2003－MPS－46　(3)
2003／9／18

多重パスメッセージ転送ネットワークの数理モデルと論理

沼　澤　政　信†　栗　原　正　仁††

本論文では，インターネット上のホスト間を移動するモバイルエージェントが，いかにロバスト性を持つメッセージ転送方法で互いに通信しあうのかについて論じ，その解として，多重パスメッセージ転送ネットワーク（MMFN: multi-path message forwarding networks）と呼ばれる通信ネットワークの数理モデルを提案する．MMFN は，ノードとターゲットの間の多重パスを基礎としたロバスト性をもつ方法で，メッセージを各モバイルエージェントの現在位置へ送信する．

MMFN をグラフ理論によって形式的に定義し，その動的特性を 6 つの推論規則からなる論理システム $\mathcal{L}_n$ により記述する．次に，本システムは MMFN のみを生成するという意味で健全性をもつことを示す．また，$\mathcal{L}_n$ の計算論的解釈に基づいて，時間計算量 $O(n)$，領域計算量 $O(n \cdot |V|)$ でネットワークを維持する簡単なアルゴリズムを示す．

Mathematical Model and Logic for Multipath Message Forwarding Networks

Masanobu Numazawa† and Masahito Kurihara ††

We discuss how mobile agents, moving in the Internet from node to node, can communicate with each other by forwarding messages in a robust way. As a solution, we present a mathematical model of a class of communication networks called the *multi-path message forwarding networks* (MMFN), which can transmit the messages to mobile agents at the current location in a robust way based on multiple paths between the nodes and the target.

The networks are formally defined in terms of graph theory, and the dynamic nature of the networks (i.e., how they evolve) is represented by a logical system, named $\mathcal{L}_n$, consisting of six inference rules. It is shown that the system is sound in the sense that it generates only MMFN. A computational interpretation of $\mathcal{L}_n$ is provides a simple algorithm for maintaining the networks with time complexity $O(n)$ and space complexity $O(n \cdot |V|)$.

1. 序　　論

近年，インターネットの急速な普及に伴い，ネットワークコンピューティング技術の向上が著しい．中でも，エージェント技術[1)~4)] は，ネットワークという動的なシステムに対して，信頼性やロバスト性を提供する有効な技術として注目されている．エージェント技術の研究は，知性，自律性，移動性，通信能力などさまざまな特性に着目して進められている．本論文では，その特性の中の移動性に焦点を当てて，インターネット上のノード間を移動するモバイルエージェント（mobile agent）[5)~8)] のためのロバストな通信ネットワークを提案し，その数理モデルを示す．

他のエージェントの位置情報なしにエージェント同士が互いに通信できるとき，そのシステムは**位置透過性**（location transparency）をもつという．位置透過性を実現する技術として，探索（searching），登録（registering），転送（forwarding）の 3 つの基本的なモデルがある[9),10)]．本論文では転送モデルに着目する．これは，エージェントが現在のノードから移動する前にそのノード内に移動先ノードへのポインタを記憶させ，それらのポインタの列（パス）に沿って，将来受信したメッセージが目標のエージェント（以後，ターゲットと呼ぶ）へと転送される技術である．このモデルは，もしそのパス上の一つのノードが故障すると，次のノード位置を示すポインタも失われるため，メッセージを目標のエージェントまで転送できないという弱点をもつ．つまり，ロバスト性がないのである．

本論文は，多重パスメッセージ転送ネットワーク（MMFN：multi-path message forwarding networks）と呼ばれるネットワーククラスを提案することにより前述の転送の問題点を解決する．MMFN は，ノードと

† 小樽商科大学商学部社会情報学科
Department of Information and Management Science, Faculty of Commerce, OTARU University of Commerce
†† 北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
Division of Systems and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

ターゲットの間の多重パスにより，ロバスト性をもつターゲットへのメッセージ送信を可能とする．

2. 多重パスメッセージ転送ネットワーク

2.1 準　　備

本節では，本論文において必要とするグラフ理論について簡単に説明する．

有向グラフ（directed graph）$G = (V, E)$ はノード（nodes または vertices）の集合 V とリンク（links または directed edges）の集合 E からなる．もし V と E が有限集合であるならば，G は有限（finite）である．リンクは慣習的にはノードの順序対 (v, w) で記述するが，本論文では $v \to w$ と記述する．このとき，v をリンクの始点（start node），w を終点（end node），$v \to w$ を v からの**外向きリンク**（outgoing link）と呼ぶ．また，v からの外向きリンクの数を v の**出次数**（outdegree）と呼び，$od(v)$ と記述する．同じ始点と終点を持つリンクは平行（parallel）であり，平行なリンクを持たないグラフを単純（simple）グラフと呼ぶ．

有向パス（directed path）は $v_0 \to v_1 \to \ldots \to v_p$（または，$v_i \to v_{i+1}$，$0 \leq i < p$）と表す．これは $v_1, \ldots, v_{p-1}$ を**通過する** v_0 から v_p までのリンクの列である．もし $v_0 = v_p$ ならば，このパスは有向閉路（directed circuit）である．閉路を持たないグラフを無閉路（acyclic）グラフと呼ぶ．

本論文では，有限で単純な無閉路グラフのみを扱う．

2.2 MMFN の定義

本節では， MMFN をグラフ理論により形式的に定義する．

定義 1　次数 n（n は非負整数）の**多重パスメッセージ転送ネットワーク（MMFN: multi-path message forwarding network）**は以下の条件を満たす有限で単純な無閉路グラフ $G = (V, E)$ である．

- すべてのノード $v \in V$ は $od(v) \leq n + 1$ を満たす，かつ
- 任意の整数 i（$0 \leq i \leq n$）について，$od(v) = i$ であるノード $v \in V$ がただ一つ存在する．

$od(s_i) = i$ $(0 \leq i \leq n)$ を満たす唯一のノード s_i を次数 i の**特殊ノード**（special node）と呼ぶ．特に，次数 0 の特殊ノード s_0 を**ターゲット**（target）と呼び，t で表すこともある．特殊ノード以外の残りのノードを**残余ノード**（residual nodes）と呼ぶ．残余ノード r は $od(r) = n + 1$ を満たす．これより，V を互いに素な集合 $S = \{s_n, s_{n-1}, \ldots, s_0\}$ と $R = V \backslash S$ に分割し，次数 n の MMFN $G = (R+S, E)$ を $G = (R, S; E; n)$ と記述する．なお，$X + Y$ は互いに素な集合 X と Y の和を，$X \backslash Y = X \cap \overline{Y}$ は任意の集合の差を表す．

定義 1 から以下の補題が得られる．

補題 1　もし $G = (R, S; E; n)$ が MMFN であるならば，すべての特殊ノード s_i，$s_j \in S$（$0 \leq j < i$）についてリンク $s_i \to s_j \in E$ が存在する．

2.3 MMFN のロバスト性

次数 n の MMFN において，ノード v で受信したメッセージは，v から t へのパスに沿ってターゲット t へ転送される．本節では，この MMFN において，高々 n 個のノードが故障状態になろうともメッセージはターゲットへ転送可能であるという意味で**ロバスト性**（robustness）があることを示す．

このロバスト性はグラフ理論的に形式化された以下の定理で示される．

定理 1　$G = (V, E)$ はターゲットを t とする次数 n の MMFN であるとする．このとき，任意のノード $v \in V$ と任意の集合 $A \subseteq V - \{v, t\}$ について，もし $|A| \leq n$ ならば，A のいずれのノードも通過しない v から t へのパスが存在する．

3. MMFN の動的性質

本節では，MMFN の動的変化を記述する 6 つの推論規則からなる論理システムを示し，その健全性（soundness）を証明する．

3.1 論理システム $\mathcal{L}_n$

本節では，前節で導入した記法 $(R, S; E; n)$ を**配置**（configuration）と呼び，グラフ $G = (R+S, E)$ が特殊ノード S と残余ノード R をもつ次数 n の MMFN であるときに限り真となる論理式とみなす．

S は次数 i（$i \in \{0, 1, \ldots, n\}$）の特殊ノード s_i を要素としてただ一つ含むので，要素を i について降順に並べた順序集合（ordered set）とみなし，ドット「.」により要素を分けて列 $s_n.s_{n-1}.\cdots.s_0$ として記述する．また，ノードの記述に小文字を，列の記述に大文字を使用する．たとえば，$s.S$ は最初（最左）の要素 s の後に列 S が続く列を表す．空集合または空列は $\emptyset$ と記述する．

配置は，モバイルエージェントがノードからノードへ移動した後も，MMFN がもつべき性質を保持するように再構成されなければならない．このようなネットワークの動的メカニズムを 6 つの推論規則からなる以下の論理システムにより形式的に表現する．文字 s, S などは，n が定数であるということ以外は任意の要素または列を表す変数である．

定義 2　論理システム $\mathcal{L}_n$ は以下の 6 つの推論規則により定義される．ただし，n は非負整数である．

スタート a

$$\overline{(\emptyset, a; \emptyset; 0)}$$

ノード u **による拡張**

$$\frac{(\emptyset, S; E; k) \quad u \notin S \quad k < n}{(\emptyset, S.u; E \cup \{v \to u \mid v \in S\}; k+1)}$$

新しいノード u **への移動**

$$\frac{(R, s.S; E; n) \quad u \notin R + s.S}{(R + \{s\}, S.u; E + \{v \to u \mid v \in s.S\}; n)}$$

特殊ノード s **への移動**

$$\frac{(R, \overline{S}.s.S; E + \{s \to v \mid v \in S\}; k) \quad S \neq \emptyset}{(R, \overline{S}.S.s; E + \{v \to s \mid v \in S\}; k)}$$

残余ノード r **への移動**

$$\frac{(R + \{r\}, s.S; E; n)}{(R + \{s\}, S.r; E \backslash E_1 + E_2; n)}$$

ただし，$E_1 = \{r \to v \in E\}$,

$E_2 = \{v \to r \mid v \in s.S\}$

ノード v **をバイパス**

$$\frac{(R, S; E + \{u \to v, v \to w\}; n) \quad u \to w \notin E}{(R, S; E + \{u \to w, v \to w\}; n)}$$

以下の形式の各推論規則 $\mathcal{I}$ は，もしすべての条件 $C_1 \cdots C_m$ が（通常の算術，集合演算のもとで）真であるならば，配置 G' が配置 G から推論される（inferred）ということを表している．

$$\frac{G \; C_1 \; \cdots C_m}{G'}$$

これを $G[\mathcal{I}]G'$ とも記述する（ただし，$\mathcal{I}_0$ が規則「スタート a」のときは，単純に [スタート a] G' と記述する).

もしすべての i（$0 \le i < d$）について $G_i[\mathcal{I}_i]G_{i+1}$ であるならば，

$$G_0[\mathcal{I}_0]G_1[\mathcal{I}_1]G_2 \ldots [\mathcal{I}_{d-1}]G_d$$

と記述し，配置 G_d は配置 G_0 から導出される（derived）という．この場合，

$$G_0[\mathcal{I}_0; \mathcal{I}_1; \ldots; \mathcal{I}_{d-1}]G_d$$

のように中間を省いて記述することもある．途中の推論規則を明示する必要がないときは $G_0 \vdash G_d$ と記述する．このとき，$\mathcal{I}_0$ が規則「スタート a」ならば，G_0 を省いて $\vdash G_d$ と記述する．

3.2 健 全 性

前節では，配置 G が論理システム $\mathcal{L}_n$ によって導出される（または，生成される）という意味で記法 $\vdash G$ を導入した．ここでは，記法 $\models G$ を導入する．これは，前節で与えられた解釈の下で論理式 G が真（true）である，すなわち，G が定義 1 のすべての条件を満たした MMFN であるという意味をもつ．以下の定理は，$\mathcal{L}_n$ が生成したすべての式が真であるという意味で，$\mathcal{L}_n$ の**健全性**（soundness）を示している．

定理 2　もし $\vdash G$ であるならば $\models G$ である．

3.3 計算論的解釈

$\mathcal{L}_n$ の推論規則は計算論的に解釈可能である．つまり，これまでグラフ理論的に述べられてきたノードは，プロセッサ，メモリ，通信ポートのような計算資源をもつ計算ノードとみなすことができる．各々のリンク $v \to w$ は，ノード v からノード w へのポインタ（もしくは参照）として解釈できる．そのようなポインタ全体の集合によって通信ネットワークが定義される．モバイルエージェントの現在位置はターゲット t で，ノード v が受信したメッセージは v から t へのパスに沿って t へ転送される（メッセージの代わりに，モバイルエージェントの位置を要求する質問（query）と考えてもよい）．定理 1 はノード v と t 以外の n 個のノードが故障しても，それらを通過しない v から t へのパスが存在することを保証している．

各々の推論規則を，ネットワークの配置を更新するための，適切なノードのポインタを修正する遠隔操作（もしくは，手続き，命令）と考えることもできる．推論規則「スタート a」の操作により定義されるノード a からなる初期ネットワークから始める．エージェントが新しいノードへ移動するときには,「ノード u による拡張」操作（ネットワークの次数 k が n より小さいとき）または「新しいノード u への移動」操作（$k = n$ のとき）のどちらかを使用する．また，エージェントが特殊ノードに移動したときは,「特殊ノード s への移動」操作を使用する．同様に，残余ノードへ移動する場合は「残余ノード r への移動」操作を使用するが，これは $k = n$ のときのみである.「ノード v をバイパス」操作は（v を経由する u から w へのパスにおける）ホップ数を減らし，それらを含むパスを短くしてメッセージ配信の効率化を行うために使用する．

この考え方を実装するために，モバイルエージェントに現在の次数 k と，全 $k+1$ 個の特殊ノード $s_k.s_{k-1}.\cdots.s_0$ の現在位置の列 S を持たせる．これは，各々のエージェントに対して高々 $1 + (n+1)$ に比例したメモリ空間を追加することで実現できる．

エージェントが (現在のノードと異なる）ノード u に移動したと仮定する．エージェントは，u が新規ノード，特殊ノード，もしくは残余ノードであるかを識別

しなければならない。これは u の出次数によって決定できる．すなわち，$od(u)=0$ ならば新規ノード，$0<od(u)\leq k$ ならば特殊ノード，$od(u)=k+1$ ならば残余ノードである．

この方法で，各々の操作を実現することは簡単である．特に，必要な情報を得るためにネットワーク全体の解析や探索が必要ないことに注意していただきたい．例えば,「新しいノード u へ移動」操作を実現するためには，エージェントに各特殊ノードへ u へのポインタの追加を求める遠隔命令を送信させる．さらに，推論規則により，列 S の最左要素を取り除き，代わりに最右要素として u を追加する．

次に，システムの計算量について考える．各々の操作で追加もしくは削除されるリンク数によって $\mathcal{L}_n$ の時間計算量を計る．また，領域計算量をネットワークのすべてのリンク数（もしくはポインタ数）で定義する．$V=R+S$ をネットワーク $(R,S;E;n)$ のノード集合であるとする．以下の定理は，定数 n が与えられたとき，時間計算量は（$|V|$ に独立な）定数であり，領域計算量は $|V|$ に比例するということを述べている．

定理 3　$\mathcal{L}_n$ の時間計算量の上限は $2(n+1)$，$\mathcal{L}_n$ の領域計算量の上限は $(n+1)|V|$ である．

証明　時間計算量における最悪のケースは「残余ノード r への移動」操作である．すなわち，$n+1$ 個のリンクを取り除き，$n+1$ 個のリンクを追加することが求められる．このとき上限の $2(n+1)$ となる．

領域計算量については V のポインタの数を考える．V の各々のノードは高々 $n+1$ 個のポインタを持つので，$(n+1)|V|$ が上限である．

□

4. 結　　論

本論文では，モバイルエージェント間の位置透過な通信のための多重パスメッセージ転送ネットワークを提案し，グラフ理論および論理的システム $\mathcal{L}_n$ に基づく厳密な数理モデルを解析することによって，ロバスト性，健全性，および提案したアルゴリズムの計算量を明らかにした．

エージェントネットワークは非常に新しい技術分野であるため，これまで提案されてきたシステムアーキテクチャは単純なもので，特に抽象的な数理モデルを必要とするまでもなく理解や分析が可能であった．しかし，本論文で提案するネットワークモデルはこれまでの技術に比べて複雑性の高いものであり，今後の研究の進展に伴いさらに複雑化する潜在的可能性を有している．したがって，システムを正確かつ明確に表現し，数理的な根拠に基づいてシステムを設計し解析するためには，このような数理モデルの開発は必要不可欠である．この分野に限定されずに関連分野でもこのようなモデリング手法が導入されることも考えられるが，現状ではこれはこの分野独自のものである．

今後の課題として，システム $\mathcal{L}_n$ は完全（complete）であるかどうかという理論的な問題が残っている．完全性とは，健全性の逆，すなわち，$\models G$ であるならば $\vdash G$ である性質である．もしシステム $\mathcal{L}_n$ が完全であるならば，提案した推論規則およびアルゴリズムは，すべての MMFN を生成するための万能な能力をもつことになる．

実用面における工学的課題の 1 つは適切な次数 n を決定する方法である．これは計算環境とアプリケーションの性質および目的に依存すると考えられるが，基本的ガイドラインを示すことが望まれる．

参　考　文　献

1) 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).
2) 長尾確: エージェントテクノロジー最前線, 共立出版 (2000).
3) 西田豊明, 木下哲男, 北村泰彦, 間瀬健二: エージェント工学, オーム社 (2002).
4) 西田豊明編: エージェントと創る インタラクティブネットワーク, 培風館 (2003).
5) Appleby, S. and Steward, S.: Mobile software agents for control in telecommunication networks, *Software Agents for Future Communication Systems* (L.G.Hayzelden, A. and Bigham, J.(eds.)), Springer-Verlag (1999).
6) Cockayne, W. R. and Zyda, M.: *Mobile Agents*, Manning Publications (1998).
7) Dddd Kotz, e. a.: Mobile agents for mobile Internet computing, *IEEE Internet Computing*, Vol. 1, No. 4 (1997).
8) Pham, A. and Karmouch, A.: Mobile software agents: an overview, *IEEE Communications magazine*, Vol. 36, No. 7 (1998).
9) Aridor, Y. and Oshima, M.: Infrastructure for mobile agents: requirements and design, *Proc. 2nd Intern. Workshop on Mobile Agents*, Lecture Notes in Computer Science 1477, Stuttgart, Germany, Springer-Verlag (1998).
10) Milojicic, D.S., LaForge, W. and Chauhan, D.: Mobile objects and agents (MOA), *Proc. 4th USENIX Conf. on Object-Oriented Technologies and Systems*.