

M-057

## 格子結合網上のモバイルエージェントのための領域分割型メッセージ伝達法

## A Message Delivery Method for Mobile Agents on Grid-Type Networks

重井 徳貴†

宮島 廣美†

Noritaka Shigei

Hiromi Miyajima

## 1. まえがき

モバイルエージェント (MA) は、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プロセスのことであり、分散環境における通信量の低減、負荷分散に効果的であることが知られている。MA の実行では、自由に移動する MA に対し、いかに確実に、速く、少ない通信量でメッセージを伝達するかが重要となる。

MA のメッセージ伝達の古典的な手法として、全てのノードにメッセージを送る Broadcast 法 [1]、ホストのノードで MA の位置情報を管理する Home-Proxy 法 [4]、電子メールの仕組みを採り入れた E-mail 法 [5] などが知られている。Broadcast 法は多い通信量、Home-Proxy 法は確実な伝達が保証されていないこと、そして E-mail 法は時間的なオーバーヘッドが大きいといった問題点がある。これらの問題点を解決すべく、Murphy 法 [1]、エリア分割法 [2]、領域間結合が疎な領域分割法 (以下、疎結合領域分割法と呼ぶ) [7] が提案されている。Murphy 法は、移動する MA を追跡するようにメッセージの伝達を行う手法である。この手法は、自律分散的に動作し、確実なメッセージの受信のみならず受信の順番が送信順と同じであることも保証されているが、MA の移動範囲が広がるにつれ通信量が多くなる傾向がある。エリア分割法は、ネットワークを複数の領域に分割し、MA が存在するエリア内で Murphy 法による伝達を行うことで、Murphy 法の弱点を改善するが、領域の境界ノード間で情報の同期をとる必要がある。これに対し、疎結合領域分割法は、境界ノード間の同期が不要であり、処理のオーバーヘッドが少ないという特徴を持つ。この手法の有効性は、インターネットの理論的なモデルである Scale-Free ネットワーク [3] について示された [7]。

本論文では、Scale-Free ネットワークとは異なり、空間的な隣接関係に基づくネットワークである格子結合網への疎結合領域分割法の適用について検討する。はじめに、提案されている領域分割アルゴリズムを格子結合網に適用する場合の問題点について述べる。そして、格子結合網のための二種類の領域分割法を提案し、これらの有効性について検討する。

## 2. モバイルエージェントとメッセージ伝達

MA は、ネットワークで結合された処理ノード (典型的にはコンピュータ) 上を移動し、各ノード上で処理を行うデータとプログラムからなるオブジェクトであり、移動先のノード上で処理を行い、送り出し元のノードに処理結果を持ち帰る。移動する MA に対し処理の中止や処理内容の変更などの指示を出したり、MA 間で情報

交換を行ったりする必要がある。このとき、MA に対し送受信されるデータをメッセージと呼ぶ。本論文では、メッセージ伝達の問題として、MA を生成したノードから MA にメッセージを届けることを考える。MA はネットワーク上のノードを移動しながら処理を行うので、このメッセージの伝達を確実かつ短時間でいかに行うかが問題となる。

Murphy 法 [1] について説明する。以下では、MA が移動するネットワークにおいてノード間にリンクが存在する場合、互いに向きの異なる 2 本の有向のリンクがあるものとする。この有向リンクのことをチャンネルと呼び、あるノードから見て入ってくる側を入力チャンネル、出ていく側を出力チャンネルと呼ぶ。Murphy 法は、仮想ネットワークの概念を導入することで、メッセージが移動する MA の軌跡をたどりメッセージを伝達する。仮想ネットワークにおけるネットワークは、はじめはリンクが存在しない空のグラフであり、その後、MA があるチャンネルを通過するごとにそのリンクがグラフに追加されていく。

Murphy 法では、はじめ、全てのチャンネルは非アクティブ状態であり、MA が通過することでアクティブ状態となり、メッセージ伝達の処理に参加するようになる。あるメッセージ  $m$  を伝達する場合の、各ノードにおける処理の流れは次のとおりである。

処理 (1) アクティブな入力チャンネルからメッセージ  $m$  を受け取ったノードは、MA がそのノードに滞在している場合は、メッセージ  $m$  を MA へ渡し、メッセージ伝達を完了する。さもなければ、そのメッセージのコピーを残し、全てのアクティブな出力チャンネルへメッセージ  $m$  を送出する。

処理 (2) 全てのアクティブな入力チャンネルからメッセージ  $m$  を受け取った場合、メッセージのコピーを削除し、このノードでは、メッセージ  $m$  の伝達の処理を終了する。

処理 (3) MA がまだメッセージ  $m$  を受け取っておらず、メッセージ  $m$  の伝達の処理を既に終了したノードに移動する場合、MA はメッセージ  $m$  が追いつくまでチャンネル上で拘束される。追いついたメッセージ  $m$  を MA が受理した時点で、MA は解放される。

処理 (1) により、メッセージは移動する MA の軌跡をたどるように伝送される。処理 (2) は、各ノードにおけるメッセージ伝達処理の終了を定義する。これにより、ネットワーク上をメッセージがいつまでも伝搬し続けたり、ノードのメモリがオーバーフローするようなことはない。これらの処理の例を図 1 に示す。この例は、ノード A で生成された MA が移動し、ノード A で生成されたメッセージを MA に伝達する場合である。図 1.(a) は、既に MA が移動し、そしてメッセージがちょうどノード A から送出されたところである。メッセージが送られ

† 鹿児島大学工学部, Kagoshima University

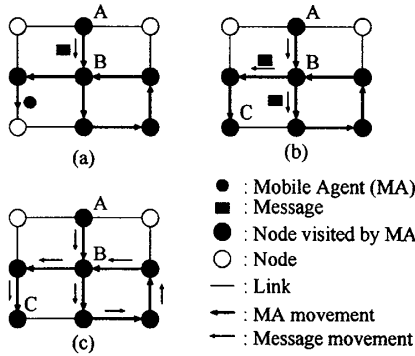


図 1: Murphy 法におけるメッセージ伝達の例

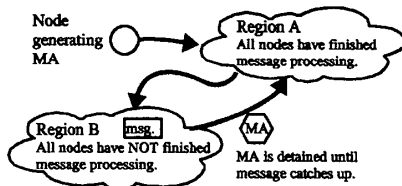


図 2: Murphy 法における処理 (3) の概念図

てくると、各ノードにおいて、処理 (1) と処理 (2) を行う。続いて、図 1.(b) では、ノード B は二つのアクティブな出力チャネルを有しているが、メッセージは全てのアクティブな出力チャネルへ送出される。また、このときメッセージのコピーがノード上に作成される。最後に、図 1.(c) では、左方向のチャネルに送出されたメッセージがノード C に滞在している MA に届く。下方向の出力チャネルに送出されたメッセージは、再び、ノード B にもどって来ることになるが、既に全てのアクティブな入力リンクからメッセージを送出しているため、再度の送出は行わない。また、全てのアクティブな入力リンクからメッセージを受け取ったので、メッセージのコピーを削除し、ノード B はメッセージ伝達の処理を完了する。

処理 (3) は、ネットワーク上を移動し続ける MA に対し、必ずいつかはメッセージが伝達されることを保証する。この処理は、既にメッセージ伝達の処理を終了したノードへ MA が移動すると、MA を拘束しメッセージが追いつくまで待たせる。図 2 にこの処理の概念図を示す。

Murphy 法では、MA がたくさん移動するにつれて、仮想ネットのサイズは大きくなっていき、その伝達法はよりブロードキャストに近くなる。したがって、仮想ネットが小さいときは、メッセージの MA への到着時間が相対的に長くなり、仮想ネットが大きくなるにつれネットワーク内のメッセージ数が多くなる傾向がある。

### 3. 疎結合領域分割法

著者らは、任意のネットワークに適用可能な領域分割型のメッセージ伝達法を提案した [7]。この手法は、与えられたネットワークを、各領域には他の領域とのリンクをもつノード (これを中心ノードと呼び、以下 CN と記す) がただ一つだけ存在するように領域分割を行い、そ

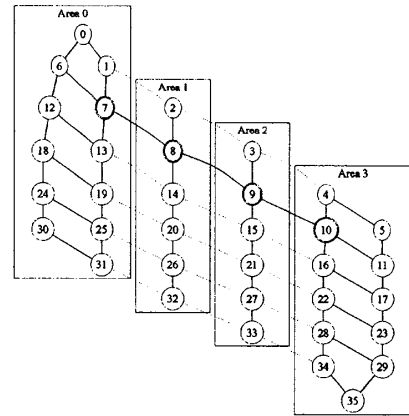


図 3: 領域分割の例 (6 × 6 格子結合網)

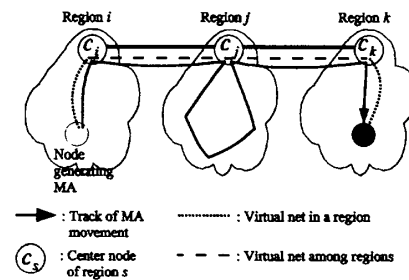


図 4: 疎結合領域分割法における仮想ネットの形成

して、分割されたネットワーク上で、Murphy 法に基づくメッセージ伝達を行うという手法である。

#### 3.1 ネットワークの分割とその問題点

ネットワークの分割では、与えられたネットワーク  $G = (V, E)$  を、 $S$  個の領域に分割し、その結果として、領域ネット  $G_s = (V_s, E_s)$  ( $1 \leq s \leq S$ ) と幹線ネット  $G_C = (V_C, E_C)$  を生成する。ここで、 $V, V_s, V_C$  はノード集合、 $E, E_s, E_C$  はノード間のリンクの集合である。領域ネット  $G_s$  は領域  $s$  に含まれるノードとリンクを表しており、幹線ネット  $G_C$  は CN のみからなるネットワークで CN 間の隣接関係を表している。分割後の全体のネットワーク  $\tilde{G} = (\tilde{V}, \tilde{E})$  は、 $S$  個のグラフ  $G_s$  と  $G_C$  を重ねたグラフであり、 $\tilde{V} = V, \tilde{E} = \left(\bigcup_{s=1}^S E_s\right) \cup E_C$  である。図 3 に 6 × 6 格子結合網を 4 つの領域に分割した例を示す。7, 8, 9, 10 のノードが CN であり、領域間は CN のみを介し結合されるため、分割後のネットワークでは、破線で示されるリンクが取り除かれることになる。

文献 [7] では、任意のネットワークに適用可能な、領域分割アルゴリズムを与えている。このアルゴリズムでは、はじめ、逐次的に隣接ノード数が多いものを CN として選択し、幹線ネットを生成する。そしてその後、CN を出発ノードとして、隣接するノードを領域に加えていくことで、領域ネットを生成するというものである。この手法は、Scale-Free ネットワークのように、ノード数に比べて直径が小さかったり、隣接ノード数が多い

ノードが存在するようなネットワークでは効果的であるが、格子結合網などのように空間的な隣接関係とネットワーク上の近傍関係が一致するようなネットワークでは必ずしも効果的でない。具体的には、CNの決定はノード数に基づき行っているが、格子結合のように次数が異なるネットワークの場合、どのノードもほぼ等確率で選択されることになる。この場合、空間的な隣接関係に基づき、いかに均等にネットワークを分割するかが重要であるといえる。例えば、図3は、[7]のアルゴリズムで分割したものである。この場合、領域0と領域1の直径は7、全体の直径は13であるが、図5と同様に、全ての領域を3×3の格子状に分割することで、全ての領域の直径を4、全体の直径を10と改善することができる。

### 3.2 メッセージ伝達法

疎結合領域分割法は、Murphy法の自然な拡張であり、領域間と領域内に仮想ネットを形成する。領域間の仮想ネットは、幹線ネット $G_C$ 上に生成され、これはMAがCN間を移動した時に拡張される。領域内の仮想ネットは、メッセージを発信したノードが存在する領域内とMAが存在する領域内のみ生成され、領域間に生成される仮想ネットの両端に接続する。MAがある領域 $s$ に入り、その内部で移動する時、仮想ネットは領域ネット $G_s$ 上で拡張され、MAが領域 $s$ からでると $G_s$ 上に生成された仮想ネットは削除される。図4に仮想ネット形成の例を示す。この例では、MAは領域 $i$ のノードを出発し、次に領域 $j$ の内部を移動し、最後に領域 $k$ に入ってきている。仮想ネットは、領域 $j$ 内の出発ノードを起点とし、幹線上でCN $c_i, c_j, c_k$ とつらなり、そして領域 $k$ の内部へと続いている。このとき、領域 $j$ の内部をMAは移動しているが、既に領域 $j$ の内部にMAはないので、この移動は仮想ネットに組み込まれていないことに注意する。提案法では、メッセージの伝達をこの仮想ネット上で行うが、MAが内部に存在しない領域内でのメッセージの伝達を省略することになるので、これによりメッセージ量と伝達時間を縮小することが期待できる。

## 4. 格子結合網のための疎結合領域分割法

本節では、提案法として、疎結合領域分割法のための、 $N \times N$ の二次元格子結合網の二種類の領域分割法について説明する。

### 4.1 2重格子結合を用いたネットワークの分割

一つ目の手法は、2次元格子結合網をサイズ $N/S' \times N/S'$ の $S' \times S'$ 個の領域に分割する。領域分割数が $S' > 2$ の場合、各領域のCNをどのように配置しても、全ての領域を連結とすることが出来なくなる。そこで、もともとの局所的な2次元格子結合網に加え、CNを追加の2次元格子結合網により結合することを考える。各領域のCNは、領域内のほぼ中心のノードとする。図5にノード数が $N = 6$ 、領域数が $S' = 2$ の場合の分割例を示す。網掛けのノードがCNであり、破線が削除されたリンク、太線がCN上に追加された格子結合である。ここで、追加されるリンクは新たなリンクであり、これにより結合されるCN間の距離は1となることに注意する。

以下、追加の2次元格子結合網を導入したネットワー

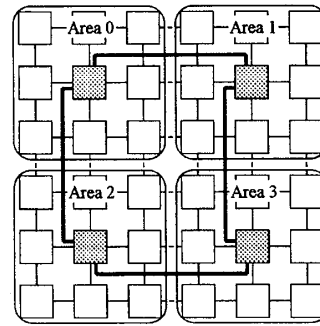


図5: 2重格子結合網を用いたネットワーク分割の例

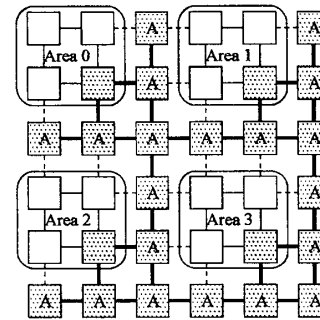


図6: 単一格子結合ネットワークの分割の例

クを2重格子結合網と呼ぶことにする。

### 4.2 単一格子結合網の分割

二つ目の手法では、CN上に追加の格子結合網を導入することなく、もともとの局所的な格子結合のみを用いて、領域分割を行うことを考える。この場合、全ての領域をほぼ均等な正方形とすると、任意の分割数で全ての領域を連結とすることはできない。そこで、均等な正方形領域を、単一のノードからなるたくさんの領域で連結することを考える。具体的には、 $S' \times S'$ 個のサイズ $(N/S' - 1) \times (N/S' - 1)$ の正方形領域を格子状に配置し、正方形領域の行間と列間、最左列と最下行に単一のノードからなる領域を配置する。ここで、 $S' \leq N/2$ であり、 $S' = N/2$ のとき、分割を行わないことと同等となる。図6に、 $S' = 2, N = 6$ の場合の分割の例を示す。網掛けのノードがCNであり、Aと記されたものが単一ノードから領域のノード、破線が削除されたリンク、太線がCN間のリンクである。

以下、通常の格子結合網のことを、2重格子結合網と区別するために、単一格子結合網と呼ぶことにする。

### 4.3 評価

はじめに、 $N = 32$ の場合のネットワークの直径と平均距離を表1に示す。ここで、2重格子(分割無)は、2重格子網と同様のリンクの追加は行うが領域分割を行わず、局所結合の削除を行わない場合である。領域分割を行うことで直径と平均距離ともに大きくなるが、2重格子結合網の場合、単一格子の場合に比べて、悪化の度合

表 1: ネットワークの直径 ( $N = 32$ )

$S'$	1	2	4	8
2重格子(分割無)	62	32	20	20
2重格子(分割有)	62	34	22	22
単一格子	62	90	74	66

は小さくなっていることがわかる。単一格子の場合、分割数を多くしていくと分割無 ( $S' = 1$ ) に近付いていくことがわかる。

次に、 $N = 32, 40$  について、メッセージ伝達時間と送受信メッセージ総数に関するシミュレーション結果を図 7 に示す。シミュレーションは、ランダムに選択したノード上で MA を生成し、MA は 5 ステップ毎にランダムに選択したノードへ最短距離で移動することを繰り返す。10,000 ステップ経過した後、MA を生成したノードからメッセージを送信し MA がメッセージを受信するまでのステップ数(メッセージ伝達時間)と送受信されたメッセージ総数を計測した。結果は、10 回の平均値である。Double (no div), Double, Single はそれぞれ、2重格子(分割無)、2重格子(分割有)、単一格子である。

まず、2重格子の場合、伝達時間に関しては、分割有と分割無ではほとんど変わらないことがわかる。一方、メッセージ数については、分割有の方が分割無よりもはるかに小さくなっていることがわかる。 $N = 32$  よりも  $N = 40$  の方が改善の割合が大きく、 $N$  が大きいほど、効果的であることが予想される。

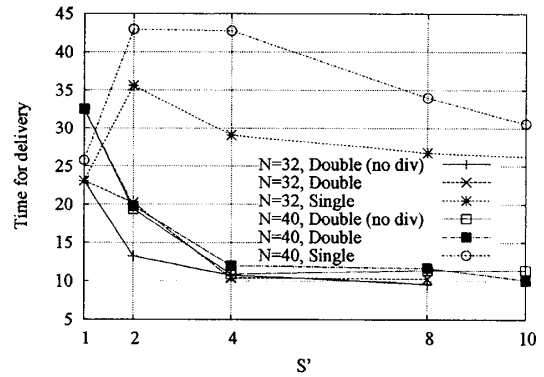
次に、単一格子に関しては、2重格子と比較して直径が 2~3 倍程度あるため、伝達時間では、2重格子よりはるかに劣る。しかしながら、 $N = 32$  に注目してみると、 $S' = 8$  では、単一格子の分割無 ( $S' = 1$ ) の場合と比較して、伝達時間は約 15% 遅い程度で、メッセージ量は約 1/3 と少ない。また、 $S' = 4$  では、伝達時間は約 30% 遅い程度で、メッセージ量は 1/6 と大幅に少なくなっている。 $N = 40$  の場合も同様の傾向が見て取れ、メッセージ数の改善の割合がより大きくなっていることがわかる。

伝達時間とメッセージ総数の間にはトレードオフがあり、各々の目標値を設定することは難しいが、伝達時間とメッセージ総数の積は、 $N = 32$  の場合、分割無が  $1.4 \times 10^5$  に対し、 $S' = 2, 4, 8$  はそれぞれ  $3.4 \times 10^4$ ,  $3.2 \times 10^4$ ,  $5.9 \times 10^4$  であり、 $S' = 4$  が最小となっている。

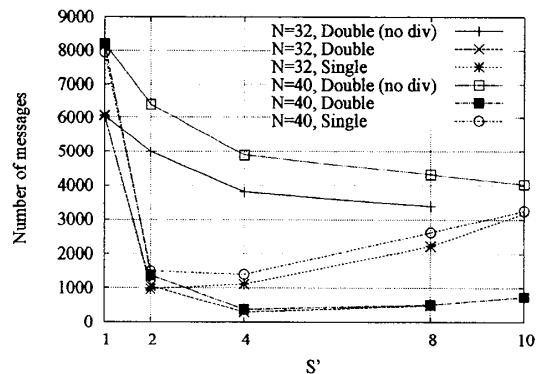
単一格子の場合、 $N = 32$  において、 $S' = 2$  の時にメッセージ伝達時間が最大となり、メッセージ総数が最小となっているが、これは、直径が最大となるとともに、メッセージが広がる範囲がほぼ単一の正方形領域内に限定されるためと考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、格子結合網を対象とした、MA へのメッセージ伝達法について検討した。疎結合領域分割法において、格子結合網のための二種類の領域分割法を提案した。その結果、2重格子結合を用いた手法では、伝達時間とメッセージ数の両方において効果的であることを示した。また、単一格子結合網を分割する方法でも、メッ



(a). メッセージ伝達時間



(b). 送受信メッセージ総数

図 7: シミュレーション結果

ッセージ数の低減には効果的であることを示した。

## 参考文献

- [1] A.L. Murphy and G.P. Picco, "Reliable communication for highly mobile agents," Proc. IEEE 1st Int'l. Symp. on Agent Systems and Applications and 3rd Int'l. Symp. on Mobile Agents, pp.141-150, 1999.
- [2] 大田知行, 増田康男, 井上伸二, 角田良明, 伊藤篤, "エリア分割によるモバイルエージェントへのメッセージ伝達法," 信学論 (B), vol.J87-B, no.6, pp.829-842, 2004.
- [3] A.L. Barabasi and R. Albert, "Emergence of Scaling in Random Networks," Science 286, pp.509-512, 1999.
- [4] D. Lange and M. Oshima, Programming and Deploying Java Mobile Agents with Aglets, Addison Wesley, 1998.
- [5] A. Lingnau and O. Drobnik, "Agent-user communications: Requests, results, interactions," Lecture Notes in Computer Science, 1447, pp.209-221, Springer, 1998.
- [6] D. Deugo, "Mobile Agent Messaging Models," Proc. of IEEE Fifth Int'l Symp. on Autonomous Decentralized Systems, pp.278-286, 2001.
- [7] 重井徳貴, 宮島廣美, 山口和彦, "領域間結合が疎な領域分割に基づくモバイルエージェントのメッセージ伝達法," 信学論 (D), vol.J90-D, no.6, pp.1495-1508, 2007.