

LL-007

## P2P 型資源検索システムにおける動的論理リンク管理機構

A Dynamic Logical Link Management Mechanism for P2P Resource Discovery Systems

大川拓郎\*

滝沢寛之†

小林広明\*†

Takurou Okawa

Hiroyuki Takizawa

Hiroaki Kobayashi

## 1. 緒言

現在、PCの性能向上とブロードバンドネットワーク環境の普及に伴い、膨大な数の高性能な計算資源がネットワークに接続されている。しかし、エディタや表計算などの一般的な用途では、PCの計算能力を最大限利用することは稀なため、その余剰計算能力の有効利用が研究されている。余剰計算能力を利用する分散コンピューティングプロジェクトとしてSETI@home[1]等があるが、このようなプロジェクトでは計算資源を借りる側と貸す側が固定され、多くの人は計算資源を貸すだけで借りることはできない。誰もが自由に余剰計算能力を使った大規模演算を行うためには、計算資源の相互利用環境が必要不可欠である。

莫大な計算資源群の中から他の計算機を利用するには、自分の利用したい機能を有した計算機の効率的な検索が強く求められる。しかし、不特定多数、かつ頻繁に参加、脱退が想定されるPCなどの個人計算資源を対象とする場合、情報を集約して管理するGlobus toolkit[2]のような機構では、情報の管理に要するコストが膨大になる。このような背景の中、特別な仲介者の存在を必要としないPeer to Peer(P2P)通信に基づく計算資源検索機構 Self-Organizing Resource Management System(SORMS)[3]が提案されている。

P2P通信に基づく資源検索では、各計算機(以下、ピアと呼ぶ)同士が直接通信して検索要求をルーティングすることにより、ユーザが要求する計算資源の検索を実現する。その結果、特定の計算資源への負荷の集中を回避することが可能であり、単一故障点がないことから耐故障性にも優れている。さらに、SORMSは、ユーザの利用特徴の局所性を利用して、各ユーザの利用する可能性の高いピアへ優先的に検索要求をルーティングする。

これまでの研究で、SORMSが高い検索効率を示すことが明らかになっている[3]。しかしながら、SORMSは計算資源の性能の違いを考慮していない。計算資源の性能が不均一な実際の環境下では、計算資源の利用される頻度が異なり、このことがSORMSによる検索効率の向上を妨げる要因となる。そこで本報告では、計算資源の性質が不均一な環境下において、SORMSの検索効率を向上させる動的リンク管理機構を提案する。さらに、シミュレーションによる性能評価から、本手法により検索条件に該当する計算資源を効率良く発見できることを明らかにする。

## 2. SORMS

現在一般に利用されているクライアント-サーバ型の計算資源検索機構と比較して、P2P型の資源検索ではサーバなどの特別な仲介者が存在しない。その代わりに、ピア同士が直接通信することにより、ユーザが要求する計算資源の検索を実現する。P2P型資源検

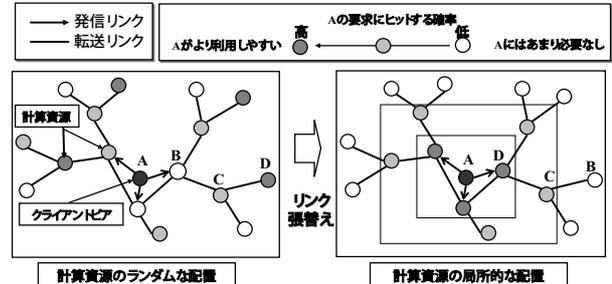


図 1: SORMS ネットワークの再構築

索のために、物理ネットワーク上での物理的接続関係とは独立に、ピア同士の論理的な接続(以下、論理リンクと呼ぶ)により構築されるネットワークを、オーバーレイネットワークという。SORMSは、計算資源間の論理リンクを張り替えていくことによって、検索効率の高いオーバーレイネットワークを形成していく機構である。張り替えの際には、ユーザの利用特徴の「時間的局所性」と「空間的局所性」の2点に注目する。時間的局所性とは、ユーザは近いうちに再び同じ計算機を使う可能性が高いという利用特徴である。また、空間的局所性とは、同じ計算機を利用するユーザ間では同様の計算機を使う可能性が高いという利用特徴である。例えば、あるユーザが科学技術計算をパラメータを変化させながら繰返し実行する場合、その科学技術計算用ソフトウェアがインストールされている計算機を短時間内に繰返し利用する可能性が高い(時間的局所性)。また、得られた結果を解析するために、グラフ描画や表計算などといったアプリケーションを次に実行する可能性が高い(空間的局所性)。

SORMSで用いられる論理リンクには、ユーザの計算機(クライアントピア)から検索要求パケットを送出するための発信リンクと、計算資源間で検索要求パケットを伝播する転送リンクの2種類がある。図1に示すように、SORMSは2種類の論理リンクを張り替えていくことによって、ユーザの利用特徴に合わせたネットワークを構成し、検索効率を向上させる。

## 3. 動的リンク管理機構

本節では、計算資源の利用される頻度(以下、利用頻度と呼ぶ)に応じて計算資源が持つ論理リンクの数を管理する動的リンク管理機構を提案する。

SORMSでは、計算資源が利用される際に論理リンクを張り替えるため、利用頻度の高い計算資源の論理リンクは頻繁に張り替えられる。論理リンク数が固定されている場合、新しい論理リンクが作成されるたびに古い論理リンクが削除されるため、論理リンクが作成されてから削除されるまでの時間は利用頻度により異なる。そのため、利用頻度の高い計算資源では作成された論理リンクがすぐに削除され、利用頻度の低い計算資源では古い論理リンクが長時間利用される可能

\*東北大学大学院情報科学研究科

†東北大学情報シナジーセンター

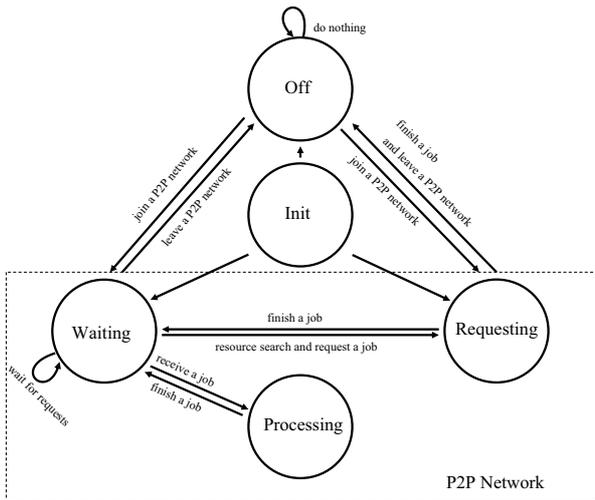


図 2: 各ピアの状態の遷移図

性が高い。また、利用頻度の高い計算資源付近では論理リンク先が頻繁に変わるため、検索要求のルーティング経路も頻繁に変化し、自己組織化能力が低下する。

論理リンク数を増加させることにより、利用頻度の高い計算資源でも論理リンクを長く利用することができ、そのルーティング経路を安定させることもできる。しかし、SORMS では flooding 型の検索を行うため、無秩序な論理リンク数の増加は大量のネットワークトラフィックの発生に繋がる。

以下、利用頻度に応じてリンク数を動的に割り当てることにより、無駄なネットワークトラフィックを発生させることなく、検索効率の高いオーバーレイネットワークを構築することを考える。利用頻度に応じて論理リンクを割り当てるために、論理リンクの有効時間を設定し、論理リンクが作成されてから経過した時間が有効時間を超えた際に、その論理リンクを削除する。論理リンクが作成されてから削除されるまでの間に他に作成される論理リンクの数は利用頻度が高いほど多いため、この機構により利用頻度に応じて論理リンク数を変化させることができる。また、既に論理リンクで接続されている計算資源間に再び論理リンクを張る場合に経過時間を 0 に再設定することにより、頻繁に論理リンクが張られる利用形態の相関が強い計算資源間の論理リンクを長く維持することができる。以上の方法により、利用頻度に応じて動的にリンク数を管理する。

#### 4. 評価

本節では、シミュレーションにより動的リンク管理機構を評価する。シミュレーションには、ネットワークシミュレータ OPNET Modeler[4] を用いる。

##### 4.1. シミュレーションモデル

本シミュレーションでは、各ピアに提供アプリケーション ID と性能値の 2 種類のピア属性が無作為に設定されている。ユーザは利用したいアプリケーション ID と必要な性能値の 2 つを検索条件として指定し、検索要求パケットを送出する。検索要求パケットを受信したピアは自分の提供内容と検索条件を比較した後、論理リンクによって接続された隣接ピアに検索要求パケットを転送する。そして、検索要求パケットが P2P ネットワークを伝播し、条件に合う計算資源が応答を

返す(以下、ヒットすると呼ぶ)。例えば、F00 というアプリケーション ID と 50 という性能値を指定した場合、検索要求パケットを受信したピアのうちアプリケーション F00 を提供し、かつ性能値が 50 以上のものがヒットする。

各ピアには、何も行わない Off 状態、他のピアに計算を依頼する Requesting 状態、他のピアからの依頼を待つ Waiting 状態と、依頼を受け計算を実行している Processing 状態の 4 つの状態を図 2 のように遷移する。それぞれの状態は、一定間隔ごとに次の状態へ遷移するか、以下に示す一連の動作により状態を遷移する。Requesting 状態へと遷移したピアは、隣接するピアへ検索要求パケットを発信し、その応答を待つ。Off 状態以外のピアは、検索要求パケットを受信すると、隣接するピアへ転送を行う。Waiting 状態のピアは、受信した検索要求パケットの条件と自分の提供内容を比較し、条件を満たす場合は応答する。そして、応答したピアのうち 1 台が Processing 状態へ遷移し、計算終了後、再び Waiting 状態へ遷移する。このとき、計算を依頼したピアも Requesting 状態から Waiting 状態、または Off 状態へと遷移する。各ピアは、図 2 に示す 4 つの状態を時間とともに遷移し、その時々 Off 状態以外のピアによりオーバーレイネットワークが形成され、複数の Requesting 状態にあるピアにより要求が発信される。

ユーザが利用する計算資源群が時間とともに変化する非定常環境では、ユーザの検索条件も時間とともに変化する。ユーザの利用特徴の時間的局所性をモデル化するためには、ユーザが前回利用した計算機を再度利用する確率を高くする必要がある。そこで本モデルでは、ユーザ A が指定する検索条件は、ユーザ A が検索を行った回数を時間とする Wiener 過程 [5] に従うと仮定する。ユーザ A が性能値  $x$  の計算資源を検索する場合、整数  $[x]$  を検索条件として指定し、次の検索では  $x$  を平均値とした正規分布から求められた値を検索条件に用いる。同様に利用するアプリケーション ID も変化し、ID 番号の近いものを利用しやすく、空間的局所性をモデル化している。その結果、同じアプリケーションを利用しているユーザは、同様の計算資源を利用する可能性が高くなるということモデル化することができる。一方、計算資源を提供する側にもユーザの利用特徴の空間的局所性と同様の局所性が存在すると考えられる。そこで本モデルでは、各ピアが複数のアプリケーションを提供する場合、空間的局所性により相互に関連性の高いアプリケーションが提供される。つまり、無作為に選択された 1 つのアプリケーションを基準として連続する ID のアプリケーションが提供される。

##### 4.2. シミュレーション条件

表 1 に示すパラメータを用いたシミュレーションにより、動的リンク管理機構の検索効率を、転送リンク数を一律に 4 本、5 本、6 本とした場合と比較しながら評価する。ここで最大ホップ数は、検索要求パケットが伝搬する範囲を設定するパラメータである。最大ホップ数 4 の場合、検索要求パケットは発信リンクを介して 1 回、転送リンクを介して 3 回伝わったあとに、消去される。最大・最小転送リンク数は、動的リンク管理機構により変動する転送リンク数の上限値と下限

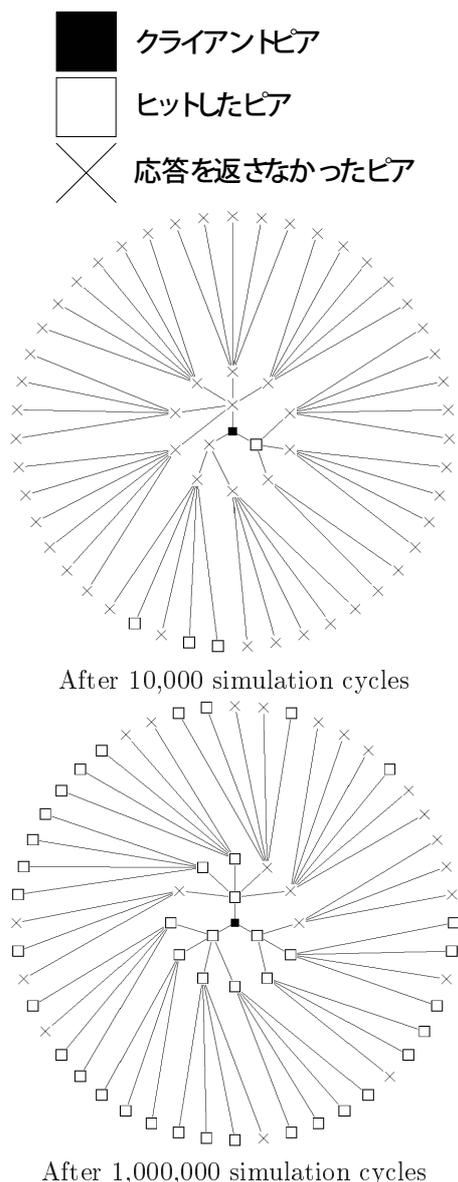


図 3: SORMS による計算資源の局所化

表 1: シミュレーションパラメータ

ピア数	16384 台
発信リンク数	3 本
最大ホップ数	4 ホップ
最大転送リンク数	6 本
最小転送リンク数	1 本
転送リンク有効時間	10,000 cycles
アプリケーション ID	F00 ~ F99
各ピアが提供するアプリケーション数	2
性能値	1 ~ 100
$t_i$	100 cycles
$V_p$	1.0
$V_a$	0.1
$p_{ow}$	0.015
$p_{or}$	0.01
$p_{oo}$	$1 - (p_{ow} + p_{or})$
$p_{wo}$	0.01
$p_{wr}$	0.015
$p_{ww}$	$1 - (p_{wo} + p_{wr})$
$p_{ro}$	0.2
$p_{rw}$	0.8

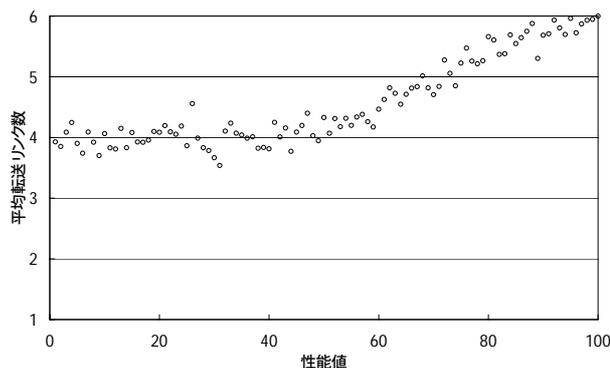


図 4: 性能値と転送リンク数の関係

値である．また，転送リンク有効期限とは，作成された転送リンクが有効である時間である． $t_i$  は，Off 状態，Waiting 状態のピアが次の状態へ遷移する間隔である． $V_p$  と  $V_a$  はそれぞれユーザの指定する検索条件の性能値と利用アプリケーション ID の Wiener 過程における正規分布の分散である． $p_{ab}$  は  $a$  の状態から  $b$  の状態へ遷移する確率である． $a, b$  に当てはまるアルファベットには  $o, w, r$  の 3 つがあり， $o$  は Off 状態， $w$  は Waiting 状態， $r$  は Requesting 状態である．本シミュレーションでは 1 シミュレーションサイクルで検索要求パケットの転送が 1 ホップ進む．初期状態では，各論理リンクは無作為に接続される．

#### 4.3. 動的リンク管理機構の評価

図 3 は，10,000，1,000,000 シミュレーションサイクルにおけるオーバーレイネットワークを可視化した図である．クライアントピアを中心として，計算資源を検索要求を受け取るホップ数の小さい順に内側から同心円状に 3 ホップまで表示している．図 3 を見ると，SORMS による論理リンクの自己組織化により，図 1 と同様に，オーバーレイネットワーク上でクライアントピアの近くに検索条件に該当する可能性の高い計算資源が局所化されている．このように，動的リンク管理機構を用いた場合においても，ユーザの利用特徴の局所性を利用して効率の高いオーバーレイネットワークを再構築できる．

本シミュレーションでは，ユーザは利用したいアプリケーション ID と必要な性能値の 2 つを検索条件として指定する．この 2 つの検索条件のうち性能値に関しては指定された値以上の性能値を持つ計算資源がヒットするため，計算資源は性能値が大きいほど利用されやすい．そこで，利用頻度を表す値として性能値を用い，1,000,000 シミュレーションサイクルにおけるピアの持つ性能値と割り当てられた転送リンク数の関係を図 4 に示す．図 4 では，性能値が高いほど平均転送リンク数が増加している．このことから，動的リンク管理機構が正常に動作し，利用頻度が高いほど転送リンク数が増加していることがわかる．また図 4 から，性能値が低いピアの平均転送リンク数が 4 程度になっていることがわかる．図 2 で Off 状態のピアが状態遷移し SORMS ネットワークに参加する際，自分に要求が転送されるように既存のピアと双方向のリンクを確立する．従って，全く利用されない計算資源でも新しいリンクが作成される機会があり，性能値が低いピアもオーバーレイネットワークの入り口としての役

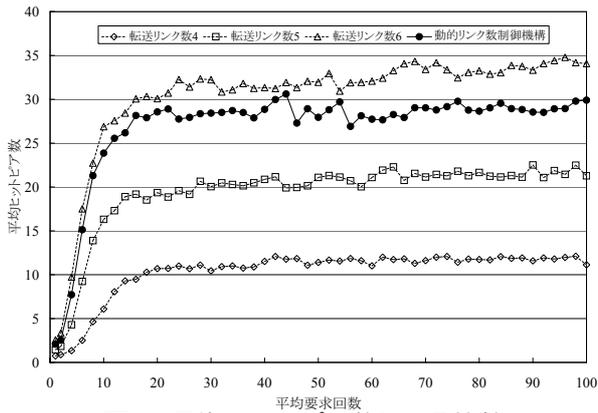


図 5: 平均ヒットピア数による比較

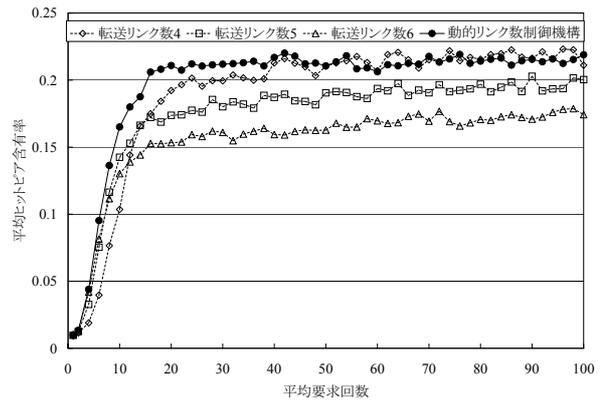


図 6: 平均ヒットピア含有率による比較

目を果たすことにより、ピア加入時の負荷の分散に貢献していると考えられる。

無作為に論理リンクを接続した初期状態から、SORMS によってオーバーレイネットワークを最適化した場合のシミュレーションの結果を図 5 に示す。横軸の平均要求回数とは、1 ピアあたりの計算を依頼した回数であり時間経過を表すとともに、SORMS による論理リンク張り替え回数も表す。図 5 より、時間が経つにつれてどの場合も 1 検索あたりにヒットするピアの平均数 (平均ヒットピア数) が増加していることがわかる。これは、図 3 に示したように、SORMS による論理リンクの張り替えにより、提供内容の似た計算資源がオーバーレイネットワーク上で局所化され、近い位置に相互接続されたからである。

平均要求回数 100 の時点で比較すると、転送リンク数が一律 4 本と 5 本では後者の平均ヒットピア数が前者の 1.91 倍となり、4 本と 6 本では 3.06 倍もの差がある。これは、リンク数を増加させることにより、同じ最大ホップ数でも検索できる計算資源の数が増加するため、ヒットするピア数も増加するからである。本シミュレーションでは、動的リンク管理機構の 1 ピアあたりの平均転送リンク数は 4.46 本である。図 5 を見ると、動的リンク管理機構は平均要求回数 100 のとき、平均ヒットピア数は転送リンク数一律 4 本の場合の 2.69 倍である。これは、動的リンク管理機構は、平均転送リンク数が 4.46 本と一律 5 本よりも少ないのに対して、平均ヒットピア数が一律 5 本よりも多いことを示す。このことは、動的リンク管理機構により、ユーザの求める計算資源を効率よく検索できていることを意味する。

動的リンク管理機構により効率良く検索できることを定量的に評価するために、平均ヒットピア含有率を図 6 に示す。ここで平均ヒットピア含有率とは、1 回の検索で要求パケットを受信したピア中のヒットピアの割合の平均値である。ヒットピア含有率が高い場合、ヒットするピアに検索要求パケットが伝搬する可能性が高く、検索効率が高いといえる。図 6 より、転送リンク数を一律に増加させた場合、平均ヒットピア含有率が減少していることがわかる。図 5 の結果と合わせると、転送リンク数が全ピアで一律の場合、転送リンク数の増加は平均ヒットピア数を増加させるが、ヒットピア含有率の観点から見ると検索効率を低下させるといえる。一方、動的リンク管理機構は、転送リンク数一律 4 本の場合とほぼ等しい平均ヒットピア含有率

となっている。また、図 5 および 6 において、動的リンク管理機構と転送リンク数一律 5 本を比較すると、平均ヒットピア数、平均ヒットピア含有率ともに動的リンク管理機構のほうが高い値になっていることがわかる。

以上のシミュレーション結果より、転送リンク数の一律増加が検索効率を損なうことを示した。一方、動的リンク管理機構により、利用頻度に応じて転送リンク数を変化させることによって検索効率を向上できることを明らかにした。

## 5. 結言

本報告では、計算資源の性能が不均一な環境下で、P2P 通信に基づく計算資源検索機構 SORMS の検索効率を向上させるために動的リンク管理機構を提案した。シミュレーションにより提案手法を評価し、一律にリンク数を増加させる場合と比べて、提案手法が高い検索効率となることを示した。

今後は、様々なトポロジの物理ネットワークに対して検索遅延の評価を行い、検索遅延の削減など物理ネットワークも考慮した論理ネットワーク自己組織化の効率化について検討する。

## 謝辞

日頃熱心にご討論いただく東北大学後藤英昭助教授、村田善智氏、王弘氏、NTT 東日本の稲葉勉氏に感謝する。本研究の一部は、総務省特定領域重点型研究開発「ICT エコ社会を創造する安全・安心・安価なユビキタスコンピューティングプラットフォームの研究・開発」の支援を受けている。

## 参考文献

- [1] David P. Anderson, Jeff Cobb, Eric Korpela, Matt Lebofsky, and Dan Werthimer, "SETI@home: an experiment in public-resource computing," Communications of the ACM, Volume 45, Number 11 (2002), 56-61
- [2] I. Foster and C. Kesselman, "The Globus Project: A Status Report," In: Proc. of the 7th Heterogeneous Computing Workshop, held in conjunction with IPPS/SPDP '98, Orlando, 418, Feb. 1998
- [3] Hiroaki Kobayashi, Hiroyuki Takizawa, Tsutomu Inaba, and Yasuaki Takizawa, "A Self-Organizing Overlay Network to Exploit the Locality of Interests for Effective Resource Discovery in P2P Systems," The 2005 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT2005), 246-255, Jan. 2005
- [4] Making Networks and Application Perform. <http://www.opnet.com/>.
- [5] 大塚信一, 日本数学会, "岩波 数学辞典 第 3 版," 岩波書店, Dec. 1985