

令和 5 年 5 月 21 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11847

研究課題名（和文）数値シミュレーションのための無歪みデータ圧縮法とそのハードウェア実装

研究課題名（英文）A lossless data compression for numerical simulation

研究代表者

福間 慎治（Fukuma, Shinji）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：50313565

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では数値シミュレーションのための無歪みデータ圧縮法とそのハードウェア実装を研究した。数値シミュレーションにおける浮動小数点データに対する圧縮アルゴリズムを設計し、FPGAによりハードウェア実装した。実装した圧縮器を用いて、数値シミュレーションデータに対する圧縮率や処理時間を検証した。さらに、圧縮アルゴリズムの開発過程で得られた高速なスライディングウィンドウ回帰法を応用した1次元データ群の2次元画像可視化についても成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に、データ圧縮はソフトウェアで行われる。しかしながら、ソフトウェアによる実装は計算コストの増大を招き、数値シミュレーション速度の低下につながる。これに対し提案する圧縮器はデータ通信路にハードウェアとして挿入することを想定しているためこの問題を回避できる。圧縮器により、データ量は～1/2程度に圧縮可能であり、データ読み出しに必要な時間を1/2に削減でき、既設の計算機に圧縮器を挿入するだけでシミュレーション速度を最大2倍に加速でき、加えて既設ストレージ容量を仮想的に2倍に拡大可能である。こうして、既設のシミュレーション計算機資源を大幅に更新することなく低コストで近代化改修できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, a lossless(reversible) data compression method for numerical simulation and its hardware implementation are investigated. A compression algorithm for floating-point data in numerical simulation was designed and implemented in hardware using an FPGA. Using the developed compression algorithm, we verified the compression ratio and processing time for numerical simulation data. Furthermore, we have obtained results on a 2D image visualization of 1D data sets by applying proposed fast sliding window regression method obtained in the process of developing the compression algorithm.

研究分野：信号処理

キーワード：無歪みデータ圧縮 可逆符号化 ロスレス符号化 数値シミュレーション FPGA

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大規模数値シミュレーションは気象予測、災害予測、流体計算などに活用されており、社会を支える基盤技術の一つである。近年、地球温暖化に伴う風水害の拡大は地球規模の大きな問題となっており、このようなニーズに応える大規模な洪水予測や時間短縮のための高速な予測が求められている。これらはシミュレーションを実行する高性能計算機(スーパーコンピュータ)の性能向上が欠かせないが、一般に、計算機の更新は経済的に高コストである。もし数値シミュレーション計算機の性能を既設のままですべて2倍向上できるのであれば、機種更新間隔も2倍となり、更新コストを1/2に削減できる。

現在の大規模シミュレーションのボトルネックは計算速度よりも通信速度および記憶容量である。シミュレーションの通信速度向上のアプローチは、計算と通信を同時並行に実行(重複実行)することで通信時間を隠蔽する方法、および無歪みデータ圧縮(符号化)による方法である。前者は計算アルゴリズムに依存するため汎用的ではない。本課題は後者のデータ圧縮により通信時間を短縮する汎用的なアプローチに取り組む。データ圧縮の結果、既設の記憶領域の容量を仮想的に増加でき、シミュレーション結果の保存に利用できる。一般的なデータ圧縮法としてZiv-Lempel系統の方法(Zipやzlibなど)がある。これは限られた個数のシンボルからなる文書の圧縮には適しているが、浮動小数点形式の(32~64bitのシンボルとなる)数値データ圧縮には適しておらず、なおかつ1シンボルあたりの計算量が多い問題がある。画像圧縮JPEGやMPEG、HEVC等は画像モデルに基づく方式であり、画像と異なる性質の数値シミュレーションには適していない。さらに、JPEGやMPEGは再生時にデータの歪みを許容する圧縮方式であり、歪みによりシミュレーション結果が異なる恐れがある。こうして、大規模数値シミュレーションで出現する浮動小数点データ列の性質を考慮した圧縮率が高くなおかつ計算量の少ない無歪みデータ圧縮法の研究が問われている。

2. 研究の目的

本研究の目的は大規模数値シミュレーション向けの無歪みデータ圧縮法とそのハードウェア実装に関する研究である。本研究の独自性は2種類の圧縮器をハードウェアとして実装することである。データ圧縮はソフトウェアで行われるのが一般的である。しかしながら、ソフトウェアによる実装は計算コストの増大を招き、数値シミュレーション速度の低下につながる。これに対し提案する圧縮器はデータ通信路にハードウェアとして挿入することを想定しているためこの問題を回避できる。圧縮器により、データ量は $\sim 1/2$ 程度に圧縮可能であることから、メモリ、ストレージ、ネットワークからのデータ読み出しに必要な時間を1/2に削減できる。このことは、既設の計算機にアクセラレータやルータを挿入するだけでシミュレーション速度を最大2倍に加速できることを意味する。また、既設のストレージ容量を仮想的に2倍に拡大可能である。このように、既設のシミュレーション計算機資源を大幅に更新することなく低コストで近代化改修することが本研究における創造性である。

3. 研究の方法

本研究は数値シミュレーションにおける浮動小数点データの無歪み圧縮法とそのハードウェア実装に取り組んだ。はじめに圧縮アルゴリズムの設計を行った。本研究を遂行するにあたり、次の三つの目標を定める：圧縮アルゴリズムの設計、ハードウェア実装、数値シミュレーションによる検証である。

3.1 圧縮アルゴリズムの設計

本分野の従来研究では外挿予測と呼ばれる予測器を用いた無歪み圧縮法を用いている。これは、因果律を満たすよう受信側で再生済みのデータを用いてこれより送信するデータの予測値を生成し、その差分(残差)を求め、これをエントロピ符号化後に送信する方式である。予測精度が高ければ残差平均振幅はもとのデータのそれよりも小さくなる。情報量[bit]は平均振幅の \log_2 に比例することから、予測を導入することにより情報圧縮が可能となる。予測器には、内挿予測、適応予測、および学習データに基づき最適化した予測器などさまざまなものが提案されている。本研究では、ハードウェア実装に適している線形予測器の採用と、予測器の最適化による圧縮率の向上を目指す。

3.2 ハードウェア実装

無歪み圧縮器をハードウェアとして実装する。実装はプログラム可能な論理回路素子であるFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いる。ハードウェア設計はC言語による高位合成とVHDLによる低位合成を併用する。

3.3 数値シミュレーションデータによる検証

海洋の水温シミュレーション、流体シミュレーション、乱流シミュレーションなど、実際の数値シミュレーションデータを用いて設計した無歪み圧縮器の圧縮率や計算時間等を評価する。

4. 研究成果

4.1 圧縮アルゴリズムの設計

線形予測法による無歪み圧縮は，入力データ系列を $\mathbf{x} = \{x_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ とするとき，予測残差 $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \text{round}[\hat{\mathbf{x}}]$ をエントロピ符号化することにより実現される．ここで $\hat{\mathbf{x}}$ は予測値系列であり

$$\hat{x}_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^p \beta_j x_{i-j} & (i = p + 1, \dots, n) \\ 0 & (i = 1, 2, \dots, p) \end{cases}$$

である．予測器係数 β は予測残差ノルムを最小化するように決定される． p は予測次数である．一般に，ノルムは L2 ノルム（残差 2 乗和）が利用され，その解は

$$\beta^* = \arg \min_{\beta} \sum_i |r_i|^2$$

により求める．このとき予測器係数は連立方程式（正規方程式）の解となり，解析的に決定できる．一方，残差 L1 ノルムを指標として求めた予測器係数

$$\beta^* = \arg \min_{\beta} \sum_i |r_i|$$

は，L2 ノルムよりも高い圧縮率を得ることが知られている．しかしながら，予測器係数の導出では線形計画法を利用するのが一般的であるが，その計算量はデータサイズ n の 2~3 乗に比例し，大規模なシミュレーションデータには利用できない．そこで，勾配ブースティングに基づく L1 ブースティングアルゴリズムを提案した（図 4.1.1）．

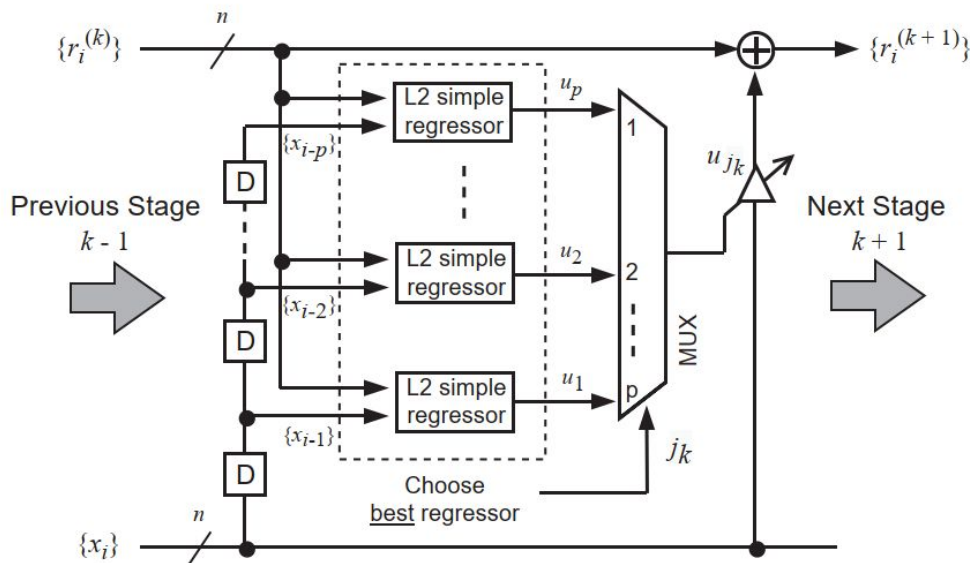


図 4.1.1 L1 ブースティングによる予測器設計

L1 ブースティングアルゴリズムの特徴は

反復解法

各反復は計算量が少ない L1 単回帰計算

である．特徴により，所望の残差ノルム値に達した段階で反復を停止でき，線形計画法よりも高速な解算出を可能にする．また特徴により，反復 1 回あたりの計算量は $O(n)$ であり，これも高速な解算出につながる．また，反復停止条件を適切に設定することにより，より圧縮率の高い予測係数値の産出も可能である．

表 4.1.1 に L1 ブースティングによる圧縮率と計算時間を示す．比較として，線形計画法ソルバ cvx による計算結果を示している．表より，cvx よりも計算時間が短いことがわかる．

図 4.1.3 に反復回数と圧縮率の関係を示す．線形計画法ソルバ cvx による L1 ノルム最小解よりも，L1 ブースティングによる反復途中解による圧縮率の方が高い場合がある．このことは，線形計画法よりも提案法の方が，より圧縮率の高い予測器をより高速に設計できることを示唆している．

表 4.1.1 計算時間

Images	Method	Code length [bpp]	L1	sec
lenna	L1-boosting	5.036	6.251	12.075
	L1-cvx	5.036	6.184	27.556
Mandrill	L1-boosting	6.318	14.012	5.679
	L1-cvx	6.318	14.01	6.102
aerial	L1-boosting	5.876	10.365	8.431
	L1-cvx	5.876	10.363	40.253
Pepper	L1-boosting	5.103	6.738	1.337
	L1-cvx	5.103	6.354	5.42

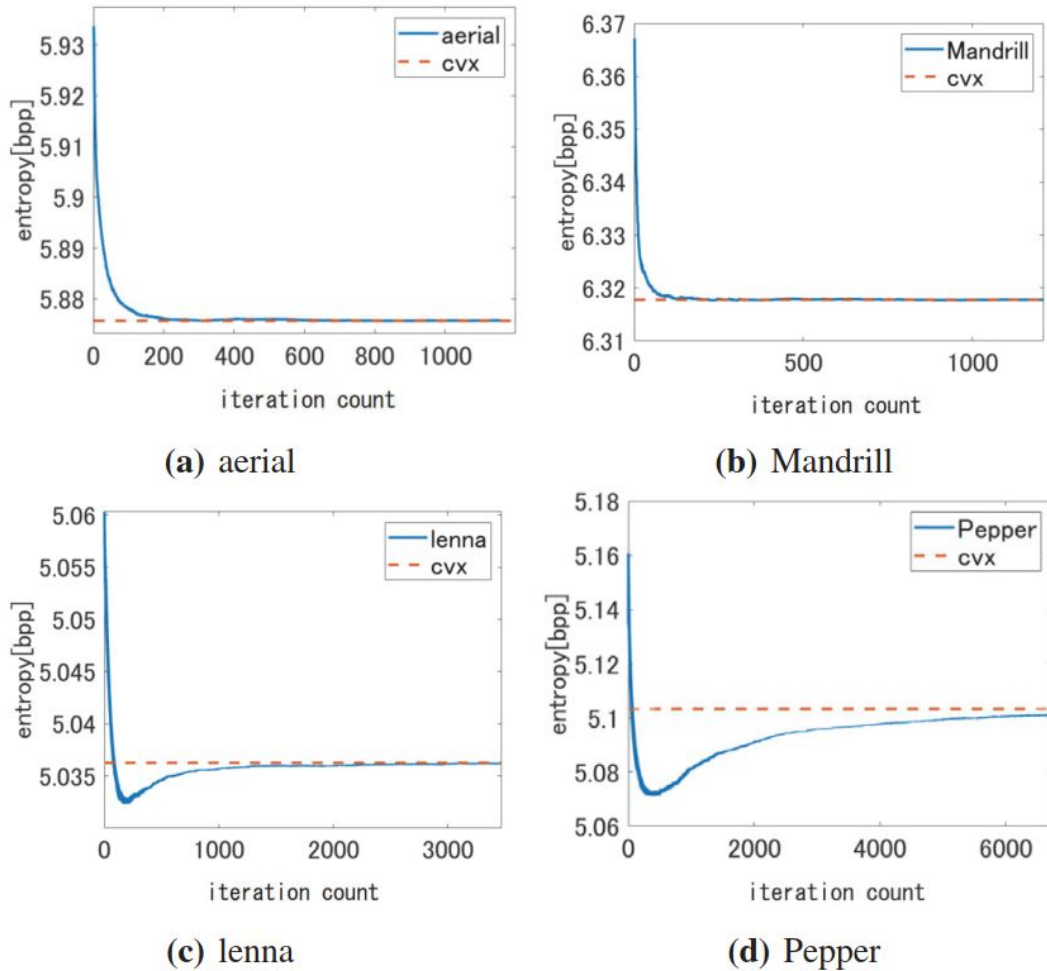


図 4.1.3 反復回数 vs 圧縮率

4.2 無歪み圧縮器のハードウェア実装

無歪み圧縮器をハードウェアとして実装する．実装はプログラム可能な論理回路素子である FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いる．ハードウェア設計は C 言語による高位合成と VHDL による低位合成を併用する．実装した圧縮器のブロック図 (エンコーダ) を図 4.2.1 に示す．

設計結果を表 4.2 に示す．表はハードウェアリソースの利用率である．十分少ない利用率であることから，無歪み圧縮器ハードウェアは低コストで実装可能であることがわかる．

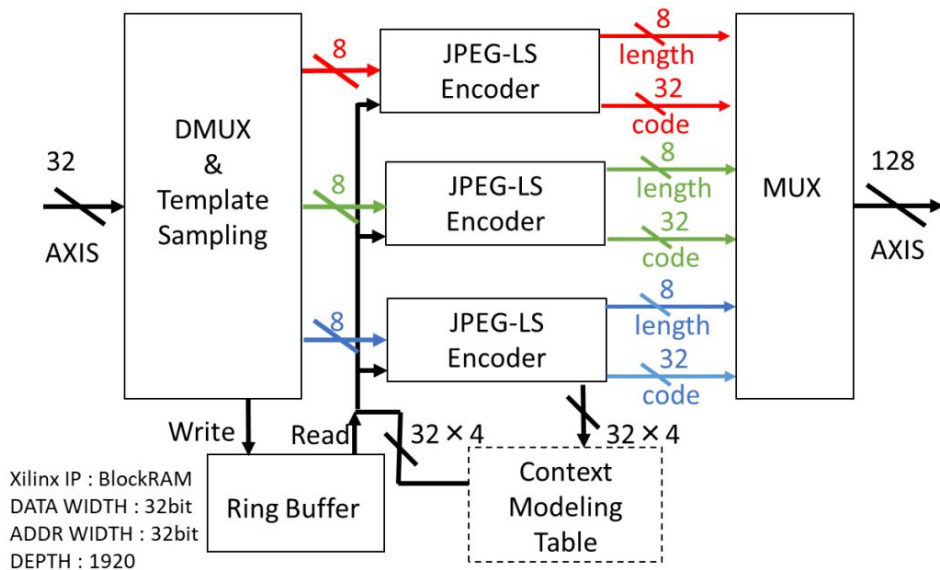


図 4.2.1 無歪み圧縮器のハードウェア構成

表 4.2 ハードウェアリソース

		FF	LUT	DSP48E	BRAM
エンコーダ	使用数	1854	4045	0	13.75
	使用可能数	106400	53200	220	140
	使用率[%]	1.74	7.60	0.00	9.82
デコーダ	使用数	2320	4426	0	13.75
	使用可能数	106400	53200	220	140
	使用率[%]	2.18	8.32	0.00	9.82

4.3 研究成果の応用例

本研究の特色である L1 ブースティングアルゴリズムの応用についても成果を得ている。新たなデータ入力ごとに回帰を行う適応的なブースティングはスライディングウィンドウ回帰の一種となっている。本研究のスピンオフとして、ベクトル計算向けの高速なスライディングウィンドウ回帰計算アルゴリズムを得ている。これを応用した、数値データの高速な 2 次元可視化法についても成果を得ている。図 4.3.1 はある機械的な測定データを画像として可視化するシステムであり、可視化結果を図 4.3.2 に示す。

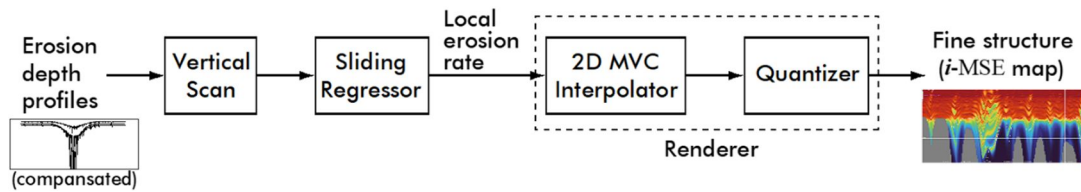


図 4.3.1 機械的特性を画像可視化するシステム

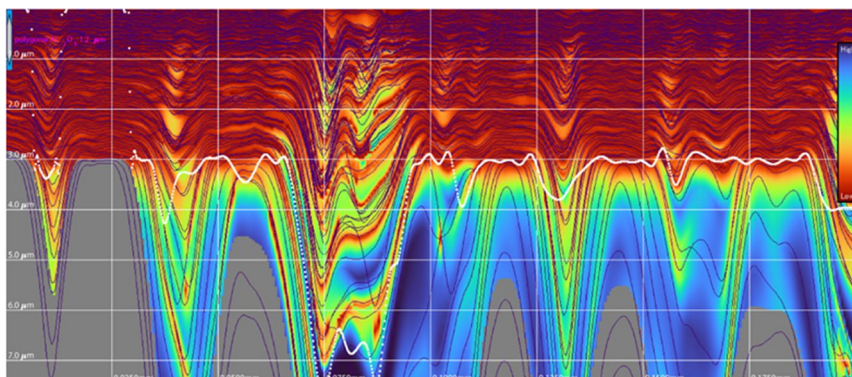


図 4.3.2 可視化例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomoki Okuno, Shinji Fukuma, Shin-ichiro Mori	4. 巻 1
2. 論文標題 An Iterative Method of LAD Regression using Gradient Boosting and Its Application to Image Coding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia 2022	6. 最初と最後の頁 96-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34385/proc.69.RS2-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinji FUKUMA, Yoshiro IWAI, Shin-ichiro MORI	4. 巻 1
2. 論文標題 An Imaging of Fine Structure for Surface and Its Inside of Solid Material with Micro Slurry-jet Erosion Test	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia 2022	6. 最初と最後の頁 113-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34385/proc.69.RS2-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥野 智貴, 小原 秀介, 福間 慎治, 森 眞一郎
2. 発表標題 勾配ブースティングを用いた L1回帰の反復解法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 D-11-32
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福間 慎治, 宮本 岳人, 大江 真由, 北澤 凌, 岩井 善郎, 森 眞一郎
2. 発表標題 マイクロスラリージェットエロージョン（MSE）試験データを用いた材料表面の摩耗過程と構造の可視化
3. 学会等名 電子情報通信学会スマートインフォメディアシステム研究会 SIS2022-37
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 畑中 理, 福間 慎治, 森 眞一郎
2. 発表標題 画像処理を用いた注視点計測の精度向上に向けた顔器官特徴量の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会スマートインフォメディアシステム研究会SIS2020-57
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------