

## 内部処理の可視化を可能とする

### 仮想マシンを用いたソフトウェアルータの開発

#### Development of Software Router enabling Visualization of Internal Processing utilizing Virtual Machine

宮本 拓†  
Taku MIYAMOTO

井口 信和‡  
Nobukazu IGUCHI

#### 1. はじめに

近年、コンピュータネットワークの普及により、大学等の教育機関においてネットワーク技術者の養成を目的とした教育が実施されている。ネットワークの学習には講義や書籍を用いた学習と実際にネットワーク機器を操作・設定する演習がある。講義や書籍を用いた学習では、ネットワークの基礎知識について学習できる。しかし、実際にネットワーク機器に設定を施すことが無いため、実践的なスキルを修得できない。一方、実際のネットワーク機器を用いた演習では書籍などを用いて学習した知識を実践することで、知識の定着や実践的なスキルの修得が期待できる。そのため、ネットワーク技術者の養成には、実際にネットワーク機器を利用してネットワークの構築経験を積むことが重要となる。

ネットワークの構築演習は、Cisco Systems 社の提供するシスコネットワークアカデミー[1](以下、CNA)に代表される教育カリキュラム等で実施されている。CNA において実施されている構築演習は、ルータやスイッチの設定を繰り返すことによる、知識の定着や技能の修得を目的としている。しかし、構築演習を実施するには複数台のネットワーク機器が必要となるため、機材の確保に加え、機器の管理やメンテナンス、故障時の対応などのコストが発生する。また、課題に応じて複数のネットワーク機器を用意する必要があるため、演習環境を手軽に提供することは困難である。さらに、実機を用いた演習では、書籍を用いた講義とは異なり、ルータの内部処理について学習できない。

ルータの内部処理には、ルーティング、パケット転送処理、キューイングなどがある。我々は、これまでにルーティングの動作について学習するシステムを開発した[2]。本研究ではパケット転送処理の学習を目的とする。この目的を達成するため、これまでに開発した IP ネットワーク構築演習支援システム(NetPowerLab®)[3]上で動作する、内部処理の可視化を可能とするソフトウェアルータ(以下、本ルータ)を開発した。

NetPowerLab は仮想マシンである User Mode Linux(以下、UML)を仮想的なネットワーク機器として動作させ、複数の仮想マシン同士を相互に接続することで、1 台のコンピュータ上で仮想的にネットワークの構築を可能とする。

さらに本ルータを使用することで、ルータ内部で動作する処理の流れを視覚的に確認できる。これにより学習者は、構築したネットワーク上のルータで実行される処理の流れについて学習できる。

#### 2. 関連研究

ネットワーク技術者の育成を目的とした学習環境や仮想マシンを利用した学習システムが開発されている[4-10]。

立岩らは、仮想マシンを用いたネットワーク学習のためのシステムを開発している[11]。本システムと同様に仮想マシンに UML を用いたネットワークの学習システムである。学習の対象は、ネットワークの構築と構築した仮想ネットワーク環境を用いた Web サーバの設定・運用、およびトラブルシューティングである。これに対して本システムの学習対象は、ネットワークの構築経験の蓄積や技能の修得、構築したネットワーク上で動作するルータの内部処理の理解である。

中川らは、Web ブラウザで利用できるネットワーク学習のためのシステムを開発している[12]。こちらは、仮想マシンとして Micro Core Linux を用いたネットワークの学習システムである。学習対象は、IPv4/IPv6 双方のプロトコルを利用したネットワークの構築と構築したネットワーク上での Web サーバの設定・運用である。そのため、本システムとは学習の対象が異なる。また、ネットワークの設定は GUI を用いており、動的にネットワークの設定を変更できない。これに対して本システムでは、コマンドを用いて動的にネットワーク機器の設定を変更し、ネットワークを構築できる。

スタンフォード大学の Casado らは、学習者のコンピュータ上で動作する、仮想ルータを用いたシステムを開発している[13]。仮想ルータは、専用のサーバが提供する仮想トポロジに配置することで、実際のトラフィックを扱える。学習の対象は、インターネットで実際に動作するネットワーク機器の動作理解である。学習者は、ルータや任意のパケット処理装置をネットワーク上に配置し、動作の検証ができる。これに対して本システムは、ネットワーク構築演習用のシステムであるため学習の対象が異なる。

スタンフォード大学の Wendlandt らは Casado らのシステム上で動作する、グラフィカルなルータを開発している[14]。学習の対象は、本研究と同様にルータの内部処理の理解である。しかし、動的ルーティングなどで扱うパケットは独自のもので、実際にネットワーク上を流れているパケットと構造が異なる。これに対して本システムは、実際にネットワークを流れているパケットを扱うため、パケットの構造や内容についても学習できる。

†近畿大学大学院 総合理工学研究科  
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,  
Kinki University

‡近畿大学 理工学部 情報学科  
Department of Informatics, School of Science and Engineering,  
Kinki University

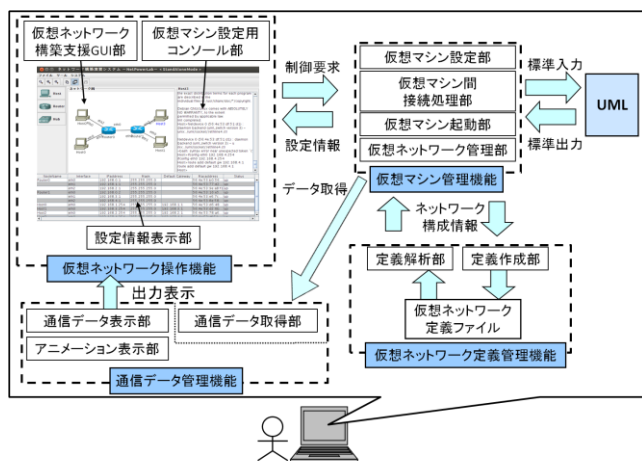


図 1：システム構成図

### 3. IP ネットワーク構築演習支援システム

本章では、IP ネットワーク構築演習支援システムについて述べる。

#### 3.1 概要

IP ネットワーク構築演習支援システムの構成を図 1 に示す。このシステムは、UML を用いて仮想マシンを作成する。仮想マシンをホストやルータなどのネットワーク機器として動作させ、機器に対し設定を施すことで仮想的なネットワークを構築できる。これにより、1 台の PC 上で実際のネットワーク機器を用いた場合と同様のネットワークの構築演習が可能となる。

#### 3.2 機能

UML はコンソールアプリケーションであるため、仮想マシン間の接続状況を把握することが困難である。そのため、直感的にネットワークの構成を把握するための GUI が用意されている。学習者は、この GUI を用いて仮想ネットワーク機器に対して設定を施す。設定できる項目として、ホストでは IP アドレス、デフォルトゲートウェイなどがある。ルータでは、IP アドレスなどのインタフェースの情報、RIP や OSPF などのルーティングプロトコルの設定などが可能である。また仮想マシン間の通信データは全てホスト OS 上に保存しており、仮想ネットワークでやりとりされたパケットの情報を一元管理できる。さらに、仮想ネットワークの定義ファイルを作成することにより、ネットワーク構築作業の中断・再開を可能とする。以下、機能の詳細について述べる。

##### 3.2.1 仮想ネットワーク構築支援 GUI

学習者は、仮想ネットワーク構築支援 GUI(以下、構築支援 GUI)を用いてネットワークを構築する。構築支援 GUI は、仮想ネットワークのトポロジを表示する「ネットワーク図表示部」と仮想マシンの一覧と各仮想マシン設定情報を表示する「機器情報一覧表示部」、仮想マシンの設定コマンドの入力と仮想マシンからの出力を表示するための「コンソール部」と仮想ネットワーク機器を追加するための機器追加パネルから構成される。

学習者は構築支援 GUI を用いて、ネットワークの構築演習を実施する。機器を追加するには機器追加パネルから任意の機器をネットワーク図表示部にドラッグアンドドロップする。機器が追加されると、その機器の標準出

力がコンソール部に表示される。このコンソールにコマンドを入力することで、機器に対し設定を施す。またネットワーク図表示部から機器をコンソール部へドラッグアンドドロップすることで設定する機器を変更できる。機器に対する設定情報の変更は、機器情報一覧に反映される。

##### 3.2.2 仮想マシン管理機能

仮想マシン管理機能は、仮想マシンを起動する「仮想マシン起動部」と仮想マシンに設定を反映させる「仮想マシン設定部」、仮想マシン間を接続する「仮想マシン間接続処理部」、および「仮想ネットワーク管理部」から構成される。

仮想マシン設定部は、仮想マシンの標準入出力と、構築支援 GUI のコンソール部を連結する。これにより、コンソール部に入力されたコマンドを仮想マシンの標準入力に渡す。また、仮想マシンの標準出力は、実行結果としてコンソール部に出力される。

##### 3.2.3 通信データ管理機能

通信データ管理機能は、仮想ネットワーク上でやりとりされるデータをキャプチャする「通信データ取得部」、およびキャプチャした通信データを表示する「通信データ表示部」、キャプチャした通信データを使用することで通信を再現する「アニメーション表示部」から構成される。

通信データ取得部は、各仮想ネットワーク機器のネットワークインタフェースを通過する通信データを取得する。取得した通信データは通信ログファイルとして保存される。通信データ表示部、アニメーション表示部は、この通信ログファイルの内容を解析することで様々な形式での表示を可能とする。通信データ表示部では、パケットのヘッダ情報をプロトコルフォーマットに従って表示する。アニメーション表示機能では、パケットが流れる様子をアニメーションで確認できる。

##### 3.2.4 仮想ネットワーク定義管理機能

仮想ネットワーク定義管理機能は、「仮想ネットワーク定義作成部」と「仮想ネットワーク再現部」から構成される。仮想ネットワーク定義作成部は、構築した仮想ネットワークの構成を XML(Extensible Markup Language)で定義した Network Defined File(以下、NDF)として保存する機能である。NDF では、IP アドレスやルーティング等のネットワーク機器の設定やインタフェースの接続情報を保存している。これを解析することで、ネットワークを再現できる。

NDF を XML で記述することで「機器名」の下に「設定情報」を配置するといった階層構造をとることができる。階層構造を作成することで、定義ファイルからネットワークを再現する際、機器ごとの設定情報を取り出す作業が容易になる。さらに、構築した仮想ネットワークの情報を XML による 1 つの NDF として保存するため、作成した NDF の配布が容易になる。

仮想ネットワーク再現部は、NDF を読み込むことで、システム上で仮想的なネットワークを構築する。これにより、構築作業の中断・再開や、指導者が作成した模範解答からネットワークを再現することが可能となる。



図 2：ルーティングアップデート確認用 GUI

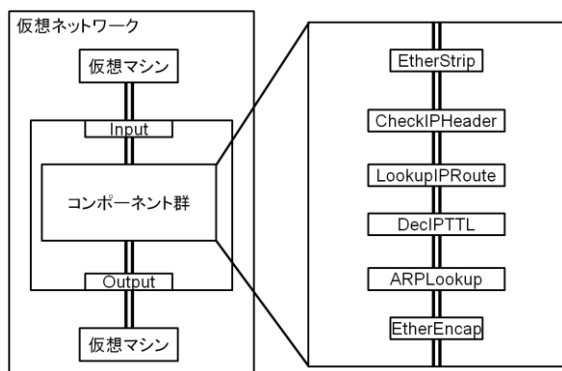


図 3：本ルータの構成例

#### 4. ルーティングアップデート可視化機能

これまでに開発したルーティングアップデート可視化機能について述べる。この機能は、学習者自身が構築したネットワーク上で動作する動的ルーティングの更新メッセージの確認を可能とする。また、更新メッセージの受信による、ルーティングテーブルの変化をリアルタイムに確認できる。これにより、ルーティングプロトコルの動作について学習できる。

この機能は、IP ネットワーク構築演習支援システムの通信データ管理機能を用いて、仮想ネットワーク上を流れる全てのパケットをキャプチャする。キャプチャしたパケットのうち、ルーティングアップデートに関係するものだけを解析し、図 2 に示すルーティングアップデート確認用の GUI に情報を表示する。この GUI を参照することで、ネットワーク上の全てのルータが受信したルーティングプロトコルの更新メッセージを確認できる。GUI 上に表示される更新メッセージの情報は、ルーティングプロトコルや、宛先ネットワークの情報などがある。これらの情報とルーティングテーブルの変化を確認することで動的ルーティングの動作を確認できる。

実際のネットワーク機器を用いてルーティングアップデートの情報を確認するには、全てのルータでパケットをキャプチャし解析する必要がある。これに対してルーティングアップデート可視化機能では、ネットワークを流れる全てのパケットを自動でキャプチャし解析する。また、全てのルータのルーティングテーブルと受信した更新メッセージの履歴を一括して確認できる。これにより、学習者は自身が構築したネットワーク上で動作するルーティングアップデートについて容易に確認できる。

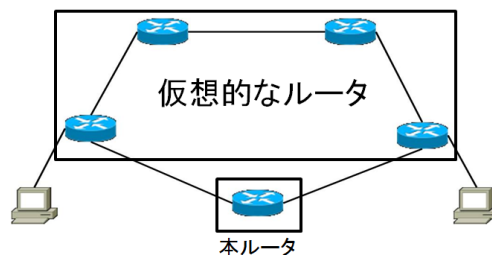


図 4：実験用トポロジ

#### 5. 内部処理可視化ルータ

今回開発したルータの内部処理の可視化を可能とするソフトウェアルータについて述べる。本ルータは、ルータ内部で行われる処理を分割し、それぞれの処理をコンポーネントとして扱う。このコンポーネントはパケットを受信する処理を実行するものや、パケットに Ether ヘッダを付加する処理を実行するものなどがある。各コンポーネントは、パケットを受け取ると自身に割り当てられた処理を実施する。その後、次のコンポーネントにパケットを渡すことでルータとして動作する。この動作の流れを GUI 上に表示することでルータの内部処理の流れについて視覚化する。これらの機能は、Java 言語を用いて開発した。

また、内部処理はコンポーネントの組み合わせで決定するため、自由に処理手順を変更できる。図 3 に本ルータの構成の一例を示す。本ルータは仮想ネットワーク機器と同様に接続される。図 3 のコンポーネント群に各コンポーネントを配置し、接続することでパケットに対する処理を決定する。図 3 では、パケットを受信すると EtherStrip で Ether ヘッダを取り除き、CheckIPHeader で IP ヘッダを確認する。その後 LookupIPRoute が、ルーティングテーブルを参照し宛先を決定する。DecIPTTL が IP ヘッダの TTL フィールドの値を 1 減少させ、ARPLookup が ARP テーブルを参照し、宛先 MAC アドレスを決定する。最後に、EtherEncap が Ether ヘッダを付加し、パケットを送信する。この処理の流れを学習者自身が組み立てることで、任意の処理手順のパケット処理装置を作成できる。また、IP ネットワーク構築演習支援システムを用いることで、実際にパケットに対して行われるルータの処理について確認できる。これらの機能を用いることで、学習者はルータの内部処理の流れを視覚的に確認できる。

#### 6. 動作実験

本ソフトウェアルータについての動作実験を実施した。以下に実験方法とその結果について述べる。

今回の動作実験では、ルータ 3 台を直列に接続したネットワークにおいて中心のルータに本ソフトウェアルータを配置し、その他の 2 台については既存の仮想的なルータを配置した。このネットワークにおいて静的ルーティングを用いてルーティングテーブルを設定し、両端のルータ同士でパケットを交換した。この時、中央に配置したルータにおいて、ルータの内部処理について確認した。これにより、ルータ内部の処理の流れを動的に閲覧できることを確認した。この結果、パケット転送処理について期待した動作をしていることがわかった。

また、動的ルーティングが正しく動作しているかを検証するために仮想的なルータ 4 台、本ルータ 1 台、ホスト

2 台から構成される RIP ネットワークを構築した(図 4). このネットワークにおいて, 仮想ルータとルーティング情報を交換し, 正しくルーティングテーブルが更新されているかを確認した. この結果, ルーティングテーブルが正しく更新されていることを確認した. また, ホスト間の通信においてホップ数の少ないルートを選択していることを確認できた. これにより, 本ルータを用いた場合でも実機と同様に動的ルーティングが動作することを確認できた.

## 7. おわりに

本研究では, 仮想的なネットワークを用いて内部処理の可視化に対応したソフトウェアルータを開発した. 本ルータを IP ネットワーク構築演習支援システムと共に使用することで, 学習者自身が構築したネットワーク上のルータの内部処理について確認できる. これにより, 書籍を用いた学習でしか確認できなかった, ルータの内部処理についてネットワークの構築演習環境上で確認できる. また実際にパケットを交換させることで, ネットワークを流れるパケットに対する処理の流れを動的に確認できる.

しかし, 今回開発したソフトウェアルータでは, ルータの機能の全てを実装できていないため, OSPF に対応していないなど処理内容に制限がある. また, キューイングなどの処理についても確認できない.

そこで今後の予定として, ソフトウェアルータの機能拡張を行う必要があると考える. また, 今回の実験は, 想定通りに動作しているかを検証するものである. そのため, 実際にルータの内部処理の理解に役立つかの検証はできていない. そのため, 本ルータの評価実験についても今後行う必要があると考える.

## 文 献

- [1] Cisco Systems: Cisco Networking Academy,  
<http://www.cisco.com/web/learning/netacad/>
- [2] 宮本拓, 北澤友基, 井口信和, “仮想マシンを活用したルーティングアップデートの学習システム”, 信学技報, ET2013-4, pp17-22, May.2013.
- [3] 井口信和, “仮想ルータを活用したネットワーク構築演習支援システムの開発”, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3, pp.1412-1413, Mar.2011.
- [4] 早川正昭, 丹野克彦, 山本洋雄, 中山実, 清水康敬, “LAN 構築シミュレータの開発と教育手法の改善”, 教育システム情報学会第 26 回全国大会講演論文集, Vol.E5-4, pp.367-368, 2001.
- [5] 宮地利幸, 三輪信介, 長谷川忍, 丹康雄, 篠田陽一, “StarBED を利用したネットワーク体験演習環境の構築”, 日本教育工学会論文誌 34(3), pp.235-248, 2010.
- [6] Abler,R. ,Contis,D. ,Grizzad,I. and Owen, H. “Georgia tech information security center hands-on network security laboratory”, Education, IEEE Transactions, Vol.49, No.1, pp.82-87, Feb.2006.
- [7] Bruce,K. and Ilona,B. “A Virtual Learning Environment for Real-World networking”, Proceeding of Informing Science + IT Education Conference 2003 (2003).
- [8] Steve,L. ,Willis,M. and Wei, Z. “Virtual Net-Working Lab(VNL):its concepts and implement-tasion ”, Proceedings of the 2001 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition (2001).
- [9] Fermin,G. and David,F. “ Distributed Virtualization Scenarios Using VNUML ”, Proceedings of the First System and Virtualization management Workshop(SVM'07) (2007).
- [10] Benjamin, A. and Thomas, E.D. “Xen Worlds:Xen and the Art of Computer Engineering Education ”, Proceedings of 2006 ASEE Annual Conference and Exposition (2006).
- [11] 立岩祐一朗, 岩崎智弘, 安田孝美, 高橋直久, “高機能仮想ハブによる異種構成・分散配置型仮想マシンネットワークの実現とネットワーク構築演習への応用”, 信学論(D), J94-D(5), pp.791-802, May.2011.
- [12] 中川泰宏, 浮貝雅裕, “LAN 管理者教育におけるクラウド型学習支援環境の開発”, 信学技報, Vol.111, No.394, ET2011-88, pp.1-6, Jan.2012.
- [13] Casado M. & Mckeown, N. (2005). The Virtual Network system. The Proceedings of the 36<sup>th</sup> SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education(SIGCSE'05), pp.76-80.
- [14] Wendlandt D. (2005). Clack: A Graphical Router Toolkit for Networking Education. May.2005.