

Nomadic Agent System : インフラに依存しない位置情報サービス提供システム

屋代 智之[†] Thomas F. La Porta^{††}

モバイルエージェントは LBS (位置情報サービス) 分野において重要な役割を担うと考えられている。本論文では、モバイルエージェントがアドホックネットワークを用いて端末間を移動することにより、特定の物理的エリア内にエージェントがとどまる手法について提案を行い、その有効性を評価する。この手法を用いることで、エージェントはインフラを使用せずに、特定のエリアに十分な時間にわたって存在し続けることが可能となり、特定の位置に依存したデータ収集および提供を行うことができるようになる。著者らは利用者の密度に応じてこれらのエージェントの生存時間と、対象エリアからの位置誤差を評価した。また、エージェントの通信範囲を動的に変化させることで電力消費量を抑える手法である DRC (Dynamic Radius Control) を提案し、その有効性を示した。

Nomadic Agent System: Infrastructureless Location Based Service System

TOMOYUKI YASHIRO[†] and THOMAS F. LA PORTA^{††}

Mobile agents are expected to play a large role in providing location based services. In this paper we define and evaluate algorithms that enable mobile agents to move between hosts on adhoc network so that the agent may stay within a close proximity of its target area. Using this method, an agent can be deployed for a sufficient term without fixed infrastructure and remain in one area to gather and disseminate data depends on the area. We quantify the lifetime of these agents for several migration policies considering varying user densities.

Furthermore, we applied DRC (Dynamic Radius Control) which the agent can change the radius of the transmission area dynamically to reduce power consumption without reducing agent lifetime and the effectiveness of DRC is shown.

1. はじめに

モバイルエージェント技術は、無線、有線環境を問わずさまざまな場面に適用されている。一般にエージェントは、ある端末がそれ自身で実行できない機能を代行するために利用される。モバイルエージェントは、1つのデバイスの代わりにさまざまな地点においてある機能を実行するため、あるいはデータを収集するために利用され、デバイス自身が移動する必要性がないという特徴がある。

多くの LBS (Location Based Services : 位置情報サービス) の出現により、モバイルエージェントの役割はますます重要になってきている。LBS は、位置に依存する情報を提供するサービスである。LBS に関

する多くの研究では、携帯電話や無線 LAN の基地局などインフラを用いたシステムの利用が想定されている^{3),9),10),13)}。

インフラを利用したシステムは、多くの情報をサーバに集積し、さまざまな地点の端末に情報を提供できるという点で LBS に適している。しかし、サーバのリソースの制限などから、さまざまな局所的情報をその地点近傍にのみ提供するという事を考えると、必ずしも効率的ではない。

たとえば、広大なショッピングモールで LBS を利用して情報提供を行う場合、モール内には非常に多くの客が存在することが考えられる。ここで流される情報は、時限セールに関する情報であったり、迷子に関する情報であったり、広告などが考えられる。これらの情報は限られた範囲のみで必要であり、たとえばモール外にいる人間にはまったく必要のない情報である。このようなサービスを最も効率良く提供するためには、情報収集および提供を、情報を必要とする特定のエリ

[†] 千葉工業大学

Chiba Institute of Technology

^{††} ペンシルバニア州立大学

Pennsylvania State University

ア内で行う必要があると考えられる。

インフラを利用しない手法として、7DS⁶⁾ではアドホックネットワークを利用して情報提供する手法を含めて検討しているが、1つの情報を拡散させ、共有する手法については検討しているものの、特定の場所に依存して情報を物理的位置に束縛する方法は検討していない。

Data on the Road¹¹⁾では、ORDIという手法を提案し、携帯端末を用いて情報を共有するうえで、システムリソースを効率的に利用する方法を検討している。この方式はインフラを利用せず、アドホックネットワークを利用するが、情報は拡散させ、各端末レベルでこれらを必要時間保持する方法であり、情報を物理的位置に束縛しているわけではない。

本論文では、インフラを必要としないLBSを提案する。ここでは、エージェントが特定のエリアにおいて自身の物理的位置を変更しないように端末間を移動しつつ、情報収集・提供を行う^{12),14)}。過去の多くの研究が、アドホックネットワークなどの不安定なネットワーク環境で効率良く情報を得るために、情報を効率良く分散させるアプローチをとっているのに対して、本論文では局所的な情報を、その特定の場所に物理的に固定させて保持させることによって、近傍に移動してきた端末が情報を得られるという手法であり、端末が存在する限り、すなわち端末を持った人がその場所にいる限り、その場所に情報をとどめることを可能にする。また、物理的な位置を基準にしているため、ネットワークの不安定さにかかわらず、エージェントが存在している限りその場所に関する情報は取得できる。

本論文における位置情報サービスでは、インフラを利用しないため、エージェントはモバイル端末上で動作する。通信にはアドホックネットワークを利用することを想定する。通信メディアとしては、無線LANのアドホックモードの利用などが考えられる。エージェントを保持したモバイル端末は移動するため、エージェントは自身の位置を特定の場所周辺に維持するために、端末間を移動しなければならない。多くのエージェントシステムでは、情報収集や提供のためにエージェントが異なる場所に移動するが、本システムのエージェントは自身の位置を維持するために、端末を切り替える。

以降、このような動作を行うエージェントをNomadic Agent (NA) と呼び、NAを用いた位置情報サービス提供システムをNAシステムと呼ぶ。

NAにはオーナという概念はなく、端末間を移動するが、そのために自身の位置を厳密に維持することが

できない。このため、NAが活動を行うエリアとして、有効範囲を定義する。有効範囲は、特定の地点と半径で規定される。NAがNAを保持している端末とともに有効範囲から出た場合、NAで提供されているサービスは停止する。このような場合、NAは消滅するか、早急に有効範囲に戻る必要がある。NAシステムでは、情報はNAのみが保持しているため、NAが消滅すると、NAに保持されている情報も消滅する。

本エージェントの生存時間（生成されてから消滅するまでの時間）は、アプリケーションによって異なる。ショッピングモールのような場所でのアプリケーションを考えた場合、モールが開店してから閉店までの間、NAが生存していることが望ましい。他のアプリケーションでは、これに対して若干の長短が生じることが考えられる。

ここでは、モールのようにつねにある程度以上の人口密度がある環境を考え、その中の一定の地域で複数のNAが開店から閉店までの間、生存し続けることを目標とする。このため、5つのNAが午前10時～午後6時までの8時間程度（30,000秒）生存することを目標値と定める。

本論文では、NAが移動するための基本的な方式を提案し、評価を行った後、動的に通信半径を変化させるDynamic Radius Control方式を提案して、送信電力を低減しながら、十分な時間NAを生存させる手法について検討を行う。

2. ネットワークモデル

本論文においては、NAの基本的な特性を検討するため、すべての端末が自身の物理的位置を知ることができるかと仮定した。このための技術として、GPSに代表される全地球規模の測位システム²⁾やセンサを用いた位置検出システム^{1),4)}などが検討されている。また、各端末 h は、通信範囲 $R_t(h)$ で表される送信機と受信機を保持している。

さらに、以下の条件を仮定した。

- 各端末が他の端末との通信リンク確立にかかる時間は1秒未満である。
- 各端末はブロードキャストの送信、受信を行える。
- 通信における衝突は無視できるか、十分に小さい時間で回復される。
- すべての端末は、自身が通信範囲内にあるすべての他の端末の送信情報を受信できる。

エージェントは、モバイル端末上で動作するソフトウェアである。エージェントは、その機能を実行するうえで必要な場合に、端末間を移動する。このための技

術も数多く検討されている^{7),8)}。本論文におけるエージェントの移動に関しては、以降に述べるようにエージェントの物理的位置の変化によってその処理が開始される。

ここで、ある点 $p_i(x, y)$ を、 i 番目の NA が情報を保持する際の目的とする地点とする。また、各 NA の有効範囲 (Active Area) は、 $p_i(x, y)$ を中心として半径 R_a^i で表される。 $p_i(x, y)$ を有効範囲の中心 (Center of Active Area: CoA) と定義する。NA は自身がこの有効範囲の中に存在する場合に、サービスを提供する。もしも NA が有効範囲から出てしまった場合、サービスの提供を停止する。次章で述べる方式に依存するが、このような場合、NA は消滅するか、有効範囲へ戻るための移動を行う。

エージェントの移動を容易にするために、モバイル端末は相互に通信を行う必要がある。あるモバイル端末が、有効範囲内のすべての端末と通信を行えることを保証するためには、端末 h の送信範囲は、有効範囲の 2 倍必要となる。すなわち、 $R_t(h) \geq 2R_a^i$ となる。

エージェントが端末間を移動するためには、他の端末の位置の認識や移動にともなう通信処理にかかる時間が必要であるため、さらに保持エリア (Holding Area) を定義する。この保持エリアは有効範囲同様、 $p_i(x, y)$ を中心とし、その半径は有効範囲よりも若干小さく設定する必要がある。これは、エージェントが保持エリアを出てから移動処理を開始し、有効範囲を出る前までに移動処理を終了するためのマージンが必要であるためであり、現実には移動速度、移動方向の分布状況などから適当な値を求める必要がある。保持エリア内では、各 NA は現在 NA が保持されている端末内にとどまり、移動処理は行わない。自身を保持している端末の位置が保持エリア外に出たことを NA が検出した場合、移動するために、保持エリア内に存在する端末の検索を行う。保持エリアの半径を R_h と定義する。 $R_h < R_a^i$ である。検索された端末から、移動先となる端末を選択する

図 1 にこれらの値の関係を示す。

3. 基本方式

NA システムでは、エージェントは自身の位置を維持するために端末間を移動し、位置に依存した情報を無線通信を用いて周辺の端末に提供する。

エージェントが最初に発生する方法については、

- 周辺に NA が存在しておらず人口密度が高い場合に、個々の端末の判断で NA を発生させる、
- なんらかのインフラあるいは固定端末の補助のも

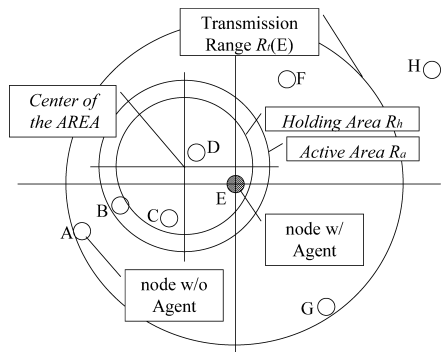


図 1 Nomadic Agent
Fig. 1 Nomadic Agent.

と、近隣のどこか (駅、モールの入り口など) で NA を発生させ、NA はマルチホップの通信によって自身の目的地となる領域に移動する、の 2 つの方式が考えられるが、本論文ではこの点に関しては検討を行わず、なんらかの手法を用いて NA が発生している状況について検討する。

通常、NA は歩行者が保持する端末上で動作する。ここで、エージェントを保持している端末を NA 端末と呼ぶ。NA 端末は、端末を保持している人に依存して移動するため、NA は NA 端末の位置を制御することはできない。このため、各 NA は、自身の現在位置を測定し、保持エリア外に出たことを検出した場合に、保持エリア内にいる新しい端末へと移動するために、端末を検索する。

3.1 移動先となる端末の選択方法

ここでは、移動先となる端末の選択方法として、3 つの方式を検討する。各方式とも、NA 端末は周期的なブロードキャストを行い、NA を保持しない端末は、このブロードキャストに応答して自身の位置を送信することによって、各 NA が周辺のモバイル端末の ID と位置情報を含むリスト (近接端末リスト) を保持・更新していることを仮定している。

ランダム選択方式

この方式では、エージェントは近接端末リストから、保持エリア内に存在する端末をランダムに 1 つ選択し、その端末へと移動を行う。これは最も簡単な方式であるが、移動した端末が最適な端末ではない可能性があり、場合によってはその端末へ移動した直後に保持エリアから出ようとしている場合も考えられる。この場合、NA は再度移動を行わなければならない。

位置選択方式

この方式では、NA は CoA に最も近い端末を選

択する。NA の移動先となる端末は、ランダム選択方式よりも長く保持エリア内に存在することが期待できる。しかし、新しい NA 端末が有効範囲内に存在する時間は、現在位置だけではなく移動速度によっても変化する。このため、位置選択方式による選択が、最適ではない端末を選択する可能性は依然として残る。

予測生存時間選択方式

この方式では、NA は近接端末リストに各端末の ID と位置だけではなく、直前のブロードキャスト時の位置と時刻も保持する。これによって、移動速度と方向の推測を行い、今後もその移動速度、方向を維持すると仮定して、保持エリア内に各端末が存在し続ける時間を計算し、その時間の最も長い端末へと移動を行う。

3.2 エージェントの動作

状況によっては、NA は移動先となる端末を有効範囲内に見つけることができない場合が想定される。このような場合、NA は NA 端末とともに有効範囲から出てしまい、自身の位置に依存する情報を提供できなくなってしまう。このような状況を Deactivated State と呼ぶ。有効範囲内に存在している NA は Activated State (稼働状態) であり、情報提供を行うが、有効範囲から出てしまった NA は Deactivated State となって再度有効範囲に戻るまでは情報提供を行わない。

このような状況の NA の動作には 2 つの方式が考えられる。

サドネス方式

この方式では、NA 端末が NA を保持したまま有効範囲から出てしまった場合に、NA は消滅し、NA が保持している情報は失われる。この後、CoA 近傍に端末が移動した場合には、その端末が新たに NA を再発生させることは可能である。この方式は非常に単純であり、いくつかのアプリケーションに対しては有効性が高いものと考えられるが、消滅してしまった NA が保持していたすべての情報が失われてしまうという点で問題は残る。なお、再発生の仕組みについては、現状では明確に規定していないが、本論文のように周辺にも NA が存在する場合には、それらの NA が周囲の NA の位置情報を管理することによって、消滅した NA 方面へ移動する端末を利用して NA を再発生させるという手法が考えられる。

リカバリ方式

NA 端末が有効範囲から出てしまったあとも、NA は有効範囲内に戻ろうと努力をする方式である。

表 1 シミュレーション条件
Table 1 Simulation conditions.

条件	値
シミュレーション範囲	400 m × 400 m
有効範囲の半径 (R_a)	50 m, 40 m, 30 m
保持エリアの半径 (R_h)	$R_a - 5$ (m)
通信半径 (R_t)	$2 \times R_a$ (m)
NA の数	5

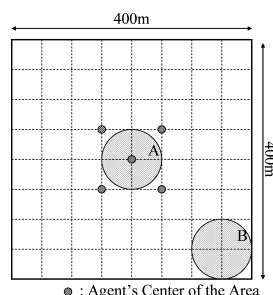


図 2 シミュレーション環境
Fig. 2 Simulation environment.

一般的には、直接有効範囲に戻る (1 ホップで戻る) ことが考えられる。しかし、NA が直接、有効範囲に戻ることはできない場合には、有効範囲に近い端末にいったん移動し、その後で有効範囲に戻ることも可能である。この方法を特にマルチホップリカバリ方式と呼ぶ。

この方式は、NA が保持している情報をより長く利用できる点で有効性が高い。しかし、NA が有効範囲に戻るまでに端末の移動速度に依存した時間がかかるという点で問題が残る。マルチホップリカバリ方式を使用した場合、NA は周囲の端末の移動方向を把握する必要がある。このため、予測生存時間選択方式と同様の情報を近接端末リストに保持する必要がある。本論文では、マルチホップリカバリ方式においては、通常の移動においても予測生存時間選択方式を採用するものとする。

4. 基本方式の評価

本章では、3 章で述べた基本方式について、シミュレーションを用いて評価する。シミュレーション条件を表 1 に、シミュレーション環境を図 2 に示す。ここで、点線の間隔は 50 m であり、中央部付近に 5 つの NA を発生させる。保持エリアの半径を有効範囲より 5 m 小さい値としているが、これは移動速度 (後述) が最大値の場合でも保持エリアを出てから有効範囲を出るまでに最低約 3 秒かかることを意味する。この時間はエージェントが他の端末を検索して移動する

のに十分な時間であると考えられる。また、有効範囲の半径として 50 m～30 m の値を用いているが、これは無線 LAN などを用いられる一般的な通信範囲を基準にして定めた値である。なお、図中 A, B については 6 章で述べる。

シミュレーション上では、すべての端末が Random Way Point モデル⁵⁾によって移動する。移動速度は我々が実験的に近隣の交差点、道路上などで測定した歩行者の移動速度の実測値をもとに、0.9 m/s から 1.7 m/s の範囲内で正規分布をとるものとした。移動の目的地についてはランダムに選択し、目的地到着後、ランダムな時間静止した後に、新たな目的地と速度を設定し、そこへ向かって移動を行う。静止時間は、平均を 30 秒とした指数分布乱数により設定した。

さらに、各端末はある瞬間に最大で 1 つのエージェントのみを保持できるもの (1 端末 1 エージェントルール) とした。これは、1 つの端末が複数のエージェントを保持してしまうことによる過負荷を避けるためである。

4.1 NA の平均生存時間

最初に、さまざまな人口密度下における NA の平均生存時間を評価した (図 3)。ここでは、NA が移動先端末を選択する手法として、予測生存時間選択方式を採用した。また、NA が有効範囲外に出てしまった場合にはマルチホップリカバリ方式を用いて、有効範囲に戻ろうとするものとした。ただし、NA は CoA から $3 \times R_a$ 以内の距離にいる間は生存を続けるものの、この範囲を出てしまった場合には消滅するものとした。これは、この範囲内に NA 端末が存在している間は、有効範囲と通信範囲の重なった部分に端末が存在していれば NA は 1 ホップで有効範囲まで戻ることが可能であり、1 ホップで戻ることができない場合でも、通信範囲内に存在する別の端末経由でマルチホップで有効範囲に戻るための努力を続けることを意味している。有効範囲と通信範囲がオーバーラップした領域に端末が存在しない場合、NA は有効範囲近傍の端末へと移動を行う。もしも有効範囲と通信範囲がオーバーラップした領域がなくなった場合、NA は有効範囲への復帰を諦め、消滅する。

図 3 において、縦軸は生存時間と稼働時間を対数表記したものである。稼働時間とは、NA が生存中に有効範囲内に存在した累計時間であり、生存時間は NA が発生してから消滅するまでの時間である。この 2 つの時間の差は、NA が有効範囲外に存在していた時間を示しており、有効範囲に戻るためにかかった累計時間を表している。

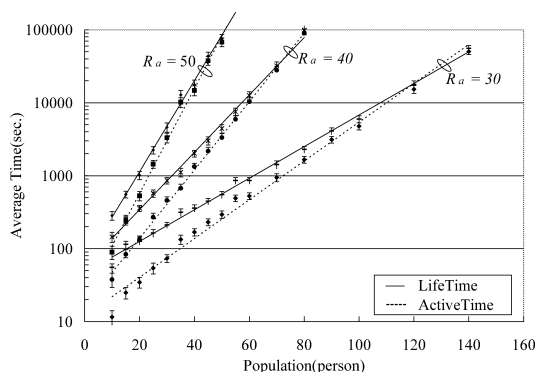


図 3 平均生存時間と平均稼働時間

Fig. 3 Average life time and active time.

横軸は、シミュレーション環境上に存在した人口 (端末数) である。有効範囲の半径 R_a は各プロットの脇に示してある。また、前述のとおり、通信半径は $R_t(h) = 2R_a$ で表される。

図 3 より、NA の生存/稼働時間は、人口密度が大きくなるにつれて、指数関数的に増大していることが分かる。同様に、通信半径も生存/稼働時間に対する影響が大きい。通信半径が大きくなると、NA は移動が必要な際に、より多くの移動先候補となる端末を発見することが可能になるため、これによって生存し続ける確率が大幅に高まっていることが分かる。

なお、それぞれの通信半径における近似直線で、人口密度が高い部分で生存時間と稼働時間が逆転しているが、これは直線近似したための誤差であり、実際には稼働時間が生存時間を上回ることはない。

4.2 NA 生存数と時間の関係

図 4、図 5 に $R_a = 50$ m とした場合の時間経過による NA の生存数と稼働数の変化例を示す。図 4 における人口は 40 人であり、図 5 は 20 人の場合を示している。

これらの図より、リカバリ方式の有効性が分かる。もしも NA がリカバリできずに消滅する場合、稼働している (Active 状態の) NA の数は単調減少となる。NA がリカバリできる場合には、再度稼働状態に復帰することが可能なため、稼働数が NA の初期の値に戻っている。NA の生存数が減少しているところは、NA がリカバリを諦めていることを表している。しかし、この人口密度においては、4,000 秒経過時点で、まだ 1 つの NA が生存している。

図 5 のように、より低い人口密度の場合、最後の 1 つになった NA は、他の NA よりも非常に長い生存時間を持っていることが分かる。これは 1 端末 1 エージェントルールが原因であると考えられる。多くの NA が

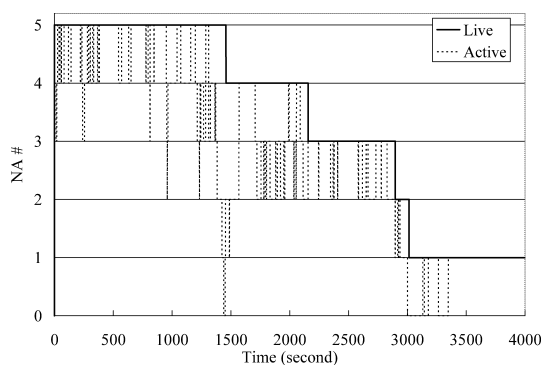


図 4 人口 40 人のときの生存数と稼働数

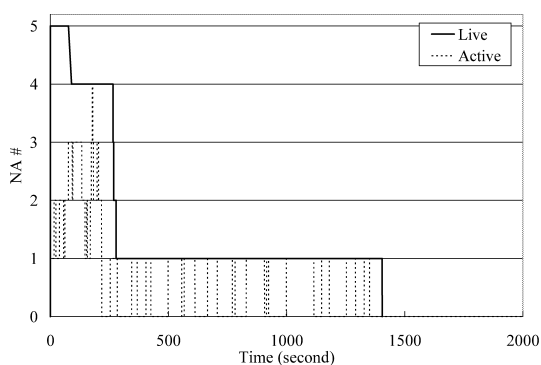
Fig. 4 Number of alive on $pop. = 40$.

図 6 人口 40 人, 有効範囲 30 m のときの生存数と稼働数

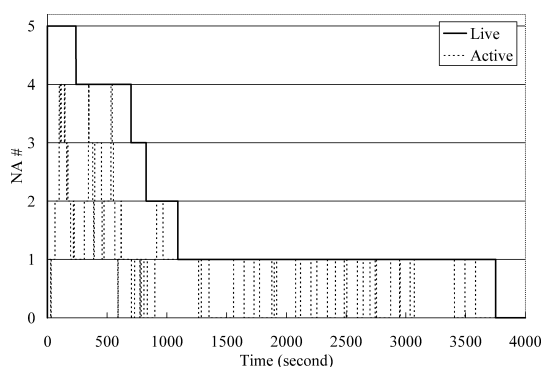
Fig. 6 Number of alive on $pop. = 40$ and $R_a = 30$ (m).

図 5 人口 20 人のときの生存数と稼働数

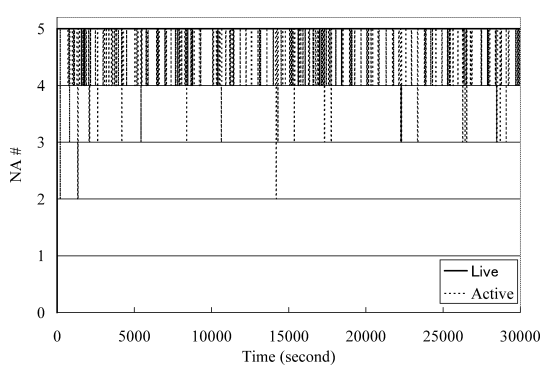
Fig. 5 Number of alive on $pop. = 20$.

図 7 人口 80 人のときの生存数と稼働数

Fig. 7 Number of alive on $pop. = 80$.

生存している場合、移動先候補となるべき端末がすでに NA を保持していると、その端末は移動先から除外されてしまい、結果として移動先端末がなくなってしまう。これに対して、NA が消滅していくに従い、このような除外候補が減少することから、NA が生き残る可能性がより高まるものと考えられる。

図 6 に、異なる有効範囲の半径の結果を示す。ここでは、人口は 40 人、有効範囲の半径 R_a は 30 m である。このとき、最後の NA は約 1,400 秒で消滅しており、図 4、図 5 と比べると非常に短い。

これらの結果より、NA の生存時間に関しては、有効範囲の半径による影響の方が、人口の変化による影響よりも大きいと判断できる。

図 7 に、人口が 80 人で有効範囲の半径 R_a が 50 m の場合の結果を示す。ここでは、すべての NA がシミュレーション終了時 (30,000 秒経過時) まで生存している。

表 2 に、図 7 の場合の、NA の稼働数の時間比率を示す。この結果より、ほぼ 99% の確率で、4 つ以上の NA が稼働していることが分かる。これは多くのアプ

表 2 稼働数の時間比率

Table 2 Ratio of active number.

#	time (sec.)	ratio (%)
5	26,564.8	88.55
4	3,127.8	10.43
3	287.6	0.96
2	19.8	0.07
1/0	0	0.00

リケーションでの利用を想定した場合に、非常に重要な特性である。同条件下でさまざまな乱数系列を用いて多くのシミュレーションを実行した結果、95%以上の確率で 5 つすべての NA が 30,000 秒以上生存することが確認された。これは 8 時間超のサービスがほぼ安定して実現可能であることを示している。以降、この条件を本論文における目標値とする。

5. Dynamic Radius Control 方式

本章では、新たに NA の生存に関する目標の表現方法を導入し、それを実現するための方式を提案する。目標は、 t 個の NA が期間 L_T 後に x の確率で生存

する、と表現する。本論文での目標値は、30,000 秒後 ($L_T = 30000$ s) に 5 つの NA ($t = 5$) が 95% の確率 ($x = 0.95$) で生存することである。

ここで提案する Dynamic Radius Control 方式では、周辺の推定端末密度に応じて、有効範囲の大きさを動的に変更することにより、NA が所望時間生存できるように調整する。

有効範囲の大きさを動的に変更することにより、情報を収集・提供できる範囲も変化することになる。NA システムでは、ある地点近傍でのサービス提供を目的としているため、有効範囲は固定的であることが望ましいが、サービスによってはある地点になるべく近い範囲でのみ情報提供を行いたい場合も考えられる。このような場合、人口密度が高い場合に有効範囲を縮小させても、ある地点周辺で情報を得られる端末、情報を収集できる端末の数は減少しない。逆に、特定地点近傍だけの情報を処理できる意味では、有効性が高まる場合もあると考えられる。

なお、本方式ではエージェントが、端末の持つ通信範囲を制御することが可能であることを前提としている。

多くの場合、有効範囲の半径および通信半径を十分に大きくすると、NA の生存時間を長くすることが可能である。本方式は、この半径を可能な限り小さく維持するための提案である。これには 2 つの効果が考えられる。1 つは、通信半径を変更することによって、電力消費を抑えることが可能となることであり、もう 1 つは、有効範囲を小さくすることによってより特定の地点に対して近い範囲でより正確な情報提供を行うシステムが可能となる点である。半径を小さくしすぎてしまうと、NA の消滅につながり、結果として十分な生存時間は得られず、大きくしてしまうと電力消費が大きくなり、また正確性を必要以上に欠いてしまう。

そこでまず、人口に応じて必要とされる半径を算出した。

p を 30,000 秒経過するまでに NA が消滅する確率と定義する。式 (1) は平均が $1/\lambda$ である指数分布を、式 (2) は、その累積分布を表している。

$$P(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$$\int_0^T P(t) dt = 1 - e^{-\lambda T} \quad (2)$$

30,000 秒経過するまでに 95% の確率で 5 つの NA すべてが生き残るためには、式 (3) を満たす p を求める必要がある。

$$(1 - p)^5 = 0.95 \quad (3)$$

この結果、式 (4) が得られる。

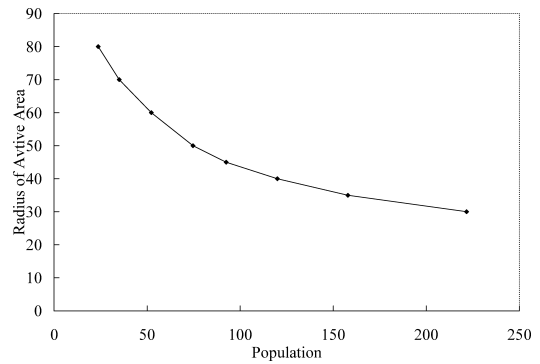


図 8 Dynamic Radius Control モデルにおける必要半径
Fig. 8 Transmission range on Dynamic Radius Control model.

$$p = 1.02062 \times 10^{-2} \quad (4)$$

30,000 秒経過時の NA の消滅確率をこの p 以下にするために必要な条件は、式 (2) と式 (4) より、以下の式で表される。

$$1 - e^{-\lambda x} = 1.02062 \times 10^{-2} \quad (5)$$

これより、必要とされる平均生存時間は以下の式で表される。

$$\frac{1}{\lambda} = 2.924 \times 10^8 \quad (6)$$

これを満たす条件を求めるために、図 3 より人口ごとの平均生存時間を求め、そこから目標を満たす通信半径を求めた結果を図 8 に示す。

図 8 より、NA の生存時間に対する人口変化の影響は、有効範囲の半径を変化させることで十分補えることが分かる。このとき、通信半径も同時に変化する。

このためには、まず、各 NA は自身周辺の人口密度を推定し、そこから目的に合うように半径を制御しなければならない。図 8 の結果より、求められた人口密度に対して必要とされる半径が求められることになる。

NA システムでは、ブロードキャストによって得られる情報を人口密度の推定に用いた。すべての端末は、定期的にブロードキャストを行い、自身の存在を周辺の端末に通知する。これを収集することによって、周辺の端末のリストを得ることが可能である。

ここで、たとえば、端末 h_i について考える。端末 h_i は、自身まで電波の届く端末に関するリストを保持している。通信半径は動的かつ端末単位で独立に変化するため、それらの端末が h_i と同じ通信半径を持っていることは保証されない。また、それらの端末が h_i からのブロードキャストを受信できていることも保証されない。

最も単純に考えると、 h_i は自身が受信できるブロードキャストの数と自身の通信半径 $R_t(h_i)$ をもとに周辺の人口密度を推定することが可能である。この方式は単なる端末数の推定であり、通信半径の変動により誤差が生じる。さらに、別の問題も発生する。たとえば、もしも端末 h_i が人口密度が高いと判断した場合に、 h_i は自身の通信半径を減少させる。しかし、 h_i が受信できる情報は、周辺の端末のブロードキャスト情報であり、 h_i 自身のブロードキャストの通信半径と直接の関係はない。このため、これらの端末が直前のブロードキャスト時と通信半径を変化させていない場合、その前に受信した端末数と同数のブロードキャストを受信することとなる。結果として、 h_i はさらに通信半径を減少させることとなる。このような現象が続いた場合、 h_i は通信半径を過度に減少させることによって、孤立化してしまうことになる。

このような不安定性を排除するために、ここでは周辺の端末の 1 ホップ端末の情報をを用いた。各端末は、自身の 1 ホップ端末の数と通信半径を含めた情報をブロードキャスト情報に含める。これによって、このブロードキャストを受信した端末は、自身の 2 ホップまでの端末の情報を得ることとなる。

各端末は基本的に同期しているわけではないので、ブロードキャストは各端末が個別に持っている時間に依存してたとえば 1 秒などの固定間隔で周期的に行われる。このため、 h_i はその固定のブロードキャスト間隔の間に、すべての周辺端末のブロードキャストを 1 回受信することが可能である。

端末 h_i について考えると、自身のブロードキャスト周期の最初に、ブロードキャストの受信を開始し、同時に自身の 1 ホップ端末および 1 ホップ端末経由の 2 ホップ端末の数をカウントする。同時に、 h_i は自身の 1 ホップ端末の数を入れた情報をブロードキャストし、周辺の端末にこれらの情報を知らせる。

結果として、 h_i は、自分自身を含む 2 ホップ端末の数を知ることとなる。ここから、 h_i は、1 ホップ端末 1 台あたりの 2 ホップ端末の数を求めることが可能である。この情報には、 h_i 自身も含まれているため、 h_i が通信範囲を減少させた場合には、この値も減少することとなり、結果として不安定性が大幅に取り除かれることとなる。

これらの情報から、以下の式によって基本推定人口密度を算出した。

$$pop_{est} = \frac{(2hop_t + 1hop_t + 1hop_t)}{1hop_t + 1} \times \frac{400^2}{PI \times r_{ave}^2} \quad (7)$$

ここで、 pop_{est} は基本推定人口密度（ここでは、シミュレーション領域である 400 m×400 m の人口を表す）、 $2hop_t$ は 2 ホップ端末の数、 $1hop_t$ は 1 ホップ端末の数、 r_{ave} は端末自身と 1 ホップ端末の通信距離の算術平均を表す。

これに加えて、半径の大きな変動を減衰させるためにダンピングファクタ d を導入した。

$$pop_t = d \times pop_{t-1} + (1 - d) \times pop_{est} \quad (8)$$

ここで、 pop_{est} は上記式 (7) により算出された基本推定人口密度であり、 pop_t は、時刻 t における推定人口密度、 pop_{t-1} は直前に式 (8) によって求められた推定人口密度を表す。

本論文では、このダンピングファクタとして、0.9 を採用し、推定を行う間隔を 1 秒と規定した。ダンピングファクタ d によって、通信範囲の変化量の安定性が高まる。

人口密度を推定することにより、NA の有効範囲を変化させることが可能となる。推定された人口密度と図 8 から、通信半径が算出される。有効範囲は通信半径の 1/2 である。

しかし、ここで求められた人口密度はあくまでも推定値であるため、予測誤差により NA が消滅することが考えられる。これを回避するために、緊急モードを導入する。

5.1 緊急モード

Dynamic Radius Control 方式では、各端末は周辺の人口密度を推定する。しかし、周辺の端末の分布は片寄っており、このような場合に NA が移動先を見つけれずに消滅してしまうことが考えられる。

NA が有効範囲から出てしまった場合には、NA はこの範囲に戻るための努力を行う。もしも NA が有効範囲に戻ることができない場合、自身の生存範囲に近接している端末への移動を試みる。この際に緊急モードに移行する。緊急モードでは、NA 端末は、自身の通信半径を最大値に設定し、緊急フラグを立てて自身の情報をブロードキャストする。緊急フラグが立った情報を受け取った端末は、次にブロードキャストする際に 1 回だけ、自身の情報を最大限の送信出力で送信する。

この方式を用いることにより、緊急モード中の端末は、より多くの周辺端末の情報を取得することができ、結果として移動先を発見できる確率が飛躍的に高くなる。

本論文では、この最大通信範囲を 140 m に設定した。

6. シミュレーション結果

我々は、Dynamic Radius Control 方式に緊急モードを導入した方式について、以下の3つの環境で評価した。

- (1) 人口固定モデル
- (2) Hot Spot モデル
- (3) ショッピングモールモデル

人口固定モデルは、ここまでのシミュレーションで使用してきたモデルである。端末の数は固定であり、シミュレーション終了まで変化しない。このためシミュレーション環境上では、どこであっても平均人口密度はあまり変化しない。

Hot Spot モデルでは、半径 50 m の円形の特定領域があり、各端末はそこにある程度集中する。このため、この領域およびその周辺は、他の領域より人口密度が高いことになる。本モデルは、Random Way Point 移動モデルを変更し、目的地を決定する際に 50% の確率でその特定の領域になるようにして実現した。残りの 50% については、従来どおりランダムに目的地を選択する。

ここでは、Hot Spot モデル上で2通りのケースについて検討を行った。1つは Hotspot1 と呼ばれるモデルであり、Hot Spot がシミュレーション環境の中心に位置する（図2：A の位置）。もう一方は Hotspot2 と呼ばれるモデルであり、シミュレーション環境上の右下から X 軸の負の方向、Y 軸方向にそれぞれ 50 m 離れた位置に Hot Spot が存在する（図2：B の位置）。Hotspot1 モデルでは、NA が Hot Spot の近傍に位置しており、Hotspot2 モデルでは、これが離れている。

シミュレーションによって得られた、5つのNAが30,000秒経過後、5つとも生存している確率を図9に示す。この図において、“Uniform”と書かれているデータが、人口固定モデルを表す。

人口固定モデルと Hotspot1 モデルの場合、50人以上の人口において、目標となる5つのNAの30,000秒以上の生存確率95%が達成されている。Hotspot2 モデルの場合は人口60人以上が必要となった。

図10に、通信半径 R_t の平均値を示す。この図において、“Agent”と書かれたデータは、NA 端末だけの平均送信半径を表す。これはシミュレーション環境中心付近の人口に大きく依存する。一方、“Node”と書かれたデータは、シミュレーション環境上の全端末の平均送信半径を示している。

これらの値は、Dynamic Radius Control 方式と、人口密度推定の有効性を示しているといえる。

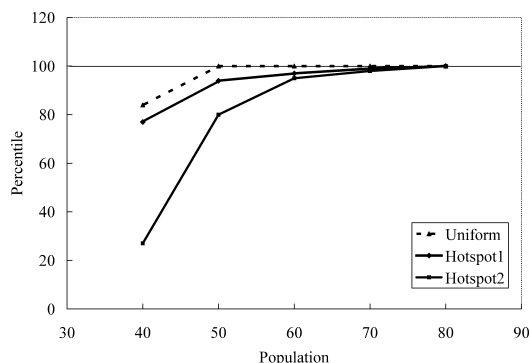


図9 人口と5つのNAが30,000秒生存する確率
Fig. 9 Population vs. 5 NA live percentile after 30,000 sec.

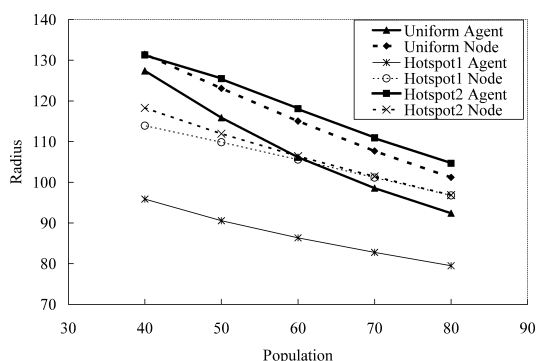


図10 平均送信半径
Fig. 10 Average transmission radius.

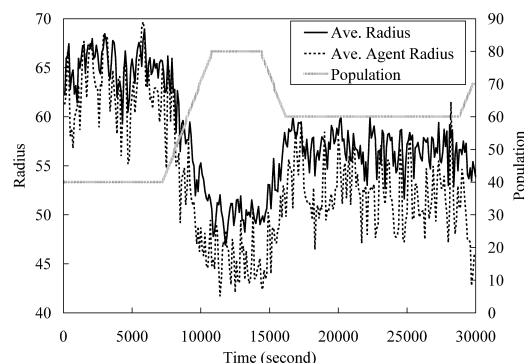


図11 ショッピングモールの結果
Fig. 11 Mall result.

ショッピングモールモデルでは、人口密度は時刻によって変化する。本モデルでは、シミュレーション上の人口を図11におけるグレー線のように変化させた。本モデルのシミュレーションでも、すべての端末は人口固定モデル同様、Random Way Point モデルによって移動を行う。

この条件で30,000秒分のシミュレーションを異な

る乱数系列を用いて 100 回行い, 5 つの NA がシミュレーション終了時点で生存している確率を求めた結果, 95%であった。

図 11 に, このときの有効範囲の半径と人口の変化を示す。ここで, “Ave. Radius” とは, 全端末の有効範囲の平均半径を示し, “Ave. Agent Radius” とは, NA 端末の有効範囲の半径の平均値を示す。この値は測定された人口が異なるため, 全般に Ave. Radius の結果より小さくなる。シミュレーション環境の周辺部では, 環境外に端末が存在しないため, 相対的に人口密度が低くなるのが原因である。NA はすべてシミュレーション環境の中心付近に位置しているため, NA 周辺の人口密度は相対的に高くなり, 結果として Ave. Agent Radius の結果が小さくなっている。

図 11 より, 有効範囲の半径は, 人口の変化に追従してほぼリアルタイムに変化していることが分かる。

7. ま と め

位置情報サービスを提供するために, Nomadic Agent (NA) を提案した。NA は, エージェントが移動する技術を利用して, 自身の位置を目標とする物理的領域内に維持することを可能とする。本論文では, NA の機能を実現するために, シミュレーションを用いて生存時間の観点で評価した。この結果, 提案した Dynamic Radius Control (DRC) の有効性が示された。

さらに, ショッピングモールのような環境に DRC を適用した場合に, 有効範囲の半径が人口密度の変化に適応して動的に変更されることおよびその有効性が示された。これらのことから, DRC を用いた NA は, エージェントの生存時間を減らすことなく, 電力消費量を減少させることが可能であるといえる。

DRC を用いた NA を用いることによって, 特定の場所において情報を収集し, あるいは提供する, インフラを必要としない位置情報サービスが実現できるといえる。

本論文では, エージェントが自身の位置を, 特定の物理的な場所に固定するための手法を検討し, これを用いた位置情報サービス提供システムの実現性を示した。ここで検討された多くの技術は, 端末群中の相対的な位置にエージェントを固定する手法としても用いることが可能である。たとえば, 高速道路上の車群の中心部付近にエージェントを位置させ, 車群とともに移動させることによって, 車に対してさまざまなサービスを提供することが可能である。

今後の課題として, 人口密度に応じて NA の数を

変化させた場合の評価, および NA が消滅してしまった場合に再発生させるための手法の検討などが考えられる。

参 考 文 献

- 1) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, *IEEE Infocom 2000*, pp.775–784 (2000).
- 2) Bajaj, R., Ranaweera, S.L. and Agrawal, D.P.: GPS: Location-Tracking Technology, *IEEE Computer*, Vol.35, No.4, pp.92–94 (2002).
- 3) Iwasaki, Y., Kawaguchi, N. and Inagaki, Y.: Azim: Direction Based Service using Asimuth Based Position Estimation, *24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS '04)*, pp.700–709 (2004).
- 4) Lee, S.-W. and Mase, K.: Activity and Location Recognition Using Wearable Sensors, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.1, No.3, pp.24–32 (2002).
- 5) Navidi, W. and Camp, T.: Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.3, No.1, pp.99–108 (2004).
- 6) Papadopouli, M. and Schulzrinne, H.: Effects of power conservation wirelss coverage and co-operation on data dissemination among mobile devices, *ACM SIGMOBILE Symposium on Mobile Ad hoc Networking & Computing (MobiHoc)*, pp.117–127 (2001).
- 7) Porta, T.L., Ramjee, R., Woo, T. and Sabnani, K.: Experiences with Network-Based User Agents for Mobile Applications, *ACM/Baltzer Journal of Mobile Networks and Applications*, Vol.3, No.2, pp.123–142 (1998).
- 8) Ramjee, R., Porta, T.L. and Veeraraghavan, M.: The Use of Network-based Migrating User Agents for PCS, *IEEE Personal Communications Magazine*, Vol.2, No.6, pp.62–68 (1995).
- 9) Schilit, B.N., LaMarca, A., Borriello, G., Griswold, W.G., McDonald, D., Lazowska, E., Balachandran, A., Hong, J. and Iverson, V.: Challenge: Ubiquitous Location-Aware Computing and the “Place Lab” Initiative, *Proc. 1st ACM international workshop on Wireless Mobile Applications and Services on WLAN Hotspots (WMASH '03)*, pp.29–35 (2003).
- 10) Tarumi, H., Morishita, K., Nakao, M. and Kambayashi, Y.: SpaceTag: An Overlaid Virtual System and Its Applications, *International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS '99)*, Vol.1, pp.207–212 (1999).

- 11) Wolfson, O. and Xu, B.: Data-on-the-Road in Intelligent Transportation Systems, *Proc. IEEE International Conference on Networking, Sensing, and Control (ICNSC 2004)*, Taipei, Taiwan (2004).
- 12) 菊池聡敏, 八木啓介, 加藤泰子, 屋代智之: Nomadic Agent の提案と応用, 情報処理学会第16回高度交通システム研究会 (2004-ITS-16), Vol.2004, No.19, pp.7-14 (2004).
- 13) 垂水浩幸, 森下 健, 中尾 恵, 上林弥彦: 時空間限定型オブジェクトシステム: SpaceTag, インタラクティブシステムとソフトウェア IV, pp.1-10, 近代科学社, (1998).
- 14) 八木啓介, 菊池聡敏, 井上真吾, 屋代智之: Nomadic Agent を用いた情報提供と UWB 適用に関する評価, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウム論文集, Vol.2003, No.9, pp.565-568 (2003).

(平成 17 年 4 月 5 日受付)

(平成 17 年 10 月 11 日採録)



屋代 智之 (正会員)

平成 4 年 3 月慶應義塾大学大学院理工学研究科計測工学専攻修士課程修了。平成 10 年 3 月同大学院後期博士課程修了。同年より千葉工業大学工学部情報ネットワーク学科専任

講師。現在、同大学情報科学部情報ネットワーク学科助教授。博士 (工学)。高度道路交通システム (ITS), モバイル・コンピューティング等の研究に従事。情報処理学会高度交通システム研究会運営委員, 情報処理学会論文誌編集委員会ネットワークグループ副査。著書『ITS と情報通信技術』(裳華房) 等。電子情報通信学会, 人工知能学会, IEEE 各会員。



Thomas F. La Porta

Thomas F. La Porta received his B.S.E.E. and M.S.E.E. degrees from The Cooper Union, New York, NY, and his Ph.D. degree in Electrical Engineering from Columbia University, New York, NY. He joined the Computer Science and Engineering Department at Penn. State in 2002 as a Full Professor. He is the Director of the Networking Research Center at Penn. State. Prior to joining Penn. State, Dr. La Porta was with Bell Laboratories since 1986. He was the Director of the Mobile Networking Research Department in Bell Laboratories, Lucent Technologies. He is an IEEE Fellow and Bell Labs Fellow. Dr. La Porta was the founding Editor-in-Chief of the IEEE Transactions on Mobile Computing. He has published over 50 technical papers and holds 25 patents.