

3U-6

多層プロトコルを持つネットワークの待ち行列網モデルによる性能評価

井上一郎 福井俊之 相田仁 齊藤忠夫
 東京大学工学部

1. はじめに

多層プロトコルを持つネットワークの性能はそのプロトコルパラメータに依存するが、それを考慮して性能評価を行なった例は少ない。一方、OSI基本参照モデルなどの普及により、多層プロトコルを持つネットワークの性能評価の必要性はますます増大すると考えられる。

本稿では、待ち行列網モデルとMVA(Mean Value Analysis)法により、複数の層にコネクショ形プロトコルを持つようなネットワークの性能を、伝送効率を尺度として解析的に評価している。また、結果をシミュレーションにより検証している。

2. 待ち行列網モデルとMVA法による解析

ポイント-ポイントのネットワークにおける一方向の連続的なデータ伝送を考える。用いるプロトコルは確認応答順次返送方式のCO(Connection Oriented)形のトランスポート層の下に、確認応答一括返送方式のCO形もしくはCL(Connectionless)形のネットワーク層、CL形のデータリンク層を仮定した合計3層とする。これらのプロトコルの構成を、上位から順にOOL形、OLL形、などと表現する。例えば、OLL形のネットワークにおいて、メッセージとそれに対する応答が伝送される様子を待ち行列網でモデル化したものを図1に示す。

MVA法は、サービス時間が指数分布でカスタマの数が一定の待ち行列網において、任意のウィンドウサイズ(カスタマの数)におけるスループット(ここでは単位時間にある一点を通過するカスタマの数)、平均待ち行列長、平均待ち時間などを数学的帰納的方法に計算する方法である^[1]。

例として図1のモデルの解析手順を示す。但し、記号は以下の通りとする。

- W: チェイン中のカスタマの数(ウィンドウサイズ)
- τ_i : 待ち行列iの平均サービス時間
- $w_i(W)$: 待ち行列iでの平均待ち時間(含サービス)
- $n_i(W)$: 待ち行列iの平均待ち行列長
- $\lambda(W)$: スループット

解析手順(各手順は全iについて)

① $n_i(0) = 0$

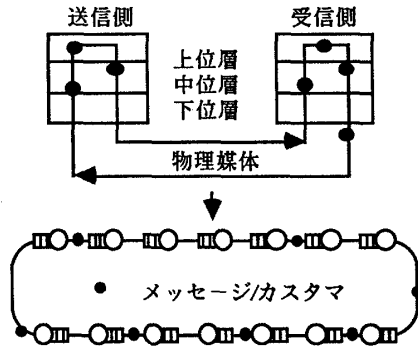


図1. ネットワークの待ち行列網によるモデル

- ② $W = 1$ から W_{end} まで③から⑤を繰り返す
- ③ $w_i(W) = \tau_i [1 + n_i(W-1)]$
 (FCFS with Single Serverの場合)
- ④ $\lambda(W) = W / \sum w_i(W)$
- ⑤ $n_i(W) = \lambda(W) \cdot w_i(W)$

3. 多層CO形プロトコルを持つネットワークのモデル化

待ち行列網モデルとMVA法による解析は、2章のように従来OLL形のネットワークにしか適用できなかった。

ここでは、複数の層にCO形プロトコルを持つネットワーク(多層CO形ネットワークと呼ぶ)について、レスポンスタイム(データの送信開始からそれに対する確認応答を受信するまでの時間)の理論値を求め、この結果から、多層CO形ネットワークを適当な待ち行列網モデルで表現することを考える。これにより、多層CO形ネットワークにMVA法を適用して性能を評価する。

レスポンスタイムの理論値は、データや確認応答のやり取りをタイムチャートで追跡することで求める。

ウィンドウサイズ: W トランスポート層確認応答長 + DPDU長: D_d NPCI長 + DPDI長: A_t
 TSDU長: D_t 各層のプロトコル処理時間の和: τ
 プロトコル処理時間の最大値: τ_{max}

伝送速度: V データ送信間隔: t

伝送遅延: d レスポンスタイム: R

とすると、簡単な考察により、OLL形のネットワークのとき

$$R = \text{Max}((D_d + A_t) / V + 2d + \tau, Wt)$$

$$t = \text{Max}(D_d / V, \tau_{max})$$

となることがわかる。また、レスポンスタイムがウィンドウサイズによらない一定値となるようなウィンドウサイズの最大値は、

$$W_{max} = \frac{(D_d + A_t) / V + 2d + \tau}{\text{Max}(D_d / V, \tau_{max})}$$

である。

OOL形のネットワークのときは、

- ① ネットワーク層での確認応答待ち
 - ② ネットワーク層確認応答伝送(受信)
 - ③ ネットワーク層確認応答相互やデータとの競合などのためにレスポンスタイムが増加する。
- ①は図2のような場合であり、この効果はおおむね、
 (確認応答待ちを生じるデータの数) × (データ伝送間隔) + 定数
 で表現される遅れとなる。
- ②は図3のような場合であり、この効果はおおむね、
 (ネットワーク層確認応答長) / 伝送速度 + 定数
 の遅れを生じる。
- ③はデータリンク層サービスを要求するデータが多くなるための効果である。

以上をまとめると、00L形のネットワークの場合、レスポンスタイムは表1のように、

(ウィンドウサイズ) × (データ伝送間隔) + 定数
で表される。

表1.00L形ネットワークのレスポンスタイム理論式

<p>$V > D/Dr$ $W=1 \quad R0=(D+At)/V+2d+\tau$ $W=2 \quad R0+Ar$ $W>2 \quad R0+(W-3)t+Dr-As-Ds$ $D/Dr > V > An/(Dr+As)$ $W=1 \quad R0$ $W=2 \quad R0+Max(An/V, Ar)$ $W>2 \quad R0+An/V+(W-1)t-(Dr+Ds+Ar+As)-(At-An)/V$ $An/(Dr+As) > V > An/(3Ds+Aa-As)$ $W=1 \quad R0+An/V-(Dr+As)$ $W>1 \quad R0+(W-1)t-(Ds+2Dr+Ar+2As)-(At-An)/V$ $An/(3Ds+Aa-As) > V$ $W=1 \quad R0+2An/V-(Dr+3Ds+Aa)$ $W>1 \quad R0+(W-1)t-(Ds+2Dr+Ar+2As)-(At-An)/V$</p>	<p>An:ネットワーク層確認応答長+ DPCI長 Ds(Dr):データ送信(受信) 処理時間 As(Ar, Aa):確認応答送信 (受信,後)処理時間</p>
--	--

このようなネットワークの状態について考える。いま、0LL形のネットワークについて考えると、 $W < W_{max}$ の場合、各待ち行列では待ち行列ができずRが一定になるのに対して、 $W > W_{max}$ の場合には、tを与える待ち行列(ボトルネック待ち行列)で待ち行列が生じRがWtになる。00L形のネットワークではウィンドウサイズが小さくときからレスポンスタイムがWtになるので、小さなウィンドウサイズから同じことが起こっていると考えることができる。

MVA法の適用可能な待ち行列網(図1など)は各待ち行列を一定回数だけ通過するclosed chainなので、このままでは $W < W_{max}$ のときにはボトルネック待ち行列には待ち行列が生じない。これは W_{max} が1より大きい場合に問題となる。そこで、データ受信待ち行列をchainがW回通過するモデルを考えてみると、伝送速度が大きい場合にはデータ受信待ち行列がボトルネックであり、ここでの待ち時間がWとともに増加し、これがレスポンスタイムの主要な部分なので比較的良い結果を与えることが予想される。伝送速度が小さい場合にはこの値はレスポンスタイムの主要な部分ではないが、 W_{max} が1に近く、比較的小さいウィンドウサイズからボトルネック待ち行列(この場合はデータ伝送待ち行列)に待ち行列が発生するのでモデルを変更することなく良好な結果を得られると思われる。

4. 性能評価結果

以上の手法によって性能評価を行なった結果をシミュレーションの結果(95%信頼区間)とともに示す。ここで「性能」とは、次式で定義される伝送効率とする。これは、スループット(ここでは単位時間に伝送された情報量)を伝

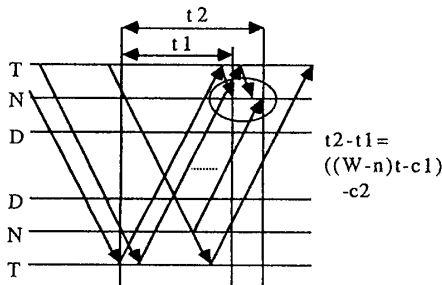


図2.ネットワーク層確認応答まちの影響

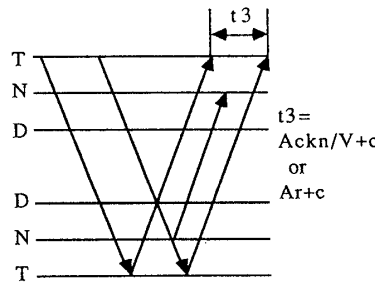


図3.ネットワーク層確認応答伝送の影響

送速度で正規化したものである。

$$\text{伝送効率} = \frac{\text{スループット}}{\text{伝送速度}} = \frac{\text{単位時間に実際に伝送された情報量}}{\text{単位時間に伝送路が伝送できる情報量}}$$

また、各層でのプロトコル処理時間、伝搬遅延は以下のように定める。

データ送(受)信:2(3)ms 応答送(受)信:1(2)ms
 応答受信後処理:1ms 伝搬遅延:5ms

図4に示す結果から、待ち行列網モデルとMVA法による結果は、伝送速度中程度以外はシミュレーションとよく一致することがわかる。伝送速度が中程度のときはボトルネック待ち行列がデータ伝送であるのに W_{max} が1以上であるため、実際のものよりレスポンスタイムを小さく見積って、伝送効率としては大きめの値を得ているものと思われる。また、伝送速度が大きい場合、ウィンドウサイズが大きくなると安全側にずれる。これは、さきに挙げたボトルネック待ち行列をchainがW回通過するモデルでは、実際の場合にもともと生じていた待ち行列が余分に生じるようになって待ち行列が長く(待ち時間が長く)になってしまうためと思われる。

そのほか、全体の傾向をまとめると、同一伝送速度のときはウィンドウサイズが大きいほど伝送効率が向上し、伝送速度が大きくなるとスループットが一定になるので伝送効率が速度に反比例する。また、伝送速度を一定としてウィンドウサイズを大きくしたときに、伝送効率が向上しなくなるウィンドウサイズの大きさ W_{max} は、伝送速度が大きくなるにしたがって大きくなるということがいえる。

以上の結果は全て、 $W < W_{max}$ のときはネットワーク層での確認応答待ちが、 $W > W_{max}$ のときにはさらに、伝送速度が小さいときは媒体上のデータ伝送が、伝送速度が大きいときには各層でのプロトコル処理がボトルネックとなることから説明できる。

5. おわりに

多層CO形ネットワークのレスポンスタイムの理論値を求め、その考察結果をもとにモデルを作ることにより、従来多層CO形ネットワークに適用が困難であった待ち行列網モデルとMVA法による解析法を適用して性能を評価した。また、シミュレーションによってその結果を検証した。参考文献

[1] M. Reiser, S. S. Lavenberg: "Mean-Value Analysis of Closed Multi-chain Queueing Networks", J. ACM, vol. 27, No. 2, pp. 313-322 (April 1980).

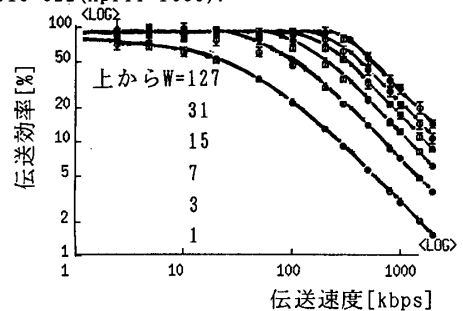


図4. 多層CO形ネットワークにおける伝送速度と伝送効率の関係 (TSDU長=128Byte)