

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19700094

研究課題名（和文）

高性能な軽量 XML データ問合せ処理に関する研究

研究課題名（英文）

A study on high performance and light weight XML query processing

研究代表者

宮崎 純 (MIYAZAKI JUN)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：40293394

研究成果の概要：

XML は IT 技術の中核をなし、その処理はサーバ型計算機上だけでなく、今後は小型計算機上でも効率的な処理が必須となる。このような背景のもと、XML の問合せ言語である XQuery の処理に適した XML データの二次記憶への写像・配置方式、アクセスパターンに適したデータ読出し、ならびに軽量な XML データの分散問合せ処理に関して、特に最も柔軟性の高い XML 問合せ言語 XQuery に焦点を当て、その処理方式に関する研究を行った。さらに、軽量な問合せ処理を可能とするためのデータベースバッファ管理に関する研究を行った。

その結果、XML データの二次記憶への写像・配置方式として、DTM データ構造に基づく方式が優れていることを示した。軽量な XML 分散問合せ処理に関しては、XQuery の処理に lazy evaluation を採用し軽量な処理を実現した。また、データベースバッファ管理に関しては、ロックフリーデータ構造の導入により、アクセスの衝突による待機を無くし、極めて高いスループットで問合せ処理が可能なることを示した。上記技術より、高性能な軽量 XML データ問合せ処理の要素技術を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：データ工学

科研費の分科・細目：メディア情報学・データベース

キーワード：データベース、XML、XQuery、問合せ処理

1. 研究開始当初の背景

近年、XML データベースに代表される木構造スキーマを持つデータベースの研究開

発が活発となっている。このようなデータベースは既存の関係データベースと比較して、スキーマの設計において柔軟性に富むだけでなく、格納される XML データそのものが、

標準フォーマットとして電子商取引などのデータの交換に利用される等、XML は様々な分野へ急速に普及しつつある。XML は、組織間のデータ交換形式としてデファクトスタンダードとなる一方で、計算機上でのデータ永続化フォーマットとしても利用が広がっている。

例えば、DNA やタンパク質等のバイオ情報データベースは、各研究機関独自の形式からデータ交換が容易なXML に移行しつつある。また、Web サービスやビデオデータの索引等、多くの分野で標準記述形式としてXML が利用されており、今後ますますXML データの流通量が増加すると予想される。

こうしたXML の浸透に伴い、大規模XML データに対して柔軟な問合せができるだけでなく、問合せを処理する計算機の規模に関係なく、例えばネットワーク上を流れるXML データに対する問合せも可能とするために、組込システム等の資源に制約のある環境でも軽快に問合せ処理が可能であることが望まれる。また、XML データを永続化するにあたり、XML の木構造を可能な限り保持して二次記憶に格納し、効率の良いデータアクセスが可能なネイティブXML ストアも強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、XML の問合せ言語としてXQuery を前提とし、特にメモリ搭載量が少ない計算機でもXML 処理が可能とすることを目的に、以下の項目について研究を行った。

- (1) 資源に制約のある計算機環境、特にメモリ量に制約がある環境であっても、大規模XML データに対するXQuery 問合せが可能な問合せ処理方式の研究開発
- (2) XML データを可能な限り構造を残して二次記憶へ格納でき、かつ記憶階層間で効率の良いアクセスが可能なネイティブXML データの格納方式の研究開発

上記二つの項目は車の両輪の関係にあり、高性能な問合せ処理には、それに見合った二次記憶へのデータ格納方式が必須である。これらにより、従来実現が困難であった、組込システムやメモリ資源の乏しい計算機においても、軽快に動作するXQuery 問合せ処理を実現し、多くの分野に浸透しつつあるXML データを軽快に処理可能とすることが目標である。

3. 研究の方法

本研究の目的は、高性能な省メモリXQuery 問合せ処理を実現するための基礎技術であ

る、XML データの二次記憶への格納手法、ならびに二次記憶に格納されたXML データから省メモリでXQuery 問合せを行う手法を確立することである。これらを実現するために、以下の三つの副課題に分けて本研究を行う。

- (1) DTM の拡張によるXML データのブロック化および二次記憶への写像・格納方式
- (2) XQuery 問合せのアクセスパターンを考慮した問合せ処理方式
- (3) 小型計算機や組込システムに対応した分散XQuery 問合せ処理の検討

(1)のXML データの二次記憶への写像に関して、ブロックI/O と親和性の高いDocument Table Model (DTM)と呼ばれるデータ構造を利用し、二次記憶コストとアクセスコストが両立する二次記憶格納方式を明らかにする。

(2)の問合せのアクセスパターンを利用した問合せ処理方式に関して、XML の問合せ処理の多くは文書順の逐次アクセスであるが、XQuery では結合演算もあり、反復して同じデータが参照される場合もある。そこで、XQuery 問合せのアクセス特性に適した問合せ処理方法を明らかにする。

(3)に関して、小型計算機や組込システムでは搭載メモリが少なく、省メモリ化のために、さらなる工夫が必要となる。これは(2)と密接に関連しており、(2)の研究成果を改良しながら研究を進める。

4. 研究成果

XML データの二次記憶への写像・格納方式として、XML データの表現の一つであるDocument Table Model (DTM)を利用する方式、ならびにそのデータ格納方式と連携して動作するXQuery 問合せ処理系を提案した。DTM は、実行性能の効率化と記憶領域の最小化を目的としたメモリ上でのXML データの内部表現形式であり、既存のXQuery/XSLT 処理系に採用されている。しかしながら、その二次記憶への写像については明らかにされていなかった。DTM の基本構造は、XML 木の各ノードをleftmost-child right-sibling形式で表現したものであり、固有の整数値ラベルを用いて、XML データ維持のための情報を配列要素内に格納する。例として、図1上にXML 木とその固有のラベルを示す。これをDTM に変換すると、図1下に示す配列に変換される。なお、図1下の配列の第一列はXML 木のノードタイプ、第二列は親ノードのインデクス、第三列は弟ノードのインデクス、第四列は具体的な文字列や要素名等をアクセスする際の識別子である。配列に変換することでブロックアクセスを基本とする二次記憶と整合する。それには、単に長大な配列を分割し、二次記憶のページに写像するだけである。そ

のため、既存の要求ページ駆動のメモリ管理により、メモリの効率化が可能である。さらに提案手法は、DTMは木構造情報のみを持ち、データ自体は他の空間に格納するため、XML問合せ処理で典型的なパス検索が、データと分離されて効率良く処理できる点で優れている。

DTMは計算機の原始データ型でXMLの木構造を表現でき、従来のDOMモデルのような抽象データ型を用いる必要がなく、オブジェクト生成オーバーヘッドならびにメモリ空間上に散逸するオブジェクトのI/Oオーバーヘッドを軽減することができる。つまり、問合せ処理の軽量化、省メモリ化が可能となる。

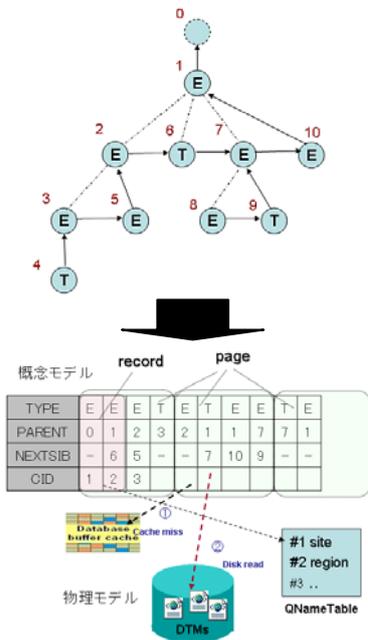


図1: XML木のDTMへの変換

DTM自体、主記憶と二次記憶との透過性が高いが、軽量のXML問合せ実現のためには、適切な問合せ処理アルゴリズムの設計とデータアクセスパターンの解析が必要である。ディスクに代表される二次記憶装置は、ランダムアクセスよりも逐次アクセスの方が遙かに効率が良いこと、DTMの構造そのものがXMLの文書順に基づくことから、問合せの大部分を逐次アクセスで処理可能なアルゴリズム設計した。これにより、ディスクアクセスの先読みが可能となり、メモリ容量が許す限り、I/Oと計算をオーバーラップさせることができる。すなわち、小型計算機でも効率的なXML問合せが可能となる。

以上のXMLデータの二次記憶への写像・配置方式、ならびにその効率的なアクセス方法を実現する省メモリXQuery問合せ処理エンジンを実装し、XMLデータベースの標準ベンチマークツールであるXMarkを利用して評価

を行った。その結果、既存の処理系であるSaxonと比較して、最大で4倍の高速化を実現した。さらに要求駆動ページングにより必要なデータを必要時にアクセス可能なため、消費メモリは1/4以下で実行可能なことを確認した。

次に、小型計算機や組込みシステム等のメモリが少ない計算機が協調して、高速にXQuery問合せ処理が可能なシステムの構成法の提案を行った。基本的に前述のXML問合せ処理系を分散問合せ可能なよう拡張する試みである。この拡張は、分散XQuery問合せ中の各オペレータにlazy evaluation、ブロッキングキュー、remote proxy等の導入により、効率の良いストリーム処理を可能とするだけでなく、DTMに基づくXMLデータ写像・格納方式との親和性が高い。また、各演算オペレータは任意の計算ノードに配置することができ、計算能力を有するストレージデバイス上にデータを絞り込むオペレータを配置する等の応用が考えられる。

本分散処理系の特徴は、lazy evaluationによるXML問合せのストリーム処理の実現、ブロッキングキューを利用したフロー制御による通信バッファ領域の削減、ならびにremote proxyを利用した仮想化によるリロケータブルな処理を実現したことにある。特にストリーム処理と通信バッファの削減により、メモリの消費を著しく減少させることができる。

本システムの性能を測るために、旧来のRPCに基づく最も高速な分散XQueryプロセッサの一つであるMonetDB/XRPCと比較した。結果は図2に示すとおりである。

図2より、本提案(左から2番目グラフ)は実行速度がMonetDB/XRPC(右端のグラフ)と比べて約22倍高速化された。また、本提案は疑似マルチユーザ環境を模した30スレッドから総計160の並行問合せを160秒で処理することができた。一方、MonetDB/XRPCは、RPCの本質的な問題であるメモリの大量消費のため、スラッシングが発生し、その結果900秒を経過しても実行が終了しなかった。すなわち、本分散処理系はメモリの利用効率が非常に良く、小型計算機に適していると言える。

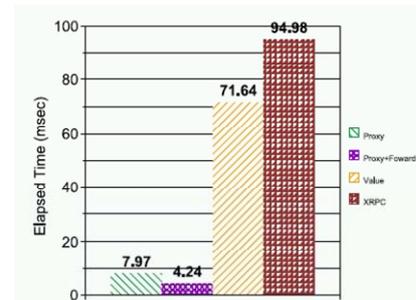


図2: 分散XQuery問合せの評価

一般にデータベースシステムは複数のユーザから同時にデータベースにアクセスされるため、ページバッファと呼ばれる、頻繁にアクセスされるデータブロックをメモリ上に保管する箇所への同時アクセスが頻繁に起こる。すなわちこのバッファ管理部分を効率しなければ、XML データベースであっても性能向上が望めない。しかし、バッファ管理部分はデータアクセスの一貫性を堅持するために、一般にロックによる排他制御が行われる。しかし、ロックは他のデータアクセス要求を待機させるため、性能を下げる主要因となる。

そこで、バッファ管理部分にロックに代わりロックフリーアルゴリズムによるデータ構造を利用した、Nb-GCLOCK アルゴリズムを開発した。Nb-GCLOCK は、既存の GCLOCK バッファ管理の改良版であるが、バッファ参照表に無待機ハッシュデータ構造、バッファの割当てには独自のロックフリーアルゴリズムを導入した。また、このデータ構造に対するアクセスがロックフリーであることを、linearization point の概念を利用して証明した。

Nb-GCLOCK の効果を計測するため、比較対象として既存のバッファ管理手法の代表である GCLOCK、LRU、2Q を選び、64 スレッドが同時実行可能な Sun SPARC T2 プロセッサを搭載する計算機を利用して実験を行った。図 3 に実験結果を示す。なお、図中の NbGClock(stripe) は、オリジナルである NbGClock(atomic) をメモリアクセスに関して最適化したもの、また、E\$NbGClock は NbGClock の理想時の性能、E\$LRU は LRU の理想時の性能である。

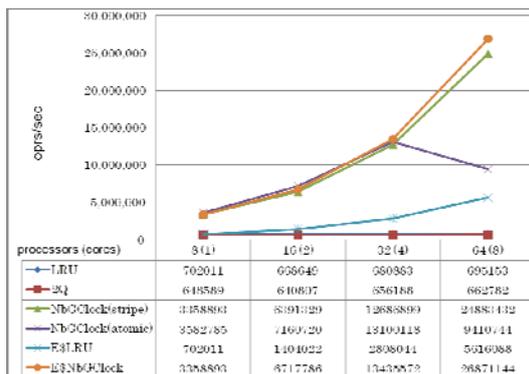


図 3: Nb-GCLOCK の性能評価

図 3 から自明なように、Nb-GCLOCK は性能線形性が高く、既存のバッファ管理手法と比較して極めて高いスループットを有することを確認した。

この提案手法は、Web 等の高いスループットを要求される製品を開発している企業から非常に高い評価を受け、2008 年の WebDB フ

ォーラムにてスポンサー 3 社の共同による企業賞を受賞するに至った。

今後は、本研究で培った基礎技術を統合するとともに、近年高性能計算用として利用される、グラフィックプロセッサ等を利用して、高性能かつ省メモリな XML 問合せ処理システムの研究開発を行う予定である。

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 4 件)

- ① 油井誠, 宮崎純, 植村俊亮, 加藤博一: “Remote Proxy を利用した分 XQuery 問合せ処理”, 情報処理学会論文誌データベース, Vol. 2, No. 1 (TOD41), pp. 104-115, (2009), 査読有
- ② 宮崎純: “比較器を有するメモリシステムを用いた主記憶データベース処理”, 情報処理学会論文誌データベース, Vol. 48, No. SIG11(TOD34), pp. 177-189, (2007), 査読有
- ③ 油井誠, 宮崎純, 植村俊亮: “効率的な XQuery 処理のための DTM に基づく XML ストレージ”, 情報処理学会論文誌データベース, Vol. 48, No. SIG11(TOD34), pp. 128-148, (2007), 査読有
- ④ Jun Miyazaki: “Query Processing and Access Path Selection in the Relational Main Memory Database Using a Functional Memory System”, IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 33-47, (2007), 査読有

〔学会発表〕(計 9 件)

- ① 油井誠, 宮崎純, 植村俊亮, 加藤博一: “ロックフリー GCLOCK ページ置換アルゴリズム”, Web とデータベースに関するフォーラム(WebDB Forum)2008 論文集, 12 pages (CDROM), 東京, 2008. 12, 査読有
- ② 油井誠, 宮崎純, 植村俊亮, 加藤博一: “計算リソースとデータ量にスケールブルな XML データベースシステムの実現”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2008 No. 56, pp. 135, 小樽, 2008. 6, 査読無
- ③ Jun Miyazaki: “EVALUATION OF EFFICIENT B-TREE PROCESSING USING A FUNCTIONAL MEMORY SYSTEM”, Proc. of IADIS International Conference on Applied Computing 2008, pp. 70-77, Portugal, 2008. 4, 査読有
- ④ Makoto Yui, Jun Miyazaki, Shunsuke

- Uemura, Hirokazu Kato: “XBird/D: Distributed and Parallel XQuery Processing using Remote Proxy”, Proc. of the 23rd Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2008), Special Track on Database Theory, Technology and Applications (DTTA), pp.1003-1007, Brazil, 2008.3, 査読有
- ⑤ 油井誠, 宮崎純, 植村俊亮, 加藤博一: “遅延評価を利用した並列分散 XQuery 問合せ処理”, 電子情報通信学会 第 19 回 データ工学ワークショップ (DEWS2008) 論文集, C2-1, 電子情報通信学会, 宮崎, 2008.3, 査読無
- ⑥ Makoto Yui, Jun Miyazaki, Shunsuke Uemura, Hirokazu Kato: “Efficient XML Storage based on DTM for Read-oriented Workloads”, Proc of IEEE International Workshop on Advanced Storage Systems (ADSS 2007) in conjunction with IEEE ICDIM 2007, pp.559-564, France, 2007.10, 査読有
- ⑦ 宮崎純: “高機能メモリシステムにおける B 木処理とその評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.254, DE2007-116/DC2007-13, pp.7-12, 東京, 2007.10, 査読無
- ⑧ 油井誠, 宮崎純, 植村俊亮, 加藤博一: “Remote Proxy を利用した並列分散 XML 問合せ処理手法の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.131, DE2007-22-114 / 情報処理学会研究報告, Vol.2007, No.65, 2007-DBS-143, pp.217-222, 電子情報通信学会/情報処理学会, 仙台, 2007.7, 査読無
- ⑨ Hiroto Kurita, Kenji Hatano, Jun Miyazaki, Shunsuke Uemura: “Efficient Query Processing for Large XML Data in Distributed Environments”, Proc. of IEEE 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2007), pp.317-322, Canada, 2007.5, 査読有

[その他]

ホームページ等

<http://imd.naist.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 純 (MIYAZAKI JUN)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 40293394