

## 全ノードが移動する環境における対向ノード位置追跡方式

土 井 裕 介†

インターネットの次世代環境における通信において必須となる機能の一つ、対向ノード位置追跡方式を提供するモデルである G-P2P for Nomad を提案する。

本研究は、インターネットに接続されたノードの数が莫大になるような将来像を前提とする。ノード数が多くなるにつれ、トップダウンディレクトリ構造による管理の対象外になるノードが増えてくる。しかし、そのようなノードも適当な対向ノードを発見し、通信を行う事でサービスを提供する。

G-P2P for Nomad では、ノードはグループを作成し、互いに位置識別子の変化を通知しあう。従って、ノードはサービスを提供するグループの事を知っていれば、対向ノードが移動しても位置追跡が可能になる。G-P2P for Nomad は位置追跡においてディレクトリサービス等に依存しないので、ディレクトリによって管理しきれない多数のデバイス間における自発的ネットワークの利用を促進する。

本論文では、これらの機能を提供する G-P2P for Nomad モデルについて説明する。また、G-P2P for Nomad モデルがさまざまな環境下でどのように振舞うかを調べるため、シミュレーションを行った結果を報告する。

### A Method to Track Peer Location for All-Nomad Environment

YUSUKE DOI†

The author describes the G-P2P for Nomad model to provide an essential functionality for peer-to-peer communication in the next-generation environment of the Internet. The functionality provided is peer node endpoint tracking without central directory or authoritative server. A node with communicating peer could move. In order to use resource provided by the moved node, the peer node has to know the new endpoint id the moved node is attached.

When there is so many devices connected to the Internet as communicating nodes, it will be common that some unnamed and not managed nodes have to identify each other and track each other's location on the Internet. With G-P2P for Nomad, the endpoint tracking is provided within spontaneous group of the nodes who share an application. There's no need for any central directory and management.

In this paper, the author describes how the G-P2P for Nomad model works out such a functionality. In addition, the author conducts a set of simulation to know behavior of the G-P2P for Nomad model in various conditions.

#### 1. 導 入

The Internet(以下インターネット)に接続されたノードが移動する環境において、ノードが自律的に通信対向ノードの移動を追跡し、通信を維持するための機構を提案する。

インターネット上のアプリケーションを観察すると、実用的なアプリケーションには、通信以外に以下の動作が必須である事がわかる。

- (1) 必要な通信相手の発見
- (2) 通信関係の確立
- (3) 発見した通信関係の維持

動作1は、WWWにおいてサーチエンジンにキー

ワードを与え、結果を得る、あるいはポータルサイトのディレクトリを閲覧する、メーリングリストでやりとりされる URL を見るといった動作に相当する。つまり、特定の基準で資源の絞り込みを行う。

動作2は、WWWでは動作1から与えられたリンクの一覧から実際に選択を行い、ページを閲覧する動作に相当する。つまり、絞り込まれた資源の候補から実際に一つの通信対象を選択する動作である。通常、この直後に DNS の名前解決や通信セッションの確立が行われ、対象の資源との通信を開始する。

動作3は、利用価値があると判定した資源に対するポインタを保存する動作であり、WWWではブックマークへの登録に相当する。対向ノードが安定している場合は、ポインタを追跡する必要は無い。一方、不安定な対向ノードを対象とする場合は、資源の移動や更新に従ってポインタを更新する必要がでてくる。

† 東芝研究開発センター  
Research and Development Center, TOSHIBA Corporation

特に、ある目的や資源を継続的に共有するノードの間には、通信関係を維持する強い動機が存在する。本研究では、以上3つの動作のうち通信関係の維持に焦点を当て、特に、ノード同士が自律的に通信関係の維持を行うための手法を提案する。

### 1.1 背景

将来、個人が所有・関係するノード群の数が多くなると予測されている。このようなノードには、情報家電、PDA、あるいはセンサー機能のみを持つ単機能ノード等がある。このようなインターネットの未来像には、例えば Invisible Internet<sup>6)</sup> と呼ばれるものも含まれる。

類似した将来像として、文献<sup>3)</sup> では、無線および赤外線を組み合わせてユーザ同士が自発的に協調環境を構成するネットワークの利用法を“Spontaneous Networking”と呼んでいる。

このような将来像におけるインターネットでは、ノードが自律的に他のノードとの様々な関係を発見・維持・更新・修復する機構は重要性を増すと考えられる。なぜならば、個人が関係するノードの数が多くなるにつれて、一つ一つのノードを綿密に管理する事が困難になるからである。当然、全てのノードをDNSのような共通のディレクトリ基盤に登録する事は、徐々に困難になるだろう。

ここで、Spontaneous Networking におけるノードの通信を、前項で述べた動作に分解して考える。ある特定のノードとノードを利用者が意図した通りに組み合わせる動作(前項動作1および動作2)と、その通信関係を維持する動作(前項動作3)が存在する。

動作1および2の例としては、文献<sup>2)</sup> で示されているような方式や、Bluetooth、赤外線通信等の近接通信を用いた方式<sup>3)</sup> が提案されている。

その後、通信関係をインターネットを介して再利用する場合、ノードの移動や移設に伴い変化するノードへのポインタ、つまりIPアドレスを追跡する技術が必要となる。そのような技術を本稿では対向ノード位置追跡方式と呼ぶ。

現在、代表的な対向ノード位置追跡方式の研究は、ノードのモビリティ実現に向けた研究がほとんどである。そのような研究には、Dynamic DNSとTCP Migrationを組み合わせた手法<sup>4)</sup> や Mobile IP、LIN6<sup>5)</sup> 等がある。

### 1.2 本研究の目的

対向ノード位置追跡方式のうち、特にネットワーク上に安定したノード(「固定点」)に依存しない手法を提案する。

Dynamic DNSやMobile IP、LIN6等は、Name ServerやHome Agent等のネットワーク上の固定点

を利用した対向ノード位置追跡方式と言える。この手法は、固定点の安定性に依存できる反面、安定した固定点における管理が必須となる。そして、固定点の必要性は、Spontaneous Networkingの利便性を大きく損ねる。

例えば一般家庭内における運用や、ノードの発生・消滅のサイクルが早い場合等、管理コストが問題になるケースでは、ノードをディレクトリに登録して管理しなければいけないコストが相対的に大きくなる。特に、ノードが家電レベルでネットワークにあふれるようになると、トップダウンの管理体系を補完するボトムアップな管理体系が必須となる。

本研究は、このような環境を前提にした上で、識別子対応づけの安定性を確保するために、「一群のノードが互いの位置を教え合う」という方法を利用する。本モデルでは、特にアプリケーションやSpontaneous Networking環境から抽出できる、ノード間の自発的なグループに着目する。その上で、ノードが互いを見失う確率をできる限り下げること、実用に十分耐える安定性を得る事を狙う。

## 2. G-P2P for Nomad: グループ指向の自律的な移動追跡

G-P2Pは、筆者が検討を行っている、グループ管理及びエンドノードでの自律動作という二つの特徴を持つ、分散ノード群における情報管理手法である。本論文では、ノマドの移動追跡に焦点を絞りG-P2Pを拡張したモデルである、G-P2P for Nomadについて述べる。ノマドとはノードの中でも特に、不定期にネットワークから切断し、別の地点に出現するノードである。以下、特に断りの無い限り全てのノードはノマドである。

### 2.1 前提

G-P2P for Nomadは、システムに参加する全てのノードが何らかの形でインターネット接続性を持ち、かつ状態を保存できる事を前提としている。具体的には、ノート型を含めたPCで、かつDHCPやDialup PPPで間欠的かつ非定常な接続を行うノードがあてはまる。もちろんPC以外に、iButtons<sup>10)</sup>のようなマイクロノードやPDAのようなノードも考えられる。

また、本研究では、ノードやアプリケーション毎に一つ以上のノードのグループを定義でき、参加できるものとしている。当然、ノードやアプリケーションは、目的に応じて複数のグループに所属できるものとする。

なお、インターネットへの接続がどのような手段になるかは、本モデルでは考慮しない。本技術では、IP層以下において相互に直接の通信が可能である、という前提のみを置いている。

## 2.2 要 求

G-P2P for Nomad に対する要求を以下にまとめる。

- (1) 位置識別子を集約するノードを持たず、外部の資源 (DNS 等) に依存しない事
- (2) 通信関係の構築が各所で局所化され、全体の調整が不要である事
- (3) 既知のノードの移動が追跡できる事

要求 1 および 2 は、Spontaneous Networking で扱うノードを管理する方法に由来する。トップダウンの世界的な協調の中で管理されるディレクトリでは管理コストが増大してしまう。そこで、その場 (アプリケーション任意の識別子ドメイン) に存在するノード同士の相互関係のみの管理に必要な機能が実現できる事が望ましい。従って、通信関係の生成と管理は識別子ドメイン内部で局所化された閉じた体系である必要がある。また、要求 3 は、通信によって実現した機能を後に再利用するために必要な条件である。

## 2.3 定 義

G-P2P for Nomad で想定するモデルは、ノード、グループ、通信媒体の 3 つの構成要素と、それぞれの識別子から成る。以下に、各構成要素について説明する。特にノードの動きは、第 2.4 図にて改めて詳しく述べる。

ノードは、通信の終端を収容する実体である。例えばノート PC や PDA が例にあたる。G-P2P for Nomad では、ノードはそれぞれ固有のノード識別子を持ち、一つ以上のグループに同時に所属する。また、ノードがインターネット上に安定して存在するとは限らず、利用者の都合や外界の変動によって位置識別子 (IP アドレス) は変化する。またノードは、同じグループに所属する他のノードの位置識別子をキャッシュし、交換する機能 (位置識別子キャッシュ) を持つ。また、位置識別子キャッシュのエントリは、位置識別子および位置識別子通し番号の組である。

グループとは、ノードの集合である。グループ自体は情報であり、実体を持たない。グループにはそれぞれ固有のグループ識別子が割り当てられる。また、グループはグループに参加しているノードのノード識別子のリストを持つ。

なお、ノード識別子およびグループ識別子に関して、固有である事を保証する根拠は UUID (Universally Unique Identifier)<sup>9)</sup> と同等であるものとする。つまり、十分広い識別子の空間の中で相互に独立な乱数による識別子生成を行う事により、識別子の衝突の可能性を無視できるものとする。

通信媒体はノードとノードの間に存在する通信路である。通信媒体の接続点には位置識別子を割り当て、それぞれの接続点を識別する。また、通信媒体内の通

信は位置識別子を終点として行うので、ノードの位置識別子を知らずに通信を行う事は不可能である。

ノードは、任意の時点で通信媒体に接続する。次回接続における位置識別子は予測不可能である。ノードは任意の時点で通信媒体から切断し、切断後、再接続を行うまでの間、一切の通信は不可能である。

なお、モデル内の各要素の位置付けの例を図 1 に示す。

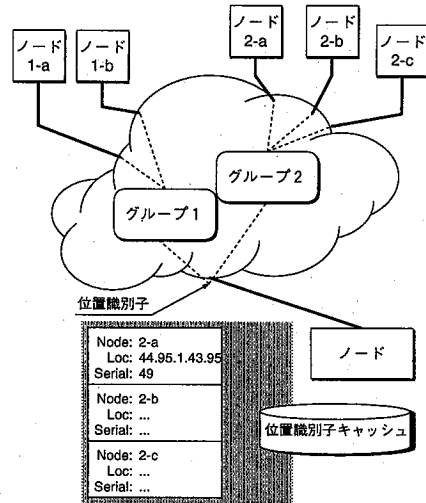


図 1 モデル内の各要素の位置付け

## 2.4 ノードの動作

ここでは、G-P2P for Nomad がどのように対向ノードの位置追跡を行うかを説明する。特に各ノードの動作を述べる。

### 2.4.1 グループ: 生成・参加・脱退

グループの生成と変更は、最低限以下の手続きで行うものとする。

- グループの生成
  - ノード A がグループ識別子  $G_1.id$  を生成する
- グループへの参加 (B が A の居る  $G_1$  へ参加)
  - ノード B はグループ識別子  $G_1.id$  と A の位置識別子  $A.loc$  を何らかの手段で知る
  - B は  $A.loc$  に参加メッセージを送る
  - A は B の位置識別子  $B.loc$  を  $G_1$  の位置識別子キャッシュに追加
  - A は  $B.loc$  に位置識別子同期メッセージを送る
  - B は A から受けた位置識別子同期メッセージを元に、位置識別子キャッシュを作成する
- グループからの脱退
  - A は  $B.loc$  に脱退メッセージを送る

- BはAに対応する位置識別子キャッシュに特定の値(脱退済を示す)を書き込む

なお、各メッセージに最低限含まれるべき情報は以下の通り。

- 各メッセージ共通
  - メッセージ送信者のノード識別子
  - メッセージ宛先のノード id
- 参加メッセージ
  - 参加を希望するグループ識別子
  - 自分の位置識別子
- 位置識別子同期メッセージ
  - 位置識別子同期メッセージ送信者について:
    - \* 位置識別子と位置識別子通し番号の組
  - グループの他のメンバそれぞれについて:
    - \* キャッシュされた位置識別子と位置識別子通し番号の組
- 脱退メッセージ
  - 脱退するグループ識別子

#### 2.4.2 単一グループ内における位置追跡

ノードがグループ内でどのようにメッセージを交換し、位置追跡を行うかについて説明する。

あるグループ  $G_1$  中のノード A が、位置  $A_1$  から位置  $A_2$  に移動する場合を考える。ここで、Aの移動は、 $A_1$  からの切断→移動→ $A_2$  への接続、という3つの段階を経て行われるものとする。

Aは $A_2$ への接続に際して、 $G_1$ に属する他のノード B および C に、新しい位置識別子である  $A_2$  を、位置識別子同期メッセージを用いて通知する。他のノードはノード中の位置識別子キャッシュの A のエントリを  $A_2$  に更新する事で、通信関係を維持できる(図2)。

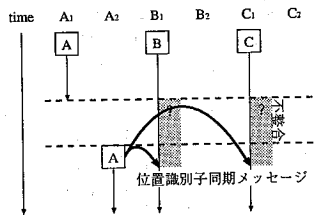


図2 位置識別子の通知と更新

#### 2.4.3 位置追跡の失敗

グループ内の通信関係の維持に失敗する場合を以下に述べる。

$A_1$  から接続した後  $A_2$  へ接続するまでの期間に、B および C がそれぞれの位置 ( $B_1$  および  $C_1$ ) からはなれてしまうと、相手を相互に見失った状態になる。仮にその後 B および C が  $B_2$  および  $C_2$  に再び接続しても、その時点での A および B と C との間で位置識

別子キャッシュの整合性が全く取れないため、新しい位置識別子の交換ができなくなる。つまり、Aは $B_1$  および  $C_1$ 、Bは $A_1$  および  $C_1$ 、Cは $A_1$  および  $B_1$  をそれぞれ位置識別子キャッシュに格納しており、それらを宛先にした位置識別子同期メッセージは目的を達しない(図3)。これをグループの崩壊と呼ぶ。

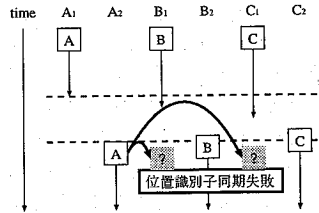


図3 グループの崩壊

#### 2.4.4 アソシエーション

単一のグループは、そのグループに属するノード全てがオフラインになった段階で崩壊してしまう。この可能性を減らすために、単一のノードが複数のグループに所属する、という前提を用いる。

G-P2Pでは、あるノードは複数のグループに同時に所属できる。つまり、そのノードは複数のグループの交点になる(図4)。これにより、このノードを共有するグループ間で、何らかのメッセージのやりとりを行う事ができる。

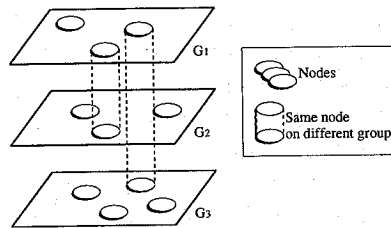


図4 グループの重なり

このような交点の存在を、より広いスケールで捉えると、少しづつ重なり合うグループの集合(アソシエーション)の存在を見出す事ができる。アソシエーションはネットワーク構造を持ち、有用な情報を交換できる可能性を持つ。ここで、見失ってしまったノードに関して、アソシエーションを利用したノード識別子の交換を行う事で、より広範囲に対する位置追跡を行う事ができる。

隣接したグループに所属するノードを再帰的に調べ、見失ったノードに到達する経路が一つでも存在すれば、ノードの位置追跡が可能になる。このようなアソシエーション内のグループ間に発生する経路をグ

ループ経路と呼ぶ。

なお、位置識別子同期メッセージによって相互に位置追跡できなかったノード同士が、お互いを検索するメッセージを送信する場合、その送信範囲を制御する必要がある。現在のモデルではアソシエーション内にフラディングを行う事を前提に設計を行っており、各メッセージはTTLを持つ。TTLはグループ経路上でいくつのグループにわたってメッセージを配送するかを示している。

### 3. シミュレーション

G-P2P for Nomad の実用可能性と限界を見極めるために、モデルを元にシミュレータを作成し、様々な初期条件を与えてモデルの性質を調べた。以下に、シミュレーションの結果を述べる。

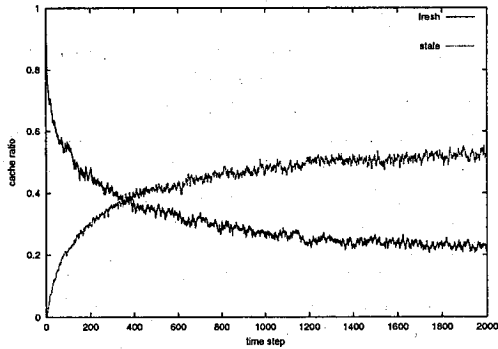


図5 位置識別子キャッシュの時間変化 ( $N_j = 3$ )

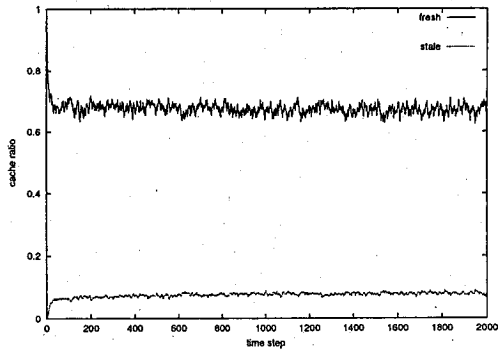


図6 位置識別子キャッシュの時間変化 ( $N_j = 5$ )

図5および6は、ノードとグループをそれぞれ1000与えた時の、各ノードの位置識別子キャッシュの状態の比率(縦軸)の時間変動(横軸)である。ここで、 $N_j$ はそれぞれのノードがいくつのグループに参加するかを決定するパラメータであり、図5では1ノードが3

つのグループ、6では5つのグループに参加している。

グラフ中“fresh”は整合キャッシュを、“stale”は不整合キャッシュを意味する。これらの図から、初期条件から安定系へ移行する様子が伺える。即ち、G-P2P for Nomad が安定する条件が存在し得る事を示す。

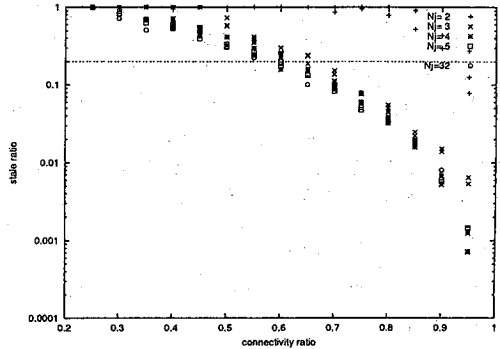


図7 ノードの存在率と位置識別子キャッシュ中の不整合キャッシュの比率の関係

図7は、各試行の結果を要約したものである。横軸にノードがオンラインである時間の全体に対する確率(存在率)、縦軸は対数で、2000単位時間後の全ノードの位置識別子キャッシュのうち不整合キャッシュの比率( $R_{s,2000}$ )である。また、初期条件はグループおよびノードそれぞれ100インスタンスずつ生成した。今回の試行では、 $R_{s,2000} < 0.2$ を可用性の目安とした。

図から、 $N_j = 2$ の時は系は不安定で、ほとんどの位置識別子キャッシュが不整合キャッシュになってしまう事が読み取れる。一方、 $N_j = 4$ 以上の時は、 $r_c > 0.7$ 以上になると  $R_{c,2000} < 0.2$ を実現する事が判明した。同時に、 $N_j$ を多くしてアソシエーションを密にしても、 $R_{c,2000}$ の向上に対する効果は小さい事が判明した。

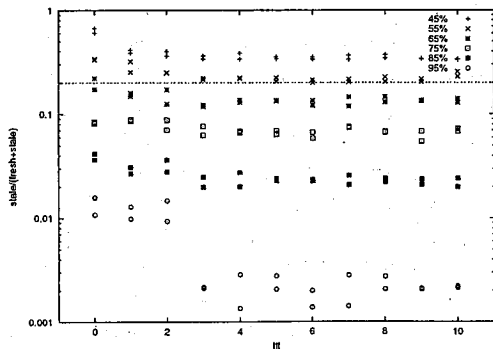


図8 メッセージ TTL の効果

図8は、同様のシミュレーションをメッセージのTTLに制約をかけて行った例である。横軸はTTL、縦軸は $R_{s,2000}$ である。また、それぞれの試行はノードの生存率を変化させて行っている。なお、この例において $N_j = 4$ である。

図8からは、TTLを向上させる事の効果が読み取れる。TTLが2以下の領域では、TTLを向上させる事により $R_{s,2000}$ が低下し、グループが崩壊しづらくなる効果が得られている。しかし、TTLが4以上の領域では $R_{s,2000}$ はあまり変化せず、グループの安定性に対する効果は限定的である事が読み取れる。このグラフからは、TTLはネットワークの規模に応じて適切な値が存在する事が読み取れる。

#### 4. まとめと今後の課題

全ノードが移動する環境における対向ノード位置追跡方式を論じた。特に、ノード同士が相互に位置識別子を更新し続けるモデルを提案し、シミュレータを用いてその性質を確認した。

シミュレーションの結果、あるグループに参加するノードの数がある程度以上あれば系全体が崩壊する可能性を極めて小さく抑える事ができる事が判明した。当然、その閾値は条件によって大きく異なる。特に、ノードがネットワークに接続している確率とあるグループに参加しているノードの数によって崩壊する可能性をある程度コントロールできる。

今後の課題を以下に述べる。

まず、G-P2P for Nomad の実際のアプリケーション環境下での応用を設計する必要がある。現在、ノードのDNSリゾルバを乗っ取る形でG-P2Pを実現する実装のデザインを進め、プロトタイプは完成している。今後、このプロトタイプを用いて、特に遅延やパケットロスに対してシステムがどのように振舞うか、特に多数のノードがG-P2P for Nomadに参加した環境下において決定的な性質の変化があるかを調査する必要がある。同時に、多数のノードが存在する場合のネットワーク資源の利用パターンも調査する。

アソシエーション内の情報配分および探索の手法についても改善の余地がある。既存の手法にも、OceanStore<sup>8)</sup>のように、ハッシュアルゴリズムを用いてデータを配分していく方法がある。しかし、前提としてネットワークが動的で、かつインフラストラクチャ的な安定したサーバ群を期待できない場合に、このような手法が適用できるのかは未調査である。

また、このような分散系システムにおいて、セキュリティは常に大きな問題である。中央に信頼すべきレジストリを持たないG-P2Pでは、どのようなセキュリティモデルを採用するか、注意深く検討する必要がある。

ある。一つの候補はJXTA Poblanoモデル<sup>7)</sup>のような分散与信モデルである。

本研究の今後の展望は以下の通りである。G-P2P for Nomadは特にノマドの追跡を目的としたモデルである。その背景にある思想として、ノードのグループとその重なりを基本要素とした自発的なノード間メッセージ交換の枠組がある。今回の研究、つまりG-P2P for Nomadの実現によって得られた知見は、G-P2Pとして一般化してまとめる。将来的にはセンサーノードネットワークやSpontaneous Networking的なネットワークの応用の中での、特にノード間の名前解決機構やサービス発見機構に適用していく展望である。

#### 参 考 文 献

- 1) Yusuke DOI, Tetsuro KIMURA, "G-P2P: Design and Evaluation of an Application-layer Autonomous Network" *INET2001 Poster Session*, June 2001
- 2) 岩崎陽平, 河口信夫, 稲垣康善, 「Touch-and-Connect: 無線機器間の接続指示手法」, ソフトウェア科学会, WISS 2001, 2001年12月
- 3) Laura Marie Feeney, Bengt Ahlgren, and Assar Westerlund, "Spontaneous Networking: An Application-Oriented Approach to Ad Hoc Networking" *IEEE Communications Magazine*, June 2001
- 4) Alex C. Soneran, Hari Balakrishnan, "An End-to-End Approach to Host Mobility" *Proc. of MobiCom, 2000*
- 5) Mitsunobu Kunishi, Masahiro Ishiyama, Keisuke Uehara, Hiroshi Esaki, and Fumio Teraoka, "IPv6: A New Approach to Mobility Support in IPv6" *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communication, 2000*
- 6) Vinton G. Cerf, "Beyond the Post-PC Internet", *Communications of the ACM*, Volume 44, Number 9, September 2001
- 7) Rita Chen and William Yeager, "Poblano, A Distributed Trust Model for Peer-to-Peer Networks" *Sun Microsystems Whitepaper*
- 8) John Kubiawicz, et. al. "OceanStore: An Architecture for Global-Scale Persistent Storage" In *Proc. of the Ninth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating System (ASPLOS 2000)*, November 2000.
- 9) draft-ieach-uuids-guids-01.txt IETF Internet Draft, not published.
- 10) TINI <http://www.ibutton.com/>