

適応型リアルタイムプランニングを用いた状態依存型 ダイナミックルーティングに関する検討

横田 英俊 松本 一則 橋本 和夫 浅見 徹

国際電信電話株式会社 研究所

〒356 埼玉県上福岡市大原 2-1-15

あ ら ま し 通信網におけるトラヒックの円滑な疎通と網資源の効率的な活用という面から、網の状態を実時間で監視し、トラヒックの経路や量を制御する状態依存型のダイナミックルーティング(SDDR)の有効性が認識されている。これに加えて、網の運用者によるより知的な制御を行なうことにより、さらにサービス品質を向上させることが期待できる。SDDRにおいて、迂回可能なルートは一般に複数あり、そのルートの容量や現在の呼量に依存して最適な迂回ルートが決定される。そして迂回ルートの選択アルゴリズムにかかわらず、輻輳しているルートが多くなれば、それらに対する全ての迂回ルートが選択されるまでの時間も増大する。しかし網のサービス品質を維持するためには実時間で全ノードの回線の利用状況を監視し、迂回ルートを選択しなければならないため、急激なトラヒック変動に対して網のトラヒック品質を維持するためには、その処理に対して常に時間的な制約を考慮しなければならない。そこで我々は、このように実時間性が要求される迂回ルート選択に関わる処理をリアルタイムプランニングととらえ、網の状態に適応してプランニング形態を制御し、実時間性を保持する適応型のリアルタイムプランニングを提案する。本稿ではまず、適応型リアルタイムプランニングの概念について明らかにし、これに基づく手法をSDDRに適用した場合の有効性に関する評価を行なった。その結果、網の状態変化に対して、応答時間を一定に保持し、非適応型の場合に比べて高いトラヒック品質を維持するのに有効な手法であることが確かめられた。これにより、時間的に負荷が大きく変動する系に対して柔軟に対応することができ、より知的で複雑な制御を組み込むうえで有効な技術となると考えられる。

和文キーワード 適応制御、リアルタイムプランニング、ダイナミックルーティング

Study on State-Dependent Dynamic Routing Using Adaptive Real-time Planning

Hidetoshi YOKOTA Kazunori MATSUMOTO Kazuo HASHIMOTO
Tohru ASAMI

KDD R&D Laboratories

2-1-15 Ohara Kamihukuoka-shi, Saitama 356, Japan

Abstract From the viewpoint of the efficient utilization of the resources of the telecommunication network, State-Dependent Dynamic Routing (SDDR) has been recognized to be significantly useful. SDDR is a method of controlling a network using its real-time status. In addition, it is expected to control the network more efficiently with intelligent operations by network operators. When using SDDR, the number of candidates of the alternate routes for one direct route is generally large, and the optimal one is decided according to their capacities and the current traffic on them. And in spite of the algorithms of their selection, the more congested routes are, the longer time it takes to determine the whole selections of alternate routes. But to maintain the quality of the network, the status of the network must be observed in real-time, and the time for the determination of alternate routes must be limited. We propose an adaptive network control method according to the status to maintain the quality of the network. First, we clarify the concept of the adaptive real-time planning. Secondly, we evaluate the efficiency of SDDR using this planning method.

英文 key words adaptive control, real-time planning, dynamic routing

1. はじめに

通信網の大規模化、多機能化に伴い、そのトラフィックの円滑な疎通と網資源の効率的な活用がますます重要視されている。通信網障害時や社会的イベントなどによるトラフィック急増等の異常が発生した場合でも、可能な限りのトラフィック疎通を維持、確保していかなければならない。このためには伝送路、および通信機器の二重化などによって危険分散を図るほか、網の異常に際しては、ルーティング変更、回線切替えなどによる網資源の弾力的活用という措置をとることが、柔軟性、即応性の面から有効である。特に、呼の接続経路を変更するルーティング制御に関しては、網の実時間状態をもとに制御される状態依存型のダイナミックルーティング(State-Dependent Dynamic Routing:SDDR)の有効性が認識されており¹⁾、網の運用者が行なうような知的な制御を付加することにより、さらにサービス品質を向上させることが期待できる。

SDDRでは迂回ルートを決断するために、他のルートの空き回線情報を収集する必要があるため、同時に輻輳しているルートが多ければそれらに対する全ての迂回ルートが決定されるまでの時間も増大する。しかし一方で網のサービス品質を維持するためには、迂回ルート選択を実時間で行なわなければならないという時間的な制約を受ける。

本稿では、このようなルート選択に関わる処理をリアルタイムプランニングとしてとらえ、網の状態に適応してプランニング形態を制御し、実時間性を保持する適応型のリアルタイムプランニングを提案する。まずはじめに、SDDRの概要とその問題点について述べ、その問題点を解決するための一手法として適応型リアルタイムプランニングの概念について示す。さらに、これに基づく手法をSDDRに適用した場合の有効性に関して、評価および考察を行なう。

2. 状態依存型ダイナミックルーティングの概要およびその問題点

2.1 状態依存型ダイナミックルーティング(SDDR)の概要

トラフィックは、時間帯や網の障害により、局所的に集中することが頻繁に起こる。このような場合、この接続要求に対して、輻輳しているルートから比較的空き回線の多いルートを通して接続することにより、より疎通率(完了率)を高めることが可能になる。このような制御をダイナミックルーティングと呼ぶ。このうち、時間帯によって

周期的に変動するトラフィックに関してはあらかじめ統計的手法によりトラフィック量を解析し、計画的に迂回ルートを設定しておくことができる。しかし、網の障害など突発的に起こるトラフィックの輻輳に対しては、このような固定的な迂回ルート設定では対応できない。そこで、網の状態を実時間で監視し、その時点で最適な迂回ルートを経由させながら疎通率を維持することが必要となる。前者のように時間により計画的に迂回ルートを設定する方式を時間依存型のダイナミックルーティングと呼ぶのに対して、後者のようにその時点で網の状態に応じて迂回ルートを選択する方式を状態依存型のダイナミックルーティングと呼ぶ。

2.2 SDDRを実現する上での問題点

状態依存型ルーティングの最も簡単な形態は、空き回線が最も多いルートを利用するという方式である。このためには、各ルートの回線の空き状態を常に監視しなければならない。網の規模が大きくなるにつれて、迂回ルートの選択に非常に時間がかかるようになる。また障害の形態、トラフィック変動による迂回ルート選択の高度な判断など、自動化が困難な部分もある。

SDDRにおいて、迂回ルートの選択の仕方は一般に複数あり、そのルートの容量や現在の呼量に依存して決定される。しかし迂回ルートの選択アルゴリズムにかかわらず、輻輳しているルートが多ければ、それらに対する全ての迂回ルートのプランニング結果が出力されるまでの時間も増大する。通常迂回ルート選択に関しては、何らかのヒューリスティックな手法を用いることにより、実時間で動作するように設計する。また、深刻な障害に対しては網の運用者により最終的に制御される。このようなヒューリスティックな選択手法や、網運用者の知的な処理を自動化させることは、より柔軟で即応的な網運用にとって重要なことであるが、一方で、実時間性という要求も同時に満たさなければならない。高度な知識を組み込むにつれて実時間性に対する要求を満足することが困難になる。加えて、このような処理はトラフィックの変動に大きく左右される。すなわち、トラフィック量が大きくなるにつれて処理量も増大し、輻輳時にはかえって網の性能を低下させる原因にもなってしまう。したがって、トラフィックの変動に対しても、実時間性を維持できるよう、柔軟な処理が行える機構がなくてはならない。

我々はこのように実時間でルート決定を行なう処理をリアルタイムプランニングととらえ、実時間性を維持するた

めに適応型のリアルタイムプランニングを提案する。そして、これを SDDR に適用した場合の評価および考察を行なう。

3. 適応型リアルタイムプランニングの提案

適応型リアルタイムプランニングとは、与えられた応答時間の制約に応じて、プランニング対象の挙動記述の詳細度を動的に変化させることにより、その制約を満たそうとする手法である。以下に挙動記述の詳細度の分類と、それを用いて適応型リアルタイムプランニングを実現する一手法について示す。

3.1 挙動記述の詳細度

状態の変化に適応して応答時間を一定に保持する手法として、大きく分けて以下の3種類の詳細度 (granularity) とのトレードオフとして実現する^[2]。

(1) 時間的詳細度 (temporal granularity)

状態情報を収集する周期を変更することなどにより実現される。

(2) 空間的詳細度 (spacial granularity)

制御対象をクラスタリングすることなどにより実現される。

(3) 計算量的詳細度 (computational granularity)

プランニング結果と最適解との距離をどの程度まで許容するかにより実現される。

これらの詳細度のいずれか、またはいくつかを組み合わせ利用する。

3.2 性能プロファイル

適応型のリアルタイムプランニングを実現するために、プランニングに要する応答時間をあらかじめ予測し、選択実行を可能とする、性能プロファイルを用いた手法を提案する。3.1に示した挙動記述の詳細度に着目した時の応答時間の特性を性能プロファイルとし、それをそのシステムの性能を表す基準とする。プランニングを行なう時には、この性能プロファイルをもとに、要求された応答時間を満たすようなプランニングを選択しながら処理を進める。

4. 適応型リアルタイムプランニングの SDDR への適用

トラフィックの疎通率を向上し、網資源を効率的に活用するためには、より知的な処理を付加した高機能なトラフィック制御が必要となるので、この制御にかかる処理量と網品質の関係を評価する必要がある。そこで本稿では 3.1 (3) の計算量的詳細度の面から適応型リアルタイムプランニングによる SDDR を検討する。

4.1 SDDR の制御方式について

また SDDR の制御方式としては、網情報を集中管理し、制御を行なう集中制御方式と、部分的な網情報により数箇所まで制御を行なう分散制御方式がある^[3]。集中制御方式の方が網全体の網情報を利用でき、分散制御方式に比べてより最適な制御が可能となるが、網情報の量、処理すべき溢れルートの数などが分散制御方式に比べて大きくなる。トラフィックが急増するなどして、処理時間があまりに大きくなる場合には、かえって網の性能を低下させることになる^[4]。よって SDDR を用いて網品質を向上させるためには集中制御方式を用いる方が有利であるが、同時にある時間内に全ての溢れルートの処理を終了させなければならないという制約条件が必要となる。本稿ではこれを迂回ルート選択のプランニングに対する制約時間とし、集中制御方式を用いた場合にこの制約時間を考慮しながらプランニングを行なう一手法について以下に示す。

4.2 迂回ルート選択、溢れ呼割当のアルゴリズム

迂回ルート選択、および溢れ呼の割り当てに関するヒューリスティックな解法として、Greedy Algorithm に基づく積み上げ法^{[4],[5]}を利用する。この手法は、各ノード間の要求呼量を直通ルートに割り当てた後、溢れ呼があるルートを検出し、そのうち溢れ呼量が最大のものから順に迂回させるものである。迂回ルートの候補としては、最も回線に余裕のあるルートに割り当てていく、最小負荷経路選択 (LLPR)^[6]を基本とする。また、迂回のための中継ノードの数は1つ以上とすることも考えられるが、それだけ網の資源を使うことになり、輻輳時には網品質の低下につながる^[4]。よって、選択する迂回ルートの中継ノードの数は1とする。以下に迂回ルート選択、溢れ呼割当の具体的なアルゴリズムについて示す。

(1) [溢れ呼の検出]

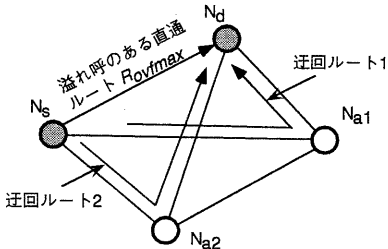
計算量的詳細度にもとづく適応型のリアルタイムプランニングを行なうために、呼が溢れているかどうかを判断する境界値 L を挙動記述の詳細度とする。あるルートに対する溢れ呼量を OF 、要求呼量を D 、現在利用可能な回線の容量を C とするとき、

$$OF = \max(0, D - C) \quad (1)$$

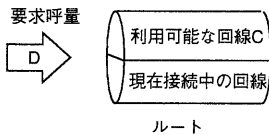
と定義し、溢れ呼が存在する場合には、 OF と L の比較により迂回ルートの探索を行なうノードの集合 N に登録する。すなわち、 $OF > 0$ のもとで、

$$\begin{cases} \text{if } OF \geq L \text{ then 集合 } N \text{ に登録する} \\ \text{if } OF < L \text{ then 溢れ呼を呼損とする} \end{cases} \quad (2)$$

とする。集合 N の中で溢れ呼量 OF が最も大きいルート (R_{ovfmax} とする) から、迂回ルートに溢れ呼を割り当てていく。



(a) 迂回ルートの候補例



(b) 溢れルートの決定

図1 迂回中継の概念図

(2) [迂回ルートの選択]

ノード n_1, n_2, \dots, n_k を経由するルートを $n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow \dots \rightarrow n_k$ と表記し、各量の添字に用いる。ノード N_1 から N_2 へのルートに対する要求呼量を $D_{N_1 \rightarrow N_2}$ 、現在利用可能な回線の容量を $C_{N_1 \rightarrow N_2}$ とするとき、迂回可能ルートのうち回線に空きがあるルートを余裕ルートとすると、そのルートの余裕呼量 $M_{N_1 \rightarrow N_2}$ を、

$$M_{N_1 \rightarrow N_2} = \max(0, C_{N_1 \rightarrow N_2} - D_{N_1 \rightarrow N_2}) \quad (3)$$

と定義する。図1より、溢れルート R_{ovfmax} の発信ノードを N_s 、着信ノードを N_d とすると、迂回ルートの

候補は図1の N_{a1}, N_{a2}, \dots のように複数存在する。そこで中継ノード N_{an} を経由する迂回ルートの余裕呼量 $M_{N_s \rightarrow N_{an} \rightarrow N_d}$ を、

$$M_{N_s \rightarrow N_{an} \rightarrow N_d} = \min(M_{N_s \rightarrow N_{an}}, M_{N_{an} \rightarrow N_d}) \quad (4)$$

と定め、複数の迂回ルートの候補の中からLLPRに基づき、余裕呼量 M が最大のルートを迂回ルートとして選択する。積み上げ法では迂回候補の数は1以上とすることを可能としているが、ここでは余裕呼量が最大のルートのみを候補とする。

(3) [溢れ呼の割り当て]

選択された迂回ルートの中継ノードを N_{an} とすると、溢れ呼を迂回ルートの空き回線に割り当てる手順は L を単位とし以下に行なう。

$$\begin{cases} \text{if } L \leq M_{N_s \rightarrow N_{an} \rightarrow N_d} \text{ then 迂回ルートに呼量 } L \text{ だけ溢れ呼を割り当てる} \\ \text{if } L > M_{N_s \rightarrow N_{an} \rightarrow N_d} \text{ then 溢れ呼を呼損とする} \end{cases} \quad (5)$$

(1)~(3)の操作を、溢れ呼がなくなるか、これ以上割り当てることができなくなるまで繰り返す。

上記の一連の操作を図2に示す。前提条件として、これらの操作の間に発生する新たな呼接続要求に関しては、これらの操作が終了した段階で行ない、集合 N はその影響を受けないものとする。

L は溢れ呼検出の境界値、および迂回ルートへの溢れ呼の割り当ての単位となることから、 L が小さいほどきめ細かい割当を行なうことができる。一方、上記の操作を多く繰り返すことになり、溢れ呼の割り当てが終了するまでの時間が大きくなる。逆に、 L が大きいほど大まかに割り当てることができ、上記の操作の繰り返し回数は減少するが、 L 以下の溢れ呼は呼損となるため、最適な割り当てにはならなくなる。上記より L は呼量割り当てに関する、計算量的詳細度として機能する。

4.3 性能プロファイルの作成

まず、適応型リアルタイムプランニングを行なうために、SDDRを実現する環境、対象となるネットワークのもとの性能プロファイルを作成する。具体的には様々な L の値に対する、溢れ呼量の合計と、全ての溢れルートに対する迂回ルートの探索および溢れ呼割り当てが終了するまでの時間(以後これを応答時間と呼ぶ)の関係をあらかじめ算出し、これを性能プロファイルとする。実行時には、

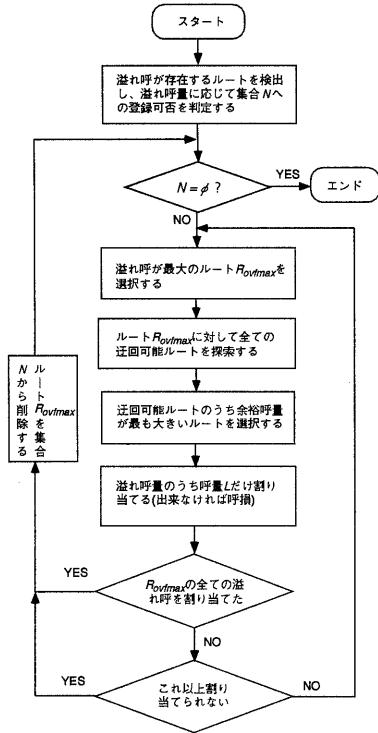


図2 溢れ呼割り当てアルゴリズムのフローチャート

収集された状態情報より得られる溢れ呼量から、要求されている応答時間に適した L を性能プロファイルより算出しプランニングを開始する。

[性能プロファイルの作成法]

表1に示す評価環境のもとで、 L の値をパラメータとした時の溢れ呼と応答時間の関係(性能プロファイル)を図3に、溢れ呼量と平均完了率の関係を図4に示す。網はノード数が20個の完全網状網(一つのノードから他の全てのノードに対して直通ルートを持つ網)、一つのルートの回線容量はどれも30回線(割り当て時には全て利用可能であるとする)とし、ルート間の呼量は5~48erlの範囲で一様に分布するものとする。溢れ呼量は1ノード当たりの平均溢れ呼量とする。また、4.2で述べたように、迂回ルートの中継ノードはひとつとする。

L が小さいほど詳細度は大きくなり、図3より応答時間が大きくなっているのが分かる。また図4より L が小さいほど平均完了率が大きくなっており、より最適に近いことが分かる。これにより図3をもとに、要求された応答時間の制約を満たすような L を算出しプランニングの詳細度を変化させることで、制約時間内にプランニングを終了さ

せることが可能となる。

評価環境	使用計算機	SunSPARC690MP
	アルゴリズム実装用の言語	OPS83 ^[7]
ネットワーク	網形状	20局完全網状網
モデル	回線容量	一様30回線

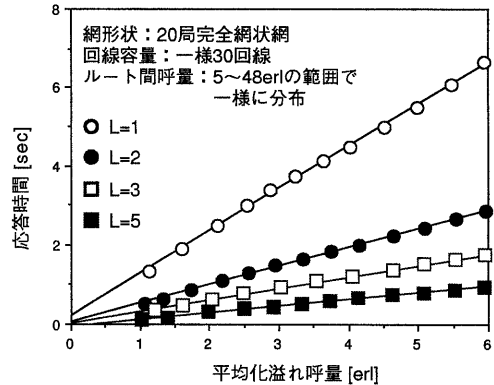


図3 平均溢れ呼量と応答時間の関係の基本特性(性能プロファイル)

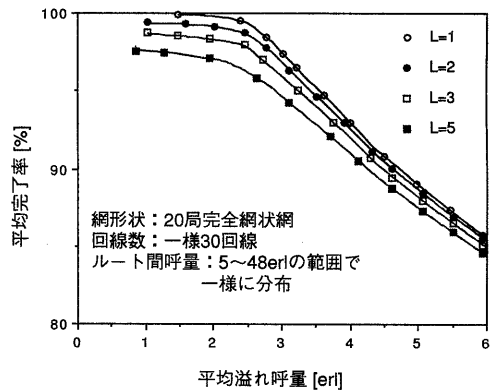


図4 平均溢れ呼量と平均完了率の関係の基本特性

5. 適応型リアルタイムプランニングをSDDRに適用した時の有効性の評価

適応型リアルタイムプランニングをSDDRに適用した場合の有効性についてシミュレーションにより評価した。まず溢れ呼の変動に対する応答時間の特性について、適応型リアルタイムプランニングを用いた場合のSDDR(適応型SDDR)と、用いない場合のSDDR(非適応型SDDR)について比較評価を行った。さらに両者共に応答時間の制約を持たせた場合のSDDRの効果の評価するために、過負

荷にトラヒックを発生させた場合のトラヒック品質の比較を行なった。評価環境は表1と同様とし、トラヒック品質の評価尺度は平均完了率を用いた⁵⁾。

5.1 溢れ呼の変動に対する評価

要求される応答時間の上限値を 1.5[sec]、ルート間の呼量は 5~48erl の範囲で一様に分布するものとする。この条件のもとで、溢れ呼の平均を時間的に変化させたときの適応型 SDDR と非適応型 SDDR ($L = 1$ で固定する) の応答時間を図5に示す。非適応型 SDDR における応答時間の平均は 2.33[sec]、適応型の時の場合は 0.714[sec] となった。また同様な条件での平均完了率の比較を図6に示す。非適応型 SDDR における平均完了率の平均は 97.0%、適応型 SDDR の場合は 96.3% となった。

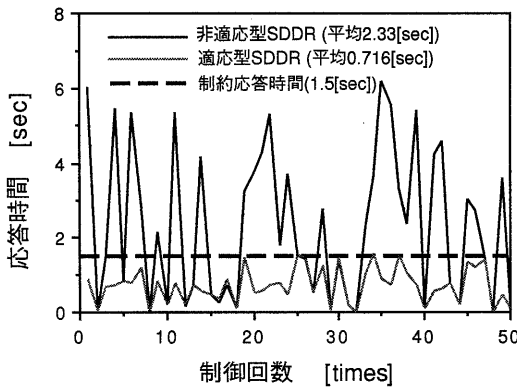


図5 溢れ呼量の変動と応答時間の関係(応答時間の制約=1.5[sec])

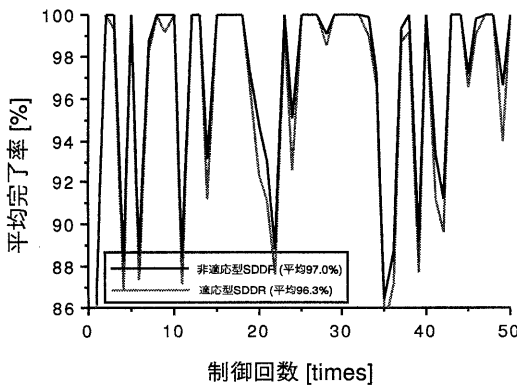


図6 溢れ呼量の変動と平均完了率の関係(応答時間の制約=1.5[sec])

5.2 過負荷時のトラヒック品質に対する評価

非適応型の SDDR において応答時間の制約を満たす簡単なアルゴリズムとして以下の手法を考える。

- (1) 迂回ルート選択のためのプランニングが制約時間内に終了した場合はそのプランニング結果を利用して溢れ呼を迂回させる。
- (2) もしプランニングが制約時間内に終了しなければ、ただちにプランニングを中止し、迂回ルートの利用は行なわない。

この非適応型 SDDR による簡易な手法と、今回提案した適応型 SDDR とのトラヒック品質の比較を行なう。非適応型 SDDR については境界値 L を一定値 1 に固定する。各ノードに発生する呼はポアソン分布 (平均生起率 λ) に従うものとし、保留時間は指数分布 (平均保留時間 h) に従うものとする。性能プロファイルは図3を用いる。回線数を S 、生起呼量を $a (= \lambda h)$ としたときに、利用率 η を、

$$\eta = a/S \quad (6)$$

と定義する。この利用率と平均完了率の関係を図7に示す。但し評価環境は表1を用い、利用率については各呼の平均保留時間 h を一定値 10[sec] として、平均生起率 λ を変化させた。また、制約応答時間は 1.5[sec] とした。

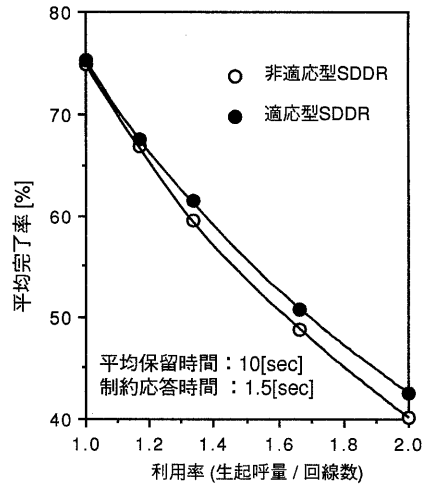


図7 利用率と平均完了率の関係

6. 評価結果および考察

6.1 溢れ呼の時間変動に対する評価について

図6より、適応型 SDDR を行なった場合の方が平均完了率の劣化が見られるが、一方図5より、溢れ呼の呼量の変化に対して応答時間の変動が小さくなっており、要求された応答時間の制約を満たしていることが分かる。すわな

ち境界値 L を動的に変化させることで、応答時間を一定に保持する効果があることが確かめられた。これにより網の瞬間的な輻輳の増大に対しても実時間性を保ちながら制御することが可能となる。

今回利用した性能プロファイルは $L = 1 \sim 5$ までの範囲で作成されたものなので、応答時間の制約がかなり小さい場合については、 $L = 5$ のみが採用されることになり適応型 SDDR の効果が減少するものと思われる。この場合には必要に応じて $L > 5$ の性能プロファイルを作成すればよい。適応型リアルタイムプランニングを有効に動作させるためには、実際の利用環境の適用範囲に合わせて性能プロファイルを作成することが重要となる。

6.2 過負荷時のトラヒック品質に対する評価について

応答時間の制約を満たす手法として、非適応型 SDDR による簡易な手法を用いた場合に比べて、適応型 SDDR を用いた場合の方が平均完了率が高いことが確かめられた。また、この傾向は利用率が高いほど顕著である。

6.3 性能プロファイルについて

今回示した評価実験では溢れ呼量と応答時間の関係がほぼ線形となったが、性能プロファイルの作成については、特性の複雑さ（例えば非線形的な特性を持つもの）には依存しないので汎用性が高く、かつシステム内部の詳細に立ち入る必要もないため、実現が容易であるという利点がある。

本稿で示した手法は適応型リアルタイムプランニングの一手法であり、他のアプローチ手法も考えられる。今後、様々な問題に適用できる包括的な手法についても検討する必要がある。

7. おわりに

本稿では通信網におけるトラヒックの円滑な疎通と網資源の効率的な活用という面から、状態依存型のダイナミックルーティング (SDDR) に着目し、網品質を低下させる原因となる迂回ルート選択にかかる時間の変動を抑える手法として、適応型のリアルタイムプランニングを提案し、性能プロファイルを利用した一方式を示した。適応型リアルタイムプランニングを SDDR に適用する際の挙動記述の詳細度として、本稿では特に計算量的詳細度の面から検討を行ない、その具体的な制御手法について示した。

評価実験の結果、本提案手法は、トラヒックの変動に対

して迂回ルート選択および溢れ呼割り当てにおけるプランニングの応答時間を一定に保持するのに有効であることが確かめられた。特にプランニングの応答時間の制約のもとで、適応型の SDDR と非適応型の SDDR を比較した場合、前者の方が過負荷時の平均完了率が高いことが確かめられた。これらの結果より SDDR に対して、本稿で提案する適応型リアルタイムプランニングを適用することで、時間的に大きくトラヒックが変動する網に対して柔軟に対応することができ、より知的で複雑な制御を組み込む上で有効な技術となると考えられる。

日頃御指導頂く KDD 研究所浦野頼義所長、眞家健次次長に感謝します。

参考文献

- [1] 山本、間瀬、井上、須山：“ダイナミックルーティング (STR) の方式構成と考え方”、NTT R& D, Vol.41, No.6, pp.687-695 (1992).
- [2] 横田、松本、橋本、浅見：“状態依存型ダイナミックルーティングにおける適応型リアルタイムプランニングに関する一検討”、1993 信学秋季全大、6-127、(1993).
- [3] B.R.Hurley, C.J.R.Seidl, W.F.Sewell: “A Survey of Dynamic Routing Methods for Circuit-Switched Traffic”, IEEE Commun. Mag., Vol.25, No.9, pp.13-21 (1987).
- [4] 伊藤、井上：“ダイナミックルーティングのための迂回候補群作成法”、信学論 B-I, Vol. J75-B-I, No.5, pp.323-332 (1992).
- [5] 伊藤、井上：“電話網における迂回路候補群作成アルゴリズム”、信学技報、IN89-117, pp.25-30 (1990).
- [6] G.R.Ash: “Use of Trunk Status Map for Real-Time DNHR”, ITC11, 4-4a-4, 1985.
- [7] C.L.Forgy: OPS83 Reference Manual, Technical Report, Department of Computer Science, Carnegie Mellon University (1984).