

# 意味情報インデックスを用いた P2P 型分散検索手法の実現

## P2P Decentralized Retrieval Strategy Based on the Statistic Information of Contents

土屋 健十 吉永 浩和 小柳 恵一  
Takeshi TSUCHIYA, Hirokazu YOSHINAGA, Keiichi KOYANAGI

### 1. はじめに

多くのセンサやサービスが遍在するユビキタス環境では検索対象はサーバのコンテンツだけでなく、提供されるサービス、センサなどの時系列に発生するデータも検索対象となる。インターネット規模に分散するサービス、コンテンツは利用者に応じてユーザ主導で構築される論理データプレーン上に配置される。従って、ユビキタス環境を想定する検索サービスは論理空間に配置されるサービス、コンテンツを検索対象とすることになる。しかし、現在の集中型の検索システムはサービス、コンテンツの移動や、時系列に変動するデータといったインデキシングのリアルタイム性や、検索対象の増加へ対応できず、十分な検索サービスを提供できないといえる。また、これらサービスを提供するノード(以降はピアと呼ぶ)の移動が発生するため、論理空間に固定のサービスピアを配置することは現実的に困難である。従って、ピアの変動に応じてインデックス管理ピアの変更といった柔軟性や、検索対象の変動に伴うシステムスケラビリティの対応が求められることになる。本稿では各ピアが分散管理するインデックスを Peer-to-Peer (P2P)技術で接続することで、ユーザ参加型の分散検索システムを構築する。

ピア主導とした分散検索の先行研究として筆者らが提案するコニカルサーチ手法[5]がある。この提案では分散ピア間で協調してインデックスの分散管理を行っているが、分散ピア間で頻繁な統計情報の更新が発生する。その結果、分散システムとしてのスケラビリティがこの更新により制限される提案であった。以上のことから本稿ではサービス、コンテンツを管理するピアがそれぞれ分散してインデックスの生成・管理を行う。このピア間を P2P ネットワーク技術で接続することにより、クエリと検索結果の配送を提供する分散検索システムとなる。しかし、このピアごと導出される統計情報は管理するコンテンツ全体から導出する情報と異なり、ピアごとの偏りの発生は明らかである。そのため、本稿では各ピアの導出した統計情報に加え、全ピアで共通する統計情報を利用することにより、現在の集中型検索がもつ品質の高い検索サービスと、P2P 型の分散システムのスケラビリティを両立した分散検索システムを実現する。そして、提案手法の評価として実装した検索システムと、シミュレーションを行い、分散システムとしての実現性、想定される適応シンの考察を行う。

### 2. クエリ伝播による分散検索方式

本章では提案するクエリ伝播による分散検索方式の各機能について説明を行う。

#### 2.1. コンテンツ管理ピアの選定

P2P ユーザ参加型オーバーレイネットワーク上の検索対象となるサービス、コンテンツの範囲を定め、このサービス、コンテンツを管理するピアを決定する。ピアの選定により、ネットワークに対し不安定なピア、処理性能の劣るピアによるコンテンツ管理を回避し、安定した分散システムを構築することになる。

図 1 にピア選定から検索サービス開始までのピア間のシーケンスを示す。以降、本稿ではサービス、コンテンツ管理ピアとして選定されたピアを選定ピア、この選定ピアの集合を選定ピアネットワークとよぶ。(1)はブートストラップピアによる分散検索機構構築の通知を示している。(2)は通知のレスポンスとして、検索対象となるサービス、コンテンツと選定のためのメトリックの評価を通知する。ブートストラップピアはレスポンスのコンテンツ数に基づいて選定ピアネットワークの規模を決定する。(3)ピアの選定には筆者らが文献[3]で提案する手法を用いてピア選定が行われる。現在、選定のメトリックとして RTT(Round Trip Time)値、スループット値、ピア処理能力、ネットワーク接続時間、ピア起動時間の 5 つが選定に利用される。(4)はブートストラップピアが選定ピアリストを通知し、同時に選定ピアネットワークの識別 ID を通知する。このとき、各サービス、コンテンツの管理する選定ピアもあわせて通知される。(5)は選定した各ピアにおいて管理するサービス、コンテンツのインデキシングが行われる。

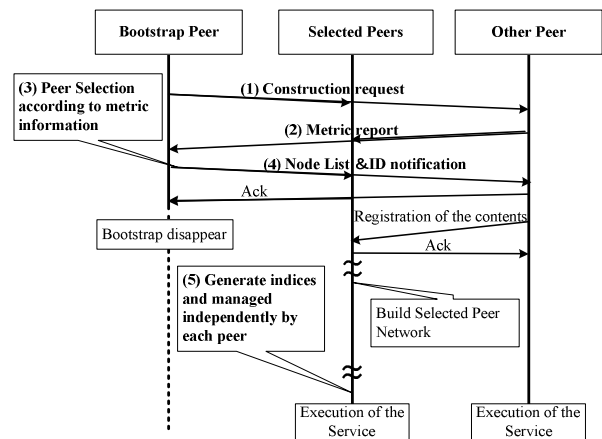


図 1 ピア選定シーケンス

管理するサービス、コンテンツの変動に対しては選定ピア数を変化させることで対応できる。また、選定ピアの突然の離脱に対しても選定ピアネットワークで定期的にプレゼンスを伝播させることで離脱を検出し、選定ピアを再配置、管理サービス、コンテンツの再配置することで対応できる。

#### 2.2. インデックスの生成・管理

各々の選定ピアは管理するサービス、コンテンツに基づいてインデックスの生成を行う。インデキシングにはコンテンツの単語を単位とした統計情報を利用して、頻度と、出現率の積値による重み付けを行う tf-idf 法[9]を用いる。しかし、前述したように選定ピアの管理するサービス、コンテンツはそれぞれ異なるから、導出される統計情報、それに基づくインデックスの値も異なる。そのため、同一のコンテンツでも、選定ピアが異なるとインデックス値に基づく検索結果であるクエリとの類似度も異なることになる。提案手法ではクエリ送信ピアにおいて各選定ピア

アから取得した検索結果のソートが行われるが、各検索結果を単純にクエリに対する類似性では分類できないことになる。結果として、十分な検索サービスを提供できないことになる。いま、分散するピア間でインデキシングに利用する統計情報を共通化する手法として、ピア間で生成した統計情報を協調管理する方式、コーパスから導出した統計情報を選定ピア間に共通の統計情報として伝播させる方式の2方式が検討できる。前者は文献[1]で示したが、定期的な発生する統計情報の同期プロセスにより、分散システムとしてのスケラビリティが制限される方式であった。そのため、本稿では後者の方式を採用し、図1の(4)の選定ピアのリストとともにコーパス[6]から導出した統計情報を通知する。各選定ピアは管理するサービス、コンテンツから導出した統計情報とあわせて更新し、インデックスを生成する。この手法を用いても厳密には各選定ピアの統計情報が異なるが、コーパス[6]から導出される統計情報は実コンテンツから導出される情報よりも充分大きいので、各選定ピアの違いは誤差の範囲に含まれるといえる。結果として、選定ピアは共通する統計情報を用いてインデキシングを行うことになる。また、この方式では選定ピアごと独立して運用され、インデキシングによる分散性の低下といったシステムへの影響は発生しない。

### 2.3. 選定ピアの接続

選定ピアネットワークは各選定ピア間を接続し、選定ピアへクエリの伝播と、各選定ピアから検索結果をクエリ送信者に通知する。選定ピアの接続のモデルはオブジェクトの管理手法によってストラクチャードモデル、アンストラクチャードモデルに分類できる。提案手法では特定のピア、オブジェクトへのルーティングは発生しないことから、各選定ピアでクエリに基づく検索が行われる。従って、選定ピアの接続にはアンストラクチャー型のオーバーレイネットワークモデルである Gnutella [8]モデルを採用する。Gnutella モデルではピアの配置管理が容易であることから、ピアの着離脱や移動といったシステムとしての柔軟性と、実装の容易さを両立したプロトコルといえる。今後、この選定ピアネットワークにおけるデータ配信の効率性といった検索サービスの高度化を求める場合は DHT を用いたストラクチャード型[7]の手法の検討が必要となる。

### 2.4. インデックス検索

各選定ピアにおける検索のシーケンスを図2に示す。

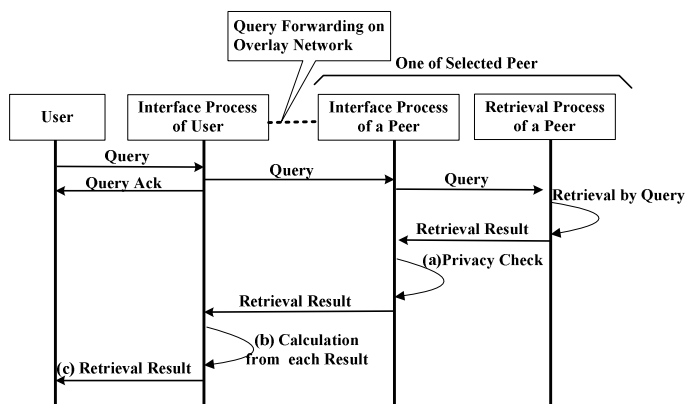


図2 検索シーケンス

ユーザは検索クエリをアプリケーションへ入力する。このプロセスの配置は実装方法にもよるが、選定ピアネットワークへの

インターフェースであり、ユーザに入力されたクエリを選定ピアネットワークへ接続して送信する。現在の実装ではユーザアプリケーションとしてユーザ側で実行されることになる。しかし、携帯電話など処理能力の劣るピアを想定する場合には、各選定ピアが検索のインターフェースを配置することで対応できる。このクエリを受信した各選定ピアのインターフェース(以降、IF とする)プロセスでは接続された他の選定ピアと、ローカルの検索プロセスへクエリを転送する。検索プロセスではクエリに基づいて検索を行い、検索結果をローカルの IF プロセスへ検索結果を通知する。各選定ピアの IF プロセスでは(a)において検索結果として開示される情報のチェックや、類似度に基づいた検索結果の調整を行う。今後の検討として、各選定ピアにおいてユーザやクエリなどの情報に対し動的に開示される情報の制御が可能となる。その後、各選定ピアの IF プロセスはクエリを送信したプロセスへ検索結果を送信する。(b)は非同期に受信する各選定ピアからの検索結果をクエリとの類似度に基づき検索結果をソートし、(c)でユーザに通知・表示することになる。このとき、各選定ピアからの検索結果は非同期に到着することから、ユーザ側の IF プロセスはユーザに通知後も非同期に検索結果のソートを繰り返すことになる。この後、クエリ送信ユーザは通知された検索結果からサービス、コンテンツ情報を取得し、そのリンクから直接取得する。

### 2.5. 実装

本稿の提案手法は図2に示した各選定ピアの検索プロセス、ユーザと選定ピアネットワークインターフェースプロセス、そして選定ピアネットワークの3機構に分割して実装の検討を進める。検索プロセスは検索システムのフレームワークの Java 実装である Apache Lucene [5]を用いて実装されている。また、選定ピアの接続には Gnutella tool kit [9] をベースとして拡張した API を用いて実装している。この2機構を接続する選定ピアのインターフェースプロセスを Java 1.5 で実装している。

選定ピアの接続には Gnutella の基本プロトコルのうち、ピアプレゼンスを示す Ping-Pong プロトコルは変更することなく提案手法においても利用する。検索クエリの配送、そのレスポンスである Query ヘッダと、Query Hit ヘッダには IP 情報に代えて選定ピアネットワークの識別 ID フィールドと、選定ピアにおける検索結果用フィールドとして、リンク、キャッシュ、そしてクエリとの類似度のフィールドを追加する。

## 3. 評価

本章では提案手法を実装したシステム、シミュレーションにより評価を行う。

### 3.1 統計情報の共有化の評価

2.2節で検討したように、クエリの送信側の IF プロセスでは各選定ピアの検索結果を類似性に基づいてソートが行われる。いま、この類似性とは数値化されたクエリベクトルとインデックスベクトルの類似度を示している。このとき、各選定ピアは共通した統計情報を利用してインデキシングとクエリのベクトル化を行うことにより、選定ピアの検索結果をインデックス値や、この値に基づいた類似性として比較することが可能となる。本節ではこのコーパスの統計情報の利用による選定ピアのインデックス値の変化について評価を行う。

実装した選定ピアネットワークのある特定のピア(ピア A と B とする。)に同一のコンテンツを配置し、コーパスの統計情報の

影響によるインデックス値の変化の関係を観測する。また、この同一のコンテンツは 1 種類だけであり、これ以外のサービス、コンテンツはそれぞれ管理するサービス、コンテンツが管理されている。

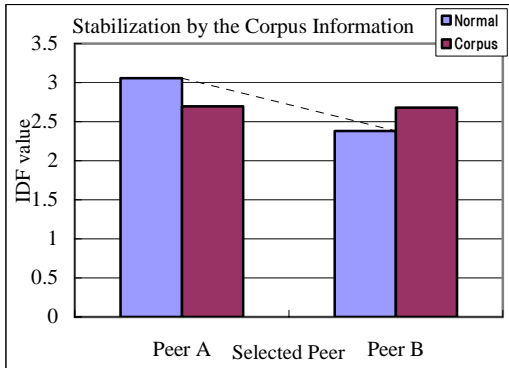


図 3 ピア数と評価に要する時間

### 3.2 評価結果

図 3 はピア A, ピア B に配置した同一のコンテンツに対する IDF (Inverse Document Frequency) 値を示している。Normal は各ピアの管理するサービス、コンテンツの統計情報から導出した IDF 値, Corpus はこの統計情報と、コーパスの統計情報を利用してインデキシングが行われている。いま、インデキシングに用いられる tf-idf 法では、同一のコンテンツに対し本文中の単語ごとの頻度を示す tf (term frequency) は一致し、インデキシングには統計情報を用いて導出される IDF によってインデックス値が決定されることになる。以上のことから本節では IDF 値について議論することになる。いま、Normal では同一コンテンツであってもピア環境が異なることにより、IDF 値として 20% の差が発生するのに対し、コーパスの統計情報を用いた場合では IDF 値で 1-2% 程度の誤差程度の差が発生している。いま、この IDF は全コンテンツ  $N$ 、クエリ  $t$  を含むコンテンツ数  $n(t)$  を用いて以下の(式 a)によって導出される。

$$IDF(t) = \log(N/n(t)) + 1 \quad (\text{式 a})$$

(式 a)は全コンテンツに対するクエリを含むコンテンツの出現率に基づいて導出されることがわかる。コーパスの提供する大きな統計情報の利用により、各選定ピアでは管理するサービス、コンテンツに関係なくほぼ同一の統計情報によりインデキシングされる。従って、インデックス、クエリとの類似性は生成されたピアに関係なくソートすることを可能としている。前述した[1]では定期的に選定ピアで同期を行い、統計情報を更新するのに対し、提案手法では更新されないコーパスの統計情報を利用することで、統計情報の更新による検索の正確性よりも、分散システムとしてのスケーラビリティとある程度の検索サービス品質を両立した提案と位置づけることができる。

### 3.3 スケーラビリティの評価

提案手法のスケーラビリティの評価として、シミュレーションを行う。いま、あるオーバーレイネットワーク上の特定ピアから選定ピアネットワークへクエリを送信し、受信した各選定ピアでは接続する他の選定ピアへ転送と、このクエリで検索を行う。

その後、この検索結果をクエリ送信ピアへレスポンスとして戻す。いま、選定ピアネットワーク上には 7000 ピア程度存在しており、各選定ピアではクエリに対する検索結果はポアソン分布(  $\lambda=1$  )に基づいて発生する。いま、シミュレーション環境は P2P ネットワークシミュレータである NeuroGrid [4]の提供する Gnutella のシミュレーションを改変して提案手法である選定ピアを実装してシミュレーションに用いている。

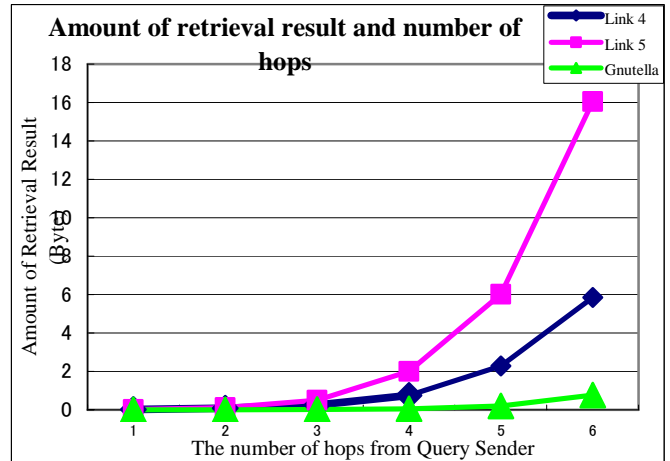


図 4 ホップ数と検索結果データ量

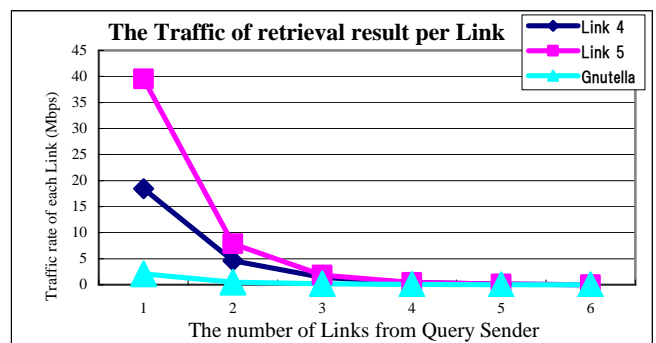


図 5 リンクのデータトラフィック

### 3.3 評価結果

図 4 はクエリ送信者からのホップ数と検索結果データ量の関係、図 5 はクエリ送信者からのリンク数と各リンクにおける検索結果トラフィックの各リンクにおける平均スループットを示している。いま、各図における Link とは選定ピアが他の選定ピアへ接続しているリンク数を示している。また、図中の Gnutella とは同一のクエリによって Gnutella のネットワークで検索を行った場合のデータ量を示している。ホップ数及び、リンク数はクエリ送信者からの距離であり、本稿のシミュレーションでは最大ホップ数 6 と設定している。このとき、クエリ送信者からのホップ数 6 の場合では、Link 5 のとき 6800 ピア、Link 4 のとき 1456 ピアの選定ピアがネットワーク上に配置され、このピアにおいて検索される。

図 4 は検索される選定ピア数の増加に伴い、検索結果のデータ量の増加を観測することができる。それに対し、図 5 はこの検索結果をクエリ送信者へ通知するためのトラフィックとなる。このとき、クエリ送信者から遠い選定ピア(ホップ数の大きいピア)から、近いピア(ホップ数の小さいピア)に向けて検索結果のデータ

が加算されていくことと同値となることから、リンクのデータ量が急激に増加することになる。この後、クエリ送信ピアでは受信した検索結果から類似性に基づくソートが行われる。しかし、受信したデータ量は Link 5 の場合のオーダとしては 20-30M[Byte] の検索結果データのソートと、35M[bps]のネットワークリンクが必要となる。本シミュレーションでは特定のピアのみが検索クエリを送信していたが、実サービス環境においては同時に複数のピアが同時に検索クエリの発生が予想され、トラフィックのデータがますます増加する。

提案手法はシミュレーションの結果では少なくとも数百ピア~数百、環境によっては数千ピア程度の選定ピアネットワークを構築できることになる。従って、提案手法はオーバーレイネットワークの分散検索システムとしてスケーラビリティは十分であるといえる。さらなるスケーラビリティの確保のためにトラフィック軽減の手法として、検索結果のバイナリ化による配信されるデータの削減を検討できる。各選定ピアでは取得した検索結果をバイナリ化(現在の実装では可逆圧縮)して送信することで、各選定ピアの負荷が発生するが、現在の実装では各選定ピア当りのデータ量を 30%-60%程度削減することが可能となることがわかっている。

#### 4. 提案手法の考察

##### 4.1 シミュレーション結果から

提案手法の考察を行い、分散検索システムとしての実現性を考察する。頻繁に更新されるインデキシングのリアルタイム性について検討を行う。提案手法は各選定ピアによって分散管理されていることから、選定ピアのインデックス情報が更新されることで検索可能となる。従って、インデックスのリアルタイム性は優れているといえる。

検索精度としては従来のインデックス集中型の検索システムと同じサービス、コンテンツの意味情報を用いた手法を採用しているため、従来の DHT を採用したシステムと比較して十分な検索精度を持つ。また、提案手法ではコーパスから導出した統計情報を選定ピア間で共有することでインデキシングされるピアに依存することなくシームレスにインデックス値、このインデックス値に基づいたクエリとの類似性による検索結果のソートを可能としていた。今後の検討としてコーパスから導出するのではなく、分散検索システムの初期化時に管理する全コンテンツから統計情報を導出し、その情報を選定ピアが共有することでコーパスの利用を回避できる。このとき、コーパス利用時と比較して偏りが発生する可能性があるが、定期的に統計情報を更新することで実サービス、コンテンツに基づいた統計情報の利用が可能となる。この統計情報の更新は文献[1]と同様に、サービス、コンテンツの変動をトリガーとして発生させるのではなく、サービス、コンテンツと統計情報が大きく異なる場合のみ発生させることでシステムスケーラビリティの低下を回避できる。文献[10]は統計情報の変化は数ヶ月単位で発生することが示されており、この粒度での統計情報の更新では選定ピアの分散性には大きく影響しないといえる。

各選定ピアは分散してインデックス管理を行うと同時に、選定ピア間の接続にはスケーラブルな P2P オーバレイネットワーク手法である Gnutella に基づくマルチホップルーティングを用いていることからオーバーレイネットワークのアプリケーションとしてのスケーラビリティ、ピアのモビリティへの対応は優れているといえる。シミュレーションによる評価で検討したが、従来の P2P

型の検索手法と比較して検索結果のデータ量が多くなる。特に、オーバーレイネットワークなどのヘテロジニアスな環境の上では筆者らが文献[2], [3]で検討した手法の導入により、選定ピアの配置と、検索結果ルーティングの改善による効率化に伴いオーバーレイネットワーク上のアプリケーションとしての実現性が高まることになる。

##### 4.2 適応シーンと今後の課題

評価結果からリアルタイム性、十分な検索精度と品質、オーバーレイネットワークのアプリケーションとして十分なスケーラビリティをもつことから、ユビキタス環境における検索システムとして期待できる。特に、ユーザを主体として構築される様々な粒度のオーバーレイネットワーク空間と検索対象となる空間を一致させた柔軟な検索システム、プロジェクトや部署単位で構築されたそれぞれの空間を検索対象とする統合的な検索システムのような社内の検索システムとして利用が期待できる。

今後の課題として、実コンテンツから導出した統計情報をコーパスの代替として利用するには、初期化時に導出する統計情報と、管理するサービス、コンテンツの変動に起因した実コンテンツの乖離の検出と、この検出をトリガーとした統計情報の更新手法が必要となる。この検討により、選定ピアの分散性と実サービス、コンテンツに基づく検索サービス品質の正確性を実現できることになる。また、選定ピアの配置と、検索クエリ検索結果の選定ピア間ルーティングの高度化の実現により、オーバーレイネットワークのアプリケーションとして検索システムの効率化と、それに伴う分散検索システムとしての実現性を向上させることになる。

#### 5. おわりに

本稿ではユーザが構築する P2P オーバレイネットワーク上の分散したサービス、コンテンツを意味情報による分散検索を可能としていた。提案手法では独立管理される選定ピア間を P2P ネットワークで接続することにより、スケーラブルかつ高精度そしてリアルタイム性のある検索サービスを提供可能としていた。以上のことから、ユビキタス環境における検索サービスとして十分に期待できる提案であるといえる。

##### 謝辞

本研究の一部は JGN2-A19003 として JGN2 のサポートにより行われました。

##### 参考文献

1. 土屋健, 吉永浩和, 小柳恵一, “コンテンツ意味情報を利用した P2P 型分散検索手法の実現”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-B, No. 7, Jul. 2007 (to be appear)
2. 土屋健, 吉永浩和, 小柳恵一, “P2P コンピューティング技術によるオーバーレイストリーミングシステムの構築”, 情報処理学会誌 Vol. 46 No. 6 pp. 1466-1469 June 2005
3. 吉永浩和, 土屋健, 小柳恵一: “Peer-to-Peer 環境における協調作業アプリケーションのための適応型調停プラットフォーム”, 情報処理学会論文誌, Vol. 46 No. 8 pp. 2162-2174, 2005 年 8 月
4. NeuroGrid, “<http://www.neurogrid.net/>”
5. Apache Lucene, “<http://lucene.apache.org/>”
6. NPL, “<ftp://ftp.cs.cornell.edu/pub/smart/>”
7. S. Ratnasamy, “A scalable content-addressable network”, ACM SIGCOMM'01
8. Gnutella, “<http://www.gnutella.com/>”
9. Gnutella Tool Kit, “<http://www.jnutella.org/>”
10. M. Berry, Z. Drmac, and E. Jessup: “Matrices, Vector Spaces, and Information Retrieval”, SIAM Review, 41(2):335-362, 1999