

社会工学としてのエージェントベースシステム

——オルタナティブ通信システムの可能性と災害時の避難誘導システムを例として——

神 林 靖

今日コンピュータネットワークは、社会生活を営む上での重要なインフラストラクチャとなっている。二〇一一年三月の東日本大震災で経験したように、通信基盤は一般に考えられているよりも脆弱である。更にアラブの春ではフェイスブック等のソーシャルネットワークが活躍したと報道されているが、ソーシャルネットワークが基盤とするインターネット通信網は容易に監視が可能である。本稿では、最初にインターネットが技術的には恣意的な管理監視下に容易に置かれ得ることを指摘し、対抗技術としてインターネットインフラストラクチャを使用しない通信技術であるアドホック通信により局所的な通信ネットワークを構築する技術を紹介する。この方法は、反政府的な使用だけでなく、わが国のように成熟した民主的な政体においても、災害等により通信基盤が破壊された場合に有効である。

本稿では、アドホック通信により局所的なネットワークを構築する方法を検討する。アドホック通信によるネットワーク構築には、自律的な移動ソフトウェアエージェントを採用するのが適当であり、その際、経路制御が重要な課題となる。したがって本稿では、移動ソフトウェアエージェントの実現に有効と考えられるアントコロニー最適化手法も併せて概観し、その上で災害時の避難誘導システムへの応用した例を報告する。

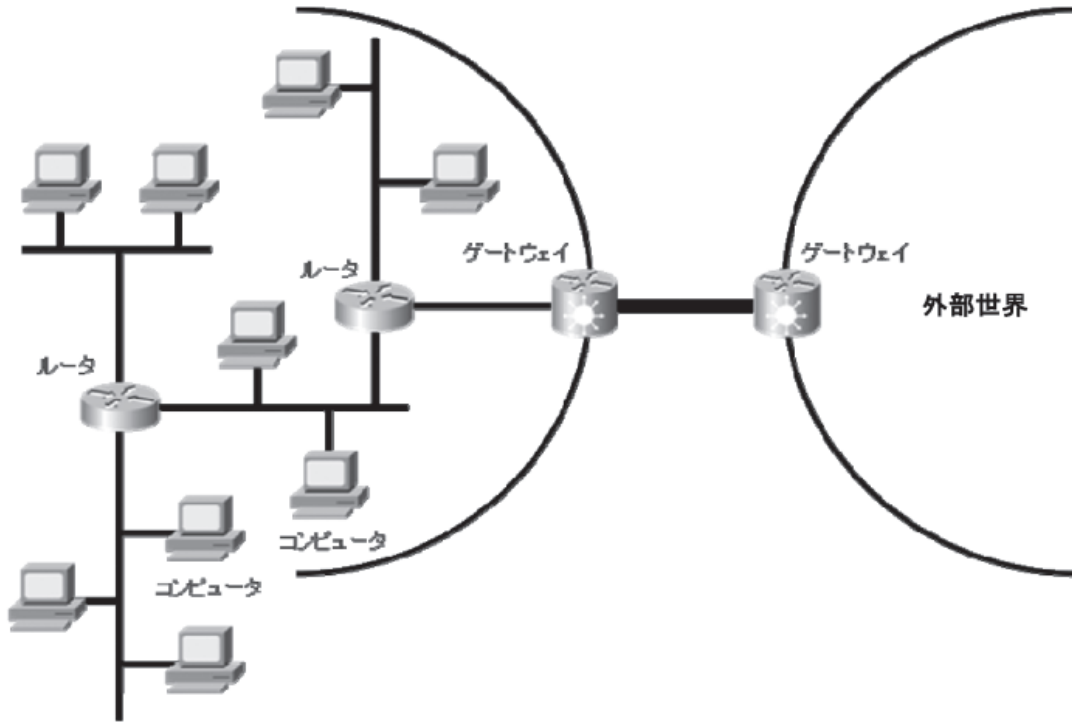
1. はじめに

二〇一一年一月二七日、エジプト政府がインターネットを遮断したというニュースが世界を駆け巡った。最も上位に位置するティア1ネットワークを管理する *Renesis Corporation* の技術者によると、エジプト政府はファイバオプティックリンクを占有しているために比較的容易に遮断することができた由である。⁽¹⁻³⁾ *Cory Doctorow* は、携帯電話企業がどれほど政府による監視と従属に置かれているかを報告している。^(4, 5)

中華人民共和国におけるインターネットの検閲は有名である。情報遮断がどれほど有効に機能しているかの事例として、*Rebecca MacKinnon* は、自身の経験として北京大学の学生がどれほど外部の情報から遮断されているかを指摘し、インターネットアクティビストの運動に疑問を呈している。^(6, 7)

アラブの春を喧伝する向きは、デモンストレータが携帯電話のテキストメッセージ交換システム(電子メール等)により連絡を取り合うことで自然発生的に反政府運動が隆盛し発展することを称えているが、多くの国家で通信設備は直接間接に政府の管理下にあることを忘れてはならない。事実イランでは、釈放された民権運動家が尋問の過程で、傍受された電子メールを示されたことを報告している。⁽⁸⁾ これらのことは、インターネットの構造を考えたとき不思議

図1 インターネット概念図



社会工学としてのエージェントベースシステム（神林）

なことではない。図1に示すようにコンピュータネットワークはルータと呼ばれる通信経路制御のコンピュータによって接続されている。とりわけ外界（外国）との接続に使用されるルータをゲートウェイと呼ぶが、中華人民共和国においてはわずか八台のゲートウェイによって外界と接続されている⁽⁹⁾。情報遮断が容易なのは当然である。中華人民共和国におけるインターネット状況については、(10)に詳しい。

携帯電話やスマートフォンを用いるとき、その基礎となる通信が既存の通信インフラストラクチャに依存している限り、政府によるソーシャルネットワークの管理と統制を逃れることはできない。本稿では、既存の通信インフラストラクチャを代替するものとしてアドホック通信によるネットワーク構築の可能性を提案する。アドホック通信とは、通信経路の制御に特定のコンピュータを必要とせず、とりあえず接続できる通信端末（携帯電話やスマートフォン）同士で情報を送り合うことで、バケツリレー式に遠隔地との通信を可能にする技術である。

本稿の構成は、次のとおり。第二節では、アドホック通信の経路制御について背景を述べる。第三節では、アドホック通信の経路制御で応用されることの多いアントコロニー最適化について簡略に述べる。第四節では、アドホック通信における経路制御のサーベイを行う。通信が途切れがちになる状況において有効性が期待できる移動エージェントの経路制御、とりわけ蟻の行動を模した通信プロトコルに焦点を当てる。アドホック通信は、その名前が表現しているように統制することがきわめて困難な通信形態なので、反政府運動を支援する場合に有効であろう。もつとも我が国のように通信の統制が実施されていない国ではあまり意味がないように思えるかもしれない。しかしながら情報インフラストラクチャを使用しなくても使用できない事態は考えられる。東日本大震災のような場合である。したがって第五節では、我が国でも有効な応用として災害時の通信制御を取り上げ、現在実装中の避難誘導システムについて紹介する。そして第六節で結論を述べる。

2. 移動アドホックネットワークの経路制御

通常インターネットによる通信では、各所に置かれたルータあるいはゲートウェイがネームサーバと呼ばれるコンピュータの助けを借りつつ通信データを転送していく。携帯電話やスマートフォンで電子メールを送受信する場合も同じで、その通信経路は概ね決まっている。（輻輳や障害が発生したときに迂回路を積極的に探すのがインターネットの特徴であるが、それでも通信経路は複数あるものの中から選ぶだけである。）

それに対してアドホックな通信とは、通信可能な機器（スマートフォンのような携帯端末）が一時的に接続しあい通信を行う手法である。直接一対一の通信だけでなく、携帯端末に通信データの転送機能をもたせることにより、携帯

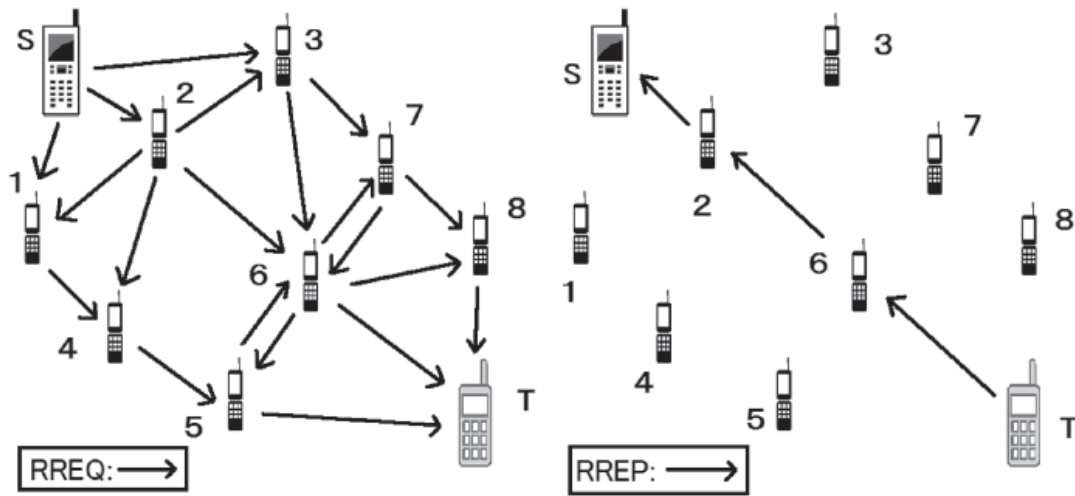
端末だけで通信網を構築しようとする試みが、近年脚光を浴びている。

アドホック通信におけるネットワークには、積極的に経路を探索し前もって通信路を確保しようとする手法と必要に応じて経路を探索する手法がある。本章では、それらについて(11)に基づいて概観する。モバイルアドホックネットワーク (Mobile Ad Hoc Network、以下MANET) とは、ノート型PCやスマートフォンのような無線通信による機器から構成されるネットワークであり、携帯電話の基地局のような既存の通信インフラストラクチャを用いずに一時的な通信網を構築できる¹²⁾。ルータのような経路制御用のコンピュータが提供されていない環境では、無線の到達範囲外にある機器と通信を行うためには、同等な複数の機器を経由して通信データを送らなければならない。つまり送信元の機器は、通信データを仲介してくれる他の機器を必要とするのだ。そのとき、どのように通信データの受け取り手を発見し、どのように通信データを転送するかの手順である通信プロトコルを設定しなければならない。

従来のアドホックネットワークにおける経路制御の通信プロトコルには、本質的な欠点がある。積極的に経路を探索するプロアクティブな経路制御プロトコルでは、常時経路制御データを交換し更新し続けなければならない。これは、ネットワーク資源の浪費になり得るのみならず、スマートフォンのような携帯端末を考えた場合バッテリーの消耗を引き起こす¹³⁾。一方送信要求を受けてから通信経路を探索するリアクティブ型の経路制御プロトコルでは、通信経路を確立するまでに時間がかかりすぎる¹⁴⁾。この問題を受けて、リアクティブ型の経路制御プロトコルに積極的に経路を探索する機能を組み入れたハイブリッド型の経路制御プロトコルが開発された。現在普及している Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) である¹⁵⁾。

AODVを採用したMANETで中継する通信機器は、プロアクティブ型のプロトコルを採用する機器と異なりす

図2 RREQとRREP



すべての通信機器への経路を得ようとはしない。したがって通信データを送出しようとする機器は、最初に通信経路を探索し確立しなければならない。そのため送信元の機器は、route request packet (RREQ) と呼ばれるメッセージを通信可能な近在の機器すべてに送出する。このメッセージを受け取った機器は、更にそこから到達可能な機器へと送出する。このデータ転送の連鎖は、RREQが最終的な送信先に到達するか、あるいは最終的な送信先についての十分な情報をもつ危機に到達するまで続けられる。図2の左の図が、RREQがどのようにネットワーク中を移動するかを示している。プロアクティブ型のプロトコルでは通信データそのものの中にすべての経路情報が含まれているのに対して、AODVの通信データには、次にどの機器に移動するかの情報だけが含まれる。メッセージに一連番号を含めることで、経路探索のメッセージが同じところを巡回しないように工夫が施されている。

送信先の機器が発見されRREQを受け渡されると、送信元の機器にroute reply packet (RREP) が送り返される。図2の右側の図が、RREPが送り返される様子を示している。これで通信経路が確立され、以降通信機器同士のメッセージのやり取りが可能になる。もともと通信機器は互いに移動することがあるので、定期的にhello messageという確認データを送るこ

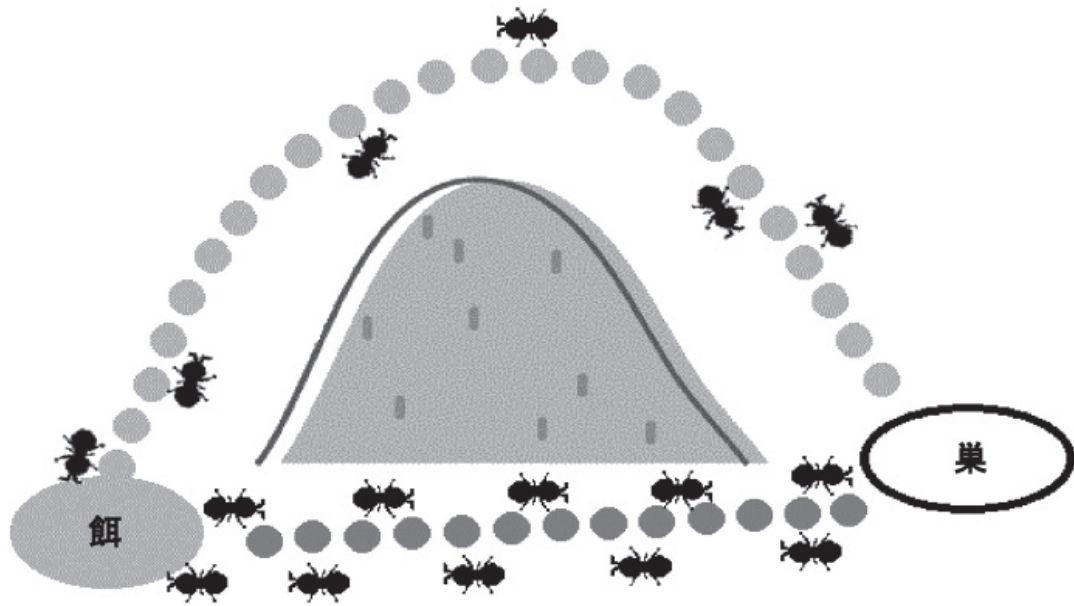
とで経路を確認する。中継機器が失われる等の状況変化に応じて route error message (RERR) を伝播させ、通信経路の再確立を促す。

3. アントコロニー最適化手法

アントコロニー最適化とは、蟻がフェロモンにより間接的にコミュニケーションを取りつつ効率的に餌場の確保を行うという生態に注目し、組合せ最適化問題を解くのに使用されている⁽¹⁶⁾。エージェントベースの経路制御、そしてエージェントベースのシミュレーションには有効であると考えられる。この節では、アントコロニー最適化手法について概観する。

蟻類似の動きをする移動ソフトウェアによって通信網を制御する考え方は一九九〇年代には提案され、今日では様々な制御手法が提案されている^(17,20)。蟻類似の動きをする移動ソフトウェアを用いて経路制御をする考え方は、蟻のような社会的生物が、複雑な問題を分散的かつ驚くほど効率的に行っているという事実に基づいている。蟻の社会においては中央集権的に統制する機能はない^(21,22)。女王蟻は繁殖に特化した蟻であり、統制しているわけではない。個々の蟻は、局所的な情報だけに依存して行動しているにもかかわらず、全体として調和のとれた行動が達成されているが、それはフェロモンと呼ばれる科学物質を環境に塗布することで間接的に達成される。Deneubourg と Beekers は、蟻の行動を模すプログラムが自己組織的に複雑な問題を解くことができることを示した^(23,24)。たとえば図3に示すように、巣と餌場の間に複数の経路が存在するとき、最短距離が発見できる。なぜなら往復する蟻がフェロモンを環境に塗布するため、より頻繁な往来のある経路では、蒸発するよりも塗布されるフェロモンの量が多くなるからである。個々

図3 フェロモンにより経路が短い方が選ばれやすくなる



の蟻はランダムな行動を取るようであり、フェロモンに誘引されるため自然と短い距離をもつ経路に誘導されるわけである。一旦フェロモンの集積が開始されると、正のフィードバックが働くため選択された経路は強固になる。もつとも各蟻の行動はあくまで確率的なので、更に短い経路が偶然発見されることもあり、長時間に亘ると最短経路が発見されるわけである。

Dorigo を中心とする研究グループは、以上の蟻の生態を模したソフトウェアにより、巡回セールスマン問題を解くのに有効であること⁽²⁵⁻²⁸⁾を示した。巡回セールスマン問題は、多項式時間で解くことができない⁽²⁹⁾ことが知られている。

4. 蟻類似の移動ソフトウェアエージェントによる経路制御

アントコロニー最適化手法を応用した通信ネットワーク制御には、多くの先行研究がある。それらについてそれぞれ概観する。通信網間を移動するプログラムを移動ソフトウェアエージェントと呼ぶ。エージェントという名称は、遠隔操作によって制御されるのではなく、プロ

グラム自身に自律的に行動することのできる規則の集合が備わっていることを表現している。アンテナ類似の移動ソフトウェアエージェントは、比較的単純な構成であり、通信網を構成する機器間を移動しながら接続情報を収集すると同時に、収集した情報によって通信機器が保持する経路情報を更新する。(12、24、30)で紹介されているようなネットワークアプリケーションでは、蟻を模する移動ソフトウェアエージェントは、この通りを行っている。各通信機器は独自に接続情報を収集することはせず、経路情報に関してはすべて移動ソフトウェアエージェントに依存している。この節では、蟻類似の移動ソフトウェアエージェントによる経路制御プロトコルについて議論する。

4.1 AntNet

AntNetとは、通信網における輻輳も考慮した動的に最適な経路を確立するために手法である。従来型の通信網での使用を前提としており、アドホックなネットワークを想定していないため、通信機器は静的に配置されていることを前提にしている。したがって積極的に経路情報を収集し、各通信機器がすべての接続先との最良の接続経路を保持できることを目的としている。この目的を達成するために、通信網の経路制御にはフォワードアンテナ⁽³¹⁻³³⁾ (forward ant) とバックワードアンテナ (backward ant) という二つの型の移動ソフトウェアエージェントを使用する。これらの蟻類似の移動ソフトウェアエージェントは、接続情報を収集するためのだけのソフトウェアエージェントであり、利用者が発行する実際の通信データとは異なる。実際の通信データは、これらのソフトウェアエージェントが収集した情報に基づいて設定された経路表にしたがって各通信機器が転送する。実際の通信データと二種類のアナログエージェントは、同時並行的に通信網の中を移動することになる。

ネットワーク中の通信機器は、ネットワーク中の他のすべての通信機器に向けて定期的にフォワードアントを送り出す。フォワードアントは、通信機器がもつ接続情報を表現する経路表に基づいてランダムに経路をして進む。フォワードアントは、与えられた目的の通信機器に到達するまでに訪れた機器の履歴を保持する。フォワードアントは、目的の通信機器に到達するとバックワードアントを生成して、送信元の機器に向かってバックワードアントを送り出す。バックワードアントは、フォワードアントの履歴を使用して、同じ経路を逆向きに辿る。送信元の機器までの経路の途中でバックワードアントは、そこから送信元の機器までどのくらいの時間がかかるかを経路表に記入していく。こうすることにより、経路表は到達可能な通信機器への時間最短経路をもつことができるようになる。しかし先に述べたように、実際の通信データの送受信には貢献しない経路探索のためだけのアントエージェントを用いることにより、ネットワークに無視できないオーバーヘッドを生じさせてしまうことになる。とりわけMANETのような動的にトポロジーの変化するネットワークにおいては、バックワードアントが送信元に到達する頃には、経路情報が変わってしまったすべての努力が無駄になってしまっている可能性もある。

4.2 AntHocNet

MANETにおいては、通信機器は移動すると考えておかなければならない。つまり通信網に接続したり接続を切断したりといったことが頻繁に発生すると考えなければならない。したがってAntNetにおけるように、通信機器が常に他のすべての機器に対して最適な経路を保持するということは合理的な要求事項ではない。この考え方にもとづいて、AntNetの研究グループは、送信要求を受けてから経路を探索するリアクティブ型のアントエージェントによ

り経路表を作成し、積極的に経路を探索するプロアクティブ型のアントエージェントによって経路の情報を更新するアルゴリズムを開発した。これが AnthocNet と呼ばれるものであり、MANET に適合するように AntNet を改良したものともいえる。AnthocNet では、通信経路の品質を表すのに人工的なフェロモンを使用しそれを中継する通信機器の経路表に書き込む。より蟻の生態に近い経路制御の手法といえることができる。

AnthocNet は、複数経路を追及する蟻類似の移動ソフトウェアエージェントに基づく経路探索アルゴリズムである⁽³⁴⁻³⁷⁾。アント類似のエージェントは、経路情報を求めてネットワーク中を徘徊する。AnthocNet において経路の品質は、人工的なフェロモンによって指定される。フェロモン値は、送信元の通信機器から送信先の通信機器までどれだけの中継機器を経由するかを表わすコストの逆数の平均値である。送信元の機器が、ある機器と通信するための手順を開始しようとしたとき、まず送信元の機器は、送信先の機器への経路が存在するかどうかを検査する。存在していればそれを使用するが、存在しない場合、送信先の機器への経路を発見するためにリアクティブフォワードアント (reactive forward ant) と呼ばれる蟻類似のソフトウェアエージェントを送出する。フォワードアントは、送信先の機器への道筋を探ると同時に辿っている経路の品質についての情報も収集する。送信先に到着するとフォワードアントはバックワードアント (backward ant) となり、送信元へと同じ経路を逆向きに辿って戻りながら、通信経路のフェロモンと経路上の中継機器にある経路表を更新する。実際の通信のためのデータは、確率的に複数の経路に分散されて送信される。これは各中継機器において、次の機器への経路のフェロモン値に比例して確率的に転送経路を選択することににより実現される。送信元の機器は、一旦送信先への経路が確立されて実際のデータ通信の手順が開始されると、更に重ねてプロアクティブフォワードアント (proactive forward ant) を送り出す。このプロアクティブフォワードア

ントは、実際の通信データと同じようにフェロモン値にしたがって進みつつ、使用されている経路の品質を監視する。ごく稀にプロアクティブフォワードアントを複数送出することにより、送信先への新しい経路を探索することも忘れない。

4.3 ARA

蟻類似の移動ソフトウェアエージェントに基づき、かつ送信要求を受けて通信経路を探索するリアクティブ型の経路制御アルゴリズムの代表的なものに、Ant-Colony Based Routing Algorithm (ARA) ³⁸⁾がある。ARAは純粹にリアクティブ型の経路制御アルゴリズムであり、一旦接続した近傍の通信機器に対して接続の存在を確認するためだけのメッセージを送ることはしない。そのかわりに接続確認を必要としない一斉送信の技法を用いる。ARAを採用するMANTの送信元の通信機器は、フォワードアントを指定した送信先の通信機器に向けて一斉送信するのだ。これらのフォワードアントは、送信先に向けて進みつつ、訪れた中継機器からそのフォワードアントを発行した送信元の機器への経路を生成する。ARAでは、通信経路は、中継機器の経路表中に正のフェロモン値として示される。送信先の機器に到着すると、バックワードアントを送信元に向けて送り出すことにより、送信先に向けての前向きの経路が生成されたことを確認する。送信元と送信先が同じである各フォワードアントには、一意な一連番号が割り当てられているので、ノードに重複したアントが到着したとしても、劣った経路を通って戻ってくるアントエージェントは廃棄してしまえばよい。経路が優れているか劣っているかは、どれだけの中継機器を通過したかによって計算されるフェロモン値によって決定される。

AntHocNet 同様に経路の品質は、フェロモン値によって管理されるものの、AntHocNet と異なり経路上のフェロモンの値は、アントエージェントでなく引き続いて送信される実際の通信データによって保持される。それは、通信データを中継する機器が通信データを送信先に向けて転送する度に、各中継器中の経路表中のフェロモン値を増加させることにより達成される。自然界のフェロモンが時間とともに蒸発するのと同じように、人工のフェロモン値も時間とともに減少させられるので、実際の通信データが送られなくなると、その値は下がるのだ。そのようにして利用価値が低くなった通信経路は取捨選択されるわけである。

実際の通信データを送信している途中で、それまで中継していた機器の移動により経路が切断されたときは、転送に失敗した中継機器がエラーメッセージを、通信データを送ってきた機器に向けて送信する。中継機器は経路欠損メッセージを受け取ると、まずは別経路があるかどうかを調べて、もしあればその別経路に通信データを送信する。別経路がなければ、隣接する別の機器に、その通信データを中継してくれるように依頼する。このようにして、送信先への経路が見つければ通信データは無事送信し続けられるし、そうではなくて経路欠損メッセージが最初の送信元の機器にまで届いてしまえば、送信元は、再びアントエージェントを用いる経路発見手続きを開始する。

4.4 MAR

Zhou や Zinclair-Heywood は、Mobile Agent Routing (MAR) と呼ばれるアルゴリズムを提案した。³⁹⁾ MAR においては、実際の通信のためのデータそのものもエージェントとして実装して、ネットワーク中で経路情報を収集する。ARA と同じようにこのプロトコルも、一定数のアントエージェントをもち、それらは常時ネットワークを探索して

ルーティング情報を収集する。MARのアントエージェントは、固定長の履歴リストをもち、その中には、そのアントエージェントを転送した中継機器の情報が、アントエージェントを発行した送信元の通信機器の経路表の情報とともに含まれる。中継機器はアントエージェントを受け取ると、アントエージェント中の履歴リスト中に自分自身の経路表にあるものよりも優れた経路情報があれば、それを自分の経路表に複写するとともに、自分の経路表中に優れた経路情報があれば、それをアントエージェントの履歴リストに複写する。その後中継機器は、アントエージェントをランダムに選んだ隣接する中継機器へと送信するのだ。ネットワーク中の通信機器が頻繁に移動するようであれば、アントエージェントの数を増やし、比較的静的であれば、アントエージェントの数を減らす。接続を確認するための短いメッセージを使って隣接ノードの生存を確認する。一定時間接続確認のメッセージが到着しなければ、その中継機器は失われたものと見做して隣接中継機器のリストから削除する。

4.5 PERA

確率的創成ルーティング (Probabilistic Emergent Routing Algorithm, PERA) は、三つのタイプのアントエージェントを使用する。⁴⁰⁾ すなわち、1) フォワードアント、2) ユニフォームアント、3) バックワードアントである。フォワードアントは、各ノードによりネットワーク中のランダムに選ばれた通信機器に向けて定期的に送り出される。フォワードアントは、各中継機器において、送信先に到達する確率に従って、アントエージェントが訪れている中継機器の現在の経路表の中の次の中継機器へと転送される。この方法だと発見されていない新しい経路に向けて確率的にフォワードアントが転送されることはない。通信機器の移動により経路欠損が頻繁に発生する動的ネットワークに

においては、このような経路制御のアルゴリズムは、ネットワークのトポロジカルな変化に適應することができない。アルゴリズムの適應力を養うために、通常のフォワードアントを生成する際、そのうちの数パーセントをフォワードアントのかわりにユニフォームアントを使用して各ノードが送出する。ユニフォームアントは、フォワードアントと異なつて転送される。ユニフォームアントは、中継機器において、次の転送先を選ぶに際して等しい確率を用いるのだ。フォワードアントあるいはユニフォームアントが送信先に到達すると、バックワードアントが生成される。バックワードアントは、フォワードアントが作成した履歴リストの複製を受け取る。バックワードアントは、フォワードアントによつて生成された経路情報もち、フォワードアントを生成した送信元の通信機器に向けて逆向きの経路を辿る。送信元に向けて経路を逆向きに辿りながらバックワードアントは、中継機器の経路表を更新していくのだ。

4.6 GPSAL

GPSアント類似ルーティング (GPS/Ant-Like Routing, GPSAL) では、MANET中のすべての通信機器は、GPSを備えていると仮定している。⁽⁴⁾ GPSALに参加する通信機器の経路表には、その通信機器の現在と前回の場所が時刻とともに記載されており、尚その通信機器が移動体なのか固定されているのかの情報ももつ。新しい移動する通信機器がGPSALを採用するMANETに加わりたくと希望する場合は、まず無線を傍受して隣接する通信機器を発見する。その上で発見した通信機器に自分の経路表を送つて登録してもらふのだ。GPSALにおける送信先への経路は、最短経路発見アルゴリズムを用いて物理的に最も近い距離にある通信機器を中継機器として繋いで形成される。経路上の中継機器の情報は、それぞれの時刻とともに通信データパケットの中に付加される。送信先への経

路がわからなければ、移動体としての中継機器は、近傍の固定通信機器にメッセージを送って送信先への経路を発見してくれるように依頼する。

アントエージェントは、ネットワーク中の経路表をプロアクティブに更新するのに使用される。各中継機器は、アントエージェントを受け取ると、アントエージェント中に格納されている経路情報と自分の経路表中の情報を比較して、経路表の内容を更新し、よりよい経路が見つかれば、送信先への経路を変更する。アントエージェントの内容も同様に経路表を参照して書き換える。次に転送する先は、経路表中で最も古い記載の中継機器か、あるいは現在の中継機器からMANET中で最も遠距離にある中継機器か、あるいは経路表から任意に選択した中継機器ということになる。一旦送信先に到達すると、アントエージェントはそれが生成された送信元へと送り返される。

5. 社会システムへの応用

第四節においてアント類似のエージェントを用いたMANETにおける経路制御の手法についてサーベイを行った。いずれのプロトコルもファイバーオプティックスのような基幹システムを必要としないだけでなく、携帯電話やスマートフォンにおける無線基地局も必要としない。

筆者らは、インターネット上でピアツーピアモデルを用いた資源探索問題を扱ってきた⁽⁴²⁾。ピアツーピアモデルに基づいた通信手法は、Winny⁽⁴³⁾のように匿名性を維持することができるため、解放技術 (Liberation Technology) として期待されている⁽⁴⁴⁾。しかしながらピアツーピアモデルに基づいた通信方式と雖も、政府あるいは政府の厳重な管理下にある企業が運営する通信インフラストラクチャに依存している限り秘匿性を維持することはできない。民間団体である

著作権協会の目を盗んで音楽ソフトの交換をするのが限度である。これなども費用対効果の面で看過されている（わけではないと思うが）だけで、取り締まりは簡単にできる。

翻ってMANETに基づいた通信ネットワークを構築することができれば、完全に携帯端末保持者間における草の根的なネットワークを構築できる。したがって純粹にMANETを用いた通信網の構築は、第一節において紹介した通信傍受や通信遮断を日常的に行っている非民主的な政府機関にとつて脅威となるはずである。国家規模でそのようなMANET装備の携帯端末を配布することは内政干渉にあたり、厳に慎まなければならないが、非政府組織（NGO）レベルで民主活動家に提供することはできるのではないかと考える。もちろんそのような活動は非合法活動と見なされるであろう。したがってこれはあくまで空想レベルの応用ではある。

またMANETは基本的に無線通信によるアドホックな接続を行うので、容易に傍受されるといふ危惧もあろう。しかし現状代表的な無線通信技術であるWi-Fi、Zig-bee、Bluetoothともに一つの端末から次の端末へと通信データを送るための消費電力は、既存の携帯電話などに比較して小さく、通信距離も限られている。Android端末を用いた実験によると、最も消費電力が大きなWi-Fiであったとしても一〇〇メートルを越える通信は不安定になる。通信傍受の設備を備えた自動車を発見して電源を切断するのに十分の余裕がある。われわれは、消費電力が比較的小さくかつ一Mbps程度の通信速度が可能なBluetoothによるシステム構築を目指している。バッテリー駆動型の携帯端末では消費電力を抑えることはきわめて重要であり、かといってZig-beeでは、最大二五〇Kbpsという通信速度が実用化を妨げるからである。

反政府活動という穏やかでない応用について言及したが、それでは、わが国のように成熟した民主国家においては、

無用の技術なのであろうか。コンピュータネットワークが政府機関によって、政治的に緊密に管理制御されているわけではないので、政府の監視の目をかいくぐって通信するという需要はない。しかしながら通信ネットワークが機能しない状況というのは考えられる。卑近では、平成二三年三月一日の東日本大震災である。被災地以外の場所でも、急激な通信量の拡大に基幹システムが追いつかなくなり、また通話できたとしても話者が正確な情報をもっていないので、どこへ向かえばよいかわからないという事態が発生した。以下に、わが国においても有効と考えられる避難誘導システムを紹介する。これは、第三節で言及したアントコロニー最適化を利用した移動ソフトウェアエージェントによる避難誘導システムである。

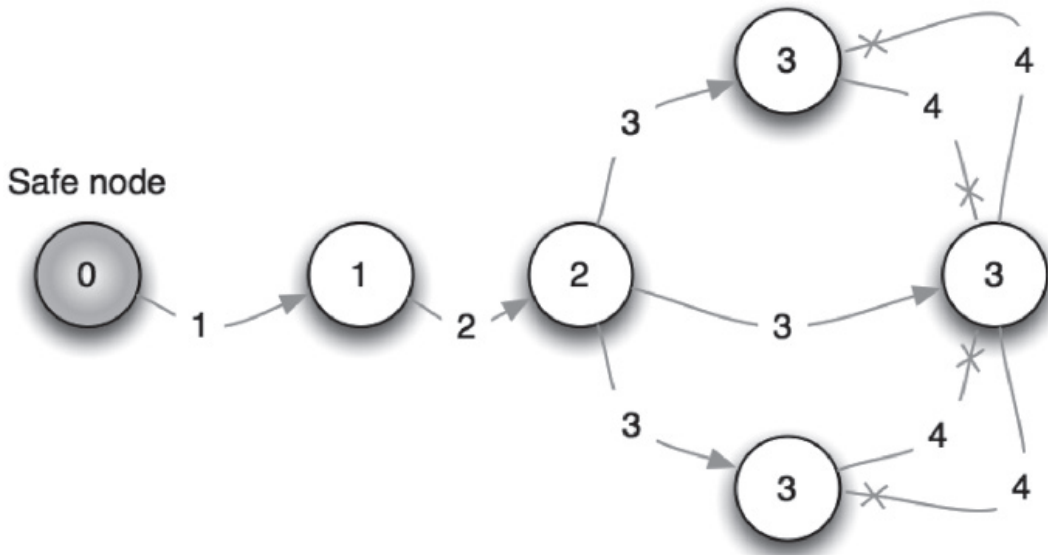
5.1 災害時の避難誘導システムへの応用

筆者らは、エージェントを用いたアドホックネットワークを一時的に構築し、災害時の避難誘導に生かす試みに挑戦している。一つは屋内における災害（火災など）を想定し、アドホックネットワークを用いて安全な出口を求めのみならず、避難者の流れ（移動速度）を考慮して最適な経路を誘導するシステムである。以下、(46)に基づいて M A N E T を用いた避難経路を誘導するシステムを記述する。

避難口は一つ以上あり、屋内であるので壁に遮られていて通り抜けることはできない。避難者は、誘導されるまま通路を通って避難口へ向かう。群衆の一部はスマートフォンのような携帯端末を所持していて、端末同士はアドホックに通信できる。また各携帯端末は、GPSによって自分の位置情報を取得できるものと仮定する。

群衆の振舞いとして、避難口の近傍にいる場合、避難口のサインを見て自力で避難口へ向かうことができる。一旦

図4 最小移動回数



避難口から外に出て安全が確認できると、携帯端末からゴール通知エージェントを発行することで、他の避難者を誘導する。このゴール通知エージェント（以下GA）は、避難口までの最小移動回数を記録しつつ、他の避難者の携帯にアドホック通信により移動する。

一方避難経路を探索する人は、携帯端末から経路探索エージェント（以下RA）を発行する。RAは、第三節で紹介したアントコロニー最適化を実装したソフトウェアエージェントであり、GAが移動の途中で各携帯端末に残したフェロモン値を指標としつつ、壁を通り抜けないようにしながら避難口まで到達する。避難口まで到達することで避難経路が確定するとRAは、移動した経路を逆に辿り、発行した避難者の携帯端末に避難経路を提示するのである。GAは、避難者が避難に成功する度に生成されるので、最新の情報が維持される。

図4において、Safe node と記された端末が避難に成功した人の携帯端末である。避難に成功して発行されたGAは、図4に示すようにカウンタを増加させながら移動先の携帯端末に記録を残す。この際、すでにカウンタ値が記録されていれば、新しい値が小さいときだけ記録する。そうすることにより、各携帯端末には、避難口までの最良の

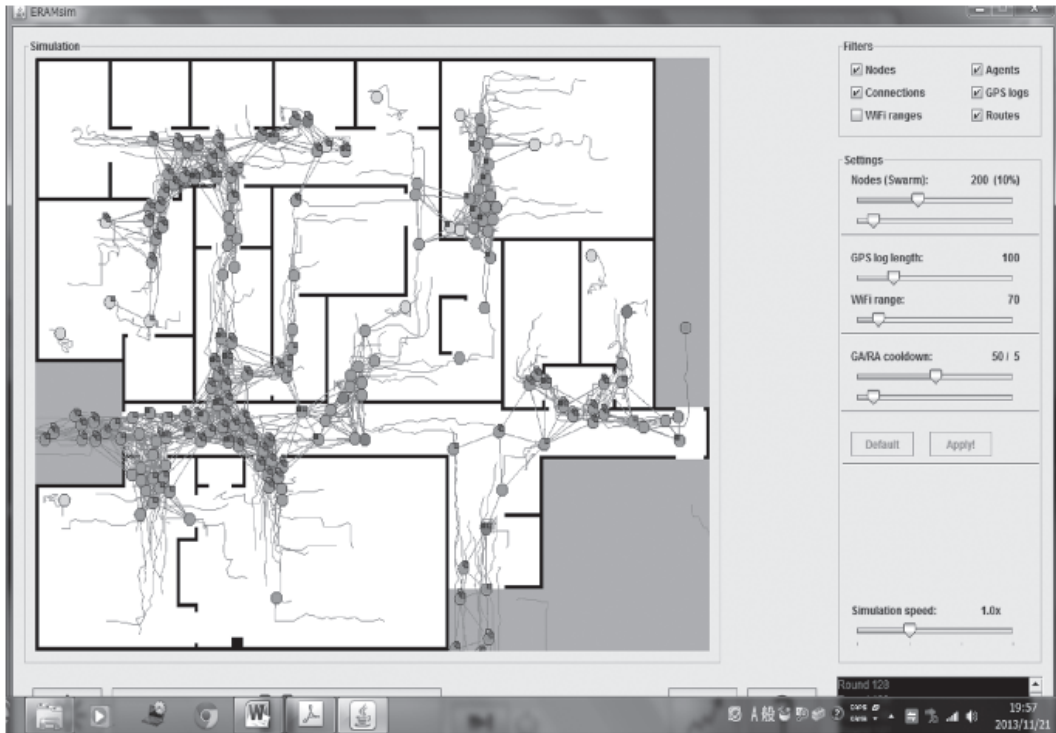


避難経路（最小の移動回数）が記録される。先にRAは、GAが移動の途中で各携帯端末に残したフェロモン値を指標とすると述べたが、移動回数が少ないほどフェロモンを強くすればよい。

RAは、避難者の携帯端末で生成された後、避難口を求めて他の移動可能な携帯へと移動し、避難口に到達した時点で、移動してきた端末の位置情報から避難経路を計算する。移動可能な端末が複数ある場合は、フェロモン値の高い（移動回数の少ない）端末に移動する。したがってRAは、比較的少ない回数で避難口まで到達することができる。

ここで注意しておきたいのは、通信可能な端末と移動可能な端末は異なるという点である。単に通信データを送るのであれば、通信可能な端末に移動すればよいのだが、避難経路は人間が辿れなければならない。壁を通り抜ける経路を生成してはならないのだ。移動先の端末が壁の向こう側になことを保証するためにRAは、移動先の候補である端末のGPSによる移動軌跡（以下GPS軌跡）を検査する。各端末は、GPSの軌跡を記録しているので、RAがある端末から通信可能な別の端末に移動しようと試みる際に、図5に示すように、移動先の端末に記録されたGPS軌跡と自分自身のGPS軌跡が交点をもつかどうか検査する。GPS軌跡は、実際に人が携帯端末をもって移動した痕跡なので、壁が存在しな

図6 避難経路探索システムのシミュレータ



いことは明らかである。したがって二つの端末のGPS軌跡が交点をもつということは、その移動軌跡を繋いだ経路が存在することになるのだ。

単に避難経路を提示するだけでなく、GPS軌跡を精査することにより渋滞情報も得ることが出来る。図6のシミュレータの画面はこのことを表しており、左側の避難口に人々が殺到する状況を示している。現状のシミュレータでは、混雑情報を有効に活用する機構が組み込まれていないからである。実用システムとするためには、二次災害を防ぐためにもGPS軌跡を解析し複数の避難経路に分散させる必要がある。

6. 議論と結語

アドホック通信モデルによるモバイルアドホックネットワーク (MANET) を構築し、通信経路の制御を行う手法についてサーベイを行った。MANETを構築することは、通信ネットワークが強固に管理されている体制において、オルタナティブテクノロジーになるだけでなく、解放技術とし

て強力なものとなりうると考えるので、煩雑さを厭わず技術的詳細を記述した。その中でも蟻の行動を模したアントコロニー最適化手法を応用したエージェント技術は、これからの大きな発展を見込むことができる。

MANETは、その名前が示すようにアドホックに通信経路を設定するので、その特定の通信に参加していない外部から通信を傍受し遮断することが難しいことを示した。また無線通信を使用するといっても、携帯電話のような基地局を使用するわけではなく、携帯電話から携帯電話へと比較的微弱な電波を使用するので、電波による傍受も困難である。もつともその場合、第四節で述べたような経路制御の技法が使えない可能性はある。それは、伝統的な通信(電話のような)では、発信者と受信者が対称的になるため、一定期間双方向の経路を確立しなければならないからである。第四節でフォワードアントとバックワードアントと称していたのがこれにあたる。

これに対して筆者らの提案するマルチエージェントシステムでは、発信者が通信データを発行する時点で通信経路が確立されている必要はない。各エージェントは、自律的に行動できるだけの能力をプログラムされているからである。第五節で述べた避難誘導システムは、この自律的に行動できるという能力を経路探索と誘導に用いただけであるが、避難口情報でなく通常のメッセージを運搬するようにするのはたやすい。経路を確立せずに発信できるという点は民主化運動に有効であろう(もちろんGPS軌跡などを含めてはならないが)。特定の受信者でなく、情報の拡散を目的としたシステムには、更に有効なはずである。

情報の拡散という視点を踏まえて、前節で述べた避難誘導システムを広域に拡大応用したシステムを構想している。想定しているのは、二〇一一年三月一日に東京都心で発生したような帰宅困難者の大量発生時の対策である。基本的な発想は避難誘導システムと同じで、各帰宅者は手持ちの携帯端末から経路探索エージェントを発行して周辺状況

を把握しようとする。また何らかの有用な情報を得た場合は、自ら発信者となってその情報を拡散させる。移動方向に好ましい設備（救護所等）の情報や好ましくない状況（使用不能の橋等）の情報をプロアクティブに拡散する移動エージェントと、個人が進みたい方向の情報を収集するリアクティブエージェントを活用するシステムである。第四節で紹介したGPSALのようにGPS情報を基に、それぞれの携帯端末保持者の移動方向の情報を収集し適切な帰宅経路を助言するシステムである。これもささやかであるが、エージェントベースのアドホック通信の有用な使用方法であろう。MANETが、真の意味での解放技術（Liberation Technology）となるまで地道に基礎的な研究を続けていきたい。

参考文献

- (1) Cowie, J. Egypt Leaves the Internet.
<http://www.renesys.com/2011/01/egypt-leaves-the-internet/> から閲覧可能
- (2) Zmijewski, E. Egypt's Net on Life Support.
<http://www.renesys.com/2011/01/egypts-net-on-life-support/> から閲覧可能
- (3) Glanz, J.; Markoff, J. Egypt Leaders Found 'Off' Switch for Internet. New York Times, Feb 15, 2011, <http://www.nytimes.com/2011/02/16/technology/16internet.html> から閲覧可能
- (4) Doctorow, C. Report: Belarusian Mobile Operators Gave Police List of Demonstrators. BoingBoing.net, January 15, 2011, <http://www.boingboing.net/2011/01/15/report-belarusian-mo.html> から閲覧可能
- (5) Rosen, H. Ericsson Technology Used to Wiretap in Belarus. Dagens Nyheter, December 22, 2010, <http://www.dn.se/nyheter/varlden/ericsson-technology-used-to-wiretap-in-belarus> から閲覧可能

- (㉟) MacKinnon, R. Networked Authoritarianism in China and Beyond: Implications for global Internet Freedom. In *Liberation Technology in Authoritarian Regimes*, October 11-12, 2010.
- (㊀) MacKinnon, R. China's "Networked Authoritarianism." *J. Democracy*, 2011, 22 (2), 32-46.
- (㊁) OpenNet Initiative, Internet Filtering in Iran. <https://opennet.net/research/profiles/iran>, 2013.
- (㊂) MacKinnon, R. Consent of the Networked: The Worldwide Struggle for Internet Freedom, Basic Books, 2012, p. 35.
- (㊃) OpenNet Initiative, Country Profile: China, In *Access Controlled*, August 9, 2012, 271-298.
<https://opennet.net/research/profiles/china-including-hong-kong> 中国网络空间治理
- (㊄) Kambayashi, Y. A Review of Routing Protocols Based on Ant-like Mobile Agents, *Algorithms*, 2013, 6 (3), 442-456.
- (㊅) Perkins, C. *Ad Hoc Networking*; Addison-Wesley Publishers: Boston, MA, USA, 2001.
- (㊆) Perkins, C.E.; Bhagwat, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 1994, 24, 234-244.
- (㊇) Johnson, D.B.; Maltz, D.A.; Broch, J. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless *Ad Hoc Networks*. In *Ad Hoc Networking*; Perkins, C.E., Ed.; Addison-Wesley: Boston, MA, USA, 2001; pp. 139-172.
- (㊈) Perkins, C.; Belding-Royer, E.; Das, S. *Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. In *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, New Orleans, LA, USA, 25-26 February 1999; pp. 90-100.
- (㊉) Dorigo, M.; Gambardella, L.M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 1997, 1, 53-66.
- (㊊) Schoonderwoed, R.; Holland, O.; Bruten, J. Ant-Like Agents for Local Balancing in Telecommunications Networks. In *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents*, Marina del Rey, CA, USA, 5-8 February 1997; pp. 209-216.

- (81) Appleby, S.; Steward, S. Mobile software agents for control in telecommunications networks. *Br. Telecom Technol. J.* 2000, 18, 68-70.
- (61) Subramanian, D.; Druschel, P.; Chen, J. Ants and Reinforcement Learning: A Case Study in Routing in Dynamic Networks. In Proceedings of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Nagoya, Japan, 23-29 August 1997; pp. 832-839.
- (20) Bonabeau, E.; Henaux, F.; Guérin, S.; Snysers, D.; Kuntz, P.; Theraulaz, G. Routing in Telecommunications Networks with Ant-Like Agents. In Proceedings of the Second International Workshop on Intelligent Agents for Telecommunication Applications, Paris, France, 4-7 July, 1998; Lecture Notes in Computer Science; Springer-Verlag: London, UK, 1998; Volume 1437, pp. 60-71.
- (21) 吉川公雄‘ 社会性昆虫 生態学講座 一一卷 一一一’ 共立出版‘ 一九七三’。
- (22) 長谷川英祐‘ 働かならばりに意義がある’ メディアファクトリー‘ 二〇一〇’。
- (23) Deneubourg, J.L.; Goss, S. Collective patterns and decision-making. *Ethol. Ecol. Evol.* 1989, 1, 295-311.
- (24) Beekers, R.; Deneubourg, J.L.; Goss, S.; Pasteels, J.M. Collective decision making through food recruitment. *Insectes Sociaux* 1990, 37, 258-267.
- (25) Colorni, A.; Dorigo, M.; Maniezzo, V. Distributed Optimization by Ant Colonies. In Proceedings of the European Conference on Artificial Life, Paris, France, 1-3 December 1991; pp. 134-142.
- (9) Dorigo, M.; Gambardella, L.M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 1997, 1, 53-66.
- (27) Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A. *Positive Feedback as a Search Strategy*; Technical Report 91-016; Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, June 1991.
- (28) Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. Syst.*

Man Cybern. Part B Cybernetics 1996, 26, 29-41.

- (8) Sipser, M.; Introduction to the Theory of Computation, PWS Pub., 1996.
- (9) Choudhury, R.R.; Bandyopadhyay, S.; Paul, K. A Distributed Mechanism for Topology Discovery in *Ad Hoc* Wireless Networks Using Mobile-Agents. In Proceedings of the 1st ACM International Symposium on Mobile *Ad Hoc* Networking & Computing, Boston, MA, USA, 11 August 2000; pp. 145-146.
- (10) Di Caro, G.; Dorigo, M. *AntNet: A Mobile Agent Approach to Adaptive Routing*; Technical Report IRIDIA 97-12; Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium, December 1997.
- (11) Di Caro, G.; Dorigo, M. An Adaptive Multi-agent Routing Algorithm Inspired by Ants Behaviour. In Proceedings of Fifth Annual Australasian Conference on Parallel and Real-Time Systems, Adelaide, Australia, 28-29 September 1998.
- (12) Di Caro, G.; Dorigo, M. AntNet: Distributed stigmergetic control for communications networks. *J. Artif. Intell. Res.* 1998, 9, 317-365.
- (13) Di Caro, G.; Ducatelle, F.; Gambardella, L.M. *AntHocNet: An Adaptive Nature-Inspired Algorithm for Routing in Mobile Ad Hoc Networks*; Technical Report IDSIA-27-04-2004; Dalle Molle Institute for Artificial Intelligence, Manno, Switzerland, September 2004.
- (14) Di Caro, G.; Ducatelle, F.; Gambardella, L.M. AntHocNet: An Ant-Based Hybrid Routing Algorithm for Mobile *Ad Hoc* Networks. In Proceedings of Eighth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature VIII, Birmingham, UK, September 2004; Lecture Notes in Computer Science, Volume 3242, pp. 461-470.
- (15) Ducatelle, F.; di Caro, G.; Gambardella, L.M. Ant Agents for Hybrid Multipath Routing in Mobile *Ad Hoc* Networks. In Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services, St. Moritz, Switzerland, 19-21 January 2005; pp. 18-19.
- (16) Di Caro, G.; Ducatelle, F.; Gambardella, L.M. AntHocNet: An adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile *ad*

- hoc networks. Eur. Trans. Telecommun.* 2005, 16, 443-455.
- (88) Bouazizi, I. ARA-The Ant-Colony Based Routing Algorithm for MANETs. In Proceedings of the 2002 International Conference on Parallel Processing Workshops, Vancouver, BC, Canada, 21 August 2002; pp. 79-85.
 - (89) Zhou, Y.; Zincir-Heywood, A.N. Intelligent Agents for Routing on Mobile *Ad-Hoc* Networks. In Proceedings of the Second Annual Conference on Communication Networks and Services Research, May 2004; pp. 249-254.
 - (90) Baras, J.S.; Mehta, H. A Probabilistic Emergent Routing Algorithm (PERA) for Mobile *Ad Hoc* Networks. In Proceedings of the WiOpt '03: Modeling and Optimization in Mobile, *Ad Hoc* and Wireless Networks, Sophia-Antipolis, France, 3-5 March 2003.
 - (91) Câmara, D.; Loureiro, A.A.F. GPS/ant-like routing in *Ad Hoc* networks. *Telecommun. Syst.* 2001, 18, 85-100.
 - (92) Kambayashi, Y.; Harada, Y. A Resource Discovery Method Based on Multi-Agents in P2P Systems. In Intelligent Agents in the Evolution of Web and Applications; Nguyen, N.T., Jain, L.C., Eds.; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, Germany, 2009; pp. 113-135.
 - (43) 金子勇' Winny の技術' マスカー' 110005。
 - (44) P2P Foundation: Liberation Technology. http://p2pfoundation.net/Liberation_Technology の公開資料
 - (45) Diamond, L. Liberation Technology. *J. Democracy*, 2010, 21 (3), 32-46.
 - (46) Aviles del Moral, A.; Takimoto, M.; Kambayashi, Y. ERAM: Evacuation Routing Using Ant Colony Optimization over Mobile *Ad Hoc* Networks. In Proceedings of the Fifth International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Barcelona, Spain, 15-18 February 2013; pp. 118-127.