

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロープ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロープ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

active 計測によるネットワーク QoS 過程の サンプリングと QoS 推定精度について

渡部 康平

長岡技術科学大学大学院 工学研究科

2016 年 4 月 16 日

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロープ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロープ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

氏名	渡部 康平 (わたべ こうへい)
生年月日	1986 年 4 月 28 日生 (満 29 歳)
所属	長岡技術科学大学大学院 工学研究科
職位	助教

学歴・職歴

2005 年 4 月	首都大学東京 システムデザイン学部 入学.
2009 年 3 月	首都大学東京 システムデザイン学部 卒業.
2009 年 4 月	首都大学東京 大学院システムデザイン研究科 博士前期課程 入学.
2011 年 3 月	首都大学東京 大学院システムデザイン研究科 博士前期課程 修了.
2012 年 4 月	日本学術振興会 特別研究員 (DC2) に採用.
2014 年 3 月	大阪大学 大学院情報科学研究科 博士後期課程 修了.
2014 年 4 月	長岡技術科学大学大学院 工学研究科 助教に着任. 現在に 至る.

active 計測におけるプローブ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプローブ負荷によるパス品質劣化を考慮した遅延推定

- 首都大学東京と大阪大学，長岡技術科学大学を通して，様々な研究テーマに取り組んできた。

ネットワーク計測

- CoMPACT Monitorの精度向上のためのプローブパケット間隔設計法
- active計測におけるプローブパケット送出時刻の揺らぎ量の最適化
- プローブパケット負荷によるパス品質劣化を考慮した高精度遅延計測
- Network-wide packet behaviorによるパケット分類に基づく故障箇所推定

トラフィックモデリング

- 再試行トラフィックの振舞いを解析する準静的アプローチにおける揺らぎのモデル化方法

遅延耐性ネットワーク

- ノードモビリティの局所性が遅延耐性ネットワークにおけるエピソードミックブロードキャストに与える影響
- ノードの接触時間分布を利用したエピソードミックブロードキャスト方式

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるプローブ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプローブ負荷によるパス品質劣化を考慮した遅延推定

- 自己紹介
- active 計測におけるプローブ送出時刻のゆらぎ最適化
- active 計測におけるプローブ負荷によるパス品質劣化を考慮した遅延推定

パケット遅延計測の重要性とその計測手法

渡部 康平

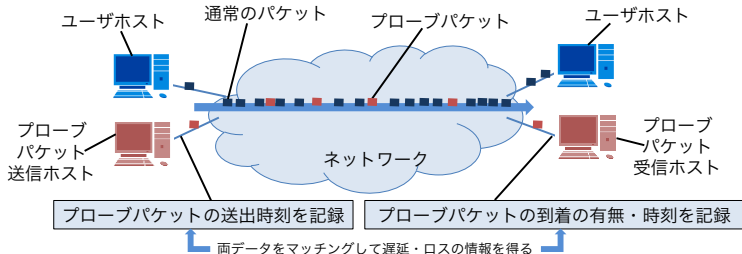
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロブ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプロブ負荷によるパス品質劣化を考慮した遅延推定

- 近年、インターネットではリアルタイム通信が増加している。(テレビ会議, IP 電話, Live 映像配信)
 - これらのアプリケーションはネットワークのパケット遅延に対してセンシティブな特性を持つ。
 - **遅延の特性の計測・解析が重要**となる。
-
- アクティブ計測は遅延を計測する代表的ツール。



渡部 康平

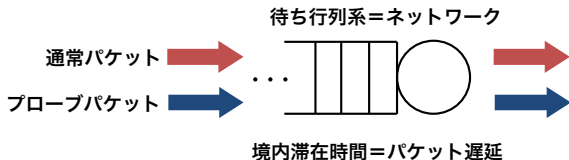
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ローブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ローブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- active 計測によるパケット遅延・ロスの計測を待ち行列的な視点で見る.



- 遅延過程を $D(t)$ として、時刻 $\{T_i\}$ に送出したプローブパケットが経験する遅延 $D(T_i)$ から $D(t)$ の特性を推定する.

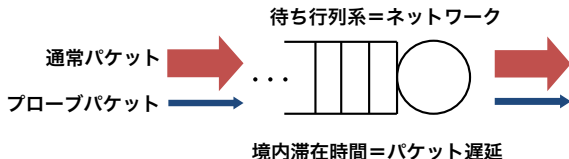
active 計測のプローブパケット送出としてはランダム到着 (指数分布間隔) が良いとされてきた



PASTA (Poisson Arrivals See Time Averages)

- Baccelli らの研究は指数分布間隔以外の送出でも真の遅延 (遅延の時間平均) を推定できることを示した.

- プローブの影響が無視できること (non-intrusiveness) が条件
(=パケットサイズが小さい or トラヒック量が少ない)
(=プローブトラヒックとシステムの挙動が独立)



NIMASTA (Non-Intrusive Mixing Arrivals See Time Averages)

遅延過程 $D(t)$ が定常で ergodic であるとする. プローブ送出時刻 $\{T_i\}$ に関する点過程が定常で mixing であり, $D(t)$ と独立であると仮定すると, 以下の式が成り立つ.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D(T_i) = E[D(0)], \quad \text{a.s.} \quad (1)$$

精度とフェーズロック現象

渡部 康平

自己紹介

発表概要

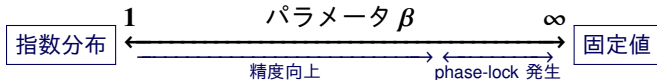
active 計測におけるブ
ロープ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロープ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- さらに Baccelli らは $D(t)$ の自己共分散関数が下に凸で、平均送出間隔が一定という条件下で、以下を証明した。
 - 固定値間隔は推定値の分散を最小化。
 - ガンマ分布間隔は形状母数 β について推定値の分散が単調減少。
- ただし、固定値間隔は mixing ではないため、フェーズロック現象により誤った値を推定する可能性がある。

Baccelli らの提案するガンマ分布間隔の特性

パラメータを通して指数分布と固定値間隔の間の無数の選択枝を提供し、トレードオフを解決



- ただし、最適パラメータの特定方法が提供されていない

本研究の目的

最適なプローブパケット送出を計測対象に対して一意に
特定する方法を提供し、計測対象と最適なプローブパケット
送出の依存関係を明らかにする。

- Baccelli らは最適なプローブパケット送出を特定する手法につ
いては提供していない
- フェーズロック現象を適切に評価することで、最適なプローブ
パケット送出を定義
- その効果は active 計測のみならず、様々なサンプリングを伴う
事象に適用可能

フェーズロック現象の効果

渡部 康平

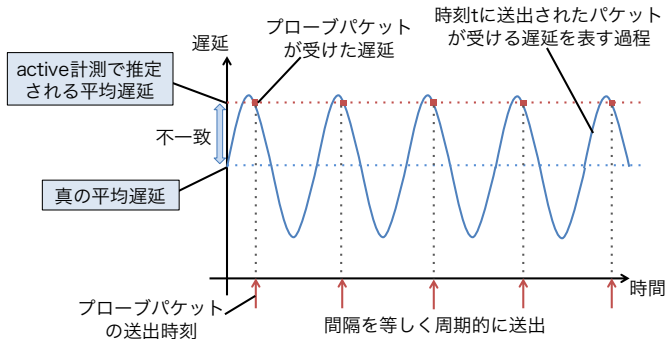
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロブ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプロブ負荷によるパス品質劣化を考慮した遅延推定

- 目的達成にはフェーズロック現象の適切な評価が必要
- フェーズロック現象は遅延やロス周期とプロブパケットの周期の一致によって発生



- 例えば、図のように遅延の大きいところばかり観測した場合、真の平均とは一致しない

フェーズロック現象の効果 (2)

渡部 康平

自己紹介

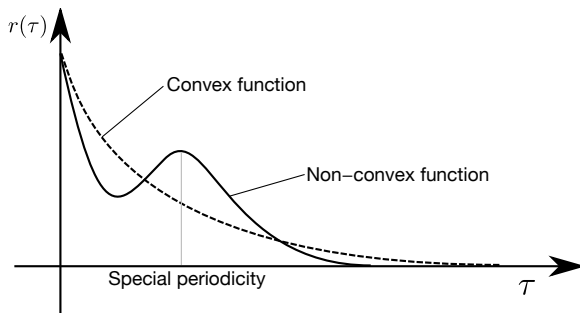
発表概要

active 計測におけるブ
ローブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ローブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

計測対象の過程が (長期平均の意味での) 周期性を持つことによるフェーズロック現象は、プローブパケットの周期をわずかにずらすことで簡単に回避可能 (そもそも、厳密な周期の一致は容易に起こりえない)

- 長期平均の意味で周期性を保つ場合は、自己共分散関数の凸性は崩れる。



フェーズロック現象の効果 (3)

渡部 康平

自己紹介

発表概要

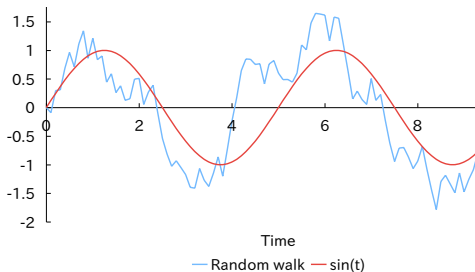
active 計測におけるブ
ロード送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロード負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

フェーズロック現象の評価における重要な点

- 実際の計測ではサンプルパスを有限区間で計測
- フェーズロック現象の真の問題は有限区間において現れる見かけ上の周期性

- 有限区間で区切れば、周期性の存在しないランダムな過程でも見かけ上の周期性は持ちうる



フェーズロック現象の効果 (4)

渡部 康平

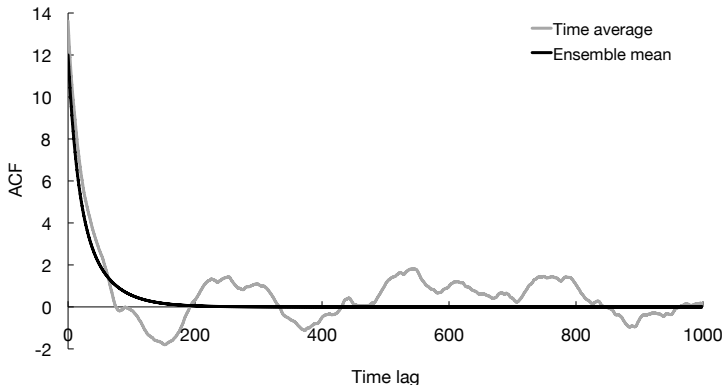
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロープ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロープ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- サンプルパスには特定周期成分が多く含まれる可能性



- プローブパケットの周期と同じ周波数成分が (偶然) 多ければ精度悪化し，少なければ精度は向上

フェーズロック現象の効果 (5)

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロープ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロープ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- 精度はサンプルパスの形状次第で変化する.
- つまり, 精度は単純に推定値 \hat{p} のばらつき $\text{Var}[\hat{p}]$ で評価するべきではない.
- 遅延過程 $D(t)$ が与えられたとすると, サンプルパスに依存した推定精度は条件付き分散を用いて $\text{Var}[\hat{p} | D(t)]$ と表現可能
 - $D(t)$ の実現値 (=サンプルパス) に依存して, 推定精度 $\text{Var}[\hat{p} | D(t)]$ は変化する.
- フェーズロック現象の問題は, サンプルパスの形状次第で**推定精度** $\text{Var}[\hat{p} | D(t)]$ が大きくばらつく点

評価関数の定義

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- 最適なプローブパケット送出とはどんなものかを考える

最適なプローブパケット送出に求められる条件

- 1 推定精度が平均的に優れる
- 2 推定精度がばらつかず、著しく精度が悪くなるケースが起
こりにくい

- 次の評価関数で最適なプローブパケット送出を定義

$$\underbrace{E \left[\text{Var} \left[\hat{P} \mid D(t) \right] \right]}_{\text{平均的推定精度を評価}} + \underbrace{\sqrt{\text{Var} \left[\text{Var} \left[\hat{P} \mid D(t) \right] \right]}}_{\text{フェーズロック現象による推定精度のばらつきを評価}}$$

平均的推定精度を評価

フェーズロック現象による
推定精度のばらつきを評価

\hat{P} : active 計測による推定値

$D(t)$: 遅延やロスを表す確率過程

ゆらぎを付加した計測

渡部 康平

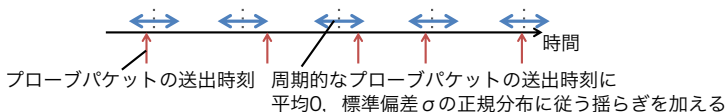
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- フェーズロック現象を回避するためのプローブパケット送出法を考える
- 固定値間隔のプローブパケットの周期をずらすことが必要
- 周期をずらすため、**間隔にランダム性 (確率的ゆらぎ) を加える**



- 本研究では、固定値間隔に正規分布のゆらぎを加える
 - 正規分布を用いたのは解析的に扱いやすいため
 - Baccelli らはガンマ分布を用いていたが本質的な違いはない

ゆらぎを付加した計測 (2)

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロープ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプロープ負荷によるパス品質劣化を考慮した遅延推定

- i 番目のプロープパケットの送出時刻 T_i を以下で与える

$$T_i = S + G_i - l \left\lfloor \frac{S + G_i}{l} \right\rfloor$$

l : 計測期間長

m : プロープパケット送出個数

S : 一様分布 $U(0, l)$ に従う確率変数

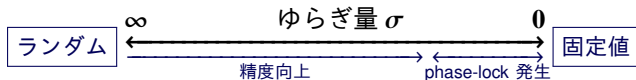
G_i : 正規分布 $N((i-1)l/m, \sigma^2)$ に従う確率変数

σ : ゆらぎとして与える正規分布の標準偏差

- $\hat{P} = \sum_{i=1}^m D(T_i)/m$ は、区間 $(0, l]$ における $D(t)$ の時間平均に対して不偏推定量になっている

ゆらぎを付加したプロープパケット間隔の特性

ゆらぎ量 σ を大きくするとランダムに、小さくすると固定値間隔に一致



- 正規分布のゆらぎを付加したプローブパケット送出においては、推定精度 $\text{Var}[\hat{P} | D(t)]$ は以下のように書き換えられる.

$$\text{Var}[\hat{P}|D(t)] = \sum_{i=1}^{\infty} w_i \left(\frac{C_i + S_i}{2} \right), \quad (2)$$

$$w_i = \begin{cases} \frac{1+(m-1)e^{-\left(\frac{2\pi i}{l}\right)^2 \sigma^2}}{m}, & i = mj \ (j = 1, 2, \dots) \\ \frac{1-e^{-\left(\frac{2\pi i}{l}\right)^2 \sigma^2}}{m}, & \text{otherwise} \end{cases},$$

$$C_i = \frac{2}{l} \int_0^l \cos\left(\frac{2\pi i t}{l}\right) D(t) dt,$$

$$S_i = \frac{2}{l} \int_0^l \sin\left(\frac{2\pi i t}{l}\right) D(t) dt.$$

- C_i, S_i は確率変数であることに注意する.

評価関数の挙動 (2)

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- さらに C_i , S_i が正規分布に従うと仮定すると, 評価関数は以下のように記述できる.

$$\begin{aligned} & \mathbb{E} \left[\text{Var} \left[\hat{P} \mid D(t) \right] \right] + \sqrt{\text{Var} \left[\text{Var} \left[\hat{P} \mid D(t) \right] \right]} \\ & \simeq \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{l} w_i r_{C,i} + \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{4}{l} w_i r_{C,i} \right\}^2} \\ w_i &= \begin{cases} \frac{1+(m-1)e^{-\left(\frac{2\pi i}{l}\right)^2 \sigma^2}}{1-e^{-\left(\frac{2\pi i}{l}\right)^2 \sigma^2}}, & i = mj (j = 1, 2, \dots), \\ \frac{m}{m}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad r_{C,i} = \int_0^l \left(1 - \frac{\tau}{l}\right) \cos\left(\frac{2\pi i}{l} \tau\right) r(\tau) d\tau \end{aligned}$$

- $r(\tau)$ は計測対象 $D(t)$ の自己共分散関数

- 計測のパラメータから最適なゆらぎ量を特定可能

$$\left. \begin{array}{l} \text{計測期間長} : l \\ \text{プローブパケット送出レート} : m/l \\ D(t) \text{ の自己共分散関数} : r(\tau) \end{array} \right\} \rightarrow \text{評価関数} \rightarrow \text{最適ゆらぎ量}$$

評価関数の挙動 (3)

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロープ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロープ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- M/M/1 のキュー長を計測について評価関数を算出
 - M/M/1 のキュー長に関して、自己共分散関数 $r(\tau)$ は以下の形で与えられる

$$r(\tau) \simeq \frac{\rho}{2(1-\rho)^2} \left\{ e^{-A|\tau|} + e^{-B|\tau|} \right\}$$
$$A = \frac{(1-\lambda)}{1+\lambda+\sqrt{\lambda}}, \quad B = \frac{(1-\lambda)}{1+\lambda-\sqrt{\lambda}}$$

評価関数および最適なゆらぎ量の計測パラメータに対する依存性を検証。

評価関数の挙動 (4)

渡部 康平

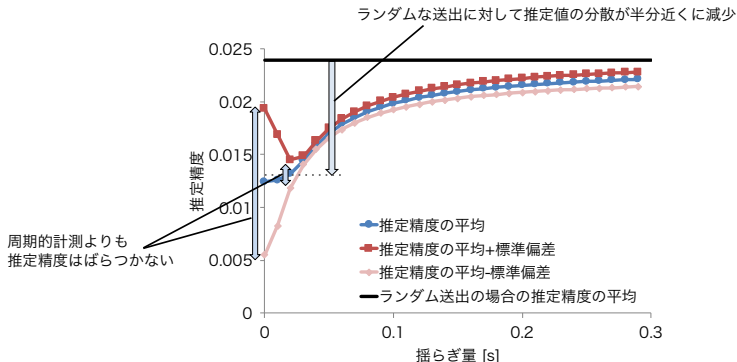
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロップ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロップ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

■ M/M/1 のキュー長過程を計測した場合の評価関数を表示



入力レート : 0.75

プローブパケット送出レート : 0.01

退去レート : 1.00

計測期間長 : 50000

- ゆらぎの小さい領域では、フェーズロック現象の影響を受けて評価関数が大きくなっている

評価関数の挙動 (5)

渡部 康平

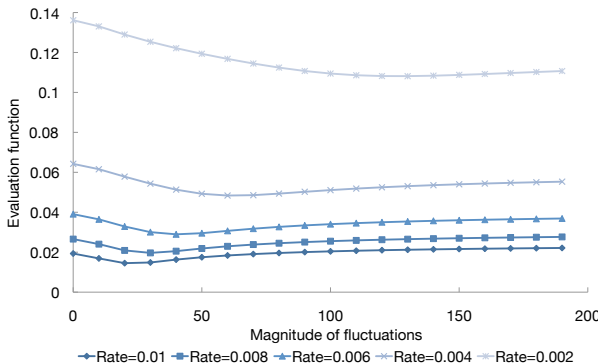
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

■ プロブパケットの送出レート毎の評価関数を表示



入力レート : 0.75

計測期間長 : 50000

退去レート : 1.00

■ プロブパケットのレートに依存して最適なゆらぎ量に変化

評価関数の挙動 (6)

渡部 康平

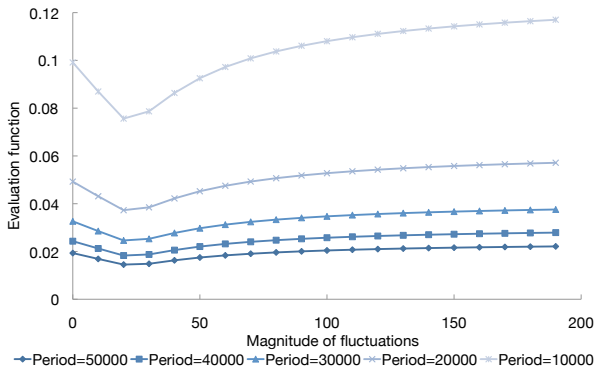
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

■ 計測期間長毎の評価関数を表示



入力レート : 0.75 プロブパケット送出レート : 0.01
退去レート : 1.00

■ 計測期間長の変化に対しては、最適なゆらぎ量是不変

評価関数の挙動 (7)

渡部 康平

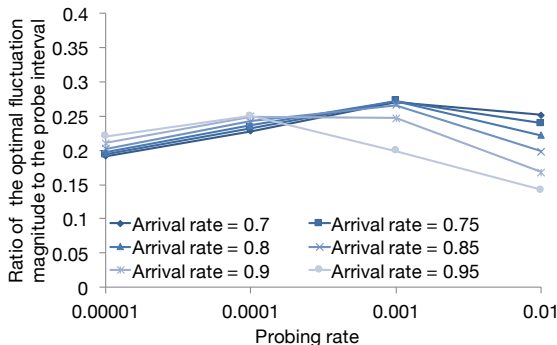
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロープ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロープ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- プローブパケットの平均送出間隔に対する最適なゆらぎ量の割合を表示



入力レート : 0.75

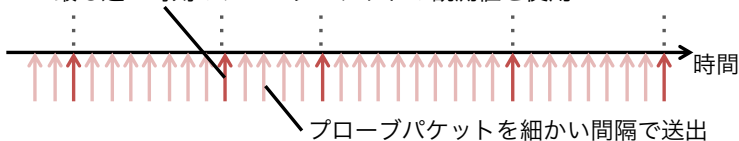
退去レート : 1.00

- 最適なゆらぎ量は平均送出間隔の $20 \pm 5\%$ 程度

■ ping を使い簡単な計測実験を実施

- プロブパケットを細かい間隔で送出し、平均 RTT を算出
- それらのプロブパケットの一部を利用することで、各ゆらぎ量毎の計測値を算出
- 全プロブパケットを使った場合の計測値との差 (計測誤差) の分布を導出

乱数によって決定したタイミングに
最も近い時刻のプロブパケットの観測値を使用



送出レート : 200.0 pps

送出時間 : 10.0 s

宛先ホスト : www.google.com (74.125.153.99)

実験評価 (2)

渡部 康平

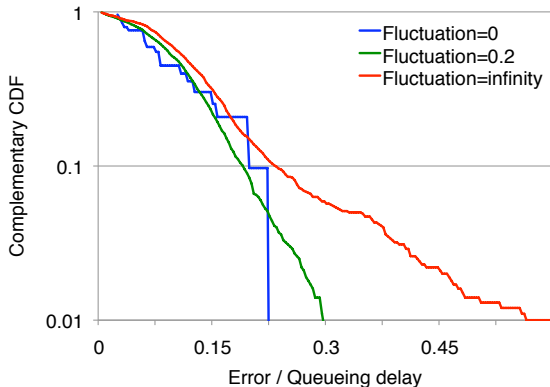
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロ
ブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるプロ
ブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- 計測誤差の補分布の典型的なグラフを表示



- ゆらぎ無限大の結果は従来方法に相当
- 多くの場合、固定値間隔や 20%のゆらぎを加えたプローブパケット送出による結果は、従来方法より優れる

実験評価 (3)

渡部 康平

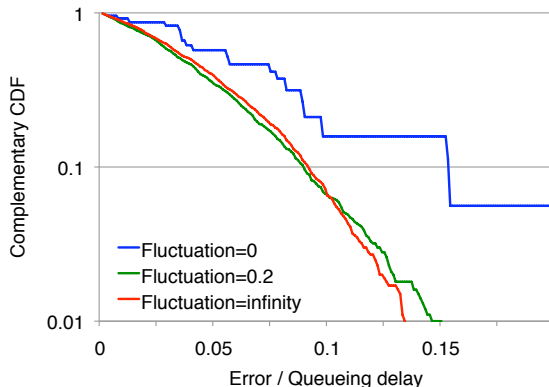
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロ
ブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるプロ
ブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- 計測誤差の補分布の典型的なグラフを表示



- 固定値間隔は、しばしばフェーズロック現象の影響により極端に精度が悪化
- 20%のゆらぎを加えた場合は、これを適切に回避

有限時間内の active 計測における**最適なプローブパケット送出方法**を、計測対象に対して一意に特定する方法を提供し、最適なプローブパケット送出方法と各計測パラメータとの依存関係を明らかにした。

課題と今後の展望

- 計測対象の過程の自己共分散関数 $r(\tau)$ が既知でなければ最適ゆらぎ量の算出はできない
- 今後、過去の計測から $r(\tau)$ を推定するアルゴリズムを提案
- active 計測以外への適用の模索

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ローブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ローブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- ここまでの成果により, non-intrusive な場合にプローブパケットをどのように送出すべきかが分かった.
- では, intrusive な場合はどうか?



- intrusive な計測であっても, non-intrusive に補正すれば良い.

アクティブ計測が抱える問題と本研究の目的

渡部 康平

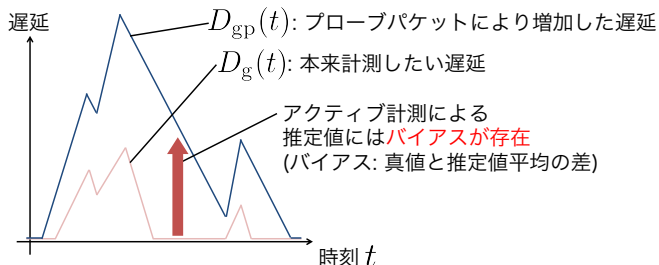
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロブ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプロブ負荷によるパケット品質劣化を考慮した遅延推定

- プロブパケットはネットワークに負荷をかけ、遅延を増大させる。



本研究の目的

- 従来のアクティブ計測におけるバイアスによる精度の限界を解析的に明らかにする。
- **プロブパケットの影響を受けていない状態における遅延を推定**する推定手法を提案する。

アクティブ計測における推定値

渡部 康平

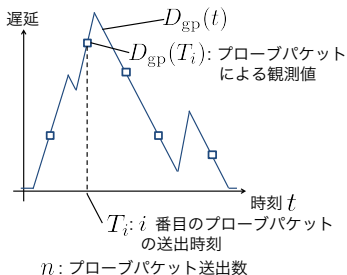
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロ
ブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるプロ
ブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- アクティブ計測の各プローブパケットが観測する遅延は、遅延過程のサンプルと捉えられる.
- 従来の推定では、**観測値を基に算術平均などで推定値を決める.**



平均遅延の推定値

各観測値の算術平均
 $\sum_{i=1}^n D_{gp}(T_i)/n$ が推定値となる.

遅延の q -分位点の推定値

観測値の中で $\lceil (1-q)n \rceil$ 番目に大きい観測値が推定値となる.

推定値の分散とバイアス

渡部 康平

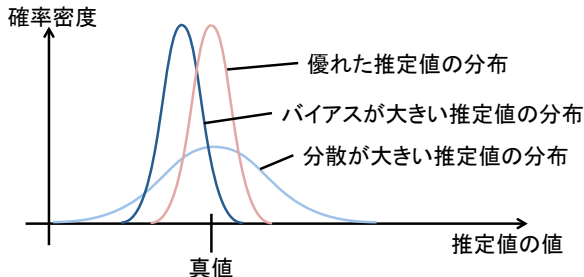
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロ
ブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるプロ
ブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- 優れた推定値は分散とバイアスが共に小さくなければならない。



- 本研究では、平均 2 乗誤差 (Mean Square Error; MSE) により推定精度を定義し、**分散とバイアスが共に小さい推定値を目指す。**

$$(\text{MSE}) = \underbrace{\text{Var}[\hat{P}]}_{\text{分散}} + \underbrace{\{E[\hat{P}] - P^*\}^2}_{\text{バイアス}} = E[(\hat{P} - P^*)^2] \quad (3)$$

\hat{P} : 推定値

P^* : 真値

M/M/1 の計測の分散とバイアス

渡部 康平

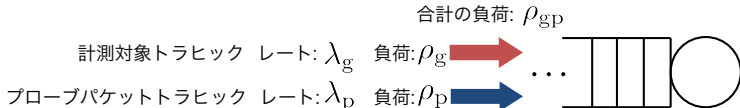
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ローブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ローブ負荷によるパ
ス品質劣化を考慮した遅
延推定

- M/M/1 の平均系内パケット数を計測する場合の推定値の分散とバイアスを解析的に導出した。



- n 個のプローブパケットで推定した場合の推定値の分散 σ^2 は

$$\sigma^2 \simeq \frac{\rho_{gp}}{n(1-\rho_{gp})^2} + \frac{2}{n^2} \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{\rho_{gp}(n-k)}{2(1-\rho_{gp})} \left(\frac{(\lambda_p)^k}{\lambda_p + A(\rho_{gp})^k} + \frac{(\lambda_p)^k}{\lambda_p + B(\rho_{gp})^k} \right) \right\}$$

$$A(\rho) = \frac{(1-\rho)^2}{1+\rho+\sqrt{\rho}}, \quad B(\rho) = \frac{(1-\rho)^2}{1+\rho-\sqrt{\rho}},$$

- プローブパケットトラヒックの負荷増加によるバイアス ε は

$$\varepsilon = \frac{\rho_p}{(1-\rho_g)(1-\rho_{gp})}.$$

M/M/1 の遅延計測における精度の限界

渡部 康平

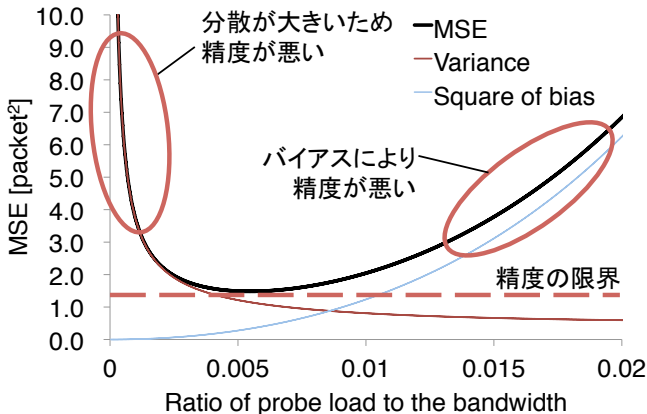
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロブ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプロブ負荷によるパケット品質劣化を考慮した遅延推定

- 分散とバイアスの式に値を代入すると以下の様な形状になる。



物理帯域： 155.52 Mbps

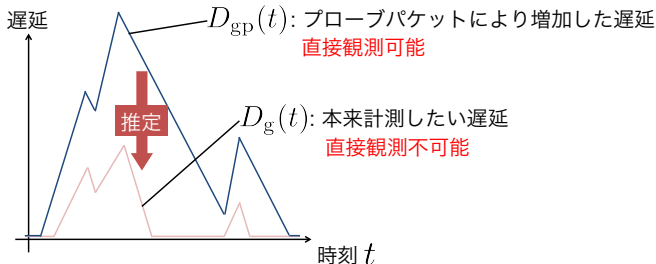
計測対象トラヒックの負荷： 帯域の 90%

パケットサイズ： 平均 600 byte の指数分布に従う

計測期間： 1.0 [sec]

- ここまでの結果から、アクティブ計測には計測精度の理論的限界が存在することが示された。

本研究では、この限界を克服するため、**プローブパケット**
によるバイアス分を減算して高精度の計測を実現する
INTrusiveness-aware ESTimation (INTEST) を提案する。



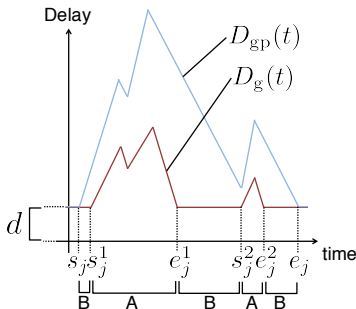
- 計測者はプローブパケットをどの程度送出したかを知っているため、どの程度遅延が増えているかを推定できる。

- プロープパケットがあるルータで受ける遅延 $D_{gp}(T_i)$ は、**ビジー区間 $[s_j, e_j]$ に限定すれば、以下の式で記述できる。**
(ビジー区間: ルータ内パケット数が 0 でない期間)

$$D_g(T_i) = D_g(T_{i-1}) + \frac{X_g(T_i, T_{i-1})}{c} - (T_i - T_{i-1}), \quad (s_j^k \leq T_i \leq T_{i-1} \leq e_j^l)$$

$$D_{gp}(T_i) = D_{gp}(T_{i-1}) + \frac{X_g(T_i, T_{i-1}) + x_{i-1}^p}{c} - (T_i - T_{i-1}),$$

$$(s_j \leq T_i \leq T_{i-1} \leq e_j)$$



T_i : i 番目のプロープパケットのルータ到着時刻

$X_g(t_0, t_1)$: 区間 $[t_0, t_1]$ に流入したプロープ以外のトラフィック量 [bit]

x_i^p : i 番目のプロープパケットのパケットサイズ [bit]

c : 物理帯域 [bps]

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ローブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ローブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- ビジー区間はプローブパケットの遅延を観測すれば、推定可能.
- 前スライドの式から $X_g(T_i, T_{i-1})$ を削除することにより, $D_g(T_i)$ と $D_{gp}(T_i)$ を関係づけることができる.

$$D_g(T_i) = D_g(T_{i-1}) + D_{gp}(T_i) - D_{gp}(T_{i-1}) - \frac{x_{i-1}^p}{c},$$
$$(s_j^k \leq T_i \leq T_{i-1} \leq e_j^l)$$

- これは、増加した遅延の減算を行い, $D_{gp}(T_i)$ から $D_g(T_i)$ を算出できることを意味している.
- ただし、この関係が成立するのは、プローブトラヒックがない状態におけるビジー区間のみ (前スライドの A の区間).

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロブ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプロブ負荷によるパスポ品質劣化を考慮した遅延推定

- 非ビジー区間での挙動を考慮すると、以下の漸化式による推定式で真の遅延を推定することができる。

ビジー・非ビジー区間による場合分け
プロブパケットにより増加した遅延の減算

$$\hat{D}_g(T_i) = \begin{cases} \max\left(\hat{D}_g(T_{i-1}) + D_{gp}(T_i) - D_{gp}(T_{i-1}) - \frac{x_{i-1}^p}{\hat{c}}, \hat{d}\right), & \hat{s}_j \leq T_i \leq \hat{e}_j \\ D_{gp}(T_i), & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$\hat{D}_g(T_i)$: 時刻 T_i におけるプロブパケットの影響を除いた遅延の推定値 [sec]

x_i^p : i 番目のプロブパケットのパケットサイズ [bit]

\hat{s}_j : $D_{gp}(T_{i-1}) < \delta \leq D_{gp}(T_i)$ を満たす j 番目の T_i

\hat{e}_j : $D_{gp}(T_{i-1}) \geq \delta > D_{gp}(T_i)$ を満たす j 番目の T_i

- \hat{s}_j と \hat{e}_j はビジー区間の開始と終了時刻の推定値になっている。

マルチホップのネットワークへの拡張

渡部 康平

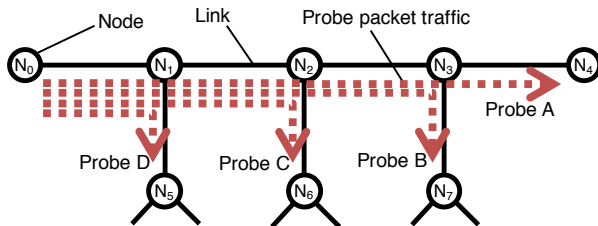
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- マルチホップのネットワークでは、ビジー区間ごとに輻輳の原因となっているリンクの帯域が異なる。
- 以下のように、各ホップ毎に分岐するプローブフローを観測し、ビジー区間が重なるフローを調べることで、輻輳の原因となっているリンクを特定できる。
 - ビジー区間ごとに輻輳の原因となるキューは1つと仮定。



M/M/1 のシミュレーションによる評価

渡部 康平

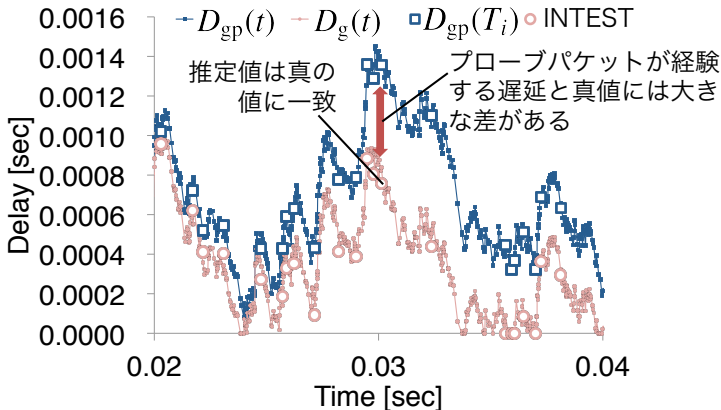
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロ
ブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるプロ
ブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- M/M/1 でモデル化されるルータの遅延を推定した結果.



物理帯域 : 155.52 Mbps

計測対象トラフィックの負荷 : 帯域の 90%

パケットサイズ : 平均 600 byte の
指数分布に従う

プロブパッケージ負荷 : 帯域の約 3.16%

ビジー区間推定のしきい値 δ : 7.5 packet

M/M/1 のシミュレーションによる評価 (2)

渡部 康平

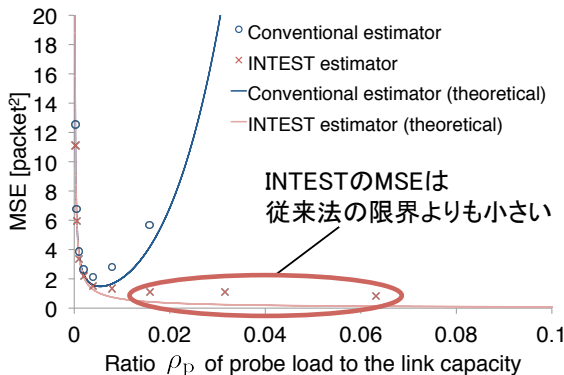
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロブ送出時刻のゆらぎ最適化

active 計測におけるプロブ負荷によるパスポ品質劣化を考慮した遅延推定

- シミュレーションを各 5000 回繰り返すことで MSE を算出.
- 従来法は理論値通り限界が存在するが, INTEST はプローブパケットの増加とともに精度が向上する.



シミュレーション条件 : 前スライドと同様.

M/M/1 のシミュレーションによる評価 (3)

渡部 康平

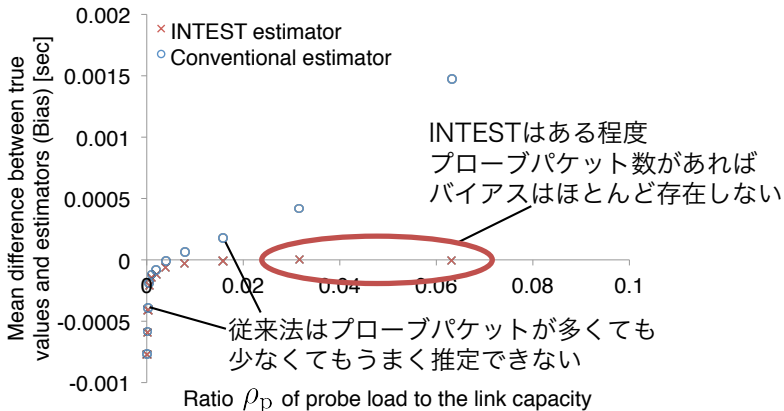
自己紹介

発表概要

active 計測におけるプロ
ブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるプロ
ブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- 遅延の 95%分位点を推定した場合のバイアスを調査した.



ビジー区間推定のしきい値 δ : 0.2 msec

その他のシミュレーション条件 :前スライドと同様.

ns-3 によるシミュレーション評価

渡部 康平

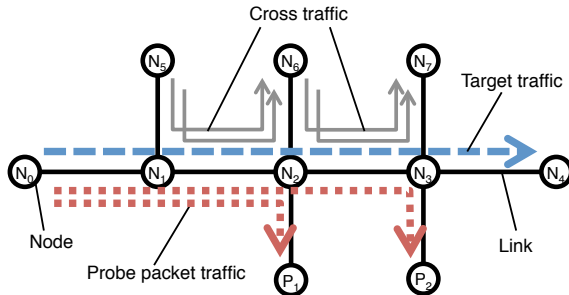
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ローブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ローブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- 以下のトポロジーのネットワークを ns-3 により 10.0 sec シミュレーションして評価を行った。



N_1 - N_2 の物理帯域 : 15.552 Mbps プローブパケットサイズ : 64 byte

N_2 - N_3 の物理帯域 : 31.104 Mbps その他のパケットサイズ : 600 byte

その他の物理帯域 : 62.208 Mbps

計測対象トラヒックの負荷 : ボトルネックの帯域の 10%

クロストラヒックのパターン : 平均 0.5 sec の指数分布間隔で ON-OFF

クロストラヒックのレート : 8 Mbps

ns-3 によるシミュレーション評価 (2)

渡部 康平

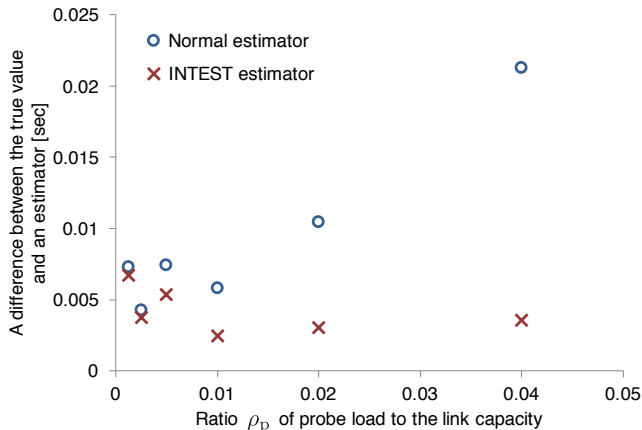
自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロブ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロブ負荷によるパス
品質劣化を考慮した遅
延推定

- 計測対象フローの packets が受ける遅延の 95% 分位点を推定して、そのバイアスを比較した。
- M/M/1 での評価結果と同様の結果が得られた。



アクティブ計測での遅延計測において、プローブパケット送出量の制御では克服することのできない精度の限界が存在することを示し、プローブパケット負荷による**バイアスの問題を克服する高精度遅延推定法を提案**した。

- 提案手法では、プローブパケット負荷により増加した遅延を減じてバイアスを補正する。
- M/M/1 と ns-3 によるシミュレーションにより提案手法の有効性を確認した。

今後の課題

- 遅延だけでなくパケットロスへの拡張。
- 無線ネットワークでの計測に拡張。

渡部 康平

自己紹介

発表概要

active 計測におけるブ
ロープ送出時刻のゆら
ぎ最適化

active 計測におけるブ
ロープ負荷によるバス
品質劣化を考慮した遅
延推定

ご清聴ありがとうございました.