

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

立岩佑一郎^{†a)} 岩崎 智弘^{††} 安田 孝美^{††} 高橋 直久[†]

Development of Heterogeneous and Distributed Virtual Machine Network Based on Sophisticated Virtual Hub and Its Application to Network Construction Exercise

Yuichiro TATEIWA^{†a)}, Tomohiro IWASAKI^{††}, Takami YASUDA^{††},
and Naohisa TAKAHASHI[†]

あらまし 近年、仮想マシンによるネットワーク（以下、仮想マシンネットワーク）がネットワーク構築演習に使われている。我々は、インターネット経由での参加が可能で、大規模なネットワークを管理する演習を実施したい。この演習環境の実現のためには、拡張性に優れた仮想マシンネットワークが重要である。そこで、異なる種類の仮想マシンにより計算機リソースを有効利用した仮想マシンネットワークを、インターネットに接続された計算機にわたって構成する方法に着目する。しかし、このネットワークを実現する従来手法は、仮想マシンの改造が必要であるもの、異なる NAT 環境下の計算機間で仮想マシンネットワークを実現できないものなど、ネットワーク規模の拡張性の問題をもつ他に、演習にて必要であるリピータハブとして使用できない。また、仮想マシンのユーザインタフェースの転送表示ができないこと、仮想マシンネットワーク構成のためのユーザの作業が煩雑であることにおいて演習に適さない。本研究では、これらの問題を解決する方法を提案し、高機能仮想ハブの開発と仮想マシンネットワーク構成支援機能の開発によるネットワーク構築演習環境システムを実現する。

キーワード 仮想マシン、仮想マシンネットワーク、ネットワーク構築演習、オーバーレイネットワーク

1. ま え が き

仮想マシンの発達と計算機の性能向上により、計算機上に複数の仮想マシンを稼働させ、複数のサーバ計算機の代替とするサーバインテグレーションが広く行われるようになってきた。一方、複数の仮想マシンを接続したネットワーク（以下、仮想マシンネットワーク）を実現してネットワーク管理演習に利用する試みも行われている。仮想マシンネットワークは、比較的容易に仮想マシン数を増加できるため、実ネットワークに比べてネットワーク規模の拡張性に優れたネットワーク管理演習環境を実現できる。また、仮想マシンネットワークの稼働サーバにインターネットからア

クセス可能とすることにより、教育機関の演習室だけではなく、自宅などの遠隔地からの演習参加も可能なネットワーク管理演習環境を実現できる。

我々は、サーバ、クライアント、ルータ、スイッチングハブ、リピータハブから構成されるネットワークにおいて、サーバの構築、IP ネットワークの構築、ネットワーク性能評価、トラブルシューティング、アクセス制御などからなるネットワーク構築演習を実施している。この中には複数の学習者がそれぞれ構築した IP ネットワークを接続して大きなネットワークを構築するような共同作業を伴う演習も含まれる。これらの演習を大学の演習室だけでなく、授業時間外の課題や自習などのために学内の他の部屋や自宅からインターネットを介して演習に参加できるようにしたい。

この演習環境の実現のためには、拡張性に優れた仮想マシンネットワークが重要である。そこで、計算機リソースの消費量と機能の異なる仮想マシンの混在により計算機リソースを有効利用した仮想マシンネットワークを、インターネットに接続された計算機にわ

[†] 名古屋工業大学, 名古屋市

Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

^{††} 名古屋大学, 名古屋市

Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

a) E-mail: tateiwa@nitech.ac.jp

たって構成する方法に着目する。しかし、このネットワークを実現する従来手法は、(1) 異種の仮想マシンを接続するリピータハブとして使用できない、(2) 異種の仮想マシンのネットワークデータを NAT 環境で交換するために仮想マシンの改造を必要としてしまうので、プロプライエタリの仮想マシンには適用しづらい、(3) 仮想マシンのユーザインタフェースを転送できないため演習に不向き、(4) インターネットにわたる仮想マシンネットワークの構成の学習者の作業負担が大きという問題を有している。

本研究では、以下の提案により問題点 (1)~(4) を解決する。

(A) 仮想マシンのネットワークデータをカーネル空間で取得・転送・付与する仮想ハブの実現方法 (問題点 (1) に対応)

(B) イーサネットトンネルとトンネル中継サーバにより、方法 A による仮想マシンネットワークをインターネットに接続する計算機間にわたって構成する方法 (問題点 (2) に対応)

(C) イーサネットトンネル、及びトンネル中継サーバにより仮想マシンのユーザインタフェースをインターネットに接続する計算機間で転送表示する方法 (問題点 (3) に対応)

(D) ネットワークを経由して各計算機を制御し、仮想マシンネットワークの構成に必要な情報の収集、及び自動的に仮想マシンネットワークを構成する方法 (問題点 (4) に対応)

本研究では、方法 (A), (B), (C) を高機能仮想ハブとして実現し、方法 (D) の機能と統合したネットワーク管理演習システムを、インターネットに接続された Linux OS の計算機により実現する。学習者は、インターネットに接続された計算機に分散して稼動させた異なる種類の仮想マシンから構成される仮想マシンネットワークを使用できるようになる。以下、本論文では異種の仮想マシンからなる仮想マシンネットワークを異種構成型仮想マシンネットワーク、複数の計算機に分散した仮想マシンからなる仮想マシンネットワークを分散配置型仮想マシンネットワークと呼ぶ。

2. 関連研究

従来の仮想マシンネットワークの実現手法は、(1) 単一計算機上の同種仮想マシン群 [1]~[4]、(2) 単一計算機上の異種仮想マシン群 [5]、(3) クラスタ計算機上の同種仮想マシン群 [6]、(4) LAN 内の複数計算機上

の同種仮想マシン群 [7]~[9]、(5) インターネットの複数計算機上の異種仮想マシン群 [10]~[12] によるものがある。仮想マシンネットワークの規模の拡張性は、仮想マシンの稼動する計算機を配置するネットワークのエリアの広さ及び仮想マシンネットワークを構成する仮想マシンの種類の多さに比例する。前者は、仮想マシンネットワークのための計算機の条件の緩和になるからである。後者は、様々な仮想マシンの組合せによる計算機リソースの消費効率の良い仮想マシンネットワークを構築できるからである。

(5) による仮想マシンネットワークの規模の拡張性は (1), (2), (3), (4) より高いといえる。しかし、VNET [10] は仮想マシン間をポイントツーポイントで接続するものであり、VIOLIN [11] は異なる NAT 環境に属する計算機間で仮想マシンネットワークを実現できず、VIOLIN, VDE [12] は仮想マシンの改造によりサポート可能となるため、プロプライエタリな仮想マシンへの適用が困難であるという問題点がある。加えて、VNET, VIOLIN はリピータハブとして異種の仮想マシン間を接続する機能を有していないため、本研究の目的とする演習を行えない。

また、ネットワーク管理演習のための仮想マシンネットワークとしては、仮想マシン間の TCP/IP 通信及び仮想マシンのユーザインタフェースのユーザへの提供を実現することが必要である。(1), (3), (4) は演習環境のためのシステムとして実現されているが、(5) は仮想マシン間のネットワーク通信の実現にとどまっており、仮想マシンのユーザインタフェースの転送表示ができないこと、仮想マシンネットワーク構成のためのユーザの作業が煩雑であることにおいて演習に適さない。

本研究では、(5) に属するシステムの問題点を解決する手法を提案する。この手法は、異なる NAT 環境に属する計算機間でも仮想マシンネットワークを実現可能とし、多くの仮想マシンをサポートし、異なる NAT 環境に属する計算機間で仮想マシンのユーザインタフェースを転送表示可能で、学習者の作業負担の少ない仮想マシンネットワーク構成を可能とする。

3. 想定しているネットワーク管理演習

本研究で想定しているネットワーク構築演習は、大学の工学部情報系の演習授業であり、初学者が数台のネットワーク機器から構成される LAN を構築できるようになることを目的としている。個々の学習者がサ

表 1 ネットワーク構築演習の内容

Table 1 Contents of network construction exercise.

演習項目
A) サーバの構築
B) IP ネットワークの構築
C) ネットワーク性能評価
D) トラブルシューティング
E) アクセス制御
使用機材
サーバ
クライアント
ルータ
スイッチングハブ
リピータハブ
ネットワークケーブル

ブネットを構築し、複数のサブネットでは LAN を構築し、複数の LAN で WAN を構築する。

受講者数は 50 人程度で、各受講者にはインターネットに接続された計算機が少なくとも 1 台割り当てられる環境である。また、各々の学習者は自宅でもインターネットに接続された計算機を使用可能な状況である。個々の学習者が最大で 10 台程度の仮想マシンネットワークを構築でき、最大で 50 人程度の学習者の仮想マシンネットワークを接続した仮想マシンネットワークを構築できる必要がある。演習内容を表 1 に示す。(A) は、OS インストール、サーバソフトウェアの設定などである。(B) は、機器の IP アドレス割当やサブネット間の経路制御である。(C) は、スループットの測定である。(D) は、tracertoute や tcpdump などのネットワーク診断ツールによるトラブル解決である。(E) は、パケットフィルタリングや DMZ の構築である。

したがって、仮想サーバとしてイーサネット通信が可能で PC/AT 互換機をシミュレートする仮想マシン、仮想クライアント及び仮想ルータとしてイーサネット通信が可能で LinuxOS をシミュレートする仮想マシン、以上二つの仮想マシンのイーサネットフレームを中継処理する仮想スイッチングハブ及び仮想リピータハブが必要となる。仮想スイッチングハブだけでなく、仮想リピータハブを必要とする理由は、ネットワークに流れるネットワークデータをキャプチャして解析する演習を行うためである。

4. システムの実現方法

4.1 システム構成

本論文では、ネットワーク構築演習での利用を目的とした以下の特徴をもつ仮想マシンネットワークの実現方法を提案している。

- 異なる種類の仮想マシンから構成される仮想マシンネットワーク
- インターネットに接続された計算機にわたって構成される仮想マシンネットワーク
- 仮想マシンのユーザインタフェースをインターネットに接続する計算機間で転送表示する仮想マシンネットワーク
- 構成支援のある仮想マシンネットワーク

図 1 はインターネットにおける本システムの構成で、図 2 は計算機上におけるシステムの構成である。図 1 下段 (Hardware Environment) のハードウェア環境において、図 1 上段 (Virtual Machine Network) の仮想マシンネットワークを構成するために、図 1 中段 (Software Process) のようにソフトウェアが動作する。PC-A, PC-B, PC-C, PC-D は Linux OS の計算機であり、インターネットに接続されている。PC-A と PC-D はインターネットからアクセス可能であるが、PC-B と PC-C は NAT 環境に属するため不可能である。

1. で述べた方法 (A) に基づく高機能仮想ハブ (Sophisticated Virtual Hub) により、PC-B と PC-C では異なる種類の仮想マシンのネットワークデータが交換される。これは図 2 におけるハブモジュール (Hub Module) とハブモジュールコントローラ (Hub Module Controller) により実現される。この手法の詳細を 4.2 に述べる。

方法 (B) に基づく高機能仮想ハブにより、PC-A の仮想マシンプロセス (図 1) は、PC-B の学習者の仮想マシンネットワークを構成できる。また、PC-B と PC-C は相互にネットワークアクセス不可能であるが、PC-D の高機能仮想ハブを経由して PC-B と PC-C の仮想マシンネットワークは相互に通信できる。また、方法 (C) に基づく高機能仮想ハブにより、この仮想マシンのユーザインタフェースは PC-B に表示される。これらは、図 2 のトンネルコントローラ (Tunnel Controller) により実現される。この手法の詳細を 4.3 に述べる。

方法 (D) に基づく仮想マシンネットワーク構成支

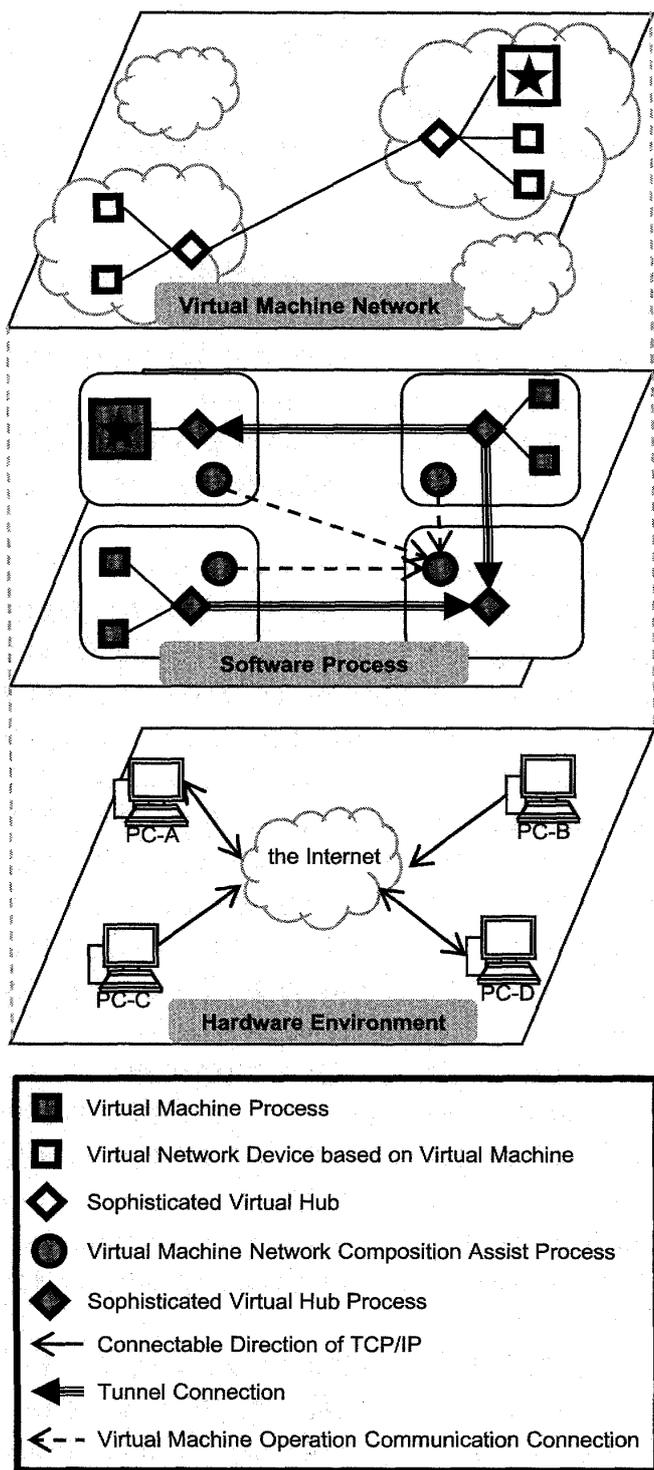


図1 インターネットにおけるシステム構成
Fig.1 System structure in the Internet.

援機構 Virtual Network Composition Assist (図1 及び図2, ただし図1ではプロセスを明示するため Process を名前末尾に付加している) により, 各計算機において分散配置型仮想マシンネットワークの構成に必要な情報の収集, 仮想マシンの制御, 及び高性能仮想ハブの制御がネットワークを経由して行われ, 学

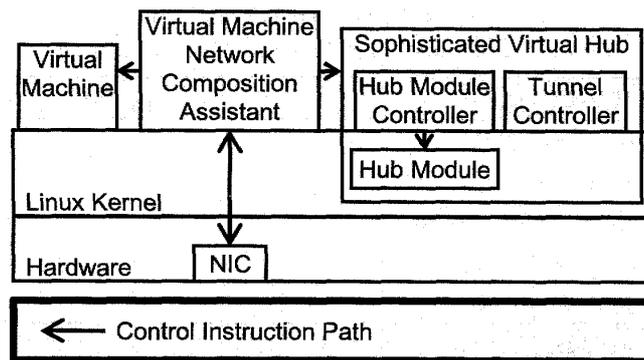


図2 計算機上のシステム構成
Fig.2 System structure in a computer.

習者の分散配置型仮想マシンネットワークの構成作業が支援される。この詳細を4.4に述べる。

4.2 異種構成型仮想マシンネットワーク

仮想マシンには完全仮想化, 擬似仮想化, OS 仮想化がある。完全仮想化はどんな OS でも修正せずに仮想サーバ上にインストールすることができる。擬似仮想化は OS に手を加えることでインストールすることができる。そのため, 手を加えることが可能なオープンソースの OS に限定される。OS 仮想化は, 仮想マシンを稼働させる計算機と同じ OS を動作させる。計算機リソースの消費量は, 完全仮想化, 擬似仮想化, OS 仮想化の順に少なくなる。

このため, 目的に合わせて種々の仮想マシンを選び, それらによる仮想マシンネットワークを実現することが, ネットワーク規模の拡張を可能にする。しかし, 各仮想マシンに付属するツールは, 同種の仮想マシンによる仮想ネットワークを実現できるが, 異種の仮想マシンでの仮想ネットワークの構築をサポートしていない。また, 2.にて述べた従来手法((2)及び(5))は, VDEを除き, リピータハブとして動作しないため, 表1にて示した演習内容を完遂できない。VDEは仮想マシンの改造によりサポート可能となるため, プロプライエタリな仮想マシンへの適用が困難である。

本研究では, Linux上で動作する仮想マシンの多くが, Linuxカーネルのイーサネットブリッジングをサポートするネットワークインタデバイス Linuxカーネルに作成することに着目し, Linuxカーネル空間で仮想マシンのネットワークデータを取得・転送・付与することでリピータハブ機能とスイッチングハブ機能をもつ仮想ハブの実現方法を提案する。VNET, VDEのようにカーネル空間に存在する仮想マシンのネットワークデータをユーザ空間に転送して, 再びカーネル

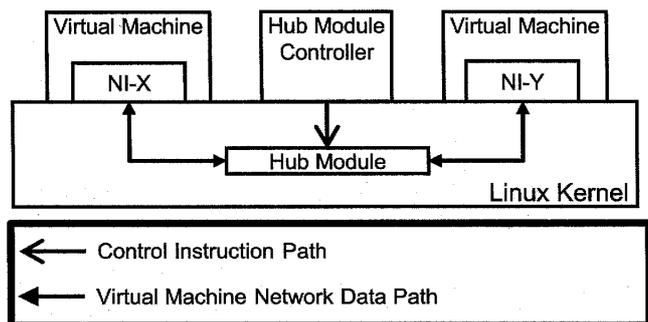


図3 ハブモジュールによる異種の仮想マシンのネットワークデータの高速転送

Fig. 3 High-speed transfer of network data between heterogeneous virtual machines by hub module.

空間に転送することはオーバーヘッドとなるため、提案方法と比較してネットワークスループットが遅くなると考えられる。表1に示した演習内容では大きなサイズのデータを取り扱うことはないため影響は小さいが、例えば、ストリーミングサーバの構築演習などを将来的に取り入れられてもよいように、できるだけ高速な手法により実現する。

本研究で開発するリピータハブ機能の動作は、接続された仮想ネットワーク機器から受け取ったネットワークデータを、接続されているその他の機器すべてへ送信するものである。また、スイッチングハブの動作は、接続された仮想ネットワーク機器から受け取ったネットワークデータを、MACアドレスに従った仮想ネットワーク機器へ送信するものである。

図3に示すように、Linuxカーネルのモジュールとしてハブモジュール(Hub Module)を開発し、それを制御するための機能(Hub Module Controller)を高機能仮想ハブに開発した。仮想マシンのネットワークインタフェース(NI-X, NI-Y)に対応したLinuxカーネル内のデバイスからのデータに対し、ハブモジュールはスイッチングハブやリピータハブとして振る舞う。ハブ制御プロセスはハブモジュールに対して、ハブ空間の作成、スイッチモード/リピータモードの設定、仮想マシンのネットワークインタフェースの登録を行う。

4.3 分散配置型仮想マシンネットワーク

各学習者の計算機上に構築された仮想マシンネットワークを接続することで、ネットワークを接続して大きなネットワークを構築するような共同作業を伴う演習を行える。また、ある学習者の計算機では計算機リソース不足のために稼動困難な仮想マシンを、別の計

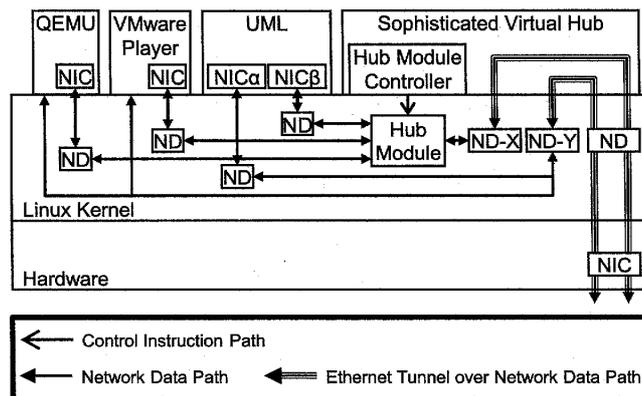


図4 トンネルによる仮想マシンのネットワークデータ及びユーザインタフェースデータの転送

Fig. 4 Transmission of network data and user interface data of a virtual machine by tunnels.

算機にて委託稼動させて、その学習者の管理する仮想マシンネットワークを構成することができる。インターネットに接続されている計算機に仮想マシンを委託稼動させられることは、ネットワーク規模の拡張性が優れた仮想マシンネットワークの実現に大いに役立つと考えられる。

一般的に、異なる計算機上の仮想マシン間でイーサネット通信をするには、それらの計算機が同一セグメントのネットワークに接続していることが必要である。しかし、本研究では、インターネットに接続された計算機を想定している。このため、イーサネットトンネルとトンネルを中継するサーバ(トンネル中継サーバ)により、インターネットに接続する計算機間にわたった仮想マシンネットワークの構成方法を提案する。このイーサネットトンネルはイーサネットブリッジングをサポートするネットワークデバイスをトンネルの両端にもつものである。

また、参加先の仮想ネットワークの計算機と参加対象の仮想ネットワークの計算機が設定変更不可能な異なるNAT環境下にあるとき、両者をイーサネットトンネルで直接接続できないことが問題となる。この場合、両者からトンネル接続を確立できる計算機にトンネル中継サーバを構築する。中継サーバにおいて双方の計算機から確立したトンネルをハブモジュールにより接合することで、両者の計算機間にデータ通信のネットワークを実現する。

図4に示すように、トンネルのネットワークデバイス(ND-X)をハブモジュールに登録することで、ハブモジュールに登録されているネットワークデバイスをもつ仮想マシン(図中のUML [13], VMware

Player [14], QEMU [15]) のネットワークデータをトンネル (以下, 仮想マシンネットワークトンネル) を経由して計算機間で交換できる. すなわち, スイッチングハブかリピータハブとして動作する仮想ハブに, 同一計算上の仮想マシンだけでなくインターネットに接続された異なる計算機上の仮想マシンを接続した仮想マシンネットワークを構築できる.

異なる計算機上の仮想マシンで仮想マシンネットワークを構成することに加え, 計算機間で仮想マシンのユーザインタフェースを転送することで, 学習者の管理するネットワークの規模を大きくできる. 委託仮想マシンのユーザインタフェースを委託元計算機の X サーバに描画させるためには, 委託先計算機から委託元計算機の X サーバに対して X11 接続できる必要がある. しかし, 集合住宅 LAN などの NAT 環境下の委託元計算機の場合, 学習者が NAT 設定を変更できないことが一般的であり, 先述の X11 接続を行えないことが問題となる. この場合, 委託先計算機に委託元計算機からイーサネットトンネルで接続し, X11 通信用のネットワークを実現する. また, 委託先計算機と委託元計算機が設定変更不可能な異なる NAT 環境下にあるとき, 両者をイーサネットトンネルで直接接続できないことが問題となる. この場合, 両者からトンネル接続を確立できる計算機にトンネル中継サーバを構築する. 中継サーバにおいて双方の計算機から確立したトンネルをハブモジュールにより接合することで, 両者の計算機間に X11 通信用のネットワークを実現する.

図 4 では, QEMU, VMware Player のユーザインタフェースのデータは ND-Y を通りトンネルの出口の計算機にて稼動している X サーバに送信される. また, UML のようにスクリーン機能を有していない仮想マシン内の X クライアントの表示は, 仮想マシンに X11 用ネットワークへ接続するためネットワークインタフェースを追加・設定し, X サーバへ仮想マシン内から X クライアントの描画データを送ることで行われるようにした. 図 4 では, UML にて動作する X クライアントは NIC α , ND-Y を通り, トンネルの出口の計算機にて稼動している X サーバに送信される.

以上の提案手法に基づいて, イーサネットトンネル作成ツール VTun [16] の制御機能を高機能仮想ハブに組み入れた. VTun はクライアント・サーバ方式にてイーサネットブリッジに対応したネットワークデバイスを両端にもつイーサネットトンネルを作成する. ト

ンネル中継サーバでは, 参加先及び参加対象からのトンネルのネットワークデバイスを高機能仮想ハブにてハブモジュールに登録することで, 二つのトンネルを接合する.

4.4 分散配置型仮想マシンネットワーク構成支援機構

4.3 にて述べた作業は, 演習内容に無関係であり, 学習者にとって煩雑なものである. このため, 仮想マシンネットワーク構成支援機構 Virtual Machine Network Composition Assist (図 1 及び図 2, 以下 VMNCA) により自動的に行われるようにする.

VMNCA はクライアントプロセスとサーバプロセスから構成される. VMNCA サーバはインターネットからアクセス可能な計算機上に常駐し, 学習者の計算機上の VMNCA クライアントからトンネル構築に必要な情報を受け取る. VMNCA クライアントから仮想マシンの委託依頼を受け取った場合, VMNCA サーバは委託先計算機を算出する. そして, トンネル中継サーバが必要であるかを判定し, 必要である場合トンネル中継サーバを構築する. その後, VMNCA サーバは委託先計算機の VMNCA クライアント及び委託元計算機の VMNCA クライアントに X11 通信用のネットワークを構築させた後, VMNCA サーバは委託先計算機の VMNCA クライアントに委託仮想マシンを稼動させる. 学習者による委託仮想マシンの委託元計算機の仮想マシンネットワークへの接続操作があった場合には, まず, 委託元計算機の VMNCA クライアント及び委託先計算機の VMNCA クライアントに仮想マシンネットワークトンネルを構築させる. 次に, 委託元計算機の VMNCA クライアントに仮想ハブにより委託元計算機側のトンネルの端点を仮想マシンネットワークに接続させ, 委託先計算機の VMNCA クライアントに委託先計算機側のトンネルの端点を委託仮想マシンのネットワークインタフェースに仮想ハブにより接続させる.

5. 実行例

図 1 に示すハードウェア環境上に演習システムを構築した. PC-A は学習者 00, PC-B は学習者 01, PC-C は学習者 02, PC-D は学習者 03 により使用されている. 各学習者はエージェントを通じて PC-A にて稼動しているマネージャにログインすることで, 本システムによる仮想マシンネットワーク構築を行えるようになる.

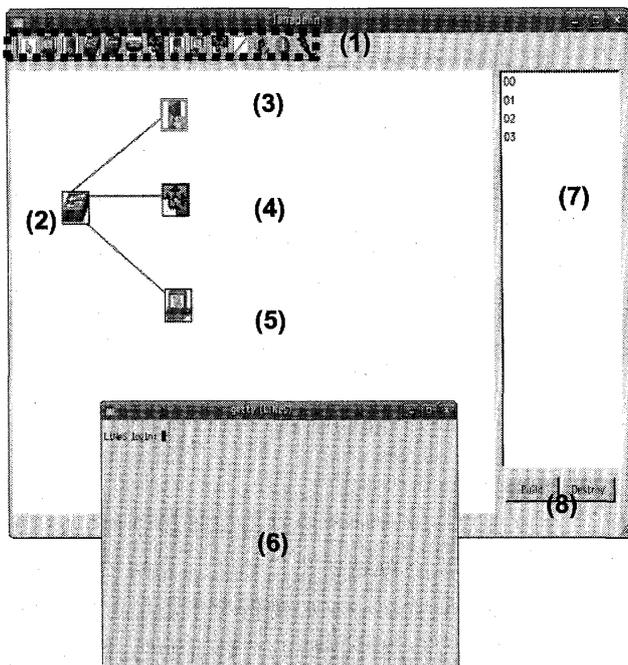


図5 仮想マシンネットワークの構築

Fig. 5 Construction of a virtual machine network.

図5は学習者01の画面である。図中(1)は、本システムで仮想マシンネットワークの構築に使用可能な仮想ネットワーク機器をアイコンとして示されたものである。Linuxクライアント、Linuxサーバ、Linuxルータ、スイッチングハブ、リピータハブ、PC/AT互換機である。(2)~(5)は学習者01の仮想マシンネットワークを構成する仮想ネットワーク機器を示している。(2)はスイッチングハブ、(3)はLinuxサーバ、(4)はPC/AT互換機、(5)はLinuxクライアントである。(3)と(5)は仮想マシン User-mode Linuxにより実現され、(4)はVMware Playerにより実現されている。

(3)のUser-mode LinuxのプロセスはPC-A上に稼動している。PC-Bはインターネットからのアクセスが不可能であるため、(3)のユーザインタフェースは(2)のトンネルを経由することでPC-B上に表示される(図中(6))。また、(3)、(4)、及び(5)によるブロードキャストドメインの構築は、PC-AとPC-Bが異なるネットワークに所属していることから、(2)のトンネルを経由することで実現される。(4)と(5)は異種の仮想マシンであるが、(2)によりネットワーク接続を行っている。

(7)は現在システムにログインしている学習者のリストである。学習者を選択し(8)のボタンにより各学習者の仮想マシンネットワークと自身の仮想マシンネットワークを接続した仮想マシンネットワークを構

築できる。例えば、学習者02、学習者03と仮想マシンネットワークを構成することを考える。PC-Dはインターネットからのアクセスが可能であるが、PC-BとPC-Cはインターネットからのアクセスが不可能であるため、学習者02と学習者03の仮想ハブは学習者04の仮想ハブへトンネルを確立することで、3者の仮想マシンネットワークからなるネットワークを実現する。

6. 評価実験

6.1 実験目的と実験環境

本研究では、異種構成型仮想マシンネットワークの実現機能(1.の方法(A)、(B))、及び分散配置型仮想マシンネットワークの実現機能(1.の方法(C))を有する高機能仮想ハブの実現と、その高機能仮想ハブの使用による異種構成・分散配置型の仮想マシンネットワークの構築を支援するシステム(1.の方法(D))の実現を目的としてきた。そこで、6.2において、高機能仮想ハブにより実現される仮想マシンネットワークのスループットを明らかにし、従来手法と比較する。

提案した接続手法によるネットワーク管理演習環境は、演習の快適性において計算機間のネットワーク性能に影響を受けることが考えられる。6.3では、演習環境の実現に最低限必要な計算機間のネットワーク性能を明らかにする。加えて、異種構成・分散配置型の仮想マシンネットワークの構築支援機能の必要性と有効性を議論する。

評価に用いた計算機は、CPUがIntel(R) Core2Duo E8400 3.00 GHz、メモリが4 GByte(OSは3.2 GByteと認識)であり、OSはUbuntu8.10である。また、計算機間のスループットの設定のために、帯域制御機能及び遅延制御機能をもつ計算機(以下、帯域・遅延制御装置)を用意した。帯域制御装置は、評価に用いた計算機と同じ性能とOSで、tc-tbf [17]による帯域制御を行う。

6.2 高機能仮想ハブのネットワークスループットの評価

はじめに、単一計算機上で高機能仮想ハブによる異種の仮想マシンネットワークスループットを計測した。図6は、開発した高機能仮想ハブのリピータ機能、VDEのリピータ機能、及びUMLの付属ツールのリピータ機能によるネットワークのネットワークスループットである。縦軸はネットワークスループット(単位:Mbit/s)、横軸は測定したネットワークを構成する

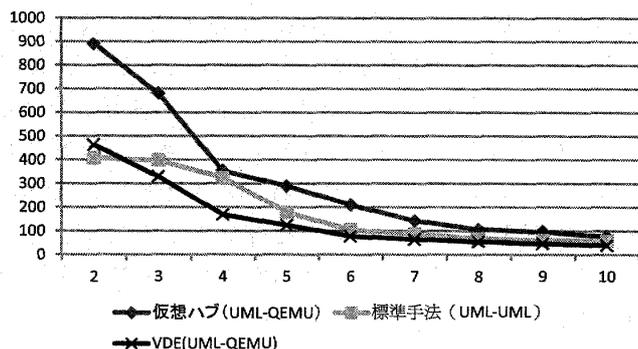


図 6 リピータハブのネットワークスループット
Fig. 6 Throughput of repeater hub.

仮想マシンの台数である。高機能仮想ハブと VDE について異種の仮想マシンとして UML と QEMU によるネットワークのスループットを測定した。測定したネットワークは、2 台のときは UML と QEMU から構成され、その後は UML, QEMU の順に交互に台数を増やしていった。図中「仮想ハブ (UML-QEMU)」は、高機能仮想ハブのリピータ機能による仮想マシンネットワークでの測定結果で、図中「VDE (UML-QEMU)」は VDE のリピータ機能による仮想マシンネットワークでの測定結果である。

UML をリピータハブで接続したネットワークを実現する標準手法は、UML のユーザドキュメントに掲載されているものである。まず、User-mode Linux の付属ツールである `umlswitch` を `-hub` オプションを付加して起動する。その後、各々の User-mode Linux を `eth0=daemon` オプションを付加して起動する。

実験結果より、ほとんどの場合において開発した仮想ハブが標準手法 (図中「標準手法 (UML-UML)」) 及び VDE (図中「VDE-QEMU」) より優れた性能となっている。各手法のネットワークスループットの平均値において、仮想ハブは標準手法より 1.69 倍高速であり、VDE より 2.08 倍高速であった。標準手法や VDE はユーザ空間にて仮想マシンのネットワークデータを交換するため、4.2 にて提案したカーネル空間での交換手法と比べて処理のオーバーヘッドが大きい。この点が、ネットワークスループットの差として現れたと考えられる。

ここで、計測中に同時に通信データを送信する仮想マシンは 1 台であるため、実際のリピータハブのようにコリジョンは発生しないにもかかわらず、ネットワークの規模が大きくなるにつれてスループットが低下したことを考える。これは、仮想リピータハブが受

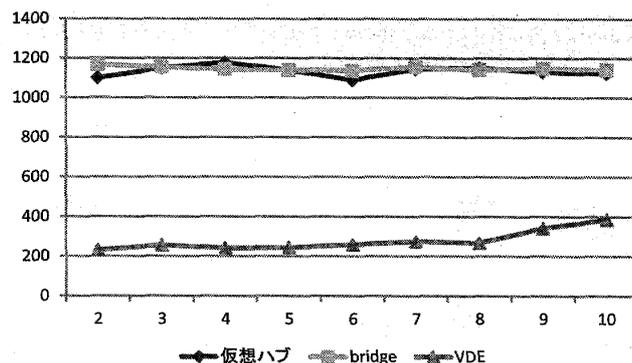


図 7 スイッチングハブのネットワークスループット
Fig. 7 Throughput of switching hub.

信したネットワークデータを自身に接続されている仮想マシンのすべてへ転送することと、それらの仮想マシンがネットワークデータの受信をすることの二つの処理に CPU リソースを消費しているからであると考えられる。この動作は実際のリピータハブとは異なっているが、本研究の演習内容には要求されないため不問とする。以上により、異種の仮想マシンを接続するリピータハブ機能を従来手法より優れたネットワークスループットにて実現できたことで、高機能仮想ハブのリピータハブ機能の開発は達成されたとする。

図 7 は、開発した高機能仮想ハブのスイッチングハブ機能、bridge、VDE のスイッチングハブ機能による UML と QEMU から構成される仮想マシンネットワークにおけるスループットである。

異種の仮想マシンとして UML 及び QEMU を選択した理由は、高機能仮想ハブ、bridge [5]、及び VDE が共通してサポートしている仮想マシンだからである。

図 7 に示す計測結果のとおり、提案手法であるカーネル内でのデータ交換方法 (仮想ハブ、bridge) がすべてのケースにおいて高速であることが分かった。仮想ハブと bridge はともにカーネル内でのデータ交換方法であるため、大きな差は生じなかったと考えられる。図 6 に示した高機能仮想ハブのリピータ機能の評価結果と併せて考えて、研究目的の一つである「異種構成型仮想マシンネットワークの実現」を達成できたと結論づける。

次に、異なる計算機に渡って実現した仮想マシンネットワークのネットワークスループットを計測した (表 2)。二つの計算機上に UML を一つずつ起動し、仮想ハブ、VNET、VDE 及び UML 同士の直接通信におけるネットワークスループットを計測した。二つの計算機間をクロスケーブルにより帯域・遅延制御装置

表 2 異なる計算機上の仮想マシン間のネットワークスループット

Table 2 Network throughput between two virtual machines running on each computer.

	速度 100	速度 200	速度 300	速度 400	速度 500
直接	93.6	186.2	275.3	361.4	449.1
仮想 ハブ	89.3 (95.4)	181.3 (97.4)	259.6 (94.3)	319.8 (88.5)	424.0 (94.4)
VNET	88.4 (94.4)	180.3 (96.8)	255.4 (92.8)	300.1 (83.0)	385.9 (85.9)
VDE	82.5 (88.1)	112.7 (60.5)	122.8 (44.6)	115.6 (32.0)	135.3 (30.1)

を経由するように接続した。二つの計算機間のスループットは 690 Mbit/s であったため、帯域・遅延制御装置のスループット値を 100 Mbit/s から 500 Mbit/s まで 100 Mbit/s ずつ変化させ（表中の速度 100, 速度 200, 速度 300, 速度 400, 速度 500）、各接続手法における仮想マシンネットワークのスループットを計測した。二つの計算機は単一ネットワーク上に存在するため、各々の計算機上で起動している仮想マシンは実ネットワークを直接利用して通信可能である。表 2 の括弧内の数値は計算機間のスループットに対する各接続手法のスループットの割合（単位：%）である。測定結果より、すべての場合において高機能仮想ハブのスループットは VNET と VDE より優れていることが示された。

以上の結果により、高性能仮想ハブは同種及び異種の仮想マシンによる仮想マシンネットワークを、単一計算機上に構成した場合と複数計算機上に構成した場合の双方において、従来手法より優れたネットワークスループットを実現できることが分かった。

6.3 ネットワーク構築演習環境への適用範囲

この評価実験の目的は、提案手法に基づき実現したシステム機能の演習利用における評価を得ることである。単一計算機上の異種の仮想マシン間のネットワーク通信速度、異なる計算機上にわたった仮想マシンネットワークのネットワーク通信速度、その際の仮想マシンのユーザインタフェースの反応速度、及び異なる計算機上にわたった仮想マシンネットワークの構成支援の利便性を評価した。

研究室に新規配属された工学部情報工学科 4 年生 10 名に本システムを利用したネットワーク構築講習を開催した。その講習の一部において本論文の機能を使

質問 1. User-mode Linux による仮想ネットワーク機器と VMware Player による仮想ネットワーク機器とのネットワーク通信速度はいかがでしたか？

質問 2. リモートの仮想ネットワーク機器のユーザインタフェースの反応速度はいかがでしたか？（ネットワークスループット評価）

質問 3. リモートの仮想ネットワーク機器のユーザインタフェースの反応速度はいかがでしたか？（通信遅延評価）

質問 4. リモートの仮想ネットワーク機器とローカルの仮想ネットワーク機器のネットワーク通信速度はいかがでしたか？

質問 5. あなたの仮想マシンネットワークと他の学習者の仮想マシンネットワークとのネットワーク通信速度はいかがでしたか？

質問 6. リモートの仮想ネットワーク機器の設置および使用のための作業を手動で行うことはいかがでしたか？

質問 7. あなたの仮想マシンネットワークと他の学習者の仮想マシンネットワークとを通信させる作業を手動で行うことはいかがでしたか？

質問 8. リモートの仮想ネットワーク機器の設置および使用のための作業を自動化することは手間の軽減に役立ちましたか？

質問 9. あなたの仮想マシンネットワークと他の学習者の仮想マシンネットワークとを通信させる作業を自動化することは手間の軽減に役立ちましたか？

図 8 アンケート質問

Fig. 8 Questionnaires.

用するネットワーク構築の演習を設けた。この実験において仮想ネットワーク内に流れるデータは、ウェブページやメールなどであり、データサイズは 1 MByte 未満である。今回の実験はウェブサーバの構築を題材とし、被験者はウェブサーバの TCP/IP 設定、ウェブサーバソフトウェア設定（ドキュメントルート設定、BASIC 認証設定、ユーザの個人ページ公開ディレクトリの設定）、及びそれらの設定確認のために HTML 記述による簡易ウェブサイトの作成を行う。

評価アンケートを図 8 に示す。質問 1~5 は、{1: 不満足, 2: やや不満足, 3: どちらともいえない, 4: やや満足, 5: 満足}, 質問 6~7 は {1: 面倒ではない, 2: あまり面倒ではない, 3: どちらともいえない, 4: やや面倒である, 5: 面倒である}, 質問 8~9 は {1: 役に立たなかった, 2: あまり役に立たなかった, 3: どちらともいえない, 4: やや役に立った, 5: 役に立っ

た}の5段階評価とした。

以降の本文中の有意確率は Wilcoxon の符号付き順位検定の有意確率を小数点第5位にて四捨五入したものである。

4.2の機能による仮想マシン間のネットワーク通信速度が、演習における使用に十分なものであるかを評価した(質問1)。学習者が単一の計算機上に、UMLによる仮想クライアントとVMware Playerによる仮想ウェブサーバ、及び高機能仮想ハブによる仮想スイッチングハブから構成される異種の仮想マシンネットワークを構築した。その後、クライアントでは、端末エミュレータからTCP/IP設定とpingによる導通確認を、ウェブブラウザでウェブサイトを表示することでウェブサーバの動作確認を行った。評価の平均値が5、有意確率が0.0019であることから1%の有意水準にて、学習者が本機能に満足していることが分かった。

4.3の機能をネットワーク構築演習において使用するための最低限のネットワーク性能を探った。クロスケーブルにより帯域・遅延制御装置を経由するように接続した2台の計算機を使い、2人1組の学習者の組ごとに独立して演習を行った。アンケート回答者が、UMLによる仮想ウェブサーバと、UMLによる仮想クライアント、及び高機能仮想ハブによる仮想スイッチングハブから構成される仮想マシンネットワークを構築する。ウェブサーバとスイッチングハブは回答者の計算機上で稼働させ、クライアントはペアの学習者の計算機に委託して稼働させた。この仮想マシンネットワークにおいて、先述の質問1と同様の作業を行った。この作業において、クライアントのユーザインタフェースの反応速度の評価(質問2, 質問3)、及びサーバとクライアント間の通信速度の評価(質問4)を行った。

この実験において委託した仮想ネットワーク機器は1台である。XサーバはXクライアントに対してマウスやキーボードからの入力を送信し、Xクライアントからの出力を受信するものである。したがって、学習者からの入力及びXクライアントからの出力が発生するとき以外は、XサーバとXクライアント間でデータ交換はほとんど行われぬ。演習において学習者が同時に操作するネットワーク機器は1台である場合が多く、学習者の使用している仮想ネットワーク機器以外のユーザインタフェース(Xクライアント)の描画内容が頻繁に変更される場合は少ないと考えられるため、1台の仮想ネットワーク機器における評価とした。

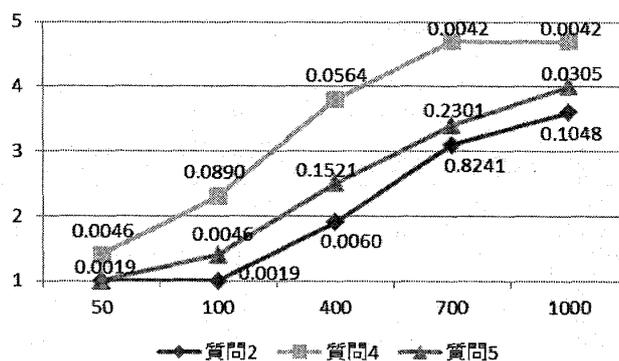


図9 4.3の機能に必要なネットワークスループットの評価結果

Fig. 9 Evaluation result of throughput required for the function of Sect. 4.3.

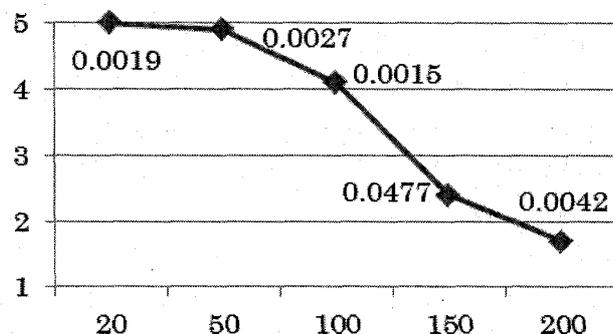


図10 通信遅延時間とユーザインタフェース反応速度の評価結果

Fig. 10 Evaluation result of user interface response depending on communication delay.

図9の縦軸は評価値の平均値、横軸は計算機間の帯域・遅延制御装置に設定したネットワークスループットの値である。図10は質問3に対する評価結果である。縦軸は評価値の平均値、横軸は計算機間の帯域・遅延制御装置に設定した通信遅延の値(単位ms)である。図9と図10のグラフ中の数値はWilcoxonの符号付き順位検定の有意確率を小数点第5位にて四捨五入したものである。

4.3の機能の演習での使用においては、ユーザインタフェースの反応速度と仮想マシンネットワークの通信速度の両立が求められる。図9において質問2が400 kbit/sにおいて有意確率1%で不満足であることを示している。また、700 kbit/sでは質問2及び質問4の平均値が3以上であるものの、有意確率が5%未満でないため満足であることに有意な結果を得られていない。以上により、4.3の機能を学習者が我慢して使用できるネットワークスループットは700 kbit/s以上であるといえる。

また、図10において、遅延時間100 msのとき、平

平均値が 4.1 で有意確率が 0.0015 であるので、有意水準 1% にて学習者は満足していることが分かった。一方、遅延時間 150 ms のとき、平均値が 2.4 で有意確率が 0.0477 であるので、有意水準 5% にて学習者は不満足であることが分かった。ここで、本システムの想定しているネットワークの遅延時間についても調査した。Windows 付属ツールの ping による計測の結果、被験者のうち 6 名の自宅の PC 間の平均遅延時間は 27 ms、同 6 名の自宅の PC と大学の PC 間の平均遅延時間は 20 ms であった。以上により、遅延時間が 100 ms 以下であるネットワーク環境であれば、本システムによる演習のユーザインタフェースの反応速度に関して不満は出ないといえるため、先述した実際の演習環境においても不満は出ないといえる。

異なる計算機の仮想ネットワーク間の通信速度を質問 5 にて評価した。2 人 1 組の学習者の組ごとに独立して演習を行った。学習者は各々の計算機上に仮想マシンネットワークを構築する演習を行った。図 9 より 100 kbit/s 以下では 1% の有意水準にて学習者が不満足であることが分かり、400 kbit/s 及び 700 kbit/s では満足及び不満足であることに有意な差がなく、1 Mbit/s 以上では 5% の有意水準にて学習者が満足していることが分かった。したがって、本機能による演習環境は最低でも 400 kbit/s 以上、理想的には 1 Mbit/s 以上のネットワークが望ましいことが分かった。

また、仮想ネットワーク構成支援機構の必要性及び効果を評価した。学習者は構成支援機構が実施している作業を手作業にて実施して仮想マシンネットワークを作成した。質問 6 の回答は平均値が 4.5 で有意確率が 0.0047 であり、質問 7 の回答は平均値が 4.0 で有意確率が 0.0313 であった。このため、5% の有意水準にて学習者が作業を面倒に感じていることが明らかになった。一方、質問 8 の回答は平均値が 4.5 で有意確率が 0.0047 であり、質問 9 の回答は平均値が 4.5 で有意確率が 0.0047 であった。このため、有意水準 1% にて構成支援機構による手間の削減の効果があったといえる。以上により、構成支援機構は必要性和有効性が高いことが分かった。

近年の高速ネットワーク通信網は、実験により得られた学習者のストレスなく使えるシステム稼動環境（ネットワークスループット及び通信遅延）を多くの場合満たすと思われる。表 1 に示す演習内容におけるネットワークデータのサイズは先述したように 1 MByte 未満のものであるが、将来的には、ストリー

ミングサーバなどのサイズの大きなデータの交換を必要とする演習も視野に入りたい。この評価については今後の課題とする。

7. む す び

本研究では、異なる種類の仮想マシンにより計算機リソースを有効利用した仮想マシンネットワークを、インターネットに接続された計算機にわたって構成する方法を提案した。この方法により、ネットワーク規模の拡張性の高い仮想マシンネットワークを実現できるようになると考えられる。

提案方法に基づいて高機能仮想ハブの開発と仮想マシンネットワーク構成支援機能の開発によるネットワーク構築演習環境システムを実現した。開発した高機能仮想ハブは、単一計算機上の仮想マシンネットワークのスループットが従来手法より優れていること、異なる計算機間に渡った仮想マシンネットワークのスループットに従来手法とほぼ同程度であることが評価実験より明らかになった。また、高機能仮想ハブによりインターネットの計算機に渡って仮想マシンネットワークを構成する作業は学習者にとって負担であることがアンケートより明らかになった。そして、それを支援するためのネットワーク構成支援機構は効果があることが明らかになった。

今後の予定は、ネットワーク規模の拡張性のボトルネックの分析と対策、及び拡張性の評価を行いたい。具体的には、仮想マシンの稼動している計算機の負荷や仮想マシンネットワークのスループットを考慮した仮想マシンの自動配置などを考えている。そして、大きなデータを仮想マシンネットワーク中に流すような演習における評価も行いたい。また、遠隔参加の学習者がスムーズに演習するための支援機能などを付加した演習システムの開発も視野に入れる。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金 (21700811) 及び電気通信普及財団の助成を受けたものである。

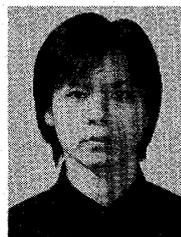
文 献

- [1] M. Anisetti, V. Bellandi, A. Colombo, M. Cremonini, E. Damiani, F. Frati, J.T. Hounsou, and D. Rebecani, "Learning computer networking on open paravirtual laboratories," *IEEE Trans. Educ.*, vol.50, no.4, pp.302-311, 2007.
- [2] 梅田雅一, 井口信和, "仮想 Linux 環境を活用した SaaS 型ネットワーク構築演習システムの開発," *DICOMO2009*, pp.1457-1464, 2009.
- [3] C. Border, "The development and deployment of a multi-user, remote access virtualization system

for networking, security, and system administration classes,” Proc. 38th SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education, pp.576–580, 2007.

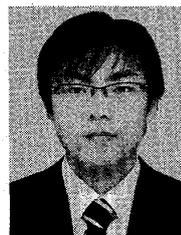
- [4] 後野 隆, “仮想環境を利用した「サーバ構築実習」環境の構築—仮想 OS の UML (UML) 活用報告,” 技能と技術, vol.2004, pp.34–39, 雇用問題研究会, 2004.
- [5] bridge | The Linux Foundation, <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/bridge>
- [6] W.D. Armitage, A. Gaspar, and M. Rideout, “Remotely accessible sandboxed environment with application to a laboratory course in networking,” Proc. 8th ACM SIGITE Conference on Information Technology Education, pp.83–90, 2007.
- [7] 中川泰宏, 須田宇宙, 三井田惇郎, 浮貝雅裕, “VMware を利用した学習用 LAN 構築支援システムの開発,” 教育システム学会誌, vol.24, no.2, pp.126–136, 2007.
- [8] 伊藤陽介, 曾根直人, “エミュレータソフトウェアによる仮想コンピュータを用いた情報システム演習環境の構築と教育利用,” 鳴門教育大学情報教育ジャーナル, vol.4, pp.1–9, 2007.
- [9] L. Yang, “Teaching system and network administration using virtual PC,” J. Computing Sciences in Colleges, vol.23, no.2, pp.137–142, 2007.
- [10] R.J. Lange and A.P. Dinda, “Transparent network services via a virtual traffic layer for virtual machines,” Paper Presented at the 16th International Symposium on High Performance Distributed Computing, pp.23–32, 2007.
- [11] X. Jiang and D. Xu, “VIOLIN: Virtual internetworking on overlay infrastructure,” Lect. Notes Comput. Sci., vol.3358/2005, pp.937–946, 2005.
- [12] M. Goldweber and R. Davoli, “VDE — An emulation environment for supporting computer networking courses,” Paper Presented at the 13th Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education, pp.138–142, 2008.
- [13] The UML Kernel Home Page, <http://UML.sourceforge.net/>
- [14] VMware Player : 簡単に仮想マシンを実行できる無償ソフトウェア, <http://www.vmware.com/jp/products/player/>
- [15] About-QEMU, http://wiki.qemu.org/Main_Page
- [16] VTun — Virtual Tunnels over TCP/IP networks, <http://vtun.sourceforge.net/>
- [17] Linux Advanced Routing & Traffic Control HOWTO, <http://lartc.org/howto/index.html>

(平成 22 年 7 月 20 日受付, 11 月 19 日再受付)



立岩 佑一郎 (正員)

2008 名古屋大学大学院情報科学研究科博士課程了(情報科学博士)。同年, 名古屋工業大学大学院工学研究科助教となり, 現在に至る。平 20 年度山下記念研究賞受賞。仮想マシン技術, ネットワーク, 情報教育等に興味をもつ。ACM, IEEE, 教育システム情報学会, 情報処理学会各会員。



岩崎 智弘

2009 名大・情報文化卒。現在, 名古屋大学大学院情報科学研究科修士課程在学中。ネットワーク管理者育成支援システムに関する研究に従事。



安田 孝美 (正員)

1987 名古屋大学大学院博士課程(情報工学)了。同年, 同大学助手。1993 同大学情報文化学部助教授。2003 同大学大学院情報科学研究科教授となり, 現在に至る。この間, 1986 日本学術振興会特別研究員。デジタル・ミュージアム, ICT を活用した地域コミュニティなど, 社会情報学, メディア情報学に関する研究に従事。1987 日本 ME 学会論文賞, 同学会研究奨励賞, 1989 市村学術貢献賞, 1994 科学技術庁長官賞, 1998 情報処理学会坂井記念特別賞, 2001 教育システム情報学会論文賞, 2006 情報処理学会活動貢献賞, 2009 「情報通信月間」東海総合通信局長表彰, 各受賞。1998~1999 情報処理学会論文誌編集委員会応用グループ主査。2009 情報文化学会学会誌編集委員長。2010 日本社会情報学会(JSIS) 副会長。



高橋 直久 (正員)

1974 電通大・応用電子工学卒。1976 同大大学院応用電子工学専攻修士課程了。同年日本電信電話公社(現 NTT) 武蔵野電気通信研究所入所。1987 工博(東京工業大学)。2001 名古屋工業大学電気情報工学科教授。2004 名古屋工業大学大学院工学研究科ながれ領域(情報工学科/情報工学専攻担当)教授。現在, 時空間情報処理, e ラーニングシステム, ネットワーク診断システムなどの研究に従事。