

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19700109
 研究課題名（和文） 分散環境における結合演算に着目した R D F 問合せ処理手法の研究
 研究課題名（英文） Research for RDF Query Processing Focused on Join Operations in Distributed Environments
 研究代表者
 的野 晃整（MATONO AKIYOSHI）
 独立行政法人産業技術総合研究所・情報技術研究部門・研究員
 研究者番号：10443227

研究成果の概要（和文）：分散環境における効率的な RDF 問合せ処理を提案することを目的とし、主に三つの研究を実施した。(1)ボトムアップ式分散環境での問合せ処理の効率化、(2)RDF の特徴に基づいたマテリアライズドビューの構築に関する研究、(3)低結合選択率時に適した結合演算手法に関する研究。いずれも研究もプロトタイプシステムを設計・開発し、実験によって提案手法の性能を評価した。それぞれ従来手法に比べ最大で、(1)では問合せ転送量を 288 倍、(2)ではマテリアライズドビューの構築時間を 3.5 倍、(3)では結合処理時間を 15%ほど効率化出来たことを確認した。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we aimed for proposing an efficient RDF query processing in a distributed environment, and then we've tried to carry out the following three issues. (1) Improvement of the efficiency of the query processing in a bottom-up distributed environment. (2) Constructing materialized views based on the characteristic of RDF. (3) Proposing a join operation for low join-selectivity. In all these themes, we designed and implemented prototype systems, and evaluated the performance of them through various experiments. As the results of comparing them with each ordinary approach, (1) the amount of transferred data could be reduced by 1/128, (2) the constructing time of materialized views could be reduced by 1/3, and (3) the join processing times could be reduced by 85%.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	0	1,100,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	600,000	3,700,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：インターネット高度化、ハイパフォーマンスコンピューティング、分散データベース、メタデータ、問合せ処理

1. 研究開始当初の背景

Resource Description Framework (RDF) という、あらゆる資源に対してメタデータを記述するための枠組みが普及しつつあった。RDF は、主語、述語、及び目的語から構成されるトリプルと、資源を一意的に識別するための URI を基本要素としている。異なるトリプルで同一の URI を参照することで、複数のトリプルを連結した有向グラフ構造を表現でき、複雑な知識としてのメタデータを記述できる。

RDF はその表現力の高さと枠組みの単純さから、様々な分野やプロジェクトにおいて、メタデータを記述するために広く利用され始めていた。

2. 研究の目的

RDF に基づいて記述されたメタデータ (以後 RDF データ) のサイズは、加速度的に膨張しつつあり、効率的な RDF データベース技術の実現が極めて重要であった。RDF データはインターネット上に広く散在すると共に、各地で日々作成、蓄積されるため、先に述べたような、一箇所で作成、管理する集中型 RDF データベースのみならず、分散 RDF データベースが不可欠であった。

RDF データベースにおける課題として、結合演算の効率化がある。結合演算とは複数のトリプルが共通の変数で接続されてことを発見する仕組みで、あらゆる場面で利用される重要な演算である。結合演算は、分散したメタデータの連携と新たな知見の発見には不可欠なもので、この効果的な処理を実現しなければならない。分散環境では、結合対象のトリプル集合が異なる計算機に格納されている場合、一つの計算機に転送して、その上で演算処理を行う必要があり、非常に処理コストが高い。そのため本研究課題では、分散 RDF データベースにおいて、結合演算に主眼を置いた問合せ処理の効率化を目的として研究を進めた。

3. 研究の方法

本研究課題では主に三つに問題を分割して、それぞれの課題について研究を実施した。

(1) ボトムアップ式の分散環境における RDF 問合せ処理の効率化を目指し、ブルームフィルタを拡張して転送量を減少する手法を研究した。提案手法では RDF トリプルに対応した 3 次元のブルームフィルタを用い、問合せ処理時にブルームフィルタ間でビット演算を行うことで、リモート RDF データへアクセスする前に、そのデータが解に含まれているかどうかを判断することができるため、データ転送量を削減でき、処理時間の減少に繋がる。我々は、RDF 問合せ言語 SPARQL を処理

するプロトタイプシステムを作成し、分散環境における RDF データ問合せ処理の効率化が向上することを実験によって確認した。

(2) RDF の特徴に基づいた RDF データのマテリアライズドビューの構築について研究した。RDF データは一般的にトリプル単位に分割して格納されるため、自然結合が頻繁に発生し、結合演算の効率化が必須の課題となっている。解決策の一つとして、構築しておいたマテリアライズドビューを問合せ処理時に利用する手法がある。そのため利用率の高いマテリアライズドビューの選択が求められている。一方、RDF はテキストファイルで配布される場合が一般的で、それらは可読性のために、関連のある情報はまとめて記述されている。すなわち、一部の結合処理が行なわれており、かつすでに人に親和性の高い構造で提示されている。これを利用すれば、利用率の高いマテリアライズドビューを効率的に構築できると考えた。実験によって、従来手法に比べ、提案手法がマテリアライズドビューを効率的に構築できることを確認した。

(3) RDF データでの結合演算の特徴として、結合選択率が低い場合が比較的多く見られる点がある。そのため低結合選択率時に効率的に結合できる仕組みが必要であった。本研究では B 木を拡張し、拡張した B 木間でマージ結合を行う手法を提案した。B 木の拡張は、各ノードが担当するキーの範囲を厳密に保持できるよう拡張し、マージ結合では非葉ノードで範囲同士のオーバーラップを判定することでより多くの読み飛ばしを実現する。提案手法により、結合不能タプルの効率的な読み飛ばしが可能になり、結合選択率が低い場合に効率化を実現できる。特徴としては、I/O コストを大幅に減少するが、ランダムアクセスが頻出してしまうため、SSD や大規模なインメモリデータベースなどの環境での応用が期待できる。実験では SSD と HDD の環境での、従来のソートマージ結合との性能比較を行ない、評価した。

4. 研究成果

(1) ボトムアップ式分散環境における RDF 問合せ処理の効率化を目指し、RDF モデルに適用するためにブルームフィルタを 3 次元に拡張し、問合せ処理を実行する際に、等結合、和集合および射影に対応する、ブルームフィルタでのビット演算を行うことで、リモートにあるデータベースサーバへアクセスすることなく、解の有無を知ることができる。これによって不要なアクセスを削除することができる。

分散環境での問合せ処理ではあるデータ

ベースサーバで演算した結果を他のサーバに転送し、そこで演算を行うことが一般的である。そのため拡張したブルームフィルタとそれらの演算によって、解判定を行うことで、解候補の絞り込みができ、転送量を大幅に減少できる。データ規模がある数 GByte を越える程度になると、受信したデータを主記憶上に保存できないため、ディスクに書き込むことになる。ディスク I/O のコストが高いため、転送量の増減が処理時間に影響を与える。

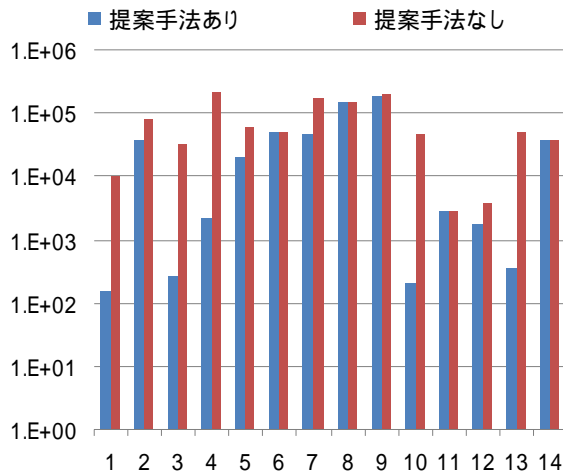


図 1 各問合せの転送量の比較

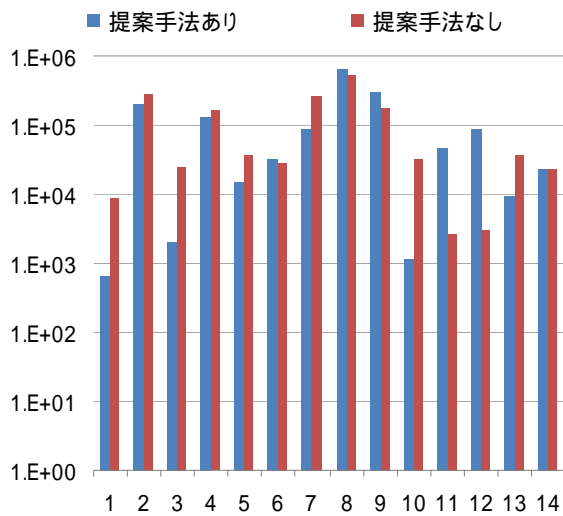


図 2 各問合せの処理時間の比較

図 1 と図 2 は、14 個の問合せを処理する際、提案手法を使った場合と使わなかった場合の転送量と処理時間を示したグラフである。横軸が問合せの種類で、縦軸がそれぞれ転送量 (kByte) と処理時間 (ms) で、いずれも対数目盛りである。このグラフから、11 問合せが転送量を減少でき、8 問合せが処理時間を減少できたことが判断できる。また最も効

率化できた問合せでは、転送量をおよそ 228 倍減少でき、処理時間を 28 倍高速化できることを確認した。

(2) 従来の RDF データベースでは、トリプル単位に細切れにしてデータを格納していた。問合せ処理時にそれらの細切れのトリプルを再構築して構造する結合が頻出することになる。

一方、RDF はそもそもテキストファイルの形式で配布されることが一般的であり、そのファイルはすでに人に理解しやすい構成に構造化されている。すなわち RDF データは、最初からある程度構造化されているにもかかわらず、データベースに格納する際に、細切れに裁断して格納され、問合せ処理時にはそれらを結合して再構築するという二度手間な処理をしている。

問合せ処理時の結合演算を効率化するために、事前にマテリアライズドビューなどの中間結果を計算しておき、それを利用することで処理時間を効率化しようという手法は従来から行われているが、それらも一旦細切れに裁断されたトリプルに対して実施するため、二度手間であることは同じである。

本研究では、この点に着目し、RDF データの格納と同時にマテリアライズドビューの推薦と構築を同時に行なうことで、二度手間を省く手法を提案した。

RDF 文書の構造を利用する利点として、すでに結合が完了している点と、その構造単位は人にとって理解しやすい単位である点である。前者の利点により、すべての結合演算を行なうのではなく、残された結合のみの演算でマテリアライズドビューが生成できるようになる。後者の利点によって、生成されたマテリアライズドビューが問合せで求められる単位に類似している可能性が高いため、問合せ時のマテリアライズドビューの高い使用率を期待でき、結果的に問合せ処理性能の向上を見込むことができる。

実験によって RDF 文書からマテリアライズドビューを構築する場合と、トリプルからマテリアライズドビューを構築する場合との比較評価を行なった。その結果を図 3 に示す。横軸は入力したファイルの数、縦軸は合計処理時間である。このグラフから提案手法の効率が高いことを確認した。提案手法では RDF ファイルからマテリアライズドビューを構築する方が最大で 3.5 倍ほど高速化できることを確認した。

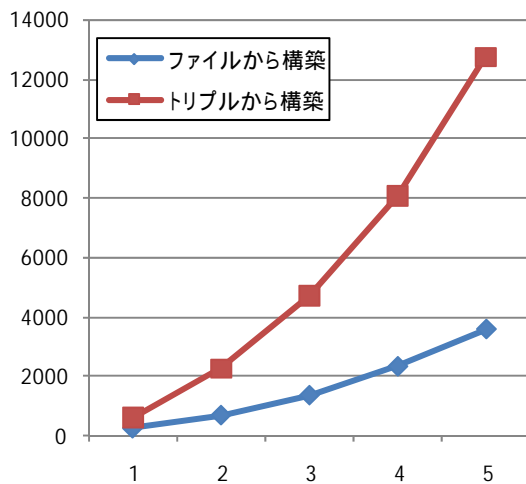


図 3 マテリアライズドビュー構築時

(3) RDF データに対する問合せは SPARQL という RDF のための問合せ言語を用いることが標準化されている。この SPARQL では、トリプルの 2 要素のうち、いくつかを変数として記述することで、そのトリプルに一致するすべてのトリプルの集合を表現できる。すなわち、複数トリプルで共通の変数を用いることで結合を表現できる。このトリプルで二つの要素が変数であるような問合せが与えられた場合、それに一致するトリプルの集合は大規模化する。さらに RDF では URI によって資源を識別するため、大規模な集合間での問合せであっても結合できるトリプルの組み合わせが少なく、結果の解集合が小さいような問合せを処理する必要がある。そのような結合選択率の低い場合に効率的な結合を実施できる仕組みが必要であると考え、本研究を実施した。なお本研究は、RDF だけでなく広い応用に対しても適用可能な技術である。

一方、従来のデータベース処理では、シーケンシャルアクセスの利用を最優先としたポリシーで設計されていた。しかしながら、近年 SSD の登場や大規模メモリを搭載した計算機のコモディティ化など、ランダムアクセスが高速なハードウェア環境が整理されてきたことなど、ハードウェア性能のバランスの変化が起きている。そのため、ランダムアクセスを多用したり、CPU コストに高負荷をかけてでも、ボトルネックである I/O コストを減少させることを最優先としたポリシーに注目が集まっている。

本研究では、ランダムアクセスは頻出するが、I/O コストを減少させることで、結合選択率の低い場合に、効率化できる仕組みを提案した。提案手法では、B 木のノードにその子孫を含むキーの範囲を保持できるように拡張し、その範囲同士でオーバーラップの判定をしながら、マージ結合をする手法である。これにより、結合不能タプルの読み飛ばしが、

非葉ノード上で可能になり、子孫ノードの読み飛ばしが可能になった。

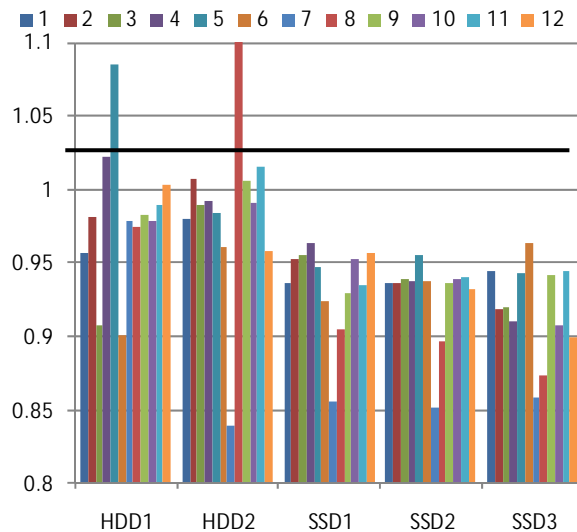


図 4 従来手法に対する提案手法の処理時間の比率

図 4 は、従来手法である Zig-zag 結合に対して、提案手法を用いた場合の処理時間の比率である。横軸は、HDD と SSD の製品とそれぞれで 12 問合せである。縦軸は処理時間の比率で 1 より小さい場合は提案手法が優れていることを示している。この図から提案手法のほとんどの場合で効率的で、特に SSD を用いた場合はすべての問合せで効率的であったことがわかる。本実験では最大で 15% 程度効率化を実現できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

的野 晃整, 小島 功, 分散 RDF 問合せ処理時の転送量減少のためのブルームフィルタの拡張, データベース (TOD) [電子情報通信学会データ工学研究専門委員会共同編集], 査読有り 2 巻 1 号 2009, 33-45

〔学会発表〕(計 4 件)

的野 晃整, 谷村勇輔, スティーブンリンデン, 小島功, Btree Merge Join: 低結合選択率に適した読み飛ばし可能な結合アルゴリズム, 第 2 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム・第 8 回日本データベース学会年次大会, 2010 年 3 月 1 日, 淡路夢舞台国際会議場 (兵庫県淡路市)

的野 晃整, 小島 功, RDF データベースのためのファイル構造に基づくマテリアライズドビューの構築, Web とデータ

ベースに関するフォーラム (WebDB Forum) 2008, 2008年12月01日, 東京都豊島区目白

的野晃整, 分散 RDF データベースに関する研究, jDB ワークショップ, 2008年6月20日, 北海道小樽市

的野晃整, サイドミルザ パレピ, 小島功, ブルームフィルタを用いた分散 RDF 問合せ処理のための索引手法, 第19回データ工学ワークショップ・第6回日本データベース学会年次大会, 2008年3月10日, 宮崎県宮崎国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

的野 晃整 (MATONO AKIYOSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・情報技術研究部門・研究員

研究者番号: 10443227