

SDN における SAT を用いた TCAM ルール分割の最適化

日大生産工(院) 〇小笠原 亮太
日大生産工 新井 雅之

1 まえがき

近年, ネットワークを仮想化する SDN (Software-defined networking) が注目されている [1]. SDN では管理する SDN スイッチのルールテーブルに大量のルールを配置する必要がある. しかし, パケットの高速転送処理のためにルールの並列比較が可能である TCAM (Ternary Content Addressable Memory) を用いた場合, 電力消費量とテーブル更新時間の問題により, ルールテーブルのエントリ数に上限が存在する [2]. この問題に対処する手法として, ルールテーブルをネットワーク上に存在する複数の SDN スイッチに分散しパケットの制御を行うルール分配が挙げられる. 文献 [3,4] では, ルール分配におけるサブテーブル割当問題を解く手法としてヒューリスティックなアルゴリズムが提案されている.

本研究では SDN におけるルール分配において, SAT ソルバを用いた最適なサブテーブル割当手法について提案する. 本提案手法を MiniSat [5] を用いて実験し, 評価を行う.

2 SDN におけるサブテーブル割当問題

SDN とは, ソフトウェアによりネットワークを仮想化し, 制御する技術である. SDN は SDN コントローラおよび SDN スイッチから構成され, デー

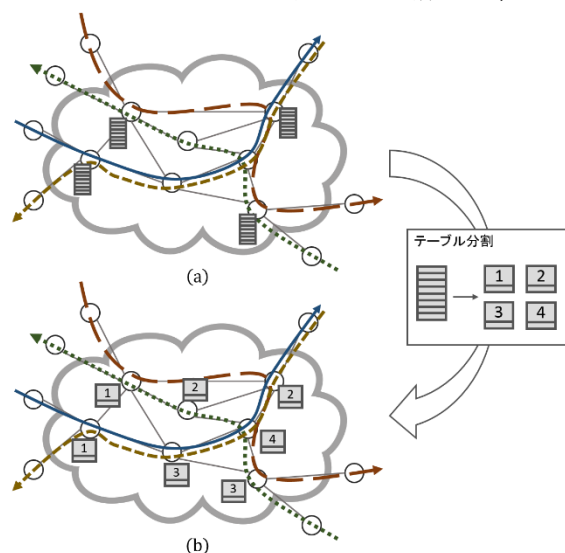


図 1. ACL におけるサブテーブル割当問題

タの通信制御ポリシーをコントローラが一括して担う. そのため, SDN ではネットワークの一元管理が可能である.

本稿ではサブテーブル割当問題を, ネットワーク上に存在する各フローパスが, 分割されたサブテーブルを全て経由するという条件のもとで, テーブルの分割数が最大となるサブテーブルの配置方法を考える問題と定義する. 各パスが全てのサブテーブルを経由することで, サブテーブル割当を行ってない場合と同様の制御を行える. また, テーブルの分割数を大きくすることで, 各ノードに配置するテーブルサイズを小さくすることが出来る. 図 1 に ACL (Access Control List) におけるサブテーブル割当問題の例を示す. ACL は通信パケットを制御するためのリストで, あるパケットの通過または破棄を一つのルールとしてテーブルを構成する. 図 1 (a) はルール分配をしていないネットワーク上での ACL テーブル配置例を示しており, 元のテーブルを各フローパスの入り口にあたるノードに配置する. 図 1 (b) はルール分配を行った際のネットワーク上での ACL テーブル配置例を示している. 図の例では元のテーブルを 4 個のサブテーブルに分割し, それらを各ノードに分散させる構成を取っている. またネットワーク上の各パスにおいて, 分割されたサブテーブルを全て経由するよう各ノードにサブテーブルが配置されている.

ルール分配におけるサブテーブル割当問題を解く手法 [3,4] が提案されている. しかしこれらの手法はヒューリスティックなアルゴリズムを用いているため, 分割数が最適であることは保証されない.

3 SAT を用いたルール分配の最適化

本研究では, SAT ソルバを用いたルール分配の最適化を行う手法について提案する.

SAT (satisfiability problem: 充足可能性問題) とは, ある命題論理式 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ に対して, $P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{True}$ となる変数 $x_1, x_2, \dots, x_n$ が存在するかという問題である. SAT を解くプログラムである SAT ソルバに, 命題論理式を連言標準形で入力することで, 高速に解を得ることが

可能である[5].

サブテーブル割当問題を SAT として表現するために、ネットワーク構成を定式化する. ネットワークに存在するスイッチ数を n とし、各スイッチを $s_1, s_2, \dots, s_n$ とする. ネットワークに存在するパス数を m とし、各パスを $p_1, p_2, \dots, p_m$ とする. また、パス p_i 上に存在するスイッチの集合を $S(p_i)$ とする. テーブルの分割数を v とし、各サブテーブルを $c_1, c_2, \dots, c_v$ とする.

独立変数として x_{ij} ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq v$) を用いる. $x_{ij} = 1$ の時、 s_i に c_j が割り当てられていることを示す. s_i に c_j が割り当てられていない場合は $x_{ij} = 0$ となる.

本問題は、One-hot 制約および出力制約を満たす必要がある. One-hot 制約は s_i ($1 \leq i \leq n$) に対して、 x_{ij} ($1 \leq j \leq v$) のうちただ一つが 1 で他が 0 となるという制約であり、判定式を h_i として (1) に示す.

$$h_i = \left(\bigvee_{j=1}^v x_{ij} \right) \cdot \left(\bigwedge_{k=1}^{v-1} \bigwedge_{l=k+1}^v (\overline{x_{ik}} + \overline{x_{il}}) \right). \quad (1)$$

出力制約は j ($1 \leq j \leq v$), a ($1 \leq a \leq m$) において各 $S(p_a)$ におけるスイッチのうち少なくとも一つに c_j が割り当てられていなければならないという制約であり、判定式を q_a として (2) に示す.

$$q_a = \bigwedge_{b=1}^v \bigvee_{s_k \in S(p_a)} x_{kb}. \quad (2)$$

式 (1), (2) より命題論理式 P を得ることができる.

$$P = \left(\bigwedge_{i=1}^n h_i \right) \cdot \left(\bigwedge_{a=1}^m q_a \right). \quad (3)$$

各パスでは分割されたサブテーブルを全て経由する必要があるため、分割数 v の最大値は最小のパス $\min(|S(p_a)|)$ と等しくなる. 本手法では $v = \min(|S(p_a)|)$ を初期値として探索し、命題論理式 P が解を得られない場合 v を 1 減らし、解が得られるまで探索を繰り返す.

4 評価

SAT ソルバを用いたルール分配の最適化手法を MiniSat[5] を用いて実験した. ネットワーク環境として、スイッチ数 n を 20 に固定し、パス数 m を 1 から 50 までの範囲で変化させた. 各パス p_a ($1 \leq a \leq m$) において、パス長 $|S(p_a)|$ を L に固定し、スイッチをランダムで経由するものとして生成した. L は 2 から 6 の範囲で変化させた. あるパス数 m とパス長 L における実験を 100 回繰り返し、分割数 v の平均値を算出した.

図 2 にパス数の変化による平均分割数を示す. 実験結果より、いずれのパス長 L においても、パ

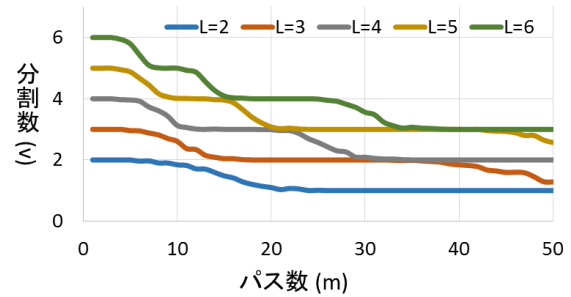


図 2. パス数の変化による平均分割数

ス数の増加に伴い分割数が減少することがわかった. SAT ソルバを用いた探索であるため、得られる分割数は最適値である.

数値解析に必要な時間は、スイッチ数 100、パス数 15、パス長 10 に固定し解析を 100 回行ったところ、平均 5.18 秒であった. 全体として、スイッチ数の減少、パス数およびパス長の増加に伴い、解析時間が増加する傾向にあるが、上記に挙げたような小規模のネットワーク環境では問題なく実用できる.

5 まとめ

本研究では SDN におけるルール分配において、SAT ソルバを用いた最適なサブテーブル割当手法について提案した. また本提案手法を MiniSat を用いて実験し、評価をした. 評価結果より、実験環境での分割数における最適数を得ることができた. またスイッチ数 100、パス数 15、パス長 10 程度の小規模なネットワークでは、本手法が十分に有効であることがわかった. 今後の課題として、サブテーブル割当問題の定式化の見直しが挙げられる. 連言標準形を構成する選言節の数を減らすことで、より規模の大きなネットワークでも適応可能になると想定される.

参考文献

- [1] N. McKeown et al., “OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks,” ACM SIGCOMM Computer Communication, Vol. 38, No. 2, p. 69–74, April 2008.
- [2] H. Chen et al., “The Case for Making Tight Control Plane Latency Guarantees in SDN Switches,” ACM SOSR 2017, April, 2017.
- [3] J. P. Sheu et al., “Efficient TCAM Rules Distribution Algorithms in Software-Defined Networking,” IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol. 15, No. 2, p. 854–865, June 2018.
- [4] Y. Kanizo et al., “Palette: Distributing Tables in Software-Defined Networks,” IEEE International Conference on Computer Communications, April, 2013.
- [5] N. Eén et al., “The MiniSat Page,” [Online]. Available: <http://minisat.se/>