

大規模 P2P システムにおける計算資源探索のモデル化と性能評価
An Evaluation and Modeling of Resource Discovery in Large Scale P2P Systems

大川拓郎* 滝沢寛之*† 小林広明*†
Takurou Okawa Hiroyuki Takizawa Hiroaki Kobayashi

1. はじめに

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。このような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、資源を提供する側と利用する側が固定化されており、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、自分の利用したい性能や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、共通の管理者が存在しない膨大な数の計算機を一元的に管理するのは非常に困難であり、一元管理ができたとしてもサーバへの負荷の集中は深刻な問題となる。このような背景から、本報告では大規模システムにおける分散制御が可能な P2P(Peer to Peer) 通信に基づく計算資源発見に着目し、大規模 P2P システムにおける資源探索の性能を評価する。

システムの詳細な評価には、実際にシステムを構築して評価する方法と、シミュレーションによって評価する方法がある。例えば、論文 [2, 3] では、P2P コンピューティングシステムである Personal Power Plant(P3) や JNGI を PC クラスタ等を用いて実装し、その性能を評価している。実装による評価は、システムの現実的な状況下での評価が行えるなど非常に有効な方法であるが、大規模システムの評価や様々な状況下における評価が困難という問題がある。一方、シミュレーションによる評価では大規模システムの構築や、異なる状況の設定が容易である。そこで、本報告では、P2P 通信に基づく計算資源発見機構の挙動を詳細に解析するために、ユーザからの検索要求とそれに対する計算資源との関係を適切に表現するための評価モデルを提案する。そして、P2P 通信に基づく計算資源発見機構である Self-Organizing Resource Management System(SORMS)[4] の大規模シミュレーションを提案モデルに基づいて設計・実装し、現実的な状況における SORMS の資源探索性能を評価する。

2. P2P 通信に基づく資源探索のモデル化

計算機間の物理的接続関係とは独立に、論理的な接続(論理リンク)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。P2P 通信に基づく計算資源探索では、ユーザがオーバーレイネットワークを使って検索要求パケットを発信し、その検索要求パケットが論理リンクを介して転送されることにより、必要な計算資源を探索する。ユーザの要求する計算資源

源の条件と計算資源の提供内容とを計算資源自身が比較することによって、ユーザの要求する計算資源が発見(以下、ヒットとする)される。

このような計算資源探索機構の探索効率をシミュレーションにより評価するために、論文 [4] ではユーザからの要求を計算資源が満たすか否かを確率(ヒット確率)により抽象化したモデル(抽象モデル)が用いられている。一般に、各ピアのヒット確率は提供できる計算資源の性能や機能に大きく依存しているが、抽象モデルではその依存関係を考慮できない。資源探索機構を適切にモデル化するためには、その依存関係を考慮して利用頻度の偏りを実現しつつ、ユーザの検索条件の変化によるヒット確率の変化や新規ピア参加などによる非定常環境にも対応できる必要がある。

計算資源探索機構の詳細な挙動を解析するためには、検索条件と提供内容を比較するという検索手順を明確にモデル化する必要がある。そのため、各ピアの提供内容を表す属性値が必須である。ユーザからの要求には、OS、提供アプリケーション、命令セットアーキテクチャ、演算能力、メモリ容量、利用料金、利用時間など様々な条件があり、目的により変化する。この中でも、利用したいアプリケーションが提供されているか否かという機能的条件と、期限までに依頼した計算を完了できるか否かという性能的条件の2つの条件が重視される。一般性を損なうことなく検索内容を抽象化するためには、少なくともこれら2つの条件に基づいて資源探索する必要がある。

3. 検索条件投入モデルの提案

本節では、前節での考察に基づき、ユーザからの機能的条件と性能的条件による計算資源探索をモデル化する検索条件投入モデルを提案する。本モデルでは、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ヒットする。例えば、F00 というアプリケーション ID と 50 という性能値を条件として指定した場合、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1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

* 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

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する。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と比較し、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。図1に示す4つの状態を各ピアが時間とともに遷移し、その時々Off状態以外のピアによりP2Pネットワークが形成される。

Off状態を定義することにより、ピアのP2Pネットワークの参加・脱退を明確に表現している。従って、途中から新たなピアをOff状態として追加することにより、P2Pネットワークが形成された後に新規に参入するピアを表現することができる。

ユーザからの検索要求には「時間的局所性」と「空間的局所性」があると考えられる[4]。時間的局所性とは、あるユーザは近いうちに同じ計算機を使う可能性が高いという性質である。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似たような計算機を使う可能性が高いという性質である。

ユーザの検索条件が時間とともに変化する非正常環境では、ユーザが利用する計算資源群も時間とともに変化していく。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過程に従うと仮定する。これにより、検索条件は前回検索した時と似た条件となり、同じ計算機を使う可能性が高いため時間的局所性を表現できる。

同じアプリケーションを利用しているユーザ間では興味などが似ていると考えられ、他に利用するアプリケーションも似ていると考えられる。そこで、利用するアプリケーションが変化する際、ID番号の近いアプリケーションに変化しやすくする。これにより、ID番号の近いアプリケーションを利用しているユーザ間では利用する計算機が似ているという空間的局所性を表現できる。

実際のネットワーク環境では、ユーザの興味の偏りや、計算資源の提供内容の違いにより検索条件に該当する頻度が違うため、各計算資源の利用される頻度には偏りがある。本モデルでは、各ユーザごとにWiener過程に従い検索条件を決定することでユーザの興味の偏りを表現し、各ピアの提供する性能値の大小により検索条件に該当する頻度の違いを表現する。

以上の検索条件投入モデルにより、提供する機能と性能に基づくヒット確率の違いや新規ピア参入などの非正常環境をモデル化することが可能になる。

4. 評価実験と考察

本節では、効率の高い計算資源探索機構であるSORMS[4]の探索効率を、検索条件投入モデルに基づくシミュレーションによって評価する。

4.1. 計算資源探索機構 (SORMS)

SORMSは、ユーザの計算資源利用履歴から将来の資源要求を予測し、検索条件を満たす可能性の高いピアをオーバーレイネットワーク上で近くなるように、オーバーレイネットワークを動的に再構成する手法である[4]。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

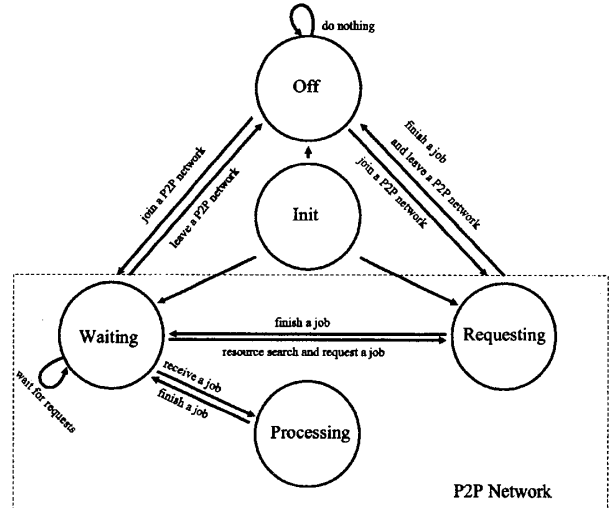


図1: 各ピアの状態の遷移図

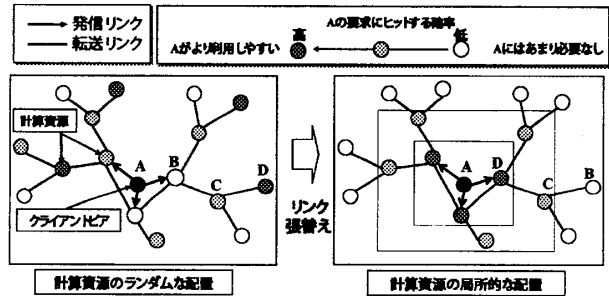


図2: オーバーレイネットワークの再構築

求パケットを伝播させる転送リンクの2種類がある。図2に示すように、SORMSは論理リンクの張り替えにより、ユーザの計算資源利用の特徴に合わせた探索効率の高いオーバーレイネットワークを再構築する。

4.2. P2Pシステムの評価項目

ネットワークシミュレーションツールOPNET[5]を用いて、検索条件投入モデルに基づいたSORMSのシミュレータを構築した。

シミュレーションパラメータを表1に示す。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。例えば、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。 t_i は、Off状態と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。論理リンクの初期の接続先は無作為に決定する。

シミュレーションにより、以下の点についてSORMSを評価する。

- 非正常環境におけるピア数の探索効率への影響。
- 多数の新規ピア参入による探索効率への影響。
- 性能とヒット確率との依存関係の利用。

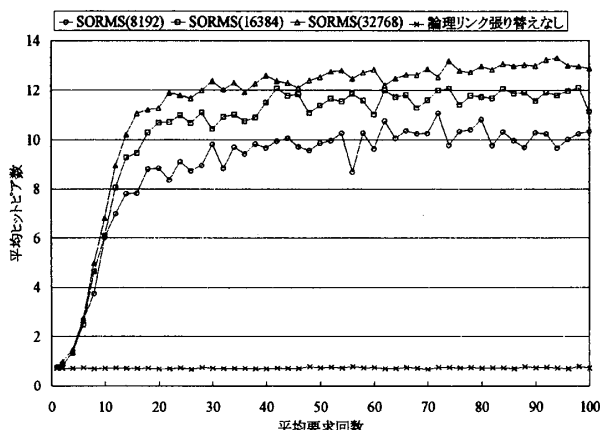


図 3: ピア数による平均ヒットピア数の変化

4.3. 提案モデルによる SORMS の評価

4.3.1. ピア数による影響

図 3 に、ピア数 16,384 台で論理リンクの張り替えを行わない場合と、表 1 に示すピア数について SORMS を用いる場合についてのシミュレーション結果を示す。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平均回数であり、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 3 より、SORMS による論理リンクの張り替えを行った場合は、時間が経つにつれて 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、各クライアントピア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。これにより、例えば P2P コンピューティングシステムで分散計算を行いたい場合、SORMS を用いることにより 1 回の検索要求で獲得できる計算能力を向上できる。また、平均ヒットピア数が多いほど障害が生じたときの代替計算資源の獲得が容易になり、システムの耐故障性が高くなる。さらに、論理リンクの張り替えを行わない場合に比べて、少ない検索ホップ数で同等の平均ヒットピア数を達成できるため、資源探索に要するネットワークトラフィックの削減も可能である。

図 3 からはまた、ピア数の増加によりヒットピア数が増加していることもわかる。本シミュレーションではリンク数と最大ホップ数が一定値のため、検索要求パケットを受信するピアの最大数は一定である。しか

表 1: シミュレーションパラメータ

| | |
|-------------------|-------------------------|
| ピア数 | 8192, 16384, 32768 台 |
| 発信リンク数 | 3 本 |
| 転送リンク数 | 4 本 |
| 最大ホップ数 | 4 ホップ |
| 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 | 5 |
| 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 |

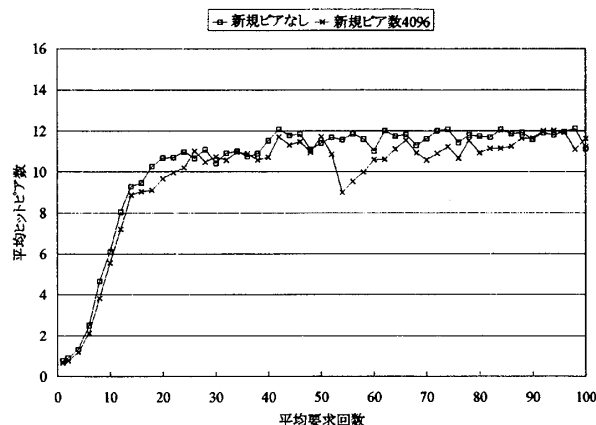


図 4: 新規ピアの参入による平均ヒットピア数の変化

し、同一の検索要求パケットを重複して受信した場合には、後から受信した検索要求パケットを破棄する。従って、ピア数の増加に応じて同一の検索要求パケットを重複して受信する確率が減少するため、同じリンク数および最大ホップ数の実験条件下でも、検索要求パケットを受信するピアの実数は増加する。その結果、平均ヒットピア数が増加する。本シミュレーション結果より、SORMS による資源探索は大規模な環境下において特に高い探索効率を示すことが明らかとなった。

4.3.2. 新規ピア参入による影響

ピア数 16,384 台に対し、500,000 シミュレーションサイクル (平均要求回数約 53 回) 経過してから 4,096 台の新規ピアが計算資源として参入する際の検索効率に与える影響を評価する。新規に参入したピアは、既存のピアに無作為に接続される。ピア数以外のシミュレーションパラメータについては、前節と同様である。

結果を図 4 に示す。横軸の平均要求回数は、初めの 16,384 台について平均を取ったものである。また、縦軸の平均ヒットピア数は初めの 16,384 台の中で図 1 の Requesting 状態にあるピアについて平均を取ったものである。これにより、大規模な新規ピアの参入が既存のピアの探索効率へ与える影響を見ることができる。

図 4 より、大規模に新規ピアが参入したとき、平均ヒットピア数が約 3 台減少している。これは、多数の新規参入ピアが、ユーザの利用履歴とは無関係な論理リンクで既存のピアに多数接続されたからである。その後、論理リンクの張り替えにより再び局所化されヒットピア数が増加する。本シミュレーション結果より、大規模な新規ピアの参入により一時的に探索効率が低下するが、再びピアが局所化され元の探索効率に戻ることが確認された。

4.3.3. 転送リンク数による影響

転送リンク数 4 本、5 本、6 本の場合を比較して、探索効率の転送リンク数による影響を評価する。また、性能値に応じて各ピアの転送リンク数を変化させる場合 (リンク数変化方式) の影響も評価する。本シミュレーションではリンク数変化方式の場合、性能値 1~33, 34~66, 67~100 のピアに対して、転送リンク数をそれぞれ 2 本、4 本、6 本に設定する。また、ピア数は 16,384 台固定であり、ピア数と転送リンク数以外のパラメータに関しては、表 1 と同様として、探索効率を平均ヒットピア数と平均ヒットピア含有率によ

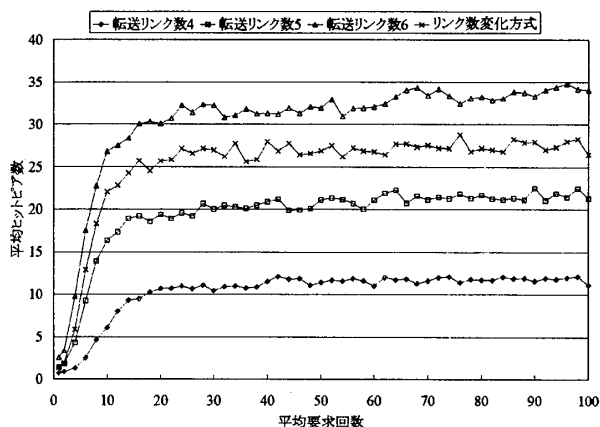


図 5: 転送リンク数による平均ヒットピア数の変化

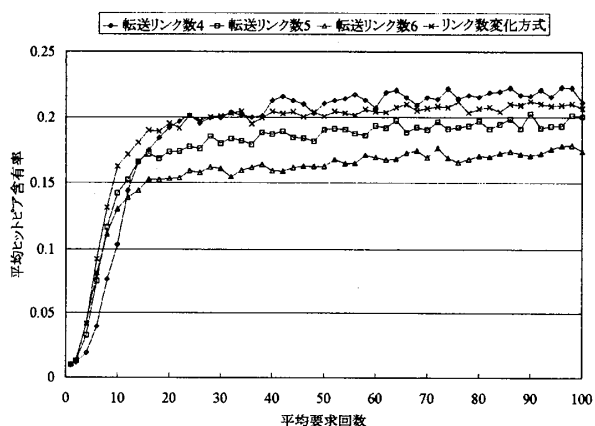


図 6: 転送リンク数による平均ヒットピア含有率の変化

り評価する。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り、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、探索効率が高いといえる。

平均ヒットピア数の推移を図5に示す。また、平均ヒットピア含有率の推移を図6に示す。転送リンク数の増加により検索要求パケットを受信するピアが増加するため、平均ヒットピア数も増加する。しかし図6より、全ピアの転送リンク数を一律に増加させた場合には、平均ヒットピア含有率が減少していることがわかる。これは、検索したピアのうち検索条件に該当しないピアの割合が大きくなったことを示している。従って、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探索効率を低下させているといえる。

図5から、リンク数一律4本の平均ヒットピア数約11.8台に対し、リンク数変化方式(1ピアあたりの平均リンク数4本)では約27.5台と2倍以上になっている。また、図6より、リンク数変化方式の平均ヒットピア含有率はわずかながら低下するが、立ち上がりは早い。つまり、リンク数変化方式は、SORMSによるオーバーレイネットワーク上での計算資源の局所化の進行速度が速いといえる。さらに、転送リンク数一律5本の場合とリンク数変化方式を比較すると、平均ヒットピア数、平均ヒットピア含有率ともにリンク数変化方式のほうが高い。以上の結果から、性能値に応

じて転送リンク数に偏りを持たせることで、探索効率を維持しつつ、一律にリンク数を増加させる場合よりも多い平均ヒットピア数を達成できることがわかる。高性能なピアの転送リンクの接続先は高性能なピアの可能性が高く、また、高性能なピアは頻繁に検索要求パケットを受信する。従って、高性能なピアの転送リンク数を増加させることにより、多くのピアを検索できるようになり、また、ヒットする確率が高いピアを優先的に検索できる効率的なオーバーレイネットワークを構築することができる。

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探索効率を低下させることと、性能値に応じて転送リンク数を変化させることで探索効率のさらなる向上が期待できることが明らかになった。

5. まとめ

P2P通信に基づく計算資源探索機構の挙動を詳細に解析するため、ユーザからの機能的条件と性能的条件による計算資源探索をモデル化した検索条件投入モデルを提案した。提案モデルにより、論文[4]では不可能だった詳細な評価が可能となり、大規模シミュレーションによって、計算資源探索機構の一つであるSORMSの資源探索性能を評価した。その結果、SORMSによる資源探索は大規模な環境下において特に高い効率を発揮することを明らかにした。また、多数のピアの新規参入により一時的に探索効率が低下するが、その後のSORMSによる論理リンク張り替えによって、再度探索効率が向上することを確認した。さらに、性能に応じて転送リンク数を変化させることにより、SORMSがさらに効率の高い探索手法となることを示した。

今後は、ネットワークトラフィックや遅延、帯域幅など実ネットワークの通信環境を考慮したより詳細な評価を行い、その結果に基づいてさらに効率的な探索方法を検討していく。

謝辞

本報告において、東日本電信電話株式会社 ネットワーク事業推進本部 研究開発センタの稲葉 勉氏に貴重な御助言を賜りました。深く感謝致します。

本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度特定領域重点型研究開発#031102005の支援を受けています。

参考文献

- [1] SETI@home: Search for Extraterrestrial Intelligence at Home. <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>.
- [2] K. Shudo, Y. Tanaka, and S. Sekiguchi, "P3: P2P-based Middleware Enabling Transfer and Aggregation of Computational Resources," in Proc. of Fifth Int'l Workshop on Global and Peer-to-Peer Computing on Cluster Computing and Grid 2005 (CCGrid 2005), May. 2005.
- [3] J. Verbeke, N. Nadgir, G. Ruetsch, and I. Sharapov, "Framework for Peer-to-Peer Distributed Computing in a Heterogeneous, Decentralized Environment," in Proc. of Third International Workshop on Grid Computing (GRID 2002), pp. 1-12, Nov. 2002.
- [4] H. Kobayashi, H. Takizawa, T. Inaba, and Y. Takizawa, "A Self-Organizing Overlay Network to Exploit the Locality of Interests for Effective Resource Discovery in P2P Systems," in Proc. of The 2005 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT2005), pp. 246-255, Jan. 2005.
- [5] Making Networks and Application Perform. <http://www.opnet.com/>.