

インテル® アドバンスト・ベクトル・エクステンション 512 (インテル® AVX-512) で x265 を高速化

この記事は、インテル® デベロッパー・ゾーンに公開されている「[Accelerating x265 with Intel® Advanced Vector Extensions 512 \(Intel® AVX-512\)](#)」の日本語参考訳です。

はじめに

目的

CPU のベクトルユニットは、メディアの高速化と SIMD (Single Instruction, Multiple Data) を利用して並列処理を行うその他のカーネルの事実上の標準となっています。¹ ベクトルユニットは、単一のレジスター・ファイルを、合計幅がベクトル・レジスター・ファイルの幅と等しい複数のレジスターの組み合わせとして扱うことができます。そのため、単一命令でこのベクトルレジスターのすべてのデータを並列に操作して、このパターンに一致するデータアクセスを持つアプリケーションを大幅にスピードアップすることができます。インテル® MMX® テクノロジーにより拡張されたアーキテクチャーで 8 ビット・レジスターとして扱われる 64 ビット・ベクトル・レジスター・ファイルから、インテル® アーキテクチャー・プロセッサ上の SIMD では、インテル® アドバンスト・ベクトル・エクステンション (インテル® AVX) とインテル® AVX2 世代の 32 個の並列 8 ビット操作が可能な 256 ビット・レジスター・ファイルに進化しました。

メディア・ワークロードのカーネルは、同じ操作 (例えばフィルタリング) がフレームの複数のピクセルに一様に適用されるため、この実行パターンに自然に合致します。そのため、いくつかの主要なオープンソース・プロジェクトではコードの高速化に SIMD 命令を活用しています。AVC (Advanced Video Coding) エンコードの x264 プロジェクト² と HEVC (High Efficiency Video Coding) エンコードの x265 プロジェクト³ は、広く利用されているメディア・ライブラリーであり、インテル® MMX® テクノロジーからインテル® AVX2 まで、インテル® アーキテクチャー・プロセッサ上の複数世代の SIMD を活用しています。図 1 に示すように、x264 と x265 は SIMD コードを使用しないベースラインと比較して、それぞれ 2 倍と 5 倍のスピードアップを達成しています。HEVC のほうが AVC よりもフレーム当たりの作業量のはるかに多いため、x265 エンコーダーのほうが x264 よりもインテル® AVX2 から大きなパフォーマンス・ゲインが得られます。⁴

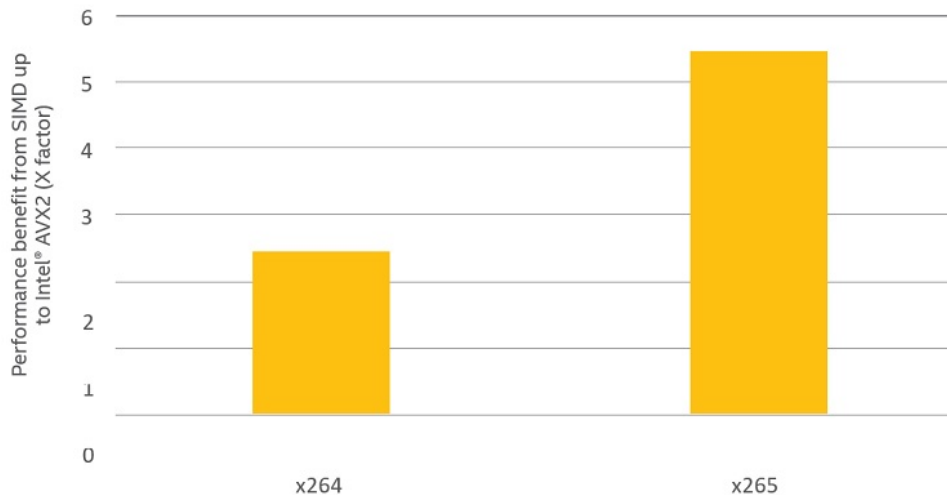


図 1. インテル® Core™ i7-4500U プロセッサ上で Main プロファイルの 1080p エンコードにインテル® AVX2 を使用した場合の x264 と x265 のパフォーマンス・ゲイン

この記事の焦点

最近リリースされたインテル® Xeon® スケーラブル・プロセッサ (開発コード名 Purley) は、インテル® AVX-512 命令セットを採用しています。⁵ インテル® AVX-512 命令は、インテル® AVX2 と比較して、同じサイクル数で 2 倍の操作を実行することができます。このスループットの向上を達成するため、より多くのダイ面積が利用されており、その結果、前世代の SIMD ユニットよりも消費電力が大きくなっています。そのため、特定のインテル® AVX-512 命令は、ほかの命令よりも CPU のクロック周波数低下幅が大きくなることが予想されます。⁶ このクロック周波数の低下は、インテル® AVX-512 命令のスループットによって相殺されますが、メディアカーネルは引き続き古い世代の SIMD 命令 (すべてのカーネルがより広い幅によって利点が得られるわけではないため) と SIMD 変換に適していない単純な C コードに大きく依存するため、パフォーマンスが低下する可能性があります。

この記事は、インテル® AVX-512 の SIMD 命令を使用して x265 の計算負荷の高いカーネルを高速化した取り組みを紹介するケーススタディーです。エンコーダー全体のパフォーマンスを向上するため、CPU 周波数の低下を相殺する方法を説明します。この過程を通じて、HEVC エンコードの x265 でインテル® AVX-512 命令の使用が推奨される場合を示します。また、メディアカーネルを高速化する方法としてインテル® AVX-512 を選択する際の経験則を共有します。

主な取り組み

メディアカーネルでインテル® AVX-512 を使用する場合、微妙なバランスが必要となります。我々の経験から、次のことを推奨します。

- ・ インテル® AVX-512 で高速化可能なカーネルを選択する際は、計算とメモリーの比率を考慮すべきです。この比率が高い場合、インテル® AVX-512 の使用を推奨します。また、インテル® AVX-512 を使用する場合、キャッシュライン境界をまたぐロードを回避するため、バッファを 64B にアライメントします。
- ・ デスクトップ SKU とワークステーション SKU (例えば、テストに使用したインテル® Core™ i9-7900X プロセッサ) では、CPU クロック周波数の低下がわずかであるため、すべてのエンコーダー構成でインテル® AVX-512 カーネルを有効にできます。

- ・ サーバー SKU (例えば、テストに使用したインテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサ) では、アクティブなコア数に比例して、周波数の低下幅が大きくなります。そのため、インテル® AVX-512 では、クロックサイクルの利点が周波数のペナルティを相殺することで、エンコーダーのパフォーマンスを向上できる、ピクセルごとの計算量が多い場合にのみ有効にすべきです。

具体的には、Main10 プロファイルで slower または veryslow プリセットを使用して 4K コンテンツをエンコードする場合にのみインテル® AVX-512 を使用することを推奨します。その他の設定 (解像度/プロファイル/プリセット) では、エンコーダーのパフォーマンスに影響する可能性があるため、インテル® AVX-512 カーネルの使用は推奨しません。

この記事で紹介する結果と推奨事項は、評価や実験的近似に限定されず、コミュニティ全体がインテル® AVX-512 を使用してメディア・ワークロードを高速化する利点を理解するのに役立つでしょう。

「背景情報」セクションでは、この記事で紹介する技術資料に関する背景情報を示します。「インテル® AVX-512 で x265 カーネルを高速化する」セクションでは、高速化する x265 カーネルの選択と Main/Main 10 プロファイルでの結果を説明します。「インテル® AVX-512 で x265 エンコードを高速化する」セクションでは、Main/Main 10 プロファイルでのエンコーダー全体の結果を示します。そして最後のセクションでは、x265 でインテル® AVX-512 の使用が推奨される場合と、特定のカーネルを高速化するためインテル® AVX-512 を選択する際の一般的な推奨事項を提供します。また、今後の課題も提示します。

背景情報

背景情報のセクションでは、この記事で紹介する概念に関する背景情報を示します。「HEVC ビデオエンコード」では HEVC の背景情報を、「x265 オープンソース HEVC エンコーダー」では x265 における既存のパフォーマンス最適化手法に注目して述べます。「インテル® Xeon® スケーラブル・プロセッサ・プラットフォームについて」では、インテル® Xeon® スケーラブル・プロセッサの概要を提供し、「インテル® AVX-512 を使用する SIMD ベクトル化」では、インテル® AVX-512 アーキテクチャーについて詳しく述べます。

HEVC ビデオエンコード

HEVC は、広く普及している AVC 規格の後継として、2013 年に JCT-VC (ビデオ・コーディングに関する共同作業チーム) によってエンコード規格として批准されました。⁴ HEVC ビデオのエンコード/デコードプロセスは、画像の各ブロックを表すコーディング・ユニット (CU)、CU の動き補償予測を含むモードの決定を表す予測ユニット (PU)、および予測と実際のブロック間の残差のコード化方法を表す変換ユニット (TU) の 3 つのユニットを識別して処理を行います。

最初に、フレームがコーディング・ツリー・ユニット (CTU) と呼ばれる、オーバーラップしない最大のコーディング・ユニットに分割されます。次に、CTU が、さまざまなサイズ (64x64、32x32、16x16、8x8) の複数の CU に分割され、クワッドツリーを形成します。その後、(同じフレームまたは異なるフレームにある) 候補ブロックのセットから各 CU が予測されます。予測に使用されるブロックが同じフレーム内にある場合はイントラ予測ブロックと言われ、異なるフレーム内にある場合はインター予測ブロックと言われます。

イントラ予測ブロックは、予測ブロックと予測の角度を示すモードの組み合わせで構成されます。イントラ予測で許可されるモードは、DC、平面、角度モードと呼ばれ、予測ブロックのさまざまな角度を表します。インター予測ブロックは、予測に使用されたブロック (リファレンス・ブロック) と現在のブロックとリファレンス・ブロック間の差分を示す動きベクトル (MV) の組み合わせで構成されます。MV がゼロのブロックはマージモードを使

用し、それ以外は AMP (Advanced Motion Prediction) モードを使用します。スキップモードは、予測ブロックがソースと同一である (つまり、残余がない) 特殊なマージモードです。AMP モードは、CU と同じサイズの PU (2Nx2N PU) を使用するが、MV を計算するためさらに分割します (矩形および非対称 PU)。そして、オリジナル画像と予測画像の差として生成された残差は、予測モードに応じて、32x32 から最大 4x4 ブロックの TU を使用して量子化およびコード化されます。

インター、イントラ、CU、PU、および TU の選択プロセス全体は、ビッグデータ、人工知能 (AI)、ハイパフォーマンス・コンピューティング、エンタープライズクラス IT、クラウド、ストレージ、通信、IoT を含む広範な使用モデルに利点をもたらします。1.5 倍のメモリー帯域幅、統合ネットワーク/ファブリック、統合アクセラレーター (オプション)、広範なワークロード向けのパフォーマンスなどが得られます。x265 の結果は、前世代の Intel® Xeon® プロセッサ E5-2600 と比較して、オフラインエンコードにおいて 50 - 67% の大幅なスピードアップを示しています。これは、主にレート歪み最適化 (RDO) によるもので、ターゲット・ビットレートで歪みが最小化されること、または歪みによって表されるターゲット品質レベルでビットレートが最小化されることを保証します。RDO プロセス全体を通して、CU、PU、TU のさまざまな組み合わせが、いくつかのカーネルを使用するエンコーダーによって試されます。この記事では、これらのカーネルを Intel® AVX-512 命令を使用するように変換してベクトル化します。

HEVC エンコードは、ビデオエンコードで複数のプロファイルをサポートしており、それぞれのプロファイルは各ピクセルを表現する異なるビット数を示します。Main と Main10 プロファイルは、HEVC の代表的なプロファイルです (対応する AVC のプロファイルはそれぞれ Main と High プロファイルです)。ピクセルの各コンポーネントは、Main プロファイルでは最小 8 ビットで表され、値は 0 - 255 の範囲になります。Main10 プロファイルは、ピクセルあたり 10 ビットを使用し、ピクセルごとに 0 - 1023 の範囲でエンコードされたビデオにより詳細な表現が可能です。x265 エンコーダーは、HEVC 規格に準拠したビデオ圧縮を提供するオープンソースの HEVC です。⁷ VLC*、HandBrake、⁸ および FFMpeg*⁹ を含む複数のオープンソース・フレームワークに統合されており、業界標準のオープンソースの HEVC ビデオエンコーダーです。x265 エンコーダーは、Intel® アーキテクチャー、ARM*、PowerPC* を含む複数のプラットフォーム向けにアセンブリーレベルで最適化されています。

x265 エンコーダーは、複雑さを増す HEVC エンコードに対応するため、フレーム間とフレーム内の並列化手法を採用しています。¹⁰ フレーム間の並列化では、x265 はシステムレベルのソフトウェア・スレッドを使用して複数のフレームを並列にエンコードします。フレーム内の並列化では、x265 は HEVC 規格の波状並列処理 (WPP) ツールを利用します。この機能は、ブロックのエンコードを開始する前に、前の行からのイントラ予測に必要なブロックが確実に完了するようにしつつ、フレームの CTU の行を並列にエンコードすることを可能にします。つまり、現在の行の CTU のエンコードを開始する前に、前の行の次の CTU が確実に完了するようにします。これらの機能を組み合わせることで、公開されているリファレンス・エンコーダー HM と比較して、効率を損なうことなく大幅なスピードアップを達成できます。

Intel® Xeon® スケーラブル・プロセッサ・プラットフォームについて

Intel® Xeon® スケーラブル・プロセッサ (開発コード名 Purley) は、画期的な新しいレベルのパフォーマンスを一貫して提供するように設計されています。最先端のテクノロジーをベースにしており、Intel® Xeon® スケーラブル・プロセッサで改良されたマイクロアーキテクチャー機能を提供します。

Intel® AVX-512 を使用する SIMD ベクトル化

Intel® AVX-512 ベクトルユニットは、512 ビットのレジスターファイルを提供し、Intel® AVX2 と比較して、サイクルあたり 2 倍の並列データ操作が可能です。Intel® AVX-512 アーキテクチャーを使用するた

めカーネルをベクトル化する利点は明白ですが、このタスクを開始する前にメディア・ワークロードに関していくつか重要な点を確認する必要があります。第 1 に、この向上した並列処理を活用するのに十分な並列性がメディアカーネルにあるかです。第 2 に、この並列処理を利用する実行の割合は、アムダールの法則に従って平均的なスピードアップを期待できる十分な大きさであるかです。そして、第 3 に、このようなベクトル化を行うことで、シリアルコードやベクトル化されていないコードの実行に影響がないかです。

インテル® AVX-512 で x265 カーネルを高速化する

高速化の最初のステップとして、インテル® AVX-512 アセンブリー命令を使用して、高速化する x265 カーネルを選択しました。ベクトル化された SIMD コードを生成する自動化ツールはありますが、手書きのアセンブリーのほうが自動ベクトル化ツールよりも優れていることが分かりました。そのため、この手法を使用することにしました。このセクションでは、この手法をどのように実行したか、そして Main と Main10 プロファイルでのこれらのカーネルのサンプル実行で観測されたサイクルカウントのゲインについて詳しく述べます。

高速化するカーネルを選択する

Main と Main10 プロファイルでインテル® AVX-512 命令を利用して最適化するため、x265 の基本計算から 1,000 を超えるカーネルを選択しました。これらのカーネルは、リソース要件に基づいて選択されました。異なるブロックコピーとブロックフィル・カーネルのように頻繁なメモリアクセスを必要とするカーネルもあれば、DCT、iDCT、量子化カーネルのように計算を多用するカーネルもあります。また、それら 2 つをさまざまな割合で組み合わせたカーネルもあります。アセンブリー・ルーチンがアクセスするバッファを 64 バイトでアライメントすることで、キャッシュミスが減り、一般にインテル® AVX-512 カーネルにとって利点があることが分かりました。インテル® AVX-512 命令で最適化された Main と Main10 プロファイルのカーネルの一覧はそれぞれ付録 A1 と A2 にあります。

サイクルカウントの向上を評価するフレームワーク

x265 エンコーダーは、アセンブリー・カーネルの正当性とパフォーマンスを測定するツールとして、サンプル・テスト・ベンチマークを実装します。このベンチマークは、カーネルに対して有効な引数を受け取り、C プリミティブと対応するアセンブリー・カーネルを呼び出して、両方の出力バッファを比較します。ランダムに分散された値のセットを使用して、入力タイプで可能なすべてのコーナーケースを検証します。各アセンブリー・カーネルは 100 回呼び出され、正当性を保証するため C プリミティブの出力と照合されます。パフォーマンスの向上を測定するため、テスト・ベンチマークは 1,000 回の実行におけるアセンブリー・カーネルと C カーネル間のクロック数の差 (rdtsc 命令で取得) を測定して、その平均を報告します。

Main と Main10 プロファイルのカーネルのサイクルカウントの向上

図 2 は、インテル® AVX-512 を利用して高速化された Main プロファイルの 500 カーネルと、Main10 プロファイルの 600 を超えるカーネルのサイクルカウントの向上を示しています。それぞれの曲線においてカーネルは、対応するインテル® AVX-512 実装と比較したサイクルカウントのゲインで昇順にソートされています。付録 A は、インテル® AVX2 と比較したカーネルごとのサイクルカウントのゲインです。

Main と Main10 プロファイルのカーネルでは、平均サイクルカウントがインテル® AVX2 カーネルよりもそれぞれ 33% と 40% 向上しました。大幅なゲインの理由はいくつかあります。Main10 プロファイルでは、x265 は 16 ビットで各ピクセルを表します。一方、Main プロファイルでは、8 ビットを使用します。Main10 は技術的には 10 ビットで十分ですが、16 ビットを使用することで、ソフトウェアのすべてのデータ構造を簡素化でき

ます。そのため、同じピクセル数に対する作業量が 2 倍になります。計算量が多いため、インテル® AVX2 とインテル® AVX-512 のゲインを比較した場合、Main10 プロファイルのカーネルのほうが Main プロファイルのカーネルよりもゲインが大きくなります。このことから、カーネルレベルでは、x265 を高速化するためインテル® AVX-512 を使用することで大きな利点が得られることが分かります。しかしこれは、インテル® AVX-512 命令を使用した場合と、インテル® AVX2 命令を使用した場合のクロック周波数低下の比較を考慮していません。次のセクションでは、この影響を考慮した全体のエンコード時間への影響について考えます。

インテル® AVX-512 で x265 エンコードを高速化する

このセクションでは、実際の x265 エンコードにインテル® AVX-512 カーネルを使用する影響を考察します。「テスト構成」では、選択したビデオ、使用した x265 プリセット、テストマシンのシステム構成を含むテスト構成について説明します。「インテル® Core™ プロセッサ上でのエンコード」では、インテル® Core™ i9-7900X プロセッサを搭載したワークステーションマシン上での結果を示し、「インテル® Xeon® スケーラブル・プロセッサ上でのエンコード」では、2 基のインテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサを搭載した典型的なハイエンドサーバー上での結果を示します。

テスト構成

このテストでは、主に Main プロファイルの 1080p ビデオのエンコードと Main10 プロファイルの 4K ビデオのエンコードに注目しました。テストには、4 つの一般的な 1080p クリップ (crowdrun、ducks_take_off、park_joy、old_town_cross) と 3 つの 4K クリップ (Netflix_Boat、Netflix_FoodMarket、Netflix_Tango) を使用しました。¹⁰ 付録 B に使用したビデオのスクリーンショットと詳細があります。次のビットレート (Kbps 単位) で Main プロファイルの 1080p をエンコードします: 1000、3000、5000、および 7000。4K クリップでは、Main10 プロファイルは次のビットレート (Kbps 単位) をターゲットにします: 8000、10000、12000、および 14000。

セクション 3 で示したすべてのカーネルを含むバージョンの x265 でこれらのビデオをエンコードします。これらのカーネルは、x265 のデフォルトのランチの一部として提供されました。カーネルは、デフォルトでは無効に設定されており、x265 コマンドライン・インターフェイスで `-asm avx512` オプションを指定して有効にできます。

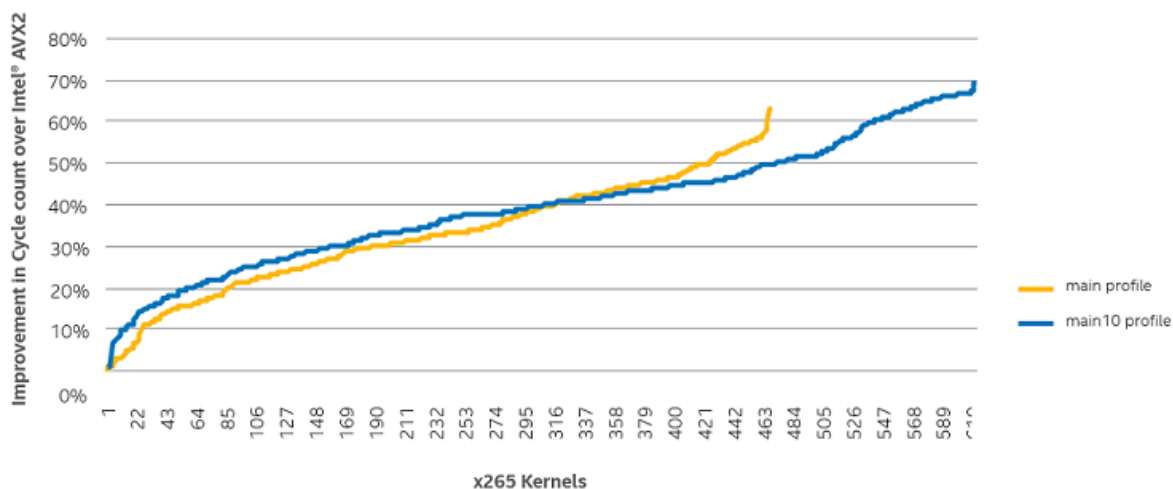


図 2. インテル® AVX-512 カーネルと対応するインテル® AVX2 カーネルを使用した場合の Main と Main10 プロファイルのサイクルカウントのゲイン

実験では、x265 の広範なユースケースを代表する 4 つのプリセットに注目しました: ultrafast、veryfast、medium、および veryslow。これらのプリセットは、エンコード効率と 1 秒あたりのフレーム数 (FPS) の異なるトレードオフを示しています。veryslow プリセットは、最も効率良いエンコードが可能ですが、最も低速です。OTT などのオフラインエンコードのユースケースに適しています。ultrafast プリセットは、x265 で最速の設定ですが、エンコード効率は最低です。veryfast と medium プリセットは、パフォーマンスとエンコード効率のバランスが良く、トレードオフの中間点と言えます。通常、より効率的なプリセットでは HEVC ツールが多く使用されるため、低効率のプリセットよりもピクセルあたりの計算量が増えます。前述のセクションの結果から分かる通り、インテル® AVX-512 カーネルは、ピクセルあたりの計算量が多いほうが大きなスピードアップを得られる傾向にあるため、これは重要です。

インテル® Core™ プロセッサ上でのエンコード

図 3 は、インテル® Core™ i9-7900X プロセッサを搭載したワークステーション構成において、x265 の単一のインスタンスでインテル® AVX2 を使用した場合と比較して、インテル® AVX-512 を使用した場合の Main と Main10 の 1080p と 4K ビデオのエンコードパフォーマンスを示しています。システム構成の詳細は、付録 C にあります。単一のインスタンスは、このシステムで HEVC エンコードを実行する典型的なユースケースのすべての構成において CPU 使用率が高くなります。

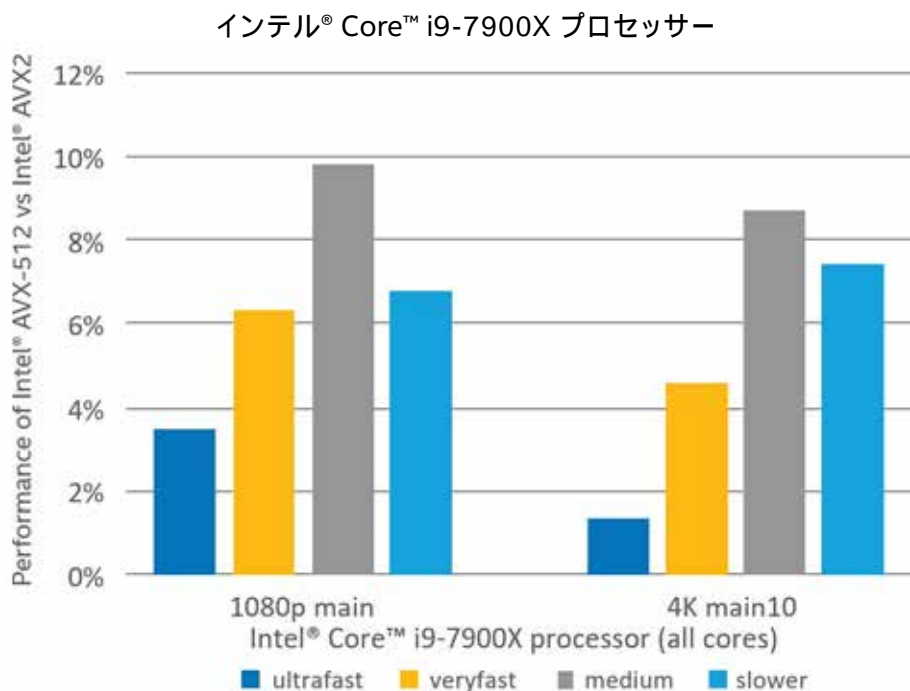


図 3. インテル® Core™ i9-7900X プロセッサを搭載したワークステーション構成で測定された x265 の単一のインスタンスでインテル® AVX-512 カーネルを使用した場合のエンコーダーパフォーマンス

図 3 の結果から、すべてのプロファイルとプリセットにおいて、インテル® AVX-512 カーネルを使用することでパフォーマンス・ゲインが得られることが分かります。インテル® Core™ i9-7900X プロセッサベースのシステムでは、測定結果は大幅なクロック周波数の低下を示しませんでした。そのため、カーネルのサイクルカウントの向上は、エンコーダーパフォーマンスに直接反映されます。エンコードごとのエンコーダーパフォーマンスの比較では、インテル® AVX2 よりもインテル® AVX-512 のパフォーマンスが低くなるコマンドラインはありませんでした。

そのため、インテル® Core™ i9-7900X プロセッサと周波数の低下がわずかである同様のシステムでは、x265 を使用する場合、すべてのエンコード・プロファイルと解像度でインテル® AVX-512 カーネルを有効にすることを推奨します。

インテル® Xeon® スケーラブル・プロセッサ上でのエンコード

このセクションでは、2 基のインテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサを搭載したハイエンドサーバー構成 (デュアルソケット構成、CPU ごとに 56 ハイパースレディング・コア) で、インテル® AVX-512 により高速化された x265 を使用した場合の結果を示します。システム構成の詳細は、付録 C を参照してください。

8 スレッドと 16 スレッドを使用した x265 の単一インスタンスのパフォーマンス

図 4 は、Main プロファイルで 1080p ビデオのエンコードと Main10 プロファイルで 4K ビデオのエンコードにインテル® AVX-512 カーネルを使用する場合と、インテル® AVX2 命令のみのカーネルを使用する場合を比較した、x265 の単一インスタンスのパフォーマンスです。グラフでは、CPU 上のアクティブなコア数を増やした場合の影響を理解するため、インスタンスごとに 8 スレッドと 16 スレッドの 2 つの構成を示しています。インスタンスごとのスレッド数は、x265 ライブラリーの --pools オプションで制御します。

グラフから、この 2 つの構成では、Main10 プロファイルの 4K コンテンツのエンコードのほうが、Main プロファイルの 1080p コンテンツのエンコードよりもゲインが大きいです。また、使用した解像度とプロファイルでは、ピクセルごとの作業量が多いプリセット (veryslow のように効率の良いプリセット) のほうが、高速なプリセットよりも大きなゲインが得られました。実際、Main プロファイルの 1080p コンテンツでは、平均してパフォーマンスの低下が見られました。これは、特定の構成においてピクセルごとの作業量が多いほうがインテル® AVX-512 を使用することで優れた利点が得られるという前述の結果と一致しています。さらに、これらのプロファイルの S 字カーブ (簡略化のためここでは示していません) を調査したところ、4K Main10 の veryslow 設定以外のいくつかのエンコーダー・コマンドラインでは、インテル® AVX2 と比較してパフォーマンスが低下しました。

そのため、インテル® AVX-512 が有効なカーネルは、Main10 プロファイルの veryslow 設定で 4K コンテンツをエンコードする場合のみ使用することを推奨します。ほかのプリセットとエンコーダー設定では、クロック周波数の低下を相殺してサイクルカウントのゲインを達成するのに十分なピクセルごとの作業量が得られません。

図 4 からもう 1 つ分かることは、x265 の単一インスタンスで 8 スレッドを使用した場合のほうが、16 スレッドを使用した場合よりも一般にシステム全体のパフォーマンス・ゲインが大きくなることです。さらなる解析により、インテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサでインテル® AVX-512 命令を使用するコア数が増えると、周波数がさらに低下し、インテル® AVX-512 命令の使用によるゲインが小さくなることが分かりました。通常のサーバーでは、エンコーダー・ベンダーはすべての利用可能な CPU コアを利用して、スループットを最大化しようとします。

このユースケースについては、セクション 4.3.2 で説明します。セクション 4.3.2 では、4K Main10 エンコードでサーバーを飽和させ、アクティブなコア数の増加により周波数がさらに低下してゲインが消滅するかどうかを調査します。

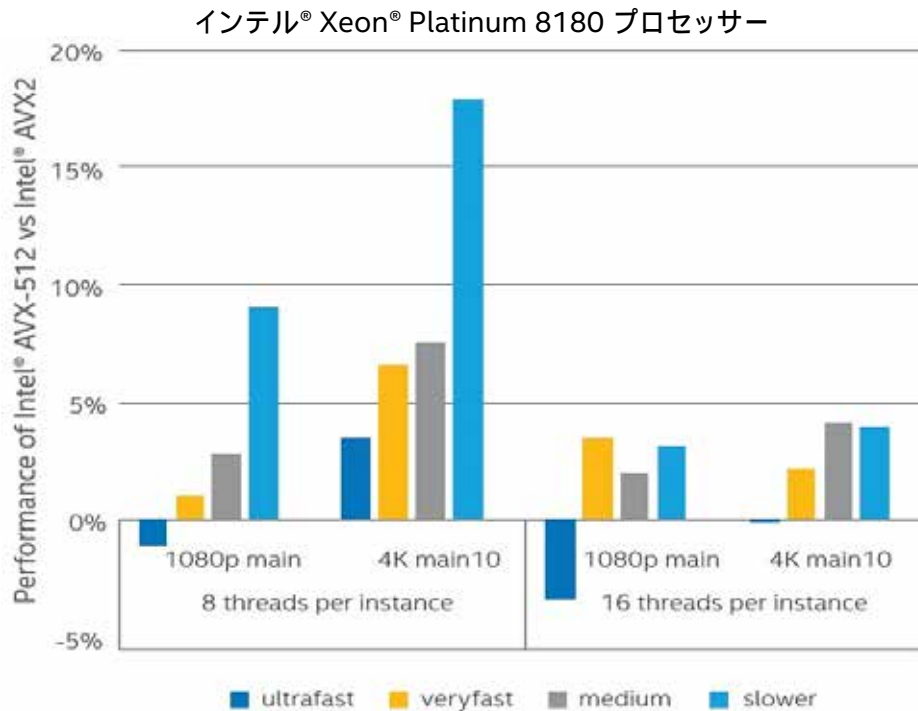


図 4. 2 基のインテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサを搭載したサーバー構成において 8 または 16 スレッドでインテル® AVX-512 を使用した場合のインテル® AVX2 と比較した x265 の単一のインスタンスの相対パフォーマンス

x265 の複数のインスタンスでインテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサを飽和させる

Main10 プロファイルで 4K をエンコードする場合に、アクティブなコア数を増やすことでパフォーマンスが低下するか調査するため、インスタンスごとに 16 スレッドを使用して、デュアルソケットのインテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサベースのサーバーの一方または両方の CPU を飽和させました。インテル® AVX-512 を使用してすべての x265 インスタンスで同じクリップを異なるビットレートでエンコードした場合の合計 FPS を測定し、インテル® AVX2 を使用した場合と比較した結果を図 5 に示します。

インテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサ - シングルまたはデュアルソケットの飽和

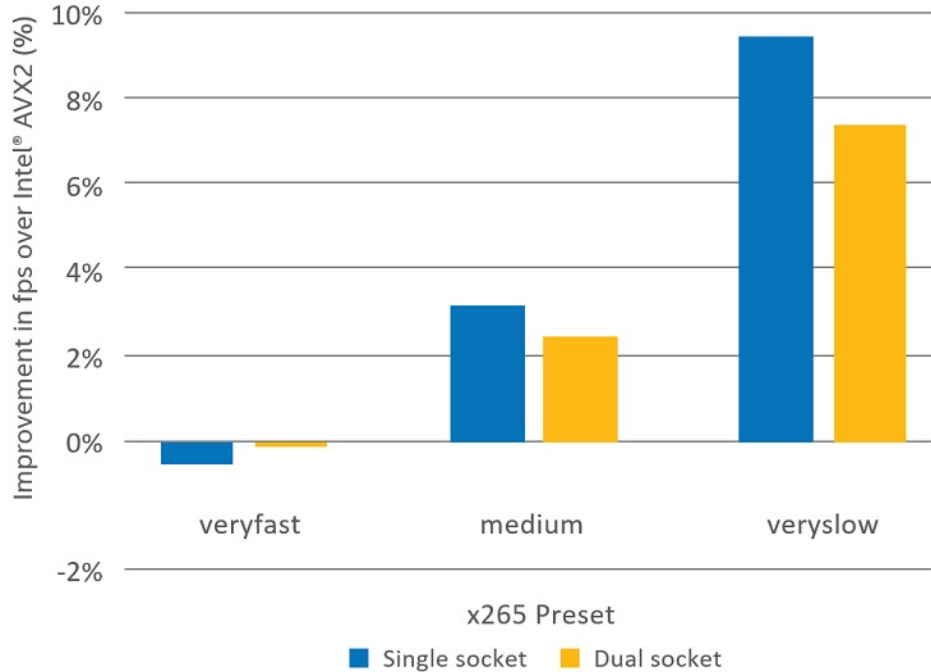


図 5. x265 インスタンスでのインテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサのシングルソケットとデュアルソケットの飽和

図 5 では、CPU の一方または両方が飽和しても、Main10 の 4K ビデオのエンコードは、インテル® AVX2 を使用した場合と比較してパフォーマンス・ゲインが得られることを示しています。しかし、より少ないコアを使用する x265 の単一インスタンスの場合と比較すると、ゲインが小さいことが分かります。さらに、veryfast や medium などの低効率なプリセットでは、アクティブなコア数を増やすと周波数がさらに低下してゲインが消滅します。

これらの結果は、インテル® AVX-512 カーネルは Main10 で veryslow プリセットを使用して 4K コンテンツをエンコードする場合にのみ有効にすべきであるという我々の推奨を裏付けるものです。ピクセルごとの計算量が少ないプリセットでは、インテル® AVX-512 カーネルを使用すると、インテル® AVX2 カーネルを使用する場合よりもパフォーマンスが低下する可能性があります。

まとめと今後の課題

この記事では、新しいインテル® Xeon® Scalable プロセッサで利用可能なインテル® AVX-512 命令を使用して、オープンソースの HEVC エンコーダー x265 を高速化した事例を紹介しました。この事例では、CPU 周波数の低下がサイクルカウントの利点によって相殺されるようにインテル® AVX-512 を使用した高速化に適したカーネルを選択し、エンコーダー・パフォーマンスを向上するためピクセルごとの計算量のバランスの良いエンコーダー構成を選択する必要性がありました。

推奨事項

メディアカーネルでインテル® AVX-512 を使用する場合、微妙なバランスが必要となります。我々の経験から、次のことを推奨します。

- ・ インテル® AVX-512 で高速化可能なカーネルを選択する際は、計算とメモリーの比率を考慮すべきです。この比率が高い場合、インテル® AVX-512 の使用を推奨します。また、インテル® AVX-512 を使用する場合、キャッシュライン境界をまたぐロードを回避するため、バッファを 64B にアライメントします。
- ・ デスクトップ SKU とワークステーション SKU (例えば、テストに使用したインテル® Core™ i9-7900X プロセッサ) では、CPU クロック周波数の低下がわずかであるため、すべてのエンコーダー構成でインテル® AVX-512 カーネルを有効にできます。
- ・ サーバー SKU (例えば、テストに使用したインテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサ) では、アクティブなコア数に比例して、周波数の低下幅が大きくなります。そのため、インテル® AVX-512 では、クロックサイクルの利点が周波数のペナルティを相殺することで、エンコーダーのパフォーマンスを向上できる、ピクセルごとの計算量が多い場合にのみ有効にすべきです。

具体的には、slower/veryslow プリセットを使用して Main10 プロファイルで 4K コンテンツをエンコードする場合にのみインテル® AVX-512 を使用することを推奨します。その他の設定 (解像度/プロファイル/プリセット) では、エンコーダーのパフォーマンスに影響する可能性があるため、インテル® AVX-512 カーネルの使用は推奨しません。

この記事で紹介する結果と推奨事項は、評価や実験的近似に限定されず、コミュニティ全体がインテル® AVX-512 を使用してメディアワークロードを高速化する利点を理解するのに役立つでしょう。

今後の課題

インテル® AVX-512 を使用して x265 を高速化する作業を通して、今後取り組みが必要ないいくつかの課題が明らかになりました。高速化されたカーネルは、公開メーリングリストから入手できます。インテル® AVX-512 によりさらなる高速化を実現するため、今後次の課題に取り組む必要があります: (1) x265 で利用可能なほかの解像度とプリセットのビデオでのインテル® AVX-512 の使用に関する詳細な解析、(2) CPU 周波数を監視してインテル® AVX-512 カーネルを動的に有効/無効にする方法の実現、および (3) ワーカースレッドを異なるタイプのスレッドに分割して、その一部のみがインテル® AVX-512 を実行することで CPU 周波数が低下するコアの数を制限するようにエンコーダーを再構築。我々は引き続きこれらのソリューションの開発に取り組み、オープンソースに貢献していきます。皆さんもぜひ <http://x265.org> (英語) でプロジェクトに貢献してください。

謝辞

この取り組みの一部には、インテル社からのエンジニアリング臨時援助金を使用されました。この取り組みを通じて幅広いサポートを提供してくれた MulticoreWare の多くの開発者とエンジニアに感謝します。特に、Thomas A. Vaughan 氏のアドバイスと Min Chen 氏のアセンブリーパッチに関する専門的な助言に謝意を表します。

付録 A

A1 - Main プロファイルの 1 サイクルあたりの命令数 (IPC) ゲイン

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
sad	0.16%	i422 chroma_vss	32.70%	i420 chroma_vpp	23.19%	luma_vss	43.18%
pixelavg_pp	0.87%	luma_vss	32.89%	addAvg	23.37%	luma_vss	43.35%
i444 chroma_vps	1.14%	sad_x3	33.01%	addAvg	23.38%	i444 chroma_hpp	43.43%
i444 chroma_vps	1.18%	luma_vps	33.05%	i444 chroma_hps	23.53%	ssd_s	43.57%
pixelavg_pp	1.41%	i420 chroma_hpp	33.08%	i420 chroma_hps	23.77%	luma_hps	43.68%
convert_p2s	1.95%	i444 chroma_hpp	33.14%	var	23.95%	luma_vss	43.75%
i420 chroma_vps	2.45%	sad_x4	33.14%	i420 chroma_hpp	24.03%	luma_hps	43.84%
i420 chroma_vps	2.72%	i444 chroma_vss	33.16%	i422 chroma_vpp	24.11%	luma_hps	43.94%
i422 chroma_hps	2.83%	i420 chroma_vss	33.16%	i444 chroma_vss	24.15%	luma_vsp	44.06%
i420 p2s	3.21%	copy_ps	33.33%	i422 chroma_vss	24.15%	luma_vsp	44.11%
i444 p2s	3.21%	i420 copy_ps	33.33%	i420 chroma_vss	24.15%	sub_ps	44.11%
sad_x3	3.29%	i444 chroma_vss	33.34%	i420 chroma_vps	24.20%	i444 chroma_hpp	44.15%
i420 chroma_vps	3.62%	i422 chroma_vss	33.34%	i444 chroma_vpp	24.20%	convert_p2s	44.33%
sad_x4	4.50%	i420 chroma_vss	33.34%	i420 chroma_vpp	24.20%	i444 chroma_hpp	44.35%
sad	4.62%	i422 copy_ps	33.43%	sad	24.21%	luma_vss	44.42%
i420 chroma_hps	4.90%	i444 chroma_vss	33.43%	i444 chroma_vps	24.22%	luma_hps	44.43%
i420 chroma_hps	5.19%	i422 chroma_vss	33.43%	i420 chroma_vps	24.22%	luma_hpp	44.48%
pixel_satd	5.42%	i420 chroma_hpp	33.55%	i444 chroma_hps	24.25%	luma_vpp	44.54%
i444 chroma_vps	5.43%	i422 chroma_hpp	33.57%	i420 chroma_hpp	24.42%	luma_vss	44.61%
i422 chroma_hps	5.82%	dequant_normal	33.60%	sad_x4	24.53%	cpy1Dto2D_shl	44.61%
i444 chroma_vps	6.78%	sad_x4	33.62%	i444 chroma_hps	24.57%	luma_vsp	44.62%

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
dct	7.06%	i444 chroma_vss	33.89%	i422 chroma_hps	24.65%	luma_vsp	44.66%
i444 chroma_hps	7.08%	i420 chroma_vss	33.89%	psyCost_pp	24.89%	luma_vss	44.70%
i444 chroma_hps	7.26%	sad_x3	33.92%	i422 chroma_vps	25.00%	luma_vpp	44.74%
i422 chroma_vss	8.85%	i420 pixel_satd	34.01%	i444 chroma_vss	25.17%	luma_vsp	44.85%
luma_vss	9.76%	i444 chroma_hps	34.02%	i422 chroma_vss	25.17%	i422 copy_sp	45.20%
i422 chroma_hps	10.27%	luma_vps	34.04%	i420 chroma_vss	25.17%	getResidual32	45.24%
i444 chroma_hps	11.00%	i444 chroma_hpp	34.20%	i422 chroma_vps	25.66%	luma_vpp	45.30%
i444 chroma_hps	11.14%	i420 pixel_satd	34.20%	luma_vps	25.82%	luma_hps	45.35%
sad	11.26%	i420 chroma_hpp	34.23%	i444 chroma_vps	25.89%	i444 chroma_hpp	45.41%
i420 chroma_hps	11.38%	i444 chroma_vss	34.43%	i444 chroma_vps	25.92%	luma_hpp	45.49%
pixel_sa8d	11.55%	i422 chroma_vss	34.43%	i420 chroma_hps	25.95%	convert_p2s	45.52%
i444 chroma_hps	11.91%	i420 chroma_vss	34.43%	i420 chroma_vps	26.07%	luma_hps	45.58%
luma_vpp	11.96%	i422 chroma_vsp	34.59%	convert_p2s	26.25%	luma_vpp	45.62%
i422 chroma_hps	12.10%	i444 chroma_vss	34.71%	i422 chroma_vps	26.42%	convert_p2s	45.62%
copy_pp	12.54%	i444 chroma_vss	34.76%	i444 chroma_vps	26.56%	luma_vpp	45.69%
ssd_s	12.58%	addAvg	34.88%	i444 chroma_vss	26.71%	cpy2Dto1D_shl	45.75%
i420 chroma_vps	12.58%	addAvg	35.14%	i422 chroma_vss	26.71%	i422 addAvg	45.76%
i444 chroma_hps	12.79%	sad	35.43%	i420 chroma_vss	26.71%	convert_p2s	46.00%
idct	13.32%	ssd_ss	35.45%	sad_x4	26.80%	i420 add_ps	46.09%
luma_vps	13.78%	i444 chroma_vss	35.51%	i422 chroma_hpp	27.06%	add_ps	46.10%
i444 chroma_hps	13.87%	i420 pixel_satd	35.55%	i422 chroma_hps	27.13%	luma_vsp	46.14%
sad	13.88%	pixelavg_pp	35.56%	luma_hpp	27.15%	luma_hps	46.29%
copy_cnt	14.25%	luma_vpp	35.62%	i420 pixel_satd	27.23%	luma_vss	46.31%
luma_vpp	14.28%	luma_vpp	36.21%	i444 chroma_vss	27.24%	i444 chroma_vsp	46.52%
pixel_satd	14.45%	i420 chroma_hpp	36.45%	i422 chroma_vss	27.24%	i422 chroma_vsp	46.52%

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
idct	14.49%	i422 chroma_hpp	36.65%	luma_hpp	27.29%	i420 chroma_vsp	46.52%
pixel_satd	14.92%	i422 chroma_hpp	36.76%	luma_vps	27.45%	luma_hps	46.65%
pixel_satd	14.99%	sad	36.76%	psyCost_pp	27.62%	pixelavg_pp	46.67%
sad	15.21%	i422 chroma_hpp	36.81%	luma_vsp	27.72%	luma_vss	46.88%
idct	15.23%	copy_pp	36.82%	i422 chroma_hps	28.00%	i422 addAvg	46.88%
sad_x3	15.32%	pixelavg_pp	36.84%	pixel_satd	28.50%	luma_hps	46.90%
i444 chroma_vpp	15.47%	convert_p2s	36.87%	cpy2Dto1D_shl	28.69%	luma_vsp	46.97%
i422 chroma_vpp	15.47%	i420 p2s	36.87%	luma_vps	28.71%	i422 p2s	47.10%
i420 chroma_vpp	15.47%	i444 p2s	36.87%	i444 chroma_hpp	28.78%	copy_pp	47.11%
pixel_satd	15.52%	i444 chroma_hpp	37.07%	i420 pixel_satd	28.80%	luma_vss	47.64%
pixel_satd	15.62%	luma_vpp	37.11%	i422 pixel_satd	28.81%	i444 chroma_hpp	47.83%
pixel_satd	15.66%	luma_vss	37.49%	i422 pixel_satd	28.95%	i422 addAvg	47.85%
sad_x3	15.70%	addAvg	37.76%	luma_vss	29.26%	luma_hps	48.46%
pixel_satd	15.75%	i444 chroma_vps	37.90%	i444 chroma_vss	29.29%	copy_ps	48.57%
i420 chroma_hps	15.83%	i444 chroma_vss	38.04%	i420 chroma_hps	29.42%	sub_ps	48.83%
copy_pp	15.93%	i444 chroma_vps	38.05%	luma_vpp	29.43%	luma_hpp	48.97%
luma_vpp	16.10%	i444 chroma_vps	38.23%	scale1D_128to64	29.50%	i422 add_ps	49.02%
nquant	16.33%	sad	38.42%	luma_vss	29.59%	i444 chroma_vsp	49.43%
sad	16.35%	i444 chroma_hpp	38.45%	i444 chroma_vpp	29.69%	i420 sub_ps	49.46%
i444 chroma_vpp	16.39%	Weight_sp	38.48%	i422 chroma_vpp	29.69%	add_ps	49.50%
i420 chroma_hps	16.60%	i444 chroma_hpp	38.55%	i420 chroma_vpp	29.69%	i422 sub_ps	49.52%
i444 chroma_vpp	17.02%	sad	38.56%	i422 chroma_hps	29.71%	i420 addAvg	49.74%
i422 chroma_vpp	17.02%	luma_hpp	38.79%	i422 pixel_satd	29.75%	convert_p2s	49.75%
i420 chroma_vpp	17.02%	pixel_satd	39.15%	i444 chroma_vpp	29.82%	i422 p2s	49.75%
pixel_satd	17.08%	luma_hpp	39.21%	i422 chroma_vpp	29.82%	i444 p2s	49.75%

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
luma_vps	17.10%	i444 chroma_hpp	39.30%	luma_vss	29.91%	luma_vss	49.84%
luma_vps	17.36%	i444 chroma_vps	39.39%	i444 chroma_vss	29.92%	luma_hpp	50.00%
i444 chroma_vss	17.55%	addAvg	39.51%	i422 chroma_vss	29.92%	copy_sp	50.11%
i420 chroma_vss	17.55%	i420 chroma_hpp	39.55%	i420 chroma_vss	29.92%	luma_vss	50.22%
pixel_satd	17.59%	i422 pixel_satd	39.57%	luma_vps	30.19%	luma_hpp	50.61%
pixel_satd	17.66%	i422 chroma_hpp	39.61%	sad_x4	30.24%	luma_hpp	51.19%
i444 chroma_vss	18.42%	convert_p2s	39.78%	sad	30.30%	i444 chroma_vsp	51.23%
i422 chroma_vss	18.42%	i420 p2s	39.78%	luma_vps	30.37%	luma_hpp	51.70%
i420 chroma_vss	18.42%	i422 p2s	39.78%	luma_vps	30.39%	nonPsyRdoQuant	51.74%
i444 chroma_vpp	18.49%	i444 p2s	39.78%	i444 chroma_vpp	30.39%	i444 chroma_vsp	52.08%
i420 chroma_vpp	18.49%	copy_sp	39.93%	i422 chroma_vpp	30.39%	copy_pp	52.17%
luma_vps	18.50%	i420 addAvg	40.02%	i420 chroma_vpp	30.39%	i444 chroma_vsp	52.22%
luma_vpp	18.51%	luma_hps	40.04%	ssd_ss	30.44%	i444 chroma_vsp	52.28%
sad_x3	18.99%	i444 chroma_hpp	40.07%	i422 chroma_hpp	30.45%	nonPsyRdoQuant	52.32%
copy_pp	19.76%	addAvg	40.64%	i420 pixel_satd	30.53%	i422 copy_ss	52.45%
luma_vss	19.80%	luma_vsp	40.87%	i422 chroma_vpp	30.54%	nonPsyRdoQuant	52.56%
pixel_satd	19.89%	i444 chroma_vsp	40.96%	i444 chroma_hpp	30.54%	i444 chroma_vsp	52.77%
sad	20.09%	i420 chroma_vsp	40.96%	i422 chroma_hpp	30.56%	i422 chroma_vsp	52.77%
sad_x3	20.26%	luma_vss	41.01%	i444 chroma_hpp	30.63%	blockfill_s	52.93%
i444 chroma_hps	20.52%	i420 copy_sp	41.12%	i420 chroma_hpp	30.85%	i444 chroma_vsp	53.30%
i420 chroma_hps	20.80%	copy_cnt	41.14%	luma_vsp	30.95%	i422 chroma_vsp	53.30%
psyCost_pp	21.15%	luma_vsp	41.16%	sad_x4	30.95%	i420 chroma_vsp	53.30%
i444 chroma_hps	21.17%	Weight_pp	41.23%	i422 chroma_vss	30.99%	i422 chroma_vsp	53.36%
pixel_satd	21.19%	luma_hps	41.42%	i444 chroma_hps	31.12%	i444 chroma_vsp	54.34%
pixel_satd	21.21%	addAvg	41.84%	i444 chroma_vpp	31.17%	i422 chroma_vsp	54.34%
quant	21.23%	i420 addAvg	41.87%	i444 chroma_vpp	31.20%	i420 chroma_vsp	54.34%
sad_x3	21.29%	luma_vsp	41.99%	sad	31.29%	psyRdoQuant	54.44%

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
i444 chroma_vpp	21.42%	luma_hps	42.05%	luma_vsp	31.33%	luma_hpp	54.62%
i422 chroma_vpp	21.42%	convert_p2s	42.13%	sad_x3	31.34%	i444 chroma_vsp	54.64%
i420 chroma_vpp	21.42%	i420 p2s	42.13%	i422 pixel_satd	31.46%	i420 chroma_vsp	54.64%
i420 chroma_vps	21.60%	i422 p2s	42.13%	luma_hps	31.52%	luma_hpp	54.78%
pixel_satd	21.61%	i444 p2s	42.13%	i444 chroma_vpp	31.57%	luma_hpp	55.06%
i444 chroma_vps	21.69%	i444 chroma_vsp	42.31%	pixelavg_pp	31.62%	luma_hpp	55.40%
i422 chroma_hps	21.99%	i422 chroma_vsp	42.31%	luma_vps	31.76%	copy_pp	55.41%
i420 addAvg	22.01%	i420 chroma_vsp	42.31%	i444 chroma_hps	31.78%	psyRdoQuant	55.70%
luma_vsp	22.09%	luma_vsp	42.35%	sad_x3	31.95%	psyRdoQuant	55.72%
i444 chroma_vps	22.27%	i420 chroma_hpp	42.43%	i444 chroma_vss	31.96%	var	55.75%
i422 chroma_vps	22.41%	nonPsyRdoQuant	42.51%	i420 chroma_vss	31.96%	copy_ss	56.00%
sad_x4	22.44%	luma_hps	42.54%	i422 chroma_vss	32.01%	i444 chroma_vsp	56.36%
var	22.51%	addAvg	42.56%	i444 chroma_hpp	32.12%	i422 chroma_vsp	56.36%
i444 chroma_vpp	22.64%	luma_hps	42.58%	var	32.17%	i420 chroma_vsp	56.36%
i420 chroma_vpp	22.64%	luma_vss	42.82%	i420 chroma_hpp	32.32%	i420 copy_ss	56.63%
sad_x4	22.84%	i422 addAvg	42.93%	i444 chroma_hps	32.44%	i444 chroma_vsp	57.60%
i444 chroma_vpp	22.87%	luma_vpp	42.97%	luma_vsp	32.61%	i420 chroma_vsp	57.60%
i422 chroma_vpp	22.87%	dequant_scaling	42.98%	i444 chroma_vss	32.67%	copy_pp	58.33%
i422 chroma_hpp	22.92%	luma_hpp	42.99%	i420 chroma_vss	32.67%	copy_ss	60.09%
sad_x4	23.09%	i444 chroma_vsp	43.05%	i444 chroma_vss	32.69%	psyRdoQuant	62.80%
i444 chroma_vpp	23.19%	i422 chroma_vsp	43.05%	i422 chroma_vss	32.69%	i444 chroma_vsp	62.98%
				i420 chroma_vss	32.69%	i420 chroma_vsp	62.98%

A2 - Main10 プロファイルの IPC ゲイン

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
convert_p2s	1.26%	i422 chroma_hps	39.92%	i422 chroma_vpp	29.64%	i444 chroma_hpp	49.20%
i420 p2s	1.26%	i422 p2s	40.30%	i420 chroma_vpp	29.64%	i444 chroma_hps	49.45%
i444 p2s	1.26%	luma_hpp	40.35%	i444 chroma_vsp	29.82%	cpy2Dto1D_shl	49.70%
addAvg	1.86%	i422 chroma_hpp	40.52%	i422 chroma_vsp	29.82%	luma_hvpp	49.80%
addAvg	6.88%	copy_cnt	40.55%	i420 chroma_vsp	29.82%	luma_vss	49.84%
dct	7.06%	luma_vpp	40.58%	luma_vss	29.91%	i420 chroma_hps	49.85%
sad_x3	7.65%	luma_vsp	40.59%	i444 chroma_vss	29.92%	convert_p2s	49.87%
sad	7.74%	i444 chroma_vps	40.60%	i422 chroma_vss	29.92%	i420 p2s	49.87%
sad	8.29%	i422 chroma_vps	40.60%	i420 chroma_vss	29.92%	i422 p2s	49.87%
i420 addAvg	8.36%	i420 chroma_vps	40.60%	i444 chroma_vps	29.93%	i422 p2s	49.87%
sad_x3	8.77%	sad_x3	40.64%	i422 chroma_vps	29.93%	i444 p2s	49.87%
luma_vss	9.76%	nonPsyRdoQuant	40.70%	i420 chroma_vps	29.93%	luma_hps	49.94%
intra_pred_ang27	9.79%	add_ps	40.71%	luma_vsp	30.06%	i422 chroma_hps	50.07%
cpy2Dto1D_shl	10.13%	sad_x4	40.73%	i444 chroma_vsp	30.11%	i444 chroma_hpp	50.13%
sad_x3	10.81%	luma_vpp	40.73%	i422 chroma_vsp	30.11%	luma_vss	50.22%
sad_x4	10.96%	copy_pp	40.81%	i420 chroma_vsp	30.11%	luma_hpp	50.25%
i420 addAvg	11.05%	i422 chroma_vps	40.88%	pixel_satd	30.30%	i420 chroma_vpp	50.28%
pixel_satd	11.05%	luma_vss	41.01%	i422 pixel_satd	30.30%	luma_hps	50.67%
i420 pixel_satd	11.05%	i444 chroma_vsp	41.02%	i422 pixel_satd	30.35%	addAvg	50.67%
i422 pixel_satd	11.05%	i420 chroma_vsp	41.02%	add_ps	30.69%	i422 addAvg	50.67%
luma_vsp	12.64%	i444 chroma_vsp	41.05%	sad	30.94%	luma_hpp	50.75%
copy_cnt	13.29%	i420 chroma_vsp	41.05%	dequant_normal	31.10%	i420 chroma_hpp	50.82%
idct	13.32%	sad	41.06%	sad	31.37%	copy_pp	50.95%
i444 chroma_vps	14.44%	intra_pred_ang34	41.06%	pixel_satd	31.43%	i422 addAvg	50.99%
i422 chroma_vps	14.44%	convert_p2s	41.09%	i420 pixel_satd	31.43%	luma_hps	51.17%
i420 chroma_vps	14.44%	i444 p2s	41.09%	i422 pixel_satd	31.43%	i422 chroma_hpp	51.22%
idct	14.49%	nonPsyRdoQuant	41.21%	i444 chroma_vpp	31.60%	i444 chroma_hpp	51.37%
i444 chroma_vpp	14.84%	sad_x4	41.22%	i422 chroma_vss	31.76%	luma_hpp	51.48%
idct	15.23%	i422 chroma_vpp	41.25%	i444 chroma_vss	31.96%	luma_hps	51.57%
luma_vsp	15.24%	i420 chroma_vpp	41.25%	i420 chroma_vss	31.96%	copy_ss	51.58%
sad_x3	15.53%	i420 chroma_vpp	41.36%	sad	31.99%	luma_hpp	51.63%
addAvg	15.60%	i444 chroma_vsp	41.40%	psyCost_pp	32.12%	luma_hps	51.64%
i422 chroma_vpp	15.71%	luma_vpp	41.43%	i420 chroma_hps	32.32%	luma_hps	51.65%

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
i420 chroma_vpp	15.71%	luma_hvpp	41.46%	i422 addAvg	32.46%	luma_hps	51.70%
addAvg	15.90%	luma_vpp	41.48%	i422 chroma_vss	32.62%	luma_hps	51.81%
i422 chroma_vpp	16.07%	i444 chroma_vsp	41.51%	i444 chroma_vss	32.67%	i422 chroma_hpp	51.86%
intra_pred_ang25	16.22%	luma_hvpp	41.54%	i420 chroma_vss	32.67%	luma_hps	51.89%
nquant	16.33%	intra_pred_ang11	41.55%	i444 chroma_vss	32.69%	addAvg	51.89%
sad_x4	16.42%	convert_p2s	41.58%	i422 chroma_vss	32.69%	i420 addAvg	51.89%
luma_vsp	16.55%	sad_x4	41.71%	i420 chroma_vss	32.69%	i422 addAvg	51.89%
i420 addAvg	17.12%	sad_x4	41.71%	luma_vss	32.89%	luma_hps	51.93%
sad_x4	17.33%	luma_vsp	41.78%	i444 chroma_vsp	33.14%	luma_hps	51.99%
i444 chroma_vss	17.55%	sad_x4	41.83%	i422 chroma_vsp	33.14%	i444 chroma_hpp	52.16%
i420 chroma_vss	17.55%	i444 chroma_vsp	42.01%	i444 chroma_vss	33.16%	i422 copy_sp	52.45%
i444 chroma_vps	17.88%	i444 chroma_vsp	42.08%	i420 chroma_vss	33.16%	i422 copy_ps	52.45%
i422 chroma_vps	17.88%	i422 chroma_vsp	42.08%	convert_p2s	33.27%	i422 copy_ss	52.45%
i420 chroma_vps	17.88%	nonPsyRdoQuant	42.13%	i444 chroma_vss	33.34%	i444 chroma_hps	52.94%
pixel_satd	18.02%	pixelavg_pp	42.17%	i422 chroma_vss	33.34%	copy_ss	53.20%
i422 addAvg	18.13%	i422 chroma_vpp	42.20%	i420 chroma_vss	33.34%	i420 chroma_hps	53.22%
i444 chroma_vss	18.42%	i420 chroma_vpp	42.20%	i444 chroma_vss	33.43%	i422 chroma_hps	53.27%
i422 chroma_vss	18.42%	luma_vps	42.30%	i422 chroma_vss	33.43%	i420 chroma_hpp	53.48%
i420 chroma_vss	18.42%	sub_ps	42.52%	pixelavg_pp	33.45%	copy_pp	53.53%
addAvg	19.50%	luma_vsp	42.55%	pixel_satd	33.45%	i422 chroma_hpp	53.81%
i444 chroma_vps	19.54%	luma_hvpp	42.65%	i420 pixel_satd	33.45%	i422 chroma_hpp	53.89%
i422 chroma_vps	19.54%	pixelavg_pp	42.65%	addAvg	33.46%	i444 chroma_hpp	54.31%
i420 chroma_vps	19.54%	luma_vps	42.72%	luma_vsp	33.47%	ssd_ss	54.69%
sad_x3	19.75%	convert_p2s	42.77%	sad_x4	33.51%	i422 chroma_hpp	54.77%
luma_vss	19.80%	luma_vss	42.82%	i444 chroma_vsp	33.79%	i420 chroma_hpp	55.18%
i422 pixel_satd	19.95%	luma_vsp	43.05%	i422 chroma_vsp	33.79%	luma_hpp	55.53%
pixel_satd	20.02%	convert_p2s	43.11%	i420 chroma_vsp	33.79%	i444 chroma_hpp	55.56%
i420 pixel_satd	20.02%	i444 chroma_hpp	43.15%	i444 chroma_vss	33.89%	i444 chroma_hpp	55.78%
i422 pixel_satd	20.02%	luma_vsp	43.17%	i420 chroma_vss	33.89%	i444 chroma_hpp	55.94%
i444 chroma_vps	20.09%	luma_vss	43.18%	luma_vsp	34.08%	luma_hpp	55.96%
i420 chroma_vps	20.09%	luma_vsp	43.22%	sub_ps	34.13%	copy_sp	56.00%
i422 chroma_vss	20.53%	luma_hvpp	43.24%	i444 chroma_vsp	34.18%	copy_ps	56.00%
sad_x4	20.69%	luma_vss	43.35%	i420 chroma_vsp	34.18%	i444 chroma_hpp	56.07%
i444 chroma_vps	20.86%	luma_vsp	43.36%	i444 chroma_vsp	34.22%	luma_hpp	56.16%
i422 chroma_vps	20.86%	i420 chroma_hpp	43.38%	i422 chroma_vsp	34.22%	i420 copy_sp	56.63%

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
i444 chroma_vpp	20.98%	cpy1Dto2D_shl	43.50%	i420 chroma_vsp	34.22%	i420 copy_ps	56.63%
quant	21.23%	luma_vsp	43.50%	i444 chroma_vss	34.43%	i420 copy_ss	56.63%
i422 chroma_vpp	21.45%	luma_vpp	43.51%	i422 chroma_vss	34.43%	i422 chroma_hpp	57.32%
sad	21.61%	copy_pp	43.54%	i420 chroma_vss	34.43%	i444 chroma_hps	57.33%
i444 chroma_vpp	21.78%	luma_hvpp	43.57%	pixel_satd	34.59%	luma_hpp	57.40%
i444 chroma_vps	22.06%	luma_vpp	43.58%	i444 chroma_vss	34.71%	i420 chroma_hps	57.97%
i420 chroma_vps	22.06%	luma_hvpp	43.60%	i444 chroma_vss	34.76%	luma_hpp	58.55%
i444 chroma_vsp	22.12%	luma_vss	43.75%	intra_pred_ang10	34.76%	i444 chroma_hps	59.21%
i422 chroma_vsp	22.12%	luma_vps	43.77%	i444 chroma_vps	34.80%	i420 chroma_hps	59.46%
i420 chroma_vsp	22.12%	i444 chroma_vsp	43.80%	i444 chroma_vps	34.98%	blockfill_s	59.53%
i444 chroma_vsp	22.14%	i420 chroma_vsp	43.80%	luma_vps	35.07%	luma_hpp	59.56%
i422 chroma_vsp	22.14%	pixelavg_pp	43.94%	i444 chroma_vps	35.34%	i422 chroma_hps	59.75%
i420 chroma_vsp	22.14%	psyRdoQuant	44.02%	Weight_pp	35.37%	copy_sp	60.09%
i422 chroma_vpp	22.28%	sad_x3	44.17%	i444 chroma_vss	35.51%	copy_ps	60.09%
i420 chroma_vpp	22.28%	pixelavg_pp	44.23%	luma_vps	35.63%	luma_hps	60.23%
i444 chroma_vpp	22.28%	luma_hvpp	44.24%	i422 chroma_hps	35.68%	psyRdoQuant	60.25%
i422 chroma_vpp	22.35%	luma_hvpp	44.28%	i444 chroma_vps	36.38%	luma_hpp	60.26%
ssd_ss	22.60%	luma_vsp	44.31%	i422 chroma_vss	36.56%	i444 chroma_hps	60.28%
i444 chroma_vpp	23.06%	dequant_scaling	44.37%	sad	36.66%	i420 chroma_hps	60.48%
sad_x4	23.09%	convert_p2s	44.40%	luma_vpp	36.68%	luma_hps	60.76%
luma_vpp	23.67%	luma_vpp	44.41%	i444 chroma_vpp	36.70%	copy_pp	60.87%
luma_vpp	23.82%	luma_vss	44.42%	luma_vsp	36.71%	i444 chroma_hps	60.92%
i444 chroma_vpp	23.84%	sad_x4	44.42%	sad_x3	36.75%	i422 chroma_hps	61.09%
i444 chroma_vss	24.15%	luma_vpp	44.60%	sad_x4	36.78%	luma_hpp	61.28%
i422 chroma_vss	24.15%	luma_vss	44.61%	pixel_satd	36.88%	i444 chroma_hpp	61.38%
i420 chroma_vss	24.15%	luma_hvpp	44.61%	i422 chroma_vpp	36.91%	luma_hpp	61.43%
intra_pred_ang9	24.37%	getResidual32	44.64%	copy_pp	36.96%	luma_hpp	61.44%
i444 chroma_vpp	24.41%	luma_hpp	44.68%	addAvg	37.08%	i422 chroma_hps	61.55%
luma_vpp	24.48%	luma_vss	44.70%	sad_x4	37.09%	luma_hpp	61.58%
i422 addAvg	24.62%	luma_hvpp	44.73%	i420 chroma_vpp	37.29%	luma_hpp	62.26%
psyCost_pp	24.88%	i444 chroma_vsp	44.76%	i422 chroma_vpp	37.36%	i422 chroma_hps	62.31%
i420 chroma_vpp	24.90%	i422 chroma_vsp	44.76%	i420 chroma_vpp	37.36%	luma_hpp	62.35%
i422 chroma_vpp	25.11%	i420 chroma_vsp	44.76%	luma_vss	37.49%	i420 chroma_hpp	62.39%
i420 chroma_vpp	25.11%	sad_x4	44.85%	luma_vpp	37.53%	i420 chroma_hps	62.39%
i444 chroma_vps	25.17%	luma_hvpp	45.15%	i444 chroma_vps	37.54%	i444 chroma_hpp	62.46%

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
i422 chroma_vps	25.17%	luma_vps	45.19%	i422 chroma_vps	37.54%	luma_hpp	62.63%
i420 chroma_vps	25.17%	i422 chroma_hpp	45.23%	i420 chroma_vps	37.54%	i444 chroma_hps	62.88%
i444 chroma_vss	25.17%	intra_pred_dc	45.26%	i444 chroma_vpp	37.59%	i420 chroma_hps	62.95%
i422 chroma_vss	25.17%	sad	45.31%	i420 chroma_vpp	37.59%	luma_hpp	63.07%
i420 chroma_vss	25.17%	luma_vps	45.36%	i444 chroma_vps	37.59%	i444 chroma_hps	63.15%
i422 chroma_vps	25.28%	psyRdoQuant	45.40%	i422 chroma_vps	37.59%	luma_hps	63.16%
i444 chroma_vps	25.97%	i420 add_ps	45.40%	pixel_satd	37.60%	i420 chroma_hpp	63.34%
i422 chroma_vps	25.97%	pixelavg_pp	45.52%	i444 chroma_vps	37.60%	luma_hpp	63.61%
i420 chroma_vps	25.97%	addAvg	45.54%	i420 chroma_vps	37.60%	i420 chroma_hps	63.85%
luma_vpp	26.22%	i420 addAvg	45.54%	i444 chroma_vsp	37.66%	luma_hpp	63.91%
sad	26.25%	i422 addAvg	45.54%	i422 chroma_vps	37.68%	i420 chroma_hpp	64.12%
psyCost_pp	26.30%	i444 chroma_vsp	45.57%	i444 chroma_vpp	37.69%	i444 chroma_hps	64.15%
i444 chroma_vsp	26.38%	i422 chroma_vsp	45.57%	i444 chroma_vps	37.71%	i444 chroma_hpp	64.23%
i420 chroma_vsp	26.38%	i420 chroma_vsp	45.57%	i420 chroma_vps	37.71%	i422 chroma_hpp	64.39%
i420 addAvg	26.39%	luma_vps	45.58%	convert_p2s	37.73%	i422 chroma_hpp	64.56%
i422 addAvg	26.39%	pixelavg_pp	45.61%	i420 p2s	37.73%	i444 chroma_hps	64.84%
pixel_satd	26.62%	luma_vps	45.62%	i422 p2s	37.73%	i422 chroma_hps	64.87%
i444 chroma_vss	26.71%	luma_vps	45.64%	i444 p2s	37.73%	i444 chroma_hpp	64.92%
i422 chroma_vss	26.71%	sad_x3	45.65%	i444 chroma_vpp	37.74%	i420 chroma_hps	64.93%
i420 chroma_vss	26.71%	i422 add_ps	45.68%	i444 chroma_vpp	37.76%	i422 chroma_hpp	65.05%
luma_vsp	26.77%	addAvg	45.72%	addAvg	37.80%	i444 chroma_hps	65.06%
luma_vps	27.04%	i420 addAvg	45.72%	i422 chroma_vpp	37.99%	i420 chroma_hpp	65.14%
luma_vpp	27.10%	pixelavg_pp	45.80%	i444 chroma_vss	38.04%	i422 chroma_hps	65.35%
i444 chroma_vss	27.24%	i444 chroma_hpp	45.95%	i420 chroma_hpp	38.04%	i422 chroma_hps	65.63%
i422 chroma_vss	27.24%	psyRdoQuant	45.96%	luma_vps	38.08%	i444 chroma_hps	65.72%
i422 chroma_vps	27.26%	luma_vsp	45.97%	i444 chroma_vpp	38.09%	i422 chroma_hpp	65.80%
i420 addAvg	27.28%	sad	46.04%	i444 chroma_vpp	38.27%	i444 chroma_hpp	65.88%
i422 addAvg	27.28%	luma_hvpp	46.17%	i422 chroma_vpp	38.27%	i420 chroma_hpp	65.92%
addAvg	27.55%	luma_vss	46.31%	i444 chroma_hps	38.30%	i420 chroma_hpp	65.94%
i422 chroma_vpp	27.71%	sad_x3	46.36%	intra_pred_ang2	38.34%	i444 chroma_hps	66.03%
i420 chroma_vpp	27.71%	sad_x3	46.42%	i444 chroma_hps	38.37%	i422 chroma_hps	66.03%
pixel_satd	27.93%	luma_vps	46.44%	i444 chroma_vpp	38.48%	i420 chroma_hps	66.15%
ssd_s	28.04%	luma_hpp	46.46%	copy_pp	38.51%	i422 chroma_hpp	66.20%
pixel_satd	28.10%	i444 chroma_vsp	46.66%	addAvg	38.54%	i422 chroma_hps	66.20%
pixelavg_pp	28.47%	sad_x3	46.71%	nonPsyRdoQuant	38.57%	i420 chroma_hps	66.29%

プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン	プリミティブ	IPC ゲイン
i420 pixel_satd	28.54%	luma_hpp	46.82%	sad_x3	38.74%	i422 chroma_hpp	66.32%
i422 pixel_satd	28.54%	luma_vss	46.88%	sad_x3	38.80%	i444 chroma_hpp	66.38%
pixel_satd	28.56%	i422 chroma_hps	46.99%	sad	38.84%	i444 chroma_vpp	66.41%
i420 pixel_satd	28.56%	intra_pred_ang26	47.26%	Weight_sp	38.86%	i444 chroma_hps	66.50%
i422 pixel_satd	28.56%	luma_vps	47.31%	pixel_satd	38.88%	i444 chroma_vpp	66.61%
i444 chroma_vps	28.75%	luma_hvpp	47.44%	i420 pixel_satd	38.88%	i444 chroma_vpp	66.63%
luma_vps	28.78%	pixelavg_pp	47.50%	copy_pp	38.96%	i444 chroma_hps	66.64%
luma_vps	28.82%	luma_vss	47.64%	i422 sub_ps	39.19%	i444 chroma_hpp	66.64%
i422 chroma_hps	28.86%	luma_vps	47.69%	i420 sub_ps	39.34%	i420 chroma_hpp	66.64%
i420 chroma_hps	29.02%	i420 chroma_hpp	47.78%	i420 chroma_hps	39.47%	i420 chroma_hpp	66.65%
sad_x3	29.04%	i422 chroma_hps	47.82%	luma_vpp	39.54%	i444 chroma_hps	66.71%
i444 chroma_hps	29.11%	luma_vsp	47.93%	luma_hvpp	39.63%	i422 chroma_hpp	66.71%
luma_vsp	29.13%	luma_hvpp	48.30%	i444 chroma_vps	39.68%	i444 chroma_hps	66.75%
luma_vss	29.26%	addAvg	48.40%	i420 chroma_vps	39.68%	i444 chroma_hps	66.91%
i444 chroma_vss	29.29%	i420 addAvg	48.40%	luma_hpp	39.72%	i422 chroma_hpp	66.92%
luma_vpp	29.39%	luma_hps	48.96%	addAvg	39.77%	i444 chroma_hpp	67.59%
luma_vss	29.59%	luma_hps	49.05%	convert_p2s	39.79%	i444 chroma_hpp	67.78%
				i420 p2s	39.79%	i420 chroma_hpp	69.14%
				i444 p2s	39.79%	i444 chroma_hpp	69.23%

付録 B

使用した 1080p テストクリップとビットレート

次の 1080p クリップをテスト結果の生成に使用しました。



park_joy_1080p.y4m



crowd_run_1080p50.y4m



ducks_take_off_1080p50.y4m



old_town_cross_1080p50.y4m

使用した 4K テストクリップとビットレート

次の 4K クリップをテスト結果の生成に使用しました。



Netflix_Boat_4096x2160_60fps_10bit_420.y4m



Netflix_Tango_4096x2160_60fps_10bit_420.y4m



Netflix_FoodMarket_4096x2160_60fps_10bit_420.y4m

付録 C

インテル® Core™ i7-4500U プロセッサ上でのテスト構成	
システム属性	値
OS 名	Windows® 10 Professional
バージョン	10.0.16299 ビルド 16299
システムモデル	MS-7A93
システムの種類	x64 ベースの PC
プロセッサ	インテル® Core™ i7-4500U CPU @ 3.30GHz、3312MHz、10 コア、20 論理プロセッサ
ソケットごとのコア数	2
コアごとのスレッド数	2
ソケット数	1
NUMA ノード数	1
BIOS	
BIOS バージョン/日付	American Megatrends Inc. 1.00, 6/2/2017
SMBIOS バージョン	3
BIOS モード	UEFI

インテル® Core™ i7-4500U プロセッサ上でのテスト構成

システム属性	値
グラフィック・インターフェイス	
バージョン	PCI-Express*
リンク幅	x16
サポートされる最大値	x16

メモリー

タイプ	DDR3
チャンネル	1
サイズ	8GB
DRAM 周波数	800MHz
コマンドレート (CR)	2T

インテル® Core™ i9-7900X プロセッサベースのテストシステム構成

システム属性	値
OS 名	Microsoft* Windows® 10 Enterprise
バージョン	110.0.16299 ビルド 16299
システムモデル	MS-7A93
システムの種類	x64 ベースの PC
プロセッサ	インテル® Core™ i9-7900X CPU @ 3.30GHz、3312Mhz、10 コア、20 論理プロセッサ
ソケットごとのコア数	10
コアごとのスレッド数	2
ソケット数	1
NUMA ノード数	1

BIOS

BIOS バージョン/日付	American Megatrends Inc. 1.00, 6/2/2017
SMBIOS バージョン	3
BIOS モード	UEFI

グラフィック・インターフェイス

バージョン	PCI-Express*
-------	--------------

インテル® Core™ i9-7900X プロセッサベースのテストシステム構成

システム属性	値
リンク幅	x16
サポートされる最大値	x16
メモリー	
タイプ	DDR4
チャンネル	2
サイズ	32GB
DRAM 周波数	1066.80MHz
コマンドレート (CR)	2T

インテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサベースのテストシステム構成

システム属性	値
OS 名	CentOS*
バージョン	7.2
システムモデル	インテル® S4PR1SY2B
システムの種類	x86_64
プロセッサ	インテル® Xeon® Platinum 8180 CPU @ 2.50GHz
ソケットごとのコア数	28
コアごとのスレッド数	2
ソケット数:	2
NUMA ノード数	2

BIOS

BIOS バージョン/日付	SE5C620.86B.0X.01.0007.062120172 125 / 06/21/2017
SMBIOS バージョン	2.8
BIOS モード	UEFI

グラフィック・インターフェイス

バージョン	PCI-Express*
リンク幅	x16
サポートされる最大値	x16

インテル® Xeon® Platinum 8180 プロセッサベースのテストシステム構成	
システム属性	値
メモリー	
タイプ	DDR4
チャンネル	2
サイズ	192GB
DRAM 周波数	1333MHz
コマンドレート (CR)	2T

参考文献

1. David A. Patterson and John L. Hennessey, *Computer Organization and Design: the Hardware/Software Interface*, 2nd Edition, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, California, 1998, p.751.
2. VideoLAN Organization, x264, The best H.264/AVC encoder. <https://www.videolan.org/developers/x264.html> (英語)
3. MulticoreWare Inc., x265 HEVC Encoder/H.265 Video Codec. <http://x265.org/> (英語)
4. G. J. Sullivan, J.-R. Ohm, W.-J. Han and T. Wigand, "Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 22, no. 12, pp. 1649-1668, 2012.
5. Intel Corporation, Intel Advanced Vector Instructions 512. <https://www.intel.in/content/www/in/en/architecture-and-technology/avx-512-overview.html> (英語)
6. Intel Corporation, "Intel® Xeon® Processor Scalable Family Specification Update", February, 2018. <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/specification-updates/xeon-scalable-spec-update.pdf> (英語)
7. x265.org (英語)
8. HandBrake, An OpenSource Video Transcoder. <https://handbrake.fr/> (英語)
9. [FFMPEG, A complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video.](http://ffmpeg.org/) (英語)
10. MulticoreWare Inc., "x265 Receives Significant Boost from Intel Xeon Scalable Processor Family." <http://x265.org/x265-receives-significant-boost-intel-xeon-scalable-processor-family/> (英語)

コンパイラーの最適化に関する詳細は、[最適化に関する注意事項](#)を参照してください。