

動的ネットワークにおける最適経路及びサーバサービスの 選択とシームレスな切替方法

高杉 耕一 中村元紀 久保田 稔 小柳恵一

日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所

〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

E-Mail: {takasugi, motonori}@ma.onlab.ntt.co.jp, kubota.minoru@lab.ntt.co.jp,
keiichi.koyanagi@ieee.org

筆者らはネットワークトポロジが動的に変化するネットワークにおいて、シームレスに端末、通信媒体を切替え、通信セッションを継続することが可能なシームレスプロキシで構成されるネットワークを提案してきた。本稿ではこのシームレスプロキシネットワーク上で最適なシームレスプロキシ間の経路と接続先サービスをコストや優先度情報に基づき評価、選択する方法について提案する。これにより、ネットワークトポロジが動的に変化した場合でも、サーバサービス、ネットワーク、クライアントサービスの3者の要求を評価し、経路と接続するサーバサービスを決定できる。この際、ユーザはネットワークトポロジの変化を意識することなく、最適な経路やサーバサービスにシームレスに移行することが可能となる。

Seamless Change to the Optimum Route and the Server Service in a Dynamic Network

Koichi TAKASUGI, Motonori NAKAMURA, Minoru KUBOTA, Keiichi KOYANAGI

NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation

3-9-11 Midori-Cho, Musahino-shi, Tokyo 180-8585, Japan

We have proposed the seamless network formed with the seamless proxies which is possible to continue communication session, even if the change of the terminal and communication medium is occurred in the dynamic network. This paper proposed the method to select the connecting server service and the optimized route between seamless proxies. Using this method, optimum route and connection server service, which satisfies the requests of server service, network and client service are automatically decided even if network topology changes dynamically. Therefore, it becomes possible to move to more optimum route and server service seamlessly without being conscious of the change of network.

1. はじめに

将来のコピキタスネットワーク環境ではいたるところに端末が配置され、それらが動的にネットワークを構築していくことが期待されている。動的なネットワークは端末やネットワークの自由度を高めることができる反面、静的なネットワークを前提とした従来の技術をそのまま適用した場合、端末間の通信環境は不安定で断続的なものとなる。例えば、無線リンクは基地局との距離や端末間距離が離れると切断されるし、端末が移動したり、通信媒体を切り替えたりする場合、サービスは継続困難である。また、孤立したネットワークが発生する可能性もある。

他方、ユーザの視点から考えると、単に端末のネットワークへの接続性が維持されていればよいわけではなく、ネットワークの状況が変化しても同じサービスを適切な端末リソース、ネットワークリソースで連続的に提供し、享受できることが重要である。つまり、ユーザにとっては接続性の確保されたある特定の端

末を利用しつづけるより、環境の変化に伴い適切なりソースを適宜選択しながら、同一サービスを連続的に享受するほうが重要である。すなわち、端末の接続性はサービス連続性の実現手段の一部とみることができ。

そこで我々は、端末そのものの接続性を確保するノードの移動性[1]と端末を変更してもサービスが連続するサービスの移動性を実現し、シームレスにサービスを連続させる技術[2][3]の研究を進めてきた。この技術はアプリケーション間のデータを中継し、サービスの連続性を保つシームレスプロキシ(S-proxy)で構成されるトランスポート層上位のオーバーレイネットワークで実現される。

また、これまでの多くの研究ではクライアントのアプリケーション(AP)が動作するノードが移動環境におかれることを想定してきた。しかしながら、コピキタスネットワーク環境ではセンサや移動ノードからのコンテンツ配信サービスなど、サーバノードが不安定な通信環境にさらされることも、十分に考えられる。そこで、サービスを提供するサーバノードに注目し、

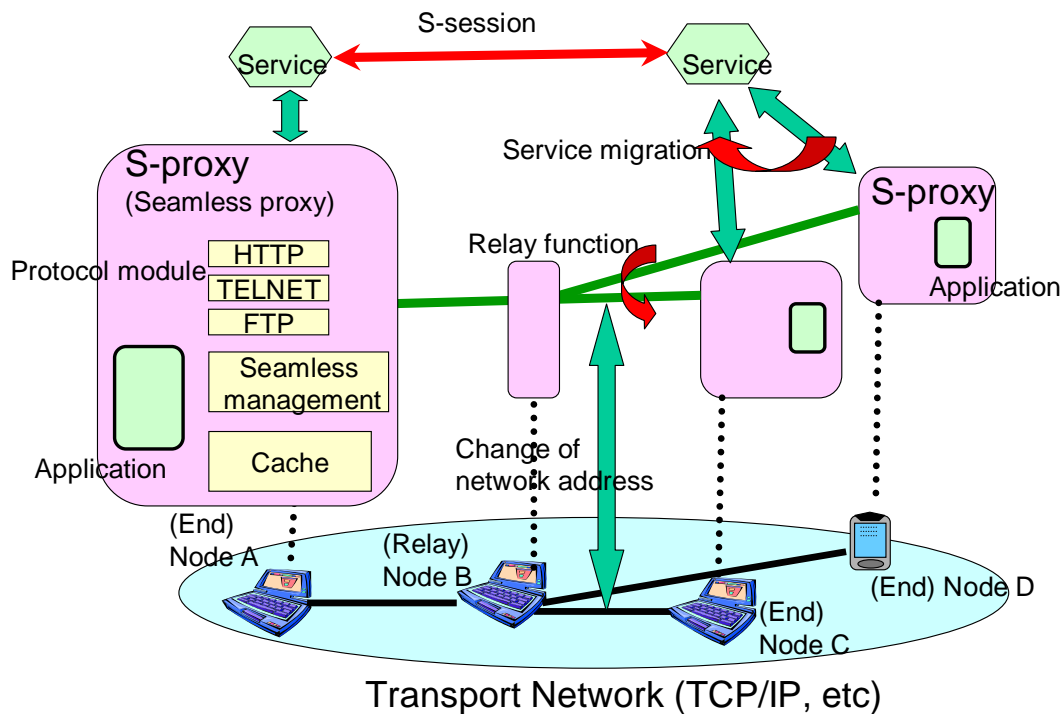


図1 シームレスプロキシネットワークモデル

同一サービスを行うのに必要なデータの複製をネットワーク内に分散させ、同一サービスを提供可能なサーバノードをサービス提供中に変更することで、シームレスかつ安定的にサービスを提供する仕組みを提案してきた[4]。

しかながら、これまでの検討ではS-proxy間の経路は静的に構築され、また、ノードの移動、サービスの移動が発生した場合、複数の選択肢を評価し経路を決定する方法については十分検討してこなかった。そのため、ユーザは設定ファイルに静的に組み合わせを記述したり、コマンドにより直接指定したりする必要があった。そこで、ネットワークのトポロジが動的に変化した場合においても、S-proxyの経路と接続先サーバサービスを動的に発見する技術が必要となる。

経路を決定する技術に関してはIP層のルーティング技術等が考えられるが、経路決定の粒度はパケット毎であり、そのため、高速性が要求される。しかし、我々が想定するアプリケーションレベルの経路決定では一度に扱う通信データの量も大きく、経路決定の粒度は一定時間毎、または経路が変更されたといったイベント毎でかまわないので、実行パフォーマンスよりも、ユーザの要求やネットワークの状態に細かく対応できることが重要である。また、同一サービスを行える接続先も複数存在する。

本論文では、前提となる技術として、2節でサービス連続技術、3節でサービス発見、4節で同一サービスを複数のノードで実現するサービスのシャドウ化について説明し、その後、経路、接続先サービスの選択

方式について提案、考察する。

2. シームレスなサービス連続技術

サービス連続技術の構成を図1に示す。各ノードにはS-proxyが配置されている。アプリケーション(AP)間で行われているデータの送受信は複数のS-proxyによって中継される。S-proxyは送受信されたデータを蓄積転送するので、S-proxy間の通信が切断された場合は複数の通信手段から利用可能なものを選択し、再接続、再開することが可能である。例えばS-proxy間が有線LANで接続されていた状態から無線LANで接続されている状態に移行することができる。また、S-proxyによる中継経路は動的に変化させることができ、ネットワークトポロジの変化により、冗長な経路になった場合はより短い経路に移行できる。さらに、S-proxyは中継するデータを解析したり、APIに問い合わせたりすることでAPの状態やプロトコルの通信状態を把握し、他のS-proxyにその状態を転送する。これにより、他のAPでサービスを連続的に継続することが可能である。例えば、図1ではノードCのS-proxyにノードDのS-proxyの状態を転送することによりノードAとノードDのAPで行われていた通信がノードAとノードCの通信に切り替えられ、その際にもユーザから見たサービス(サーバサービス、クライアントサービス)は連続している。サービス例としては、同じ映像を配信するAPにおいて、現在利用中のAPがネットワークから切断され映像が中断した場合にも別のAPが中

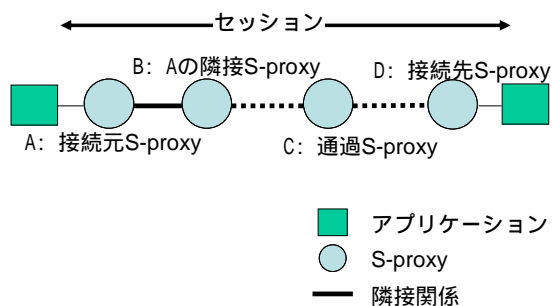


図2 セッション構築例

断したところから映像配信を再開したり(サーバサービスの連続)、ユーザがオンラインショッピング中にオフィスから外出する際、デスクトップのAPから可搬性のあるPDAのAPに切り替えたりすることが考えられる。(クライアントサービスの連続)。

このようにシームレスなサービス連続技術はユビキタスネットワーク環境で想定される動的なネットワークの変化やユーザの要求にアプリケーションレベルで対応する。

2.1 関連技術

関連研究との関係を示し、我々のサービス連続技術の特徴を明らかにする。

動的なネットワークの変化に適応するシステムとして、アドホックネットワーク[5]やP2Pサービスが注目されている。しかし、アドホックネットワークは無線の均一なネットワークを想定しており、P2Pサービスではサービスの動的な発見に重点があるため、サービスの連続性は十分ではない。

また、Mobile IP[6]に代表される、TCP/IPでのアプローチはパフォーマンス的に有利であるとともに、アプリケーションに依存することなくノードの移動を実現することができる。しかしながら、ホームページ等の固定ノードの存在を仮定したり、ファイアウォールで分断されたり、OSの実装への依存が高かったりといった欠点もある。また、サービスの移動を実現するにはアプリケーションの状態の継承やネットワークやノードのリソースの管理、割り当て等の処理を行う必要があり、TCP/IP層のみで解決することは困難である。

我々の提案するアプリケーションレベルのサービス連続技術は、固定ノードの存在、OS、トランスポートネットワーク、無線技術に依存することなく、サービスを連続させることを特徴としている。また、APと積極的に連携させることで、APの意図を反映できる。

2.2 セッションと経路

シームレスプロキシネットワークのモデルについて

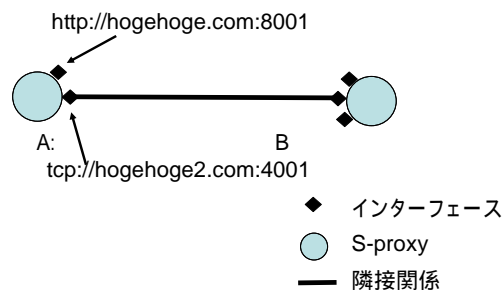


図3 インターフェースの例

て詳細を説明する。

S-proxyはS-proxy IDにより一意に識別される。APは通信のエンドエンドでサービスを提供したり、サービスを楽しむプログラムで、表示や操作といったユーザインターフェースを含む。AP間でやりとりされるAPデータは複数のS-proxyによって中継される。S-proxyの中で特にAPと直接接続しているS-proxyをエンドS-proxyと呼ぶ。セッションの構築例を図2に示す。セッションはサービスとサービスを結びつけ、これらのサービスを開始して完結するまでの単位で、その間セッションを構成しているAPやS-proxyは変化してもかまわない。APからの通信確立の要求はエンドS-proxyが受け取り、エンドS-proxy間のセッション確立要求に置き換える。APからの通信確立の要求を受け、セッション確立を開始するエンドS-proxyを接続元S-proxyと呼び、接続元S-proxyとセッションを確立し、別のAPに接続するエンドS-proxyを接続先S-proxyと呼ぶ。

エンドS-proxy間は0個以上の中継S-proxyによって結ばれる。このエンドS-proxy、0個以上の中継S-proxy、エンドS-proxyのつながりを経路と呼ぶ。

ここで、接続元S-proxy、接続先S-proxy、中継S-proxyはある時点のあるセッションに注目した場合の各S-proxyの役割を示しているに過ぎず、あるセッションの中継S-proxyは別のセッションの接続先S-proxyである可能性もある。

2.3 インターフェース

インターフェースとはS-proxy間の通信に用いるトランスポート層以下のデータの送受信ポートである。例えば、TCP/IPではIPアドレスとポート番号、HTTPではURLといった具合である。隣接S-proxyからは、自ノードの持つインターフェース宛にデータが送信される。S-proxyが統一的に扱うため、インターフェースをURI形式で表現する。同一ノードに複数のネットワークインターフェースが存在したり、ネットワークインターフェースのアドレスそのものも変化する可能性もあるので、S-proxyとインターフェースの関係は

一対多でかつ動的に変更が起こる可能性がある。図3にインターフェースの例を示す。S-proxy AとS-proxy Bは隣接関係にあり、S-proxy Aは2つ、S-proxy Bは3つのインターフェースを持つ。S-proxy AのインターフェースはURI表現で

- http://hogehege.com:8001
- tcp://hogehege2.com:4001

と表現されている。

2.4 隣接関係

S-proxy間のいくつかは隣接という関係をもっており、あるS-proxyからみた隣接のS-proxyをそのS-proxyの隣接S-proxyと呼ぶ。図2のS-proxy AとS-proxy Bは隣接関係にある。隣接関係にあるS-proxy間では経路情報をやりとりする。(また、エンドS-proxy間の中継は隣接関係にあるS-proxyのつながりで行われる。)

隣接関係には動的なものと静的なものがあり、動的な隣接S-proxyはブロードキャストやマルチキャストを用いインターフェース情報を交換することで自律的に構築、削除される。

静的な隣接関係は設定ファイルやユーザからのコマンドにより、静的に構築、削除される。

隣接関係は各S-proxyが保持する隣接関係テーブルに記載され、これには

- 隣接S-proxy ID
 - 動的or静的
 - 隣接関係の状態(アクティブor非アクティブ)
- が記載される。

S-proxyは定周期でインターフェース情報を交換することで隣接関係が維持されているかどうかを確認することが可能である。

隣接関係が維持されなくなった場合、動的な隣接関係なら隣接関係テーブルから削除され、静的な隣接関係なら非アクティブ状態に遷移する。非アクティブの場合、隣接関係テーブルに項目は保持しているが、状態を非アクティブ状態に設定しておく。

3. サーバサービス発見

サーバサービスとはサーバアプリケーションとしての機能の一部を提供することと同意である。例えば、動画配信ではある動画ファイルを送信することで、サーバサービスが完了する。S-proxyに接続しているアプリケーションにより提供できるサービスをすべてサービステーブルに登録し、そのテーブルを各S-proxyが保持する。また、サービスに関する情報はサービス広告としてネットワーク上に広告される。

接続元S-proxyはアプリケーションが要求したサービスを受けるために必要な情報(接続先S-proxyのS-proxy ID)をこのサービス広告を発見することによ

り得る。

これらの広告、発見はP2Pサービスの基本的な技術であり、Jxta[6]などのソフトウェアで実現される。

4. サービスのシャドウ化

次に、同一サーバサービスを複数のAPで行うための仕組みについて述べる。

同一のサービスを行うことのできるもののうち複製のものをマスタと呼び、複製されたものをシャドウと呼ぶ。

ここでサービスとっているのは動画配信のようなコンテンツ配信型のネットワークサービスである。シャドウはサービスに必要なデータの複製である。これらのサービスをサービスの途中でもシームレスに切り替えることで、サービスを継続させる。

詳細を以下に示す。

(1) マスタ

サービスの根本的な複製元となってサービスを行う。あるサービスのマスタは、S-proxyで構成されるシームレスプロキシネットワーク内で1つ存在する。マスタはサービスを行うための実体を持つ必要がある。また、マスタは、シームレスプロキシネットワーク内にサービス広告を行い、独自にサービスを提供する。

(2) シャドウ

複製されたデータでサービスを行う。シームレスプロキシネットワーク内において、あるサービスのシャドウは複数存在することが可能である。シャドウはシームレスプロキシネットワーク内にサービス広告を行い、サービスを提供する。シャドウは、サービスを行うためのデータの実体をもつことを必須としてはいないので、以下に示すように、データを持つものと持たないものの2種類が存在する。

➤ シャドウ(データ有り)

完全なマスタの代替えである。シームレスプロキシネットワーク内にサービス広告を行い、独自にサービスを提供することが可能である。

➤ シャドウ(データ無し)

単独でサービスを引き受けることができないため、マスタもしくは完全なデータを持つシャドウに対してサービス情報を要求し、サービスデータを受信すると同時にサービスを提供する。サービスデータをすべて受信したデータ無しシャドウは、データ有りのシャドウに遷移することが可能である。

関連技術にCDN(Content Delivery Network)やフォールトトレラント技術等がある。CDNにおいては複製の位置は静的でサービス中に複製を切り替えることは想定されていない。また、フォールトトレラント技術は障害に特化した設計を行っており、切り替え

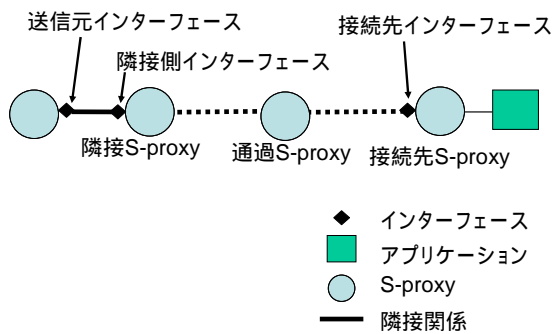


図4 経路情報

の多様性、頻度等が異なるので、サービス切り替えに適用するには柔軟性にかける。

5. 要求条件

これまで述べてきた技術を用いることにより、動的なネットワーク上でシームレスにサービスを連続させることが可能となるが、ネットワークポロジが変化することにより、ユーザが適切な通信デバイス、経路、接続先をすべて、指定することは非常に困難である。そこで、シームレスプロキシネットワークにおいて、接続先、経路、インターフェースを評価し、動的に決定する仕組みが必要である。

本論文ではこれを自動的に行うため、以下に示す要求条件をあげ、これに対する解決方法を提案する。

- (条件1) クライアント(接続元S-proxy)の要求
利用するインターフェース(無線LAN, 有線LAN)や中継S-proxyを指定することができ、この条件を経路決定のプロセスに反映できる。
- (条件2) ネットワーク側(中継S-proxy)の要求
トラフィック、リソースの配分が適切に行われるよう、経路評価のパラメータを変更できる。
- (条件3) サービス提供側(接続先S-proxy)の要求
サービス提供するインターフェースや中継S-proxyを指定することができ、この条件を経路決定のプロセスに反映できる。

6. 経路選択方法

ここでは適切な接続先S-proxyに適切なS-proxyの経路で適切なインターフェースを用いて接続するための方法を述べる。

ここで重要なのは、経路の評価のみで、接続先S-proxyを決定することができないことである。同一のS-proxyの経路でも利用可能なインターフェースが異なれば、コストは異なってくる。つまり、経路とインターフェースを独立かつ階層的に評価することは困難で、接続先S-proxyを評価するには、接続先S-proxyまですべての構成要素を考慮し評価する必要がある。このとき、経路、インターフェースも同時に

決定される。

そこで、インターフェースを含む経路情報を扱うとともに、コスト値と優先度を評価尺度とする方式を提案する。

6.1 経路情報の作成

6.1.1 経路情報の構成要素

経路情報は各S-proxyが保持するルーチングテーブルに記述される。経路情報の項目には各S-proxyからみた、送信元インターフェース、隣接側インターフェース、隣接S-proxy、通過S-proxy、接続先インターフェース、接続先S-proxyのIDとコスト値が要素としてある。図4に経路情報の各要素の関係を示す。各要素の意味はそのS-proxyの送信元インターフェースを利用し、隣接S-proxyに隣接側インターフェースを利用して接続し、さらに隣接S-proxyから、通過S-proxyを通して、接続先S-proxyに接続先インターフェースによって接続した場合の経路を示している。また、コスト値はこのような経路を利用した際にかかるコストを定量的に示している。上記に示した経路情報の要素のうち隣接S-proxy IDと接続先S-proxy ID、コスト値の設定は必須で残りの要素は省略可能である。

6.1.2 経路の広告

次に経路情報をS-proxy間でやり取りする方法について説明する。

- (1) S-proxyは隣接S-proxyを接続先S-proxyとする経路情報を作成し、ルーチングテーブルに記憶する。
- (2) ルーチングテーブルに記載の経路情報を隣接S-proxyに経路広告する。この際経路のループを防ぐため、広告先の隣接S-proxyを含む経路情報を経路広告しない。
- (3) 経路広告を受信した場合、受信した経路情報の隣接S-proxy IDを経路広告してきた隣接S-proxy IDに書き換えルーチングテーブルに記憶する。
- (4) 隣接S-proxyとの接続がなくなった場合、隣接S-proxyに関連する経路情報をルーチングテーブルから削除する。

6.1.3 コスト値の計算

次にコスト値の計算について説明する。S-proxyではいくつかの要素に対し、コスト値の増減を行うことができる。この増減により、自S-proxyを通過する際にかかるコストを周囲のS-proxyに伝達することで他のS-proxyの経路評価に影響を与える。

各S-proxyでは以下の要素に対するコストを設定し、ルーチングテーブルの参照、広告時に加算する。

- (1) 接続先S-proxyに対するコスト
特定の接続先S-proxyにむけて、自S-proxyを通過する経路に対するコスト

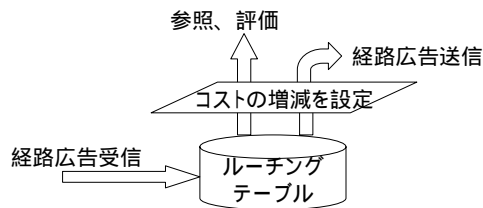
(2) インターフェースに対するコスト

自ノードの特定インターフェースを利用する経路に対するコスト

(3) 隣接S-proxyに対するコスト

特定の隣接S-proxyを隣接として通過する経路に対するコスト

上記のコストの増減値の設定は、図5に示すようにルーティングテーブルの参照、評価時、及び経路広告の送信時に参照され、該当する経路のコストを変更する。



各プロキシでコスト値を変更可能

図5 コスト値変更処理

6.2 優先度指定

接続元S-proxy、接続先S-proxyそれぞれは、サービスを提供する際、あるいはサービスを利用する際に、特定の経路を優先的に指定してセッションを構築したいという要求がある。例えば、有線LANと無線LANを同時に利用できるS-proxyは有線LANが利用可能な場合は有線LANを利用し、有線LANが利用できない時だけ無線LANを利用したいといった強い要求があったとする。そのとき、コスト値による経路だけでは、S-proxy全体の関係で経路が決定され、個々のS-proxyで発生するこのような強い要求には答えられない。そこでそのような場合に有線LANを優先的に利用するという優先度を指定できるようにする。

表1に優先度指定の各要素を示す。以下の優先度を各エンドS-proxyがアプリケーションの要求、ユーザの要求に基づき、指定する。優先度指定の方法には絶対指定と相対指定があり、絶対指定は指定されたものを絶対に使用し、相対指定は指定されたものを優先的に使用する。優先度は隣接関係にあるS-proxy間で優先度広告により伝達される。優先度広告を受け取ったS-proxyは優先度情報として保持するとともに他の隣接S-proxyに優先度広告する。

優先度要素	指定	概要
コスト範囲	コストの範囲指定	範囲内のコストの経路を希望
インターフェース指定	インターフェース 相対/絶対	このインターフェースでの送受信希望
方路指定	隣接S-proxy ID 相対/絶対	この隣接S-proxyを通じて送受信希望
中継点指定	中継点S-proxy ID 相対/絶対	この中継S-proxyを通る接続を希望
最大ホップ数指定	最大ホップ数 相対/絶対	このホップ内での接続を希望

表1 優先度の要素

6.3 経路の評価と決定方法

3節のサービス発見、6.1節の経路情報 6.2節の優先度指定を用いて、経路を評価する方法について説明する。

- (1) サービス発見の機能により、同一サービスを行うことができるAPIに接続可能な接続先S-proxyを発見する。
- (2) サービスを提供している複数の接続先S-proxyまでの全経路を集計する。
- (2) 全経路をコスト値の大小で整列させる。コスト値の小さなものを上位に配置する。
- (3) エンドS-proxyから優先度要素を絶対指定で指定されている場合はその要素を含む経路のみを残す。
- (4) 相対指定されている要素を持つ経路を上位に並べ替える。相対指定されている要素をもつ経路同士はコスト値の小さなものを上位に配置する。
- (5) 上位の経路から順に選択する。

7. 考察

まず、5節で述べた要求条件にどのように対応しているか示す。

そのS-proxyで増減するコスト値を設定することで、中継S-proxyは自らの負荷を経路決定に反映することが可能である。例えば、負荷が大きくなったら、自S-proxyが中継する経路のコスト値を増加させることで負荷を下げるのが期待される。このため要求条件2が満たされる。

また、優先度を指定することで、接続元S-proxyや接続先S-proxyは意図したインターフェースや中継S-proxyを優先的に選択することができる。また、接続元S-proxyは利用可能なすべてのサービス提供先S-proxyまでのコストを比較し、もっともコストの低いものを選択することが可能である。したがって、要求条件1、3が満たされる。

経路情報の扱いに関してはS-proxyをIPルータだとするとIP層のルーティング技術の考え方と共通部分が多い。しかしながら、インターフェースと中継S-proxy

を別のアドレス空間（インターフェースはURI, S-proxyはS-proxy ID）で管理し、複数の接続先を評価し、優先度を加味することで、よりユーザの要求やネットワークの状態に細かく適応できる。

また、Jxta[7]などのP2Pのサービス発見技術では接続性だけを対象としており、複数の選択肢からどのサービスを利用するのがもっとも適切か判断することが困難であるとともに、どのインターフェースを利用するかといった下位のネットワークまでを考慮しながらサービスを選択できない。

さらに、エンティティ間の強さを変化させ、サービスを創発させるJa-Net[8]のような生物的なアプローチがあるが、S-proxyをエンティティ、コストを強さと考えるところのようなサービス創発技術の一つの応用例であるとも見られる。

今回の提案では経路情報を広告する範囲が限定されていない。そのため、S-proxyの数が多くなり、ネットワークトポロジの変化が大きくなると経路広告が増大するとともに、ルーティングテーブルの大きさも増大する。経路情報を減らすためにはサービス提供側のインターフェース情報、優先度情報を限定することが効果的である。

8. まとめ

本論文ではネットワークトポロジが動的に変化するネットワークにおいて、サービスを連続させるS-proxyネットワーク上で最適なS-proxy間の経路と接続先サービスをコストや優先度情報に基づき選択する方法について提案した。この方法はネットワークトポロジが動的に変化した場合でも、サーバサービス、ネットワーク、クライアントサービスの3者の要求を評価し、適切な経路と接続するサーバサービスを決定できる。これにより、ユーザはネットワークトポロジの変化を意識することなく、適切な経路やサーバサービスにシームレスに移行できる。

今後、プロトタイプの実装とともに経路情報の効率的な広告の方法について検討する。

[参考文献]

[1] 高杉 耕一, 片山 穰, 久保田 稔, 小柳 恵一: ノードの移動性を実現するモビリティ技術, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 7, pp. 1828-1839, 2001.

[2] Koichi Takasugi, Motonori Nakamura, Satoshi Tanaka, Minoru Kubota: Seamless Service Platform for Following a User's Movement in a Dynamic Network Environment, PerCom2003, Fort Worth, USA, 2003 発表予定.

[3] 高杉 耕一, 中村 元紀, 田中 聡, 久保田 稔: 動的なネットワーク環境上でユーザに追従するシームレスサービスプラットフォーム, DICO 2002, pp. 297-300, 情報処理学会, 2002.

[4] 高杉 耕一, 中村 元紀: 動的ネットワークにおけるシ-

ームレスなサーバサービス端末の変更, FIT2002, M-89, 2002.

[5] Mobile Ad Hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation considerations, RFC2501, Jan. 1999.

[6] IP Mobility Support, RFC 2002, Oct. 1996.

[7] <http://www.jxta.org/>

[8] 須田達也, 松尾真人, 板生知子, 中村哲也, 松尾真人, 今田美幸, 大塚卓哉, 田中聡: アプリケーション創発のための適応型ネットワークアーキテクチャ: Ja-Net, 情報処理, Vol. 43, No6, pp. 616-622, 2002.