階層的なネットワーク設定機構に関する考察

冨永 明宏[†]
慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

移動計算機の登場によりネットワークにおける資源割当・設定機構の必要性が明らかになった。今後、“Ubiquitous Computing” の世界が実現される時に、身の回りの物すべてに含まれる多数の計算機に対する資源割当や諸設定を手動で行なうことは現実的でない。さらにそれらの計算機から構成されるネットワークは動的に構成が変化する。したがって計算機群が自律的・動的にネットワークを構成し、ネットワーク資源の配分を行なう機構が必要である。この機構を実現するために必要となる技術の一つとして、本論文ではルータや各種サーバも含めたネットワーク全体のアドレスの自動設定機構に限定して各種の考察を行なう。

1 はじめに

計算機を最初にネットワークに接続する際には、IP アドレス等のネットワーク資源や情報を入手し、手動で設定するのが一般的であった。計算機の数やネットワークの規模が小さく、すべてのユーザが管理者としての能力を保持していた頃は、手動による管理も十分に現実的であった。しかし近年は、次のような理由から、計算機やネットワークを手動で管理することは非現実的になりつつある;

- 計算機ネットワークの大規模化による総仕事量の増大
- 管理者数/計算機数の比率の減少
- 携帯型計算機や移動計算機の登場による、設定変更の機会の増加

特に、近い将来に Ubiquitous Computing が実現される際には、全てのものに計算機が含まれるようになるだろう。しかしながら、それら全ての計算機に対するネットワーク資源の割り当てや情報通知、設定などを手動的に行なうことは大規模性の観点からいって不可能である。さらにそれらの計算機からなるネットワークは動的に構成を変更できなければならない。そのためには計算機群が自律的・動的にネットワークを構成し、ネットワーク資源の配分等を行なう機構が必要となる。

Internet Engineering Task Force (IETF) の DHC working group によって提案されている Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)[1] は、このような要求の一部を解決するものである。DHCP のサーバは IP アドレスというネットワーク資源と、ネットワークに関する何種類もの情報を持つ。ただしサーバの管理する IP アドレスの集合は不変である。DHCP のクライアントは、サーバから IP アドレスと各種の情報を受け取り、それらを使って自動的に設定を行なう。

しかしながら DHCP ではネットワークを自律的に構成することはできないし、自動的に設定を行なうことができるのも、ルータや各種サーバなどを除く末端のホストのみである。したがって現在の DHCP では、より高度な要求に対応するには不十分だと言わざるを得ない。Ubiquitous Computing を実現するのに必要な技術は数多く存在すると思われるが、本論文では、ルータも含めたネットワーク全体の設定 (とりわけネットワークアドレスの設定・付け替え) に問題を限定する。

本論文の構成を述べる。まず第2章では、自律的なネットワークの自動設定機構で解決を目指す 4 つの問題に関して考察を行なう。この考察を踏まえて、第3章でネットワーク設定機構の基本設計の方針を示す。第4章ではネットワーク設定プロトコルを、次の 3 つの部分に分けて考察する;

1. サーバ木構成部
2. アドレスバルク割当/配布部
3. アドレス付け替え部

[†] Investigation of Hierarchical Network Configuration Protocol, by Akihiro Tominaga(Graduate School of Media and Governance, Keio University)

[‡] tomy@sfc.wide.ad.jp

さらにホスト設定プロトコルに関する考察を行ない、最後に今後の課題と展望を述べて本稿をしめくくる。

2 ネットワークの自動設定に関する一考察

まず、本章では以下の4つの問題について順に考察していく。その際に特にDHCPではこれらの問題になぜ対処できないかという理由も述べる。さらに、これらの問題を解決するためには、どのような条件を満たす必要があるかについても論ずる。

1. 大規模ネットワークの設定・管理
2. Nomadic Students 問題
3. IP アドレスの枯渇問題やアドレス付け替えへの要求
4. 自宅内 LAN へのアドレス割り当て

2.1 大規模ネットワークの設定・管理

ネットワークの規模が拡大するにつれ、その設定や管理に必要な労力も増大している。先にあげたDHCPは、この問題を解決するものである。DHCPを使用すれば、ネットワーク管理者はDHCPサーバのみを管理すればよく、その他の多数の計算機の管理は自動的に行なえる。

しかしながらDHCPには複数のサーバ間で情報を交換するためのプロトコルが定義されていない。したがって、各サーバの管理するIPアドレスの集合は、互いに独立でなければならない。さらにバックアップサーバといった機構も存在しない。それゆえ耐故障性を高めるためには1つのサーバで集中的に管理するよりも複数のサーバに分散して管理するのが望ましい。またネットワークの規模が非常に大きくなった場合に、サーバの処理能力を越えて、クライアントからの要求が発生する可能性があるので、サーバを分散させることが必要になってくる。これは同時に、ネットワーク管理者が複数のサーバを管理しなければならないことを意味する。つまり、この2つの要求は互いに矛盾することになる。

これらの要求を実現するためには、サーバを分散させると同時に、中央のサーバにおける集中管理を実現するためのサーバ間プロトコルを開発する必要がある。Ubiquitous Computingにおいては、ネットワークの規模が非常に大きくなると思われるので、この必要性は更に高くなる。また、Ubiquitous Computingでは、動的にネットワークの規模や構成が変化すると思われるので、それらに対応できるような「ネットワーク全体」の設定を行なう機構が必要となる。

2.2 Nomadic Students 問題

携帯型の計算機・ネットワークデバイスが登場したことにより、例えば大学生が講義にノートブックパソコンを持ち込み、LANに接続するというようなことが起こっている。小人数の場合にはDHCPを普通に使用するだけで問題ないが、大人数で移動する場合にはネットワークアドレスをあらかじめ十分に用意しておくなどの対応が必要となる。仮にそれでもネットワークアドレスが足りなくなった場合には、ユーザはネットワークへの接続を諦めるしかない。

また、あまり多くのIPアドレスを余分に確保しておくことは、次の「IPアドレスの枯渇問題」という観点からも好ましくない。必要な時に必要なだけのIPアドレスを確保し、そのサブネットを担当するサーバへ通知する機構が必要である。

2.3 IP アドレスの枯渇問題とアドレス付け替え

最近になって、数年後にはIPアドレスが足りなくなるという予測がされている。以前はIPアドレスよりもルータのメモリが貴重だったために、複数のクラスCアドレスを割り当てるよりも単一のクラスBアドレスを割り当てる方が経路情報の少なさから好まれた。しかしIPアドレスが不足しつつある現在では、基本的にクラスBのアドレスは割り当てられず、複数のクラスCアドレスが割り当てられる。これが可能となったのはClassless Inter-Domain Routing (CIDR)[2]によって、経路情報の集約が可能となったためである。

CIDRは、連続するクラスCアドレスがネットワークトポロジ的に近くに存在している場合に効果を発揮する。そのため、過去に割り当てられたクラスBアドレスを返却し、複数のクラスCアドレスにアドレスを「付け替える」ということが行なわれている。

このように「アドレスの節約」と「(CIDRを考慮した)アドレスの付け替え」を行なうことは、非常に時間と手間のかかる作業であり、クラスBアドレスの返却が盛んにならない原因とも考えられる。

IPv4ではアドレスの付け替えがあまり考慮されていないが、IPv6では最初からそのような機能を実現できるように考慮して設計されている。したがってIPv6への移行も視野にいれ、そのような「アドレス付け替え」に関する研究を行なう事には意義がある。

2.4 自宅内LANへのアドレス割り当て

最後の問題は、即実用可能な要求に関するものである。現在、PPP[3] (正確には、PPPのIP用制御プロトコルのIPCP[4]) を通じて動的にアドレスを割り当てる事が可能である。

しかしながら単一の計算機を接続するだけでなく、家庭内LANをインターネットに接続する場合には、アドレスバルクの割当を行なって家庭内LAN上の全ての計算機を設定したいという要求がある。さらにその場合のLANの経路情報をいかにインターネットへ向けて流すかという問題もある。

PPPなどのアクセス先が単一のプロバイダの場合には、あらかじめアドレスの割当や経路の設定を行なう事が可能である。しかし複数のプロバイダにアクセスする場合には、この方法では解決できない。

したがってネットワークアドレスをバルクで割り当て、家庭内LANを自動的に設定するプロトコルが必要となる。

3 ネットワーク設定機構の基本設計方針

ここでは前章での考察を踏まえてネットワーク設定機構の基本設計方針を明らかにする。

3.1 問題領域の定義

ネットワーク全体を自動的に設定·設定変更する場合には、大雑把にいっても次のような問題点が明らかになる。

- IPアドレスが変更されると、論理的通信路が維持できなくなる
- サーバ·クライアントモデルは、サーバのアドレスに依存している
- ルーティング関係の設定は、IPアドレスに基づいている場合が多い
- ホスト名とIPアドレスの対応を管理するDNSの変更をしなければならない

これらの問題を全て一度に取り扱う事は無理なので、本論文では次のように問題の範囲を限定する。

- 現段階では、アドレスの割り当てと付け替えのみを取り扱う
- ルーティングは、「デフォルトのみ」、「デフォルトと (単一のAS内における) OSPFのみ」、「デフォルトとRIPのみ」などの単純なものを仮定する。アドレスの付け替えによって複雑な波及効果が起こるような状況は考えない。
- ホストや各種サーバのIPアドレスが変化する事によって生じる問題は考慮しない。
- DNSの動的な更新については、考慮しない。

3.2 基本設計方針

第2.1章で述べたように、ネットワークの管理において大規模性の確保、耐故障性の向上、集中管理の実現といった要求を実現するための手段として、木構造を考える (図1)。大規模性を確保するのに階層構造を採り入れるという手法は、様々な分野で利用されている。また、木構造を採り入れることによって、管理者は根にあたるサーバ一台 (ルートサーバと呼ぶ。図1における “RS”) だけを操作すれば良く、そこから他の計算機を再帰的に制御できれば良い。これによって集中管理の実現も図れる。耐故障性については単に木構造を導入するだけでは実現できないが、本論文では問題の複雑化を避けるために考慮しない。

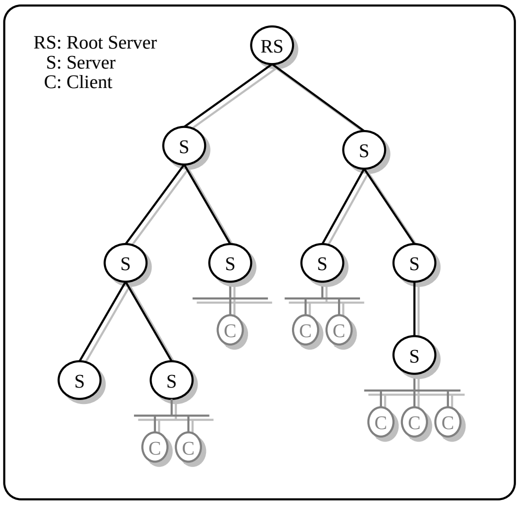

図 1: サーバ木

また木構造にそってアドレスを割り当てる事によって、本質的にCIDRに適合したアドレスの分配が可能になる。将来的に1つの組織内に限らず複数の組織にわたって管理を行なう場合に備えて、バックボーンや組織外リンクの近くにルートサーバを配置するのが望ましいだろう。さらにIPアドレスの付け替えと大規模性を実現することを考慮すると、各セグメントにサーバが存在することが望ましい。また上位のサーバとの接続が断たれても、ある程度まで自律的に動作しなければならない。

これまではネットワークの設定機構というように一まとめに呼んできたが、拡張性を考慮し、次の二

つにプロトコルを分割する。

- ネットワーク設定プロトコル .. ネットワーク全体の設定。サーバ間のプロトコルを規定
- ホスト設定プロトコル .. 各セグメント上のサーバとクライアントの間のプロトコルを規定。DHCP に相当するもの

このように分離することによって、例えば将来、本機構を IPv6 へ応用したい場合に、ネットワーク設定機構に若干の修正を加えるだけで良い。

3.3 想定する環境

ここでは、本機構を設計する際の前提条件に関して述べる。第一に「全てのルータでサーバを動作させることができるとは限らない」。ルータで使われているメモリなどの計算機資源の量や OS によっては、サーバを動作させることは不適当な場合がある。

その代わりに第 2 条件として、「全てのルータでは、サーバとリレーエージェントのどちらかが動いている」と仮定する。サーバ群が自律的に木構造を構成するには、ネットワークのトポロジに関する情報を得る必要がある。そのためにはルータの協力を得るか、あるいはルーティングプロトコルなどから情報を取得しなければならない。

第 3 に「全てのホスト (ルータを含む) ではクライアントが動作可能でなければならない」。ネットワークアドレスの付け替えをネットワーク全体で実現するためには不可欠の条件である。やはり不可欠な条件として、「全てのホストは 1 つのネットワークインタフェースに複数のアドレスを設定できる」というものがある。これは、アドレスの付け替えを徐々に行なうために必要な条件である。

次に「全てのルータは、VLSM をサポートしている」必要がある。これは複数のネットワークインタフェース間で、異なるサブネットマスクを保持できるという意味である。アドレスを節約するために、必要量のアドレスのみを配分した場合、各々のネットワークインタフェースのつながっているサブネットの規模が同等であるとは限らない。

さらに「全てのホストはマルチキャストができる」ことを条件とする。この条件は現状に即しているとは言い難いが、プロトコルを簡素化するために、この条件を加える。同時に最後の条件として「全てのルータはマルチキャストルーティングができる」というものもある。

4 ネットワーク設定プロトコルの概要

先に、ネットワーク設定機構をネットワーク設定プロトコルとホスト設定プロトコルの 2 つに大きく分割したが、さらに細かく、次の 4 つの部分に分けることができる。

1. サーバ木構成部 .. サーバ木を自律的に構成する。ただし静的な構成も可能
2. アドレスバルク割当/配布部 .. サーバ間における、アドレスバルクの割当・返却を実現
3. ホスト設定部 .. サーバからクライアントへの、アドレスの割当・設定を実現
4. アドレス付け替え部 .. アドレスの付け替えを実現

本章の残りでは各部分を順に考察する。

4.1 用語定義

- ルートサーバ .. サーバの木の根の部分に位置するサーバ。ネットワークの管理者が、唯一直接に操作を行なう。
- 上位 (下位) サーバ .. あるサーバよりも階層が一つ上 (下) のサーバ。
- リーフサーバ .. 木の葉に位置するサーバで、下位サーバは存在しない。
- リレーエージェント .. ネットワーク構成プロトコルのメッセージを必要に応じて隣接サブネットへ中継するプログラムのこと。ルータ上で動作する。
- 上流/下流 .. 木の根に近い方を上流、葉 (末端) に近い方を下流という。また「上流側のネットワークインタフェース」とは、あるサーバ (ホスト) の持つネットワークインタフェースの中で、ルートサーバへ IP パケットを送るのに使われるネットワークインタフェースのことを意味し、これ以外のネットワークインタフェースを「下流側のネットワークインタフェース」と呼ぶ。ただし、ネットワークインタフェースが一つしかない場合には、上流側ネットワークインタフェースと下流側ネットワークインタフェースは同一となる。

4.2 サーバ木構成部

サーバ木構成プロトコルでは木構造を、自律的に構成することも、静的に構成することも、両者を混在させることも可能なのが望ましい。自律構成の基本として、“Reverse Path Forwarding” と呼ばれて

いる手法を考えている??。これはマルチキャストの配布木を作る時にも使われる手法 (の基礎) である。しかしながらマルチキャスト配布木の場合には、マルチキャストルーティングを行なうプロセスは、全てルータ (Tunnel を使った論理的なルータも含む) の上に存在するのに対し、ここでは一般のホストがルータ上で動作するリレーエージェントの協力を元に木を構成することも可能にしなければならない。

Reverse Path Forwarding の基本的な概念は、次のような物である;

1. 送信者がパケットを送る
2. パケットを受け取ったルータは、受信したネットワークインタフェースが「送信者へパケットを送るのに使われるネットワークインタフェース」と同一の場合は、他のネットワークインタフェースから送り出す。
3. 同一でない場合には何も処理をしない

ただしサーバ木構成プロトコルでは各ルータ上にサーバが存在するわけではないので、IP TTL を 1 にセットしてルータ毎にメッセージをアプリケーション層で処理したり、メッセージ本体に送信者 (= Root Server のアドレス) を埋め込むなどの工夫が必要となる。移植性を高めるためにも、通常の Socket インタフェースだけで実現できるようにする。

また、家庭内 LAN の接続などの場合には、間にネットワーク設定プロトコルのリレーエージェントを組み込んでいないルータがある可能性がある。そのような場合には、上に示した方法ではうまく上位サーバを発見できない。そのような場合には、IP TTL を増やしながらマルチキャスト行なう “Expanding-Ring Search” の手法を使って上位サーバに接続するか、あるいはルートサーバに直接接続をする必要がある。

4.3 アドレスバルク割当/配布部

アドレスバルク割当/配布機構は、各サーバ上で再帰的に用いられる。各サーバはホスト設定プロトコルのサーバを通じて、自分自身に直結したサブネット上に何台の計算機が存在するかを把握する。その台数と、現在管理しているアドレスバルクの大きさを比較する。比較した結果、大幅に余っている場合にはサブネットの規模を縮小し、上位のサーバへ返却する。この際にサブネット上のホストのアドレスの付け替えが必要となる場合もある。

アドレスの返却を受けた上位サーバは、その他の下位サーバでアドレスが不足しそうなところはないか問い合わせる。もしあれば、そこへの割当を開始するものとし、さもなければやはり上位サーバへの返却を検討する。

逆にあるサーバでアドレスが足りなくなりそうな場合には、上位のサーバへ割当を要求する。この時に、次のような 2 つの場合が考えられる;

1. 長期的な傾向として、アドレスが不足してきている場合
2. 短期的にアドレスが不足している場合

1 は時間をかけてアドレスの割当を受ければ良いので問題はない。それに対して 2 の Nomadic Students 問題は「アドレスの不足」が前もって予測できない上に、可能な限り早く割り当てることが必要である。これと似たような状況は、新しくサブネットが接続された場合にも発生すると思われる。

4.4 アドレス付け替え部

アドレス付け替えにともなって発生する諸問題については、本研究では考慮しないと前述した。しかしながら、アドレスが変更されてからもしばらくは以前のアドレスを使い続けることができれば、影響は多少小さくすることができる。このような機能は IPv6 には当初から組み込まれているため、アドレス変更の際にどのような手順をとれば影響が少ないか考察することは、本研究の目的の 1 つである。

またルータのアドレスが変化することによる影響は、非常に大きいと思われる。サーバ木のどこからアドレス付け替えを開始するかを考慮しなければ、ネットワーク設定サーバ同士の通信も不可能になってしまう。

とはいえ、IPv4 ホストに前提条件を多数設けることは不可能である。したがってネットワーク設定機構では先に述べたように、一つのネットワークインタフェースに複数の alias アドレスが設定できることだけを仮定して設計する必要があるだろう。

基本的には、次のような手順を考えているが、これで問題ないかどうかは検証する必要がある;

1. サーバはサブネット上のすべての計算機に新しいアドレスが割り当てられた旨を確認する
2. ルータにも新しいアドレスを割り当てて、経路制御を変更しておく
3. サーバは、ある時を起点に新しいアドレスをメインとし、古いアドレスは alias アドレスにするために、サブネット上にメッセージを送る
4. 徐々にクライアントは新しいアドレスへと移行し、ある時点からは古いアドレスの使用を禁止する
5. ルータも古いアドレスに関する設定を無効にする

6. アドレスを上位サーバに返却するための処理を開始する

4.5 ホスト設定部

既存のホスト設定機構としては、DHCP があげられる。しかしネットワーク設定機構の一部として利用するためには、少なくともさらに次の2つの条件を満たさなければならない;

- 複数のアドレスを設定できる
- アドレスをサーバから強制的に返却させられる

これらの要求の一部については、DHCP の拡張という形で論文??で実験した。ネットワーク設定機構は、拡張 DHCP を利用することでも実現できると思われるが、耐故障性などを考慮すると、新しくプロトコルを設計する方が望ましいだろう。

5 おわりに

本稿では、ネットワーク設定機構の必要性について明らかにし、いくつかの考察を行なった。また基本設計方針についても論じた。

現在、プロトコルの詳細まで決定しつつあるのはサーバ木構成部だけである。今後は他の部分についても早急に仕様を固め、実装を行なわなければならない。またその実装を用いた実験をし、現実の仕様に耐え得るか検証する必要がある。

また今回、論文の範囲外とした数々の問題点についても解決しない限り、Ubiquitous Computing の世界は実現できない。それらの一部は、既に研究されているが、そうでないものについては今後の研究課題である。

参考文献

[1] Droms, R.: *Dynamic Host Configuration Protocol*, RFC1541, October 1993, Internet Draft “draft-ietf-dhc-dhcp-02.txt”, May 1995.

[2] Fuller, V., Li, T., Yu, J., and Varadhan, K.: *Classless Inter-Domain Routing*, RFC1519, September 1993.

[3] Simpson, W.: *The Point-to-Point Protocol (PPP) for the Transmission of Multi-protocol Datagrams over Point-to-Point Links*, RFC1548, July 1994.

[4] McGregor, G.: *The PPP Internet Protocol Control Protocol (IPCP)*, RFC1332, May 1992.

[5] S. Deering.: *Multicast Routing in Internetworks and Extended LANs*, Proceeding of SIGCOMM’88, Vol 18, No. 4, August 1988.

[6] Tominaga, A., Nakamura, O., Teraoka, F., and Murai, J.: *Problems and Solutions of DHCP*, Proceedings of INET’95, June 1995.