

待ち行列モデルを用いた OpenFlow の性能評価

後藤 祐希, 高橋 豊

キーワード: Software Defined Networking, OpenFlow, 待ち行列理論, ネットワーク仮想化

本稿は、後藤 祐希による 2014 年度京都大学工学部に提出した卒業論文をもとに加筆修正したものです。

1. 問題の簡単な説明と得られた結果

近年ネットワークの仮想化技術である OpenFlow が注目を浴びており、実応用段階へと移りつつある。そこで、今後の進展に向けては、ネットワーク全体への拡張可能性を議論するために、システムの基本的な性能特性を明らかにする必要がある。

OpenFlow の待ち行列モデルを構築することで、定常状態における系内パケット数分布を求めることができ、これをもとに、性能評価指標であるパケット転送遅延に関する議論を行う。

2. 問題の設定と考え方

SDN (Software Defined Networking) は、ネットワークをソフトウェアを用いて管理・制御する考え方である。従来のネットワークでは、アプリケーションなどに応じたサービス品質・セキュリティレベルなどの確保に際しては、ネットワーク機器のベンダーに依存した手作業を行う必要があり、大変な手間を要していた。これまでは、各々のネットワーク機器にパケットの転送を行う機能と、転送経路を制御する機能の二つが実装されていたのに対し、図 1 で示すとおり、SDN では、パケット転送機能をスイッチ、経路制御機能をコントローラとして分離し、コントローラのみをソフトウェアを用いて管理することで、構成を柔軟に変更することができるようになる [1]。SDN を実現するための技術として、OpenFlow が広く用いられつつある。OpenFlow では、フロー単位でパケットの経路制御を

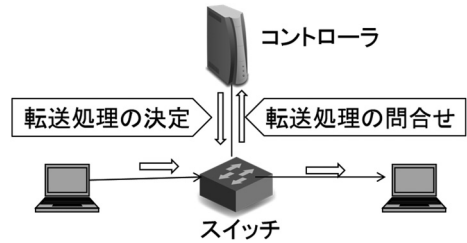


図 1 SDN の仕組み

行う。ここで、フローとは、パケットヘッダに同一の属性をもったパケット群のことで、同じフローに属するパケットに対しては同じ処理が行われる。パケット転送機能を有するスイッチは、各フローの経路制御に関する情報が記載されたフローテーブルを所持しており、スイッチにパケットが到着すると、まずフローテーブルを参照する。フローに対する情報が記載されている場合は、その情報に従ってパケットの転送を行う。もし情報が記載されていないのであれば、経路制御機能を有するコントローラへ問い合わせを行う。コントローラはスイッチのフローテーブルを更新し、スイッチはその情報に従ってパケットを転送する。

OpenFlow の処理の流れをモデル化したものが、図 2 である。コントローラには複数のスイッチを接続することが可能であるが、本モデルでは、基本的な性能を考察するために、一つのコントローラと一つのスイッチで解析を行う。外部からスイッチに到着したパケットをクラス S のパケットと呼ぶ。これらのパケットは、スイッチにおいて確率 $1 - \beta$ で外部に転送され、確率 β でコントローラへ転送される。動画像などの大きなファイルを送る場合にはフローサイズは大きくなり、 β は小さな値をとり、逆にテキストファイルを送る場合にはフローサイズは小さくなり、 β は大きな値をとる。コントローラに転送されたパケットを、クラス C のパケットと呼び、コントローラで処理後スイッチへ戻されるパケットを、クラス F のパケットと呼ぶ。クラス F のパケットは非割り込み式の優先権をもつ。すなわち、クラス F のパケットは、クラス S のパケット

ごとう ゆうき, たかはし ゆたか
京都大学 大学院情報学研究所
〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町
takahashi@i.kyoto-u.ac.jp

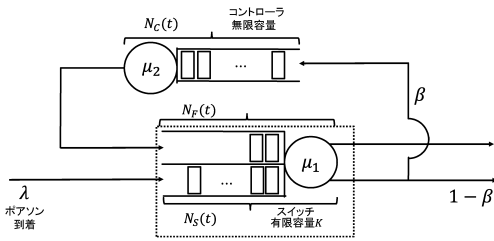


図2 OpenFlowの待ち行列モデル

より先に処理を受ける。外部からスイッチへのパケット到着は率 λ のポアソン過程、スイッチ、コントローラの処理時間分布はそれぞれ率 μ_1, μ_2 の指数分布に従うとする。また、コントローラは無限量、スイッチは有限容量 K のバッファを有すると仮定する。

3. 定式化

時刻 t において、クラス C, F, S のパケット数をそれぞれ $N_C(t), N_F(t), N_S(t)$ とすると、これらは

$$0 \leq N_C(t), 0 \leq N_F(t) + N_S(t) \leq K,$$

を満たす。以下では、 $\{N_C(t), N_F(t), N_S(t); t \geq 0\}$ を考える。この確率過程の状態空間を \mathbb{F} とすると、

$$\mathbb{F} = \{(i, j, k) \mid i \in \mathbb{Z}_+ := \{0, 1, \dots\}, (j, k) \in \{0, 1, \dots, K\} \times \{0, 1, \dots, K - j\}\},$$

となる。外部からのパケットの到着はポアソン過程に従い、スイッチおよびコントローラでの処理時間はそれぞれ独立な指数分布に従うので、 $\{N_C(t), N_F(t), N_S(t); t \geq 0\}$ は状態空間 \mathbb{F} 上の連続時間マルコフ連鎖になり、システムが安定であるとき、定常分布 $\pi = (\pi_{i,j,k})_{(i,j,k) \in \mathbb{F}}$ をもつ。

定常分布より、平均系内パケット数 $E[L]$ は $E[L] = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^{K-k} (i+j+k) \pi_{i,j,k}$ となり、クラス S 、クラス F それぞれのパケットの流れに着目すると、各々のスループット、つまり単位時間当たりのクラス S 、クラス F の処理パケット数は、

$$T_S = \mu_1 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=1}^K \pi_{i,0,k},$$

$$T_F = \mu_1 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^K \sum_{k=0}^{K-j} \pi_{i,j,k},$$

となるので、リトルの公式を用いると、平均パケット転送遅延 $E[W]$ は、次のようになる。

表1 パラメータ設定

スイッチのバッファ容量 K	10
スイッチでのパケット処理率 μ_1	50
コントローラでのパケット処理率 μ_2	0.1-4
外部からのパケット到着率 λ	20, 40
コントローラへの問い合わせ確率 β	0.01, 0.05

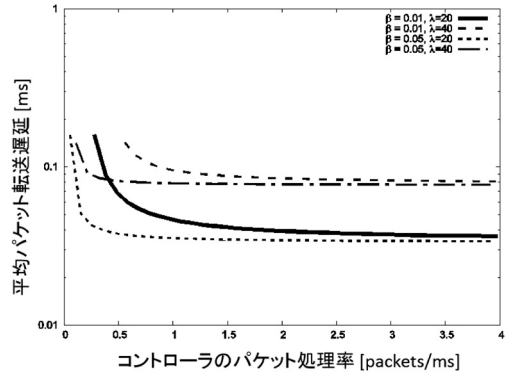


図3 コントローラのパケット処理率が平均パケット転送遅延に与える影響

$$E[W] = E[L] / ((1 - \beta)T_S + T_F)$$

$$= \frac{\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^{K-k} (i+j+k) \pi_{i,j,k}}{(1 - \beta) \mu_1 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=1}^K \pi_{i,0,k} + \mu_1 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^K \sum_{k=0}^{K-j} \pi_{i,j,k}}$$

4. 結果と考察

表1に、数値計算で使用したパラメータ設定を記す。図3は、 $\lambda = 20, 40$ かつ $\beta = 0.01, 0.05$ の場合において、コントローラのパケット処理率が平均パケット転送遅延に対して与える影響を表している。コントローラ処理率が大きくなるにつれ、平均パケット転送遅延が小さくなるが、処理率が大きければ大きいほど転送遅延の改善度は低くなる。また、 $\beta = 0.01, \lambda = 20$ のグラフと $\beta = 0.05, \lambda = 40$ のグラフが途中で交差しているが、コントローラ処理率が大きくなるにつれコントローラでの遅延が小さくなり、スイッチでの遅延の影響が大きくなるためである。

参考文献

[1] M. Jarschel, S. Oechsner, D. Schlosser, R. Pries, S. Goll and P. Tran-Gia, "Modeling and performance evaluation of an OpenFlow Architecture," In *Proceedings of the 23rd ITC*, 2011.