllabus-ex/> (2013.11.12).
- [3] Prof. Young H. Cho: Internetworking and Distributed Systems Laboratory, 入手先: <http://web-app.usc.edu/soc/syllabus/20123/30073.pdf> (2013.11.12).
- [4] 西嶋崇, 井口信和: 協調演習を可能とする仮想マシンを活用した分散型 IP ネットワーク構築演習支援システム, 平成 23 年度情報処理学会関西支部 支部大会 Vol. 2011-CE-109 No. 2.
- [5] 孫萩, 孫一, 柏木治美, 大月一弘: 視覚的なネットワーク学習のためのシステム構築方法の検討, 情報処理学会研究報告 Vol. 2011-CE-109 No. 2.
- [6] 松永賢次, 井上和博, 小林良太, 本田智史: 2011 年国際大学対抗プログラミングコンテストの報告, 専修ネットワーク&インフォメーション No. 21, 2013.
- [7] 安藤和俊, 伊藤公人, 甲斐充彦, 前田恭伸, 関谷和之: 最短距離 DEA によるプログラミングコンテスト「敢闘賞」の決定, The Operation Research Society of Japan.
- [8] 大西洋平, 富永浩之, 林敏浩, 山崎敏範: 作業過程を重視した LEGO プログラミング演習支援システム GoalPost の提案, 社団法人 電気情報通信学会 信学技法 ET2005-15(2004-06).
- [9] 富永浩之, 川崎慎一郎: 競争型学習を取り入れた入門的 C プログラミング演習-運用実験での実行テスト系列の利用状況-, 情報処理学会研究報告 Vol. 2010-CE-104 No.4.
- [10] 三浦秀一郎, 伊藤恵, 公立はこだて未来大学: 教育の観点から考えるペアプログラミングの有用性, 平成 18 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会.