

マルチエージェント技術を用いた文書群の自己組織化

二方 厚志 (財) 電力中央研究所 情報研究所

〒 201-8511 東京都 狛江市 岩戸北 2-11-1
futakata@criepi.denken.or.jp

あらまし

本論文は、ユーザの作業プロセスを基に、マルチエージェントの働きによって文書群の構造を自己組織化させる方法について述べる。作業プロセスでの文書の利用と、その利用が起きた時間的距離をエージェントが監視・収集し、多階層文書ネットワーク (Multi-layered Document Network: MLDN) と呼ばれるハイパーグラフ構造をボトムアップかつインクリメンタルに自動構築する。MLDN は、ユーザの利用と、MLDN の内部で起こる共通部分構造の強化によって自動的に保守されていく。これにより、up-to-date かつ理解しやすい文書群の構造が形成されることが期待される。

キーワード 自己組織化, マルチエージェント, 情報共有, プロセス分析

Self-organization of Documents based on Multi-agent Technology

Atsushi FUTAKATA

Communication & Information Research Laboratory,
Central Research Institute of Electric Power Industry

2-11-1, Iwado-Kita, Komae, Tokyo 201-8511 Japan
futakata@criepi.denken.or.jp

Abstract

This paper presents a novel mechanism for self-organization of structure among documents based on process-oriented relations and multi-agent technology. The process-oriented relations represent operations and temporal distance between uses of documents in users' working processes. A complex network of process-oriented relations is rearranged as a *multi-layered document network* (MLDN) that has recursive hypergraph structure. The MLDN is self-organized by two kinds of autonomous agents: *document agent* and *group agent*. The MLDN is constructed by a bottom-up and incremental method, and maintained by users' operations and autonomous reinforcement of internal structure. This facility helps users to understand structure among documents.

key words Self-organization, Multi-agent, Information sharing, Process analysis

1 はじめに

企業組織内で作成・利用される文書数の増加とともに、文書間に存在する関係の把握が困難になってきている。文書間の関係や構造を把握するために、文書の内容・意味に着目した研究が、文書検索やデータ/文書からの知識発見といった分野で多く行われてきた [1, 2, 3, 4, 5]。しかし、これらの研究は、ユーザの作業プロセスにおける各文書は、意味に依存しない関係をプロセスによって与えられているという視点を欠いている。

たとえば、ある種の製品に対する市場調査報告と、個々の製品の仕様の内容は全く異なるものであるが、新しい製品の企画を行なう際に同時に利用される。この事実は、それらの文書間になんらかの関係が存在することを示している。作業プロセスに現われる文書への操作を基にして、文書間の構造を形成することで、文書の実際の利用に即した構造を得ることができる。

本論文は、文書に対する操作を獲得するマルチエージェントの働きによって、文書群の背後に潜む構造を自己組織化する方法について論じる。本アプローチの特徴は以下の通りである。

- 操作に基づく関係を集約し、多階層文書ネットワーク (Multi-layered Document Network: MLDN) として形成する、
- 新しく作成された文書に対して、自律的なエージェントの働きによるボトムアップかつインクリメンタルな MLDN の構築を行う、
- 既存の文書に対するユーザの操作と、MLDN の内部でおこる共通構造の強化によって、MLDN の保守を自動的に行なう、
- 現在使っている文書と関係する文書を積極的に推薦し、それに対するユーザのフィードバックを得ることで、文書間のリンクの重みを変更する。

本アプローチによって、文書間の構造を継続的に構築・保守することが可能になる。ここでは、これを自己組織化と呼ぶ。本アプローチにより、up-to-date かつ理解しやすい構造が形成され、文書群の構造をユーザが理解する手助けが可能になる。

以下では、本アプローチの詳細について記述する。2 節では、操作に基づく関係と MLDN の概念を紹介する。3 節では、文書群の構造の自己組織化で重要な役割を果たす文書エージェントの機能と構成について報告する。4 節では、文書エージェントとともに自己組織化を行うグローバルエージェントと、MLDN の自己組織化の過程を順を追って説明する。

2 文書群の構造

本節では、文書間の操作に基づく関係と、MLDN の概念について説明する。

2.1 操作に基づく関係

操作に基づく関係とは、ユーザの作業プロセスにおいて、他の文書との関係をもって、文書がどのように作成・利用されるかを表現したものである。たとえば、ユーザが文書を編集しているときに、そのユーザは他の文書を参照したり、他の文書から内容をコピーしたり、新しい文書を作成するかもしれない。このような文書に対する操作は、2つの文書間の操作に基づく関係として表現される。

しかし、文書間の関係は必ずしも操作として陽に現れるとは限らない。それらは、ユーザの頭の中にあり、それに基づいてユーザが新しい文書を作成したり、他の文書进行操作するということもある。これらは、順序や時間的距離といった文書間の関係の時間的要素として表出する。すなわち、時間的要素とは、作業プロセスを進行させるための、ユーザの操作対象 (文書) の選択という結果として現れる。図 1 は、一人のユーザの作業プロセスを、操作に基づく関係で表現したものである。点線が時間的要素を中心とした関係を、実線がユーザの操作を中心とした関係を示している。このような時間的要素を含むことで、プロセスを適切に表現することが可能になる。

文書 d_1 と d_2 の間の操作に基づく関係は、

$$\langle \text{操作のタイプ, 時間的距離, 操作者} \rangle (d_1, d_2)$$

によって表される。操作のタイプと時間的距離は、上記の操作的要素と時間的要素を表現するものである。たとえば、 $\langle refer, 0, Futakata \rangle (d_1, d_2)$ は、「Futakata が d_1 を利用中に d_2 を参照した」という事実を示しているし、 $\langle refer, 30, Futakata \rangle$ は、「Futakata が d_1 を利用後 30 分経ってから、 d_2 を参照した」ことを示している。操作に基づく関係は、操作のタイプによって与えられる値と、時間的距離に反比例する値の和によって定義される強度を持つ。

組織内では、多くの人間が協調しながら作業を行っているため、それらのプロセスによって生成される操作に基づく関係は、複雑にもつれ合ったネットワークを形成する。文書群の構造理解を支援するためには、このネットワークを変換する必要がある。

そこで我々は、ネットワークに階層構造を導入する。まず、 d_1 と d_2 の間の操作に基づく関係を、 d_1 と d_2 の間の重み付き無向リンクへと集約する。このとき、リンクの重みは、基本的には関係の強度の和として定義される。次に、このリンクを基に階層構造を構築していく。この階層構造を、多階層文書ネットワーク (Multi-Layered Document Network: MLDN) と呼ぶ。

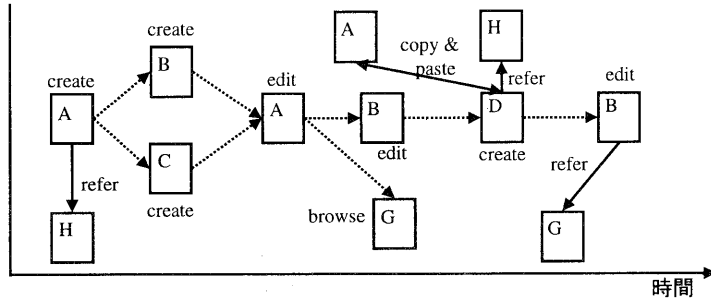


図 1: ユーザの操作に基づくプロセスの表現

2.2 多階層文書ネットワーク

MLDN は、図 2 に示すようなハイパーグラフ構造を持つ。文書の集合 D 上の MLDN は、各階層を表わすネットワーク N_i から構成される。各階層は以下のように定義される。

- (1) N_1 は D 上のネットワークである、
- (2) n 番目の階層 N_n のノードは、以下の性質を満たす N_{n-1} のサブネットワークである。

$$G_i \subset N_{n-1}, UG_i = N_{n-1},$$

ここで、 N_n のノード g_j と g_k 間のリンク l_{jk} は、 N_{n-1} 上の対応するサブネットワーク G_j と G_k を跨ぐリンクが存在した場合にのみ定義され、 G_j と G_k を跨ぐ全てのリンクの重みの総和が、その重みとなる。MLDN が構築されたとき、上記の G_i をグループと呼ぶ。

「良い」 N_n のグループ分割を行えば、MLDN は作業プロセス内の個々のサブプロセスを表現することができ、理解しやすい構造を形成することが可能になる。本アプローチにおけるグループの分割基準は、以下の通りである。

- (a) グループ内部の各リンクの重みを、グループ外に伸びているリンクの重みより大きくする。
- (b) ユーザの構造理解を助けるために、グループの規模を制限する。

この基準によるグループは、時間的に近く、かつ強い操作で結び付けられたものとなり、局所的なサブプロセスを適切に表現することが期待される。

任意の時間に任意の人間によって作成される文書を取り込むためには、操作に基づく関係を獲得するとともに、MLDN のボトムアップかつインクリメンタルな構築方法が必要となる。そのために、これらの作業を行う 2 種類のエージェントを、次節以降で導入する。

3 文書エージェント

本節では、操作に基づく関係を獲得し、そこからリンクを作成するエージェントである文書エージェントの機能と構成について述べる。操作に基づく関係を獲得するためには、文書に対する操作の継続な監視が必要となる。最近のモバイル環境の普及を考慮した場合、これを集中的に行うのは難しい。そこで、我々は、文書を文書エージェントにカプセル化する¹。文書の作成は、文書エージェントを新規作成した後に、これを通して行なわれる。また、文書に対するあらゆる操作は、文書エージェントを通して行なわれることになる。

文書エージェントは、以下の機能により MLDN の構築と保守に関する作業を行う。

- (1) 文書に対するユーザの操作を、操作に基づく関係として獲得する、
- (2) 操作に基づく関係から文書間のリンクを構成する、
- (3) 利用者の操作や文書が消された場合に、リンクやその重みを変更する、
- (4) 文書エージェントとリンクによるネットワーク (MLDN の最下層) を構築する。

実際のプロセスを反映した MLDN の構築には、過去に作成された文書をユーザが頻繁に利用する状況が必要である。一般には、これは現実的な仮定とはいえない。文書の再利用が進まない大きな原因としては、ユーザが利用可能な文書の存在を知らないことにある。これを解決するために、文書エージェントはもう一つの機能を持つ。

- (5) ユーザが文書を利用する際に、MLDN 上で強いリンクを持つ他の文書やグループを積極的に紹介する。さらに、紹介に対する評価をユーザから得ることにより、リンクの重みを変化させる。

どの文書やグループを推薦するかは、過去、たとえば、30

¹以下では、特に誤解が生じない場合には、文書と文書エージェントを同一視して話を進める。

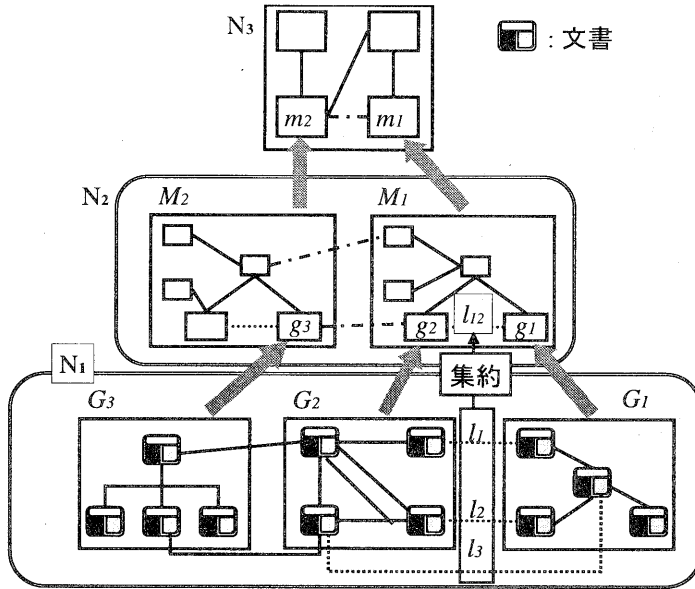


図 2: 多階層文書ネットワーク (MLDN)

分以内にどのような他の文書やグループを利用していたかによる。推薦する候補とそれらの文書とのリンクの重みを考慮した上で、文書エージェントがどれを推薦するかを決定する。文書エージェントのこのような自律的な活動により、MLDN は up-to-date な状態に保たれる。

文書エージェントの構成は図 3 のようになっている。文書エージェントは、(a) メソッド、(b) 文書、(c) メタデータ、(d) リンク、の 4 つの部分からなる。

メソッドは、上記の機能や、文書进行操作する機能を提供する手続きからなる。

メタデータは、作成者や場所、バージョン、操作ログなどを含む。操作ログには、編集や他の文書からの参照といった文書になされた操作の他に、ある文書を閉じた 5 分後に同じユーザによって他の文書が使われたといった、2 つの文書が同一ユーザによって同時または短時間内に操作された記録が保存される。

2.2 節で述べたように、リンクは操作に基づく関係を集約することで構成される。ただし、リンク先の文書の作成者が同じであったり、同じディレクトリにあるといった、互いのメタデータの情報によって、リンクの重みに事後的な修正が加えられる。たとえば、操作に基づく関係 p_i と、重みへの修正 q_i が図 4 に示す強度を持っているケースを考えてみる。このとき、文書 A と B の間のリンクは、 $\{p_1(A, B), q_1(A, B), q_2(A, B)\}$ というバッグ

によって特徴付けられ、その重みは 7 になる。

文書エージェントは、MLDN の最下層の構築において重要な役割を果たす。次節では、MLDN の上位層を自己組織化させるエージェントであるグループエージェントと、自己組織化のプロセスについて述べる。

4 文書群の自己組織化

新しい文書が作成されるのに伴い、MLDN は徐々に大きくなっていく。さらに、ユーザの各文書への操作によって、MLDN 内のグループ構成が変化していく。本節では、このような自己組織化のプロセスについて順を追って述べる。

4.1 初期グループの形成

新しい文書 d が作成されたとき、MLDN の最下層において初期グループが形成される。初期グループは、新文書 d と、 d 内で構成されたリンクによって、ある閾値以上の強さで接続している他の文書を構成要素として含む。初期グループ形成後、新文書はリンクを他の文書に渡す。初期グループの構成は、グループエージェントによって管理される。

グループエージェントは、初期グループに限らず MLDN 内の個々のグループに必ず付随するものであり、グループの構成を管理する。グループエージェントの主な機能は、リンクの重みや存在に関する階層内/間の整合性の維持と、

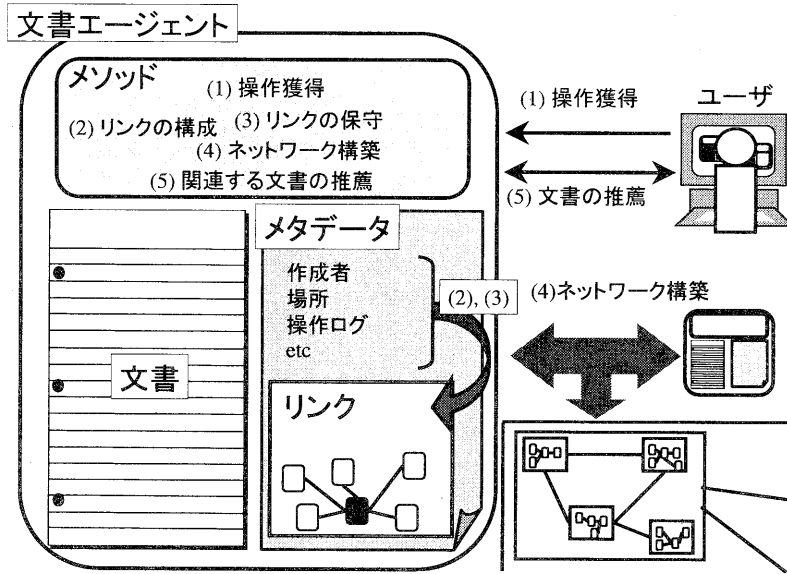


図 3: 文書エージェントの構成

MLDN の上位層の構築の 2 つである。たとえば、図 4 で形成される初期グループの構成 $\{\{A, B, C\}, \{P_1(A, B)/7, P_2(A, C)/5\}\}^2$ はグループエージェントによって管理される。

4.2 グループの再編

初期グループは、新しい文書に対して形成される暫定的なグループである。2.2 節で述べた評価基準に基づいたグループ分割を実現するために、初期グループの近傍にあるグループ群でグループ再編が起る。ここでいう近傍とは、重なりを持つか、直上の階層で直接リンクが張られているグループの集合である。初期グループに限らず、任意の階層で新しいグループが形成されたときや、グループ内のノードに接続しているリンク（またはその重み）に変化があったときに、グループ再編が引き起こされる。

グループ再編のプロセスを説明する前に、まず、グループの凝集度を 2.2 節の評価基準に基づいて定義する。

$$[\text{凝集度}] = [\text{グループの内部強度}] \cdot f(n)$$

ここで、 $f(n)$ は、基準 (b) を実現する、グループ内のノード（エージェント）数に関する関数である。グループに最適規模があるとすれば、 $f(n)$ は図 5(a) のような形になるし、グループは小さい方が良いとすれば、 $f(n)$ は

² $P_i(X, Y)/w$ は、重みが w のリンク $P_i(X, Y)$ を表す。

図 5(b) のような単調減少関数になる。グループの内部強度 (Internal Strength of Group: ISG) は、基準 (b) を実現するための、以下のような関数である。

グループ $\{D, L\}$ において、 l_{ij} を D 内のノード d_i と d_j の間のリンク、 w_{ij} をその重みとする。このとき ISG は以下のように定義される。

$$ISG = \sum_{i=1}^n r_i/n,$$

$$\text{where } r_i = \sum_{j=1}^n w'_{ij},$$

$$w'_{ij} = w_{ij} \text{ if } l_{ij} \in L, \text{ or } 0 \text{ if } l_{ij} \notin L.$$

r_i は、 d_i と、 d_i を除いたグループとの間の関係強度を表している。

グループエージェントは、凝集度を用いて自らの再編を行なう。グループエージェントは、 r_i が最も弱いノードと、グループ外で r_i が最も強くなるであろうノードとの交換を試みる。そして、その結果の凝集度を計算して、凝集度が高くなるようなグループ構成を選択する。また、交換が行なわれない場合でも、 r_i が最も弱いノードを取り除いた方が凝集度が高まる場合には、そのノードを取り除く。

上記の再編と同時に、グループの併合も起る。2 つのグループがほとんど同じ構成を持っていたとき、併合した方が凝集度が高くなる場合には併合が起る。

新規作成された文書 A

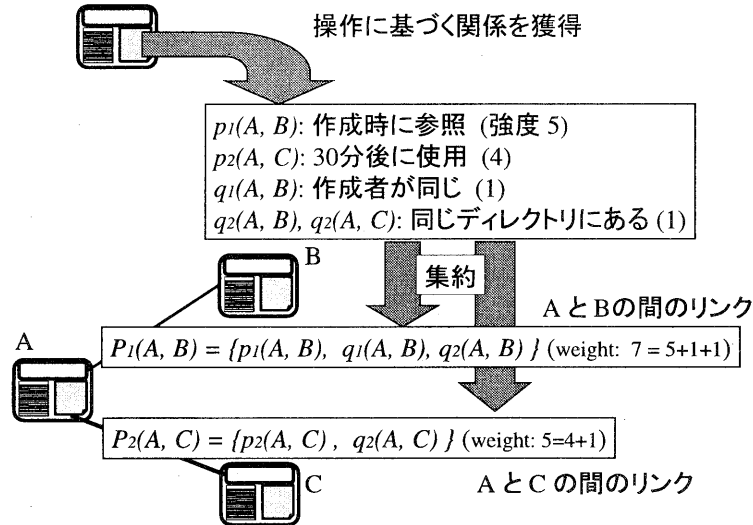


図 4: 操作に基づく関係からのリンク構成

初期グループに対するグループの再編の例を図 5 に示す。初期グループ G_1 が A, B, C, D の 4 つのエージェントからなり、既存のグループ G_2 が B, C を含んでいるとする。このとき、 G_1 と G_2 それぞれの ISG は 5.5 である。 $f(n)$ が最適規模 5 に対して対称な関数であるとき、 G_1 と G_2 は新しい G_2 として併合される。これは、新しい G_2 の ISG が 7.3、 $f(4) = f(6)$ だからである。その後、D を除いたグループの ISG が 7.6、 $f(5) > f(6)$ であるため、D は G_2 から除かれる。

4.3 上位階層でのグループの形成

n 番目の階層でグループの再編が起きた場合、 $n+1$ 番目の階層では、リンクの構成要素と重みが変わる。これにより、グループ再編が $n+1$ 番目の階層でも生じる。 n 番目の階層で生じたグループが、 $n+1$ 番目の階層でどのグループにも属さない場合には、4.1 節と同様に初期グループが形成される。このような再帰的なグループ形成・再編により、MLDN が構築されていく。

4.4 共通構造の強化

組織においては、細部で異なるが本質的には同じ流れの作業プロセスが多く存在する。これらのプロセスに付随する共通構造を表出することは、文書群の構造理解に有用である。ここでは、共通構造を表出させるために、同一階層内で類似の構造を持つグループ内のリンクの重み

を増やすというアプローチをとる。2 つのグループの類似度は、グラフの類似度を基に、対応するリンクの構成要素と重みが類似しているかどうかを判定することで行なわれる。重み w_i は、対応するリンクの重み w'_i ($w'_i > w_i$) を用いて、以下のように強化される。

$$w_i \leftarrow w_i + (w'_i - w_i)/n,$$

ここで、 n は、2 つのグループのいずれかで構造強化が起きた回数の最大値である。 n の項を導入することで、構造強化の繰り返して重みが極端に大きくなることを防いでいる。構造強化が行なわれた回数とその相手は、各グループエージェントに記録される。同一の組み合わせでの構造強化は一度しか起きない。

構造強化による重みの変化は、下位階層へと伝播する。これは共通構造に合うようなグループ再編を下位階層で引き起こす。図 6 に、グループ再編のサイクルを示す。

まず、ユーザの操作や、関連文書・グループの推薦に対するユーザの評価によって、グループ再編が起こる (a)。グループ再編は上位階層でのさらなるグループ再編を引き起こす (b)。そして、再編されたグループに対する共通構造の強化が起こり (c)、これは下位階層でのグループ再編を引き起こすことになる (d)。このサイクルによって、MLDN は動的に保守され、ユーザの操作を通じて up-to-date な構造を保つ。

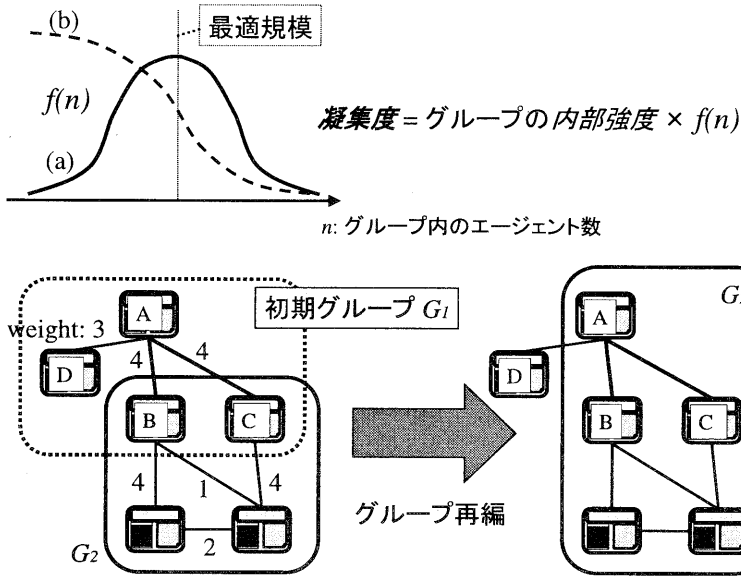


図 5: 凝集度を用いたグループ再編

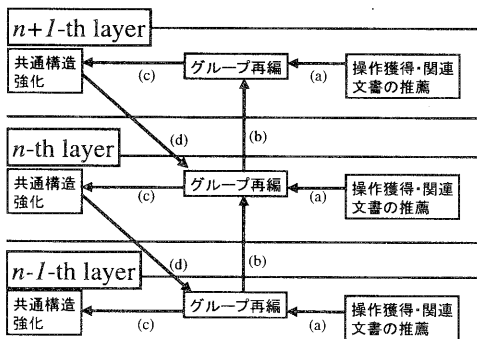


図 6: グループ再編の階層間サイクル

5 関連する研究

gIBIS [6] のようなグループウェアでは、ユーザの作業プロセスを予め定義してあるため、そのプロセス定義によって文書群の構造が決定される。しかし、プロセス定義のコストは大きい上、作業の流れが変更されたときの柔軟性に乏しい。

文書群の構造を自動的に構成するために、意味的な関係に着目した様々な研究が行なわれている [1, 2, 3, 4, 5]。

しかし、ユーザの操作および作業プロセスに着目した研究は少ない。このような研究の一つとして、たとえば、インターネットのナビゲーションのログを基にした HTML 文書の相関関係を解析した研究がある [7]。また、[8] では、ユーザの文書利用の履歴から、KeyGraph と呼ばれる意味構造を構成することで、文書の利用を基にした文書群の構造の視覚化を行っている。我々のアプローチは、ユーザの文書利用を通して、ボトムアップに文書群の構造を形成し、過去に存在した関係を変更していくという点で、これらの研究と異なっている。

自己組織化の代表的な研究としては、Kohonen の自己組織化マップがある [9]。MLDN と自己組織化マップとの大きな違いは、MLDN ではグループ再編という局所的な構造変化が随時起こるという点である。他にも、散逸構造 [10] を用いたマルチエージェントによる構造形成の研究も多く見受けられる [11]。我々の立場は、社会システムをオートポイエティックなコミュニケーションシステム³、すなわち、コミュニケーションが増殖し、その意味が変わっていく過程を社会システムと見なした、社会学でのルーマン理論 [12] に近い意味での自己組織化であるといえる。

また、リンクの自動構成や変更に関する研究としては、

³ここでいうコミュニケーションとは、情報とそれに対する操作を含んだ概念である。

ハイパーテキスト分野での動的なリンク生成がある [13, 14]。これらは基本的には状況に応じて構成された検索条件を用いて、検索を行なうものであるが、あくまでも意味的な関係を構成するものであるという点が、我々のアプローチとは異なっている。しかし、概念理解を目的として、インターネット上の文書のナビゲーションプランを建てる NaviPlan [15] のようなアプローチは、文書に対する操作を形成するという意味で、ユーザの操作の獲得を補完しうるものであると考えることができる。

6 今後の展開

本論文で我々は、ユーザの文書利用を基に文書群の構造を自己組織化する方法について述べた。MLDN と呼ばれる文書群の構造は、文書エージェントとグループエージェントという2種類のエージェントによって、自動的に構築・保守される。

既存の研究と比較すると、本アプローチは以下に示す利点を持つ。

- MLDN の自己組織化、
- プロセスを基に構造を形成、
- 任意のタイプの文書が対象、
- スケーラブルな構築方法、
- ユーザに対する積極的な情報提供

一方、以下にあげる欠点も存在する。

- (a) 各グループの意味が不明確である。
 - (b) 共通構造の強化が新しい構造の出現を邪魔する可能性がある。
- (a) の欠点を克服するためには、意味的な関係との連携が有効であると考えられる。また、(b) の解決方法を探るために、今後は、MLDN の構築過程と、グループ再編のサイクルの挙動をシミュレーションによって解析する。さらに、各エージェントのプロトタイプの作成と、小集団での実験を行なう予定である。

参考文献

- [1] G. Salton and C. Buckley: Term-weighting approaches in automatic text retrieval, In K. S. Jones and P. Willet, eds. *Readings in Information Retrieval*, pp. 323-328, Morgan Kaufmann, 1997.
- [2] G. Salton and M. J. McGill: *Introduction to modern information retrieval*, McGraw-Hill, 1983.
- [3] D. H. Fisher: Knowledge Acquisition Via Incremental Conceptual Clustering, Vol. 2, pp.139-172, *Machine Learning*, 1987.
- [4] R. S. Michalski, I. Brato, and M. Kubat eds.: *Machine Learning and Data Mining*, John Wiley & Sons, 1998.
- [5] R. Feldman and I. Dagan: KDT: Knowledge Discovery in Texts, In *Proc. of 5th International Conference on Knowledge Discovery*, 1995.
- [6] J. Conklin and M. L. Begeman: gIBIS: A Hypertext Tool for Exploratory Policy Discussion, *ACM Trans. on Office Information Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 303-331, 1988.
- [7] 風間洋一, 佐藤進也, 清水奨, 神林隆: WWW のユーザ操作履歴による HTML 文書の相関関係の解析, Vol. 40, No. 5, *情報処理学会論文誌*, pp. 2450-2459, 1999.
- [8] 大澤幸生, 須川敦史, 谷内田正彦: グラフに基づくキーワード抽出法 KeyGraph のデスクトップ整理への転用, 知能と複雑系 研究報告, 98-ICS-112, pp. 7-12, 1998.
- [9] T. Kononen: *Self-Organization and Associative Memory*, Springer-Verlag, 1989. (中谷和生監訳: 「自己組織化と連想記憶」, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1993.)
- [10] Nocolis, G. and Prigogine, I.: *Self-organization in nonequilibrium systems*, John Wiley & Sons, 1977. (小島陽之助, 相沢洋二訳: 「散逸構造 — 自己秩序形成の物理学的基礎 —」, 岩波書店, 1980.)
- [11] 「マルチエージェントと協調計算 I, II, III, IV」, 近代科学社, 1992, 1993, 1994, 1994.
- [12] Luhmann, N.: *Soziale Systeme: Grundriß einer allgemeinen Theorie*, Suhrkamp, 1984. (佐藤勉監訳: 「社会システム理論 (上・下)」, 恒星社厚生閣, 1993, 1995.)
- [13] Z. Li, H. Davis and W. Hall: Hypermedia Links and Information Retrieval, <http://www.mmrg.ecs.soton.ac.uk/publications/archive/li1992/html/>.
- [14] G. Golovchinsky: What the Query Told the Link: The Integration of Hypertext and Information Retrieval, In *Proceedings of Hypertext 97, 1997* (<http://www.fxpal.xerox.com/papers/go197a/>.)
- [15] 山田誠二, 大澤幸生: WWW での概念理解のためのナビゲーションプランニング, 知能と複雑系 研究報告, 98-ICS-112, pp. 29-36, 1998.