

SoCCeR を用いたキャッシュへの最適経路探索

尾崎 航太[†] 中里 秀則[†]

[†] 早稲田大学大学院基幹理工学研究科 〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-14-9
E-mail: [†]kota.wase-tennis@fuji.waseda.jp, ^{††}nakazato@waseda.jp

あらまし 近年、ネットワーク上のコンテンツの大容量化やリアルタイム性の追及が急速に進んでおり、それらを実現する手法が必要となっている。その解決策として、サーバだけでなくその他のルータにコンテンツをキャッシュさせる手法が有効であり、さらにその手法でコンテンツをルーティングする方法としてアリの群知能を用いる SoCCeR が現在研究されている。本研究では、SoCCeR のルーティング手法に則り、最適ルートの探索確率を向上させる手法を提案し評価した。

キーワード SoCCeR, 蟻コロニー最適化, ルーティング

Optimum Routing to Cache using SoCCeR

Kota OZAKI[†] and Hidenori NAKAZATO[†]

[†] graduate School of Information engineering, Waseda University Okubo 3-14-9, Sinjuku-ku, Tokyo,
169-0072 Japan
E-mail: [†]kota.wase-tennis@fuji.waseda.jp, ^{††}nakazato@waseda.jp

Abstract In recent years, the demand for large-capacity and real-time content on the network has been rapidly advancing, and a solution is needed. As a solution, it is effective to cache contents not only on the server but also on other routers, and SoCCeR that uses ants' swarm intelligence is being studied as a method of routing contents by that method. In this research, we proposed and evaluated the method of searching for the optimal route more efficiently than the current SoCCeR based on the routing method of SoCCeR.

Key words SoCCeR, Ant Colony Optimization, Routing

1. 本研究の背景と目的

近年、ネットワーク利用者の拡大に加え、IoT や 5G の普及への動きが進んでいる。これらの技術が一般的に普及された場合、今までに比べ大量のコンテンツがネットワーク上を往来することになると考えられている。また、ネットワーク上を往来する情報の内容も大きく変化している。従来の通信データは静止画像やテキストファイルなど、ネットワーク遅延が起きた場合でも利用者に届きさえすれば目的を達成しうるデータ内容だった。しかし最近では、ストリーミングによる映像配信や自動運転の制御など、リアルタイム性の強い通信データが増加している。つまり今後のネットワークでは大容量データをリアルタイムで通信する必要がある。短い遅延時間での情報取得を実現する一つの手法として、ネットワーク内のルータでキャッシュをする方法が有効である。現在のネットワーク通信は IP アドレスをベースに行われているが、IP アドレスをベースとした 1 対 1 の通信を行うように設計された IP ネットワークは、ネットワークの末端に接続されたコンピュータを宛先として通

信を行うように設計されており、途中のノードにコンテンツをキャッシュするのが難しい。

そこで、新しいネットワークの 1 つとして、ICN (Information-Centric Network) が提案されている。この論文では、ICN において、情報の存在するサーバやルータまでのルーティングを、蟻コロニー最適化を活用した手法である SoCCeR (Services over Content-Centric Routing) [4] を用いて行う場合について評価を行った。

以下、2. で ICN について、3. で SoCCeR について説明し、4. で提案手法について述べる。5. で提案手法を評価し、6. で今後の課題について述べる。

2. ネットワーク

2.1 IP ネットワーク

現在のインターネットにおいて、ユーザがコンテンツを取得するためには、要求をコンテンツの存在するホストに向けて転送する必要があり、パケットの宛先を指定するために IP アドレスを用いる。しかし、IP アドレスによるコンテンツ取得方法

にはいくつかの問題点が存在する。一つ目は、サーバの位置が変化した場合である。この場合、サーバに新たな IP アドレスを割り振られるため、サーバの新たな IP アドレスを知るため、余計な通信を行わなければならない。二つ目は、基本的にエンド・ツー・エンドの通信のため、途中のノードへコンテンツをキャッシュしたとしても、コンテンツ取得を簡単には行えない。

2.2 ICN (Information-Centric Network)

ICN は、IP ネットワークとは異なる新しいネットワークの 1 つである。ICN では、IP ネットワークのようにコンテンツの存在するサーバの場所を特定し、その場所に向けてパケットを送信するのではなく、情報そのものをメッセージを配送する宛先にする。宛先を情報そのものにしてあるため複数の場所にコンテンツを存在させても、IP ネットワークのような複雑な機能設定をしなくても、複数のコンテンツに対して、要求パケットの送信を行うことができる。そのため、ネットワーク内でキャッシュをする場合、IP ネットワークに比べコンテンツのキャッシュからの取得が容易であり、無駄な通信を行わずに良いというメリットがある。ユーザがコンテンツを要求した場合、ネットワーク上の要求されたコンテンツを保持しているノードの中でユーザに近いノードからコンテンツを取得することが可能になる。

2.1 で挙げた問題点を ICN 上で考える。一つ目の問題については、ICN の場合、宛先をコンテンツそのものにしてあるため、コンテンツを保持しているホスト自体が移動した場合でも要求メッセージの到達性に影響なく、コンテンツの取得を行うことができる。二つ目の問題に関しても、宛先がコンテンツ名であるために、コンテンツをキャッシュしているノードの中で最も近いものからコンテンツを取得することができる。

ICN としては様々なものが提案されており、PARC が提案し開発を進めている CCN (Content Centric Network) [1] や、CCN と同じアーキテクチャとしてスタートして、現在は CCN とは別に University of California, Los Angeles で開発を進めている NDN (Named Data Network) [5], EU の Framework Program 7 のプロジェクトとして進められた PURSUIT [3] や NetInf (Network of Information) がある [2] [7]。

2.3 CCN (Content-Centric Network)

2.2 で述べたように、CCN は ICN の手法の一つである。ICN では Interest パケットと Data パケットと呼ばれる 2 種類のパケットが用いられる。Interest パケットはユーザがコンテンツを取得したいときに送信するパケットである。Data パケットは、要求されたコンテンツを持つノードが Interest パケットを受信したときに、そのコンテンツを入れてユーザへ返送されるパケットである。Interest パケットにコンテンツ名を記述して送信することによってユーザが要求するコンテンツを指定する。また、CCN ではこのコンテンツ名がどのような名前でも構わないが、コンテンツ名のフォーマットは階層的な構造をもつことが仮定とされている。以下に階層構造のコンテンツ名の例を示す。例えば、hiragana という動画があった場合、動画コンテンツのサイズが大きいものであったとすると、図 1 のように 1,2,3 というように分割される。Interest パケットにコンテンツ名を記述する

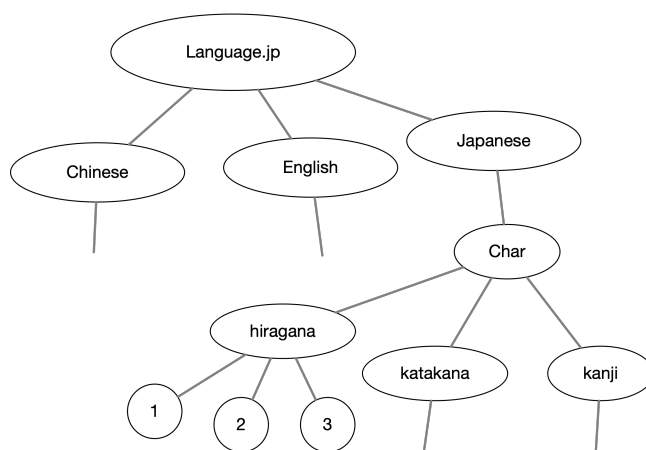


図 1 階層構造のコンテンツ名

ことで要求するコンテンツを指定することができるため、/Language.jp/Japanese/hiragana/1 というコンテンツ名を記述すると /Language.jp/Japanese/hiragana/1 というコンテンツを保持するホストに転送することができる。コンテンツ名を階層構造にすることによって、/Language.jp/Japanese/Char/hiragana という動画コンテンツを取得したい場合、Interest パケットには /Language.jp/Japanese/Char という名前のプレフィックスが分かればコンテンツにたどり着くことができる。[6]。また、コンテンツ名に基づくパケット転送を行う CCN では、各ルータに三つのデータ構造を持ち、それぞれ FIB (Forwarding Information Base), PIT (Pending Interest Table), CS (Content Store) と呼ばれる。

FIB は要求されたコンテンツ名のプレフィックスと、コンテンツプレフィックスが一致した Interest パケットをどの方向に転送するかを示すフェイス (ネットワークインターフェイス) のナンバーが格納される。PIT は要求されたコンテンツ名と Interest パケットを受信したフェイスの組が格納される。PIT は、Interest パケットに対応した Data パケットを受信したときに、その Data パケットを転送する方向を決定するのに用いられる。CS には、要求されたコンテンツ名とそのコンテンツ自体が保存される。CS は、Interest パケットが要求するコンテンツが CS に保持されている場合、Interest パケットを FIB に従って転送することはせずに、当該ルータで CS に格納されたコンテンツから Data パケットを作成し、Interest が到着したフェイスから返送する。また Data パケットが返送されてきたときに、Data パケットに格納されているコンテンツをキャッシュするかどうか判断し、キャッシュすると判断した場合には CS に保存する [6]。

3. SoCCeR

3.1 Ant Colony Optimization (ACO) アルゴリズム

SoCCeR は、情報の存在するサーバまでのルーティング手法の 1 つである。SoCCeR はルーティングの方法として ACO アルゴリズムを用いる。ACO アルゴリズムはアリの群知能を模倣した最適化問題の計算手法である。

アリは巣から餌のある場所までの最短経路を群知能によって

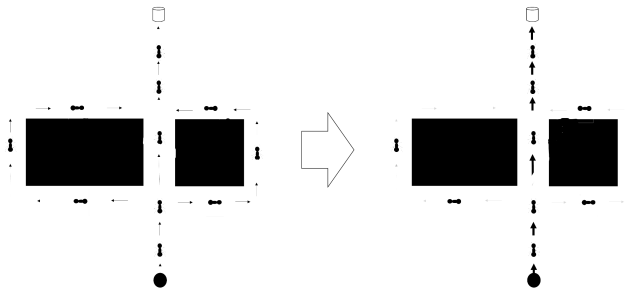


図2 ACO アルゴリズムによる経路の最適化

見つけ出すことができる。アリの一個体は餌を見つけるまでランダムに動き回り、餌を見つけると通ってきた道にフェロモンという化学物質を落としながら巣に戻る。その後アリはフェロモンのより強く残っている道を選択して餌を見つけ、同じようにフェロモンを落としながら巣へ戻るという動きが繰り返される。また、フェロモンは揮発性があり、時間が経つにつれ蒸発しフェロモンの量は減っていく。そのため、度々アリが通過する道とそうでない道のフェロモンの量は時間がたつにつれ差が開き、アリが道を選ぶ確率にも影響して最終的にアリの進む道は一本の道に画一化される [8]。例えば、巣から餌までに通る道にいくつかの選択肢があった場合、はじめアリはランダムに餌を探するため、様々な経路を通り餌にたどり着く。経路の長さが短いほど餌の場所から巣まで戻ってくる時間は短くなるため、最短ルートが最も短い時間間隔でフェロモンの強さを更新する経路となる。そのため、その後巣から餌の場所へ向かうアリは最短ルートを確率的に選択しやすくなり、時間があがる程度経過すると、ほとんどすべてのアリが最短ルートによって餌を見つめることが可能となる。

3.2 フェロモンテーブル

SoCCeR では FIB, PIT, CS の 3 つデータ構造に加え、コンテンツ名のプレフィクスとそれに対応付けられたフェイス、ACO アルゴリズムによる各フェイスのフェロモン値 (フェロモンの量)、全てのフェロモン値から算出したフェイスの選択確率の四種類のデータを格納するフェロモンテーブルというデータ構造を持つ。あるコンテンツ要求において、フェロモンテーブルに格納されている選択確率の最も高いフェイスが、最適な転送方向のフェイスとして FIB に格納される。

図 3 に CCN ルータのフェロモンテーブルと FIB の例を示す。/Language.jp/Japanese/Char というプレフィクスを持つ Interest パケットをルーティングする場合、フェロモンテーブルに格納された選択確率に沿って FIB に格納される Interest パケットの転送方向のフェイスが決定される。/Language.jp/Japanese/Pronunciation というプレフィクスを持つ Interest パケットの経路としては、選択確率の最も高いフェイス 3 が FIB に格納される。

3.3 Interest Ant

Interest Ant は、Interest パケットが最適なルートを通してホストにたどり着くためにユーザー側からネットワーク上に送

/Language.jp/Japanese/Char		
face	pheromone	probability
0	Ch ρ 0	0.7
1	Ch ρ 1	0.21
4	Ch ρ 2	0.09

FIB	
name	face
/Language.jp/Japanese/Char	0
/Language.jp/Japanese/Pronunciation	3

図3 FIB とフェロモンテーブルの関係

信されるプローブエージェントである。Interest Ant は一定の時間間隔で、ランダムに選択されたあるコンテンツ名に向けて、ネットワーク内のすべてのノードで生成される。Interest Ant はタイムスタックを持ち、タイムスタックには通過する各ノードの通過時刻を記録する。

Interest Ant はランダム時刻に生成され、フェロモンテーブルに格納されたコンテンツ名に対して、そこに記された選択確率に基づき確率的に決定された FIB の転送先のフェイスに向けて送信される。このプロセスを Interest Ant が 目的のコンテンツを持つノードに到着するまで繰り返す。

3.4 Data Ant

Data Ant は目的のコンテンツを持つノードが Interest Ant を受信したときに生成されネットワーク上に送信されるエージェントであり、Interest Ant の持つタイムスタックのコピーとサービス負荷情報 (目的のコンテンツの状態情報) を持つ。Interest Ant を生成したノードが Data Ant を受信した時刻と Data Ant の持つタイムスタックのコピーから、往復遅延時間を計算する。こうして計算された往復遅延時間とサービス負荷情報を用い、通った経路のフェロモン値を算出し、更新する。遅延時間とサービス負荷の値が小さいほど、更新されるフェロモン値は大きくなる。あるノードにおいて一つのフェイスのフェロモン値が大きくなった場合、他のフェイスの選択確率は減少する。また、フェロモン値はアリのフェロモンと同様に時間が経つにつれ減少する。ネットワーク上のフェイスのフェロモン値は、一つの Data Ant だけでなく他のノードが送信した Data Ant が通過した場合にも更新される [4]。

3.5 フェロモン値の導出

各ノード間のフェロモン値は一定時間ごとに更新する。フェロモン量の更新は以下の式に基づいて行われる。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)}, & \text{if } i, j \in T^k(t); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

ここで τ_{ij} はノード i におけるフェイス j のフェロモン値、 ρ はフェロモンの蒸発率、 m は通過するノードの数、 Q は一定値、 t は単位時間、 k はサービス、 $L^k(t)$ は経路長、 $T^k(t)$ はフェロモンテーブル値である。

4. 提案手法

提案する手法では、3. で説明した SoCCeR に対して、以下の3点の変更を加える。

- Interest Ant が Data Ant による最新のフェロモン値変更の影響を受けやすいようにするため、一つの Data Ant が Interest Ant を生成するノードに到着した際に新たな Interest Ant を生成してネットワーク上に送信する。

- 純粋なフェロモン値によるルーティングを調べるため、選択確率を算出する際にサービス負荷を考慮しないものとする

- 経路長によって Data Ant のフェロモン値が異なる場合、更新する最適でない経路に対し Interest Ant が多く送られることで、すべての Interest Ant が送られた時点でその経路が最適ルートと判断される可能性が高くなってしまいうため、Data Ant が更新するフェロモンの値を経路長によらない一定のものとする。

以上から、フェロモン値の更新の式を以下のものに変更する。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q, & \text{if } i, j \in T^k(t); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

5. 提案手法の評価

5.1 評価方法

提案手法に則った SoCCeR シミュレータを作成した。

まず、Interest パケットがフェロモン値の存在しない状態、すなわち完全にランダムな動きで目的のコンテンツを持つサーバーに向かう経路を求め、次に、提案手法による SoCCeR を Ant の数だけ繰り返す。全ての Ant が動いた経路の中で最もホップ数の少ないものを最適ルートとする。次に全ての Ant が動いた後に Interest パケットを送信し、目的のコンテンツを持つノードに到着するまで、全てのノードにおける最も選択確率の高いフェイスの方向への転送を繰り返す。そのようにして求めた Interest パケットのルートが最適ルートであった場合、最適ルートではなくランダムルートよりもホップ数が少なかった場合、ランダムルートよりもホップ数が多かった場合の3つに分類する。この評価を全ての要素で変動させた値で100回ずつ行い、上記3つの分類の確率を割り出し比較する。

Ant の数、ノードの数、フェイスの数、キャッシュの数、フェロモン蒸発率、フェロモン更新値の6つのパラメータについて、それぞれ基準値を設定し、各パラメータを一つずつの変動させ、評価をおこなった。これら6つのパラメータの基準とした値を表1に示す。

パフォーマンスの評価尺度として、最終決定経路が最適経路だった場合の数の合計（最適化数）、初期のランダムな動きによる経路と最終決定経路を比較し、最終決定経路が短かった場合の数の合計（達成数）、そうでない場合の数（失敗数）を用いた。

Ant の数の変動による各値の変位、フェロモンの蒸発率の変動による各値の変位、フェロモンの更新値の変動による各値の

表1 評価におけるパラメータの基準値

Interest Ant 及び Data Ant の数	1000
ノードの数	1000
各ノードにおけるフェイスの数	ノードの数 × 0.01
Cache の数	2
フェロモンの蒸発率	0.001
フェロモンの更新値	1.0

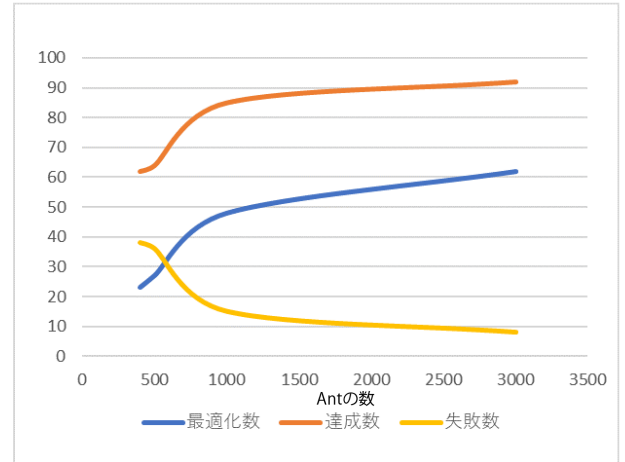


図4 Ant の数の変動による各値の変位

変位をそれぞれ図4、図5、図6に示す。

5.2 Ant の数の変動による値の変位

Ant の数を変動させたときの値の変動は、Ant の数に対して最適化数、達成数が単調増加している。これは、以下の理由によると考えられる

- Ant の数が少ない場合、ホップ数の少ないルートを選択するためのフェイスの選択確率と他のフェイスの選択確率との差をつけにくく、始めの Ant によるランダムな動きに依存してしまうため、失敗数が多くなる。

- Ant の数が多い場合、ホップ数の少ないルートを選択するためのフェイスの選択確率と他のフェイスの選択確率との差をつけることができ、Ant が最適ルートとして導出するルートを選択しやすくなり、最適ルートが多くなる。

5.3 フェロモンの蒸発率の変動による値の変位

フェロモンの蒸発率を変動させたときの値の変位は、フェロモンの蒸発率に対して、最適化数は0からの微小範囲で増加し、その後急激に減少して再び緩やかに増加する。達成数は0からの微小範囲で変化せず、その後急激に減少して再び緩やかに増加する。図5のような値の変位は以下に示す理由によるものだと考えられる。

最適化数について

- 蒸発率が極端に小さい場合、フェイスの選択確率値に大きな差をつけることができないため、Ant の数が一定の場合、完全に最適化されずに探索が終了してしまう場合がある。そのため、蒸発率が極端に小さくなると最適化数が少なくなる。

- 蒸発率が大きい場合、最適化数に対する影響は二つある。一つ目は、Data Ant が経由していないフェイスの選択確率は早い段階で極小になってしまい、Ant による経路選択が断定的な

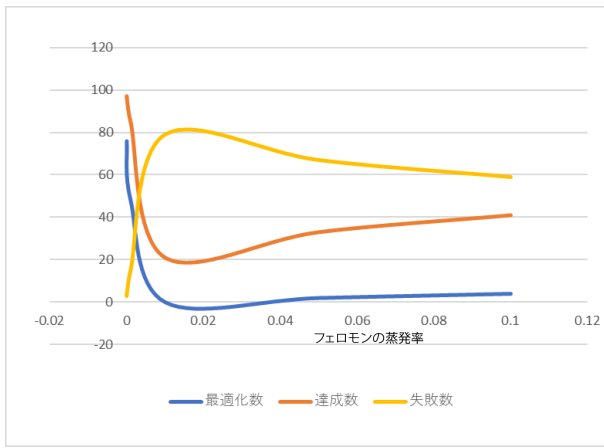


図5 フェロモンの蒸発率の変動による各値の変位

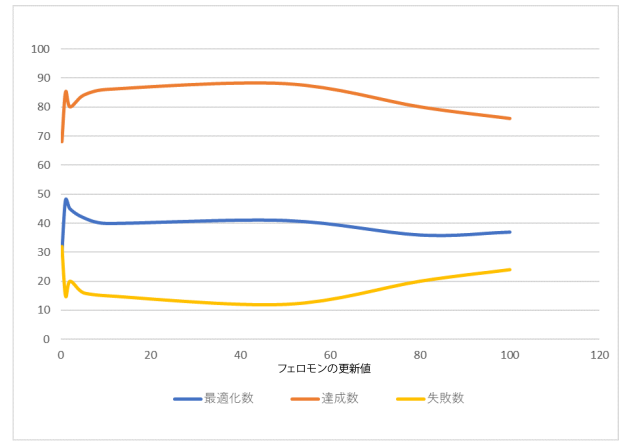


図6 フェロモンの更新値の変動による各値の変位

ものになってしまうことだ。そのため蒸発率が大きい場合、失敗数は多くなる。二つ目は、蒸発率が極大の場合、急速にフェイスの選択確率値に大きな差が生まれ、探索が開始された初めのAntのランダムな動きに近い経路が最適ルートとされる可能性が高まることだ。最適ルートとしてのランダムに近いホップ数と元々のFIBとしてのランダムホップ数を比較する機会が増え、達成数が増加する。

達成数について

- 蒸発率が極端に小さい場合、フェイスの選択確率値に大きな差をつけることができないため、Antの数が一定の場合、完全に最適化されずに探索が終了してしまう場合がある。しかし、選択確率に差がない状態である程度最適化されたルートはFIBによるランダムホップ数よりもホップ数が小さい可能性が非常に高い。そのため、達成数は蒸発率が極端に小さい場合において常に100に近い値となる。

- 蒸発率が大きい場合、最適化数に対する影響は二つある。一つは、Data Antが経由していないフェイスの選択確率は早い段階で極小になってしまい、Antによる経路選択が断定的なものになってしまうことだ。そのため蒸発率が大きい場合、失敗数は多くなる。二つ目は、蒸発率が極大の場合、急速にフェイスの選択確率値に大きな差が生まれ、探索が開始された初めのAntのランダムな動きに近い経路が最適ルートとされる可能性が高まることだ。最適ルートとしてのランダムに近いホップ数と元々のFIBとしてのランダムホップ数を比較する機会が増え、達成数が増加する。

5.4 フェロモンの更新値の変動による値の変位

フェロモンの更新値を変動させたときの値の変位は、フェロモンの更新値に対して、最適化数は増加から始まり、ある値から緩やかな減少に変わり、その後ほとんど一定の値で変化していない。達成数は増加から始まり、増加、減少、増加、減少を繰り返している。図6のような値の変位は以下に示す理由によるものだと考えられる。

最適化数について

- 更新値が小さい場合、フェイスの選択確率に差が生まれないため、探索ルート中は常に探索の初期状態のような状態である。そのため、更新値が小さい場合は失敗数も多く、最適化

数も小さい。

- 更新値が大きい場合、Antによる経路選択が断定的になり最適化数が小さくなる。

達成数について

- 更新値が小さい場合、フェイスの選択確率に差が生まれないため、探索ルート中は常に探索の初期のような状態である。そのため、更新値が小さい場合は失敗数も多くなる。

- 更新値が大きい場合、経路選択が断定的になるため、更新値がある程度大きい場合は選択確率に差が生まれることで最適ルートを決められ、達成数が多くなるが、更新値が大きくなるにつれ極端に断定的な経路決定をしてしまうため失敗数が多くなる。

- 達成数がある値においてピークを示すことについて、フェロモン値は初期値、蒸発率、更新値に依存しているが、更新値が増大するにつれ初期値に依存しなくなるためピークが現れる。

5.5 考察

これらの結果から、Antによる最適ルート探索確率を高めるためには、

- (1) Antの探索中に探索ルートが決定されること
- (2) 不確実な時点で探索ルートを断定しないこと
- (3) フェロモン値の初期値と、蒸発率及び更新値の関係

の3点が重要だと考えられる。1点目は、Antの数が多ければ探索確率が高まる。2点目、3点目においては、フェロモン値の変動が探索確率を変化させる。フェロモン値の初期値に対し蒸発率、更新値が大きいほどルートは早く決定されるが、最適ルートである確率は低くなる。一方で、蒸発率、更新値が小さいほど最適なルートを探すが、Antが探索し終わるまでにルート決定が終わらない可能性が高くなる。この3点を踏まえてパラメータの値を再決定する。ここでは、Antの数、ノードの数、フェイスの数、Cacheの数はネットワーク上において自由に決めることができないため、ノードの数、フェイスの数、Cacheの数は表1の基準値に設定する。Antの数は多いほど探索確率が高まるため、変位させた最も大きい値を基準値とする。フェロモンの蒸発率は、最適化数の最も

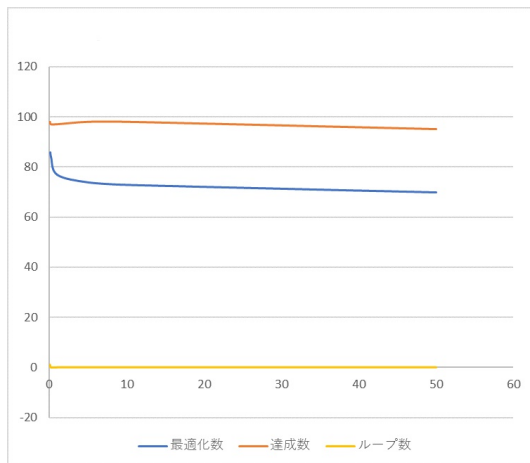


図 7 再決定基準値でのフェロモン更新値の変動による各値

多い値を基準値に選ぶ。これらの条件下でフェロモン値の更新値を変位させたグラフを図 7 に示す。図 6 と図 7 を比較すると、図 7 のほうが最適化数、達成数においてどちらも常に多かった。このことから、上記の 3 点によって最適化確率が変化することが分かった。

6. む す び

Interest Ant 生成時間の非ランダム化, Data Ant の更新フェロモン値の平等化, サービス負荷の無考慮による最適ルート探索の有効性を示した。Ant の数やフェロモン値の蒸発率, 更新値の変位による最適ルート探索確率の変化動作から, それぞれの変位値の特徴を見出すことに成功した。今後の課題では, 現行 SoCCeR との有効性の比較をし, 提案手法を実際にネットワークに取り入れることによって起こりうる事象を検証する。

文 献

- [1] Content-centric networking. [Online]. Available: <https://www.parc.com/events/content-centric-networking-6/>.
- [2] Network of Information webpage. [Online]. Available: <http://www.netinf.org/>.
- [3] Nikos Fotiou, Pekka Nikander, Dirk Trossen, and GeorgeC. Polyzos. Developing information networking further: From PSIRP to PURSUIT. In Ioannis Tomkos, ChristosJ. Bouras, Georgios Ellinas, Panagiotis Demestichas, and Prasun Sinha, editors, *Broadband Communications, Networks, and Systems*, Vol. 66 of *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, pp. 1–13. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [4] Shashank Shanbhag, Nico Schwan, Ivica Rimac, and Matteo Varvello. SoCCeR: Services over content-centric routing. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking, ICN '11*, pp. 62–67, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [5] Lixia Zhang, Alexander Afanasyev, Jeffrey Burke, Van Jacobson, kc claffy, Patrick Crowley, Christos Papadopoulos, Lan Wang, and Beichuan Zhang. Named data networking. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 44, No. 3, pp. 66–73, July 2014.
- [6] 中里秀則. コンテンツ指向ネットワーク. 映像情報メディア学会誌, Vol. 69, No. 3, pp. 253–255, 2015.
- [7] 朝枝仁. 情報指向ネットワーク技術におけるプロトタイプ実装と評価手法. <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jssst/>