

特別研究報告

題目

生化学反応モデルに基づいた
仮想ネットワーク機能の動的資源配分手法の実験評価

指導教員

松岡 茂登 教授

報告者

黒川 稜太

平成 29 年 2 月 14 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

生化学反応モデルに基づいた
仮想ネットワーク機能の動的資源配分手法の実験評価

黒川 稜太

内容梗概

近年, スマートフォンの普及やモノのインターネット (Internet of Things: IoT) 技術の発展等, ネットワークを取り巻く環境の変化により, ネットワークに接続されるハードウェア機器の種類が増加し, トラフィック量も増加している. このような問題に対処するための1つの技術として, ネットワーク機能仮想化技術 (Network Function Virtualization: NFV) がある. NFV を用いることで, 通常はハードウェア機器で実行されるネットワーク機能がソフトウェアで実現されるため, それらを柔軟に移動, 追加できるようになる. NFV における仮想ネットワーク機能 (Virtual Network Function: VNF) は, 汎用サーバ上で実現され, 複数の VNF が1台のサーバ資源を共有することや, 1つの VNF が複数サーバ上で分散実行されることが考えられる. NFV では, ネットワークフローが, 適用されるべき VNF の順序を示すサービスチェイニング要求を持つ. 従って, NFV に基づくネットワークシステムを効率的に運用するためには, 各 VNF の配置, サーバ資源の割り当て, 及びトラフィック量やサーバ負荷に応じたネットワークフローの経路等を適切に決定する必要がある. また, NFV のようなネットワークサービスは, ネットワークの輻輳やシステム障害等に素早く対応するために, 自律分散的に動作することが望ましい. そのような動作を表現する1つの方法として, 自律分散性や自己組織性の高い, 生化学機構を用いる手法がある.

我々の研究グループでは, 生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法を提案している. この手法を用いることにより, 提供するサービスの決定, サービスによるサーバ資源の共有, サービスの分散実行, サービスを適用するフローの決定を実現することができる. また, 化学反応式はそれぞれのタプル空間で独立に定義されて動作するため, 自律分散的な挙動をモデル化するのに適している. しかし, 過去の研究では, コンピュータシミュレーションによる基本的な動作検証のみが行われている.

そこで本報告では, 上述のモデルを NFV 環境へ適用し, その有効性を実験によって検証した. 具体的には, まず, 1つのサーバ上で複数の VNF が動作し, 複数のネットワークフローに対して VNF を適用する環境を構築した. 次に, 生化学反応モデルに基づいて, ネットワー

クフローのトラフィック量に応じて、VNF へサーバ資源を配分する機構を実現した。実験の結果、実装したシステムが、ネットワークのフローレートに応じて、各 VNF へ CPU 資源を適切に分配することで、過不足なくフローのパケットを処理できることを確認した。また、フローのビットレートの動的な変動に対しても、割り当てる CPU 資源を適応的に調整できることを示した。

主な用語

生化学反応式, ネットワーク機能仮想化技術 (NFV), 仮想ネットワーク機能 (VNF), 動的資源配分

目次

1	はじめに	6
2	生化学反応式モデルに基づくサービス空間構築手法	9
2.1	生化学反応式を用いたタプル空間モデル	9
2.1.1	サービスの実行及び成長と衰退	9
2.1.2	資源量に基づく制約	11
2.2	NFV への適用	11
2.2.1	サービスチェイニングの表現	12
2.2.2	VNF への資源の割り当てと実行	12
2.3	実システムへの適用	13
2.3.1	化学物質濃度の設定と更新方法	13
2.3.2	サービスチェイニングの実現	15
3	動作検証	16
3.1	実験環境	16
3.2	VNF プログラム	16
3.3	パラメータ設定	18
3.4	実験方法と評価指標	18
3.5	検証結果と考察	21
3.5.1	フローのビットレートの影響	21
3.5.2	フローのビットレートの変動の影響	21
3.5.3	複数フローが存在する場合	21
4	まとめと今後の課題	31
	参考文献	33

目 次

1	ネットワーク機能仮想化 (NFV) 環境	7
2	生化学反応式を用いたタプル空間モデル [1]	10
3	生化学反応モデルが適用された NFV 環境	14
4	実験ネットワーク環境	17
5	送信レートと受信レートの関係	19
6	VNF に割り当てる CPU 使用率と受信レートの関係	20
7	実験 1 の結果	23
8	実験 2 の結果	24
9	実験 3 の結果	25
10	実験 4 の結果	26
11	実験 5 の結果	27
12	実験 6 の結果	28
13	実験 7 の結果	29
14	実験 8 の結果	30

表 目 次

1	仮想化ホスト及び仮想マシンの仕様	17
2	実験内容	22

1 はじめに

近年, スマートフォンの普及やモノのインターネット (Internet of Things: IoT) [2] 技術の発展等, ネットワークを取り巻く環境の変化により, ネットワークに接続されるハードウェア機器の種類が増加し, トラフィック量も増加している. 新しいネットワークサービスを立ち上げるには, 専用のハードウェア機器が必要となり, 設置するための空間や稼働するための電源を必要とするため, コスト増大による利益減少やエネルギー消費量の増大等の問題が発生する. また近年, ネットワークサービスの継続的な発展や拡大により, ハードウェア機器の製品寿命が短くなっていることが, 設備投資コストの増加を引き起こしている. さらに, ハードウェア機器の保守運用やシステム障害等の環境変動への対応にも手間がかかり, 柔軟性が低い.

このような問題に対処するための1つの技術として, ネットワーク機能仮想化技術 (Network Function Virtualization: NFV) [3] がある. 図1に, NFVが適用されたネットワーク環境として, モバイルコアネットワークに対してNFVを適用した例を示す. NFVは, 仮想ネットワーク機能を汎用サーバ上で実現する技術であり [4, 5], 通常はハードウェア機器で実行されるネットワーク機能がソフトウェアで実現されるため, それらを柔軟に移動, 追加できるようになる. NFVにおける仮想ネットワーク機能をVNF (Virtual Network Function) と呼ぶ. VNFは, ファイアウォール [6] や Deep Packet Inspection (DPI) [7] と呼ばれるネットワーク機能や, Evolved Packet Core [8, 9] と呼ばれるモバイルコアネットワークの機能, Optical Network Unit, Optical Line Terminal と呼ばれるアクセスネットワーク機器等, 多種多様なネットワーク機能を対象に考えられている [10]. その結果, さまざまなVNFが汎用サーバ上に配置され, 複数のVNFが1台のサーバ資源を共有することや, 1つのVNFが複数サーバ上で分散実行されることが考えられる [11, 12].

また, NFVでは, ネットワークフローが, 適用されるべきVNFの順序を示すサービスチェイニング要求を持つ. 図1では, NFV環境に到着したネットワークフローのパケットが, そのサービスチェイニング要求に従った複数のVNFが順に適用され, 退出する様子を表している. このようなNFVに基づくネットワークシステムを効率的に運用するためには, 各VNFの配置, サーバ資源の割り当て, 及びトラフィック量やサーバ負荷に応じたネットワークフローの経路等を適切に決定する必要がある. さらに, NFVのようなネットワークサービスは, ネットワークの輻輳やシステム障害等の環境変動に素早く対応するために自律分散的に動作することが望ましい [13].

そのような動作を表現する1つの方法として, 自律分散性や自己組織性の高い, 生化学機構を用いる手法がある. 我々の研究グループでは, 生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法を提案している [1, 14, 15]. この手法では, サーバをタプル

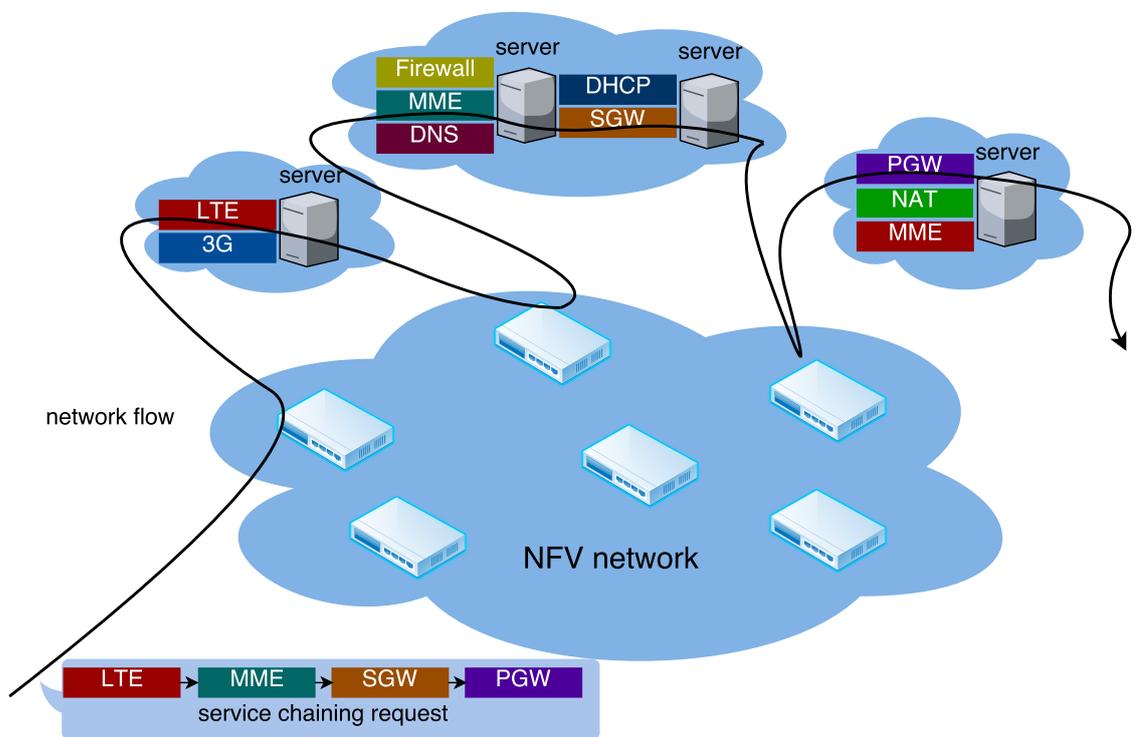


図 1: ネットワーク機能仮想化 (NFV) 環境

空間と考え、サービス要求やサービス需要、及びサーバ資源を化学物質として表現し、サーバの挙動を、タプル空間内の化学反応式として記述する。さらに、複数のタプル空間を接続してネットワークを構成することで、複数のサーバから構成される大規模ネットワークシステムにおける、サービスの拡散やサービスに対する要求の移動を表現することができる。この手法を用いることにより、分散配置されたサービスにおける、提供するサービスの決定、複数の種類のサービスによるサーバ資源の共有、サービスの分散実行、及びサービスを適用するフローの決定等を実現することができる。また、化学反応式はそれぞれのタプル空間で独立に定義されて動作するため、自律分散的な挙動をモデル化するのに適している。しかし、過去の研究においては、コンピュータシミュレーションによる基本的な動作検証のみが行われている。

そこで本報告では、上述の手法をNFVにおける仮想ネットワーク機能への動的資源配分へ適用することを検討し、その有効性を実験によって検証する。初めに、VNFのサーバへの配置、サーバ資源の配分、トラフィック量やサーバ負荷に応じたネットワークフローの経路の決定等を化学反応式で表現する。次に、それらを実システムへ適用するために、化学反応式を構成する物質や反応式を、NFV環境の構成要素や挙動に対応させる。さらに、提案手法の有効性を検証するために、サーバ上で複数のVNFが動作し、複数のネットワークフローへVNFを適用する環境を構築し、生化学反応モデルに基づいて、ネットワークフローのトラフィック量に応じて、VNFへサーバ資源が配分されることを確認する。

本報告の構成は以下の通りである。まず2章では、本報告で用いる、生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法を説明し、NFV環境へ適用する方法、及び実装指針について述べる。3章では、実証実験を通じて、手法の有効性を検証する。最後に4章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2 生化学反応式モデルに基づくサービス空間構築手法

本章では、本報告で用いた、仮想ネットワークシステムにおける、生化学反応式を用いたタプル空間モデルに基づくサービス空間構築手法 [1, 14, 15] について述べ、NFV 環境への適用方法、及び実装指針について説明する。

2.1 生化学反応式を用いたタプル空間モデル

生化学反応式を用いた1つのタプル空間モデルの概要を図2に示す。タプル空間を化学反応が起こる場とする。タプル空間内のタプルは化学物質に相当し、その量は化学物質の濃度に相当する。タプル空間内で起こる化学反応を定義することで、化学反応が起こり、タプル濃度の増減やタプルの挙動が定められる。タプル空間におけるそれぞれの化学反応式は、全ての反応物の濃度と反応速度係数の積に比例して実行される。また、タプル空間の外部からの化学物質の投入や、生成物を外部に送出する挙動を記述することによって、タプル空間外との相互作用を実現することができる。さらに、本報告では用いていないが、複数のタプル空間を接続してネットワークを構成することで、タプル空間同士のタプルの拡散や移動を表すことができる。このとき、各タプル空間で起こる化学反応はそれぞれの空間で独立に起こるので、自律分散的な動作を表現することができる。

次に、上述のモデルの仮想ネットワークシステムへの適用方法について説明する。図2におけるタプル空間は、サービスを提供するサーバに対応付けられる。タプル空間内のタプルは、サービス需要、サービス要求、資源量等を表す。サーバにおける提供するサービスの決定、複数の種類のサービスによる資源量の共有、サービスの分散実行、及びサービスを適用するフローの決定等の挙動を、化学反応式を定義することによって表現する。以降では、1台のサーバで運用される仮想ネットワークシステムへの適用方法について概略する。

2.1.1 サービスの実行及び成長と衰退

仮想ネットワークシステムにおけるサービスは、その要求に従って実行される必要がある。また、需要の多いサービスは成長させ、需要の少ないサービスは衰退させることが求められる。このような挙動を反応式 (1)、及び (2) のように表す。



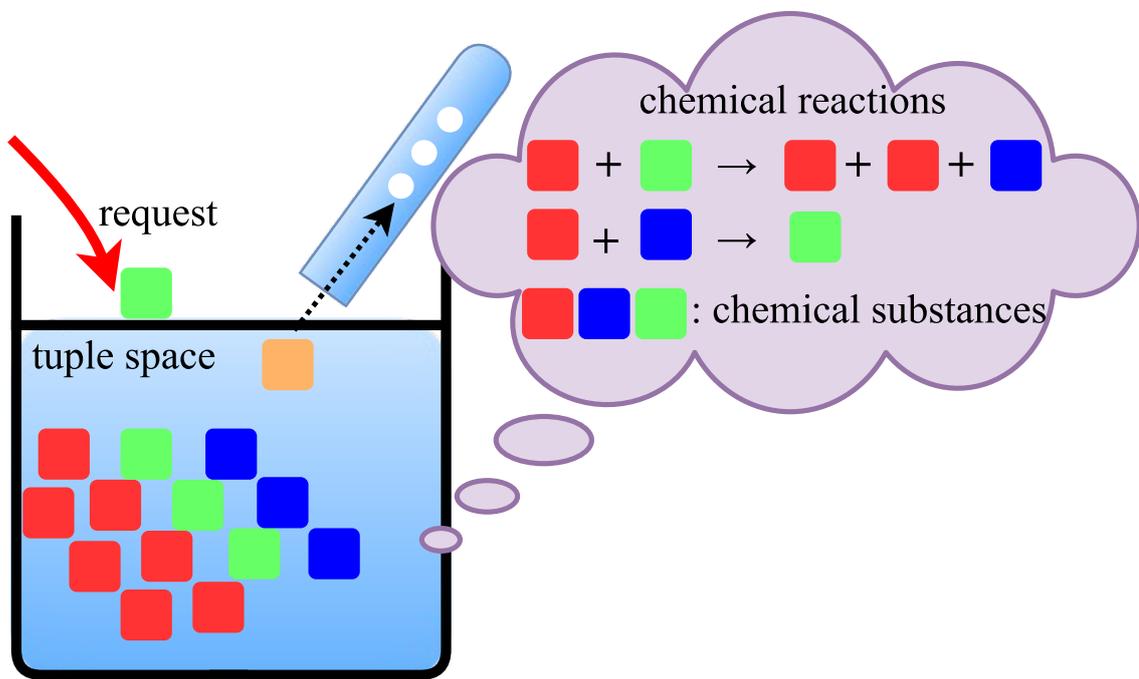


図 2: 生化学反応式を用いたタプル空間モデル [1]

$SERV$ は、サービス需要を表し、その濃度が大きいほどサービスに対する需要が多いことを表す。 REQ , $toserve(SERV, REQ)$ はそれぞれ、サービス要求、及びサービスの実行結果を表す。化学反応式の矢印の上にかかれた変数は、反応速度係数を表す。反応式 (1) は、サービス需要とそれに対する実行要求が存在する場合に、サービスを実行し、要求を削除すること、及びサービスが成長することを表す。反応式 (2) は、サービス実行要求が存在しないサービスが衰退することを表す。

2.1.2 資源量に基づく制約

反応式 (1) は、反応物の濃度が高いと、それに応じて反応速度が制限なく大きくなる。しかし、実環境におけるネットワークサービスは、その実行に様々な資源を必要とするため、サービスの実行速度には制約が存在する。そのような環境に適用するために、酵素触媒反応 [16] の反応速度を説明するための理論を応用し、上述の反応式 (1) を以下のように拡張する。



$CATAL$, $MEDIANE$ はそれぞれ、タプル空間に存在する、サービス実行のために利用可能な資源量、及びサービスに割り当てられる資源量を表す。反応式 (3) 及び (4) は、利用可能な資源量に応じて、サービスに資源が割り当てられる様子を表す。反応式 (5) は、サービスに割り当てられた資源量に基づいて、サービスが実行されることを表す。

2.2 NFV への適用

NFV に基づくネットワークシステムを効率的に運用するためには、各 VNF の配置、サーバ資源の割り当て、及びトラヒック量やサーバ負荷に応じたネットワークフローの経路等を適切に決定する必要がある。そのような挙動を自律分散的に決定するために、上述のモデルを用いる。文献 [1] では、反応式 (1) - (5) における化学物質 $SERV$, REQ , $CATAL$, 及び $MEDIANE$ を、VNF、サービスチェイニング要求を持つフローのパケット、サーバにおける利用可能な資源量、及びサーバが提供している VNF に割り当てられた資源量にそれぞれ対応させている。以降では、文献 [1] で提案されている上述のモデルの NFV への適用方法を概略する。

2.2.1 サービスチェイニングの表現

あるフローに対して、そのサービスチェイニング要求により実行される VNF を順に f_1, f_2, f_3, \dots とすると、サービスチェイニング要求 c を式 (6) のように表す。

$$c = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_{end}\} \quad (6)$$

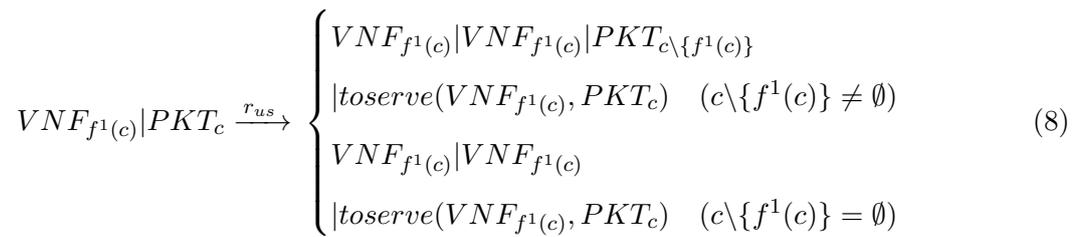
サービスチェイニング要求 c を持つフローに対して、VNF f_1 が実行された場合、サービスチェイニング要求 c は式 (7) のように変化する。

$$c \leftarrow c \setminus \{f_1\} = \{f_2, f_3, \dots, f_{end}\} \quad (7)$$

サービスチェイニング要求 c が次に実行を要求している VNF を $f^1(c)$ と表す。式 (7) の例では、 $f^1(c) = f_2$ である。以下では、化学物質の添え字 f はフローを、 c はサービスチェイニング要求を表す。

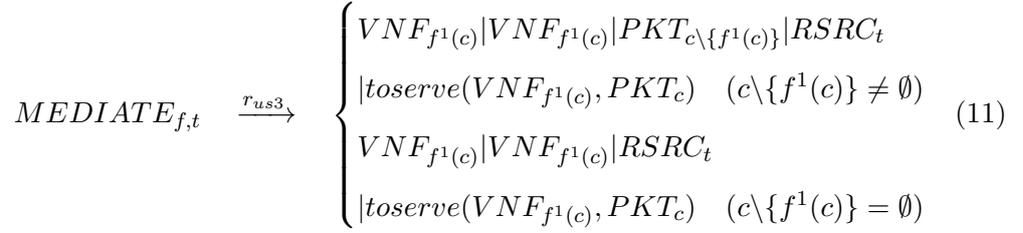
2.2.2 VNF への資源の割り当てと実行

サービスチェイニング要求 c を持つフローのパケットがサーバへ到着した時、サーバにおいて対応する VNF が存在する場合には、パケットに対して VNF が適用される。このとき、サービスチェイニング要求が 1 つの VNF から構成されている場合には、VNF が適用された後にそのパケットは消失する。一方、サービスチェイニング要求が複数の VNF から構成されている場合には、パケットが持つサービスチェイニング要求から適用した VNF を削除する。このような挙動を反応式 (8) のように表す。



$VNF_{f^1(c)}$ は、サービスチェイニング要求 c が次に実行を要求している VNF を表し、その濃度が大きいほど VNF に対する需要が多いことを表す。 PKT_c は、サービスチェイニング要求が c であるフローを構成するパケットを表す。 $toserve(VNF_{f^1(c)}, PKT_c)$ は、サービスチェイニング要求が c であるフローのパケットに対して、次に適用すべき VNF が実行されたことを表す。

また, NFV サーバの資源量とフローの到着レートに応じた VNF への資源の割り当てを実現するために, NFV サーバにおいて, 以下の化学反応式を導入する.



$RSRC_t$ 及び $MEDIANE_{f,t}$ は, サーバ t における利用可能な資源量, 及びサーバ t が提供している VNF f に割り当てられた資源量をそれぞれ表す. 反応式 (9) 及び (10) は, サービスチェイニング要求 c のフローを構成するパケットが適用すべき NFV サーバ t に到着した際に, 各 VNF の需要の大きさに応じて資源が割り当てられる様子を表す. 反応式 (11) は, VNF f に割り当てられた資源量に基づいて, それが実行されることを表す.

2.3 実システムへの適用

2.2 節で記述した手法を, NFV 環境において実現するための検討を行う. NFV 環境に生化学反応モデルを適用するネットワーク例を図 3 に示す. NFV サーバでは 1 つ, あるいは複数の VNF プログラムが稼働している. NFV サーバにフローのパケットが到着すると, 該当する VNF が適用され, NFV サーバから退出する. NFV サーバ上では, 前述の生化学反応モデルに基づいて各物質濃度を計算するプログラムが動作しており, NFV サーバへの各フローのパケット到着レートに基づいて, 各 VNF へ割り当てる資源量を決定する. 以降では, 本報告において構築した NFV サーバにおける, 反応式 (8) - (11) 内の化学物質濃度の設定方法, 及びサービスチェイニングの実現方法について説明する.

2.3.1 化学物質濃度の設定と更新方法

反応式 (8) - (11) における化学物質 VNF , PKT , $RSRC$, $MEDIANE$ の濃度について, 実システムでは以下のように設定する.

VNF 初期濃度値を設定し, 反応式に応じて更新する.

PKT NFV サーバに到着するフローのパケット数, 及び VNF が適用されて退出パケット数に応じて決定される.

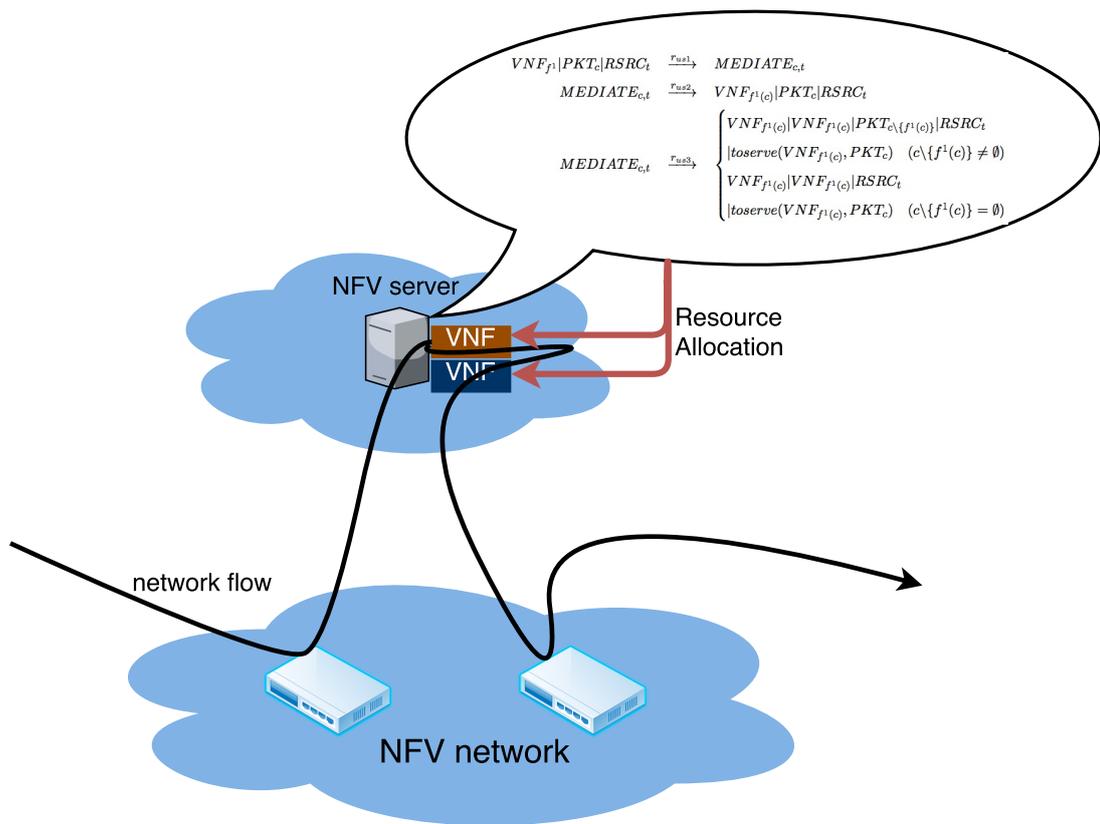


図 3: 生化学反応モデルが適用された NFV 環境

RSRC サーバにおける CPU 資源量を利用率で表現し、反応式に応じて更新する。

MEDIATE 各 VNF に与える CPU 資源量を利用率で表現し、反応式に応じて更新する。各 VNF には *MEDIATE* の濃度に応じて CPU 資源を割り当てる。

これらの化学物質濃度の更新は、文献 [17] に示されている、化学反応式モデルの数値計算手法に基づき、一定の時間間隔毎に行う。その間隔で区切られた時間をタイムスロットと定義する。具体的には、各タイムスロットの開始時点で、1つ前のタイムスロットの間に NFV サーバに到着したパケット数に応じて、*PKT* の濃度を増加させる。次に、タイムスロット内で各化学反応式が実行される回数を反応物の濃度と反応速度係数から算出し、反応を実行して各化学物質の濃度を更新する。最後に、各 VNF へ割り当てられる資源を表す物質である化学物質 *MEDIATE* の濃度に応じて、各 VNF へ CPU 資源を配分する。

このとき、*PKT* の濃度を更新する際には、NFV サーバ内に実際に蓄積されているパケット数に関する情報を用いることが考えられる。これにより、サーバ負荷の突発的な変動等による、VNF の実行速度に変動が生じた際にも、VNF に対して与える CPU 資源量を適切に調整することが可能となる。一方で、この方法の実現のためには、VNF が実行されたパケット数を把握する必要がある。このような方法を実現することは、今後の課題とする。

2.3.2 サービスチェイニングの実現

サービスチェイニング要求は、パケットのペイロードに記述する。あるフローに対して、そのサービスチェイニング要求により実行される VNF を順に $VNF1, VNF2, VNF3, \dots$ とすると、サービスチェイニング要求を式 (12) のように定義する。

$$\{VNF1, VNF2, VNF3, \dots, (\text{受信サーバの IP アドレス})\} \quad (12)$$

NFV 環境にパケットが到着すると、そのサービスチェイニング要求に応じて、1つ目の VNF を適用すべき NFV サーバに向けて送信される。NFV サーバでは、サービスチェイニング要求を持つフローのパケットを受信し、サービスチェイニング要求に記述されている1つ目の VNF を適用する。VNF 適用後、パケットが持つサービスチェイニング要求から適用した VNF を削除し、次の VNF を適用すべき NFV サーバ、もしくは受信サーバに向けてパケットを送信する。式 (12) で示されるサービスチェイニング要求を持つパケットに対して、 $VNF1$ を適用した後は、そのサービスチェイニング要求は式 (13) のように変化する。

$$\{VNF2, VNF3, \dots, (\text{受信サーバの IP アドレス})\} \quad (13)$$

3 動作検証

3.1 実験環境

本研究で構築した実験ネットワーク環境を図4に示す。実験ネットワーク環境は全て1台の仮想化ホスト上の仮想環境内に構築している。仮想化ソフトウェアには、Oracle VM VirtualBox [18]を用いた。実験ネットワークは、送信サーバ、受信サーバ、NFVサーバ、及びそれらを接続するネットワークスイッチから構成される。3台のサーバ、及びネットワークスイッチは、全て1Gbpsのイーサネットを用いて接続されている。送信サーバは、NFVサーバへ向けて、VNFを適用すべきフローのパケットをUDPを用いて送信する。受信サーバは、NFVサーバにおいてVNFを適用されたフローのパケットを最終的に受信する。NFVサーバは、VNFプログラムを動作させており、フローのパケットに対して対応するVNFを適用し、受信サーバに向けて送出する。表1に、仮想化ホスト及び3台のホストの仕様を示す。

本実験環境のボトルネックを明らかにするために、以下に示す予備実験を行った。送信ホストから、NFVサーバを介さずに受信ホストに向けてiperf [19]を用いてUDPパケットを連続的に送信し、送信レートと受信レートを計測した。また、送信ホストから、NFVサーバを介して受信ホストへUDPパケットを送信する場合についても計測を行った。本実験においては、NFVサーバにおいてはVNFの処理等を行わず、アプリケーションプログラムが単純なパケット転送を行う。図5に、送信レートと受信レートの関係を示す。図には、NFVサーバを経由する場合としない場合の結果を合わせて示している。この結果から、NFVサーバを経由させることによって、入力レートはほとんど低下していないことがわかる。一方、図より、送信レートの最大値が500Mbpsであることがわかる。これは、本環境におけるボトルネックが、送信ホスト、あるいはネットワーク部分にあることを意味している。

3.2 VNF プログラム

本報告では、Deep Packet Inspection (DPI) 機能を想定したVNFをVNFプログラムにおいて実現し、セキュリティ用途を想定して実装した。具体的には、パケットが到着した際に、そのペイロードの内容が、事前に設定したマッチング条件となる文字列を含むかどうかを判定し、含まれる場合にはそのパケットを破棄する。

また、複数のフローの場合においても同様のVNFプログラムを利用し、VNFプログラムはそれぞれのフローに対して同様の処理を行うこととした。

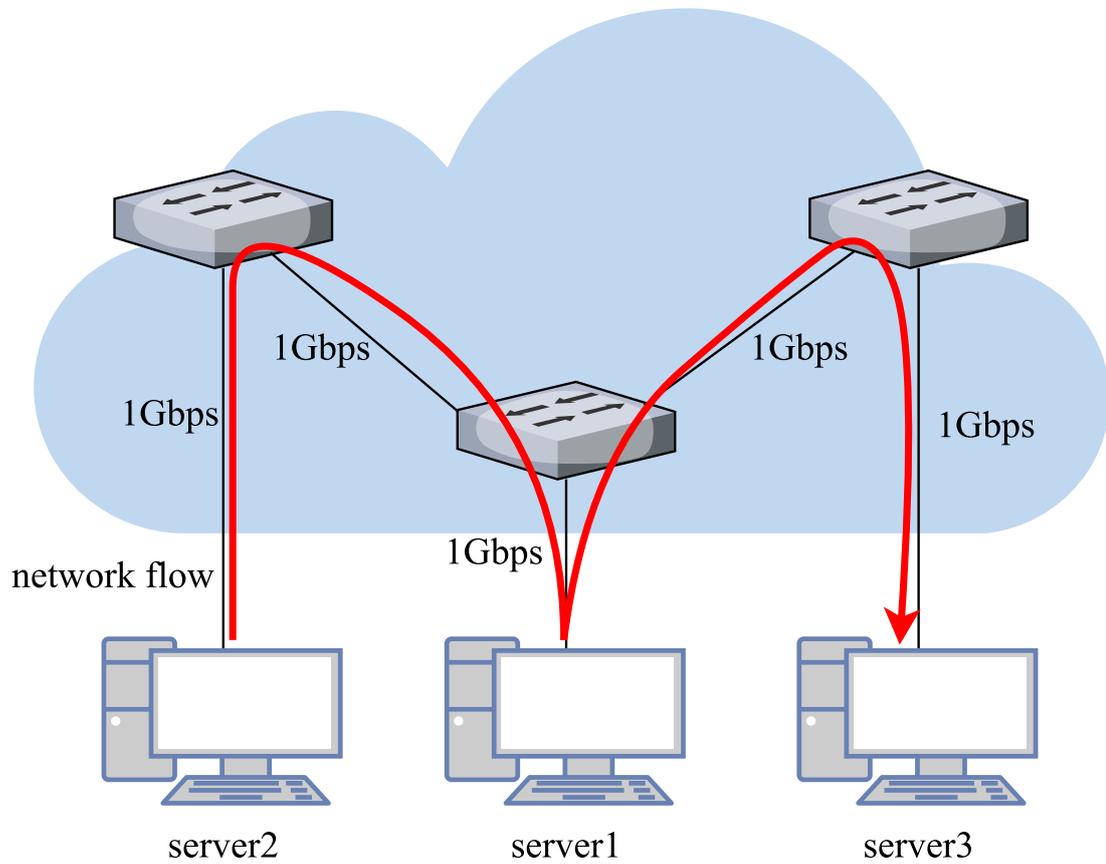


図 4: 実験ネットワーク環境

表 1: 仮想化ホスト及び仮想マシンの仕様

	仮想化ホスト	NFV サーバ	送信サーバ	受信サーバ
Virtual / Physical	Physical	Virtual	Virtual	Virtual
Kernel Version	4.4.0-62-generic	3.13.0-63-generic	3.13.0-63-generic	3.13.0-63-generic
Operating System	Ubuntu16.04 LTS	Ubuntu14.04 LTS	Ubuntu14.04 LTS	Ubuntu14.04 LTS
CPU Core	8	2	1	1
Memory Size	8 [GB]	1,024 [MB]	512 [MB]	512 [MB]

3.3 パラメータ設定

反応式(9) - (11)における化学物質 VNF , $RSRC$ の濃度の初期値を, それぞれ 2,000, 1,000 と設定し, 反応速度係数をそれぞれ, $r_{us1} = 0.0001$, $r_{us2} = 0.0001$, $r_{us3} = 0.05$ とした. これらの値は, 文献 [1] で行われているシミュレーション評価において用いられているものである. また, タイムスロット長を 2.0 [sec], パケットサイズを 1500 [bytes] と設定した.

$MEDIATE$ の濃度に応じた VNF への CPU 使用率の割り当て, 及び NFV サーバへのパケット入力レートに応じた化学物質 PKT の濃度の更新を決定するために, 以下のような事前実験を行った. プロセスが使用する CPU 使用率の上限を設定することができるコマンドである `cpulimit` コマンドを用いて, VNF のプロセスが用いる CPU 使用率を設定し, 送信サーバから VNF の適用を必要とするフローのパケットを 400 [Mbps] の速度で NFV サーバへ送信し, NFV サーバで処理された後の受信ホストにおけるパケットの受信レートを計測した. 図 6 に VNF のプロセスに対して設定した CPU 使用率の上限値と, 受信レートの関係を示す. この結果より, CPU 使用率と受信レートはほぼ比例関係にあることが分かる. このことから, 化学物質 $RSRC$ の濃度から CPU 使用率を決定する際には, $RSRC$ の濃度に比例させた値を用いることが適切であると言える.

上記の実験結果に基づき, さらに, パケット入力レートの急激な変動やサーバ資源量の減少等の環境変動に対応するために, NFV サーバにおいて VNF のプロセスに割り当てる CPU 使用率の最大値を 80.0% とし, それを $RSRC$ の濃度 1,000 に対応させる. 一方, 文献 [1] におけるシミュレーション結果より, 上述のパラメータを用いた場合に, タイムスロット内で処理することができる化学物質 PKT の濃度の最大値が 45 であることがわかっている. また図 6 より, CPU 使用率が 80% である時の受信レートは約 280 [Mbps] であり, これは, タイムスロット長である 2.0 [sec] の間に到着するパケット数が 23,777 であることを意味している. そのため, NFV サーバへの到着パケット数の 23,777 を, PKT の濃度である 45 に対応させる.

3.4 実験方法と評価指標

表 2 に, 本実験において行った 8 種類の実験内容を示す. T は, パケットの送信を始めてからの経過時間 [s] を表す. これらの実験を行うことで, フローのパケットの入力レートに応じた VNF に与える資源量の制御, 入力レートの時間的変動に対する挙動, 及び複数フローに対してそれぞれ異なる VNF を適用する場合の制御を確認する.

評価指標として, 定義した化学反応式における各化学物質の濃度の時間変化, 各 VNF プログラムに与えた CPU 使用率の時間変化, 送信サーバからのフローの送信レートの時間変化, 及び受信サーバにおけるフローの受信レートの時間変化を用いる.

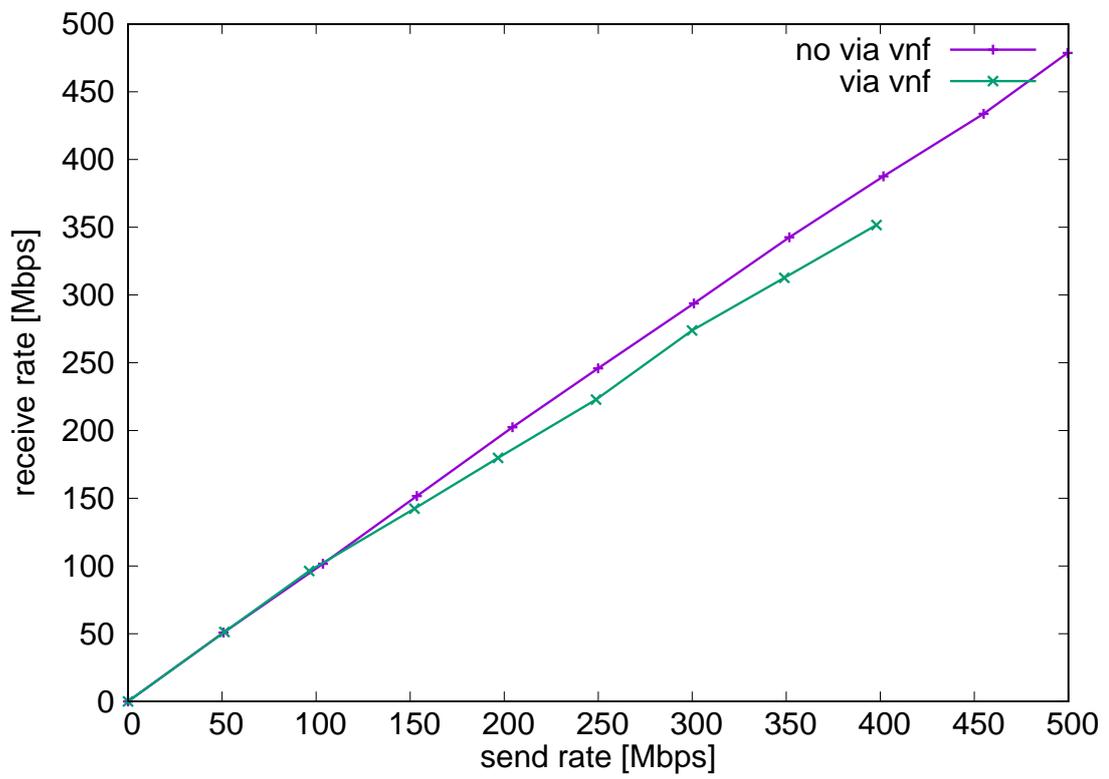


図 5: 送信レートと受信レートの関係

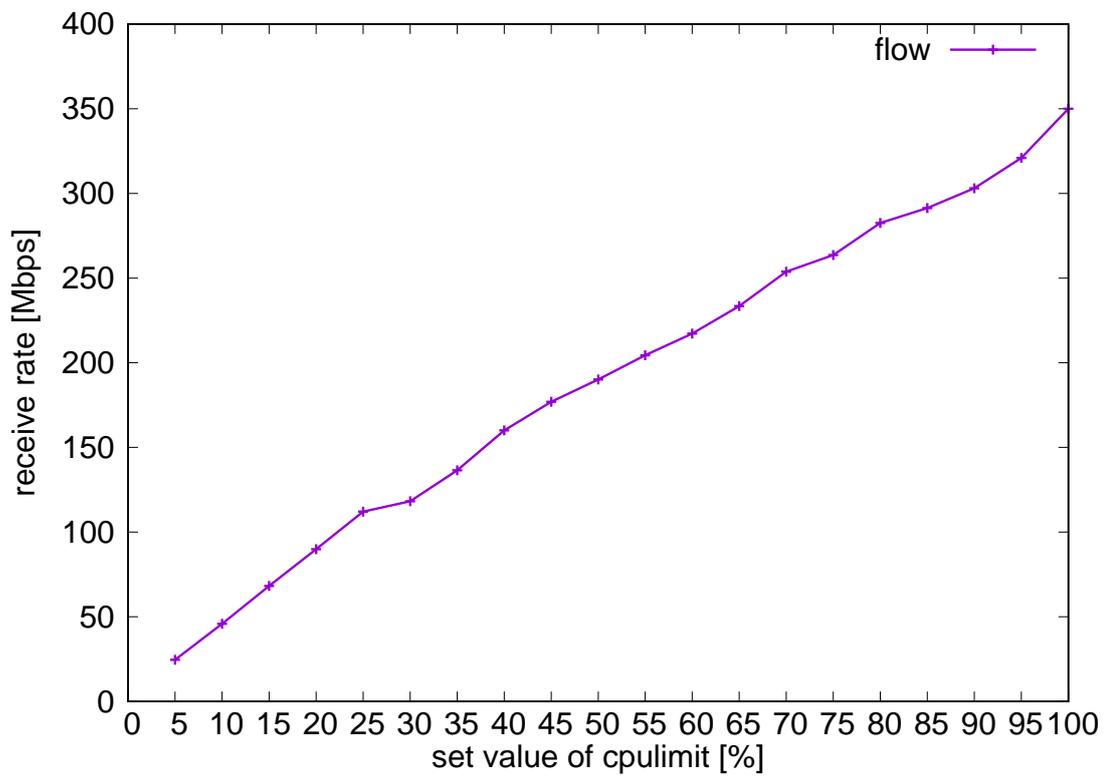


図 6: VNF に割り当てる CPU 使用率と受信レートの関係

3.5 検証結果と考察

本節では、表 2 に示す内容に基づいた実験を行った結果と考察について述べる。

3.5.1 フローのビットレートの影響

図 7, 8, 9 に、それぞれ表 2 における実験 1, 2, 3 の結果を示す。送信レート及び受信レートの時間変化をそれぞれ図 7(a), 図 8(a), 図 9(a), また、各化学物質濃度の時間変化をそれぞれ図 7(b), 図 8(b), 図 9(b) に示す。これらの図から、実験開始直後は、送信レートに比べて受信レートが小さくなっていることが分かる。これは、実験開始直後は *MEDIATE* の濃度が小さいため、VNF に十分な CPU 使用率が与えられておらず、NFV サーバに到着するパケットを処理し切れていないためである。*MEDIATE* の濃度が十分大きな値に収束すると、VNF に十分な CPU 使用率が与えられるため、パケットが過不足なく処理され、受信レートが送信レートにほぼ等しくなる。

また、フローの送信レートの大きさに依らず、同様の結果が得られていることも分かる。これは、図 7(b), 図 8(b), 図 9(b) に示すように、フローの入力レートの大きさに応じて *MEDIATE* の濃度が変化し、適切な量の CPU 使用率が VNF プログラムに対して与えられるためである。

3.5.2 フローのビットレートの変動の影響

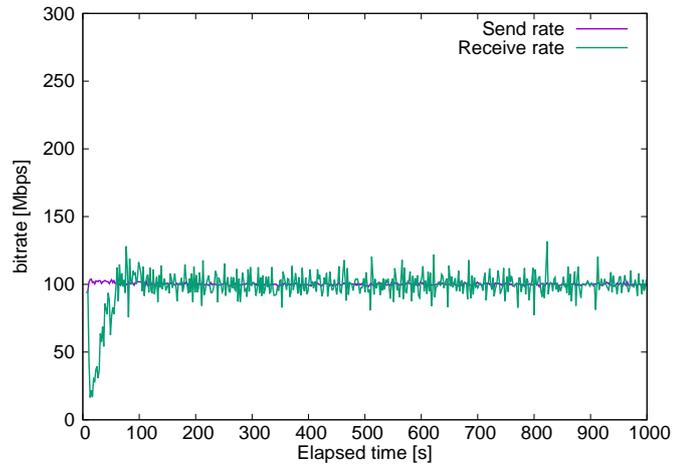
図 10 及び 11 に、フローレートが実験途中で変化する場合の実験結果を示している。これらの結果から、フローレートが途中で増加、あるいは減少する場合においても、各化学物質濃度が反応式の実行にともなって適切に更新され、VNF プログラムに与えられる CPU 使用率が適応的に変化することがわかる。その結果、フローレートの変化にかかわらず、受信レートが送信レートとほぼ等しくなっており、NFV サーバにおいて過不足なくパケットに対して VNF が適用されていることがわかる。

3.5.3 複数フローが存在する場合

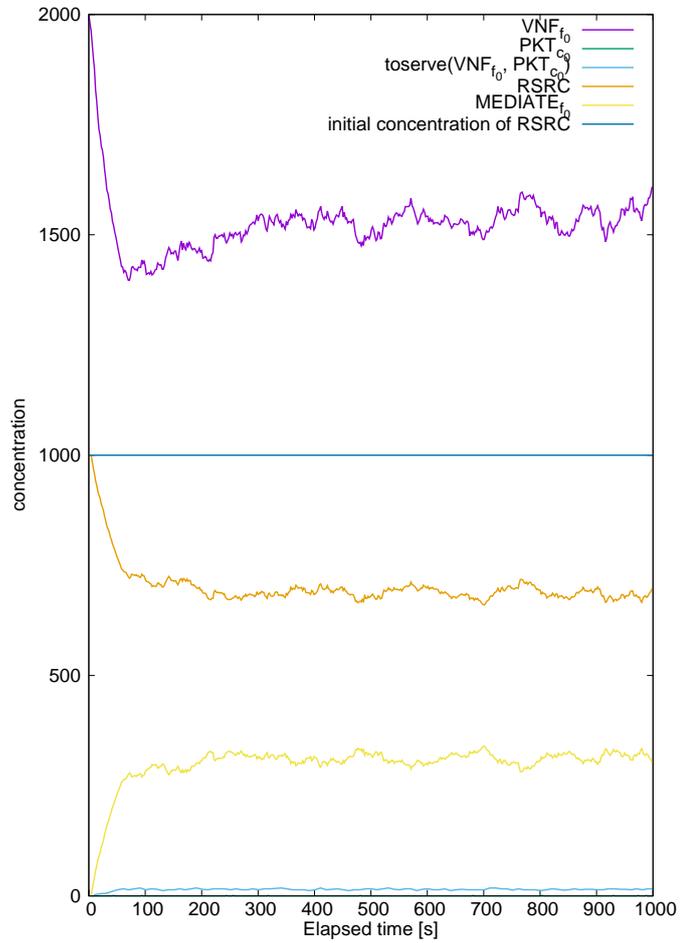
最後に、2 つのフローが存在する場合の評価結果を示す。図 12, 13, 14 は、それぞれ実験 6, 7, 8 に対する評価結果である。これらの評価結果から、NFV サーバにおいて、それぞれのフローに対する VNF プログラムに対して、フローレートに応じた量の CPU 使用率が与えられ、両方のフローのパケットに対して VNF が過不足なく適用されており、受信レートが送信レートとほぼ等しいことがわかる。また、2 つのフローレートが途中で変化する場合においても、その変化に適応的に追随し、VNF プログラムへ適切な量の CPU 使用率が与えられ、フローのパケットが適切に処理されていることが確認された。

表 2: 実験内容

実験	フロー数	実験時間 [s]	送信レート (フロー 1) [Mbps]	送信レート (フロー 2) [Mbps]
1	1	1,000	100	—
2	1	1,000	200	—
3	1	1,000	280	—
4	1	2,000	100 ($T \leq 1,000$) 200 ($T > 1,000$)	—
5	1	2,000	200 ($T \leq 1,000$) 100 ($T > 1,000$)	—
6	2	1,000	100	100
7	2	1,000	40	200
8	2	2,000	40 ($T \leq 1,000$) 200 ($T > 1,000$)	200 ($T \leq 1,000$) 40 ($T > 1,000$)

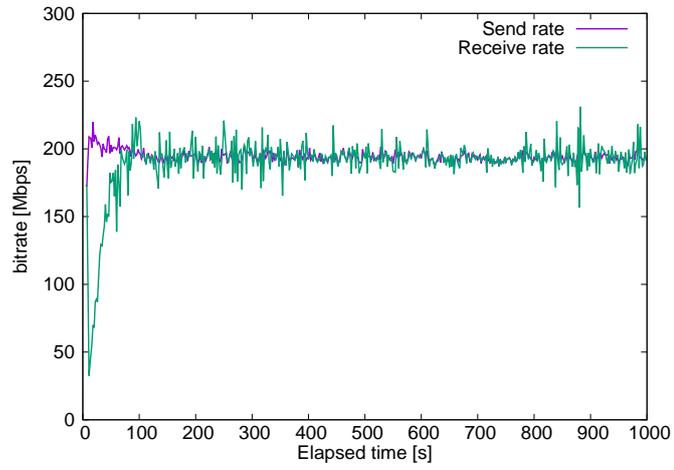


(a) 送信レート, 受信レートの時間変化

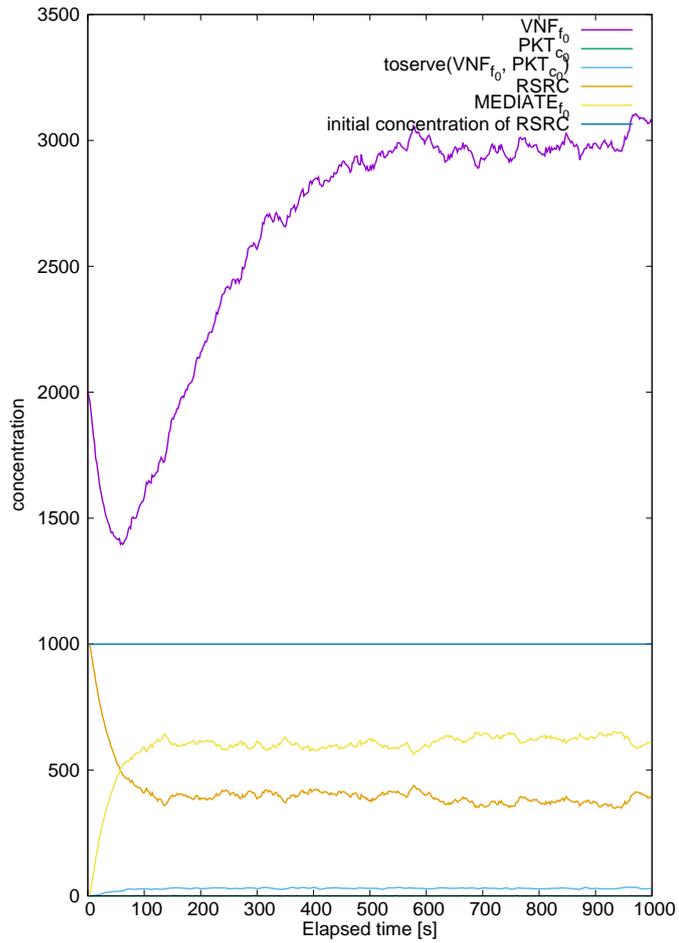


(b) 化学物質濃度の時間変化

図 7: 実験 1 の結果

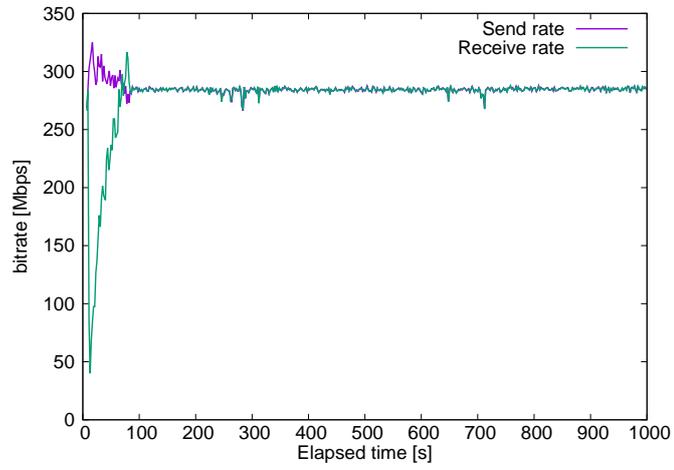


(a) 送信レート, 受信レートの時間変化

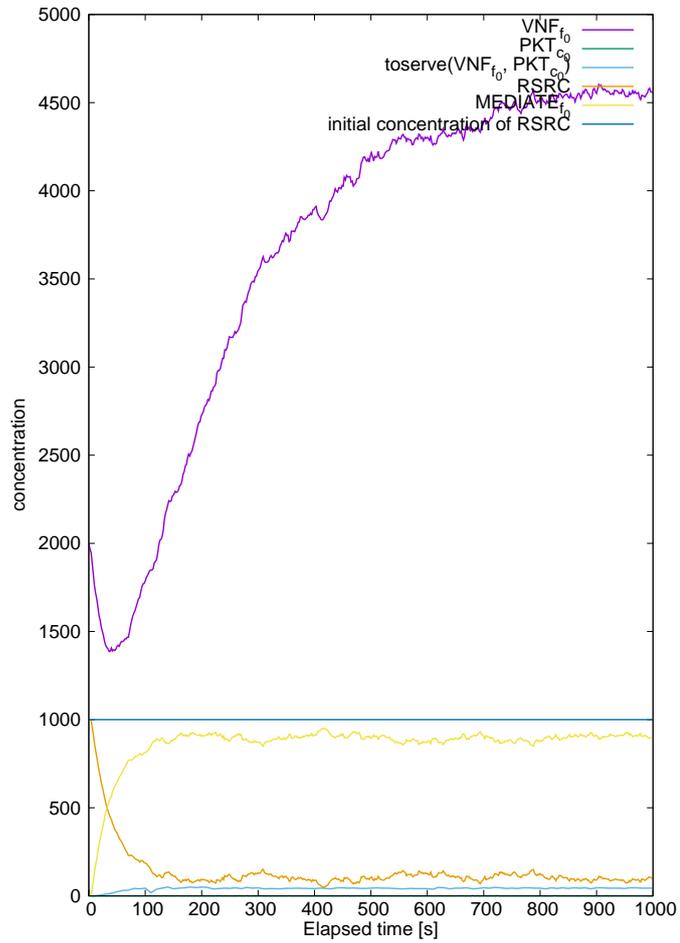


(b) 化学物質濃度の時間変化

図 8: 実験 2 の結果

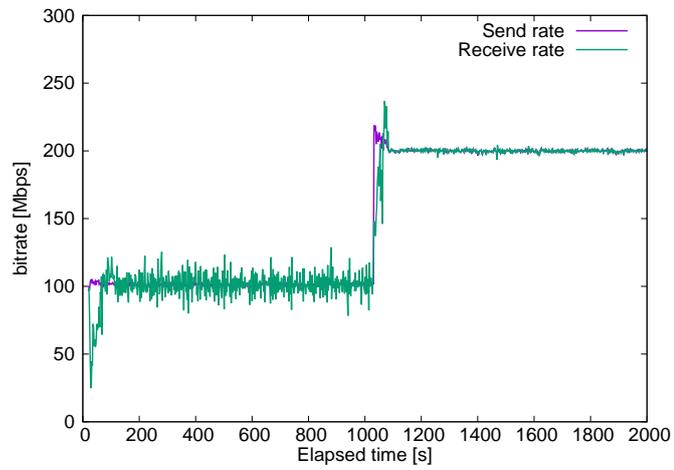


(a) 送信レート, 受信レートの時間変化

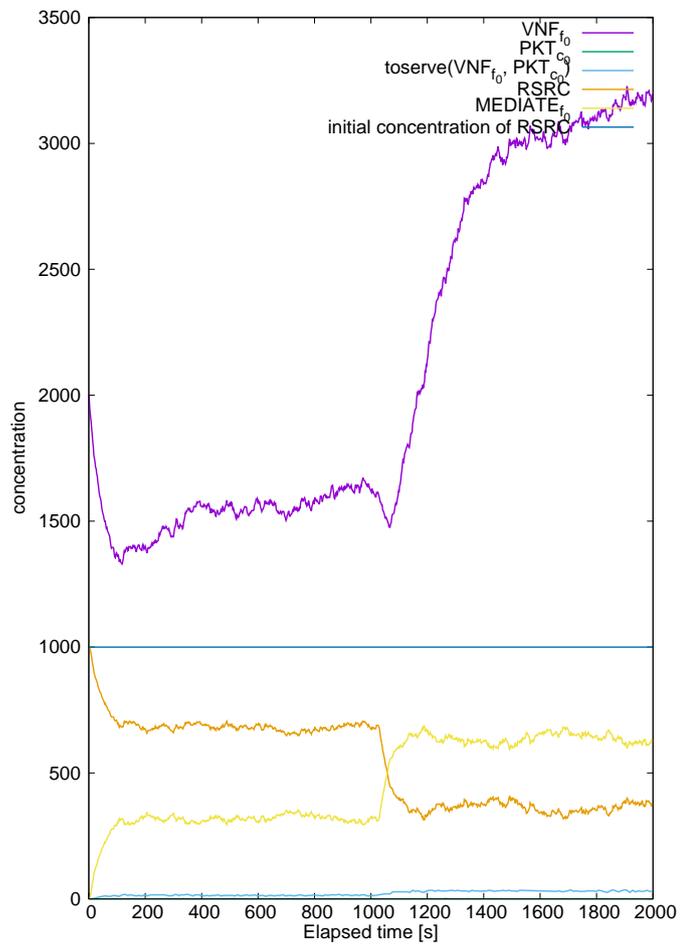


(b) 化学物質濃度の時間変化

図 9: 実験 3 の結果

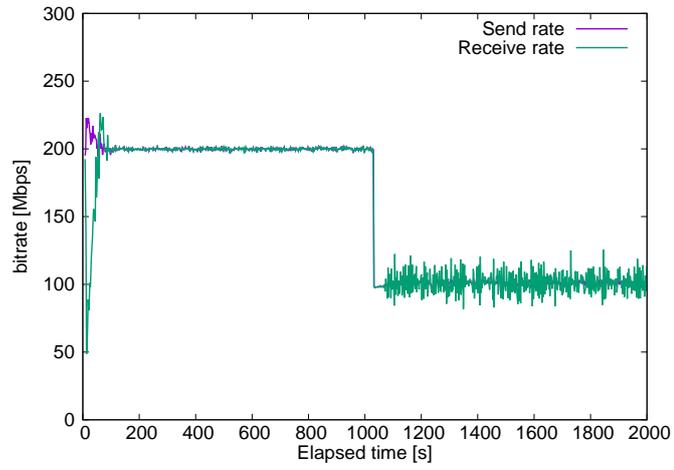


(a) 送信レート, 受信レートの時間変化

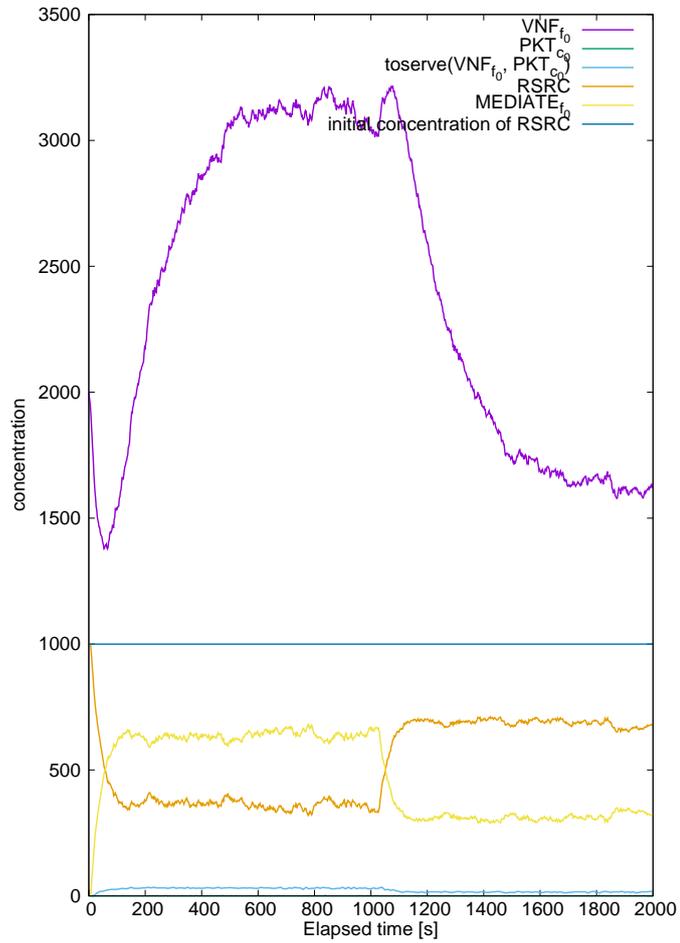


(b) 化学物質濃度の時間変化

図 10: 実験 4 の結果

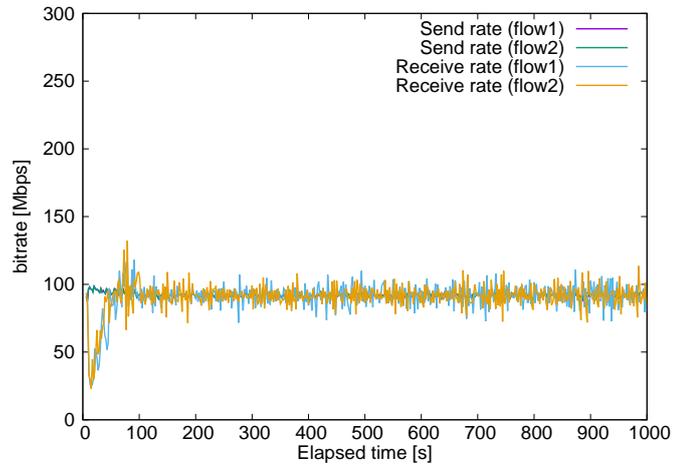


(a) 送信レート, 受信レートの時間変化

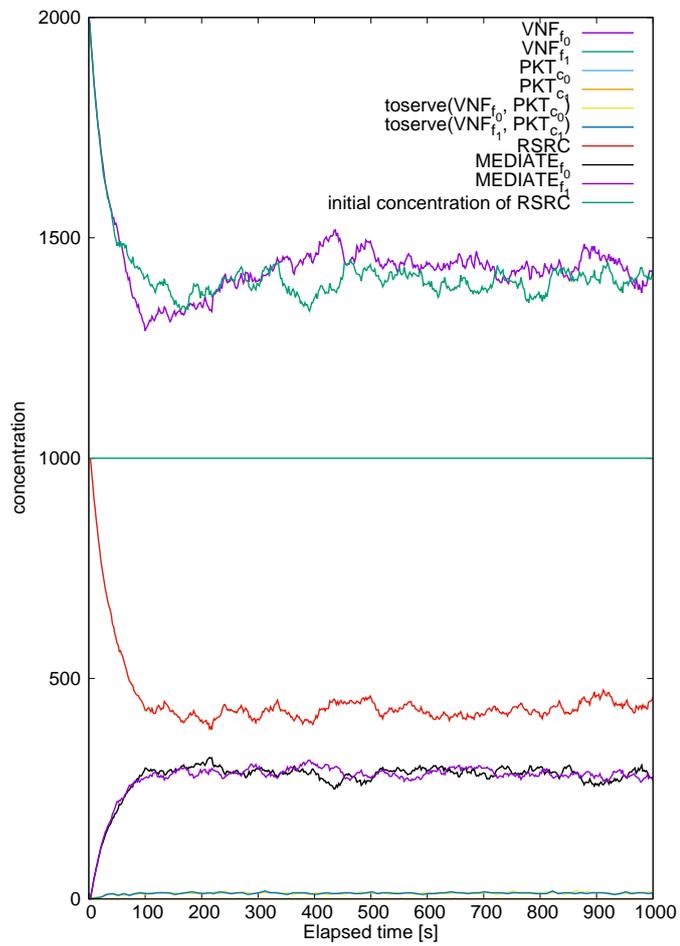


(b) 化学物質濃度の時間変化

図 11: 実験 5 の結果

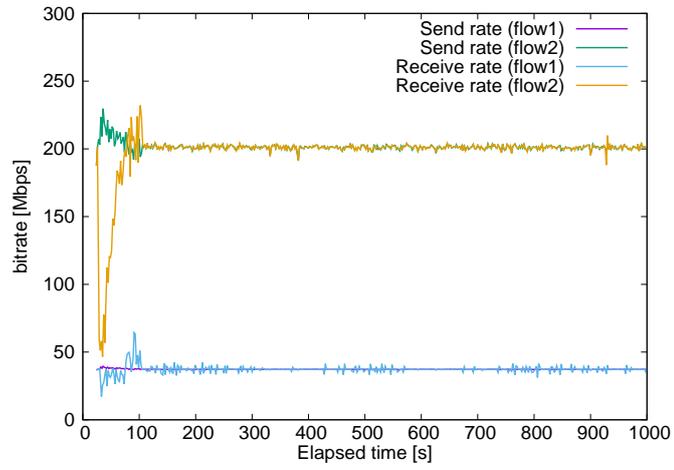


(a) 送信レート, 受信レートの時間変化

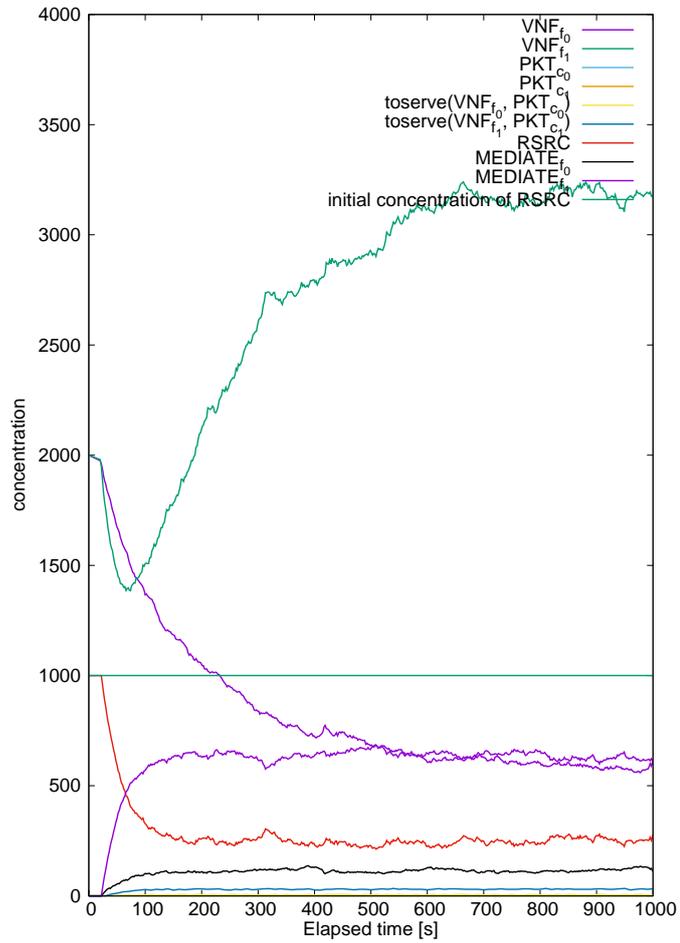


(b) 化学物質濃度の時間変化

図 12: 実験 6 の結果

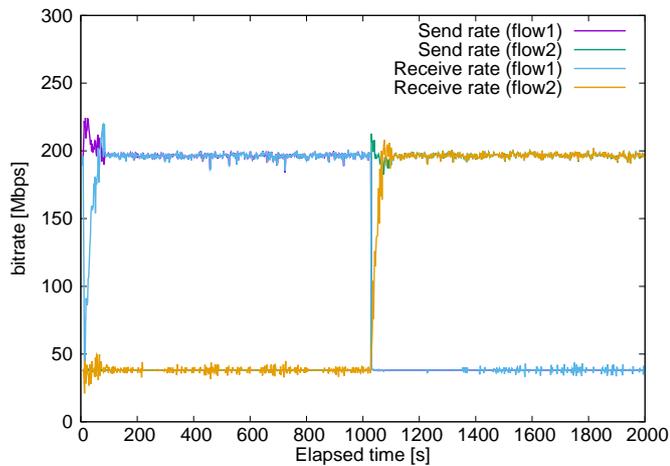


(a) 送信レート, 受信レートの時間変化

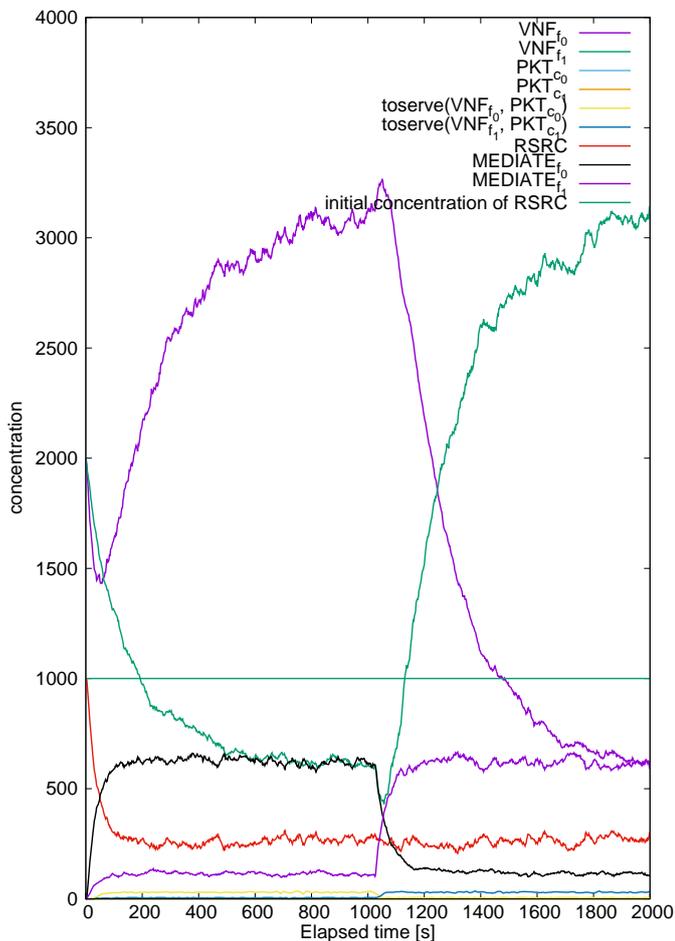


(b) 化学物質濃度の時間変化

図 13: 実験 7 の結果



(a) 送信レート, 受信レートの時間変化



(b) 化学物質濃度の時間変化

図 14: 実験 8 の結果

4 まとめと今後の課題

本報告においては、生化学反応モデルに基づくサービス空間構築手法を、NFV 環境における仮想ネットワーク機能の動的資源配分へ適用することを検討し、その有効性を実験によって検証した。具体的には、まず、化学反応式を構成する物質や反応式を、NFV 環境の構成要素や挙動に対応させた。次に、1つのサーバ上で複数の VNF が動作し、複数のネットワークフローに対して VNF を適用する環境を構築した。そして、提案手法に基づいて、ネットワークフローのトラフィック量に応じて、各 VNF へサーバ資源を配分する機構を実現した。さまざまなシナリオを想定した実験を行った結果、実装したシステムが、ネットワークの入力レートに応じて、各 VNF へ CPU 資源を適切に分配することにより、過不足なくフローの packets を処理できることを確認した。また、フローの入力レートの動的な変動に対しても、割り当てる CPU 資源を適応的に調整できることを示した。

今後の課題として、文献 [1] で検討されている、複数のタプル空間を接続したネットワークにおける VNF の拡散や移動についての実装、及び実験評価を行いたい。また、OpenStack [20] や Open Platform for NFV [21] などの実在する NFV プラットフォームを用いて、NFV 環境を構築し、提案手法を実装することも重要であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたって、御多忙の中、多くの方々に御指導、御教授を頂きました。指導教員である松岡茂登教授には、研究に対する心構えを教えて頂き、また様々な場面で御指導を頂きました。ありがとうございました。また、村田正幸教授には、様々な観点から鋭い御指摘や御指導を頂きました。ありがとうございました。そして、長谷川剛准教授には、日々の研究から本報告の作成に至るまで、終始丁寧な御指導を頂きました。初めての研究を進めるにあたって至らない所が多く、試行錯誤しながらも、ここまで取り組んでくれたのは長谷川剛准教授のおかげです。大変感謝しております。ありがとうございました。樽谷優弥助教授には、研究室生活から研究に至るまで様々な御指導を頂きました。ありがとうございました。

また、松岡研究室の先輩方には、研究に関する御指導や御支援を頂いただけでなく、研究室の生活でも大変お世話になりました。研究室に配属された当初、何も分からなかった私に温かく接して下さり、助言を頂きました。ありがとうございました。研究チームで一緒だった阿部修也先輩、坂田航樹先輩には、研究の進め方等、何も分からなかった私に、親身になって御支援、御指導頂き、研究の面白さ、難しさを教えて頂きました。ありがとうございました。最後に、研究チームの垣根を超えて、研究室に配属された同期の方々、心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 坂田 航樹, 長谷川 剛, 村田 正幸, “生化学反応モデルに着想を得た仮想ネットワーク機能の配置手法の提案と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 507, pp. 25–30, 2016年3月.
- [2] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Fourthquarter 2015.
- [3] ESTI, “Network Functions Virtualisation - White Paper1.” available at https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf.
- [4] J. Carapinha and J. Jiménez, “Network Virtualization: A View from the Bottom,” in *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures, VISA '09*, (New York, NY, USA), pp. 73–80, ACM, Aug. 2009.
- [5] R. Mijumbi, J. Serrat, J. L. Gorricho, N. Bouten, F. D. Turck, and R. Boutaba, “Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 236–262, Firstquarter 2016.
- [6] K. Ingham and S. Forrest, “A History and Survey of Network Firewalls,” University of New Mexico, Tech. Rep, Jan. 2002.
- [7] M. Finsterbusch, C. Richter, E. Rocha, J. A. Muller, and K. Hanssgen, “A Survey of Payload-Based Traffic Classification Approaches,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 1135–1156, Secondquarter 2014.
- [8] A. Gonzalez, P. Gronsund, K. Mahmood, B. Helvik, P. Heegaard, and G. Nencioni, “Service Availability in the NFV Virtualized Evolved Packet Core,” in *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, Dec. 2015.
- [9] H. Ko, G. Lee, I. Jang, and S. Pack, “Optimal Middlebox Function Placement in Virtualized Evolved Packet Core Systems,” in *2015 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, pp. 511–514, Aug. 2015.
- [10] ESTI, “Network functions virtualisation - white paper2.” available at https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper2.pdf.

- [11] J. G. Herrera and J. F. Botero, “Resource allocation in nfv: A comprehensive survey,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 13, no. 3, pp. 518–532, Sept. 2016.
- [12] X. Li and C. Qian, “A Survey of Network Function Placement,” in *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, pp. 948–953, Jan. 2016.
- [13] I. Foster, C. Kesselman, C. Lee, B. Lindell, K. Nahrstedt, and A. Roy, “A Distributed Resource Management Architecture that Supports Advance Reservations and Co-allocation,” in *Quality of Service, 1999. IWQoS '99. 1999 Seventh International Workshop on*, pp. 27–36, June 1999.
- [14] G. Hasegawa and M. Murata, “Biochemically-inspired Method for Constructing Service Space in Virtualized Network System,” in *Proceedings of ICIN 2016*, Mar. 2016.
- [15] M. Viroli, M. Casadei, S. Montagna, and F. Zambonelli, “Spatial Coordination of Pervasive Services Through Chemical-Inspired Tuple Spaces,” *ACM Trans. Auton. Adapt. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–24, June 2011.
- [16] W. Cleland, “The Kinetics of Enzyme-catalyzed Reactions with Two or More Substrates or Products,” *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Specialized Section on Enzymological Subjects*, vol. 67, pp. 173 – 187, May 1963.
- [17] H. Li, Y. Cao, L. R. Petzold, and D. T. Gillespie, “Algorithms and Software for Stochastic Simulation of Biochemical Reacting Systems,” Feb. 2007.
- [18] “Oracle VM VirtualBox.” available at <https://www.virtualbox.org/>.
- [19] “iPerf - The TCP, UDP and SCTP network bandwidth measurement tool.” available at <https://iperf.fr/>.
- [20] “OpenStack Open Source Cloud Computing Software.” available at <https://www.openstack.org/>.
- [21] “OPNFV.” available at <https://www.opnfv.org/>.