

氏名	原田 崇司
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第238号
学位授与の日付	2019年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文の題目	The Packet Classification Problem and its Solutions
論文審査委員	主査 神奈川大学 教授 田中 賢 副査 神奈川大学 教授 永松 礼夫 副査 神奈川大学 教授 松尾 和人 副査 新潟大学 准教授 三河 賢治

【論文内容の要旨】

インターネット上でやりとりされるパケットは増大の一途をたどり、様々なサービスやセキュリティ上の要請を達成するためにパケットの分類や転送を高速に行う手法がますます重要になっている。本論文は、NFVやネットワークセキュリティなど、特に複雑な条件に従ったパケット分類をとりあげ、分類の高速化に必要な問題の形式化とその解法、およびデータ構造について理論的に検討している。

まず、到着パケットの頻度分布を考慮したルール順序最適化問題を、緩和された条件のもとで新たに RORO(Relaxed Optimal Rule Ordering)として形式化した。これにより、緩和された条件のもとでより高速に分類を行うルール順序を求めることが可能となった。

ROROを解くにあたってはルールの入れ替えに伴うルール重みの変動を考慮する必要がある。ここではルールの重みを求める問題が計算複雑さクラスの1つである#P-completeに属することを示し、この問題に対する効率的解法の存在に否定的予想を与えた。その上で、ZDDを用いた重みの算出法を提案し、現実的なサイズのルールに対し重みを算出できることを計算機実験により示した。

論文ではさらに RORO が NP 困難であることを示し、重みを求める問題と同様、効率的解法に対する否定的予想を与え、ルールのペアリングによる新たな発見的解法を提案した。ペアリング法は従属関係にあるルールの中で重み最小のルールとのペアを再帰的に構成することでルールの降順での並び替えを実現する多項式時間の解法である。従来、遅延平均の意味で最もよい解を与える方法は A. Tapdiya らによって提案された SGM(Sub Graph Merging)である。ペアリング法は SGM と同等以上に遅延を抑制する解を 1/10 程度の時間で求められる有効な手法であり、論文では計算機実験により有効性を検証している。

一般にルールの並べ替えにあたってはルールが実現するポリシーを維持することが必須である。並べ替えがポリシー破壊を引き起こすとネットワーク運用やセキュリティ上の重大な問題を引き起こすからである。しかし、2つのルールリストの等価性を判定する問題は NP 完全であると予想される。この論文では ZDD を用いて2つのルールリストの等価性を確認する方法を提案し、ペアリング法と合わせて計算機実験により現実的なサイズの問題に対し実用的な時間で等価性判定

が可能であることを確認している。

ルールリストの並べ替えとは異なり、決定木を用いたパケット分類法についても検討を加えている。決定木を用いた分類は分類時間がルール数に依存しないという望ましい特性を持つ反面、領域計算量がビット長に対して一般に指数的となる問題をもつ。ここでは、主査が提案した新たなデータ構造である Run-based-Trie を元に構成した決定木について検討し、ルールリストを C1P とよばれる特性にもとづいて分割し、構成される決定木のサイズを大幅に抑制する方法を提案している。提案手法によれば 5000 程度のルールまでで決定木が構築可能であり、計算機実験によりルールの増加に伴う分類遅延の増加を効果的に抑制できることを示している。この結果は、従来現実的なサイズでの運用が難しかった Run-based-Trie の実用化に道を開いている。C1P 特性の応用は他の様々な決定木構築を効率化できることから、今後 BDD や MDD、MTMDD などを用いた分類法においても大きな改善が期待できる。

【論文審査の結果の要旨】

本論文はパケット分類について広い観点から分類と分析を行い、様々な手法について理論的に検討し、新たな問題の形式化を行うと同時に計算複雑さの点からの難しさを明らかにしている。一般に #P-complete、NP 困難などのクラスへの帰属はその問題について多項式時間の解法が存在しないことを示唆する結果であり、直ちに発見的解法の必要性を要請する。本論文では、理論的結果を踏まえルールのペアリングに基づく発見的解法を提案し、その有効性を検証している。従来もっともよい解を与えるとしてされている Tapdiya らが提案した SGM をはじめ、多くの発見的解法との比較を行い、提案手法が同等以上の解を 10 倍程度高速に求められることを実験的に確認し、その有効性を詳細に示している。この結果は当該分野における本論文の顕著な貢献といえる。

Run-based-Trie に対する決定木構築において、従来は領域削減のために枝刈りが用いられてきた。ここではルールのビット列が備える特性の 1 つである C1P に着目し、ビット列の整序によって Trie の領域を大幅に削減することに成功している。離散数学の順列における知見を Trie の構築に応用することは、複数の分野における横断的な探究を必要とし、本論文の独自性を特徴づけているといえる。そこで得られた結果についても、従来の方法を大きく改善することに成功しており、Run-based-Trie をはじめとした決定木によるパケット分類の実用化に今後大きく貢献するものである。

ルールリストの最適化において従来ルールリストの等価性判定はとかく見過ごされてきた。このことはその問題が計算量的に手におえないことが明らかであることが背景にあるが、論文提出者は近年さまざまな分野で応用されつつある列挙アルゴリズムに着目した。疎な組み合わせ集合の列挙に有効とされる ZDD を用いた等価性判定を提案し、この問題への現実的な取り組みに道を開いた。従来見過ごされてきた問題に向き合い、他領域の知見にもとづき解決策を提示した点でこの分野への貢献は大きい。

審査において、三河副査より RORO の NP 困難性の証明の理路について疑問が提示されたが、説明の補完を行うことにより疑問は解消された。松尾副査からは論文題名や全体の構成について指摘が行われ、これらを最終的な論文に十分反映することが求められた。永松副査からは実験結果のグラフの提示法について問題が指摘され、全面的にこれらを描きなおすことが求められた。これらを含め多くの詳細な改善点が提案された。それらを解決することを条件として、審査委員は全会一致で

論文提出者の博士学位論文に対し合の審査結果を与えた。