

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11953

研究課題名（和文）大規模なNFVを実現するコンパクトなパケット分類手法の構築

研究課題名（英文）A compact packet classification method that realizes large scale NFV

研究代表者

田中 賢（Tanaka, Ken）

神奈川大学・情報学部・教授

研究者番号：50272810

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複雑なルールを対象とするパケット分類問題に対して高速なパケット分類実現のために必要なC1PおよびCirc1Pに対する決定木構築アルゴリズムを実現した。ルールリストを二値行列として見たときのC1Pを詳細に分析し、その判定と入れ替えを行う効率的な手法を検討した。関連する文献の調査と分析、分類にもとづき、連を統一する操作とその時間計算量について詳細な分析を行った。これらの結果について高速なパケット分類実現のために必要なC1PおよびCirc1Pに対するアルゴリズムを構築した。実際のIP4パケットを想定し108ビットの連について統合操作の計算機実験を行いその有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リモートワークの急激な普及に伴い、企業や官公庁、研究機関においてセキュリティの確保や機器性能の限界、ネットワーク運用の難しさなどが大きな問題となっている。NFVの下では、IPアドレスやプロトコルからセッション、アプリケーションなどの通信内容に応じたネットワーク構成の柔軟な変更が仮想環境上の高速なソフトウェアで実現される必要がある。本研究ではこの点に着目し、NFV環境の下で複雑な条件に従った高速なパケット分類アルゴリズムを構築した。考案した方法は、今後リモートワークを前提としたクラウドシステムへと移行する中で、汎用ハードウェアによって高度なネットワーク機能を実現するための必須の技術になる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we realized a decision tree construction algorithm for C1P and Circ1P, which is necessary to realize fast packet classification for complex rule-based packet classification problems. We analyzed C1P in detail when the rule list is viewed as a binary matrix, and studied efficient methods for its determination and replacement. Based on the survey and analysis of relevant literature and classification, we conducted a detailed analysis of the operation of unifying the chain and its time-computing complexity. Based on these results, we developed algorithms for C1P and Circ1P, which are necessary to achieve fast packet classification. We conducted a computer experiment of the unification operation on a 108-bit chain, assuming an actual IP4 packet, and confirmed the effectiveness of the unification operation.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

研究分野：ネットワークセキュリティ

キーワード：パケット分類 決定木 RBT C1P Circ1P

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

リモートワークの急激な普及により、社内システムへのアクセスは、セキュリティの確保や性能の限界、ネットワーク運用の難しさを抱えていた。その解決手段である NFV の下では、サービスや運用ポリシーに応じた最適なネットワーク構成を動的に構築するために、IP アドレスやプロトコルからセッション、アプリケーションなどの通信内容に応じたネットワーク構成の柔軟な変更を高速なソフトウェアで実現する必要があった。

2. 研究の目的

本研究ではNFV環境で求められる従来とは異なるより複雑な条件による高速なパケット分類の実現を目指した。例えば、悪意を持った通信を排除するためにパケットのヘッダだけでなくペイロードまで参照して分類を行う、あるいはカスタムの要求に応じて、サービスの種類や重要性、秘匿性に応じた経路選択をするというような状況を対象とした。これらの条件の追加や変更に対して随時対応できるパケット分類手法の実現を目指した。

3. 研究の方法

パケットヘッダに記述される条件に従うパケット分類手法として、従来の L3 スイッチでは、経路制御表の検索で類似の機能が実装されてきた。ネットワークアドレスのように上位にビット値{0,1}が集約され残りはマスク*であるような特殊な条件のルールをプレフィックスルールとよぶ。例えば、

11000000.10101000.*****.*****	インタフェース 1 から出力
-------------------------------	----------------

のような 128 ビット程度のプレフィックスルールに限定して実装を施すことで従来は高速な経路表の探索を行ってきた。しかし、ペイロードの内容まで参照するパケット分類では、一般に上位にビット値が集約されるような条件にはなりえない。一般的には、

11000000.*****.0100****.1001****	インタフェース 1 から出力
----------------------------------	----------------

といったビット値と*が混在するような条件が想定される。また条件のサイズもヘッダだけで IPv4 の場合 100 ビット以上、IPv6 環境では 500 ビットを超える膨大なものとなる。ペイロードを含めればサイズはさらに長大になる。このような条件をもつ数千から数万程度の規則を検索しながらワイヤスピードの 1~10Gbps の速度でパケットを分類できる手法はまだ明らかにされていない。ここでは、ハードウェアの援用によらずビット値の集約により高速な規則の検索を実現するアルゴリズムの構築を目指した。

4. 研究成果

我々は既存の RBT を改善するために Circular-Run-Based Trie を提案した。Circular-Run-Based Trie はルール数 n に依存しない一定の時間でパケットを分類することができる。しかし一般にルールリストは非循環連のルールから構成される。そこで、ルールリストを二値行列とみなし、行列が循環的な 1 を持つように並び替える方法を考案した。以下に例を示す。

表 1 C1P-行列

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
1	0	1	0	
1	1	1	1	
0	1	1	0	
0	1	0	1	
1	0	1	0	
0	0	1	0	

表 2 並び替え済み

	c ₁	c ₃	c ₂	c ₄
1	1	0	0	
1	1	1	1	
0	1	1	0	
0	0	1	1	
1	1	0	0	
0	1	0	0	

表 3 Non-C1P 行列

	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
1	1	0	0	
1	1	1	1	
0	1	1	1	
0	0	1	1	
0	1	1	0	
0	1	0	1	

表 2 において太字の 1 の列が並び替えにより集約された連である。この方法により、長大なルールにおいてビット値を集約し RBT にもとづく決定木のサイズを大きく削減することを目指した。

ビット値の集約が十分でないルールリストに対しては、ルールリストを分割して複数の木を構築することで全体のサイズを削減した。表 4, 5, 6 に例を示す。サイズ 9 のルールリストがルール 4+3=7 となっていることがわかる。

上記の方法により既存の Grouper、MDD と構築時間および分類時間の比較実験を行った。図 1, 2 に結果を示す。いずれのルール数でも Grouper の構築時間が最小となったが MDD はルール数 5000 でメモリ限界に達し構築に失敗した。分類時間については MDD が高速だがルール数 4000 に達すると MDD は分類時間が長くなった。一方、提案手法は 5000 ルールにおいても安定した分類に成功している。Circ1P ルールリストの構築は、実用的なルール数においても構築、分類が安定して実行可能であることがわかる。

表 4 Example of non-Circ1P rule list.

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}
r_1	1	*	0	*	1	1	0	*	*	*	0	1
r_2	1	0	*	0	*	1	0	0	0	*	1	*
r_3	0	1	0	1	0	1	*	*	0	0	*	*
r_4	*	1	0	*	1	0	*	1	0	1	*	1
r_5	*	0	1	1	*	*	*	*	*	1	*	*
r_6	1	0	0	0	*	*	*	*	1	*	*	0
r_7	*	1	*	*	1	0	0	*	*	*	0	0
r_8	0	*	1	0	0	0	*	0	*	0	*	*
r_9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

表 5 Circ1P rule list 1.

	c_{12}	c_5	c_3	c_{10}	c_2	c_8	c_9	c_4	c_1	c_7	c_{11}	c_6
r_1	1	1	0	*	*	*	*	*	1	0	0	1
r_2	*	*	*	*	0	0	0	0	1	0	1	1
r_4	1	1	0	1	1	1	0	*	*	*	*	0
r_9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

表 6 Circ1P rule list 2.

	c_{12}	c_9	c_1	c_4	c_3	c_2	c_{10}	c_5	c_6	c_7	c_8	c_{11}
r_3	*	0	0	1	0	1	0	0	1	*	*	*
r_5	*	*	*	1	1	0	1	*	*	*	*	*
r_6	0	1	1	0	0	0	*	*	*	*	*	*

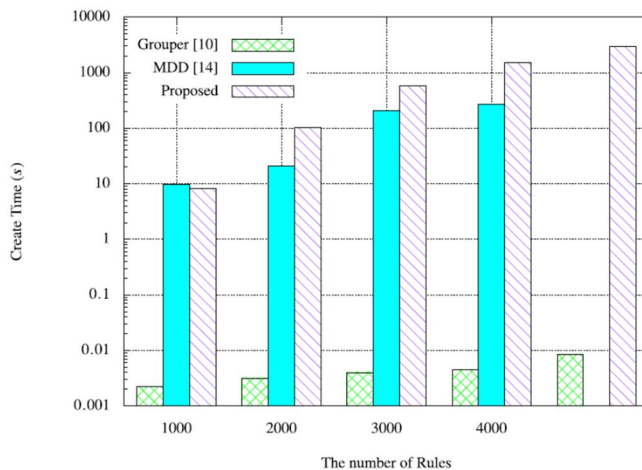


図 1 構築時間 (s).

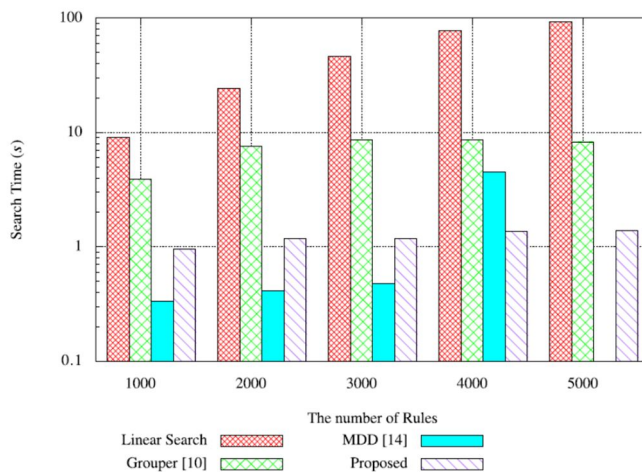


図 2 分類時間 (s).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fuchino T., Harada T., Ishikawa Y., Tanaka K., Mikawa K.	4. 巻 E106-A(9)
2. 論文標題 Computational Complexity of Allow Rule Ordering and its Greedy Algorithm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 pp.1111-1118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2022dmp0006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 淵野敬, 原田崇司, 田中賢, 三河賢治	4. 巻 64(9)
2. 論文標題 遅延の差分を用いたバケット分類の高速化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1217-1226頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20729/00227589	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 原田崇司, 淵野敬, 田中賢, 三河賢治	4. 巻 Vol.122, No.229
2. 論文標題 リスト構築問題の計算困難性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 .COMP, コンピューテーション	6. 最初と最後の頁 pp.32-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 淵野敬, 原田崇司, 田中賢, 三河賢治	4. 巻 J104-B(10)
2. 論文標題 ポリシーに影響しない先行制約削除に基づくルール並び替え法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 783-791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2020NSP0004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Fuchino, T. Harada, K. Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Accelerating Packet Classification via Direct Dependent Rules	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 12th International Conference on Network of the Future(NoF2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/NoF52522.2021.9609820	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 淵野敬, 原田崇司, 田中賢, 三河賢治	4. 巻 Vol. J103-D, No. 4
2. 論文標題 従属部分グラフ列挙によるルール並べ替え法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 228-237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2019PDP0019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Harada T., Tanaka K., Mikawa K.	4. 巻 Vol. E103-D, No. 3
2. 論文標題 Simulated Annealing Method for Relaxed Optimal Rule Ordering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information & Systems	6. 最初と最後の頁 509-515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2019FCP0006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石川裕樹, 原田崇司, 田中賢, 三河賢治	4. 巻 Vol. J103-B, No. 2
2. 論文標題 ポイント付連分割トライに基づく決定木構築法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 48-56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2019GTP0013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fuchino T., Harada T., Tanaka K., Mikawa K	4. 巻 No.1
2. 論文標題 Acceleration of Packet Classification Using Adjacency List of Rules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICCCN.2019.8846923	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Harada T., Ishikawa Y., Tanaka K., Mikawa K.	4. 巻 Vol.E102-A, No.9
2. 論文標題 A Packet Classification Method via Cascaded Circular-Run-Based Trie	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 pp.1171-1178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.1171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 淵野敬, 原田崇司, 田中賢, 三河賢治
2. 発表標題 ポリシーに影響しない従属関係削除に基づくルール並び替え法
3. 学会等名 第19回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 淵野敬, 原田崇司, 田中賢, 三河賢治
2. 発表標題 共通部分の削除によるルールリスト最適化法
3. 学会等名 情報処理学会第86回全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 八木健三ウィリアム、淵野敬 , 原田崇司 , 田中賢 , 三河賢治
2. 発表標題 論理の単純化によるAllowListの再構築
3. 学会等名 情報処理学会第86回全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原田崇司, 田中賢, 三河賢治
2. 発表標題 ポインタ付連分割トライに基づく決定図構築法
3. 学会等名 情報処理学会研究報告Vol.2019-AL-176, No.3, pp.1-8, 2020年01月
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田崇司, 田中賢, 三河賢治
2. 発表標題 Computational Complexity of Relaxed Optimal Rule Ordering ,
3. 学会等名 信学技報, Vol.119, No.340, pp.47-54
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 淵野敬, 原田崇司, 田中賢, 三河賢治
2. 発表標題 SATソルバによるルールリストポリシーの等価判定
3. 学会等名 信学技報, Vol.119, No.329, pp.13-19, 2019年11月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 淵野敬, 原田崇司, 田中賢, 三河賢治
2. 発表標題 重み0のルール削除に基づくルール並び替え法
3. 学会等名 信学技報, Vol.119, No.249, pp.47-52, 2019年10月
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三河 賢治 (Mikawa Kenji) (00344838)	前橋工科大学・工学部・教授 (22303)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	原田 崇司 (Harada Takashi)	高知工科大学・情報学群・助教 (26402)	
研究協力者	淵野 敬 (Fuchino Takashi)	前橋工科大学・工学部・助教 (22303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------