

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる



Teledyne e2v
Semiconductors

2024年6月

概要

Teledyne e2vは独自のベンチマーキングを行い、最新の宇宙用プロセッサのロスレス圧縮性能をレビューしました。その結果、マルチコア通信プロセッサはシステムレベルで経済的・性能的利点があること、そして最新の圧縮アルゴリズムを様々なファイル・フォーマットに活用できることが明らかになりました。

宇宙ミッションでは経済的な理由から帯域幅とストレージ容量が制限されるため、効率的なデータ管理と伝送技術が必要です。理想的には、データセットのサイズを最小限に抑えつつ必要な情報を保存する効果的なデータ圧縮を適用することで、システムを強化することができます。圧縮を行うには、まずデータをローカルに保存し、オンボードで処理(符号化)してから、地上に伝送する必要があります。この高度なロスレス・アルゴリズムの実行には、宇宙用プロセッサに相当な計算能力が求められます。データ圧縮アルゴリズムとプロセッサの性能はここ数十年で大幅に進歩しており、最新鋭のマルチコア通信プロセッサで高速なリアルタイム圧縮が可能になっています。Teledyne e2vの最新宇宙グレードプロセッサは、このようなアプリケーションに非常に効果があることが証明されています。

本研究では、2種類のARMマルチコアA72ベースの通信プロセッサであるLS1046とLX2160を、同等の性能である産業グレード(非宇宙用)プロセッサと比較します。

圧縮アルゴリズム実装の実用的な側面については、一般的な可逆的方法(LZ4)の例とともに詳しく説明します。最終的には、MB/sの単位で測定した圧縮率のベンチマーキング比較により、広範でスタンダードな最新処理プラットフォームの機能を検証できます。

データ圧縮の基本

データ圧縮とは、データサイズを削減してローカルのストレージメモリに必要な容量と帯域幅を削減することです。データ圧縮することで、経済的でレジリエントなミッションの実現が可能になります。圧縮で冗長なデータを削除すると、ハードウェアに要求される速度や性能の制約を緩和できます。宇宙では用途ごとに独自の要件がありますが、本研究では幅広いユースケースを想定し、広く理解することを目指しました。

データ圧縮には2種類のアプローチがあり、いずれも保存、伝送するデータ・サイズを削減します。

非可逆圧縮では、一部のデータを破棄して伝送や保存を最適化し、一定の圧縮率を達成します。非可逆圧縮では圧縮の程度をあらかじめ決められることができ、ファイルサイズが小さくなりますが、圧縮の性質上データの品質は低下します。さらにいったん圧縮すると、元データに対する忠実度は失われます。商用の非可逆圧縮としては、JPEG(ジョイント・フォトグラフィック・エキスパート・グループ)やMPEG(ムービング・ピクチャー・エキスパート・グループ)フォーマットがよく利用されています [3]。ただ、データ損失が避けられないため、プロカメラマンには生データ(非圧縮・未加工)ファイルでの画像管理が好まれます。

記事の要点

- ・宇宙ミッションでは帯域幅やローカルストレージが制限されるため、効率的なデータ圧縮方式や伝送方式を使用する必要があります。
- ・最新のマルチコア宇宙グレードプロセッサによるリアルタイム圧縮により、通信リンクのスループットが向上します。
- ・ロスレス圧縮方法にはランレングス法、ハフマン法、レンペル・ジヴ・ウェルチ(LZW)法などがあり、データセットの忠実度が保たれます。
- ・ベンチマークテストの結果は、LZ4可逆アルゴリズムを使用して複数のプロセッサの圧縮率を比較したものです。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる



Teledyne e2v
Semiconductors

2024年6月

非可逆アルゴリズムの例 (JPEG)

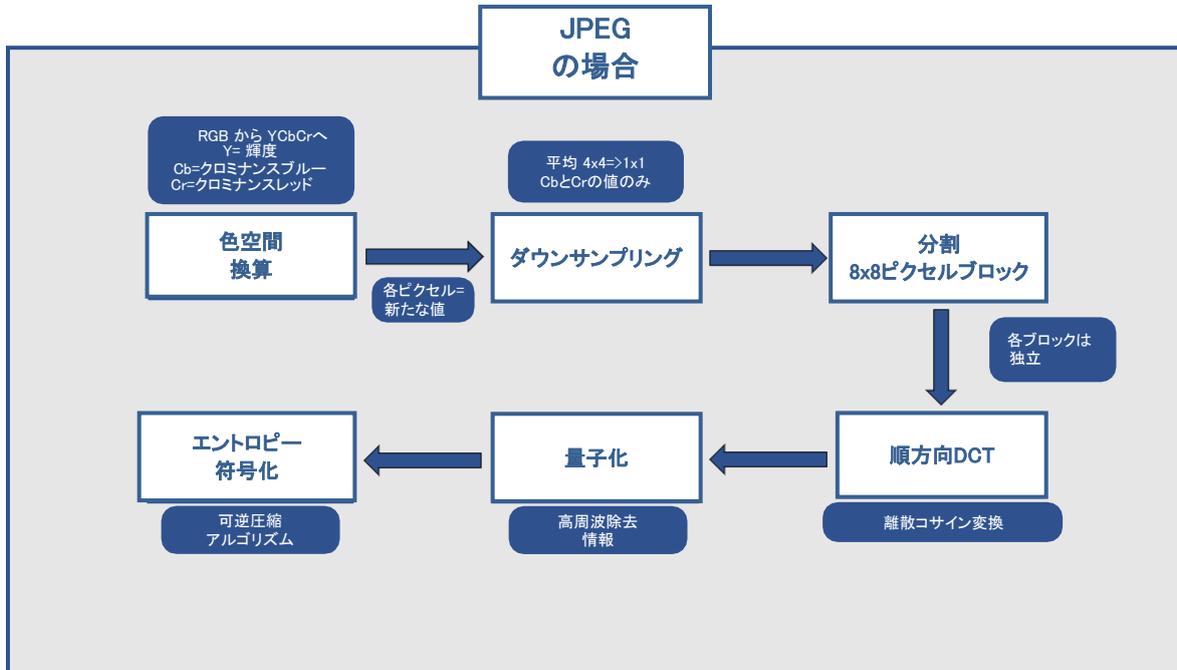


図1: JPEG圧縮(非可逆) [5]

衛星で圧縮する場合、消費電力を考慮することが非常に重要になります。FPGAに比べ、通信プロセッサは微細なプロセス形状を採用しており、消費電力をMBあたりのワット数で見るとかなりの優位性があります。このため、非可逆圧縮の場合にはプロセッサが最善のソリューションとなります。

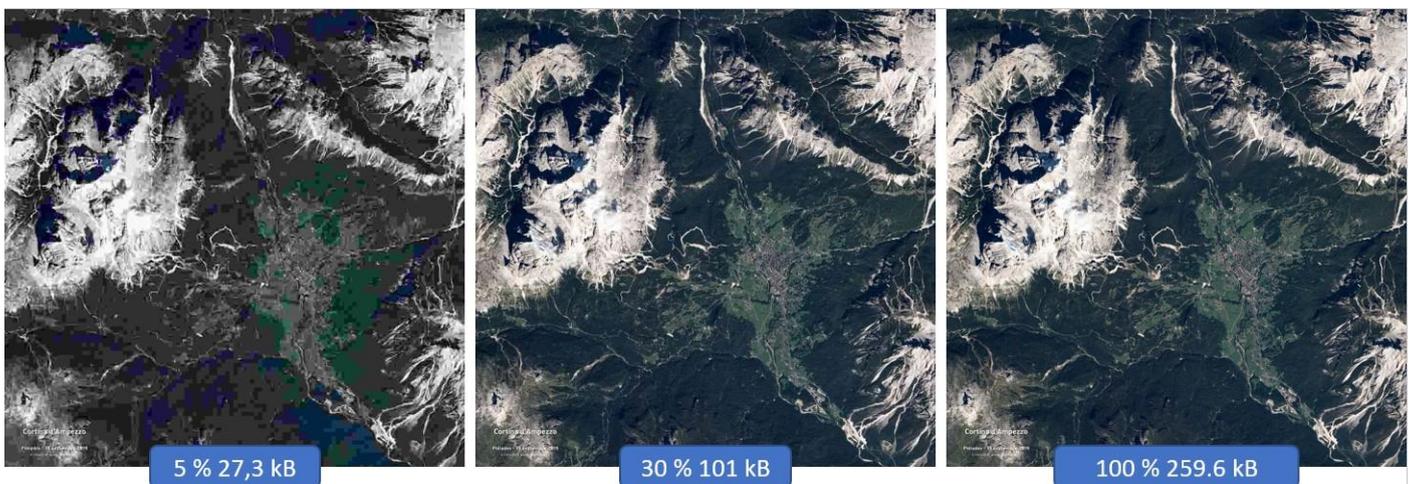


図2: 非可逆圧縮効果の例 [CNES画像]

図2に、さまざまな圧縮比で同じ画像に適用した非可逆JPEG圧縮の例を示します。画質(シャープネスと解像度)は左から右にいくほど上がりますが、ファイルサイズも増加します。非可逆圧縮に代わるものがロスレス圧縮です。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる

2024年6月

Teledyne e2v
Semiconductors

ロスレス圧縮は幅広い分野の専門家に好まれる圧縮方法で、情報を損失することなくファイルサイズを縮小できます。ロスレス圧縮は可逆的なプロセスで、データ内の統計的冗長性を識別して削除する作業が行われます。

長年、様々な可逆アプローチが開発されてきました。個別のアプローチは複雑なのでこの記事では扱いませんが、符号化のしくみにより以下の4つのカテゴリーに分類できます。

- ・変換符号化(離散コサイン変換など)
- ・予測に基づく符号化(適応型PCMなど)
- ・エントロピー符号化(ハフマン法など)
- ・辞書に基づく符号化(LZW & LZ4など)

一般的な可逆アルゴリズムには、ランレングス法、ハフマン法、レンペル・ジヴ・ウェルチ(LZW)法などがあり、宇宙での専門的業務に適しています [2]。

ロスレス圧縮の強みは、符号化された元のファイルが復元できることです。宇宙での圧縮ユースケースはほとんどの場合、こういった可逆圧縮データを利用すると想定されます。

上述した2つのアプローチについて、状況を含めた概要を以下の表にまとめます。

圧縮方法	非可逆	ロスレス(可逆)
アルゴリズムの例	JPEG、MPEG、MP3など	ランレングス法、ハフマン法、LZW、LZ4、ZIPなど
主な目的	コスト効果	データの完全性
データ品質の要求元	ユーザ/市場	アプリケーション
利点	費用対効果の高いトレードオフにより多くの消費者ニーズを支える	特定の専門的用途に適した多様な方法
メモリへの影響	目的に応じた最適化	アルゴリズムによって異なる
伝送への影響	大幅に増加	増加するがアルゴリズムによって異なる
CPUリソース	控えめ	より必要
欠点	データの忠実度の不可逆的な損失、不要なアーティファクトが生成される可能性	処理の複雑さ

表1: 非可逆および可逆圧縮方法の概要

圧縮アルゴリズムのベンチマーク:

Teledyne e2vのベンチマーキングでは、LZ4圧縮プラグインを使用します。LZ4はよく用いられる可逆アルゴリズムです。優れた圧縮比と高速な解凍が可能で、高速データ処理が求められる用途に最適です。LZ4とはレンペル・ジヴ4のことで、その名の通りレンペル・ジヴ系列のアルゴリズムを使用しています。この方法はデータスループットを向上させるため、インターネットやクラウドネットワークで広く利用されています。速度とシンプルさの点で優れているものの、符号化メモリに関してはペナルティがあり、特に繰り返しの少ないデータセットでは高いレベルの圧縮を達成することはできません。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる



2024年6月

アルゴリズムの例(LZ4)

LZ4アルゴリズムでの演算による圧縮の概要:

- ・このアルゴリズムでは、スライディングウィンドウを使用し、繰り返されるビット系列(マッチ)と、それに続く固有のデータパターン(リテラル)をスキャンします。
- ・ハッシュテーブルを使用してオフセットと長さでマッチを識別し、リテラルは「そのまま」格納されます。
- ・アルゴリズムは圧縮出力を生成します。これはトークンで構成され、各トークンはリテラルシーケンス(マッチしていないデータ)またはマッチ(送信された前のシーケンスを参照)を表します。

注記:LZ4圧縮のシンボル・ライブラリは初期状態では空ではなく、アルファベットの文字セットや、送信されたデータの最新のブロックなど、標準的な情報があらかじめ設定されています。

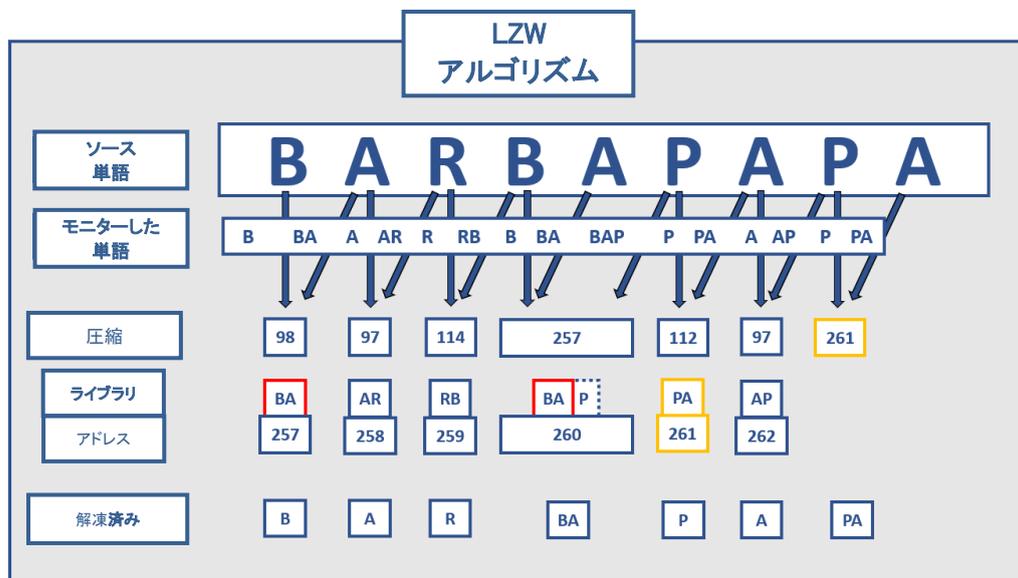


図3: 非可逆および可逆圧縮方法の概要

図3に、レンペル・ジヴ・ウェルチ法による符号化フローを示します。ここでは解凍時間を節約する設計となっています。リテラルライブラリがあるため、解凍は圧縮段階よりも6倍高速に実行できます。特定の用途に最適化したカスタムライブラリ作成が有効な場合もあります。

LZ4アルゴリズムはレイテンシが低いのでよく利用されています。これにはリアルタイムのデータ処理や通信システムも含まれます。多様なプログラミング言語やプラットフォームと互換性があり、広く普及しています。

圧縮の配分はプラグインによって異なるため、パフォーマンスや圧縮速度に影響することもあります。レベルが高ければ高いほどより高圧縮になるため、速度は低下します。この研究では、各ベンチマークファイルタイプに対して最適な第9レベルのLZ4圧縮を選択しました。

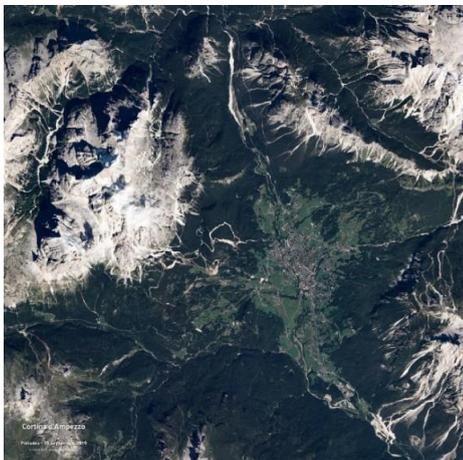
LZ4の符号化(圧縮)処理は、復号化処理に比べてより多くのリソースを必要とします。これは、マッチの検出、ハッシュテーブルの管理、データの最適な圧縮方法の決定に伴う計算量の増加によるものです。復号はこれより単純で、符号化されたトークンから元のデータを再構築するという単純なタスクがメインとなるため、より高速に実行できます。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる



Teledyne e2v
Semiconductors

2024年6月



可逆圧縮
99%
257.0kB

図4: LZ4による可逆圧縮を適用した例 [CNES画像]

宇宙用通信プロセッサのご紹介

新しいパワフルな宇宙用通信プロセッサの組み合わせを考えてみてください。

LS1046とLX2160は64ビットARM Cortex-A72マルチコア・プロセッサです。Teledyne e2vが製造しており、耐放射線設計 (rad-tolerant) となっています。計算集約的な機能を必要とする多くのアプリケーションに対応し、ディープラーニングやAIアルゴリズムを実行できるため、人工知能を組み込めるのが大きな特徴です。これにより、画像をスムーズに取得して処理できます。このアプローチでは、ソースデータを「エッジ」で前処理できるため、ダウンリンク帯域幅が削減できます。その他にも、以下のエンドアプリケーションがあります。

- ・ 衛星通信、組み込みAIとセキュリティ
- ・ 着陸・アビオニクス宇宙システム、ロボティクス、メカニカルアーム制御
- ・ 有人探査、科学ミッション
- ・ 早期警告、観測衛星 - 状況の自動検知と認識
- ・ 気象衛星

本研究は、宇宙アプリケーションのデータ圧縮におけるTeledyne2v通信プロセッサの効率を実証することを目的としています。



図5: LS1046

LS1046-Spaceはクアドコアプロセッサで、1.8GHzの速度で30k DMIPSを実現、ECCで保護されたL1およびL2キャッシュ、パケット処理の加速化、1/10 Gbイーサネット、PCIe® Gen3、SPI、I²C、UARTなどの豊富な周辺機能を提供します。

ステータス: 認定済み、発売開始。

宇宙用認定: レベル1 (NASA EEE-INST-002-Section M4 - PEMs & ECSS-Q-ST-60-13C)

DMIPについて

DMIPとは「Dhrystone 100万命令/秒」のことで、プロセッサ性能の測定単位です。一般的な整数演算をテストする1980年代のDhrystoneベンチマークから導出されています。

DMIPはリファレンス・マシン (VAX 11/780) に対してプロセッサが処理できる命令数を数値化します。

計算性能の比較にも便利なのですが、DMIPは整数演算に重点を置いています。このため、最新の浮動小数点演算ワークロードを完全に表現できるわけではありません。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる



2024年6月



図6: LX2160

LX2160-Spaceは最新の16コアプロセッサで、200k DMIPsまで対応し、最大2.2GHzで動作します。また、100GbE、複数のPCIe Gen3.0、ハードウェアL2スイッチング、100Gbps解凍/圧縮のDPAA2、最適化された50Gbps暗号化エンジンなどの高速周辺機器に対応できるWRIOPを搭載しています。様々な標準的データインターフェイスも備えています。

ステータス: LX2160 は現在開発中。

圧縮に影響するプロセッサ側の設計要因

プロセッサの圧縮性能に影響を与える要因は、使用するアルゴリズムの特性以外にもいくつかあります。そのような要因を知ることで、特定のプロセッサのパフォーマンスが低下した場合でもDMIPを考慮して突発的な事態に対応することができます。このうち上位2つは、ハードウェアの並列処理（およびマルチコアプロセッサの設計）、そして綿密なキャッシュとローカルメモリアーキテクチャです。では、どのようなことからこの要因が重要になるのでしょうか。圧縮アルゴリズムに何が必要かを考える手がかりがあります。

並列処理とマルチコアアーキテクチャ

並列処理はハードウェアとソフトウェア双方の設計で重要な役割を果たすもので、以下のようなものがあります。

- ・マルチコアプロセッサ: 圧縮アルゴリズムには、異なるデータブロックの同時処理など、並行して実行できる作業がよく含まれます。マルチコアプロセッサでは作業負荷をコア間で分散できるので、この種の作業はかなり高速化できます。
- ・SIMD（単一命令、複数データ）拡張: AVX（アドバンスド・ベクトル・エクステンション）やSSE（ストリーミングSIMD拡張）といったSIMD拡張では、単一命令で複数のデータポイントを同時に処理します。

マルチコアプロセッサとSIMD機能により、圧縮アルゴリズムによる高いスループットと実行時間短縮が実現できます。

キャッシュアーキテクチャとメモリ帯域幅

システム内のデータアクセスや移動の効率は圧縮速度に大きく影響します。主な要素は以下の通りです。

- ・キャッシュサイズとレベル: 大規模でマルチレベルのキャッシュ（L1、L2、L3）は、物理的にCPUに近い場所にアクセス頻度の高いデータや命令を格納できるため、データ検索のレイテンシを短縮できます。圧縮アルゴリズムには同じデータへのアクセスを繰り返す場合があるため、効率的なキャッシュ利用が有効です。
- ・キャッシュラインサイズとプリフェッチ: キャッシュラインサイズを最適化して効率的なプリフェッチを可能にすると、アルゴリズムが必要とするデータがすぐに利用でき、キャッシュミスによる停滞を最小限に抑えることができます。
- ・メモリ帯域幅高いメモリ帯域幅があれば、CPUとメモリサブシステム間での迅速なデータ転送が可能になります。もともと大量のデータを処理する圧縮アルゴリズムでは、動作速度の遅いメモリボトルネックになることがあります。帯域幅が広く安定したデータの流が確保されるため、CPUの処理能力維持とアイドルタイム短縮につながります。

キャッシュアーキテクチャを最適化し十分なメモリ帯域幅を確保することは、高いデータレート維持に不可欠で、LZ4符号化では特に重要です。しかし、利用可能なメモリサイズ制限のため、処理が遅くなる可能性もあります。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる

2024年6月

Teledyne e2v
Semiconductors

ハードウェア設定

性能評価は複数のインターフェイスをサポートするQLS1046-Space開発キットとNXPのLX2160ARDBNXPで行い、ベンチマークにはLinuxオペレーティングシステムを使用しました。個々のベンチマークボードの設定は以下の通りです。

QLS1046-Space評価ボードは8GBではなく、4GBのDDR4メモリ搭載のものを使用しました。最大クロック数は1.8GHzですが、今回は1.6GHzの動作速度で実行しました。

LX2160プロセッサは、最大100Gbpsのデータスループットレートを処理できる解凍/圧縮アクセラレーションエンジン(DCE)を搭載しています。しかし本研究の範囲では、このアクセラレータの直接評価は実施せず、純粋にコアの計算性能を評価しました。もちろんDECを使うと圧縮速度が格段に向上します。ベンチマークでは最大の2.2GHzクロックではなく、2GHzで行っていることにご注意ください。調査結果は利用可能なローカルのDDR4メモリの制約を受けることにもご注意ください。

シンプルなベンチマークでは色々な種類のプロセッサを対象としており、十分なデータを得るため多様なアプリケーションを使用して圧縮性能を比較します。

数種類のプロセッサプラットフォームを使用し、宇宙アプリケーションで使われる複数のタイプのファイルを用いてベンチマークを実施しました。プロセッサによっては、Teledyne e2vが直接試験を行っていますが、その他の製品については参考文献で入手した過去の試験を参考にしました[1]。

Teledyne e2vのテスト対象プロセッサ

プロセッサ	試験周波数 (最大GHz)	試験した コア数(最大)	アーキテクチャ	宇宙用 品質認定	代表的な用途
Texas Instruments DM3730	1	1	ARM	なし	ナビゲーション
Amlogic S805	1.5	4	ARM	なし	TVボックス
LS1046	1.6 (1.8)	4	ARM	あり	宇宙
Intel® Atom™ D525	1.8	2	x86	なし	デスクトップ
Intel® Core™ i7-2630QM	2	4	x86	なし	モバイル
LX2160	2 (2.2)	16	ARM	あり	宇宙
Intel® Core™ i5-1145G7	2.6	4	x86	なし	デスクトップ
Intel® Core™ i3-2105	3.1	2	x86	なし	デスクトップ
Intel® Core™ i5-2400	3.1	4	x86	なし	デスクトップ
Intel® Xeon® Processor E3-1225 v3	3.2	4	x86	なし	サーバー

表2: 対象プロセッサ

ベンチマークでは、耐放射線(rad hardened)プロセッサの中でも性能の低いものは、圧縮処理の負荷を処理しきれないと考えられることから除外しました。MicrochipのSAMRH71はArm Cortex M7を搭載し、200 DMIPSで動作します。これはLX2160の1000分の1のスループットです。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる

2024年6月



Teledyne e2v
Semiconductors

テストファイルシナリオ

ベンチマーキングでは複数の異なるタイプのファイルを用いました。ファイルの種類は宇宙アプリケーションの代表的なものを考慮して選定しました。代表的な画像フォーマットのJPEGやRAW画像データも興味深い圧縮対象です。圧縮により画像のダウンロード時間を高速化し、リアルタイム実行ファイルに近づけることができます。また圧縮を導入することで、アップリンクによる、ソフトウェアアップデートや衛星システム上のAIプラグインのアップグレードも可能になります。

テストしたファイルの特徴は以下の通りです。

名称	種類	説明	ソース	サイズ(MB)
X線	X線	医療用X線写真	病院画像 ^[1]	8.5
dickens	.txt	チャールズ・ディケンズ著作集	プロジェクト・グーテンベルク ^[1]	10.2
image	.raw	非圧縮画像	Teledyne e2v	19.1
nci	database	化学構造データベース	CACTVS ^[1]	33.55
mozilla	.exe	Mozilla 1.0のTar実行ファイル	Mozilla Project ^[1]	51.22
fireworks	jpeg	JPEG画像	Snappy ^[1]	112

表3: ベンチマーキングに利用したファイルの種類

ファイルタイプに関する注意点をいくつか挙げます。まずjpeg画像はすでに圧縮済みですので、圧縮をかけるのは無意味に思われるかもしれませんが、LZ4でさらに圧縮できるかを検証するため対象としています。元々の画像も圧縮して差異を比較しました。さらに、テキストファイルについては、LZ4アルゴリズムは単語ライブラリを含む構造となっているため、興味深いケースとなります。実行ファイルは関連するコードの構造のためデータの冗長性が非常に高いことから、テキストファイルと類似しています。最後に、表構造を持つデータベースファイル(ここではnci)も評価対象として興味深いものです。

ベンチマーク

今回のベンチマークは個別プロセッサコアによるファイル圧縮を行う設計で、最大限のパフォーマンスと迅速な結果を保証します。その仕組みについて簡単にご説明します。

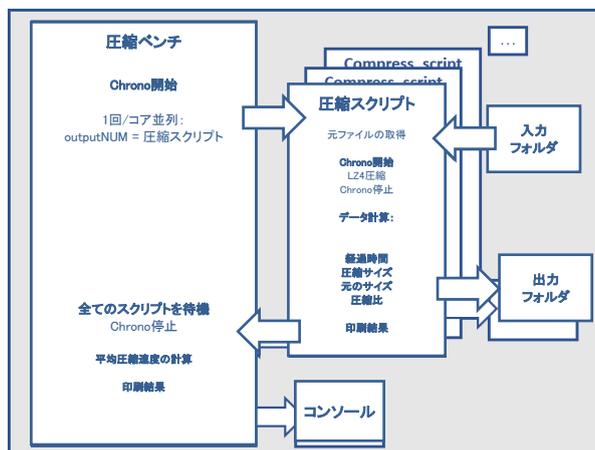


図7: ベンチマークアルゴリズムのブロック図

並列処理: ベンチマークではファイル圧縮のため、同時に複数の圧縮スクリプトを実行します。並列処理によって、ファイル圧縮に必要な総時間をかなり削減できます。

性能指標: ベンチマークでは圧縮の符号化時間を測定して圧縮速度 (MB/s) を計算します。さらに、すべてのスレッドにかかった時間を測定し、すべてのスクリプトの総圧縮速度 (MB/s) を決定します。

連続動作: このアルゴリズムは無限ループで動作するため、継続的なファイル圧縮が可能です。このプロセスは継続的に監視されます。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる



2024年6月

圧縮速度結果

今回のベンチマーキングでは、圧縮率または圧縮速度という単一の圧縮性能要因に焦点を当てています。計算速度はプロセッサを比較するうえで重要な要素です。

レーダー図(図8)には興味深い結果が示されています。まず、Intel® Core™ i5-1145G7に比べ、LX2160は格段に処理能力が優れています。各ファイルタイプに対する圧縮速度が類似している(プロットの形状)のは興味深い結果です。アルゴリズムの処理速度への影響は、どのプロセッサに対しても同様になっているようですので、アルゴリズムの選定が重要であるとわかります。さらにこの図から、LX2160と低速のLS1046やIntel i5-1145G7の間に4倍の速度差があることもわかります。

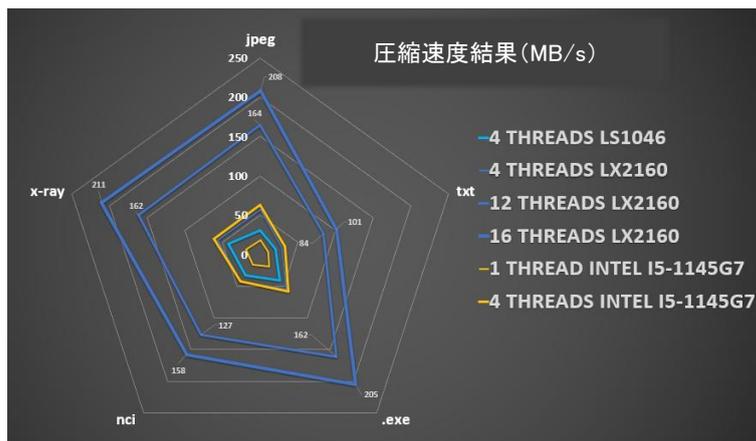


図8: Teledyne e2vプロセッサとのファイルごとの圧縮速度比較

Teledyne e2vのプロセッサを一般的な商用コンポーネントと比較するため、公表されているベンチマーク結果を利用しました。公開結果にはシングルスレッド動作しか示していません。公正な比較のため、すべての公開結果には使用可能なコア数を掛け合わせました。ただし、この単純なアプローチでは未検証の近似値が示されることを認識する必要があります。このベンチマークでは、プロセッサの圧縮能力も過小評価されているため、もっともなことだといえます。ただし、.nciファイルなど特定のファイルについては、単純な整数倍では性能を過大評価している可能性があることにも注意が必要です。

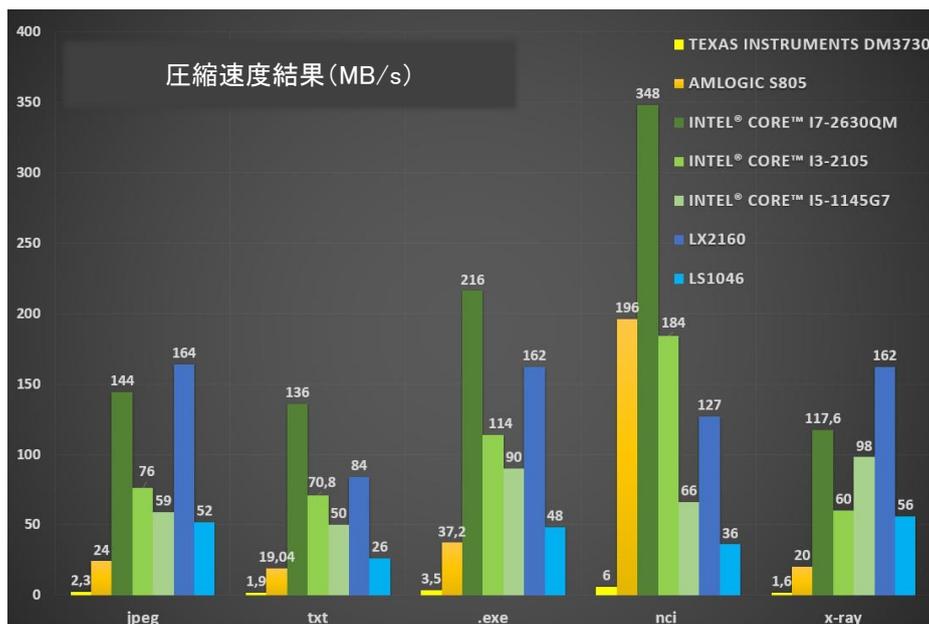


図9: 全てのプロセッサのファイルごとの圧縮速度比較

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる



2024年6月

図9に結果をまとめます。5種類のファイルを10種類の異なるプロセッサで圧縮しました。LX2160はかなりよい性能であることがわかります。ファイルの種類によっては、X線ファイルの場合(162 MB/s)のように、群を抜いているものもあります。しかし、nciファイルのように、Intelプロセッサが優位なファイルもあります。この結果は直接検証したわけではないため、慎重な解釈が必要です。速度を外挿するために補正が単純化されており、バイアスがかかっている可能性もあります。

結論

このホワイトペーパーでは、64-bitの優れた計算性能を持つTeledyne e2vの宇宙用プロセッサについて説明し、非可逆圧縮およびロスレス圧縮という2種類の圧縮方法を検討しました。具体的な圧縮アルゴリズムとしてこのベンチマーキングではLZ4アルゴリズムを取り上げ、詳細に検討しました。さらに、圧縮方法を検討する際に重要なプロセッサ側の性能要因を検討しました。

検討においては10台のプロセッサを使用し、5種類のファイルの圧縮ベンチマークを実施しました。そのうち2つはTeledyne e2v製で、耐放射線宇宙グレードコンポーネント(rad-tolerant)です。LS1046は圧縮速度(MB/s)の点でIntelの商用プロセッサと互角の性能を見せています。最新のLX2160ではLS1046に比べ4倍の圧縮性能となっています。さらに圧縮速度についても他のプロセッサに比べて格段に速いのも特徴的です。このベンチマーク値が、最大100Gbpsのデータレートに対応するオンチップの解凍/圧縮アクセラレーション・エンジンであるDCEを使用することなく達成できていることも注目に値します。

現代の最新式センサーでは高解像度と幅広いサンプルレートが求められますが、宇宙用プロセッサにこれだけの性能があれば、飛行中に生成される大規模なデータセットを処理して圧縮することが可能です。AIをオンボードで利用し[7]、重要なデータを抽出してから地上局へ伝送することも可能です。また、必要とされる帯域幅も削減できます。

将来的にはこの分析をさらに発展させて、市販のプロセッサについてもより詳細に分析してマルチスレッド機能を検証することが考えられます。さらに非可逆圧縮アプリケーションに適用されるFPGA圧縮性能の分析も興味深い対象です。最後に、候補となる全ての商用プロセッサについて、ワットあたりの圧縮率を評価することが参考なると考えられます。

最新の宇宙用マルチコアプロセッサがロスレス圧縮によるデータ処理能力を向上させる



2024年6月

参考とした情報源:

- [1] [Squash Compression Benchmark \(quixdb.github.io\)](https://quixdb.github.io) (Squash圧縮ベンチマーク)
- [2] [Lossless Compression: A Complete Guide | Adobe](#) (可逆圧縮:完全ガイド | アドビ)
- [3] [Lossy Compression: Everything You Need to Know | Adobe](#) (非可逆圧縮:基礎知識 | アドビ)
- [4] [Lossless bit compression \(article\) | Khan Academy](#) (可逆ビット圧縮(記事) | カーンアカデミー)
- [5] [JPEG Compression Explained | Baeldung on Computer Science](#) (JPEG 圧縮の解説 | Baeldung コンピュータサイエンス)
- [6] [La compression de données - La compression de Lempel Ziv Welch \(univ-mlv.fr\)](#) (データ圧縮 - レンペル・ジヴ・ウェルチ圧縮 (univ-mlv.fr))
- [7] [Deep-learning AI in Space enabled by Qormino® processing module | Teledyne e2v Semiconductors](#) (Qormino® プロセッサモジュールが実現する宇宙空間でのディープラーニングAI | Teledyne e2v Semiconductors) (teledyneimaging.com)
- [Executable Usage · Vitis Libraries · Reader · AMD Adaptive Computing Documentation Portal \(xilinx.com\)](#) (実行可能ファイル利用法 · Vitis ライブラリ · リーダー · AMDアダプティブ・コンピューティングのドキュメンテーション・ポータル (xilinx.com))
- <https://ark.intel.com/content/www/fr/fr/ark/products>
- [LZW \(Lempel-Ziv-Welch\) Compression technique - GeeksforGeeks](#) (LZW(レンペル・ジヴ・ウェルチ)法) - GeeksforGeeks)



お問い合わせはこちら:

マニュエル・ブランコ、
アプリケーションエンジニア、
データプロセッシングソリューション

Manuel.BLANCO@Teledyne.com



お問い合わせはこちら:

ヴァンサン・ティボー
アプリケーションエンジニア、
データプロセッシングソリューション

Vincent.THIBAULT@Teledyne.com



お問い合わせはこちら:

ギヨーム・ネゾ、
アプリケーションエンジニア、
データプロセッシングソリューション

Guillaume.Nezot@Teledyne.com



お問い合わせはこちら:

トーマス・ギルマン、
マーケティング & ビジネス部門、
データプロセッシングソリューション

thomas.guillemain@teledyne.com

