The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	確率的モデル検査ツールPRISMによるリアルタイム分散システムのネットワーク遅延を考慮した検証手法について
Author(s)	長井, 栄吾; 岡野, 浩三; 楠本, 真二
Citation	電子情報通信学会技術研究報告. SS, ソフトウェアサイエンス. 2006, 105(597), p. 19-24
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27429
rights	Copyright © 2006 IEICE
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report
SS2005-86(2006-2)

確率的モデル検査ツールPRISMによるリアルタイム分散システムのネットワーク遅延を考慮した検証手法について

長井 栄吾† 岡野 浩三† 楠本 真二†

† 大阪大学大学院情報科学研究科
〒 560–8531 大阪府豊中市待兼山 1–3
E-mail: †{e-nagai,okano,kusumoto}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし モデル検査など形式モデルに基づくソフトウェアシステムの形式的検証は高い信頼性を持つソフトウェアの構築を可能にすると期待されている．さらに，分散システムにおいてはネットワーク上の遅延，遅延変動 (ジッタ)，帯域幅，パケットロスパラメータなどを管理して，要求される QoS を達成することが重要とされる．そこで，本研究では確率的振る舞いを持つシステムに対するモデル検査ツール PRISM に着目し，これを用いたリアルタイムマルチメディアシステムのネットワーク遅延を考慮した形式的検証手法を提案する．また本論文では，提案手法の有用性を明らかにするために例題に適用し，その評価と考察についても述べる．
キーワード リアルタイム分散システム，モデル検査，PRISM，形式的検証

A Verification Considering the Network Delay for Real-time Distributed Systems with the Probabilistic Model Checker PRISM

Eigo NAGAI†, Kozo OKANO†, and Shinji KUSUMOTO†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
Machikane-yama 1–3, Toyonaka City, Osaka, 560–8531 Japan
E-mail: †{e-nagai,okano,kusumoto}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Formal verification techniques, especially model checking techniques are promising techniques in software developing due to their ability of exhaustive checking. For distributed systems, managing QoS parameters, such as latency, network delay, jitters, bandwidth and packet loss, is a focal point of their quality. In this paper, focusing using PRISM, a model checker for probabilistic real-time systems, we present a new method to analysis real-time multi-media systems considering network properties. The paper also describes an application example and the result.
Key words Real-time Distributed System, Model Checking, PRISM, Formal Verification

1. まえがき

近年，インターネットの高速化に伴い，ストリーミングサービスの動画像データ配信に代表されるような，リアルタイム系の分散システムが急速に普及しつつある．これらのシステムはストリーミングデータの転送遅延や欠落による停止や途切れ，ちらつきを防ぐため，QoS 制御のような時間に基づいた配信が必要不可欠と言える．しかしながら，現在のインターネットは複数の利用者がネットワーク帯域を共有する，ベストエフォート型のネットワークであり，通信帯域や遅延，スループットといった通信品質に対する保証がない．したがって，このようなシステムの開発者はシミュレータ [2] や数学的解析 [3] により，システムのパフォーマンスをあらかじめ予測しなければならない．シミュレータを利用した場合システムの性能をある程度，予測することが可能であるが定性的解析とは言えず，数学的な保証にはならない．また，一般に多くの計算リソースを必要とする．一方，数学解析は数学的，論理的に正しく，一般に計算時間を必要としないが，解析対象が限られるのでシステム全体の現実的な定性的解析は難しい．したがって，本手法では近年，ハードウェア，ソフトウェアの設計検証手段として注目を浴びているモデル検査を利用することで，システム全体の性能解析を目指す．通常のモデル検査ツールではモデルに確率要素を付加していないものが多いが，確率モデル検査ツール PRISM [1] は時間要素と確率要素をともに取り入れたモデルを対象にしており，ネット

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

ワークのようなシステムのモデル化に極めて有用と判断できる．

そこで本稿では，PRISM を用いて，インターネット環境における，輻輳のランダム性によるネットワーク遅延の変動を考慮した検証を行なう．一般にインターネット環境に用いられるプロトコルもしくはアプリケーションは輻輳処理機構を持ち相互に使用帯域を調節しあうことにより，ネットワークの輻輳崩壊を防いでいる．代表的なプロトコルである TCP (Transmission Control Protocol) では輻輳制御機構として AIMD (Additive Incerase Multiplicativ Decrease) 型のウィンドウフロー制御が行なわれ，ネットワークの利用可能帯域にあわせてパケットの送出量を調整している．TCP はデータ系の転送については優秀であるが，正確性に重点を置く代わりに，ある程度の遅延を許容するためにリアルタイム系のシステムでは利用されることがない．リアルタイム系のシステムでは RTSP (Real Time Streaming Protocol) が用いられる．RTSP はインターネットやイントラネットなどの TCP/IP ネットワーク上で，音声や動画などをストリーミング配信するためのプロトコルである．RTSP の輻輳制御機構として，RAP (Rate Adaptation Protocol) [4], TEAR(TCP Emulate At Receivers) [5] のようなものがあげられるが，近年では TFRC (TCP-Friendly Rate Control) [6] が注目されてきている．したがって本手法では輻輳制御機構 TFRC を対象とし，その振る舞いをモデルとして，モデル検査を行う．PRISM を用いた検証例題については文献 [7] [8] [9] などプロトコルレベルでの検証はあったが，システムのスループットの解析に踏みこんだ例題はない．本稿はこのレベルのケーススタディを与える．また，モデル化の際の課題点，解決法についても述べる．

以降，2. ではモデル検査に利用するツール PRISM について説明し，3. ではモデル検査の対象となるリアルタイム分散システムのプロトコルについての考察，4. では本手法の検証方法，5. において提案手法を例題に適用する．最後に 6. でまとめる．

2. 確率的モデル検査ツール PRISM

近年，解析や検証のために確率モデルが注目されつつある．特に確率的モデルを対象としたモデル検査は，ランダムな振る舞いを持つシステムのパフォーマンスや信頼性，安定性を見積もるための形式的手法と考えられてきている．本節では，本手法に用いられる確率的モデル検査ツール PRISM [1] (以降，PRISM とする) について説明する．

2.1 状態遷移系

モデル検査とは，時相論理式で表現された調べたい性質を，状態遷移系が満たすかどうかを判定するものである．PRISM は状態遷移系として主にマルコフ連鎖を対象とし，次の 3 つのマルコフ連鎖を入力として，与えることができる．

- Discrete-time Markov chains (DTMC)
- Continuous-time Markov chains (CTMC)
- Markov decision processes (MDP)

2.2 時相論理

また PRISM は時相論理式として次の 2 つを入力として与えることができ，状態遷移系との対応は図 1 に示す．

- Probabilistic Computation Tree Logic [10] (PCTL)
- Continuous Stochastic Logic [11] (CSL)

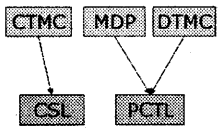

図 1 PRISM の時相論理と状態遷移系の対応関係

時相論理 PCTL，CSL の文法は表 1 のようになる．

表 1 PCTL,CSL 文法

$\phi := true \mid false \mid \phi \wedge \phi \mid \phi \vee \phi \mid \bar{\phi} \mid \phi \Rightarrow \phi$		
$* := \leqq \mid \geqq \mid < \mid > \mid =$		
Next	$P_{*c}[X\phi]$	次状態が ϕ である確率 $*c$
Bounded Until	$P_{*c}[\phi_1 U_{\leqq H} \phi_2]$	ϕ_1 から H 以内で ϕ_2 となる確率*c
Until	$P_{*c}[\phi_1 U \phi_2]$	ϕ_1 から ϕ_2 となる確率*c

さらに CSL には長時間経過後の ϕ となる確率を求める $S_{*c}[\phi]$ が存在する．具体的には PRISM のスループットの変数として *Throughput* が与えられるとすると，“$P_{=?}$[True$U$Throughput$= x$]” として，x の値をプロットしていけば，スループットの確率密度関数を得る．

2.3 PRISM の出力

一般に PRISM は与えられたモデルと論理式に対して，その式が真となる確率を返す．このように真偽だけではなくいくつかの不確定変数について，論理式を満たすような値も候補を返す形式のモデル検査は従来の真偽のみを返すモデル検査と比してパラメトリックモデル検査 [12] と呼ばれる．したがって PRISM によるモデル検査も広義にはパラメトリックモデル検査の 1 つといえる．

3. リアルタイム分散システムのプロトコル

システム全体のレスポンスはサーバ遅延やネットワーク遅延，あるいはトランザクション時間などが相互に影響し合う．しかしリアルタイム分散システムにおいては，動画像データなど大きなペイロードを扱うことになるため，ネットワーク遅延がボトルネックとなりやすい．そこで本節ではリアルタイム分散システムに用いられる各プロトコルの振る舞いを考えることでネットワーク遅延について言及し，システム全体のレスポンス (スループット) に与える影響を考える．次節にて PRISM に状態遷移系の一部として以上のモデルを与えることで，検証を行う．

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

3.1 RTSP

RTSP はユーザデータの発信元と宛先のエンドノード (端末やコンテンツサーバ) 間の代表的プロトコルの一つであり，遠隔のビデオサーバをあたかも手元のビデオデッキを操作するかのように，プレイバック (再送，巻き戻し，停止など) 制御するためのものである．RTSP は SETUP, PLAY, RECORD, PAUSE, TEARDOWN の 5 つの状態を持っており，エンドノードとのパケット交換により，これらを実現する．一方実際のストリームデータの転送は RTP(Real-time Transport Protocol) が行う．RTP は UDP を基盤とし，ストリーミング配信用の情報をヘッダに付加したものである．

RTSP は RTCP(RTP Control Protocol) のレポートメッセージを受け取り，TFRC のレート制御方式を用いて，RTP のスループットを定める．

3.2 輻輳処理機構 TFRC

リアルタイム系輻輳制御である TFRC は，非リアルタイム系輻輳制御である TCP との混在環境において，RTP と TCP との公平性を実現することを目指したレート制御方式である．制御を行なわない UDP 系のパケットは TCP 系のパケットに悪影響を与えることが広く知られている．同じネットワーク環境下 (パス・遅延・ロス率) において TCP フローに対して同じ平均帯域を得られるようなレート制御を行うことで，既存 TCP フローに大きな悪影響を与えることなく通信を行うことができ，ネットワークの系全体の利用率を向上することができる．TFRC は RTCP のレポートメッセージを用いてレート制御を行う．レポートには、受信された RTP パケットのシーケンス番号を調べることでわかるパケット損失量や、タイムスタンプと受信時刻から見積もられたジッタ (転送遅延のゆらぎ) などの情報が含まれている．IETF が発行した TFRC の仕様記述文書 RFC3448(Request For Comment) には次のようなスループット推定式が載せられている．

$$X = \frac{8s}{R\sqrt{2bp/3} + T_RTO((3\sqrt{3bp}) * p * (1 + 32p^2))} \quad (1)$$

TFRC は X の値が Bandwidth など出しえる最大のスループットよりも小さい場合，この X をスループットとして設定するように RTSP に指示を出す．X のパラメータは表 2 のようになる．

表 2 TRFC スループット推定式のパラメータ

R	ラウンドトリップタイム
p	パケット損失率
s	パケットサイズ
b	TCP 肯定応答回数
T_RTO	TCP タイムアウト値

4. 検証手法

PRISM を用いたモデル検査までをまとめると図 2 のようになる．

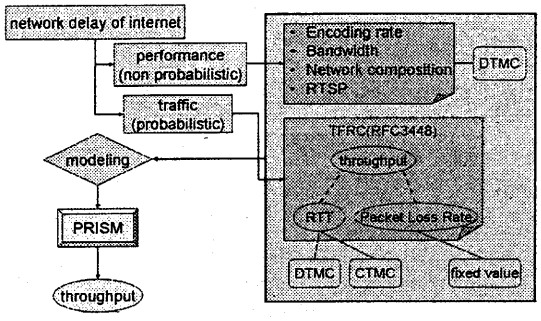

図 2 モデル検査までの流れ

図 2 のように，ネットワーク構成，サーバのデータ符号化，RTSP(RTCP) によるパケット交換および TFRC によるスループット推定式を状態遷移系として PRISM に与える．ここで，ネットワーク構成，サーバのデータ符号化，RTSP によるパケット交換については，それらの振る舞いにおける時間経過を離散的にとらえ，DTMC としてモデル化し，スループット推定式については以下に示す．

4.1 スループット推定式のモデル化

TFRC によるスループット推定式のパラメータのうち，パケットサイズ TCP 肯定応答回数，タイムアウト値はシステムにおいて一意に決定する値であるのに対し，ラウンドトリップタイムおよびパケット損失率についてはネットワークの輻輳状態により，時系列で変化する値である．したがって，これらの定性について考え，DTMC もしくは CTMC として PRISM に与えることにする．

4.1.1 ラウンドトリップタイム

ラウンドトリップタイムの揺らぎについては，パケット転送遅延の分析 [14] により図 3 の分布すなわちパレート分布に従うことがわかっている．

PRISM ではパレート分布をそのまま扱うことはできない．解決策としては CTMC として近似をとるか，区間に分割し DTMC でモデル化する 2 つの方法が考えられる．

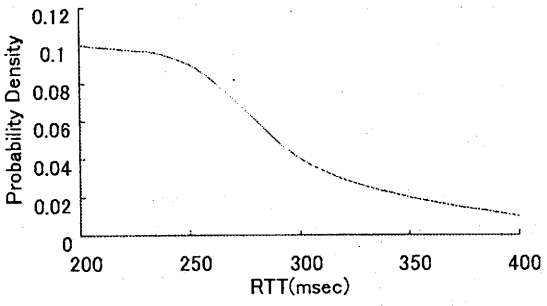

図 3 RTT 遅延の確率分布

まず DTMC については，図 4 のように時系列において一定時間毎の到達確率とその経過時間を算出し，離散化を行った．

CTMC については，図 5 のように χ^2 分布による近似を行うことで，DTMC の指数分布パラメータを算出した．

NII-Electronic Library Service

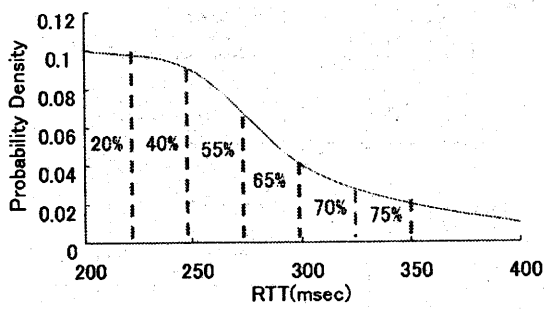

図4 RTT 遅延の確率分布の離散化

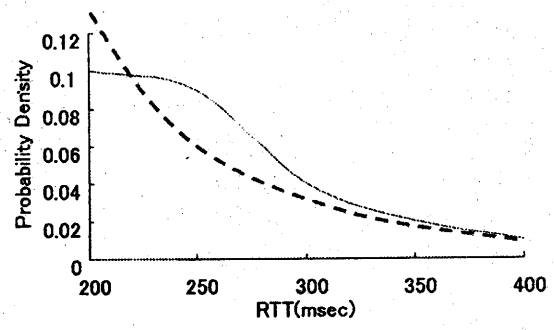

図5 RTT 遅延の確率分布の指数分布への近似

4.1.2 パケット損失率

パケット損失は次の 2 種類が存在する．

- ランダムロス
- バーストロス

ランダムロスは，パケットもしくはビットごとにランダムに損失または反転を指し，一般的にパケットサイズに比例して損失率も大きくなるといわれている．バーストロスは，ルータにおけるバッファ溢れによるパケット棄却であり，連続したパケット列を一挙に損失する．要因はルータ性能や通過回数，もしくは輻輳の度合いに依存する．これらは様々な要素から成り立ち，特にインターネット環境において輻輳の度合いは時間帯などの影響を考えると定性を求めるのは難しいといえる．したがって本手法ではパケット損失率を一定とする．

5. 例題適用

考案した検証手法に対して例題を適用した．なお，実験環境は OS が Fedora Core 3，CPU が Pentium(R) 4 CPU 1.80GHz，およびメモリが 768MB である．

5.1 例題概要

動画像データ配信システム [13] において測定された実測値と，それと同じ実験環境を想定した上で得た本検証系による予測値を比較することで，本手法の実用性を示す．動画像データ配信システム [13] の実験システムの構成は図 6 に示す．動画像サーバが 2 台のルータを介してクライアントに繋がれており，3 対の FTP サーバ/クライアント，およびパケットジェネレータが，ルータ間のリンク容量を動画像配信と競合することで，擬似的なインターネット環境を構築している．動画像サーバは MPEG–4 形式の動画像データ約 80M を符号化レート 1Mbps でクライアントに送信する．その際，動画像サーバの RTSP は TFRC によるレート制御を行なう．また輻輳の影響を受けない状態と TFRC による輻輳制御された状態を比較するため，時刻 100 秒から 3 対の FTP サーバ/クライアント間で TCP セッションによるファイル転送が行なわる．なお，パケットジェネレータは常に 8Mbps の UDP トラヒックを送出する．

5.2 本手法への適用

動画像データ配信システム [13] の実験環境のうち，本手法に必要なパラメータを抽出し，表 3 にまとめる．

表3 スループット推定式パラメータ

ラウンドトリップタイム (RTT)	10(ms)
パケット損失率	10% or 20%
パケットサイズ	500(byte)
TCP の肯定応答回数	1
TCP のタイムアウト値	4*RTT

これらの値を RTT の確率分布をマルコフ連鎖化した上でスループット推定式に代入し，動画像サーバのスループットを得る．次にパケット損失率をふまえたクライアントの受信レートを算出した．

また検証時間の問題から，サーバにおける RTSP の振る舞いと符号化過程を無視した簡単化した DTMC モデルを用意し，簡単化しない場合と比較し，その有用性を考えた．

5.3 モデル検査結果

PRISM はグラフィカルインターフェースにより，パラメトリックに検査した結果をグラフとして出力することが可能である．システムのスループットを変数 *throughput*，時相論理式 "P =?[throughput< $x U$ throughput> x]" とし，x の値をプロットすることによって，スループットの生起確率を得る．DTMC を用い，さらにパケット損失率 10%である場合に導出されるスループットを図 7 に示す．

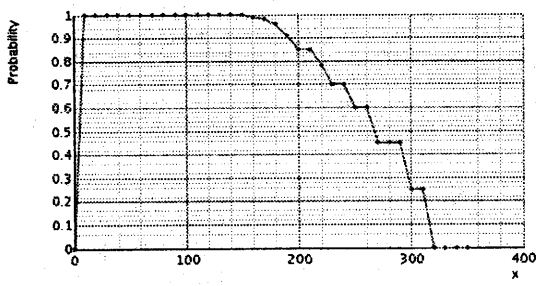

図7 DTMC によるスループット生起確率 (パケット損失率 10%)

また時相論理式を "throughput> MIN & throughput< MAX" として，スループットの最大値，最小値を求め，結果を表 4 に示す．

表 4 では，導出したシステムのスループットの最大値は DTMC，CTMC であっても同じである．これは定常状

NII-Electronic Library Service

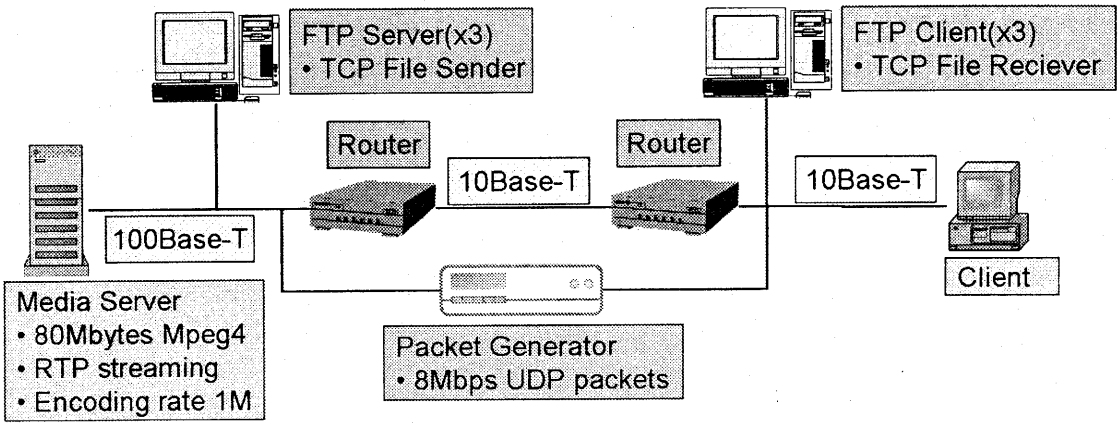

図 6　実験例題の概要

表 4　スループットの最大値と最小値

	MAX	MIN
DTMC (Packet Loss Rate 10%)	320kbps	159kbps
DTMC (Packet Loss Rate 20%)	70kbps	34kbps
CTMC (Packet Loss Rate 10%)	320kbps	124kbps
CTMC (Packet Loss Rate 20%)	70kbps	26kbps

態の RTT の最小値 10ms であることが原因となっている．RTT10ms，パケット損失率 10%として，(1) 式を適用した場合，表 4 で得られる出力と大差ない数値を得る．このことから，サーバや RTSP の振る舞い (データ符号化や RTCP のデータ交換) はスループットにほとんど影響を与えていないといえる．最小値では DTMC と CTMC で違いが見られる．RTT の最小値が 10ms と固定で与えられることに対して，RTT の最大値は DTMC では 20%，CTMC では約 22%となるからと考えられる．

図 7 から得られたスループットの生起確率から，シミュレーションを行ない時系列におけるスループットの推移をグラフ化した．その結果と [13] より実測された値を以降の図に示す．RTT 値を DTMC によりモデル化を行ない導出された結果を図 8，また DTMC を簡単化したモデルから得られた結果を図 9，および CTMC によるモデル化から導出された結果を図 10 にそれぞれ示す．

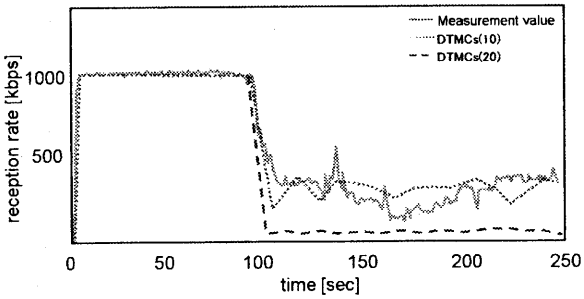

図 8　DTMC モデルによる検証結果

図 8 が示すように，パケット損失率が 10%である場合は実測値に近い結果を導出することができた．表 4 より最大スループット 320kbps，最少スループット 159kbps と導出されているが，図 8 の $MeasurementValue$ では，最大値 320kbps よりも大きいスループットが計測されており，これはパケット損失率の変動の影響によるものだと考えられる．

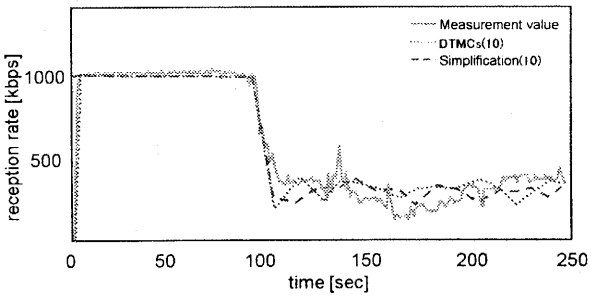

図 9　簡単化 DTMC モデルによる検証結果

図 9 では，簡単化した DTMC と簡単化していない DTMC から得た検証結果を比較している．簡単化した DTMC では符号化過程を考慮していないため，経過時間 0 秒におけるスループットが既に 1Mbps となっているが，それ以外はほとんど簡単化しない DTMC と変わらない結果が得られた．RTSP は非常にサイズの小さいパケットなので，スループットに与える影響はほとんどないことがわかる．

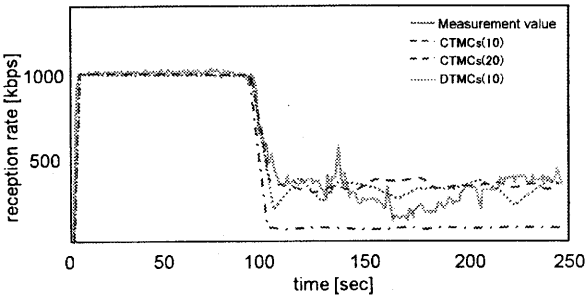

図 10　CTMC モデルによる検証結果

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

図 10 は DTMC と CTMC によるモデル化の検証結果を比較している．CTMC で得られたスループットは DTMC と比べて，高めで安定している．CTMC では χ^2 分布を利用した近似により指数分布としているが，そのすその部分が近似前よりも大きくなっているためだと考えられる．

5.4 検証時間

表 5 に検証時間をまとめる．

表 5 検証時間

DTMC	about 180 minutes
Simplified DTMC	about 5 minutes
CTMC	about 30 minutes

DTMC によるモデル化では RTT の確率分布を離散的に切り分けるため，その分の状態数が増加し結果として，検証時間も増加している．3 時間程度の検証時間がかかるものの，状態爆発を起こすこともなく検証を完了することができた．

5.5 考　　察

パケット損失率を 10%に固定した場合，実測値に近いスループットを導出することができた．しかし，実際にはパケット損失率は変動しており，正確な数値ではないと言える．またパケット損失率だけではなく，ルータの処理にも影響を受ける．例えば，ルータのバッファに RTP のパケットばかり溜まってしまい，それらが一気に放出されたとするとクライアントの受信レートは一気に増大することもある．しかしながら，ある程度固定された状況下 (輻輳やルータの数が既知) においては，本研究の結果から解析可能ではないかと考えられる．実際，本研究の結果はこの程度の例題であればかなりよく再現されていることを表していると思われる．また本例題においては RTT の値が小さいので，RTT の確率分布による変動はあまり見られない．相対的にパケット損失率の影響が大きくなっている．

簡単化することによって，スループットに与える影響はほとんどないと考えられる．ただし，通信以外の振る舞いの一部をモデル化しないことになるため，検証項目が制限される．

6. おわりに

本論文では，リアルタイム分散システムの RTT 遅延確率分布を離散時間マルコフ連鎖，および連続時間マルコフ連鎖にモデル化し，モデル検査ツール PRISM に与えることで，システムのスループットを検証し導出することで，スループットの変動の様子を視覚的に捉えることができる．さらにシステムが出しえるスループットの定性的な最大値と最小値を算出することができ，これらの値はパケット損失率を考慮していないために正確ではないが，ある程度の指標になり得ると考えられる．したがって，この実験結果は確率遷移モデルに対するモデル検査ツールを活用する提案手法が，従来の検証対象のみならず，ネットワークの性能評価解析にも適用できる可能性があることを示したといえる．

今後の課題として，パケット損失率のモデル化を考えている．本例題での輻輳状態におけるパケット損失率はほぼ 10%を前後しており，固定されたネットワーク構造である場合では，パケット損失率のモデルを推定することが可能と考えられる．また，リアルタイム分散システムにおいて重要なのはスループットだけではなく，動画像配信では再生待ち合わせ時間にデータが間に合うかどうかといった問題も考慮しなければならない．したがって，これらについても検証を行なえるようにしたい．

文　　献

[1] M. Kwiatkowska, G. Norman and D. Parker : "PRISM 2.0: A Tool for Probabilistic Model Checking," In Proc. 1st International Conference on Quantitative Evaluation of Systems (QEST'04), pp.322–323, 2004.

[2] "The Network Simulator - ns-2," available at http://www.isi.edu/nsnam/ns/.

[3] E. J. Kim, K. H. Yum, and C. R. Das : "Calculation of Deadline Missing Probability in a QoS Capable Cluster Interconnect," IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA'01), pp.36, 2001.

[4] R.Rejaie, M. Handley, and D. Estrin : "RAP: An end-to-end ratebased congestion control mechanism for realtime streams in the internet," in Proc. of INFOCOM 1999, pp.1337–1345, 1999.

[5] I. Rhee, V. ozdemir, and Y. Yi : "TEAR: TCP emulation at recievers – flow control for multimedia streaming," NCSU Technical Report, 2000.

[6] M. Handly, S.Floyd, J.Padhye, and J.Widmer : "TCP friendly rate control (TFRC): protocol specification," Request for Comments (RFC)3448, 2003.

[7] M. Kwiatkowska, G. Norman, D. Parker and J. Sproston : "Performance Analysis of Probabilistic Timed Automata using Digital Clocks," In Proc. Formal Modeling and Analysis of Timed Systems (FORMATS'03), 2003.

[8] M. Kwiatkowska, G. Norman and J. Sproston : "Probabilistic Model Checking of the IEEE 802.11 Wireless Local Area Network Protocol," In Proc. PAPM/PROBMIV'02, LNCS 2399, pp.169–187, 2002.

[9] M. Kwiatkowska, G. Norman, J. Sproston and F. Wang : "Symbolic Model Checking for Probabilistic Timed Automata," In Proc. FORMATS/FTRTFT'04, LNCS 3253, pp.293–308, 2004.

[10] H. Hansson and B. Jonsson : "A logic for reasoning about time and probability," Formal Aspects of Computing, 6(5) pp.512–535, 1994.

[11] A. Aziz, K. Sanwal, V. Singhal, and R. Brayton : "Verifying continuous time Markov chains," LNCS 1026, pp.499–513, 1996.

[12] R. Alur, T. A. Henzinger and M. Y. Vardi : "Parametric Realtime Reasoning," Proc. 25th ACM Annual Symp. on the Theory of Computing (STOC'93), pp.592–601,1993

[13] Y. Taniguchi, A. Ueoka, N. Wakamiya, M. Murata, and F. Noda, "Implementation and Evaluation of Proxy Caching System for MPEG-4 Video Streaming with Quality Adjustment Mechanism," in Proc. of The 5th AEARU Workshop on Web Technology, pp.27-34, 2003.

[14] 藤本 康平, 阿多 信吾, 村田 正幸 : "実時間アプリケーションのためのパケット転送遅延の分析とプレイアウト制御への適用," 電子情報通信学会全国総合大会, 2001.

NII-Electronic Library Service