

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24680010

研究課題名(和文) Linked Data検索のための結合効率化に基づくメタデータクラウドの研究開発

研究課題名(英文) Developmental Studies on Metadata Cloud based on Efficient Join for Linked Data Search

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・主任研究員

研究者番号：10443227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,600,000円

研究成果の概要(和文)：Linked Data には価値ある情報が埋没していると期待されているが、大規模な結合演算が頻出してしまうため、全体を効率的に検索できる技術は存在していない。この問題の解決のために、RDF文書の構造に着目した結合演算を省略できるデータ格納技術と入力に対する出力の比率が非常に低い結合が頻出する点に着目して、不要なデータを読み飛ばす技術の研究開発を行なった。提案技術の性能を評価するためにプロトタイプシステムの設計・実装し、大規模データを用いた代替技術との比較実験を行ない、提案技術の有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：Linked Data is expected as resources where value information is buried. However, it's too hard to search answers from the entire Linked Data efficiently because large and high cost join operations are frequently occurred for such a query. To address such a problem, we proposed novel techniques. In particular, storing approach that can skip join operations based on structure of RDF documents, and join algorithm that can avoid unnecessary data reading for the low-selectivity join. We evaluated the performance of our approaches through a series of experiments using large data set.

研究分野：データ工学

キーワード：Linked Data データベース 結合 並列処理・分散処理 メタデータ クラウド RDF 構造化文書

1 . 研究開始当初の背景

研究開始当初 ,Linked Data (Linked Open Data:LOD) は ,Web of Documents(現在の Web)を支える Web of Data(次世代 Web)を実現するための基礎として大きな注目を集めていた . 図 1 は ,LOD の組織間リンクを示した図で ,データを提供する各組織を円で表現し ,リンクが存在する組織間は矢印で接続されている . 2011 年当時は組織数が約 300 で ,各組織が平均 1 億要素にまで増加している .

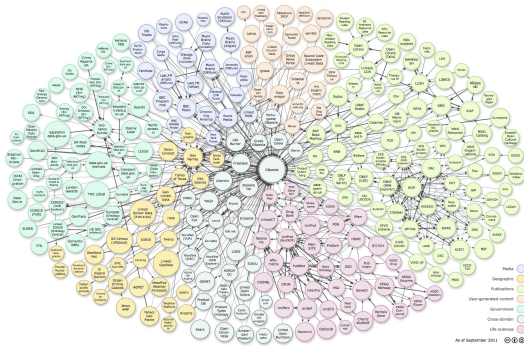


図 1: Linked Open Data の組織間リンク

LOD に対して検索することで ,分野や組織をまたがる連鎖した知識の発見が期待できる . 例えば ,福島原発の燃料に関する論文の著者の出身と ,その燃料の産地 ,あるいは被曝被害の多い地域とが同じかどうかなどの検索は ,Wikipedia , 出版 , 地質 , 医学 , ニュースなどの多分野の情報を連鎖して ,はじめて得られる知識である . しかしながら ,LOD 全体に対する横断的・連鎖的な検索ができる環境は現在存在せず ,データの有効利用が不十分である . 検索環境が存在しない理由は ,LOD が大規模かつ複雑なグラフ構造であるため ,大規模な結合演算が頻出してしまい ,現実的な時間で連鎖検索が処理できないことが要因である . グラフに対する検索とは部分グラフの発見に等しく ,そのためにはリンクを繋げる演算(結合演算:2 集合を入力とし ,同じ識別子を持つ要素のペアを出力する処理)が必要で ,部分グラフの検索ではその構造に応じて結合回数が増加する . LOD ではグローバルな識別子が使われるため ,一見無関係と思える 2 集合間でもリンクの有無を評価するために結合演算を試みなければならない . これは 1 億要素同士の結合演算を 9 万(組織数の二乗)回要求する検索があり得ることを意味する . これらから検索環境の提供が容易でないことが分かる .

LOD は Resource Description Framework (RDF) と呼ばれるメタデータ記述の枠組みに基づいている . すなわち ,本提案のメタデータクラウドとは ,資源増減が可能な並列 RDF データベース(DB)をバックエンドに持つ検索サービスである . RDF DB はこれまでいくつか提案されており ,一般に Triple Store(TS)[1] , Vertical Partitioning(VP)[2] , Property Table(PT)[3]

の 3 つに分類される . TS は ,RDF データをすべて細かく分割(リンクを切断)して一つの関係表に格納する最も単純な方式で ,多くの RDF DB で採用されている . 一般に結合を繰り返す連鎖検索の場合 ,小さい集合順に結合を実行することで全体として効率化できるが ,TS では一つの関係表に格納しているため ,入力となる集合の大きさを見積ることができない . また関係表が巨大すぎるため ,単純な検索処理も高コストである . VP はこれらの問題を解決する格納法ではあるが ,すべてのリンクを切断して格納する点は TS と同じであるため ,連鎖検索時にそれらを再構築(結合)しなければならず ,結合演算の回数は減少していない . PT は結合演算の回数を減少するために ,最初から一部結合して格納する方式で ,どこを結合するかが性能に直接影響するため ,幾つかの手法が提案されており ,その一つに提案者らが先行研究にて提案した手法[4]がある . 先行研究[4]の特徴として ,一部結合した結果 ,解の部分グラフより大きい(結合過多)グラフや小さい(結合不足)グラフ(これらを中間データと呼ぶ)が混在する環境で ,それらを取りこぼしや重複なく利用できる点がある . この特徴を利用すれば ,結合回数の増加に対してスケラビリティを確保できる . 本提案では ,先行研究[4]を拡張し ,並列分散環境や計算資源増減へ適用し ,キャッシュ利用などを導入することで ,結合回数と計算資源の増加に対処可能なスケラブルな RDF データ格納法と検索法を提案する .

また ,データ規模の増加に対応するために ,結合演算自体の効率化が不可欠である . LOD では ,入力サイズは数億あっても ,出力は 0 あるいはごくわずかであるような ,結合選択率(入力に対する出力の比率)が非常に低い結合が頻出するため ,出力に含まれない無駄なデータを無視できる結合アルゴリズムが適している . 提案者らは先行研究[5]にて ,ダイジェストデータ(実データから生成したサイズの小さい代理データ)を用いた代理演算(実データを使わない解を予測する演算)に基づく ,低結合選択率に適した結合アルゴリズムを提案した . この特徴は LOD に最適であるため ,これを拡張し ,並列分散環境や計算資源増減へ適用するために ,並列処理フレームワーク MapReduce[6]上での並列ハッシュ結合において転送量を減少する ,データ規模が膨大であっても ,効率処理できる結合アルゴリズムを提案する .

2 . 研究の目的

本提案では ,LOD 規模の RDF データに対し ,効率的に連鎖検索ができるメタデータクラウドを開発することを目指し ,その過程で ,A)中間データを再利用可能な並列環境のための格納・検索法と ,B)ダイジェストデータによる代理演算に基づく並列結合アルゴリズムを研究開発する . A)は先行研究[4]を基

礎とした手法で、中間データを矛盾なく再利用できる並列環境を構築し、スケーラブルな格納・検索方式を提供する。また B) は先行研究[5]に基づく手法で、低結合選択率の結合を効率化するために、ダイジェストデータによる代理演算を行うことで、不要なデータ転送を減少する MapReduce のための並列結合アルゴリズムである。これらの各要素技術および、それらを統合するメタデータクラウド全体に対して、スケーラビリティ(データ規模、結合回数、計算資源)や高速性(スループット、TAT、応答時間)などの性能評価を行う。応用として LOD を用いた検証実験を行い、さらに LOD 検索サービスとして Web 上に公開する。また所属組織の知的資産を LOD 化し、メタデータクラウド上での公開を目指す。これらの評価実験を通して提案研究の有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

メタデータクラウドのための要素技術である以下の 2 つの研究を設計・提案し、各技術のための初期的なプロトタイプシステムを開発し、実験と改良を重ねる。

A) 中間データを再利用できるメタデータの格納法および検索法：メタデータクラウドのアーキテクチャの要となるデータ配置や構造を設計する。分散カラム指向データベースの利用を前提にしており、その上で生成される中間データを利用する際、取りこぼしや重複がないことを保証できる格納法と検索法を設計する。先行研究[4]で未検討であったキャッシュや分散並列環境、動的資源増減などを考慮する。

B) 低結合選択率で効率的な結合ができる並列結合アルゴリズム：単独で結合演算を実施するのみでなく、連鎖検索の一つの演算として利用できれば、検索全体の効率化に繋がるため、A)にて設計した検索法の過程で利用できる必要がある。そのため、A)の格納構造を十分に考慮してした上で、先行研究[5]のアイデアを MapReduce 上での並列結合演算に適用し、Map 時に発生するデータ再配置の転送コストを減少する並列結合アルゴリズムを提案する。

これらはメタデータクラウド全体のアーキテクチャ設計を前提に、プロトタイプシステムを設計・開発・実装する。提案手法を実装したプロトタイプシステムを通じ、大規模データを用いて最先端手法あるいは標準的な手法との公平な性能評価を行い、提案手法の特性を明らかにし、有用性を実証する。それらの結果を論文等にまとめ、国際会議等にて発表する。

4. 研究成果

本研究で目標としていた、LOD 規模の RDF データに対し、効率的に連鎖検索ができるメタデータクラウドについて、それを支える要素技術として、A)中間データを再利用

可能な並列環境のための格納・検索法と、B)ダイジェストデータによる代理演算に基づく並列結合アルゴリズムを研究開発した。

A)について、RDF の文書の構造に着目した格納手法と検索手法を提案した。これまで述べてきたように RDF 検索処理において最も重要かつ最も高コストな演算の一つとして結合演算があるが、検索時に頻出する、この結合を省略することが可能な格納方法である。本来 RDF データは RDF/XML や turtle などの構造化言語を用いて記述され、RDF 文書として記述・交換される。この RDF データは RDF 文書として表現されるとき、多くの場合、その順序に意味がある場合が多い。つまり特定の資源についてのメタデータは連続して記述されることが一般的である。これは、文書を人が読む可能性があることを考慮したためと考えられる。本研究の手法はこの文書の構造に着目した手法である。文書内の近接するメタデータは高い確率で結合することができることを利用した手法である。提案手法を模式的に表した図を図 2 に示す。

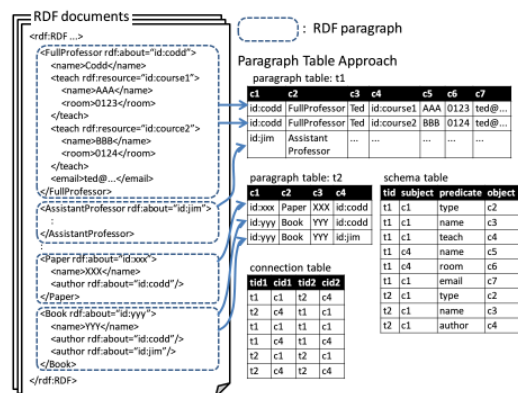


図 2: RDF 文書構造に着目した格納方法

提案した手法の性能を評価するために、プロトタイプシステムを設計・実装し、大規模データを用いて提案手法の有用性を確認した。実験を通じて、提案手法は比較対象の手法に比べ、すべての実験で最も良いか 2 番目に良いという結果を得た。従って多くの問合せにおいて高い有用性があることを示した。提案手法は論文にまとめ、国際会議にて発表した。

B)について、低結合選択率のための MapReduce 上での並列結合手法を開発した。本来の研究計画ではダイジェストデータを用いて低選択結合率のための結合の効率化を図る予定であった。しかしながらプロトタイプシステムを通じた事前評価の結果、期待していたほどの性能が得られなかった。そのためダイジェストデータを用いた手法は諦め、代替手法を提案した。なお、同条件下での同目的に対する異なるアプローチであるため、若干の計画修正は必要だったものの、研究目的等の修正はしていない。

MapReduce 上での低選択率の結合処理では Per-Split Semi-Join (PSSJ) [7]という手

法が提案されていた。しかしこの手法にはいくつかの問題がある。1)フィルタを作成するために結合キーのみのファイルを作成するが、もし結合キーのサイズが大きい場合に転送量が増加してしまうこと、2)ジョブ数が3回必要であること、3)一方の入力データを2回スキャンする必要があること、4)および入力データ数が2のみに対応しており、より選択率が低下し、性能向上が期待できる3以上の入力に対応していないことの4点である。提案手法はこれらの4点の問題点をそれぞれ解決する手法を提案した。

1)のために Hash を用いて固定長のキーに変換してフィルタデータを作成する方法を導入した。2)のためには第3ジョブで実施する最終的な結合処理を第2ジョブの Reducer で実施するよう変更した。3)のためには1度目のスキャンにおいて行番号に基づく索引を同時に作成しておき、2度目の読み込み時にその索引を使用することで、必要な行のみを読み込む方法を導入した。これらの3つの手法を PSSJ に適用した、Ext-PSSJ を提案した。また、4)のために、3以上の入力を処理可能な手法である Reduce-Side Join の拡張手法として提案されている Improvement Repartition Join(IRJ)[6]という手法に前述の1~3の拡張を導入した、Ext-IRJ を提案した。Ext-PSSJ と Ext-IRJ を図3に示す。

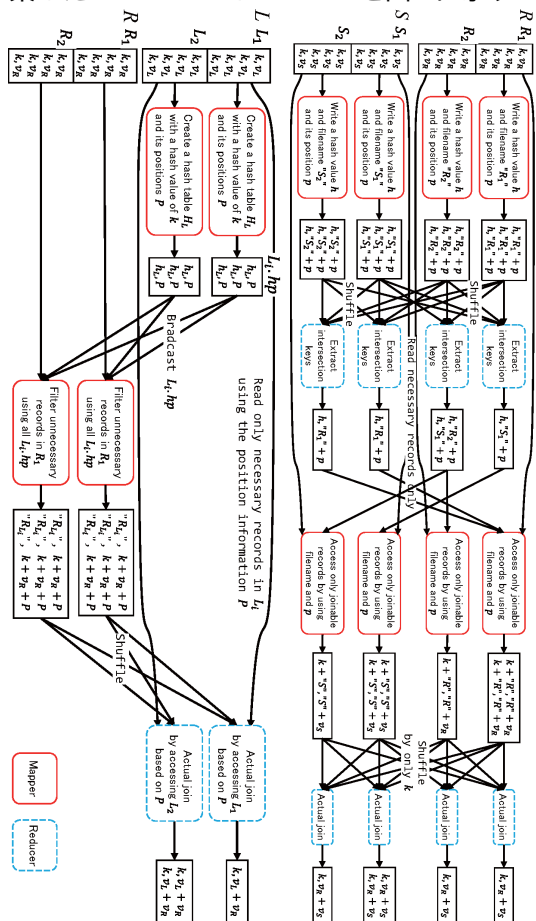


図 3: Ext-PSSJ (左) と Ext-IRJ (右)

提案した手法の性能を評価するために、プロトタイプシステムを設計・実装し、大規模

データを用いて提案手法の有用性を確認した。実験では、PSSJ と Ext-PSSJ, IRJ と Ext-IRJ を比較し、性能を評価した。実験の結果、Ext-PSSJ は実験を通じてあらゆる場合に PSSJ より優れていることを確認した。また、Ext-IRJ は入力数が2の時は利点がほぼ見られなかったが、入力数が3以上になると優れた性能を示すことを確認した。これらの提案手法は論文にまとめ、国際会議にて発表した。

<引用文献>

- [1] J. J. Carroll et al. Jena: Implementing the semantic web recommendations. Technical Report HPL-2003-146.
- [2] D. J. Abadi et al. Scalable semantic web data management using vertical partitioning. In VLDB, pp. 411–422, 2007.
- [3] K. Wilkinson. Jena property table implementation. Technical Report HPL-2006-140.
- [4] 的野晃整ら, 「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」, WebDB Forum 2008.
- [5] 的野晃整ら, 「BF マージ結合:Bloom フィルタを保持する B+ 木を用いた低結合選択率に適した結合手法」情報処理学会論文誌: データベース(TOD), Vol.4 No. 2, pp.114-125, 2011.
- [6] J. Dean et al. Mapreduce: simplified data processing on large clusters. Commun. ACM, 51(1):107–113, 2008.
- [7] S. Blanas et al. A comparison of join algorithms for log processing in mapreduce. In: Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. pp. 975, 2010.

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 0 件)

(学会発表)(計 6 件)

Akiyoshi MATONO, Hirotaka OGAWA and Isao KOJIMA, Improvement of Join Algorithms for Low-Selectivity Joins on MapReduce, The 26th edition of the Australasian Database Conference(ADC2015), Melbourne, Australia, June 2015.

Isao KOJIMA, Ryosuke NAKAMURA, Hirotaka OGAWA, Yoshio TANAKA and Akiyoshi MATONO, The Current and the Future of AIST GEO Grid Technologies- A Case Study of

Fukushima Radiation Monitoring Application, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2014 年大会, 横浜, 2014 年 4 月
Isao KOJIMA, Yoshio TANAKA, Akihito NAKAMURA and Akiyoshi MATONO, Implementation of the Fukushima Radiation LOD Framework, Linking Geospatial Data Workshop, London, UK, March 2014.

Isao KOJIMA, Yoshio TANAKA, Akiyoshi MATONO and Akihito NAKAMURA, OGC-based Database / Sensor Federation Framework for Fukushima Padiation Monitering Data, Geospatial Wold Forum 2014, Geneva, Switherland, May 2014.

Steven Lynden, Isao Kojima, Akiyoshi Matono, and Akihito Nakamura, Best-effort Linked Data Query Processing with time constraints using ADERIS-Hybrid, 12th International Semantic Web Conference (ISWC), Sydney, Australia, Oct. 2013

Akiyoshi MATONO and Isao KOJIMA, Paragraph Tables: A Storage Scheme Based on RDF Document Structure, 23rd International Conference on Database and Expert Systems Applications (DEXA 2012), Vienna, Austria, Sep. 2012

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

的野 晃整 (MATONO, Akiyoshi)

産業技術総合研究所・人工知能研究センター・主任研究員

研究者番号：10443227

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし