

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11235

研究課題名（和文）特性の異なる複数経路を有効活用するためのマルチパスデータ転送方式

研究課題名（英文）Multipath data transfer method for effective utilization of multiple paths with divergent characteristics

研究代表者

阿部 洋丈（Abe, Hirotake）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：00456716

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：第一の成果は、我々の提案方式であるHayACKの実現可能性に関する調査である。我々の提案方式は、通常の転送方式では見られないパターンで通信パケットが流れる。そのため、ネットワークの途中に存在している通信機器によって通信が遮断される恐れがある。我々は、現状でどの程度の通信経路が不規則的なパケットを遮断するのかを実際に調査した。

第二の成果は、我々の提案方式が既存の方式に与える影響の調査である。従来から用いられている公平性の指標では、我々の想定するような状況をうまく取り扱うことが出来ない。我々は、HARMという指標を用いることで、我々の提案方式が既存に方式に与える影響が軽微であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代社会が扱うデータ量は膨大になり続けており、データ転送の効率は今後ますます重要な課題になる。本研究が扱うデータ転送方式は、既存の通信設備をソフトウェアによってより効率的に活用することを目指すものである。今回の研究により、我々の提案している方式の実世界における実現可能性や既存方式に与える影響が明らかになり、その実用化に向けて大きな前進が得られた。

研究成果の概要（英文）：The first outcome is a feasibility study of our proposed scheme, HayACK. In our proposed scheme, communication packets flow in a pattern that is not seen in ordinary communication transmission schemes. Therefore, there is a risk that communication may be interrupted by communication devices in the middle of the network. We have investigated how many communication paths actually block irregular packets in the current situation.

The second result is an investigation of the impact of our proposed scheme on existing schemes. Conventional fairness metrics do not handle the situation we envisioned well. By using the HARM indicator, we found that the impact of our proposed scheme on existing schemes is negligible.

研究分野：システムソフトウェア

キーワード：ネットワーク 転送制御 マルチパス転送 TCP MPTCP インターネット データ転送制御 複数経路

1. 研究開始当初の背景

今や、世界規模で張り巡らされた情報ネットワークが全人類にとっての「頭脳」の役割を担い始めていると言っても過言ではない。世界中の研究機関がそれぞれの計算資源を出し合い、それらをネットワークで相互接続することで構築されているグリッドコンピューティングは、素粒子物理学や宇宙物理の分野において無くてはならないものになっている。素粒子物理学におけるグリッドコンピューティングの一例である WLCG (Worldwide LHC Computing Grid, <http://http://wlcg.web.cern.ch/>) では、欧州の CERN の運用する LHC (Large Hadron Collider) で生成・観測されたデータを処理するために、年間で約 200 ペタバイトという膨大な量の観測データが LHC から世界各地の研究施設へと送信されている。

限られたネットワーク資源を有効に活用するための手法の 1 つに、マルチパス転送がある。マルチパス転送は、複数の異なる経路を論理的に 1 本のコネクションとして扱うことを可能とするためのデータ転送方式である。マルチパス転送では、送信元ホスト上のパケットスケジューラが、いま送信すべきパケットをどちらの経路で送信すべきかをその都度判断する。宛先ホストは、複数の経路にバラバラに到着するパケットを再度整列し、上位層へ引き渡す。

マルチパス TCP (以下、MPTCP) は、特にモバイルコンピューティングの分野において近年普及しつつあるマルチパス転送方式である。MPTCP の特徴は、既存アプリケーションプログラムや既存のネットワークとの互換性・親和性を重視している点にある。MPTCP は、アプリケーションプログラムとのインターフェースとして従来の TCP と同じ Socket API を採用しているため、既存のプログラムを全く改変することなく適用可能である。また、IP 層から見た場合は通常の TCP パケットと同じように見えるように注意深く設計されており、経路の途中のルータで破棄される可能性は低く押されている。

我々はこれまでの研究の過程で、MPTCP によって束ねられた経路間の伝搬遅延時間の差が開くにつれて、束ねたことによるスループット向上の効果が薄れ、最終的に効果がほぼ無くなってしまふ(つまり、単一経路だけで送信した場合と同じになる)という現象を確認した。一般に、往復遅延時間(RTT)が大きくなればなるほど TCP の転送スループット性能が低下するという事は広く知られている。我々の調査の結果、MPTCP の場合は、いくら一方の経路の RTT が小さくても、他方の RTT の大きさによって全体のスループットが低下してしまうという新たな課題が明らかになった。大回り経路は、往々にして利用率が低く、これが有効に活用できるようになればその効果は非常に大きい。

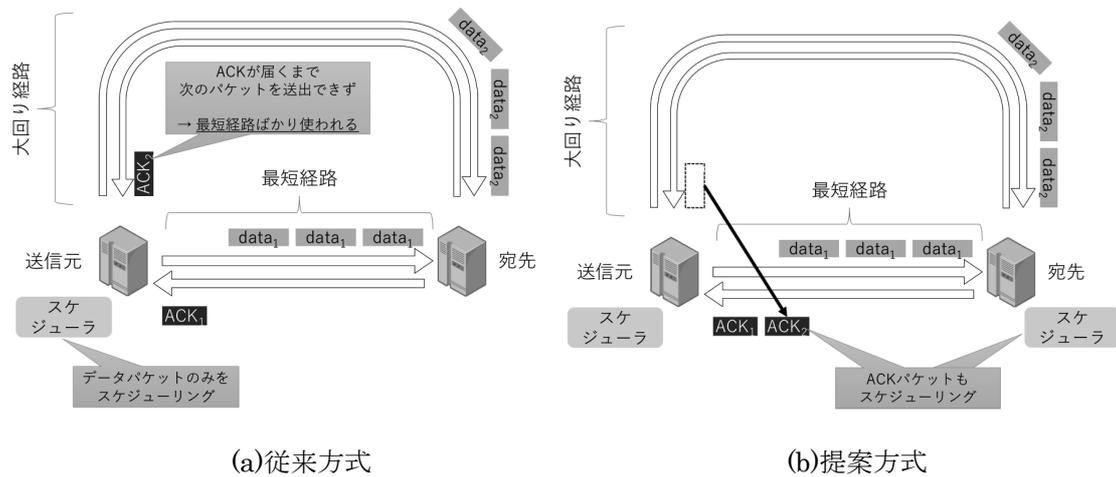
2. 研究の目的

我々は、前述の課題点(往復遅延時間の小さい経路と大きい経路を MPTCP で束ねると性能が出ない)を改善するべく、MPTCP におけるパケットスケジューリング方式を改良することを目指す。具体的には、現状ではデータパケットの送信時にのみ行われているスケジューリングを、ACK 送信時にも実施することでスループットの低下を防ぐ。

現状の MPTCP では、ある経路を通して送信されたデータパケットに対する ACK は、必ず同じ経路を通るように制御されている。これは、経路の途中で MPTCP のパケットが異常と見做され破棄されることを防ぐための保守的なアプローチであり、ここに改善の余地は大いにあると我々は見ている。我々はここにメスを入れ、ACK についても可能な限り RTT の小さい経路を通過するような制御を実現する。

図 1 は、従来の MPTCP におけるマルチパス転送制御方式と、我々の考えるマルチパス転送制御方式とを対比した図である。従来方式(図 1(a))では、輻輳ウィンドウサイズ(この例では 3)の個数分のデータパケットを連続して送出するタイミングで、利用可能な(つまり、ACK の到着待ち状態でない)経路の中から、最も RTT の短い経路がスケジューラによって選択される。データパケットはその選択された経路に繋がるインターフェースを介して送出され、宛先ホストへ届けられる。すべてのパケットが宛先ホストで受信されると、宛先ホストはデータパケットが来たのと同じ経路を用いて ACK パケットを返送する。これが MPTCP における基本的な動作原理である。

従来方式(図 1(a))では、図に表されているように最短経路と大回り経路が組み合わせられている



(a)従来方式 (b)提案方式
図 1. 従来の転送制御方式と、我々の提案する転送制御方式の対比

場合、たとえどれだけ大回り経路の帯域幅に余裕があったとしても、最短経路ばかりが用いられるという現象が起き得る。それは、前述したように、スケジューラが RTT に基づいて経路を選択しているためである。たとえば、大回り経路の RTT が最短経路の RTT の n 倍であるとする、大回り経路で一往復する間に最短経路では n 回の往復が行われる。

提案方式(図 1(b))では、従来はデータパケットにしか適用されていなかったパケットスケジューラを、ACK パケットにも適用する。スケジューラ自体は、宛先ホスト側にも元々備わっている、それを流用することが容易に可能である。ACK パケットについても、データパケットと同様に、RTT が短い経路を優先して使うようにすることで、従来は大回り経路で返送されていた ACK2 パケットが、最短経路を介して送信元ホストに返送されることになる。これにより、大回り経路でのパケット再送信が迅速に可能となり、転送スループットが大幅に向上する。我々は既にこの方式のプロトタイプ実装を行っており、単純なネットワークを模したシミュレーション実験においては、RTT の差が著しく大きい場合でも性能が期待通りに向上することを確認済みである(Morikoshi et al., IEEE CloudCom WS, 2017)。

3. 研究の方法

本研究では、以下の点について明らかにすることを目指す。第一は、既存のネットワークとの親和性の実地調査である。第二は、MPTCP 以外の通信との公平性の検証である。

我々の提案方式は、データとは異なる経路を介して ACK が返送される。これは、通常の TCP 転送に当てはめると、ACK が来ないにもかかわらずデータだけがどんどん送られることを意味する。単純なネットワーク機器においては特に問題にはならないが、性能改善やセキュリティ監視などの目的でネットワーク中に設置された機器(いわゆる middlebox)においてはパケットの破棄が起きる可能性は否定できない。そのため、さまざまな環境下において本方式を使用し、その影響を網羅的に調査する必要がある。

同じ経路で ACK が到着するよりも前に次のデータパケットを送信する本提案方式は、通信の公平性に影響を及ぼす可能性がある。言い換えると、通常の TCP によるデータ転送が同じ経路上で行われていた場合、そちらの可用帯域を過剰に奪い過ぎてしまう可能性である。通信の公平性については、TCP の輻輳制御等の研究において確立された評価手法があるので、それらの手法を用いて MPTCP が通常の TCP に与える影響の検証を実施する。

現在我々が用いている ACK 用のパケットスケジューリングは、データ用のものを基本的にそのまま用いている。しかし、データパケットと ACK パケットでは目的や性質が異なるため、より適した制御方式がある可能性は高い。また、前述の親和性や公平性を考えて、データパケットとは異なる制御を行うのが適している可能性も十分考えられる。将来的には、性能・親和性・公平性のすべてをバランスよく満たす ACK スケジューラの制御方式を確立することを目指す。

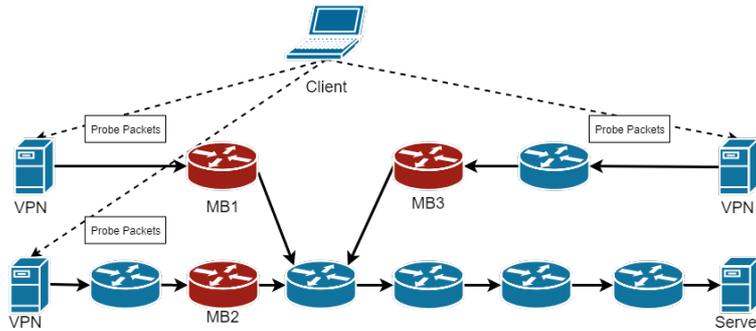


図 2. 提案方式の実現可能性に関する調査の概要 (Koibuchi et al., ISGC 2021 より抜粋)

4. 研究成果

(1) 提案方式の実現可能性に関する調査

前述のように、我々の提案方式は、ACK パケットの流れに影響を及ぼすため、経路上に設置された middlebox 等によって通信が遮断されてしまう恐れがある。我々の提案方式の実現可能性を調査するために、我々は、データパケットの送信に対応しない、不規則的な ACK パケットを意図的に送信することで、そのようなパケットの送信を遮断する経路と遮断しない経路の割合がどうなっているかを調査した。

我々の調査方法の概要を図 2 に示す。我々は、Honda et al. (ACM IMC'11) による ECN (Early Congestion Notification) 機能に関する調査で用いられている方法を参考に、世界各地の計算機から、我々が日本国内に設置したサーバ計算機にそのようなパケットを送信してパケットの到達可能性を調べる手法を用いた。Honda et al. では、知人や国際会議参加者にプログラムの実行を依頼する方式を使用していた。それに対し、我々は、ボランティアベースの VPN サービス (Softtether VPN) を利用して、日本国内を含めた世界各地の計算機を仮想的に利用することで、短時間で多数の経路の調査を実施した。

表 1 は、我々の実施した調査の一例を示している。表 1 に示す結果は、暗号化されていない WWW の参照時に用いられる通信ポートをターゲットとした通信において、11 カ国から集めた 87 台の計算機から我々のサーバまでの通信経路を調査した結果である。調査に際しては、単純な ACK パケット (A) に加えて、その他のパターンのパケットでも調査を行って比較を行った。その結果、我々の調査した 87 経路のうち 71 の経路において、データパケットに対応しない不規則な ACK パケットが通過した。また、それ以外のパターン (たとえば、ACK を新たにフラグに加えて他のフラグもオンにしたパケット) の場合でも到達可能性に違いは見られなかった。

表 1. 調査結果の一例: データパケットと一致しない ACK パケットが 80/tcp ポートを通じた経路の割合。Country は国名の ISO コードを表す。IP は、その国の中で使用できた VPN サーバの数を表す。S, A, E, C はそれぞれ SYN, ACK, ECE, CWR フラグが立っていることを表す。(Koibuchi et al., ISGC 2021 より抜粋)

country	IP	A : 80	AE:80	SA : 80	AC : 80	AEC:80
KR	44	43	43	0	43	43
JP	31	21	21	0	21	21
VN	3	2	2	0	2	2
RS	2	1	1	0	1	1
AR	1	1	1	0	1	1
IN	1	1	1	0	1	1
CL	1	1	1	0	1	1
NO	1	0	0	0	0	0
TH	1	0	0	0	0	0
KH	1	0	0	0	0	0
LV	1	1	1	0	1	1
SUM	87	71	71	0	71	71
%	100	82	82	0	82	82

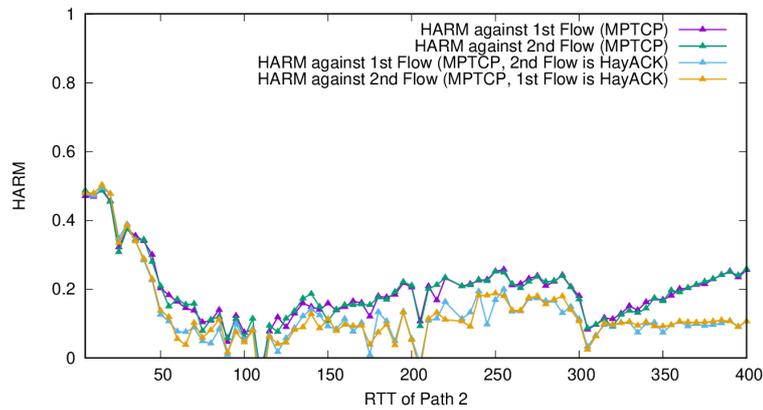


図3. 2つのフローが競合した場合のHARM値の変化。HARM値は低いほど良い。短い方の経路は帯域幅1Mbps, 遅延5ms。長い方の経路は帯域幅10Mbps, 遅延は5msから395msまで変化。紫と緑はMPTCP同士の競合。水色と黄色はMPTCPとHayAck(提案方式)の競合。

表1の結果を含む内容は、国際会議 ISGC 2021 において発表され、その予稿は国際論文誌 Proceedings of Science に掲載された。

(2) 公平性に関する詳細な調査

TCPのような転送制御方式の設計においては、しばしば公平性が重視される。これは、新たに設計された転送制御方式が、既存の制御方式と同時に使用された場合に、一方の(≒新しい方の)方式が既存の方式の帯域幅を奪うような形で高スループットを実現するような現象が起きていないかということを確認するためである。現状で最も広く知られている公平性指標に、JFI (Jain's Fairness Index) がある。これは、複数の方式が同じ条件で競合した場合に、達成された性能が公平であればあるほど1.0に近づく実数値として公平性を表現している。競合している方式が2つの場合は、JFIは(0.5, 1]の値を取る。

JFIは、これまでの転送制御方式の開発に役立てられてきたという実績がある一方で、我々の想定しているような、完全に同じ条件でない場合の評価には正しい評価を行うことが難しい。これまで議論してきたような、短い経路と長い経路の組み合わせだった環境において、オリジナルのMPTCPと我々の提案方式がそれぞれ流れている状況を考える。オリジナルのMPTCPは、前述の通り、長い方の経路を十分に活用することができない。それに対し、我々の提案方式は、オリジナルのMPTCPでは活用されていない部分を活用してより高いスループットを達成する。このとき、単純にJFIを適用すると、たとえオリジナルのMPTCPにスループット低下が見られていなかったとしても、「提案方式は公平性が低い」という結果が得られてしまう。

我々は、JFIでは適切に評価できない状況下においても評価を行う方法として、HARM (Ware et al. ACM HotNets' 19) に着目した。HARMそのものはスループットに限らず様々な指標において計算可能であるが、以降はスループットについて考える。HARMでは、競合前のスループットを x 、競合後のスループットを y と置いた場合、HARMの値は $(x - y)/x$ で表現される。つまり、競合相手がどれだけ高いスループットを達成していたとしても、自分自身に変化が起きなければHARMはゼロ、つまり不都合は無いということになる。

図3は、HARMを用いて、オリジナルのMPTCPと我々の提案方式(HayACK)を比較した結果の一例である。この結果からは、オリジナルのMPTCP同士が競合する場合に比べて、オリジナルのMPTCPとHayACKが競合する場合の方がHARMの値が低いということが読み取れる。これは、我々が事前に予想していたよりも良い結果であった。これが意味しているのは、HayACKは、自分自身の転送性能を高めるのみならず、競合しているオリジナルのMPTCPの転送性能の低下も軽減しているということである。このようなことが起きるのは、HayACKが長い方の経路を多く使った結果、短い方の経路の使用量が少なくなり、その分だけオリジナルのMPTCPがスループットを高めているためであると考えられる。この結果については、今後より詳細な分析を実施した後に、国際会議等で公表することを予定している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Koibuchi Hiroyuki, Abe Hirotake, Kato Kazuhiko	4. 巻 ISGC2021
2. 論文標題 Feasibility study on MPTCP ACK via alternative path in real network environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.378.0024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroyuki Koibuchi, Hirotake Abe, Kazuhiko Kato
2. 発表標題 Feasibility study on MPTCP ACK via alternative path in real network environment
3. 学会等名 International Symposium on Grids & Clouds 2021 (ISGC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鯉淵 寛之, 阿部 洋丈, 加藤 和彦
2. 発表標題 信頼性を持つ MPTCP における別経路 ACK の実環境動作に関する調査
3. 学会等名 第16回 ディペンダブルシステムワークショップ
4. 発表年 2018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
研究協力者	鯉淵 寛之 (Koibuchi Hiroyuki)	筑波大学・システム情報工学研究科	

6. 研究組織（つづき）

	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	森越 友祐 (Morikoshi Yusuke)	ヤフー株式会社・サイトオペレーション本部	

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