

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 13 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22500086

研究課題名(和文) 動的な多次元データの新しい記憶・処理方式の提案とその基盤構築

研究課題名(英文) A Proposal of a New Scheme for Storing and Processing Dynamic Multidimensional Data and Construction of Its Platform

研究代表者

都司 達夫 (Tsuji, Tatsuo)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80115302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多次元データのコンパクトで高速なエンコード/デコードの方式を提案し、それに基づき動的に増大する多次元データセットの新しい記憶・処理システムの基盤システムを構築して評価した。また、この基盤システム上で、(1)タプルストリームデータを蓄積し分析するためのカーネルアーキテクチャ、(2)システム運用時に分析対象のデータに新たな属性が追加されても、再編成不要なデータキューブの構築方式、および、(3)XMLデータベースの核となるデータ構造、など、関連するいくつかの応用分野を対象として提案し、構築した基盤システム上で、実装・評価し、本エンコード方式の有効性と汎用性を実証した。

研究成果の概要(英文)：In this research we proposed a compact and efficient encoding/decoding scheme, and evaluated the scheme using an implemented platform system for storing and processing dynamically increasing multidimensional datasets. We also demonstrated its advantages and versatility by evaluating the implemented systems based on the proposed encoding scheme in some of the related application fields such as: (1) a kernel architecture of data warehousing system for accumulating and analyzing tuple stream data, (2) a data cube organization scheme, in which no reorganization is necessary even if a new attribute is dynamically added to the analyzed dataset, (3) a kernel data structure for XML document database.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：(分科)情報学 (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 DBMS 多次元データ タプルストリーム データウェアハウス データキューブ XML

1. 研究開始当初の背景

複数の単純型データの組(タプル)からなる多次元データの処理は近年、多次元情報処理の応用分野の拡大につれて、急激にその重要性を増大している。特に、データの大規模化とともにシステム運用時の動的なデータ量増大や構造変化に効率よく対処するための新たな方法論と基盤技術が強く要請されており、現在まで数多くのアプローチにより優れた研究が行われてきた。

動的に増大する多次元データのエンコード方式として、我々がこれまで提案してきた経歴・オフセット法は従来方式に比べて時間・空間効率ともに優れた方式である。一般に n 次元データのタプルは各次元の属性値の定義域を多次元配列の添字に変換するデータ構造により、多次元配列中の一要素の座標で表現できる。さらに、この座標から当該配列のアドレス関数により、その要素の位置を表すオフセットを求めることができる。しかし、あらかじめ各属性のカージナリティが既知である場合にのみ有効であり、新たな属性値の出現に対しては、より大きな多次元配列を確保して、すべての既存要素を新しいアドレス関数にしたがって、そこに再配置する必要がある。経歴・オフセット法は拡張可能配列の仕組みを取り入れることにより、このような欠点を回避している。

本研究では、経歴・オフセット法のこれらの利点を活かしつつ、タプルアクセス速度と記憶効率を基本部分で向上させるための新たなタプルエンコード方式の提案を行う。従来の経歴・オフセット法によるシステム実装・評価の経験を通じて、本方式の着想に至ったが、これは、従来方式にはまったくみられない独創的な着想であるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、動的多次元データセットの実現方式について、我々がこれまで提案してきた方式も含めて従来方式より、きわめてコンパクトで効率よいタプルエンコード方式を新たに提案するとともに、本方式に基づいた多次元データベースシステムのカーネルを実装する。さらに、実装したカーネル上に多次元情報処理のいくつかの応用分野について、その動的特性に基づいた処理基盤システムを構築し、本方式の広範な有効性を検証する。この方式を以降では、経歴・パターン法とぶ。この方式では拡張可能配列のアドレス関数計算を行うことなく、各次元の配列添字のシフトとマスク演算のレジスタ命令のみでより高速にタプルをエンコード可能である。

配列の拡張に対して柔軟に効率よく対応できる拡張可能配列の仕組みは、経歴・パターン法では、各次元の添字の記憶表現サイズを一律に固定することなく、各次元の添字値のビットパターンの境界を次元拡張の状況に応じて柔軟に設定していることに活かさ

れている。座標パターンの表現に関するこのような柔軟性は、タプルのアクセス性能・検索性能の向上に寄与すると同時に、記憶量の大幅な削減にも貢献し得る。

3. 研究の方法

(1) 経歴・パターン法を定義して、その実装方式 HPMD (History-Pattern Implementation of Multidimensional Datasets) を提案する。

(2) 大規模データセットの実装を可能にするために、経歴・パターン空間を拡大する方式を検討する。

(3) (1) (2) の方式に基づいて、大規模な動的多次元データセットを蓄積し、効率よく処理するための HPMD による基盤システムを設計・実装し、評価する。

(4) 経歴・パターン法によるタプルストリームの処理方式の設計とデータキューブの分散構築方式を設計・実装する。

(5) スキーマ進化を考慮した経歴・パターン法によるデータキューブの構築方式を設計し、実装・評価する。

(6) 経歴・パターン法による XML 文書の HPMD へのマッピング手法とラベル付けの手法を開発し、XML 木の圧縮格納方式および検索方式を設計・実装する。

4. 研究成果

(1) 経歴・パターン法とその実装方式

本研究において提案した経歴パターン法による多次元座標のエンコード方式の概略を図 1 に示す。

n 次元拡張可能配列 A への新たなタプルの挿入により、次元 k のサイズ s_k が 1 つ拡張して、 s_k のビットパターンサイズが A の次元 k の現在サイズを超えたときに A と同形の部分配列 S が次 k の方向に付加され、 A は拡張される。このとき、 S が何番目の拡張による部分配列であるかを示す拡張経歴値 h が部分配列 S に付与される。経歴値 h の部分配列 S が拡張により付加された直後の A の各次元サイズを $[s_1, \dots, s_n]$ とする。 s_k を超える最小の 2 の冪乗数の表現に要するビット数を $b(s_k)$ として、 $\langle b(s_1), \dots, b(s_n) \rangle$ を h における A の境界ベクトルと呼ぶ。タプル t の座標 (i_1, i_2, \dots, i_n) のエンコードはまず、 t が所属する部分配列 S の経歴値 h を求める。境界ベクトル $\mathbf{B}[h]$ (図 1) を参照し、添字 i_k をビット幅 $b(s_k)$ で高い次元から順に右詰で並べた座標パターンを p とすると、経歴・パターン法による t のエンコードは経歴値 h と座標パターン p の対 $\langle h, p \rangle$ となる。

この方式では拡張可能配列のアドレス関数計算を行うことなく、各次元の配列添字の

シフトとマスク演算のレジスタ命令のみでより高速にタプルを<拡張経歴値, 座標パターン>の対にエンコード可能である。また、<拡張経歴値, 座標パターン>を元の座標値にデコードするのに経歴・オフセット法では $2n-1$ 回の除算を必要とするのに対して、この方式では $2n$ 回のレジスタ命令のみでよい。このことはタプルのアクセス速度および検索速度が経歴・オフセット法も含めた従来手法に比べて高速であることを意味している。

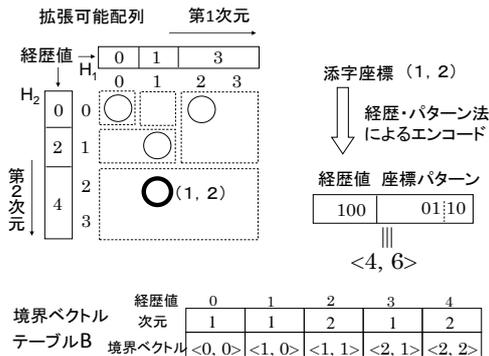


図1 経歴・パターン法の概略図

経歴パターン法により、多次元データセットを実装するためには図1で示した核データ構造に各次元の属性値をその次元添字に変換するデータ構造が必要となる。ここでは、このデータ構造として、属性値をキー、対応する添字をデータ値とするCVTと呼ぶB+木を採用する。また、エンコード結果の<経歴値, 座標パターン>を逆に座標値にデコードし、さらにそれを元の属性値のタプルにデコードするために各次元について、登録順に属性値を保持する一次元配列の属性値テーブルを有する。また、多次元データセットのエンコード結果はその出現順にB+木またはETF(Encoded Tuple File)と呼ぶ逐次ファイルに格納される。

(2) 経歴・パターン空間の拡大

(1)(2)の実装方式により多次元データセットを実装するときの問題点の一つとして、タプル数が多い大規模データセットでは座標パターン空間(例えば64ビットマシンでは1語長8バイト)のあふれにより新たなタプルの追加が不可能になることがある。ここでは座標パターン空間が一語長を超えるような大規模なデータセットについて記憶コストおよび検索時間コストのオーバーヘッドをできるだけ抑制し、効率良く実装するためにエンコードとデコードの方法を示した。

従来のようにアドレス計算を行って配列要素のオフセットを求めるために、多倍長演算を行うソフトウェアを使用することなく、この方法では、多倍長に渡りレジスタ命令を効率よく実行するための工夫を行っている。

(3) 基盤システムの構築と評価

(1)(2)(3)の方式により動的な多次元データセットの記憶・処理基盤のためのプロトタイプシステムの構築を行った。構築したシステムをPostgreSQL RDBMと比較評価した結果の概要を示す。測定に用いた計算機環境は以下の通りである。

CPU: Intel Core i7 (2.67GHz), 主メモリ: 12GB, OS: CentOS5.6 (LINUX), PostgreSQL: Version 8.4.4 (64-bit version)

TPC-H ベンチマークデータ中のLINEITEMテーブルを対象として比較評価を行った。このテーブルは16の属性からなり、タプル総数は23,996,604, csvフォーマットで2.43GBのサイズを有する。

以降では、タプルのエンコード結果を出力ファイルETFに逐次書き出す方式をHPMD, ETFにおいて経歴値ごとにページリストを構成し、当該ページリストに逐次書き出す方式をM-HPMDと表記する。またPostgreSQLによる実装をPSQLと表記する

(a) 記憶コスト

LINEITEMテーブルをデータベースとして格納したときの記憶量を図2に示す。グラフ中aux_tableshは経歴値テーブル, 境界ベクトルテーブルおよび属性値テーブルの記憶量の合計を示す。HPMDやM-HPMDの総記憶量はいずれもPSQLの1/6程度である。

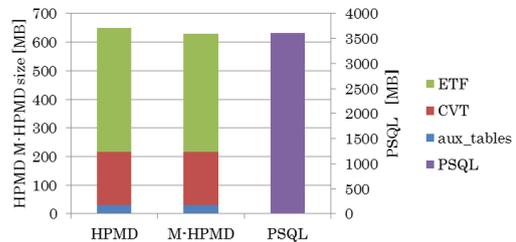


図2 記憶コスト

(b) 構築時間

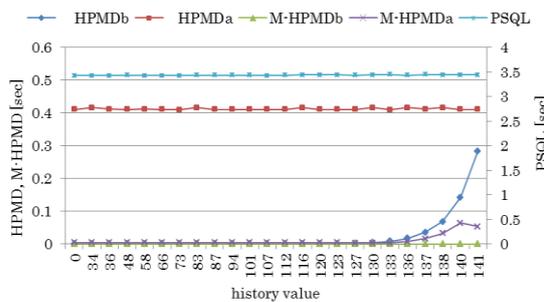
LINEITEMテーブルの格納に要する時間を示す。単位はsec。

HPMD	M-HPMD	PSQL
159.95	180.15	224

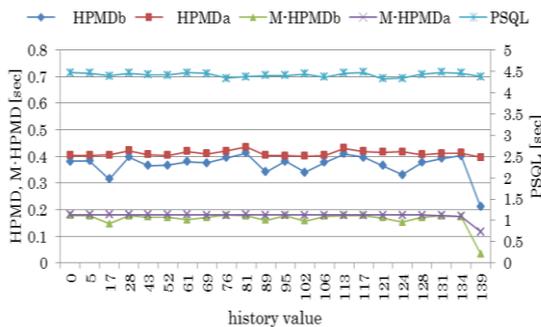
(c) 検索時間

LINEITEMテーブルの単一値指定検索の検索時間を図3に示す。属性値テーブルには当該属性値を持つタプルの数kが併せて登録されている。HPMDやM-HPMDのサフィックスa, bはそれぞれ、ETFの検索候補全体をスキャンした場合、検索結果のタプル数がkに達したときに検索を終了する場合を表している。

次元1と次元2の各経歴値について、その経歴値に対応する属性値を選んで指定した単一値検索の時間である。



(a) dim. 1 (L_ORDERKEY)



(b) dim. 6 (L_EXTENDEDPRICE)

図2 単一値検索コスト

(4) タブルストリームからのデータキューブの分散構築

ネットワーク上の関連サイトで MOLAP 用のデータキューブを分散構築するための方式を提案した。データ発生源から送信されるタブルデータを直接受信するサーバはベースキューボイドを構築しながら、それをタブルストリームとして下位のサイトに送信する。下位のサイトは受信したタブルデータを集約して、上位のキューボイドより、1次元低いキューボイドを構築しながら、それをタブルストリームとしてさらに下位のサイトに送信する。本方式では、経歴・パターン法や経歴・オフセット法による実装方式を用いることにより、効率よくタブルストリームを処理し、各サイトにおいて、リアルタイムでキューボイドを構築する。本方式におけるタブルストリームの処理方法、およびデータキューブの分散構築について検討し、必要な通信量を評価した。

(5) スキーマ進化を考慮したデータキューブの構築

システム運用時に必要に応じて新たな属性値の追加を容認する動的データキューブの実現方式を検討し、実装・評価した。データキューブは、分析対象のベーステーブルについて、その属性のすべての組合せに対して、分析対象データ(ファクトデータ)を集計した結果を保持するデータ集合である。オンライン分析を可能とするために、データキューブは分析に先立って事前に構築さ

れる。通常、対象テーブルのスキーマは不変であることを前提としている。しかし、業務の拡大につれベーステーブルに新たな属性を追加するといったスキーマ進化の必要が生じた場合、対応するデータキューブは再構築を必要とし、これには巨大なコストを伴う。そこで、ベーステーブルのスキーマ進化に対して、再構成コストが低いデータキューブの構成方式を設計した。経歴・パターン法によるタブルのエンコード方式は次元拡張に対して、高い適応性を有するが、ここでは、動的なデータキューブの実装に適合するように再設計し、システム構築を行った。また、構築した動的データキューブのパフォーマンスを評価した結果、スキーマ進化に対して、ほとんど時間コストが増加しないことを確認した。

(6) 経歴パターン法を使用した XML 文書の一実装方式を提案した。通常、検索速度向上のために多くの XMLDB では、高い記憶コストの索引付けが行われるが、本方式では、最小限の索引付けによりコンパクト性と高速性を両立させながら、動的な XML 文書を実装することを目標とした。本方式では XML 木のノードのラベル付けに経歴パターン法を適用することにより、XML 木の動的な構造更新に対して再ラベル付け等の再編成を行う必要が無い。

ここでは、経歴パターン法を XML 木の実装に用いる際に発生するラベルサイズの冗長性の問題に対する対処法を述べ、軽量で高速な XMLDB の実装方式を提案し、評価した。本提案方式によって実装される XMLDB では XML 木のノードはその構造情報を表す node ID とパス式情報を表す path ID の2つの ID によりラベル付けされる。node ID の検索は逐次検索を基本とし、索引を最低限に抑制し低記憶コストでありながら、検索速度についても比較的高いパフォーマンスを示すことがわかった。

ただし、索引によるランダムアクセスによらないために path ID に対応する node ID の数による検索速度のぶれが大きく、兄弟要素が多いほど速度が低下するという問題がある。今後の課題として、こうした速度低下を抑え、かつ述語などの指定で多く生じる構造検索に対応するために、node ID に関連した低記憶コストの索引を構成することがある。これにより、組み込みシステムへの応用を目指したい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① Jin D., Tsuji T.: A New Parallel Data Cube Construction Scheme, Int'l. Journal of Grid and High Performance Computing, Vol 4, No. 2, pp.32-45, 2012. 査読有
- ② Li B., Tsuji T., Higuchi K.: Resizable Multidimensional Arrays, I. J. Comput.

Appl., Vol.18, No. 1, pp. 1-12, 2011. 査読有

③ Shimada T., Tsuchida T., Tsuji T., Higuchi K.: Distributed construction of data cubes from tuple stream, IJBIDM Vol. 6, No. 3, pp. 302-320, 2011. 査読有

④ Li B., Kawaguchi K., Tsuji T., Higuchi K.: A Labeling Scheme for Dynamic XML Trees Based on History-offset Encoding, 情報処理学会論文誌: データベース (TOD), Vol. 3, No. 1, pp. 1-17, 2010. 査読有

[学会発表] (計 15 件)

① 渡部優太郎, 西野裕臣, 都司 達夫, 樋口 健: XML 文書の一実装方式とその性能評価, 情報処理学会データベースシステム研究会報告, 2013-DBS-158(5), pp. 1-9, 2013. 査読無

② 下野亮太, 都司達夫, 樋口健: サプライチェーン・マネジメントのためのデータベース構築, 電子情報通信学会研究会 信学技法, vol. 113, no. 214, DE2013-48, pp. 83-90, 2013. 査読無

③ Tsuji T., Amaki K., Nishino, Higuchi H.: History-Offset Implementation Scheme of XML Documents and Its Evaluations, Proc. of DASFAA 2013, pp. 315-330, 2013 査読有

④ 西野裕臣, 渡部優太郎, 都司達夫, 樋口健: 経歴・パターン法に基づく XML 文書の実装と評価, データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム論文集, B2-6, 2013. 査読無

⑤ 都司達夫: 軽量で高速な XML 文書格納検索システム, JST 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) 探索タイプ平成 23 年度技術移転シーズ紹介集, <http://www.jst.go.jp/a-step/seeds/list-a/pdf/h23/AS231Z03671A.pdf>, 2013. 査読有

⑥ 茶木一興, 岡下慎太郎, 都司達夫, 樋口健: 次元拡張を考慮したデータキューブの構築, 情報処理学会 研究報告, 2012-DBS-155, 19, pp. 1-8, 2012. 査読無

⑦ Shimono R., Tsuji T., Higuchi K.: A Proposal of Storage Scheme for Supply Chain Management, Proc. of iiWAS 2012, pp. 263-266, 2012. 査読有

⑧ Higuchi K., Wang W., Tsuji T.: Incremental Data Migration for Multi-database Systems, Proc. of SNPD, pp. 716-720, 2012. 査読有

⑨ Tsuchida T., Tsuji T., Higuchi K.: Implementing Vertical Splitting for Large Scale Multidimensional Datasets and Its Evaluations, Proc. of DaWaK2011, pp. 208-223, 2011. 査読有

⑩ Islam R., Hasan K. M. A., Tsuji T.: EaCRS: an extendible array based compression scheme for high dimensional data, Proc. of SoICT 2011, pp. 92-99, 2011. 査読有

⑪ 前田卓哉, 水野広治, 都司達夫, 樋口健:

多次元データのコンパクトな実装とその性能評価, 第 3 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, D6-2, 2011. 査読無

⑫ Jin D., Tsuji T.: Parallel Data Cube Construction Based on an Extendible Multidimensional Array, Proc. of TrustCom, pp. 1139-1145, 2011. 査読有

⑬ Shimada T., Tsuchida T., Tsuji T., Higuchi K.: Distributed Construction of Data Cubes from Tuple Stream, Proceedings of iiWAS2010, pp. 584-590, 2010, 査読有

⑭ Higuchi K., Tsuji T.: A distributed linear hashing enabling efficient retrieval for range queries. pp. 838-842, 2010, 査読有

⑮ Shimada T, Sasahara H., Tsuji T., Higuchi K.: A scheme of aggregating stream data, Proc of SMC, pp. 699-704, 2010. 査読有

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: データベース装置, データベースの管理法, データベースのデータ構造, データベースの管理プログラムおよびそれを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体

発明者: 都司達夫

権利者: 福井大学

種類: 特許

番号: 特許第 5419069 号

取得年月日: 25 年 1 1 月 2 9 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

都司 達夫 (TSUJI TATSUO)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80115302

(2) 研究分担者

樋口 健 (HIGUCHI KEN)

福井大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50293410