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持つ方法で，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持つことを示す．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 $O(n\cdot|V|)$ で次数 n，サイズ $|V|$ の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 $\mathcal{L}_n$ provides a simple algorithm for maintaining the networks of order n and size $|V|$ 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ともない，ネットワークコンピューティング技術の向上が著しい．なかでも，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どうし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）を持つという．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 1 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持つ．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）

† 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
†† 北海道大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻
Division of Computer Science, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

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，ノードとターゲットの間の多重パスにより，ロバストなメッセージ送信を可能とする．各々の MMFN は整数 n で表される**次数**（degree）により分類され，n 次の MMFN においては，故障ノード数がたかだか n 個であるならば，すべてのノードからターゲットへのパスの存在が保証される．

本論文の構成は次のとおりである．2 章は，グラフ理論に基づいて MMFN を形式的に定義し，そのロバスト性を証明する．3 章は，ネットワーク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 $\mathcal{L}_n$ を定義し，$\mathcal{L}_n$ は MMFN のみ生成するという意味で健全である（sound）ことを示す．また，$\mathcal{L}_n$ の計算論的解釈について述べる．4 章では関連研究を示す．最終章では結論として，数理モデルの観点から本論文の成果をまとめている．

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．有向閉路を持たないグラフを有向非循環グラフ（directed acyclic graph）と呼ぶ．

本論文では，有限で単純な有向非循環グラフのみを扱う．

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．

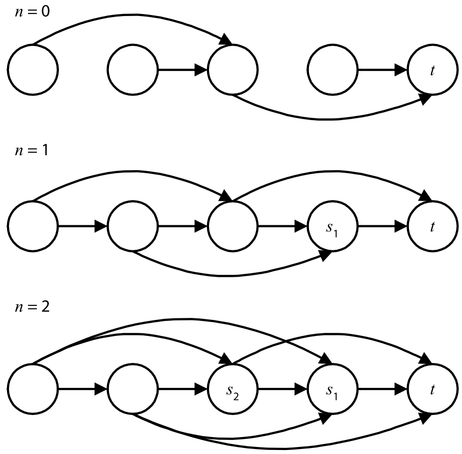

図 1 次数 n の MMFN の例
Fig. 1 Instances of MMFN of degree n.

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有向非循環グラフ $G = (V, E)$ 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 1 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**一般ノード**（ordinary nodes）と呼ぶ．一般ノード 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，$X \backslash Y$ は集合差 $X \cap \overline{Y}$ を表す．

次数 0，1，2 である MMFN の例を**図 1** に示す．

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．

証明 G は有向非循環グラフであるから，V の要素を「トポロジカル・ソート」し，V から $\{0, 1, \ldots, |V| - 1\}$ への 1 対 1 の写像 lab により，もし $v \to w \in E$ ならば $lab(v) > lab(w)$ を満たすように，各ノード v に整数のラベル $lab(v)$ を付すことができる．

この補題を証明するために，以下の命題が成り立つ

ことを確かめる．

命題 1 各 $i \in \{0, 1, \ldots, n\}$ に対し，$lab(s_i) = i$ が成立する．

与えられた i に対して $lab(v) = i$ を満たす唯一のノードが存在するのは明らかだが，それが $od(v) = i$ を満たすことは自明ではない．この命題を i（$i \in \{0, 1, \ldots, n\}$）に関する帰納法で証明する．

$i = 0$ のとき，$lab(v) = 0$ である唯一のノードを考える．0 は最も小さいラベルであるから，v からの外向きリンクはない．したがって，$od(v) = 0$．つまり，v はターゲット s_0 である．

$i < k$ を満たすすべての i について本命題が真であると仮定し，$lab(v) = k \leq n$ を満たす唯一のノード v を考える．k より小さなラベルの個数は k 以下なので $od(v) \leq k$ である．また，帰納法の仮定から $od(s_i) = i$（$i < k$）である唯一のノード s_i がすでに存在していることが確認できるので，$od(v) \geq k$ である．上記の 2 つの不等式より $od(v) = k$ を得る．

補題はこの命題から導かれることは明白である．実際，特殊ノード s_i はラベル i が付され，ノード $\{v \mid 0 \leq lab(v) < i\}$ に接続する i 本の外向きリンクを持つ．

□

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，たかだか n 個のノードが故障状態になって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．

証明 補題 1 の証明で導入したラベル関数 $lab(v) : V \mapsto \{0, 1, \ldots, |V| - 1\}$ を再利用して，ここでは $lab(v)$ に関する帰納法により定理を証明する．

$lab(v) = 0$ のときは明白である．なぜならば，補題 1 より $v = t$ であり長さ 0 のパスが存在するからである．

定理が $lab(v) < k$ で成立すると仮定し，$lab(v) = k > 0$ の場合を考える．2 つのケースに分ける．

第 1 に，v が特殊ノードの場合，補題 1 よりターゲットに直接接続するリンク $v \to t \in E$ が存在する．これが求めるべきパスである．

第 2 に，v が一般ノードである場合，$W = \{w \mid v \to w \in E\}$ を v から出る外向きリンクの終点の集合とする．G は単純グラフなので終点ノード w は互いに異なり，$od(v) = n + 1$ より $|W| = n + 1$ である．これと $|A| \leq n$ を比べることにより，$w \notin A$ であるようなノード $w \in W$ が存在することが分かる．$lab(w) < lab(v) = k$ であるので，帰納法の仮定により，A のいずれのノードも通過しない w から t へのパスが存在する．リンク $v \to w$ にこのパスを接続すれば，求めるべきパスが生成される．

□

3. MMFN の動的メカニズムの数理モデル

本章では，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，前章で導入した記法 $(R, S; E; n)$ を**配置**（configuration）と呼び，グラフ $G = (R + S, E)$ が特殊ノード S と一般ノード R を持つ次数 n の MMFN であるときに限り真となる論理式と見なす．

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 1 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）と見なし，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 が持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

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

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

$$\frac{(R, S_1.s.S_2; E + \{s \to v \mid v \in S_2\}; k) \quad S_2 \neq \emptyset}{(R, S_1.S_2.s; E + \{v \to s \mid v \in S_2\}; k)}$$

一般ノード 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（$0 \leq i < d$）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許す．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．

各推論規則が正確に何を意味しているかは，次節の定理 2 の証明の中で明らかになる．ここでは例のみを示しておく．

例 1 $\mathcal{L}_1$ における導出の例を示す（**図 2** を参照）．

［スタート a］

$(\emptyset, a; \emptyset; 0)$

［ノード b による拡張］

$(\emptyset, a.b; \{a \to b\}; 1)$

［新しいノード c への移動］

$(\{a\}, b.c; \{a \to b, a \to c, b \to c\}; 1)$

［新しいノード d への移動］

$(\{a, b\}, c.d; \{a \to b, a \to c, b \to c, b \to d, c \to d\}; 1)$

［特殊ノード c への移動］

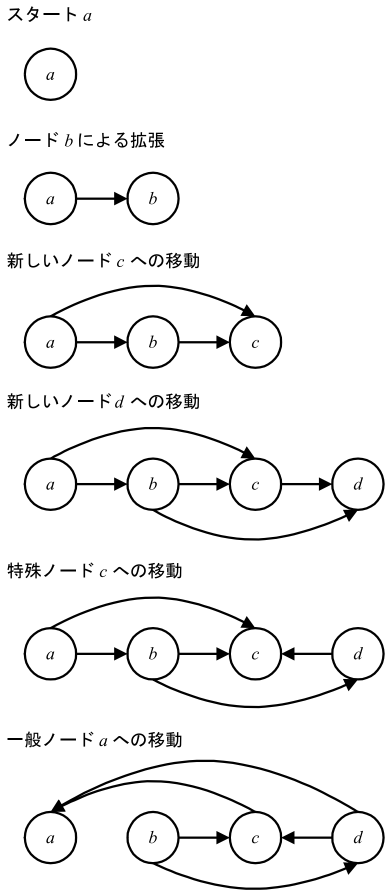

図 2 導出の例

Fig. 2 An example of derivation.

$(\{a, b\}, d.c; \{a \to b, a \to c, b \to c, b \to d, d \to c\}; 1)$

［一般ノード a への移動］

$(\{b, d\}, c.a; \{b \to c, b \to d, d \to c, c \to a, d \to a\}; 1)$

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持つ．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．

証明 はじめに，推論規則「スタート a」により生成されたノード a のみからなるネットワーク $G = (\emptyset, a; \emptyset; 0)$ を考える．次数 0 の MMFN であるということは明白である．ゆえに，残りの規則 $\mathcal{I}$ の各々に対して，もし $G = (R, S; E; k)$ が次数 k の MMFN

で，かつ $G[\mathcal{I}]G'$ であるならば，$G' = (R', S'; E'; k')$ は次数 k' の MMFN であるということを示せばよい．すなわち，G' が有限で単純な有向非循環グラフであり，すべてのノード v について $od(v) \leq k' + 1$ で，各々の $i \leq k'$ に対して $od(v) = i$ であるノード v がただ 1 つ存在することを示す．有限性は明白なので，各々の推論規則について残りの性質を示す．

(1) ノード u による拡張：この推論規則は，新たなノード u を導入し，特殊ノード S の各々から u へのリンクを接続することにより G' を生成する．G' は単純グラフである．なぜならば，G は単純で，かつ，推論規則により追加されたリンクは事前に G には含まれていなかったからである．G' の非循環性もまた明白である．G には有向閉路がないので，もし G' が有向閉路を持つならば，その有向閉路は追加された新しいリンク $v \to u$ を少なくとも 1 つ含むが，u からの外向きリンクは存在しないからである．

G' のノードの出次数を考える．G は次数 k の MMFN であるので，$S = s_k.s_{k-1}.\cdots.s_0$（$od(s_i) = i$）と記述できる．リンクを加えることにより，$S$ に属するノードの出次数は 1 つずつ増える．したがって，$S.u = s_k.s_{k-1}.\cdots.s_0.u$（$od(s_i) = i+1$，$od(u) = 0$）と記述できる．ゆえに，$G'$ は次数 $k+1$ の MMFN である．

(2) 新しいノード u への移動：この規則は，新しいノード u を導入するという点で前述の規則と似ている．違いはネットワークが（次数がもはや増えない）最大次数 n のときのみに適用され，G の最左特殊ノード s（$od(s) = n$）が，G' において $od(s) = n+1$ である一般ノードになるという点である．G' が次数 n の MMFN であるということを確かめるには，前述の推論規則の議論を再利用するとよい．

(3) 特殊ノード s への移動：この規則は，特殊ノード s からのすべての外向きリンク $s \to v$ を逆にすることにより G' を生成する．G' の単純性は G の非循環性，すなわち，もし G がリンク $s \to v$ を持つならばリンク $v \to s$ を持たないということから導かれる．G' の非循環性は，s へのリンクが追加され s からのすべての外向きリンクが削除されるということから導かれる．

出次数の議論は前述のものに似ているが，少々複雑である．配置 G は特殊ノードの列 $S_1.s.S_2$ を持つ．ただし，S_1 は次数が $od(s)$ よりも大きい特殊ノードの列を，S_2（$S_2 \neq \emptyset$）は次数が $od(s)$ よりも小さい特殊ノードの列を示す．s からのすべての外向きリンク $s \to v$（$v \in S_2$）を逆にすることにより，G' では，S_2 に属するノードの出次数が 1 つ増え，$od(s)$ は 0 になる．新たな列 $S_1.S_2.s$ は，配置 G の特殊ノードの列と同様，各ノードの出次数が k から 0 まで降順に並ぶ性質を持っている．したがって，G' は G と同様，次数 k の MMFN である．

(4) 一般ノード r への移動：この規則は，一般ノード r から出る $n+1$ 本の外向きのリンクをすべて取り除き，代わりに，各特殊ノード v から入ってくる $n+1$ 本のリンクを r に加えることにより G' を生成する．したがって，$|E_1| = |E_2| = n+1$ が成立している．単純性は補題 1，すなわち，特殊ノードを始点とし一般ノードを終点とするリンクが G には 1 つも存在しないということから導き，非循環性と出次数の議論はすでに述べたものと同様に行うことにより，G' は次数 n の MMFN であることを示すことができる．

(5) ノード v をバイパス：この規則は，ノード v をスキップするバイパス（bypass）$u \to w$ でリンク $u \to v$ を置き換えることにより G' を生成する．単純性は仮定 $u \to w \notin E$ により与えられる．G' の非循環性は G の非循環性より継承される．すなわち，G にはリンク $u \to v$ と $v \to w$ が存在するので w から始まり u で終わるパスは 1 つも存在しないことから導かれる．各々のノードの出次数は変化しない．したがって，G' は次数 k の MMFN 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持つ計算ノードと見なすことができる．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，一般ノードへ移動する場合は「一般ノード 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たかだか $1+(n+1)$ 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，もしくは一般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，$od(u) = k+1$ ならば一般ノードである．

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．たとえば，「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（エージェントはすべての特殊ノードの場所を記憶していることに注意）．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「一般ノード 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 の各々のノードはたかだか $n+1$ 個のポインタを持つので，$(n+1)|V|$ が上限である．

□

4. 関 連 研 究

位置透過性を持つシステムでは，すべてのエージェントは互いの現在位置を知ることなしに交信することができる．この性質を得るためには，一般的に 2 つの問題が解決されなければならない．第 1 に，通信相手のエージェントの現在位置を知らなければならない．第 2 に，メッセージをそのエージェントに送らなければならない（これは，モバイルエージェントがメッセージから遠ざかり，どんどん位置情報が古くなる状況では，必ずしも容易ではない）．

文献 9)，10) には位置透過性の 3 つの基本モデル，すなわち，探索（searching），登録（registering），転送（forwarding）が示されている．

探索モデルでは，モバイルエージェントは通信相手のエージェントが存在しうる位置についての事前知識を持ち，メッセージを送る前にそれらの位置すべてに検索メッセージをブロードキャストすることにより相手の現在位置を見つける[11)]．存在可能な位置の数が非常に多いときには，かなり非効率となる．しかし，もし相手エージェントの現在位置の確率分布に関する知識を持つならば，検索メッセージを適切な方法で送ることで性能を向上させられる[12)]．

登録モデルはサーバを利用する古くからあるモデルである．エージェントは特定のディレクトリサーバ上の自らの位置情報を自ら更新する必要がある．ディレクトリサーバはネットワーク内にある唯一の中央ノードもしくは各エージェントのホームホストのいずれかである[13)]．ディレクトリサーバがただ 1 つの場合には，性能と信頼性にとってボトルネックとなりうる．この問題を克服する 1 つのアプローチは負荷を共有する分散ディレクトリである[14)]．文献 15) で開発されたモデルは，インターネットにまで規模を拡大でき，かつ，セキュリティ問題にも対応している．

本論文で提案した MMFN モデルは，基本的に転送モデルとして分類される．一般に，転送モデルにおいては，相手エージェントの位置検索とメッセージ転送を分離せずに 1 つのフェーズで実行できる．すなわち，エージェントがノードに移動するごとに，元のノード内に追跡情報として新ノードへのポインタを残すことにより，将来ここに到着するメッセージはこの

拡張されたパスに沿って転送されることとなる．これと関連したモデルとして位置付けと移動（locate-and-transfer）がある．このモデルでは，第 1 のフェーズで相手エージェントの位置を検索し，第 2 のフェーズでメッセージを相手の現在位置に直接転送する．本論文における MMFN の理論は，転送ネットワークの構成のみを議論しているので，ここで述べた双方のモデルに適用可能である．

文献 16)，17) における転送ネットワークは木の形状をしているので，すべてのノードからターゲットエージェントがいるルートノードまでただ 1 つのパスしかない．したがって，故障ノードが 1 つでもあれば，メッセージはターゲットエージェントへ到達不可能になる．それらのネットワークは次数 $n = 0$ の MMFN になっている．本論文に先立つ著者らの研究[18) では，たかだか 1 つの故障ノードがあっても，ターゲットエージェントにメッセージが到達可能であるネットワークを定義している．これは次数 $n = 1$ の MMFN となっている．本論文は，その研究を $n = 0$ と $n \geq 2$ に拡張している．我々の知る限りでは，次数 $n \geq 2$ の MMFN に相当するモデルは，これまでのところ提案されていない．

転送モデルのもう 1 つの欠点は，メッセージサイズが大きくターゲットまでのパス長が長いときに，システム性能が劣化することである．この問題に対するよく知られた解決策は，たとえば文献 19) に示されるように，ネットワークに含まれるパスを動的に短くすることである．本論文における推論規則「ノード v をバイパス」はこの技術を組み込んでいる．

基本モデルを組み合わせたものも存在する．文献 20) では，登録と転送を組み合わせたモデルが提案されており，転送が失敗したときのみ，中央ディレクトリサーバがメッセージを送信する．また，文献 21) で提案されているモデルでは，メールボックスを利用するアルゴリズムがディレクトリサーバの役割を分散させて，各メッセージがたかだか 1 回転送されるしくみとなっている．

モデルの選択は応用領域と計算環境に依存する．本論文で提案したモデルは既存の高性能なモデルのいずれかを置き換えようとするものではなく，既存のモデルに取り入れて，ネットワークのロバスト性を任意の次数にまで改善することを意図している．

5. 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ともな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持つことになる．

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*, Hayzelden, A.L.G. and Bigham, J. (Eds.), Springer-Verlag (1999).
6) Cockayne, W.R. and Zyda, M.: *Mobile Agents*, Manning Publications (1998).
7) Kotz, D., et al.: 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, Springer-Verlag, Stuttgart, Germany (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*.

11) Murphy, A.L. and Picco, G.P.: Reliable communication for highly mobile agents, *Proc. 1st Intern. Symposium on Agent Systems and Applications, and 3rd Intern. Symposium on Mobile Agents*, Palm Springs, California, IEEE Computer Society Press (1999).

12) Chen, W.S.E. and Leng, C.W.R.: A novel mobile agent search algorithm, *Proc. 1st Intern. Workshop on Mobile Agents*, Lecture Notes in Computer Science 1219, Springer-Verlag, Berlin, Germany (1997).

13) Xianping, T., Lu, J., et al.: Communication mechanism in Mogent system, *Journal of Software 2000*, Vol.11, No.8 (2000).

14) van Steen, M., Hauck, F.J., Homburg, P. and Tanenbaum, A.S.: Locating objects in wide-area systems, *IEEE Communications Magazine*, Vol.36, No.7 (1998).

15) Roth, V. and Peters, J.: A scalable and secure global tracking service for mobile agents, *Proc. 5th Intern. Conf. on Mobile Agents*, Lecture Notes in Computer Science 2240, Springer-Verlag, Atlanta, USA (2001).

16) Lazar, S., Weerakoon, I. and Sidhu, D.: A scalable location tracking and message delivery scheme for mobile agents, *Proc. 7th IEEE Intern. Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*, IEEE Computer Society Press, Stanford, California (1998).

17) van Belle, W., Verelst, K. and D'Hondt, T.: Location transparent routing in mobile agent systems merging name lookups with routing, *Proc. 7th IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems*, Cape Town, South Africa (1999).

18) Kurihara, M. and Numazawa, M.: Evolution and maintenance of proxy networks for location transparent mobile agents and formal representation by graph transformation rules, *Proc. Pacific Asian Conf. on Intelligent Systems*, Seoul, Korea (2001).

19) Moreau, L.: Distributed directory service and message routing for mobile agents, Technical report ecstr m99/3, Department of Electronics and Computer Science, Univ. Southampton (1999).

20) Wojciechowski, P. and Sewell, P.: Nomadic Pict: Language and infrastructure design for mobile agents, *Proc. 1st Intern. Symposium on Agent Systems and Applications, and 3rd Intern. Symposium on Mobile Agents*, IEEE Computer Society Press (1999).

21) Feng, X., Cao, J., Lű, J. and Chan, H.: An efficient mailbox-based algorithm for message delivery in mobile agent systems, *Proc. 5th Intern. Conf. on Mobile Agents*, Lecture Notes in Computer Science 2240, Springer-Verlag, Atlanta, USA (2001).

(平成 15 年 8 月 21 日受付)
(平成 15 年 10 月 27 日再受付)
(平成 15 年 11 月 11 日採録)

沼澤 政信（正会員）
1969 年生．1992 年北海道大学工学部情報工学科卒業．1994 年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了．1999 年同大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了．現在，小樽商科大学商学部助教授．工学博士．人工知能およびソフトウェア科学における数理モデル等の研究に従事．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（正会員）
1955 年生．1978 年北海道大学工学部電気工学科卒業．1980 年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了．現在，同大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻教授．工学博士．人工知能およびソフトウェア科学における数理モデル等の研究に従事．1990 年情報処理学会創立 30 周年記念論文賞受賞．電子情報通信学会，人工知能学会各会員．