エージェントの移動性を考慮した エージェント間通信のトラフィック量に関する実験と評価

正員 能登 正人* 非会員 沼澤 政信**
非会員 栗原 正仁***

Empirical Evaluation of Traffic Performance of Inter-Agent Communication Systems with Mobile Agents

Masato Noto*, Member, Masanobu Numazawa**, Non-member, Masahito Kurihara***, Non-member

In this paper we study the basic characteristics of traffic performance of agent communication systems, focusing upon the mobility of agents. First, we will briefly introduce several application models in terms of when, where and for what purposes the agent should be moved. Then we will focus on the model in which the mobility is used for trying to reduce the total communication cost among the agents and develop a simple model on top of some kind of distributed constraint satisfaction model. Finally, we will show the empirical results obtained from the simulation and discuss how the mobility could affect the overall performance of this type of systems.

キーワード：エージェント間通信，トラフィック，通信量

Keywords: agent communication, traffic performance, communication cost

1. はじめに

近年のネットワーク技術の急速な発達により，コンピュータの利用形態は，単体で使用するというよりも，インターネットや LAN などのネットワークを介して使用する環境になった。特に，非対称デジタル加入者線 (ADSL) や光ファイバを利用したサービスなど，定額制によるブロードバンド (大容量高速通信) 回線の普及を背景に，比較的容易に大容量データを扱うことが可能となり，インターネットの利用者は急激に増加している。また，ネットワーク端末の小型化により，携帯電話に代表される移動体通信からもネットワークに接続することが可能となっており，利用

者の増加により通信量が增大している。そのため，高品質な画像や音声などといった大容量データを扱う場合には，ブロードバンド時代といえども通信トラフィックの性能評価⁽¹⁹⁾⁽²⁴⁾を事前にきちんと実施し，有線無線に関わらず効率よくデータをやり取りする必要がある。

このような背景のもと，ソフトウェア基盤技術においても，時代の要請に応じた新しい研究テーマが生み出されてきている。本論文で対象とするエージェント技術もその一つであり，高品質で信頼性の高い分散型ソフトウェアを構築するための新しいソフトウェア構造モデルとして期待されている⁽⁶⁾。エージェント技術に関しては，文献 (10) (14) などを参照されたい。

エージェント技術の進展は著しく，最近では，モバイルエージェントと呼ばれる自律的移動性を有したプログラムが容易に開発できるようになってきた。しかし，その反面，通信トラフィック特性をこれまで蓄積されてきた知見から理解することは困難になってきている。したがって，エージェントの移動性までを考慮したトラフィック特性を評価する方法論を早急に確立する必要がある。そのためには，当面はその基礎となる知見を種々のケーススタディを通じて蓄積する必要があると考える。

本論文では，そのケーススタディとして，分散制約充足を取り上げる。これは各エージェントが近傍のエージェントと通信しあいながら全体的な制約を満たすように自らの

* 神奈川大学工学部電気電子情報工学科

〒 221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1

Department of Electrical, Electronics and Information Engineering, Faculty of Engineering, Kanagawa University
3-27-1, Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama 221-8686

** 小樽商科大学商学部社会情報学科

〒 047-8501 小樽市緑 3-5-21

Department of Information and Management Science, Faculty of Commerce, Otaru University of Commerce
3-5-21, Midori, Otaru 047-8501

*** 北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻

〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

Institute of Systems and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-8628

状態（変数の値）を決定する問題である。これは十分に抽象的で簡明なモデルである一方、エージェントの行動が事前に静的には決められておらず、周囲の状況に依存して機会主義的に動的に決定される点で十分に複雑な計算モデルであるといえる。最終的に確立されるべき方法論は、少なくともこのモデルについても有効に適用可能であることが必要条件となるであろう。したがって、本研究では、最初に取り組むべきケーススタディとして分散制約充足が適切であると判断した。

本論文では特に次の二点について重点的に論じる。第一点は、いつ・どこへ・どのような目的でエージェントを自律的に移動させるのかという制御の観点からの議論である。本論文では、通信量を削減することを目的とする移動に的をしぼり、移動するための条件と移動先を決めるための基本的なアルゴリズムを提案する。

第二点は、エージェントが環境全体についての知識を持たないという前提で、部分的な情報だけからどのようにして行動戦略を決定するかという困難な問題を論じることである。本論文では、分散制約充足という特定の問題について限定的ではあるが、制約を表すリンク数が未知のときにエージェントサイズとエージェント数から移動の得失を判定する基準を算出する方法を示すことにより、上述の困難な問題への取り組みに貢献する。

以下、本論文は次のような構成になっている。2. 章では、エージェントとエージェントの実現基盤技術について概説し、その特徴を述べる。3. 章では、考えうる種々の移動条件を簡単に考察した後、通信量を移動のトリガとしたモデルを導入する。4. 章では、導入したモデルを評価するためのシミュレーション実験について述べ、実験結果に基づき、このモデルの特徴を議論する。また、関連研究として、モバイルエージェントシステムの性能を比較している研究および分散制約充足に関する研究を中心に述べる。5. 章では、まとめと今後の課題を述べる。

2. エージェントとその協調システム

2.1 エージェント 本論文では、モバイルエージェントと呼ばれる移動性を有したエージェントに着目する。モバイルエージェントは、コンピュータ間の自律的移動能力を持つプログラムであり、エージェント自体が利用者の代理人としてネットワーク上を自律的に移動しながら特定のタスクを遂行するものである。モバイルエージェントの特徴や概説は、文献 (9) を参照されたい。

モバイルエージェントを用いてコード転送し、それぞれのホストでその転送されたコードを実行するためには、セキュリティ保護、障害対策、トラフィック増加、管理の手間の増加といった問題が複雑化する。しかしながら、不安定で間欠的な通信路を常時使用する必要がなく、通信コストの削減が可能となるなどメリットが大きい。その理由は、従来のクライアント/サーバ方式とモバイルエージェント方式の二つの処理形態を比べることにより、容易に理解す

図 1 処理形態の違い

Fig. 1. Difference of processing type.

ることができる。(図 1 参照。)クライアント/サーバ方式では、毎回の要求と応答がネットワーク上を行き来するため、ホスト間のコネクションは、常時維持しなければならないのに対して、モバイルエージェント方式では、エージェントが移動するときだけコネクションを確立すればよい。これは、電話回線でモデムを利用する場合の通信や、無線を利用しているためコネクションが不安定な携帯電話、移動体通信などの通信形態にとっては非常に有利である。

2.2 協調システム モバイルエージェント方式により、効率よくデータのやり取りをする(通信トラフィックを削減する)ためには、他のエージェントと協調する必要がある。エージェントの協調方式には、問題分割主導型であるタスク共有型と部分解統合主導型である結果共有型があり、それぞれ種々の方式が提案されている。タスク共有型は、問題を分割する操作と分割した問題をエージェントへ配分する操作に重点を置いたものであり、結果共有型は、各エージェントから得られた複数の部分解を統合する操作に重点を置いたものである。たとえば、タスク共有型である契約ネットプロトコル(Contract Net Protocol: CNP)⁽²²⁾は、エージェントの協調方式としては古典的で最も代表的な方式である。この方式は、人間社会のさまざまな契約プロセスをモデル化した方式であり、複雑なタスクを分割し契約を結びながら複数のエージェントに割り当てていくプロトコルである。

本論文では協調の具体的な内容よりは、その際に生じるトラフィック特性に注目し、1 章で述べたように、協調処理の基本とも考えられる単純なモデルである分散制約充足に限定して研究する。その基礎となるのは、制約充足問題⁽¹⁶⁾である。これは、複数の変数とその取り得る値の領域、および変数間のいくつかの制約が与えられたときに、制約をすべて満たすように変数に値を割り当てよという問題である。分散制約充足は、制約充足問題の各変数をネットワーク中

の各エージェントが決定すべきものとして分散化させたものである。したがって、複数のエージェントがエージェント間通信によりメッセージ交換しながら、全体の制約を満足する解を探索する必要がある。応用として、複数のエージェントにタスクや資源を割り当てる分散資源割当問題、各エージェントが互いに矛盾のない解釈を構築する分散解釈問題などさまざまな問題が定式化されている⁽⁵⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾⁽²³⁾。

分散制約充足における典型的な処理（局所改善法とも呼ばれる）においては、まず各エージェントは自分の管理する変数の初期値をランダムに決定する。その後、近傍のいくつかのエージェントとメッセージを交換しながら、すべての近傍エージェントとの間の制約を満たすために、何らかの戦略に基づいて、自分の管理する変数の値を更新する。たとえば、違反数最小化戦略では、近傍エージェントとの間で満たされていない制約の数が最小となるように変数の値を更新する。

このように、エージェント間での問題解決には、エージェント間通信が頻繁に行われる。

3. エージェントの移動性と通信量

本章では、特に、エージェントの移動性に焦点を当てるが、特別なケースとしてエージェントが全く移動しないケースを包含している。はじめに、考えうるいくつかの移動条件を列挙し、続いてそのうちの一つである通信量に基づく移動条件を詳細化したモデルを構築する。

3.1 移動の条件 現在、エージェントの移動性と分散制約充足を関連付けた研究例はないため、研究の第一歩として、いつ・どこへ・どのような目的で移動したらよいのかを検討する必要がある。以下に移動の条件として考えられる基本的なものを述べる。

（１）時間による移動

一定時間、他のエージェントから何のメッセージ応答もないときに移動する。現在エージェントが存在しているホストが過負荷である、または何らかの理由でプラットフォームの状態が不具合であるかもしれないと考えられるときに移動するため、本移動条件は、ロバスト性を高める効果が期待できると考えられる。

（２）準局所最適時の移動

何らかの最適化基準のもとでエージェントが動作しているとき、エージェントの状態が準局所最適⁽²⁶⁾となったときに移動する。準局所最適の状態を抜け出すには他のエージェントとの協調のために多くのメッセージ交換が必要になる場合がある。本移動条件は、そのような場合、その負荷を軽減し得る可能性を持つ。

（３）メタレベルからの移動要求

アプリケーションに依存して、自分が会いたいエージェントに連絡をとり移動する。これはタスクとして分散制約充足だけを行う研究レベルのエージェン

トシステムでは該当しないが、この機能を一部として包含する現実のアプリケーションにおいては「メタレベル」での要求によって移動する必要が生ずるかもしれない。

（４）計算負荷による移動

自分が存在しているホストマシンの負荷が所定の値を超えたときに移動する。計算負荷による移動では、資源の効率的な利用が期待できると考えられる。

（５）通信量による移動

メッセージの累積量が所定の量を超えたときに、一方のエージェントが他方のエージェントのいる場所へ移動する。この条件は、非常に汎用的な単純な方法であり、通信コストの削減が期待できると考えられる。

以下では「通信量による移動」に基づく考え方で具体的にモデルを構築する。

3.2 通信量をしきい値とする移動条件 我々は、エージェント i が現在自分のいるホストコンピュータと異なるホストにいるエージェント j とメッセージ交換（送信，受信）する部分のプログラムコードに手を入れ、エージェントにこれまでの総通信量を把握させる。それがあるしきい値を超えれば、エージェント i が他のホストに移動して、その後本来の計算を続行するようなモデルを構築する。

はじめに、表記法を決めておく。エージェント間で交換するメッセージ 1 つあたりのサイズは簡単のため固定されていると仮定し、それを 1 と正規化して通信量の単位とする。エージェント i について、エージェント j との総メッセージ量を q_{ij} 、全エージェントとの総メッセージ量を $Q_i = \sum_j q_{ij}$ とする。さらに、メッセージとエージェントの移動に要した通信量（総通信量）を C_i 、しきい値を t_i でそれぞれ表し、初期値の設定は、 $q_{ij} \leftarrow 0, Q_i \leftarrow 0, C_i \leftarrow 0, t_i \leftarrow$ エージェントサイズとする。

エージェントサイズは、エージェントの大きさ（すなわち、プログラムコードおよびエージェントの状態を表すデータの量）でありエージェントが一回移動するのにかかる通信量である。簡単のためにこれは一定であると仮定する。実際、次節で述べるシミュレーション実験で用いる分散制約充足アルゴリズムはこの仮定を満たす。なお、エージェントはメッセージの内容を累積しているわけではなく、量をカウントしているのみなので、この累積がエージェントサイズに与える影響は無視できる。

移動条件のしきい値 t_i には、エージェントが最初に移動するための総メッセージ量 Q_i の基準値を初期値として与える。直観的に、総メッセージ量がエージェントサイズより相対的に小さいうちは移動することによってかえって大きな通信量の増加を招くので、しきい値の考えうる最小の値という意味で初期値をエージェントサイズと等しくした。

以上の準備のもとで、エージェント i がエージェント j とメッセージ交換したときに実行すべき処理は以下の手順にしたがうものとする。

1. $q_{ij} \leftarrow q_{ij} + \text{メッセージサイズ};$
2. $Q_i \leftarrow Q_i + \text{メッセージサイズ};$
3. $C_i \leftarrow C_i + \text{メッセージサイズ};$
4. もし, $Q_i > t_i$ ならば以下 (4.1 ~ 4.4) の処理をする;
 - 4.1 $j \leftarrow \max_j \{q_{ij}\}$ を与える j ;
 - 4.2 エージェント j のいるホストへ移動する;
 - 4.3 $C_i \leftarrow C_i + \text{エージェントサイズ};$
 - 4.4 $t_i \leftarrow 2t_i$;
5. 分散制約充足の処理;

まず, 総メッセージ量がしきい値より小さい間は各エージェント間でメッセージ交換を行いながら, メッセージサイズを q_{ij} , Q_i , C_i に累積していく。その後, メッセージ累積量がしきい値を超えたときに, エージェントは, メッセージ交換したすべてのエージェントの中で総メッセージ量が最大値であるエージェントのいる場所に移動する。このとき, 総通信量にエージェントサイズを累積する。

なお, 最大値をもつエージェントが複数の場合は, その中から非決定的に選択し移動先を決める。しきい値は移動するたびに 2 倍にしていく。これはデータ構造の分野で配列やハッシュ表のサイズを動的に拡張する際にも用いられる考え方の一つとほぼ同様で, 単純ながらも自然な考えである。

4. シミュレーション実験

4.1 実験条件 分散制約充足問題の代表的な例題として分散グラフ色塗り問題がある。グラフ色塗り問題とは, 任意のグラフと色数が与えられ, グラフ上の隣り合うノードを異なる色によって塗るものである。このグラフのノードをエージェントに見立てることで, 分散グラフ色塗り問題のエージェントネットワークが得られる。色数 2, エージェント数 6, リンク数 7 の分散グラフ色塗り問題の例および解を図 2 に示す。

移動が通信量に与える効果について評価するため, 3 章

図 2 分散グラフ色塗り問題の例

Fig. 2. An example of distributed graph-coloring problem.

で導入したモデルを分散グラフ色塗り問題を用いて評価し, 以下に示す条件で, 通信量に関する移動のシミュレーション実験を行う。

- 使用する問題: 3 色の分散グラフ色塗り問題をランダムに発生させる。
- エージェント数: 30, 60, 90, 120, 150
- リンク数: リンク密度 0 ~ 100% の範囲でリンクの本数をパラメータとして設定する。この問題では, リンク密度 25% 前後付近の値のところで最も難しい問題が存在することが知られている⁽³⁾⁽¹⁷⁾。
- メッセージサイズ: 1
- エージェントサイズ: 10 ~ 1000
- 実験回数: リンク数ごとに 100 回ずつ問題を解く。

実験は, 各エージェント数 (30 ~ 150) に対してリンク数を変化させてそれぞれ 100 回問題を解いてその平均値をとって, 各エージェントサイズでの通信量を求める。便宜上, エージェントを移動させない (固定した) ケースをエージェントサイズ ∞ で表すことにする。実験内容をまとめたものを表 1 に示す。

4.2 実験結果と考察 シミュレーション実験の結果として実験 1, 実験 3 および実験 5 (エージェント数が 30, 90 および 150) のときの総通信量のグラフをそれぞれ図 3 ~ 図 5 に示す。

はじめに, エージェント数が十分多い実験 (図 4, 図 5) において, 比較の基準となるエージェントサイズ = ∞ (すなわち移動しないケース) のグラフの特徴を示す。リンク数が増加していくと, ある狭い範囲で急激に総通信量が増加し, そのピークを超えると急激に減少する。これはいわゆる「相転移」などと呼ばれる現象としてよく知られている⁽⁸⁾。その後, 総通信量は緩やかに増加に転じた後, 再度緩やかに減少する。

次に, このグラフを他の (移動する場合の) エージェントサイズのケースと比較する。エージェントサイズが十分小さい場合には, リンク数にかかわらず, 移動しない (固定した) ときの総通信量よりも移動したときの総通信量の方が概ね削減できていることがわかる。逆に, 直観的にも明らかなことだが, エージェントサイズがあまりにも大きい場合は, 移動することにより, その移動に必要な大きな通信量が加算されるため, 総通信量は移動しないときよりもかえって大きくなる。

さらに, 重要なこととして, リンク数が 250 (図 4) 付近

表 1 実験内容

Table 1. Contents of experiment.

	エージェント数	リンク数	エージェントサイズ
実験 1	30	30 ~ 270	10, 70, 300, ∞
実験 2	60	60 ~ 1100	50, 300, 500, ∞
実験 3	90	90 ~ 2600	100, 300, 500, ∞
実験 4	120	150 ~ 4500	100, 400, 600, ∞
実験 5	150	150 ~ 7000	100, 500, 900, ∞

図 3 実験 1 (エージェント数: 30)

Fig. 3. Experiment 1 (number of agents: 30).

図 4 実験 3 (エージェント数: 90)

Fig. 4. Experiment 3 (number of agents: 90).

図 5 実験 5 (エージェント数: 150)

Fig. 5. Experiment 5 (number of agents: 150).

(図 5 では 400 付近) の最も難しい問題による通信量のピークが、いずれのエージェントサイズの場合も、 ∞ のケースより低く抑えられていることがわかる。これは、今回設定した移動基準が、過大な通信量を抑制するように働くこと

表 2 $D_{n,s}$ の計算結果

Table 2. Computational results of $D_{n,s}$.

エージェント サイズ s	エージェント数 n				
	30	60	90	120	150
10	-4220	-21800	-61500	—	—
50	-1520	-14500	-51400	-124000	—
100	1180	-7270	-38600	-107000	—
200	3230	5640	-16700	-71900	-94200
300	—	14000	2730	-35100	-59400
400	—	18500	18400	-5380	-28900
500	—	—	29500	26200	17300

によるものと考えられる。

エージェントサイズがある程度小さければ移動の効果があり、逆にある程度を超えて大きければ移動は逆効果となることがわかった。そこで、移動が効果的でありうるようなエージェントサイズの上限を求める。エージェント数に加えてリンク数が既知として与えられたときは、エージェントサイズをパラメータとして今回のような実験をして、移動しないケースと比較すれば上限は自明な方法で実験的に求められる。しかし、分散環境においては一般にエージェントは問題の全体を知らないの、エージェント数のみは知っているとして、リンク数を知らない場合の上限を定義しその概数を試算して、その効果を論じることとする。

以下では、基本的なヒューリスティクスを例として、その効果を評価する。まず、エージェント数が n 、エージェントサイズが s のときの総通信量をリンク数 ℓ の関数として $C_{n,s}(\ell)$ で表す。(図 3～図 5 の一本一本の折れ線がそのような関数の実例を表している。)そこで、 $s = \infty$ の関数との平均的な差を以下の式で定める。

$$D_{n,s} = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L [C_{n,s}(\ell) - C_{n,\infty}(\ell)]$$

ただし、 $L = n(n-1)/2$ はリンク数の上限値である。今回の実験から求めた $D_{n,s}$ の概算値の一部を表 2 に示す。表からわかるように、エージェント数を固定したとき、エージェントサイズ s が十分小さいときは $D_{n,s} < 0$ であることから、移動が効果的であるといえる。逆に s が十分大きいときは $D_{n,s} > 0$ であることから、移動は効果的でないといえる。そこで、先ほど論じた上限として、 $D_{n,s} < 0$ を満たす最大の s の値を採用する。その値は n 毎に定まることから、 s_n で表すことにする。

表 2 から補間によって求めた s_n の近似値を表 3 および図 6 に示す。最小 2 乗法によって s_n を n の 1 次関数で近似すると、おおよそ $s_n = 3.1n$ となることから、きわめて大まかな指針として、リンク数が未知の場合、メッセージサイズを 1 としたときのエージェントサイズが、エージェント数のおよそ 3 倍程度以内のときは、図 6 における「移動が効果的」な領域となり、移動による通信量の削減が期待できる。エージェントを実装するクラスファイルを各ホストに事前に置いておくなど、実装上の工夫でこの条件を満たせば、通信量の削減という理由だけで、エージェントを移動させる正当な理由となり得る。

表 3 s_n の近似値

Table 3. Approximate value of s_n .

n	30	60	90	120	150
s_n	75	156	286	417	463

図 6 移動効果の境界線

Fig.6. Border line of the effectiveness of the mobility.

ただし、エージェントサイズがこの指針より大きいときに本条件が役に立たないというわけではない。リンク数が既知で、特に、計算量的に「難しい問題」を発生させるようなリンク数のときには、多少エージェントサイズが大きくても、それを大きく上回るメッセージ量を削減できるので効果が大きい。また、3・1 で述べたような種々の理由で移動そのものが効果を発揮することもあり得る。

4・3 関連研究 モバイルエージェントに関する研究は近年盛んに行われてきており、我々の研究と同様、エージェントが移動する場合としない場合に着目し、性能を比較している研究がいくつかある。

文献(4)では、複数のサーバにアクセスする1つのエージェントが、総通信量を最小化することを目的として、エージェントサイズとメッセージサイズに応じて各アクセス毎に移動または非移動を戦略的に選択できるシステムを提案している。文献(12)では、実際に開発したモバイルエージェントシステムでの経験に基づいて、その応用可能性を冷静かつ包括的に論じている。特に、性能の問題については、画像処理に関連するタスクに関して、モバイルエージェントシステムとクライアント/サーバシステムにおける応答時間の特性を評価し比較している。文献(25)では、多くのリモートデータサーバ間に分散して存在するデータをモバイルフィルタエージェントが調査するような環境を分析し、通信コストを最小限にするようにエージェントの行動をコーディネートするアプローチ法を提案している。文献(13)では、DA (Direct Access), SA (Stationary agents Access), MA (Mobile agents Access) の3つの基本的なエージェントパラダイムを定義し、マルチエージェントフレームワークBee-gentにより開発された分散データベースシステムにお

いて、通信量やトータル処理時間などネットワークに関する諸性能を実験により定量的に評価している。その他にも、クライアント/サーバ方式とモバイルエージェント方式を比較している研究としては、文献(7)(20)などがある。

また、悪意のある攻撃からモバイルエージェントを守るためのアルゴリズム(プロトコル)を提案し、そのオーバーヘッドを評価するために、計算機実験によりエージェントサイズと1回の移動に要する時間との関係を調べている研究⁽²¹⁾や、既存のWebシステム上で軽量のモバイルエージェントを動作させられるシステムを開発し、システム内のエージェント数およびクライアント数が応答時間に与える影響を実験的に評価している研究⁽²⁾など興味深い研究も数多く報告されている。

一方、分散制約充足に関する研究も、現実的な問題を解決する有効的なモデルとして近年盛んに行われてきており、分散制約充足問題を解くためのアルゴリズムがいくつか提案されている。分散制約充足問題を解くアルゴリズムは、厳密解法である木探索アルゴリズムと近似解法である反復改善型アルゴリズムの大きく二つに分類される⁽¹⁸⁾。前者は整合性をとりながら部分解を拡張して探索木をたどり完全な解を求める。後者は変数に制約を満足しない値を割り当てた状態から制約違反を局所的に改善していくものであり、文献(26)で提案された分散ブレイクアウト法が効果的な状態空間探索法の一つとして注目されている。文献(1)では、厳密解法である同期型分枝限定法と近似解法である分散ブレイクアウト法を組み合わせることにより、効率よく解を求める手法を提案し、実験により有効性を示している。

5. おわりに

本研究では、はじめに、いつ・どこへ・どのような目的でエージェントを移動させるかという問題に対する基本的な考察をし、その中から、総通信量を抑制する目的で移動するケースに焦点を当て、簡単なアルゴリズムを構成した。次に、分散制約充足を行う協調システムに基づくエージェント間通信モデルを構築し、シミュレーションにより総通信量を測定した。その結果、以下のことが確認できた。

- (1) 総通信量は、一般にリンク数の増加とともに急激に増加し、ピークに達した後急激に減少する。その後緩やかに増加し、やがて緩やかな減少へと転じる。
- (2) リンク数が未知の場合、上限として定義した s_n よりもエージェントサイズが十分小さいならば、移動により総通信量を概ね削減できる。逆に、エージェントサイズが十分大きいならば、移動することで総通信量はかえって増加する。
- (3) 総通信量がピークとなる困難な問題に対しては、エージェントサイズがある程度大きくても総通信量を抑制できる。

1章で述べたように、本研究の目的は、ケーススタディを通して、エージェントの移動性を考慮したエージェント間通信のトラフィック性能を評価する方法論の確立に寄与

ることになった。実際、ここで提案したアルゴリズムは単に通信量の累積に応じて移動するという考え方に基いているため、分散制約充足という特定の問題とは独立に、幅広いシステムにおいて、そのままあるいは拡張して応用可能である。

それに対し、実験結果から得られた知見は分散制約充足の範囲内に限定される。しかし、ここでは間接的ながら、環境全体の情報が未知なときに、部分的な情報からいかに移動の得失判定ができるかという一般的な問題を扱っており、ケーススタディの設定範囲内では独自の考えに基づいてそれを解決している。2・2 で述べた分散制約充足の現実的な応用が将来のモバイルエージェントシステム上で稼働する際には、ここで述べた手法と知見は有益なものとなるだろう。今回の知見は分散制約充足以外の分野に直接活かすことはできないが、より広い観点から今回のケーススタディを説明できるようなモデルの開発が今後の研究課題として期待される。

最後に、本論文に直接関わる短期的な研究課題をいくつか挙げておく。今回提案したアルゴリズムをどのように精密化するといっそうの通信量抑制につながるかは興味あるテーマである。また、1つのホストに多数のエージェントが集中すると、CPU タイムが各エージェントに分配されるため、1 エージェント当りの計算スピードが減少することになるが、本論文では無視したこの効果を取り入れたモデルの開発ができれば、エージェントを特定のホストに集中させないメカニズムとその効果が分析可能となる。

謝 辞

シミュレーションプログラムの作成および実験に協力していただいた西田真和君（北海道工業大学大学院工学研究科電気工学専攻）に感謝する。また、本論文に対し査読者の方々からは貴重なコメントをいただいた。ここに記し、感謝する。なお、本研究の一部は、文部科学省科学研究費（課題番号 12780246）の補助によって行われた。

（平成 14 年 6 月 26 日受付，平成 15 年 3 月 3 日再受付）

文 献

- (1) M. Ando and M. Noto: "Experimental Evaluation of Distributed Maximal Constraint Satisfaction Algorithm", Proc. 2002 International Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, pp.1638-1641 (2002)
- (2) S. Arumugam, A.S. Helal, and A. Nalla: "aZIMAS: Web Mobile Agent System", Proc. 6th International Conference on Mobile Agents, MA 2002, Lecture Notes in Computer Science, Vol.2535, pp.1-15 (2002)
- (3) P. Cheeseman, B. Kanefsky, and W. Taylor: "Where the Really Hard Problems Are", Proc. 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.331-337 (1991)
- (4) T. Chia and S. Kannapan: "Strategically Mobile Agents", Proc. First International Workshop on Mobile Agents, MA '97, Lecture Notes in Computer Science, Vol.1219, pp. 149-161 (1997)
- (5) S.E. Conry, K. Kuwabara, V.R. Lesser, and R.A. Meyer: "Multistage Negotiation for Distributed Constraint Satisfaction", *IEEE Trans. on Syst, Man and Cybernetics*, Vol.21, No.6, pp.1462-1477 (1991)
- (6) 電気学会 新ソフトウェア・アーキテクチャの産業応用調査専門委員会編：オブジェクト指向とエージェント - 基礎と応用 - ，オーム社 (2001)
- (7) R.S. Gray, D. Kotz, R.A. Peterson, J. Barton, D. Chacon, P. Gerken, M. Hofmann, J. Bradshaw, M. Breedy, R. Jeffers, and N. Suri: "Mobile-Agent versus Client/Server Performance: Scalability in an Information-Retrieval Task", Proc. 5th International Conference on Mobile Agents, MA 2001, Lecture Notes in Computer Science, Vol.2240, pp.229-243 (2001)
- (8) T. Hogg, B.A. Huberman, and C.P. Williams: "Phase Transitions and the Search Problem", *Artificial Intelligence*, Vol.81, pp.1-15 (1996)
- (9) 本位田真一・大須賀昭彦：オブジェクト指向からエージェント指向へ，ソフトバンク社 (1998)
- (10) 本位田真一・飯島 正・大須賀昭彦：エージェント技術，共立出版 (1999)
- (11) M.N. Huhns and D.M. Bridgeland: "Multiagent Truth Maintenance", *IEEE Trans. on Syst, Man and Cybernetics*, Vol.21, No.6, pp.1437-1445 (1991)
- (12) D. Johansen: "Mobile Agent Applicability", Proc. Second International Workshop on Mobile Agents, MA '98, Lecture Notes in Computer Science, Vol.1477, pp.80-98 (1998)
- (13) T. Kawamura, S. Joseph, A. Ohsuga, and S. Honiden: "Quantitative Evaluation of Pairwise Interactions between Agents", Proc. Second International Symposium on Agent Syst. and Appli and Fourth International Symposium on Mobile Agents ASA/MA 2000, Lecture Notes in Computer Science, Vol.1882, pp.192-205 (2000)
- (14) 木下哲男編：エージェントシステムの作り方，電子情報通信学会 (2001)
- (15) V.R. Lesser and D.D. Corkill: "The Distributed Vehicle Monitoring Testbed: A Tool for Investigating Distributed Problem Solving Networks", *AI Magazine*, Vol.4, No.3, pp.15-33 (1983)
- (16) A.K. Mackworth: "Constraint Satisfaction", in S.C. Shapiro ed., *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, pp.285-293, Wiley-Interscience Publication, New York (1992)
- (17) S. Minton, M.D. Johnston, A.B. Philips, and P. Laird: "Minimizing Conflicts: A Heuristic Repair Method for Constraint Satisfaction and Scheduling Problems", *Artificial Intelligence*, Vol.58, pp.161-205 (1992)
- (18) P. Morris: "The Breakout Method for Escaping from Local Minimum", Proc. Eleventh National Conference on Artificial Intelligence, pp.40-45 (1993)
- (19) M. Murata and H. Miyahara: "Teletraffic Theory and Its Application to Communication Systems", *Journal of IEICE*, Vol.77, No.9 - Vol.78, No.5 (1994-1995) (in Japanese)
村田正幸・宮原秀夫：「通信トラヒック理論とその応用」，通学誌，77, 9 - 78, 5 (1994-1995)
- (20) A. Puliafito, S. Riccobene, and M. Scarpa: "An Analytical Comparison of the Client-Server, Remote Evaluation and Mobile Agents Paradigms", Proc. First International Symposium on Agent Systems and Applications and Third International Symposium on Mobile Agents ASA/MA '99, pp.278-292 (1999)
- (21) V. Roth: "Empowering Mobile Software Agents", Proc. 6th International Conference on Mobile Agents, MA 2002, Lecture Notes in Computer Science, Vol.2535, pp.47-63 (2002)
- (22) R.G. Smith: "The Contract Net Protocol: High Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver", *IEEE Trans. on Computers*, Vol.C-29, No.12, pp.1104-1113 (1980)
- (23) K.P. Sycara, S. Roth, N. Sandeh, and M. Fox: "Distributed Constrained Heuristic Search", *IEEE Trans. on Syst., Man and Cybernetics*, Vol.21, No.6, pp.1446-1461 (1991)
- (24) 滝根哲哉・村田正幸：「通信網における待ち行列 - 理論の応用と課題 - 」，オペレーションズ・リサーチ，Vol.43, No.5, pp.264-271 (1998)
- (25) W. Theilmann and K. Rothermel: "Disseminating Mobile Agents for Distributed Information Filtering", Proc. First International Symposium on Agent Systems and Applications and Third International Symposium on Mobile Agents ASA/MA '99, pp.152-161 (1999)
- (26) M. Yokoo and K. Hirayama: "Distributed Breakout: Iterative Improvement Algorithm for Solving Distributed Constraint Satisfaction Problem", *Journal of IPSJ*, Vol.39, No.6,

pp.1889–1897 (1998-6) (in Japanese)

横尾 真・平山勝敏:「分散 breakout: 反復改善型分散制約充足アルゴリズム」, 情報処理学会論誌, **39**, 6, pp.1889–1897 (1998-6)

能 登 正 人 (正員) 1967 年生。1996 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程修了。北海道自動車短期大学講師を経て、現在、神奈川大学工学部電気電子情報工学科講師。ソフトウェアシステム、エージェント理論、最適化手法などに関する研究に従事。博士(工学)。情報処理学会、電子情報通信学会、人工知能学会、日本ソフトウェア科学会、日本知能情報ファジィ学会各会員。

沼 澤 政 信 (非会員) 1969 年生。1999 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程修了。同年 4 月より日本学術振興会特別研究員 PD。2000 年小樽商科大学商学部社会情報学科助教授。計算モデル、ソフトウェア科学などの研究に従事。博士(工学)。情報処理学会、電子情報通信学会、人工知能学会、日本ソフトウェア科学会各会員。

栗 原 正 仁 (非会員) 1955 年生。1980 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。北海道大学および北海道工業大学勤務を経て、現在、北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻教授。システム工学、知能情報工学などの研究に従事。工学博士。情報処理学会、電子情報通信学会、人工知能学会、日本ソフトウェア科学会、米国人工知能学会 (AAAI) 各会員。