A Multi-metric QoS Routing Algorithm with the Reinforcement Learning Method

Hiroyuki Une Member (Hiroshima Kokusai Gakuin University, Chiba University)

Fei Qian Member (Kanto Gakuin University)

Hironori Hirata Senior Member (Chiba University)

Keywords: Routing Algorithm, QoS, Reinforcement Learning, Q-Learning

QoS(Quality of Service) control is required by real-time communication services, such as audio and video streaming. We focus on the QoS routing algorithm which finds the routes satisfying the restrictions on the bandwidth and communication delay metrics. If violations are detected on current route, this algorithm has to choose another route from feasible routes.

In this paper, we propose the routing algorithm QQRA (Q-learning QoS Routing Algorithm). The node using QQRA selects the next hop by deterministic mode or probabilistic mode. When node x using QQRA sends a packet to destination t , node x selects the next hop node $y^* = \arg \min_{y \in N_x} Q(t, y)$ in deterministic mode. On the other hand, node x decides the next hop by the probabilities corresponding $Q(t, y)$ in probabilistic mode.

Node x with QQRA exchanges the information of the communication delay $D_x(t, y)$ and the cost metric $C_x(t, y)$ between x and destination t via the next hop y . Node x uses this information to update $Q(t, y)$. $Q(t, y)$ is updated by the following equation:

$$Q_{new,x}(t, y) \leftarrow Q_{old,x}(t, y) + \eta \{r + Q_y(t, y) - Q_{old,x}(t, y)\}, \dots \quad (1)$$

where η is a learning rate. The reward r is calculated as follows:

$$r = r_w \left\{ c_w \frac{C_x(t, y)}{C_{xt}} + d_w \frac{D_x(t, y)}{D_{xt}} + q_w \frac{b_{xy}}{l_{xy}} \right\}, \dots \quad (2)$$

where C_{xt} and D_{xt} are the constraints of cost and communication delay. b_{xy} and l_{xy} are the sum of packet length in the queue and the length of the queue of the link (x, y) . c_w , d_w , and q_w are the weights for each metric. $r_w (= (0, \bar{Q}])$ is used as the parameter to normalize the reward.

We evaluate the effectiveness of QQRA by the simulations. Figure 1 shows the network topology. Each link has 3 [Mbps] bandwidth and 5.0 [ms] delay. As shown in Fig. 1, this network has five UDP sessions with constant bit rate. Figure 2 indicates that QQRA detects the growing of communication delay and alters the routes to satisfy the delay constraint (500 [ms]) with deterministic mode. Furthermore

QQRA chooses the route satisfying cost constraint (5) as shown in Fig. 3.

Fig. 1. Network topology

Fig. 2. Communication delay of Flow ID 1 (Total Input Rate: 4.0 [Mbps])

Fig. 3. Cost of route for Flow ID 1 (Total Input Rate: 4.0 [Mbps])

強化学習による複数のメトリックを考慮した QoS ルーティングアルゴリズム

正 員 鵜根 弘行^{*,**} 正 員 銭 飛^{***}
上級会員 平田 廣則^{**}

A Multi-metric QoS Routing Algorithm with the Reinforcement Learning Method

Hiroyuki Une^{*,**}, Member, Fei Qian^{***}, Member, Hironori Hirata^{**}, Senior Member

Recently, there are numerous services, such as audio and video streaming, which are real-time communication services which guarantee bandwidth and low latency, called “QoS (Quality of Service).” To ensure the bandwidth and shorten the communication delay, it is required to solve the problem of finding paths which satisfy the QoS constraints made of two or more metrics, such as link costs and communication delay. However, this problem is shown as an NP-complete problem. We introduce a routing algorithm with a reinforcement learning scheme to obtain the paths which satisfy two or more constraints.

キーワード：ルーティングアルゴリズム, QoS, 強化学習, Q 学習

Keywords: Routing Algorithm, QoS, Reinforcement Learning, Q-Learning

1. 研究背景

近年、インターネットにおいて音声や動画を配信するサービスが増加している。これらのサービスは実時間通信であることが要求されるため、一定の通信速度を保証するほかにも遅延や通信時間の変動（ジッタ）の抑制が必要となる。その一方で、電子メールや FTP・HTTP などを利用したデータ通信など、実時間性を求められないサービスも存在する。もしこれらのサービスを利用している多数のユーザが同時にデータの転送を行った場合、利用可能な通信帯域を占有してしまい、輻輳が発生する。それに伴い通信パケットの消失やジッタの増大が発生し、実時間通信の品質が保てなくなる。これを解決するため、ネットワークの通信帯域の確保ならびにトラフィックの優先順位を設定するなど

の、QoS (Quality of Service) 制御の重要性が高まっている。

一般に QoS 制御には輻輳制御、通信帯域の予約、ジッタの抑制、ならびにトラフィックの優先順位の設定などが含まれる。これらを効率よく実現するために、我々は以下の要素が特に重要だと考える。

- QoS スケジューリングアルゴリズム
- QoS ルーティングアルゴリズム

QoS スケジューリングアルゴリズムは、ルータで送出するパケットの順序ならびにタイミングの制御を行う。重み付けフェアスケジューリング (WFQ: Weighted Fair Queuing) ⁽¹⁾ をはじめとするパケットスケジューリングアルゴリズムがそれにあたる。パケットスケジューリングアルゴリズムでは、トラフィックを通信遅延などの要求 (QoS 要求) に応じて複数のクラスに分類する。そして要求に応じた優先度を各クラスに与え、パケットの送出制御を行う。特に WFQ では優先度の高いトラフィックが回線を占有しないよう、各トラフィックに最大遅延時間を設定することが可能である。しかしながら、QoS スケジューリングアルゴリズムはネットワーク全体の遅延特性の変動に対応できないという問題がある ⁽²⁾。そのため、QoS 要求を満たす経路の探索が必要となる。

QoS ルーティングアルゴリズムは、トラフィックの品質要求に基づく制約 (QoS 制約) を満たす経路の探索を行う。ここで複数の品質要求、例えば最大通信遅延と最小通信帯

* 広島国際学院大学
〒 739-0321 広島市安芸区中野 6-20-1
Hiroshima Kokusai Gakuin University
6-20-1, Nakano, Aki-ku, Hiroshima, 739-0321

** 千葉大学
〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
Chiba University
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522

*** 関東学院大学
〒 236-8501 横浜市金沢区六浦東 1-50-1
Kanto Gakuin University
1-50-1, Mutsuura-Higashi, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-8501

域の両方の制約を満たす経路を見つけることは、複数の制約条件を扱う QoS ルーティング問題に相当する。しかし、このような QoS ルーティング問題は NP 完全であることが証明されている⁽³⁾。さらに、インターネットのバックボーン（コアネットワーク）におけるトラフィックの変動には長期依存性、あるいは自己相似性があるといわれている。長期依存性が存在するネットワークでは、トラフィックの独立性が成立しない⁽⁴⁾。したがって、待ち行列理論を用いた古典的なモデルを用いた経路探索は、トラフィックの独立性が成り立っていることを前提としているために適切ではないと考えられる。そのため、ネットワークの特性の変化によって発生した QoS 制約違反に対して動的に対応することのできる新しい手法が提案されている。

Chen と Nahrstedt は複数の制約条件を扱う QoS ルーティング問題を、大域的な情報を使用せずに解く分散型ルーティングアルゴリズムを提案した⁽⁵⁾。このアルゴリズムを使用するノード[†]は、プローブと呼ばれるメッセージをお互いに交換する。プローブには送信元 s と宛先 t 、コネクション識別子 cid 、および QoS 制約条件 QoS が記録されている。プローブを受け取ったノード i は、このプローブがどこから届いたかを $p_i(cid)$ に記録する。そして QoS 制約条件を満たすリンクによって接続されている全てのノードに対してプローブを送信（フラッディング）する。これらの操作は幅優先探索^{††}に相当するため、最終的にプローブは宛先 t に到着する。この時点で各ノードに記録された $p_i(cid)$ をノード t から逆順にたどることで、コネクション cid が要求する QoS 制約条件を満たす経路が求まる。しかしながら Chen と Nahrstedt のアルゴリズムは、リンクの通信遅延・利用可能な帯域およびコストが既知であることを前提としている。そのため、トラフィックの変化による QoS 制約違反の検出ならびに代替経路の確保は考慮されていない。

Peng は QoS ルーティング問題を、与えられた制約を満たす辺素な（共通するリンクが存在しない）経路を発見する問題に帰着させたアルゴリズムを複数提案した⁽⁶⁾。その中の一つである Lag-2DP はラグランジュ緩和法により、送信ノード s と受信ノード t をつなぐ経路の中から以下の制約を満たす二つの辺素な経路 P_1, P_2 を発見する。

$$\sum_{i=1}^2 D(P_i) \leq \left(1 + \frac{1}{k}\right) D \dots\dots\dots (1)$$

$$\sum_{i=1}^2 C(P_i) \leq (1 + k) OPT \dots\dots\dots (2)$$

[†] 本稿では PC やルータなど、データパケットを送受信する機器の総称として「ノード」を用いる。

^{††} 幅優先探索とはグラフや木の探索を行う際、開始ノードの隣接ノード集合を最初に探索し、次にこれらの隣接ノードに隣接する集合、さらに隣接するノード集合へと探索範囲を広げていくアルゴリズムである。Chen らのアルゴリズム⁽⁵⁾において、宛先 t 以外のノードはプローブを受信したら自分自身の隣接ノード集合にフラッディングを行う。ネットワークをグラフとして考えた場合、フラッディングは隣接ノードの探索に相当するため、宛先ノード t の幅優先探索を行っていることとみなすことができる。

ここで $D(P_i)$ 、 $C(P_i)$ はそれぞれ経路 P_i の通信遅延ならびにコストを表す。 D は経路の遅延制約、 OPT はノード s, t 間を結ぶ経路の最小コストを示す。 k は解の精度に関するパラメータである。Lag-2DP はラグランジュ緩和法を用いているため、得られた解がすべて QoS 制約条件を満たす保証はない。しかし 3 本以上の辺素な経路の発見にもそのまま利用できるため、与えられた QoS 制約を満たす複数の経路を求めることが可能になる。

Peng の提案したアルゴリズムは、いずれもトラフィックの流量やネットワークの遅延、およびコストのパラメータなどが事前に与えられていることが前提である。そのため Chen のアルゴリズムと同様、QoS 制約違反の検出および代替経路の計算は考慮されていない。

Chen と Nahrstedt のアルゴリズムおよび Peng のアルゴリズム自体は、ネットワークのノード数ならびにリンク数に対する多項式時間のオーダーで実行可能である。そのため QoS 制約違反の検知と同時に代替経路を動的に計算する場合のコストはそれほど大きくないと考えられる。しかしそのためにはネットワーク全体の状態を監視し、代替経路の計算を行う管理ノードの存在が前提となる。

本研究では、複数メトリックを考慮した分散型 QoS ルーティングアルゴリズム **QQRA**（Q-learning QoS Routing Algorithm）を提案する。QQRA は経路の検出に **Q 学習**（Q-Learning）⁽⁷⁾を用いることで、遅延特性の変動に対応した動的ルーティングを行う。具体的には測定した通信遅延やリンクのコストに基づいて経路を決定する。そのため QoS 制約違反を検知した場合、QQRA はただちに QoS 制約を満たす別の経路を探索、切り替えを行うことが可能である。QQRA は隣接ノードとの間で通信遅延やコストに関する情報を交換するが、ネットワークのトポロジーならびに各リンクを流れるトラフィックの流量に関する完全な情報を必要としない。これはネットワークを監視するために特別な仕組みを用意する必要がないことを意味する。

本稿の構成を以下に示す。2 章では QoS ルーティング問題について説明する。3 章では Q-Learning の理論、ならびにルーティングアルゴリズムへの応用について述べる。4 章では、我々が提案する QoS ルーティングアルゴリズム QQRA について解説する。5 章ではネットワークシミュレータによる実験結果を元に、提案するルーティングアルゴリズムの有効性を検証し、6 章でまとめを行う。

2. QoS ルーティング問題

QoS ルーティング問題は、送信元から宛先までの QoS 要求を満たす複数の経路の中から配送に利用する経路を決定することである⁽⁸⁾。QoS ルーティング問題における基本的な QoS 要求として、以下の 2 つが考えられる。

QoS 最適条件 指定したメトリックが最適となる経路を要求する

QoS 制約条件 指定したメトリックが条件を満たす経路を要求する

QoS ルーティング問題を扱うために、以下の記号を導入する。まず、対象となるネットワークのトポロジーを双方向グラフ $G = (N, L)$ として表現する。ここで N はネットワーク上の全ノード集合を表す。ノードの総数は $|N|$ と表記する。 L はネットワーク上のリンクの集合を表す。リンクの総数は $|L|$ と表記する。個々のリンク、例えばノード $i, j (i, j \in N)$ 間のリンクは (i, j) と表記する。また、ノード $x \in N$ の隣接ノード集合を表す記号として N_x を用いる。リンク (i, j) に割り当てられたメトリックは m_{ij} と表記する。複数のメトリックを使用する場合は、ベクタ表現 $\mathbf{m}_{ij}$ を用いる。

ノード $s, t \in N$ 間の経路は、経路を構成するリンクの並び $(s, i), (i, j), \dots, (l, t)$ として表す。ノード s と t の間に複数の経路がある場合、それらの集合を P_{st} と表す。また、 P_{st} の k 番目の経路を pt_{st}^k とする。QoS ルーティングを行う場合、 pt_{st}^k の経路メトリック $m(pt_{st}^k)$ を考慮する必要がある。複数のメトリックを用いる場合は、ベクタ表現 $\mathbf{m}(pt_{st}^k)$ を使う。

〈2・1〉 メトリックの分類 QoS で取り扱うリンクメトリックには帯域幅、遅延、ジッタ、コスト、信頼性、損失率などが挙げられる。それぞれのメトリックは、次のように分類される^{(5) (8)}。

加算性メトリック: pt_{st}^k の経路メトリックが (3) 式のように、経路中のリンクのリンクメトリックの和として表現されるメトリック。遅延、ジッタ、コストが該当する。

$$\begin{aligned} m(pt_{st}^k) &= m_{si} + m_{ij} + \dots + m_{lt} \\ &= \sum_{(i,j) \in pt_{st}^k} m_{ij} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

乗算性メトリック: pt_{st}^k の経路メトリックが (4) 式のように、経路中のリンクのリンクメトリックの積として表現されるメトリック。信頼性や損失率が該当する。

$$\begin{aligned} m(pt_{st}^k) &= m_{si} \cdot m_{ij} \dots m_{lt} \\ &= \prod_{(i,j) \in pt_{st}^k} m_{ij} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

凹凸性メトリック: pt_{st}^k の経路メトリックが (5) 式のように、経路中のリンクのリンクメトリックの最小値として表現されるメトリック。帯域幅が該当する。

$$\begin{aligned} m(pt_{st}^k) &= \min\{m_{si}, m_{ij}, \dots m_{lt}\} \\ &= \min_{(i,j) \in pt_{st}^k} \{m_{ij}\} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

〈2・2〉 QoS 制約条件 QoS 制約条件において、メトリック m と要求される値 r との関係式を (6) 式で表現する。

$$m \pi r \dots\dots\dots (6)$$

ここで π は関係演算子 ($\in \{<, \leq, \geq\}$) である。同様に n 個のメトリック $(m_1, \dots, m_n)$ と、各メトリックに対する要求 $(r_1, \dots, r_n)$ との関係集合 R を (7) 式で表現する。

$$R = \{(m_1 \pi_1 r_1), \dots, (m_n \pi_n r_n)\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで $\pi_j \in \{<, \leq, \geq\}$ ($j = 1, \dots, n$) である。

〈2・3〉 本研究で扱う QoS ルーティング問題 本研究では複数の制約を持つ QoS ルーティング問題として、コストメトリックと遅延メトリックに関する 2 つの QoS 制約条件を同時に満たす経路を求める問題を扱う。本来ならば QoS 最適経路を求めるべきであるが、NP 完全問題であるために経路を計算する時間が増大する。加えて遅延やジッタなど実数値で表現されるメトリックを用いた場合に最適経路が二つ以上存在することは稀であると考えられる。そのため負荷分散の観点からも、ルーティング問題を上記の通り設定した。

まず、リンク (i, j) のコストメトリックを $\mathbf{m}_{ij} = (c_{ij}, d_{ij})$ と表記する。ここで c_{ij}, d_{ij} はそれぞれリンク (i, j) のコストメトリックと遅延メトリックを表す。 c_{ij} は OSPF⁽⁹⁾ などを用いられているのと同様、リンクに与えられた重み係数を表す。遅延メトリック d_{ij} は以下の要素の実測値から構成される。

キューイング遅延: パケットがノードの出力キューから送信されるまでの待ち時間

シリアル化遅延: パケットをリンクに送信する際に発生する遅延

リンク遅延: パケットが送出されてから隣接ノードに到達するまでの遅延 (リンクの距離に依存する)

前節で述べた通り、コストメトリックおよび遅延メトリックは加算性メトリックである。したがって経路 pt_{st}^k の経路メトリックは次式で表現される。

$$\begin{aligned} \mathbf{m}(pt_{st}^k) &= \mathbf{m}_{si} + \mathbf{m}_{ij} + \dots \mathbf{m}_{lt} \\ &= \sum_{(i,j) \in pt_{st}^k} \mathbf{m}_{ij} \\ &\triangleq \left(\sum_{(i,j) \in pt_{st}^k} c_{ij}, \sum_{(i,j) \in pt_{st}^k} d_{ij} \right) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ノード s, t 間のコスト制約 (最大コスト) を C_{st} 、遅延制約 (最大遅延) を D_{st} とすると、経路 pt_{st}^k の QoS 制約条件 $\mathbf{R}_{st}$ は次式で表すことができる。

$$\mathbf{R}_{st} \triangleq \left(\sum_{(i,j) \in pt_{st}^k} c_{ij} \leq C_{st}, \sum_{(i,j) \in pt_{st}^k} d_{ij} \leq D_{st} \right) \dots\dots\dots (9)$$

以上より、 pt_{st}^k を配送経路として利用するには、(10)(11) 式の両方を満たす必要がある。

$$\sum_{(i,j) \in pt_{st}^k} c_{ij} = c_{si} + c_{ij} + \dots + c_{lt} \leq C_{st} \dots\dots (10)$$

$$\sum_{(i,j) \in pt_{st}^k} d_{ij} = d_{si} + d_{ij} + \dots + d_{lt} \leq D_{st} \dots\dots (11)$$

3. Q-Learning

〈3・1〉 Q-Learning の概要 Q-Learning⁽⁷⁾ はエージェントの行動を Q 値 (行動価値関数) として評価し, 方策オフ型 TD (Temporal Differences) 制御を行うことで行動を決定する, 強化学習の手法の 1 つである⁽¹⁰⁾. Q-Learning に使われる記号を以下に示す。

- s_t : 時刻 t での環境の状態を表す。
- a_t : 時刻 t での行動を示す。
- $A_t(s_t)$: 時刻 t , 状態 s_t において可能な行動の集合を表す。
- a_t^* : $A_t(s_t)$ の中で最適な行動を表す。
- $Q(s_t, a_t)$: 状態 s_t において, 行動 a_t の価値を表す行動価値関数 (Q 値) を表す。値域は $[0, \bar{Q}]$ ($\bar{Q}$ は価値の上限) である。本研究ではこの値が小さいほど, a_t はよい行動であることを意味する。
- r_t : 時刻 t に得られた報酬を表す。本研究ではこの値が小さいほどよい結果を意味する。
- $\pi(s_t)$: エージェントが状態 s_t において行う方策 (行動) を表す。

エージェントは, 自身の取った行動によって得られた報酬 r_t を元に $Q(s_t, a_t)$ を更新する。更新式を (12) 式に示す。

$$Q_{new}(s_t, a_t) \leftarrow Q_{old}(s_t, a_t) + \eta \{r_t + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}^*) - Q_{old}(s_t, a_t)\} \cdots (12)$$

(12) 式中, $Q(s_{t+1}, a_{t+1}^*)$ は行動 a_t によって遷移した状態 s_{t+1} において, 最適な行動 a_{t+1}^* を行った場合の Q 値を表す。 $Q(s_t, a_t)$ の定義より, $Q(s_{t+1}, a_{t+1}^*)$ は以下の式で求められる。

$$Q(s_{t+1}, a_{t+1}^*) = \min_{a \in A_{t+1}(s_{t+1})} Q(s_{t+1}, a) \cdots (13)$$

また, $\gamma \in [0, 1]$ は割引率を表すパラメータである。これは次の状態において最適な行動を行った場合の Q 値 $Q(s_{t+1}, a_{t+1}^*)$ が学習に与える影響を示す。 $\eta \in [0, 1]$ は学習率を表す。 η の値が大きいほど, Q 値の変化が大きくなる。

エージェントは Q 値を元に自身の方策を (14) 式に基づいて決定する。

$$\pi(s_t) = \arg \min_{a \in A_t(s_t)} Q(s_t, a) \cdots (14)$$

ここで $\arg \min$ は, 与えられた関数の値を最小にする引数の値を求める関数である。つまり (14) 式は状態 s_t において, $Q(s_t, a)$ が最小となる行動 $a^* \in A_t(s_t)$ を方策として選択することを意味する。

〈3・2〉 ルーティングへの応用 Q-Learning を利用したルーティングアルゴリズムとして, Q-Routing (Littman,

Boyan)⁽¹¹⁾ が挙げられる。Q-Routing では, ノード x から隣接ノード y を経由して宛先ノード t に到達するまでの推定時間 $Q_x(t, y)$ ($y \in N_x$) を Q 値として用いる。この時 $Q(s_{t+1}, a_{t+1})$ に相当するのはノード y の Q 値 $Q_y(t, z)$ ($z \in N_y$) である。ノード x は次式で表される方策 $\pi_x(t, y^*)$ を用いてネクストホップ (転送先ノード) y^* を決定する。

$$\pi_x(t, y^*) = \arg \min_{y \in N_x} Q_y(t, y) \cdots (15)$$

Q-Routing における報酬 r は, ノード x のシリアル化遅延とリンク遅延, およびネクストホップ y でのキューイング遅延の和として与えられる。ノード x は報酬 r を元に, 次式を用いて Q 値を更新する。

$$Q_{new,x}(t, y) \leftarrow Q_{old,x}(t, y) + \eta \{r + Q_y(t) - Q_{old,x}(t, y)\} \cdots (16)$$

$$Q_y(t) = \min_{z \in N_y} Q_y(t, z) \cdots (17)$$

(16) 式中, $\eta \in [0, 1]$ は学習率を表すパラメータである。また, 上式は (12) 式の割引率を $\gamma = 1$ としたものに相当する。

Q-Routing を改良したルーティングアルゴリズムに Predictive Q-Routing (Choi, Yeong)⁽¹²⁾, Confidence-Based Q-Routing (Kumar, Mikkilainen)⁽¹³⁾ がある。Predictive Q-Routing (PQ-Routing) では Q 値の更新の際に, 過去の Q 値の最小値および Q 値の時間変化を記録する。そしてこれらの情報を用いて Q 値の推定値を求め, ネクストホップの決定を行う。Confidence-Based Q-Routing (CQ-Routing) では, Q 値の更新の際に「信頼度」(confidence measure) を用いて学習率の調整を行う。これは, 長期間更新されない Q 値に含まれる誤差がその他の Q 値に伝搬することを防ぐために使われる。

PQ-Routing と CQ-Routing のどちらも, Q 値の更新式は基本的に (16) 式と同様である。言い換えると, Q 値に反映されているのは遅延メトリックだけである。リンクコストなど, 他のメトリックを考慮した QoS ルーティングを行うことは想定されていない。

4. QoS ルーティングアルゴリズム QQRA

〈4・1〉 QQRA の特徴 本節では我々が提案するルーティングアルゴリズム QQRA (Q-learning QoS Routing Algorithm) について説明する。QQRA は Q-Routing 同様, Q-Learning を用いて経路の決定を行う。報酬 $r \in [0, \bar{Q}]$ に基づく Q 値の更新は (16) 式を用い, ネクストホップは原則として (15) 式に基づいて決定する。

Q-Routing との違いは, Q 値の更新に用いる報酬 r が (18) 式に示す通り, 複数のメトリックから計算されていることである。

$$r = r_w \left\{ c_w \frac{C_x(t, y)}{C_{xt}} + d_w \frac{D_x(t, y)}{D_{xt}} + q_w \frac{b_{xy}}{l_{xy}} \right\} \cdots (18)$$

(18) 式中, $C_x(t, y)$ および $D_x(t, y)$ はそれぞれルータ x から y を経由して t に向かう経路のコストメトリックならびに遅延メトリックである。 b_{xy} および l_{xy} は, それぞれリンク (x, y) の出力キューに格納されているパケットの合計サイズ, ならびに出力キューのバッファ容量を表す。この二つのパラメータは, 遅延コストを補間するための局所的情報として使用される。 C_{xt} ならびに D_{xt} は, ノード x から t に向かうトラフィックが満たすべきコストメトリックおよび遅延メトリックの上限を表す。

(18) 式中の係数 c_w, d_w, q_w は, 報酬 r を計算する際に各メトリックのトレードオフを表現するために用いる重み係数である。これらの重み係数は, リンク (x, y) に輻輳が発生しているかどうかで値を変化させる。輻輳が発生していないときの重み係数をそれぞれ c_i, d_i, q_i , 発生している場合はそれぞれ c_o, d_o, q_o に設定する。輻輳発生の有無は, 遅延メトリック d_{xy} が与えられた閾値 d_t を超えたかどうかで判定する。

QQRA が持っているその他の特徴として, 与えられた QoS 制約条件を満たす経路が2つ以上存在する場合, それらの経路にトラフィックを分配できることが挙げられる。これを実現するために, QQRA は方策 $\pi_x(t, y^*)$ を以下に示す確率 $p_x(t, y^*)$ によって選択する機能を持つ。

$$p_x(t, y^*) = \frac{\delta_x(t) - Q_x(t, y^*)}{(n-1) \cdot \delta_x(t)} \dots \dots \dots (19)$$

$$\delta_x(t) = \sum_{y \in N_x} Q_x(t, y) \dots \dots \dots (20)$$

(19) 式中, n は QoS 制約条件を満たす経路の数を示す。以後, (15) 式を用いて経路を決定する方法を「決定論的経路選択」, (19)(20) 式を用いる方法を「確率論的経路選択」と呼ぶ。

〈4・2〉 QQRA が扱う情報 QQRA を使用するノードは定期的に経路情報を交換し, 遠く離れたノードへの経路を求める際に必要なメトリック情報を収集する。ノード $x \in N$ が保持する経路情報はノード x に通知された宛先ノードの集合 T_x , ノード $y \in N$ を経由して $t \in N$ に向かう経路の Q 値 $Q_x(t, y)$, コストメトリック $C_x(t, y)$, 遅延メトリック $D_x(t, y)$, そして y をネクストホップとして使用可能かどうかを表すフラグ $S_x(t, y)$ の5種類である。

$S_x(t, y)$ の役割について補足する。これは宛先ノード t へのネクストホップを決定論的経路選択に基づいて決定する際に, ノード y を候補として使用するかどうかを示すフラグである。この値が0の時は y を候補に含め, 1の時は y を候補から除外する。 $S_x(t, y)$ はループを含まない経路を求めるために利用される。具体的にはノード y が宛先 t へのネクストホップにノード x を使用している場合, $S_x(t, y)$ に1をセットする。これにより, パケットがノード x と y の間で往復する現象を避けることができる。同時に経路の上流へ向かう方向への切り替えは, 上流側の経路が変更された場合にのみ発生することが保証される。なお, 確率論

Table 1. Contents of reply message

	if $z^* = x$	if $z^* \neq x$
$Q_m(t)$	$\min_{z \in N_y, z \neq x} Q_y(t, z)$	$Q_y(t, z^*)$
$C_m(t)$	$\bar{C}$	$C_y(t, z^*)$
$D_m(t)$	$\bar{D}$	$D_y(t, z^*)$
$S_m(t)$	1	0

的経路選択を行う場合は $S_x(t, y)$ の値を無視する。

〈4・3〉 メッセージ 各ノードは経路情報を交換するために, 以下に示すメッセージを定期的送信する。

クエリメッセージ 隣接ノードに対して経路情報を要求するためのメッセージである。このメッセージには, メッセージを作成したノード x の保持する宛先ノードテーブル T_x が記録される。このメッセージを受け取ったノード y は Fig. 1 に示す通り, T_y に T_x の内容をマージしたのち, 次に説明するリプライメッセージの生成と送信を行う。

リプライメッセージ クエリメッセージを受け取ったノード y が返信として, クエリの送信ノード x に対して自身の保持する経路情報を送信するために用いるメッセージである。このメッセージには, ノード y の保持する宛先ノードテーブル T_y の他, すべての宛先 $t \in T_y$ についての経路情報 $Q_m(t)$, $C_m(t)$, $D_m(t)$, $S_m(t)$ を載せる。経路情報の内容は, 宛先 t へのネクストホップ z^* がクエリ送信ノード x と同じであるかどうかに応じて Table 1 の通りに設定される。Table 1 において $\bar{C}$ および $\bar{D}$ は, それぞれコストメトリックと遅延メトリックの上限値を表す。

ノード x は Fig. 1 に示す通り, ノード y から受信したリプライメッセージの内容にしたがって経路情報を更新する。更新式を以下に示す。

$$C_x(t, y) \leftarrow C_m(t) + c_{xy} \dots \dots \dots (21)$$

$$D_x(t, y) \leftarrow D_m(t) + d_{xy} \dots \dots \dots (22)$$

$$S_x(t, y) \leftarrow S_m(t) \dots \dots \dots (23)$$

$Q_x(t, y)$ は (16) 式を用いて更新する。ただし QoS 制約条件に違反した場合は $Q \leftarrow \bar{Q}$ とする。

更新メッセージ リンクがダウンしたなどの理由でネットワークポロジの変更が発生した場合に, 隣接ノードに対して新しい経路情報を提供するために用いるメッセージである。ノード y がノード x に対して送信する更新メッセージの内容は, リプライメッセージとほとんど同じである。異なる点は, T_y にはポロジの変化により経路が変化した宛先ノードだけが記録されていることと, 更新メッセージには Q 値が記録されていないことである。

ノード x はノード y からの更新メッセージを受信した場合, リプライメッセージと同じ方法で経路情報を更新する。ただし Q 値の更新には, 最後に受信したリプライメッセージに記録された $Q_m(t)$ を使用する。さらにリプライメッセージ受信時の処理と異なり, Q 値の更新後必ず経路の再計算を行う。

Fig. 1. Sequence diagram of message passing

5. 実験結果と検証

ルーティングアルゴリズム QQRA の効果を検証するため、ネットワークシミュレータ ns2⁽¹⁴⁾ を用いたシミュレーションを行った。具体的には QQRA が負荷の変動に伴う通信遅延変動を検知し、最大遅延制約と最大コスト制約を満たす他の経路に切り替えられるかどうかを確認する。同時に End-to-End の通信遅延のジッタについても検証を行う。

実験結果の比較対象として Shortest Path First Algorithm (以下「SPF」) を用いた。その理由は、SPF が静的に与えられたリンクコストの合計が最小となる経路を選択するため、通信遅延の変動による経路の変化が起らないことである。これによりネットワークが過負荷であるかどうか、言い換えると輻輳の発生状況を確認できる。本来ならば Chen らのアルゴリズム⁽⁵⁾ や Peng のアルゴリズム⁽⁶⁾ を比較対象にすべきところである。しかしこれらのアルゴリズムは静的な遅延特性を元に経路を検出するアルゴリズムであるため、QoS 制約違反の検出と経路の切り替えという観点から比較対象にならない。同様に Q-Routing も通信遅延の推定値である Q 値に基づいたルーティングを行うため、最大遅延制約を満たすことを保証しない。さらに遅延メトリックのみに基づくアルゴリズムであるため、Q-Routing も比較対象から除外した。

〈5・1〉 実験内容 検証に用いたネットワークトポロジを Fig. 2 に示す。このネットワークは、サービスレベル契約を結んだ AS (自律システム: 同一の運用ポリシーに基づいて管理されるネットワーク) 同士で QoS ルーティングを行うことを想定している。AS 同士を接続するエッジルータに相当するノードは R_{01} から R_{05} の 5 つとしている。

Fig. 2 のネットワークにおいて、各リンクの帯域幅は 3.00 [Mbps]、リンク遅延は 5.00 [ms]、コストは 1 である。Table 2 に実験に用いたトラフィックの設定を示す。QoS 制約条件として、End-to-End の最大遅延制約に 0.5 [s] を、最大コスト制約に 5 を設定した。 R_{01} から R_{05} の 5 つのノードはリング状のトポロジを構成している。したがってこれらのノード間にはコストメトリックの異なる 2 つの経路が存在する。

Fig. 2. Network topology

Table 2. Parameter setting for each traffic

ID	Traffic type	Source node	Destination node	Input Rate [Mbps]
1	UDP/CBR	S_1	D_1	0.8/1.0
2	UDP/CBR	S_2	D_2	0.8/1.0
3	UDP/CBR	S_3	D_3	0.8/1.0
4	UDP/CBR	S_4	D_4	0.8/1.0
5	UDP/CBR	S_5	D_5	0.8/1.0

Table 3. Parameters settings for QQRA

Parameter	Value	Parameter	Value
$\bar{Q}$	10^4	η	0.8
r_w	10^3	d_t	100 [ms]
c_i	0.05	c_o	0.05
d_i	0.20	d_o	0.45
q_i	0.25	q_o	0.50

Fig. 2 からわかる通り、SPF を用いて経路を求める場合、Flow ID 5 以外のフローはコストメトリックが最小となる経路 (R_{01}, R_{03}, R_{05}) を必ず使用する。したがって、5 つのフロー全ての合計入力レート (総入力レート) がリンクの通信帯域 3.0 [Mbps] に近づくにつれて通信負荷が増大し、転送遅延の増大と輻輳が発生する。この時 Fig. 2 のエッジルータ群が QoS 制約条件を満たす経路、特に最大通信遅延制約を満たす経路 ($R_{01}, R_{02}, R_{04}, R_{05}$) に切り替えられるかどうかを確認する。また反対に、経路 ($R_{01}, R_{02}, R_{04}, R_{05}$) が QoS 制約条件に違反した場合にも経路 (R_{01}, R_{03}, R_{05}) に切り替えられるかどうかあわせて検証する。

QQRA の学習に用いたパラメータを Table 3 に示す。クエリメッセージの送信間隔 T_i は 100 [ms] とする。また、経路決定方法の違いによる比較を行うため、決定論的経路選択と確率論的経路選択の両方について実験を行った。

〈5・2〉 遅延制約 Fig. 3 に総入力レートが 4.0 [Mbps] (各フローの入力レートが 0.8 [Mbps]) における、Flow ID 1 の End-to-End の通信遅延の変化の様子を示す。Fig. 3 (a)

(a) SPF algorithm

(b) QQRA deterministic mode

(c) QQRA probabilistic mode

Fig. 3. Communication delay of Flow ID 1 (Total Input Rate: 4.0 [Mbps])

より、SPF アルゴリズムでは総入力レートが経路の帯域 3.0 [Mbps] を超えたために輻輳が発生し、その結果遅延制約 0.5 [s] に違反していることがわかる。それに対して QQRA では決定論的・確率論的の両方とも、輻輳が発生する前に経路を切り替えることで遅延制約を満たしていることがわかる。

Fig. 4 に総入力レートを 5.0 [Mbps] (各フローの入力レートが 1.0 [Mbps]) にした場合の、Flow ID 1 の End-to-End の通信遅延の変化の様子を示す。SPF アルゴリズムを用いた場合、輻輳が激しくなったために大量のパケット損失が発生していることがわかる。それに対して QQRA では決定論的・確率論的の両方とも、全体的な通信遅延とジッタが増大していることが確認できるが、パケットの損失は発生していない。

決定論的経路選択と確率論的経路選択の結果に注目した場合、Fig. 3 (b)(c)、Fig. 4 (b)(c) が示す通り、平均通信遅延は確率論的経路選択の方が優れていることがわかる。また、ジッタの大きさも確率論的経路選択の方が抑えられている。決定論的経路選択では、次の経路更新が行われるまでは一つの経路を使いつづける。それに対して確率論的経

(a) SPF algorithm

(b) QQRA deterministic mode

(c) QQRA probabilistic mode

Fig. 4. Communication delay of Flow ID 1 (Total Input Rate: 5.0 [Mbps])

路選択ではパケットごとに経路を切り替える。そのためパケットが各経路に分散し、リンクの送信キューにたまるパケット数が少なくなることから、経路中の各ノードにおける送信待ち時間が減少したと推測される。しかしながら、経路の切り替えはリンクの負荷の違いによるキューイング遅延の変動につながるため、それに伴うジッタの発生を抑制することは困難である。Fig. 3 と Fig. 4 を比較すると、流入するトラフィックの量が大きくなったときに、ジッタが顕著に現れることがわかる。

〈5・3〉コスト制約 次にフローを送信する際に使用する経路のコストについて評価を行う。Fig. 5 と Fig. 6 はそれぞれ総入力レートが 4.0 [Mbps], 5.0 [Mbps] における Flow ID 1 の配送に用いた経路のコスト変動を示している。これらの図から分かる通り、コスト制約条件である 5 以下のコストメトリックを持つ経路を常に選択していることが分かる。ここで Fig. 5 (b)、および Fig. 6 (b) が示している、確率論的経路選択を用いた場合の結果に注目する。決定論的経路選択と異なり、確率論的経路選択を用いた場合は Q 値が最小でない経路に対応するネクストホップを選択する可能性がある。そのため配送経路中にループが発生するこ

(a) QQRA deterministic mode

(b) QQRA probabilistic mode

Fig. 5. Cost of route for Flow ID 1 (Total Input Rate: 4.0 [Mbps])

(a) QQRA deterministic mode

(b) QQRA probabilistic mode

Fig. 6. Cost of route for Flow ID 1 (Total Input Rate: 5.0 [Mbps])

とがありうる。しかし Fig. 2 よりノード S_1 と D_1 の間の最小コストは 4 である。もし Flow ID 1 のパケットが通過した経路にループが存在するならば、その経路のコストは 6 以上となる。このため、コスト制約条件を満たすことは配送経路中にループが発生しないことと等価である。したがってこの結果は、確率論的経路選択を用いた場合でも配送ループが発生していないことを示す。

6. まとめ

本稿では、コストと通信遅延という 2 つのメトリックに関する QoS 制約条件を満たす経路を発見するための QoS ルーティングアルゴリズム QQRA を提案し、有効性の検証を行った。その結果、QQRA では複数のメトリックに基づく報酬を元に Q-Learning による学習を行うことで、通信遅延の変動の検出と QoS 制約条件を満たす別の経路への切り替えが可能であることがわかった。さらに確率論的経路選択により、QoS 制約条件を満たす複数の経路にトラフィックを分配できることも示した。これを IntServ⁽¹⁶⁾ と連動させることによって、フローごとに独立した経路を割り当てると、より柔軟な QoS 制御が行えることが期待できる。

今後の課題としては、経路切り替えによって発生するジッタを小さくすることが挙げられる。原理上ジッタの発生を完全に抑制することはできないが、フローごとに経路を割り当てたり、経路ごとのトラフィックの分配率を制御することでジッタを小さくできると考えられる。また、規模の大きいネットワークにおいて最大コスト制約に比べて End-to-End の経路の最小コストがとても小さい場合、確率論的経路選択を用いても配送ループが発生しないのかどうかの検証が必要である。もし確率論的経路選択において配送ループが発生する場合、学習アルゴリズムの調整を行う以外にも経路選択の際に IP ヘッダのタイムスタンプオプション⁽¹⁵⁾、あるいは遅延制約などを記述するための独自のオプションを導入し、これらを利用して配送ループの排除を行うことも視野に入れる必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたって多大なるご支援を賜りました、日本コムシス（株）の棟方雅之氏に深く感謝いたします。
(平成 21 年 10 月 22 日受付, 平成 22 年 3 月 17 日再受付)

文 献

- (1) A. Parekh and R. Gallager: "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks - the Single Node Case", *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.1, No.3, pp.344-357 (1993)
- (2) 戸田 巖:「詳解 ネットワーク QoS 技術」, pp.16-65, 103-119, 178-237, オーム社 (2001)
- (3) S. Chen and K. Nahrstedt: "An Overview of Quality-of-Service Routing for the Next Generation High-Speed Networks: Problems and Solutions", *IEEE Network Special Issue on Transmission and Distribution of Digital Video*, Vol.12, No.6, pp.64-79 (1998)
- (4) Leland et al: "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)", *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.2, No.1, pp.1-15 (1994)
- (5) S. Chen and K. Nahrstedt: "Distributed QoS Routing", Technical report, Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign (1997)
- (6) C. Peng: "Optimization Algorithms for Fault-tolerant and QoS Routing in Networks", PhD Thesis in School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology (2006)
- (7) C.J.C.H. Watkins and P. Dayan: "Technical Note Q-

- Learning”, Machine Learning, Vol.8, pp.279–292 (1992)
- (8) F. Qian and H. Hirata: “A New Distributed QoS Routing Algorithm using Mean Field Approximation Method”, *IEEE Trans. Electronics, Information and Systems*, Vol.127, No.1, pp.59–67 (2007-1) (In Japanese)
銭飛・平田廣則:「平均場近似計算法を用いた分散型 QoS ルーティングアルゴリズム」, 電学論 C, **127**, 1, pp.59–67 (2007-1)
- (9) J. Moy: “OSPF version 2”, STD 54, RFC 2178 (1998)
- (10) R.S. Sutton and A.G. Barto: “Reinforcement Learning: An Introduction”, The MIT Press (1998) (in Japanese)
水上貞芳・皆川雅章 共訳:「強化学習」, 森北出版 (2000)
- (11) M.L. Littman and J.A. Boyan: “A Distributed Reinforcement Learning Scheme for Network Routing”, Technical Report CMU-CS-93-165, Carnegie Mellon (1993)
- (12) S.P.M. Choi and D.Y. Yeung: “Predictive Q-Routing: A Memory-Based Reinforcement Learning Approach to Adaptive Traffic Control”, In *Advances in Neural Information Processing Systems* 8, pp.945–951 (1995)
- (13) S. Kumar and R. Miikkulainen: “Confidence-Based Q-Routing: An On-line Adaptive Network Routing Algorithm”, In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.758–763 (1999)
- (14) “The Network Simulator — ns-2”, VINT project.
- (15) John Postel (ed.): “Internet Protocol” STD 5, RFC 791 (1981)
- (16) B. Braden, D. Clark, and S. Shenker: “Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview”, RFC 1633 (1994)

鵜 根 弘 行 (正員) 1995 年広島大学大学院工学研究科博士課程前期情報工学専攻修了。同年広島国際学院大学

工学部メディア情報通信学科(旧称広島電機大学電子工学科)助手に着任。その後 2003 年同講師, 2004 年同情報学部情報デザイン学科講師, 2006 年 4 月千葉大学大学院自然科学研究科人工システム科学専攻博士課程後期に在職のまま入学, 2008 年広島国際学院大学情報デザイン学部情報デザイン学科講師となり, 現在に至る。コンピュータネットワークなどの並列分散システムに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。

銭 飛 (正員) 1991 年千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了。同年広島国際学院大学電子工学科講師, 1995 年同情報工学科助教授, 2000 年同教授, 2004 年関東学院大学工学部電気電子情報工学科教授となり現在に至る。Ph.D.。学習オートマトンの基本理論, 大規模システムのモデリング, 解析, およびコンピュータネットワーク, ニューロコンピュータなどの分散システムの基礎理論の研究に従事。IEEE, 情報処理学会, 計測自動制御学会, 電子情報通信学会各会員。

平 田 廣 則 (上級会員) 1976 年東京工業大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年千葉大学工学部助手, 1981 年同助教授, 1994 年同教授, 1997 年同大学院自然科学研究科教授, 2007 年同大学院工学研究科教授となり現在に至る。大規模システムのモデリング, 解析と設計, 特に生態システム, などに興味を持つ。工学博士。2001 年電気学会業績賞受賞。IEEE (Fellow), INNS, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 人工知能学会, 日本数理生物学会各会員。