

ユーザ嗜好変化への適応化のためのアトラクタ選択を用いた フィルタ適用順序決定手法

北島 信哉[†] 原 隆浩[†] 西尾 章治郎[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: {kitajima.shinya, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

近年、様々なデータ放送サービスの普及により、膨大かつ多様なデータが提供されるようになった。しかし、ユーザが必要とする情報は限られているため、必要なデータのみを自動的に選択して蓄積する情報フィルタリング技術に対する注目が高まっている。一般にフィルタリングを行う際には、複数のフィルタを順に適用するが、適用順序によってフィルタリング処理にかかる負荷は異なる。一方で、生物界の知見を応用した自律的なパラメータ制御手法であるアトラクタ選択に関する研究も、近年盛んに行われている。本稿では、アトラクタ選択を情報フィルタリングに適用した手法を拡張し、ユーザの嗜好が変化した場合でも適応的にフィルタ適用順序を選択し、フィルタリング処理にかかる負荷を低減する。

A Filtering Order Selection Method Using Attractor Selection for Adapting to Change of Users' Preference

Shinya KITAJIMA[†] Takahiro HARA[†] Shojiro NISHIO[†]

[†]Dept. of Multimedia Eng., Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Recent spread of various data broadcasting services leads to provide enormous and various data. Since, data that a client needs are part of them, there has been an increasing interest in information filtering techniques where a client automatically chooses and stores the necessary data. Generally, when a client performs filtering, it applies some filters sequentially, but the time required for filtering changes according to the order of filters. On the other hand, in recent years, there have been many studies about attractor selection which is an autonomous parameter control technique based on the knowledge from living organisms. In this paper, we extend our previous filtering order selection method using attractor selection to adapt to the change of users' preference.

1 はじめに

近年、様々なデータ放送サービスの普及により、膨大かつ多様なデータが提供されるようになった。放送型のシステムでは、サーバは大量のデータを一度にユーザに配信できるが、ユーザが必要とする情報は限られているため、必要とするデータを自動的に選択する情報フィルタリングシステムが有用である [5].

一般にフィルタリングを行う際には、複数のフィルタを順に適用する。適合する放送データ数や適用負荷はフィルタごとに異なるため、フィルタの適用順序がフィルタリング処理にかかる総負荷に大きく影響する。フィルタリングにかかる負荷が高い場合、データの受信速度が処理速度を上回り、処理が追いつかなくなる場合が生じる可能性がある。そのため情報フィルタリングシステムでは、フィルタの適用順序の決定が重要な課題となる。

一方で、生物界における知見を応用した情報技術

であるアトラクタ選択を用いたパラメータ制御手法に関する研究もまた、盛んに行われるようになってきた [1]. アトラクタ選択では状況に応じて自律的にパラメータを制御できるため、システム環境の変化に柔軟に対応できる。

これまでに筆者らは、文献 [2] において、フィルタの順序決定の際に必要なパラメータの制御にアトラクタ選択を用いることで、放送データの内容が変化した場合でも適応的に変化に追従し、フィルタリング処理にかかる負荷を低減する手法を提案した。しかし、この手法ではユーザ嗜好の変化にともなうフィルタリング負荷やフィルタ数の変化を考慮していないため、ユーザの嗜好が変化した際にフィルタリングにかかる負荷が増大するという問題があった。

そこで本稿では、文献 [2] における手法を拡張し、フィルタリング負荷やフィルタ数の変化を考慮してフィルタ適用順序を決定する手法を提案する。さらに、シミュレーション評価により、提案手法が従来

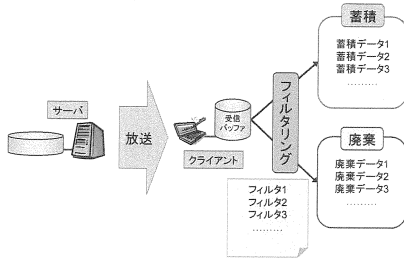


図 1: 情報フィルタリングシステム

手法と比べて、特にユーザの嗜好が変化した場合のフィルタリング負荷を低減できることを示す。

以下、2章では情報フィルタリングシステムについて述べ、3章ではアトラクタ選択を用いたフィルタ適用順序決定に関する先行研究について説明する。4章で提案する拡張手法について説明し、5章では拡張手法の性能評価を行う。最後に6章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2 情報フィルタリングシステム

2.1 想定環境

地上波放送の空き帯域を利用したサービスやインターネットを用いたニュース配信、衛星放送を利用した双方向データサービスなど、すでにサービスを開始しているデータ放送はいくつかある。このようなデータ放送では、膨大な情報を多数のユーザに一度に配信できるが、ユーザが必要とする情報はそのごく一部であることが多い。

本研究では特に、今後普及すると考えられる街中における無線LANを用いた携帯端末へのデータ配信サービスを想定する。放送されるコンテンツは文字や画像データであり、ニュースや天気などの生活情報、地域の店舗情報やイベント情報など、さまざまなジャンルのデータが配信されているものとする。携帯端末では記憶容量など計算資源に制限があるため、据え置き端末への情報配信と比べ、必要とする情報を自動的に選択する情報フィルタリングシステムの必要性は高い。

図1に示すように、情報フィルタリングシステムでは、各クライアントは受信したデータすべてを蓄積するのではなく、一度受信バッファに蓄えた後、一定数蓄積されると、あらかじめ用意したフィルタを用いてまとめてフィルタリング（これを一括処理と呼ぶ）を行い、必要なデータのみを蓄積する。

フィルタリングを行う際、例えば「スポーツに関する今日のニュースを知りたい」といった要求があ

ると、ユーザ側では、放送データがスポーツに関するものか、それがニュースであるか、それが今日のものであるか、といったように、3種類のフィルタを用いてフィルタリングを行うことになる。なお、単一フィルタによるフィルタリングの効率化については、従来から多くの研究が行われているため、本研究では扱わない。

2.2 フィルタリングコスト

フィルタが複数存在する場合、適合するデータ数や適用負荷はフィルタごとに異なるため、フィルタの適用順序がフィルタリングコストに大きく影響する。ここでフィルタリングコストとは、フィルタリングにかかる負荷を処理時間をもとにした数値で表したものであり、各フィルタの（データ単位当たりの）処理時間、フィルタを適用するデータ数に比例する [3]。

データは常に放送されているため、フィルタリングの処理速度が受信速度を下回ると、受信バッファが溢れてしまう。また、ユーザは配信される情報を受信するためにのみ携帯端末を利用しているわけではなく、他のサービス、例えば、地図ソフトと連携したナビゲーションや、動画配信サービスなどと併用して利用する場面もあるため、フィルタリングコストは小さいほうがよい。

本研究で想定している放送データは、ニュースや天気などの生活情報、地域の店舗情報やイベント情報など、内容が時間によって変化するものが多い。また、ユーザが必要とするデータも、時間の経過とともに変化すると考えられる。このような環境では最適なフィルタの適用順序を一意に決定することはできないため、動的にフィルタの適用順序を決定する手法が必要となる。

3 フィルタ適用順序決定手法

3.1 アトラクタ選択

生物は、細胞内に遺伝子、タンパク質、代謝という多階層のネットワークをもつ複雑なネットワークシステムであると考え、これを生物ネットワークと呼ぶ。過去にまったく遭遇したことのない2種の生物が共生関係を形成する際、お互いが構造や経路を変えながら安定状態（アトラクタ）にたどり着き、生物共生ネットワークを形作っていく。

この過程をもとに、アトラクタ選択による適応応答という新しい機構が提案されている [1]。複雑な遺伝子代謝ネットワークを単純化した2重フィードバックループをもつモデルを次のように仮定する。

$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{syn(act)}{1+m_1^2} - deg(act) \cdot m_1 + \eta_1 \quad (1)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = \frac{syn(act)}{1+m_1^2} - deg(act) \cdot m_2 + \eta_2 \quad (2)$$

m_1, m_2 は、オペロン 1 とオペロン 2 (オペロン: ゲノム上に存在する機能的な単位の 1 つ) から作られる mRNA 濃度 (mRNA: 細胞中でタンパク質合成部位であるリボソームに DNA の情報を伝える役割をもつ核酸) である。 syn および deg は合成と分解の係数で、以下のように細胞の活性を表す act の関数として定義する。

$$syn(act) = \frac{6act}{2+act} \quad (3)$$

$$deg(act) = act \quad (4)$$

第 3 項 η_1, η_2 はノイズである。活性度 act は以下の式に従って変化する。

$$\begin{aligned} & \frac{dact}{dt} \\ &= \frac{pro}{\left(\left(\frac{Nut_{th1}}{m_1+Nut_1}\right)^{n_1} + 1\right) \times \left(\left(\frac{Nut_{th2}}{m_2+Nut_2}\right)^{n_2} + 1\right)} - cons \times act \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $Nut_1, Nut_2, Nut_{th1}, Nut_{th2}$ は、栄養 1, 2 の外部からの供給濃度とその閾値, $pro, cons$ は、栄養を使った活性の生産と消費の係数, n_1, n_2 は適当な定数である。

この 2 重フィードバックループの応答は、図 2 に示す通りである。図から、1 つの栄養の外部供給を断つと、その欠乏を補うアトラクタが選択されていることがわかる。この環境では、吸収領域が同じ 2 つのアトラクタが存在するが、適応的なアトラクタだけが選択される。これは、環境が悪くなり、活性度 act が小さくなると、ノイズによる揺らぎが大きくなり、やがて適応的なアトラクタに近づくと、再び活性を回復し、そのアトラクタに吸収されるためである。これが、アトラクタ選択による環境適応である。

3.2 AS 方式

AS (Attractor Selection) 方式 [2] では、フィルタの順序決定の際に必要なパラメータの制御にアトラクタ選択を用いることで、放送データの内容が変化した場合でも適応的に変化に追従し、フィルタリングコストを低減する。

AS 方式では、アトラクタ選択を用いてフィルタの選択優先度 S を定義し、 S が高いフィルタから

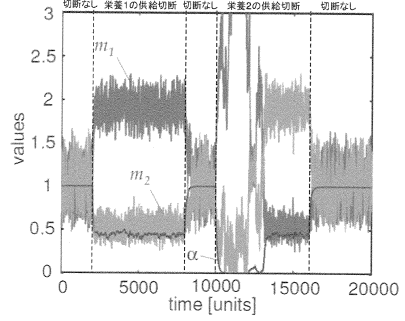


図 2: 2 重フィードバックループの応答

順に適用する。適用するフィルタ数を n とし、フィルタ F_i ($i = 1, 2, \dots, n$) を j ($j = 1, 2, \dots, n$) 番目に適用する場合の選択優先度を $S_{i,j}$ と表すものとする。

3.2.1 アトラクタ選択の適用

フィルタリングコストの計算 フィルタ F_i を適用した際にフィルタによって廃棄されるデータアイテムの割合を、減少率 D_i と呼ぶこととする。フィルタによって廃棄されたデータアイテム数を d_i 、フィルタを適用したデータアイテム数を a_i とすると、 D_i は次式で表せる。

$$D_i = \frac{d_i}{a_i} \quad (6)$$

実環境において提案手法を用いる場合、フィルタリングコストにはフィルタを実際に適用し、処理にかかった時間を用いるものとする。しかし、本稿のシミュレーション評価では擬似データを用いるため、実際にフィルタを適用することができない。そこで本稿では、フィルタリングコストを一般化し、フィルタの種類による処理負荷の違いを表すため、フィルタ F_i の適用コストを c_i と定義する。 c_i は、フィルタを適用した際の単位データあたりの処理時間を表す。

文献 [3] より、一括処理によりフィルタを適用した際の処理時間が、単位データあたりの処理時間と処理データ数に比例することから、 N 個のデータアイテムに n 種類のフィルタをある順番で適用した際にかかる総コスト C は、次式で表せるものとした。

$$C = \sum_{i=1}^n \left(c_i N \prod_{j=1}^{i-1} D_j \right) \quad (7)$$

活性度の計算 提案手法では、フィルタリングコストが低いほど性能がよいと考えるため、 C を用いて活性度を定義する。過去に適用した x 回のフィルタ

リング結果の C のうち最も小さいものを C_{min} とおき、フィルタリングコストが最小コストに近づくほど活性度が高くなるように、活性度 α を次式で定義する。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \delta \left(\left(\frac{C_{min}}{C} \right)^\lambda - \alpha \right) \quad (8)$$

式中の δ , λ は、活性度の値を調整するためのパラメータである。また、 α は $0 \leq \alpha \leq 1$ を満たす。

選択優先度の計算 選択優先度 $S_{i,j}$ は、文献 [4] を参考に、次のように定義した。

$$\frac{d}{dt} S_{i,j} = \frac{syn(\alpha)}{1 + S_{max,j}^2 - S_{i,j}^2} - deg(\alpha) S_{i,j} + \eta_{i,j} \quad (9)$$

$$syn(\alpha) = \alpha [\beta \alpha^\gamma + \phi^*] \quad (10)$$

$$deg(\alpha) = \alpha \quad (11)$$

$$\phi(\alpha) = \frac{syn(\alpha)}{deg(\alpha)} \quad (12)$$

$$\phi^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

ここで $\eta_{i,j}$ は乱数、 β と γ は定数である。 $S_{i,j}$ は $0 \leq S_{i,j}$ を満たす。ただし、 $j \geq 2$ のとき、すでに選択されたフィルタを選択することは無意味であるため、すでに選択されているフィルタ F_i に対応する $S_{i,j}$ については、 $S_{i,j} = 0$ とする。

フィルタリングコストが低く活性度が高い場合には、第1項の影響が大きく選択優先度はほとんど変化しないが、フィルタリングコストが高くなり活性度が低くなると、第3項の乱数項の影響が大きくなり、別の安定状態に遷移する。これにより、放送データの状況変化に適応可能となる。

3.2.2 問題点

ユーザの嗜好が変化する場合、例えば「スポーツに関する情報を得ていたが、ニュースに関する情報を知りたくなった」というフィルタリング条件の変化や、「スポーツに関する情報を得ていたが、そこから野球の情報のみを知りたい」というように情報絞込みのためのフィルタ追加などがある。

例えば、フィルタリングに用いるキーワードや、フィルタの閾値となるパラメータを変更する場合であれば、放送内容が変化する場合と同様に扱えるため、AS方式でも対応できると考えられる。

フィルタ数が増減する場合、そのフィルタに対応する選択優先度を追加、削除することでAS方式を適用できる。この場合、フィルタリングコストの上限値、下限値が大きく変化するが、式(8)、式(9)では上限値、下限値の変化を考慮していないため、フィルタリングコストが増加してしまう。同様に、

フィルタ適用コストが変化する場合もフィルタリングコストの上限値、下限値に変化が生じるため、AS方式では対応できない。

4 拡張手法

本章では、AS方式を拡張し、フィルタ適用コストやフィルタ数の変化を考慮してフィルタ適用順序を決定する手法を提案する。

4.1 AS-M方式

AS方式においてフィルタリングコストが増加する要因として、フィルタ適用コスト c_i やフィルタ数が一定でない場合、フィルタの適用順序や放送内容の偏りによってフィルタリングコストが大きく変化するため、式(8)における C と C_{min} の比が変化することが挙げられる。この場合、 C と C_{min} の比にあわせて λ を調整し、 $(C/C_{min})^\lambda$ の値を一定に保つことで対応できると考えられる。

そこでAS-M (Max cost) 方式では、以下に示す式に従って λ を変化させることで、 $(C/C_{min})^\lambda$ の値をほぼ一定に保つ。

$$\left(\frac{C_{min}}{C_{max}} \right)^\lambda = 0.02 \quad (14)$$

ここで C_{max} は、過去の C の最大値を表す。

4.2 AS-P方式

AS-P (Perturbation) 方式では、アトラクタ擾動 [7] と呼ばれる乱数項の制御手法を用いることで、式(9)における乱数項の重みを調整し、より柔軟にフィルタリングコストの変化に対応する。

AS-P方式における $\eta(t)$ は、次の式で表される。

$$\frac{d\eta(t)}{dt} = \tau [\eta(1 - \alpha(t)) - \eta(t)] \quad (15)$$

ここで τ は、乱数項の重みを決定するパラメータである。

4.3 AS-MP方式

AS-M方式とAS-P方式はそれぞれ独立した処理であるため、これらを組み合わせることで、さらにフィルタリングコストを低減できる可能性がある。

そこでAS-MP方式では、両者を組み合わせ、AS-M方式における λ の制御と、AS-P方式における乱数項の制御を同時に行う。

5 評価

本章では、評価基準に平均フィルタリングコストを用いて、提案手法の有効性をシミュレーション実験の結果から検証する。平均フィルタリングコスト

表 1: 評価に用いるパラメータ

パラメータ名	値
フィルタリング回数	50000
フィルタ数	5
タグ数	5
キーワード数	5
ユーザの受信バッファアイテム数	5000
ルンゲ・クッタ法におけるステップ数	10
放送帯域 [Mbps]	10
1 アイテムのサイズ [KByte]	1

とは、1回のフィルタリングにかかる総コストの平均を表す。

5.1 シミュレーション環境

本評価では、2.1節で述べた携帯端末への情報配信サービスを想定し、放送データとフィルタリングモデルを決定した。

シミュレーション評価では、パラメータ設定を変化させることで様々な状況を実現するため、実際の放送データではなく擬似的に作成したデータを用いた。複数のフィルタを用いてフィルタリングを行うために、擬似データにはフィルタ数と同数の属性を付加し、フィルタリングを行う際に比較する値を属性値として格納した。簡単化のため、フィルタリングはセレクションのみを行うものとし、フィルタリング結果はフィルタの適用順序によらず一意であるものとした [6]。

表 1 に、評価で用いるパラメータとその値を示す。各パラメータは、2.1節で述べた携帯端末への情報配信サービスを想定し、決定した。フィルタリングは受信バッファにデータアイテムが溜まるごとに行うので、3.90625 秒に 1 回行うことになる。この時間をフィルタリング周期と呼ぶ。

擬似データに付加する各属性値の分布には偏りがあるものとし、Zipf 分布に従うものとする。Zipf 分布は次の式で表せる。

$$f(r) = \frac{\frac{1}{r}}{\sum_{m=1}^{N_a} \frac{1}{m}} \quad (16)$$

式中の N_a は属性値の数、 r はその属性値を取るデータが多い順に属性値を順序付けした際の順位を表す。 $f(r)$ は順位 r の属性値の出現確率を表し、順位 r が小さいほど $f(r)$ が大きくなり、その属性値を属性にもつデータアイテムが多くなる。

ここで、各属性値に対する r は時間とともにランダムに変化するものとした。各属性値に対する r を

変える周期を属性順位変更周期と呼び、 r を変更するタイミングを属性順位変更タイミングと呼ぶ。属性順位変更周期は 600 から 1400 の間で変化させた。

ユーザは、自身の興味を表す属性値を各属性に対して 1 つずつもっており、フィルタリングの際にはユーザがもつ属性値と属性値が一致するデータアイテムのみが蓄積され、それ以外は破棄される。1 つのフィルタは、ユーザがもつ 1 つの属性値とデータアイテムがもつ 1 つの属性値一致するデータアイテムを選択するものである。ユーザが興味をもつ属性の数は、フィルタ数と等しいものとした。シミュレーション評価の際、5.3.1 節ではフィルタ適用コストとともにユーザが興味をもつ属性値が変化するものとし、5.3.2 節ではフィルタ数とともにユーザが興味をもつ属性数が変化するものとした。

$\beta, \gamma, \delta, \eta, \lambda, \tau$ は、予備実験の結果から、それぞれ $\beta = 0.4, \gamma = 5.0, \delta = 3.0, -1.0 \leq \eta \leq 1.0, \lambda = 10, \tau = 2.0$ とした。また、 C_{min} は過去 50 回 ($x = 50$) の C の最小値とした。

5.2 最小コスト法

本研究では、提案手法の比較手法として、AS 方式のほかに最小コスト法を用いる。

フィルタ数 n に対し、フィルタ順序の組合せは $n!$ 通りとなる。最小コスト法では、1 回のフィルタリングごとに $n!$ 通りの全フィルタ順序についてフィルタリングを行った後フィルタリングコストを計算し、その中から最小となるコストを求める。この手法は、下限値として最小コストを計算するためのものであり、実環境での適用は負荷が高すぎるため非現実的である。そのためシミュレーション結果では、この手法の計算負荷については考慮しない。

5.3 シミュレーション結果

5.3.1 フィルタ適用コストの変化

提案手法と最小コスト法、AS 方式において、フィルタリング回数 1000 回ごとにフィルタ適用コスト c_i を 0.1~2.0 [ミリ秒/データ] の間でランダムに変化させた場合の平均フィルタリングコストを図 3 に示す。

図から、AS-M 方式、AS-P 方式では、AS 方式と比べて平均フィルタリングコストを低減していることがわかる。また、両者を組み合わせた AS-MP 方式では、さらに平均フィルタリングコストを低減している。

AS 方式では、フィルタ適用コストの変化によるフィルタリングコストの上限値、下限値の変化を考慮していないため、フィルタリングコストが最小値

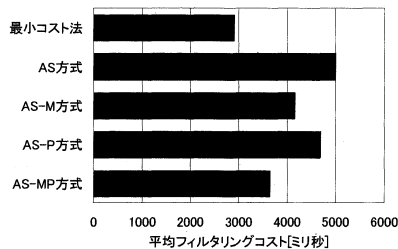


図 3: フィルタ適用コストの変化

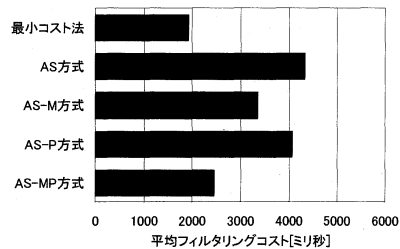


図 4: フィルタ数の変化

に近いにもかかわらず、活性度が低下し、フィルタ適用順序の入れ替わりが発生する。これは、 C_{min} や C の変化に対して λ の値が適切でない場合、式 (8) から活性度への影響が大きくなるためである。

AS-M方式では、過去のフィルタリングコストの最大値をもとに λ を制御することで、フィルタ適用コストが変化した場合でも活性度の値を適切に算出できる。これにより、フィルタ適用コストが変化した場合のフィルタリングコストの増加を抑えている。

また、AS-P方式では、活性度をもとに式 (9) における乱数項を制御することで、フィルタリングコストの変化により柔軟に対応できるため、AS方式と比べて平均フィルタリングコストが低下している。しかし、AS-M方式ではフィルタリングコストの上限値、下限値の変化を活性度にフィードバックしているのに対し、AS-P方式では式 (9) における乱数項の調整にとどまっているため、AS-M方式と比べて効果が低いと考えられる。

5.3.2 フィルタ数の変化

提案手法と最小コスト法、AS方式において、フィルタリング回数 1000 回ごとにフィルタ数を 2~5 の間でランダムに変化させた場合の平均フィルタリングコストを図 4 に示す。フィルタ適用コストは $c_i = [0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8]$ で固定した。

図から、フィルタ適用コストを変化させた場合と同様に、AS-M方式、AS-P方式では、AS方式と比べて平均フィルタリングコストを低減していることがわかる。また、両者を組み合わせた AS-MP方式では、さらに平均フィルタリングコストを低減している。

拡張手法では、フィルタ数が変化した場合でも、フィルタ適用コストが変化した場合と同様に、 λ や乱数項を動的に制御することにより、フィルタリングコストを低減できる。

6 おわりに

本稿では、フィルタの順序決定の際に必要なパラメータの制御にアトラクタ選択を用いる手法を拡張し、ユーザの嗜好が変化した場合でも適応的に放送内容の変化に追従し、フィルタリング処理にかかる負荷を低減する手法を提案した。評価結果から、提案手法が従来手法と比べて、平均フィルタリングコストを低減できることを確認した。

今後は、放送内容やユーザ嗜好の変化が提案手法に与える影響について詳しく調査する予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム (研究拠点形成費)、および文部科学省科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成: ゆらぎプロジェクト」の補助によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] A. Kashiwagi, I. Urabe, K. Kaneko, and T. Yomo, "Adaptive Response of a Gene Network to Environmental Changes by Fitness-Induced Attractor Selection," *PLoS ONE*, Vol. 1, No. 1, e49 (2006).
- [2] 北島信哉, 原隆浩, 寺田努, 西尾章治郎, "アトラクタ選択を用いたフィルタリング適用順序の適応化手法について," *情報研報*, Vol. 2008, No. 7, pp. 147-154 (2008).
- [3] 小寺拓也, 澤井里枝, 寺田努, 塚本昌彦, 西尾章治郎, "情報フィルタリングシステムにおける待ちデータ数を考慮した処理方法変換方式," *DICOMO*, Vol. 2004, No. 7, pp. 539-542 (2004).
- [4] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, "Biologically Inspired Adaptive Multi-Path Routing in Overlay Networks," *Proc. IEEE SelfMan 2005* (2005).
- [5] 澤井里枝: ミニサーベイ, "ブロードバンド時代における情報フィルタリングの動向," *DEWS* (2002).
- [6] 澤井里枝, 塚本昌彦, 寺田努, L. Y. Huei, 西尾章治郎, "情報フィルタリングの関数的性質について," *信学論 D-I*, Vol. J85-D-I, No. 10, pp. 939-950 (2002).
- [7] 大阪大学, "アンビエント情報社会基盤創成拠点-生物に学ぶ情報環境技術の確立-, "平成 19 年度成果報告書, 文部科学省グローバル COE プログラム (研究拠点形成費補助金), pp. 19-28 (2008).