



ホワイトペーパー

Chimera™ : NVIDIA の コンピューテーショナル・ フォトグラフィ・アーキテクチャ

Tegra 4SoC ファミリーで驚異的な
カメラ機能を提供

目次

.....	1
エグゼクティブサマリー	3
なぜ HDR イメージングか?	3
現在の HDR イメージング手法.....	4
Chimera: NVIDIA のコンピュテーショナル・フォトグラフィ・アーキテクチャ.....	8
NVIDIA のワンショット HDR イメージング.....	8
プログラマブルでカスタマイズ可能なアーキテクチャ.....	10
まとめ	13
文書改定履歴.....	14

エグゼクティブサマリー

世界初のカメラ付き携帯電話が発売されたのは 1999 年後期のことです。過去 10 年間にカメラ付き携帯電話や高解像度カメラ付きスマートフォンの台数は飛躍的に増加しました。スマートフォンの形状寸法と通信機能は、撮りたい時にすぐに写真を撮れる利便性と他の人との写真の共有しやすさをもたらしました。最近の市場調査によると、カメラ付き携帯電話の世界市場規模は 2013 年に 16 億台を突破すると予想されています。¹

デジタル一眼レフカメラやオートフォーカスカメラとは異なり、スマートフォン・カメラは薄型形状と限定的なバッテリーサイズの制約を受けます。そのため、かさばる光学レンズや大きなイメージ・センサ、追加の DSP チップを使用して画質向上を図ることができません。また、現時点ではまだ、スマートフォンは高度なカメラ機能に対して高い応答性を提供することもできていません。カメラ付き携帯電話は一定レベル以上のカメラ機能を搭載するようになりましたが、ハイエンドのスマートフォン・メーカーは、高解像度イメージ・センサや内蔵 LED フラッシュのほか、笑顔検出、パノラマ写真、HDR (ハイダイナミックレンジ) イメージングといった機能によって差別化を図っています。

これらのソフトウェア・ベースの先進機能の大半が、SoC (システム・オン・チップ) に搭載されたイメージ・シグナル・プロセッサ (ISP) の有限な処理能力と、SoC の CPU コアの後処理能力に依存しています。こうした設計は、限定的なカメラ効果には有効なアーキテクチャではあっても、真に驚異的なコンピューショナル・カメラ効果をサポートすることはできません。

NVIDIA® Tegra® 4 ファミリのモバイル・プロセッサは、**NVIDIA の Chimera™** コンピューショナル・フォトグラフィ・アーキテクチャを採用しています。Chimera™ アーキテクチャは、**カスタム GPU コアとクアッドコア ARM CPU コンプレックス**、先進 **ISP コア** のパフォーマンスを融合させることで、常時オン HDR による写真、HDR の動画、手ブレ補正 (動画安定化)、被写体追跡 (タップ・トゥー・トラック機能) といった演算量の多い画像処理アプリケーションなど、高度なカメラ機能実現に向け大幅に強化した演算性能を提供します。またさらに、Chimera アーキテクチャに使われるソフトウェア・スタックには明確に定義された一群の API とプラグインが含まれており、これらを使用することで OEM やサードパーティ・アプリケーション開発会社はエンジンの処理能力を容易に引き出して、独自の差別化されたカメラ・アプリケーションを開発できます。

なぜ HDR イメージングか？

ハイダイナミックレンジ (HDR) イメージングとは、明るい領域と、それほど明るくない領域 (もしくは陰になっている領域) が混在するシーンから、より広範囲の輝度をカバーできるようにする一連の手法です。現実世界のシーンのダイナミックレンジは一般的に、最も明るい領域と最も暗い領域の比率が 10,000:1 を超えます。現実世界のシーンに見られるダイナミックレンジ全体をカバーすることは容易ではありません。どの程度までカバーできるかは、デジタルカメラの CMOS センサのサイズや感度、信号品質と、センサの各画素のサイズに大きく依存します。大型のフルフレーム・センサを搭載した最上位のデジタル一眼レフカメラであっても、最大で 4000:1 という限定的なダイナミックレンジしかカバーできません。スマートフォン・カメラのほとんどは、さらに小型・低品質のイメージ・

¹ <http://www.giiresearch.com/report/iii248735-outlook-mobile-phone-cmos-image-sensor-market.html>

センサを使用しており、現実世界のシーンに見られるダイナミックレンジの何分の一しかカバーできないのです。

図 1 の画像について考えてみましょう。背景が明るいのに対して前景の被写体がそれほど明るくなく、ダイナミックレンジが非常に大きくなっています。現在のスマートフォン・カメラでは、イメージ・センサのダイナミックレンジが限定的なため、1 回の撮影でカバーできるのは、シーン内の暗領域の輝度範囲(左側の画像)だけか、あるいは明領域の輝度範囲(右側の画像)だけか、どちらか一方だけです。カメラの露出時間を長くすれば、陰になっている被写体の詳細をカバーできますが、そうすると明領域が白とびしてしまい、詳細が大きく失われてしまいます。一方、シーンの明領域の詳細をカバーできるように露出を設定すると、前景の被写体が完全に露光不足になってしまいます。



図 1 高コントラストシーンを撮影する難しさ - 背景の白とび(左)、前景の黒つぶれ(右)

現在の HDR イメージング手法

カメラのダイナミックレンジに限られることによる問題を、カメラマンは次のように回避します。すなわち、シーンを複数の部分に分け、各画像がシーンのダイナミックレンジの一部をカバーするようにして、複数の画像を異なる露出レベルで撮影します。それから、露出設定の異なる個々の画像を、Adobe Photoshop などの写真編集ソフトウェアで合成します。写真編集ソフトは複雑なソフトウェア・アルゴリズムを使って、元のシーンにあったダイナミックレンジの大半が、合成された HDR 画像によってカバーされるようにします。

この手法は広く使用されており、デジタルカメラと低価格の写真編集ソフトウェア・ツールの登場以来、その人気は飛躍的に高まっています。

同様に、スマートフォンで撮影する HDR の写真は、高露出と低露出で撮影した後、CPU で処理されるソフトウェア・アルゴリズムで 2 つの画像を合成して作成されます。HDR 写真など高度なカメラ効果に用いられる現在のハイエンド・スマートフォンのカメラ・アーキテクチャを図 2 に示します。

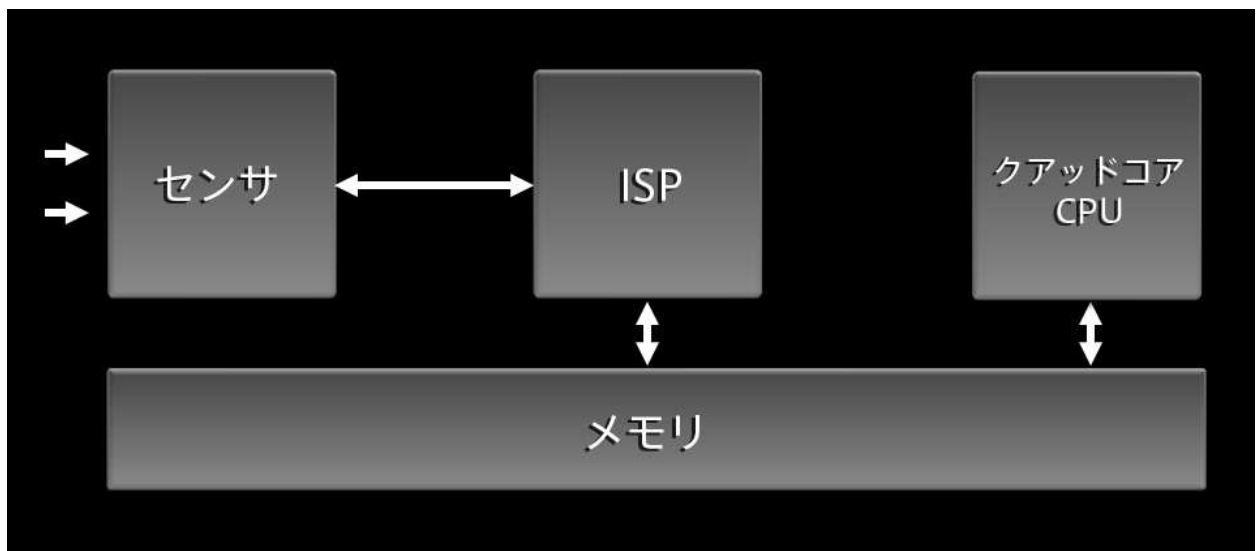


図 2 現在のハイエンド携帯端末のカメラ・アーキテクチャ



図 3 シーンの明領域と暗領域のダイナミックレンジをカバーした HDR 画像

スマートフォンで撮影した HDR 画像が、図 3 に示すように許容可能なレベルの画質が得られるとしても、異なる露出設定で 2 つの画像を撮影後、ISP で画像を処理し、CPU で画像を合成する所要時間は 2 秒を超えます。このために使い勝手が悪くなるばかりか、フレーム内の被写体（人、子供、ペットなど）や背景の物体（雲、波、滝、交通など）が動いている場合に、高品質の HDR 写真撮影がほとんど不可能になってしまいます。

図 4 の左側の画像について考えてみましょう。この画像は HDR をオフにして撮影したものです。前景の被写体は明るく、動いている背景の被写体は鮮明ですが、背景の明るい空と建物は完全に白とびしてしまっています。同じシーンを HDR モードをオンにして撮影した画像を見ると、前景の被写体と空や建物から出ている光のダイナミックレンジが正確にカバーされています。しかし、動いてい

た背景被写体の HDR 画像に「モーション・アーティファクト」(このケースでは男性の顔にかかるゴースト)が出ていて、画像が損なわれています。



図 4 現在のカメラ・アーキテクチャは、動いている被写体の HDR 画像撮影には速度が不十分

低露出撮影と高露出撮影の間にわずかな時間遅れが生じるため、シーン内の動いている物体の位置が 2 つの画像でずれてしまいます。そのため、2 つの画像を合成すると、できあがった HDR 画像は、図 4 の右側の画像に見られるように、ぼやけて見えたり、使いものにならないように見えたりします。

スマートフォンは特に、動きのある人やシーンのスナップ写真の撮影に使われることが多いため、現在のカメラ・アーキテクチャをベースにした HDR イメージングは劣悪な体験しかもたらさず、めったに使用されていません。また、現在のハイエンド・スマートフォンでは、HDR 画像の撮影、合成、作成に計 2～5 秒の時間を要するため、HDR モードは HDR 高速連写や HDR ストロボモーション撮影、HDR パノラマ写真撮影といった他の HDR 対応機能にも役に立ちません。

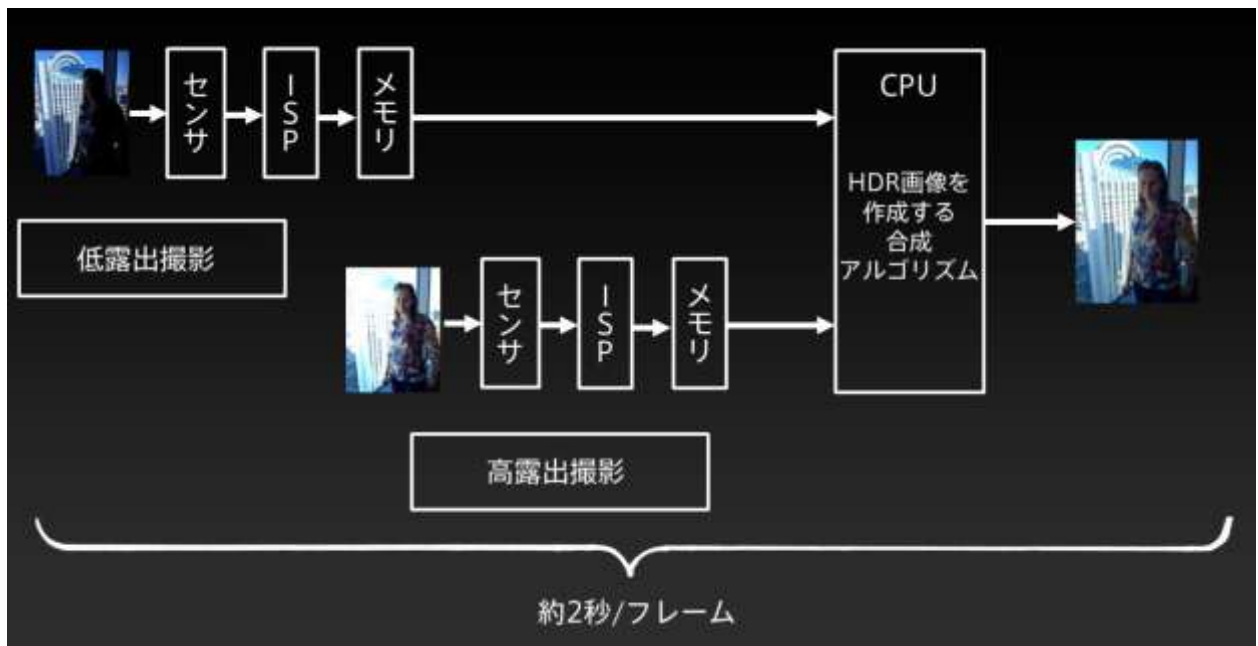


図 5 現在のスマートフォンは HDR 写真作成の所要時間が約 2 秒

Chimera: NVIDIA のコンピューショナル・フォトグラフィ・アーキテクチャ

NVIDIA® Tegra® 4 ファミリのモバイル・プロセッサは、NVIDIA の Chimera™ アーキテクチャを採用しています。Chimera™ アーキテクチャは、GPU の処理能力を演算量の多いアプリケーションに活用してきた、NVIDIA の豊富な経験をベースに開発された独自アーキテクチャです(図 6 参照)。このアーキテクチャの中核を担っているのが、NVIDIA のコンピューショナル・フォトグラフィ・エンジンです。このコンピューショナル・フォトグラフィ・エンジンは、カスタム GPU コアとクアッドコア ARM CPU の並列処理性能を駆使して、現在のスマートフォン・カメラのアーキテクチャと比べて何桁か速いスピードで高度な画像処理アルゴリズムを実行します。

従来のスマートフォン・カメラ・アーキテクチャは、データをイメージ・センサから ISP コア、CPU、メモリサブシステムへと受け渡してシリアルにデータを処理することから、処理時間が長くなり、処理能力が限られてしまいます。これに対し、Chimera アーキテクチャは、CPU、GPU、ISP にわたる画像処理パイプラインを仮想化し、計算リソースの大幅な向上と処理時間の短縮によって、NVIDIA のワンショット HDR、リアルタイム HDR ビデオ、HDR 高速連写、ストロボモーション・イメージング、被写体追跡などの高度なイメージング機能に対応します。



図 6 Chimera: NVIDIA のコンピューショナル・フォトグラフィ・アーキテクチャ

NVIDIA のワンショット HDR イメージング

コンピューショナル・エンジンは、GPU とクアッドコア CPU、ISP コアの膨大な処理能力を駆使したアルゴリズムを使って最終的な HDR 画像を構築します。

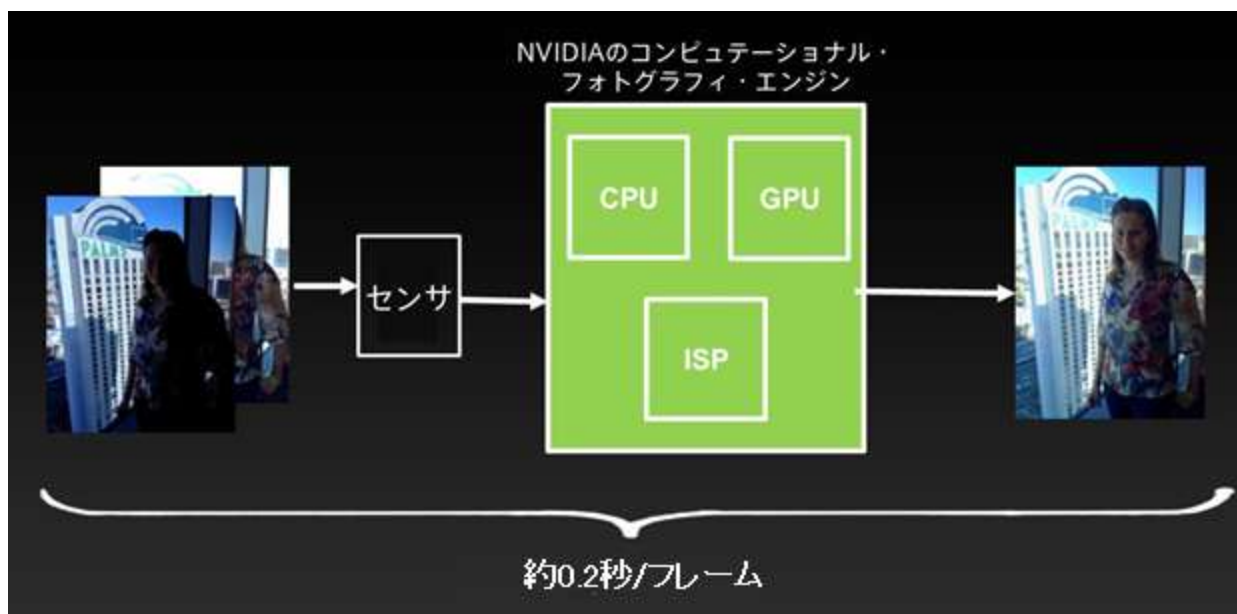


図 7 Chimera 対応 Tegra 4 により HDR イメージングは最大 10 倍に高速化

最新のイメージ・センサ技術と NVIDIA® Chimera™アーキテクチャの演算能力を組み合わせること
で、NVIDIA Tegra® 4 プロセッサは、現在のハイエンド・スマートフォンの HDR イメージング機能と
比べて最大 10 倍の高速化を達成するワンショット HDR イメージングを可能にします。NVIDIA
Tegra 4 搭載のスマートフォンとタブレットは、リアルタイム HDR ビデオを 1080p 30fps で撮影でき、
HDR 高速連写モードやフラッシュ対応 HDR モードなどの高度な HDR 機能を提供できる、まさに
業界初の携帯端末となります。スマートフォンの HDR モードはもはや、一部の撮影時にだけオン
にする特別なモードである必要はなくなりました。NVIDIA Tegra 4 プロセッサに搭載されている
NVIDIA のコンピューショナル・フォトグラフィ・エンジンは、携帯端末で「常時オン」の HDR 体験
を実現できる性能と高速性、利便性を提供します。



図 8 NVIDIA による「常時オン」HDR 体験

プログラマブルでカスタマイズ可能なアーキテクチャ

NVIDIA® の Chimera™ アーキテクチャは明確に定義された API が揃っており、容易にプログラムできます。OEM やサードパーティのカメラ・アプリケーション・ベンダーは、Chimera とつないでカスタム・カメラ機能やカスタム・アルゴリズムを実装することでパフォーマンスの差別化を図ったプラグインを開発できます。

カメラ・アプリケーションは、公開されたカメラ API を介してハードウェアと接続することで、基本的なカメラ機能を実行します。また、NVIDIA やパートナーが開発したプラグインを介して Chimera アーキテクチャにアクセスすることで、リアルタイム HDR や手ブレ補正、3D 画像再構成、画像追跡などの高度な機能が実行可能になります。

Chimera アーキテクチャは、発生するタスク要求に応じて、GPU の OpenGL、CPU の Neon、コア・カメラ・コールなど最適なハードウェア・レベル API を使って GPU、CPU、ISP 各コアを駆使し、カメラ・アプリケーションから生じるワークロードを処理します。

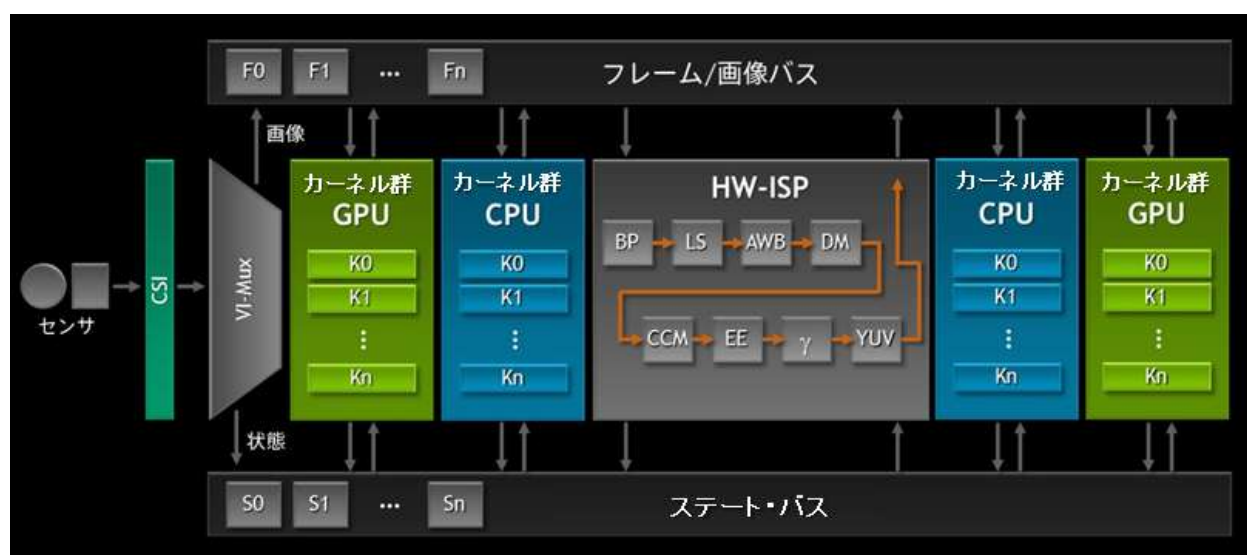


図 9 Chimera のプロセスフロー

Chimera アーキテクチャは、NVIDIA Tegra4® の GPU、クアッドコア CPU および ISP コアを抽象化したソフトウェア・フレームワーク(図 7)です。エンジン内でのデータの流れは、2 本のインフォメーション・バスを介したものとなります。1 本は画像データやフレームデータを伝送するバス、もう 1 本は各フレームに関連づけられている状態を伝送するバスです。このフレームワークによって

演算ブロックから演算ブロックへの効率的な伝達が確実に行われますから、このプロセスをプログラマが自分でマネージする必要はありません。

2 番目のキーポイントは、GPU、CPU、ISP、CPU、GPU という、特定の順序で一連の演算エレメントがつながるという概念です。アプリケーション開発者は演算チェーンの全体または一部を選択することができます。GPU と CPU は、アプリケーション開発者から提供されるカーネル（図中の K0 ... Kn）と呼ばれる「ネイティブ」コードを実行する演算エレメントです。

たとえば、カメラ・センサから出力されるベイヤーデータ（RAW データ）に何らかのノイズ軽減を行いたいとしましょう。GPU を使って、OpenGL ES フラグメント・シェーダー言語でカーネルを作成します。この例では、カーネル・コールは特定のパターンによるベイヤーデータへのピクセル単位でのアクセスをとまなわって行われますから、どのようにデータが到達したかや、さらにはデータがどこに行くかすら気にかけることなく簡単にシェーダーを書くことができます。

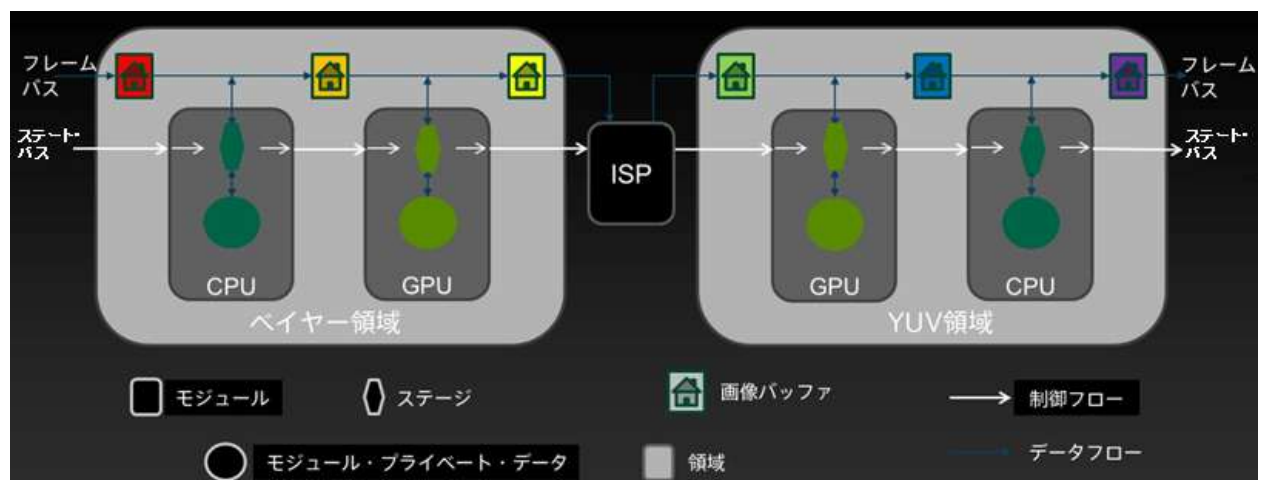


図 10 Chimera のプログラミングモデルの詳細図

図 10 は、NVIDIA® Chimera™アーキテクチャのプログラミングモデルを詳細に表した図です。各カーネル（図 9）が「モジュール」に、モジュール内のステージとして組み込まれています（ステージと呼ぶ理由は以下で明らかになります）。モジュールには、「モジュール・プライベート・データ」と呼ばれるローカルステート情報も含まれています。これはステージが演算時に使用する中間データです。モジュールのステージには、入力されるフレームに関連づけられているステート・データが「ステート・バス」から入ってきます。フレーム・ステート・データとフレームは刻々と入れ替わります。というのも新規のフレームはすべて、露出値（EV）やフレームサイズなど新規のステート・データを含んでいるからです。

ステージは、プログラマが決定した処理の完了まで動作します。モジュールには、モジュールのチューニングや改良に必要なデバッグ情報やタイミング情報も含まれています。Chimera アーキテクチャのパイプライン構造により、各ステージでは別々のフレームが並列処理され、開発者はアーキテクチャから最大限の処理能力を引き出すことができます。

次に、このプログラミングモデルが、「常時オン」HDR 機能の実装にどのように使用されるかを見てみましょう。

このケースでは、GPU と CPU だけがそれぞれ一回、GPU がパイプの初めに、CPU がパイプの終わりに使用されます。これは開発者がどれだけの処理を使用したいかを選択できるという、アーキテクチャの柔軟性を示すものです。「常時オン」HDR を実装するためにプログラマは、GPU を使ってベイヤータの HDR 処理、調整、再構成を実行してから、それを ISP HW に送って「通常の」ISP 処理を行うことになります。ISP は YUV 画像を出力し、それが、C++ 命令と ARM の Neon 命令を使って高速化された CPU 上で動作するトーンマッパーに引き渡されます。ここでもやはり、プログラマは「モジュール」を設定し、カーネル・ステージを書くだけですみました。

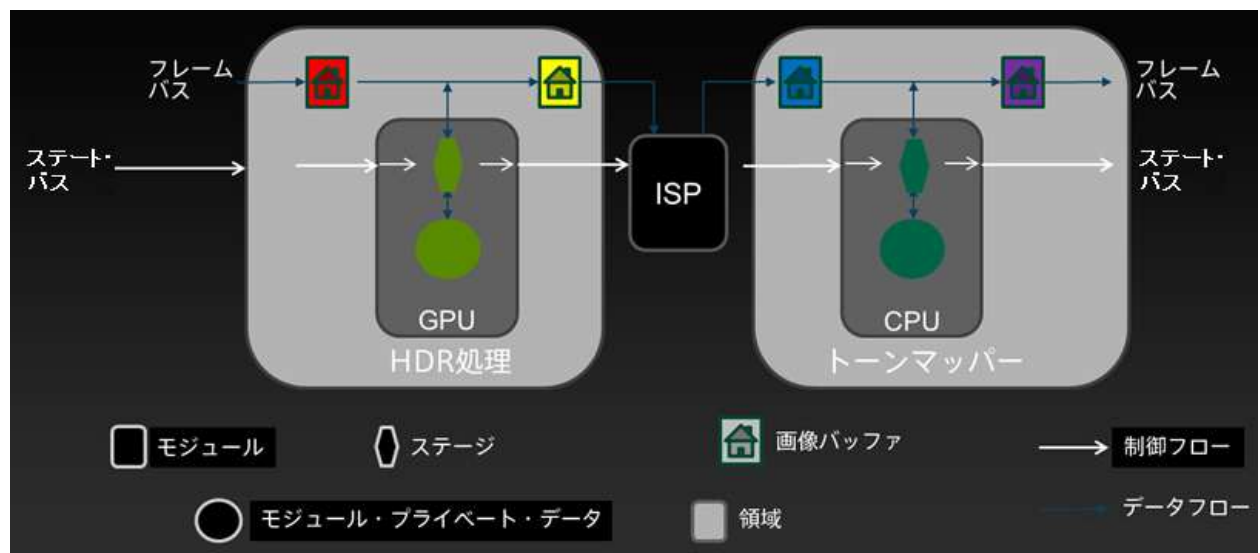


図 11 Chimera による「常時オン」HDR のプロセスフロー

多くの状況でプログラマは、カーネルを積み重ね、各カーネルに何らかの処理要素を実行させたいと考えるかもしれません。これは任意のモジュールに「ステージ」を追加することで行います(図 12)。各モジュールは 0 個または 1 個以上のステージを含むことができます。モジュール内では、そのモジュール・オブジェクトに設定された順序でステージが実行されます。モジュール・プライベート・データは共有されますから、ステージ間でモジュール・プライベート・データを使って状態の伝達が行われます。モジュールは、モジュール開発者のプログラミングに従ってプライベート・データをステート・バスにエクスポートできるため、モジュールは処理モジュールから次の処理モジュールへとデータを共有することができます。

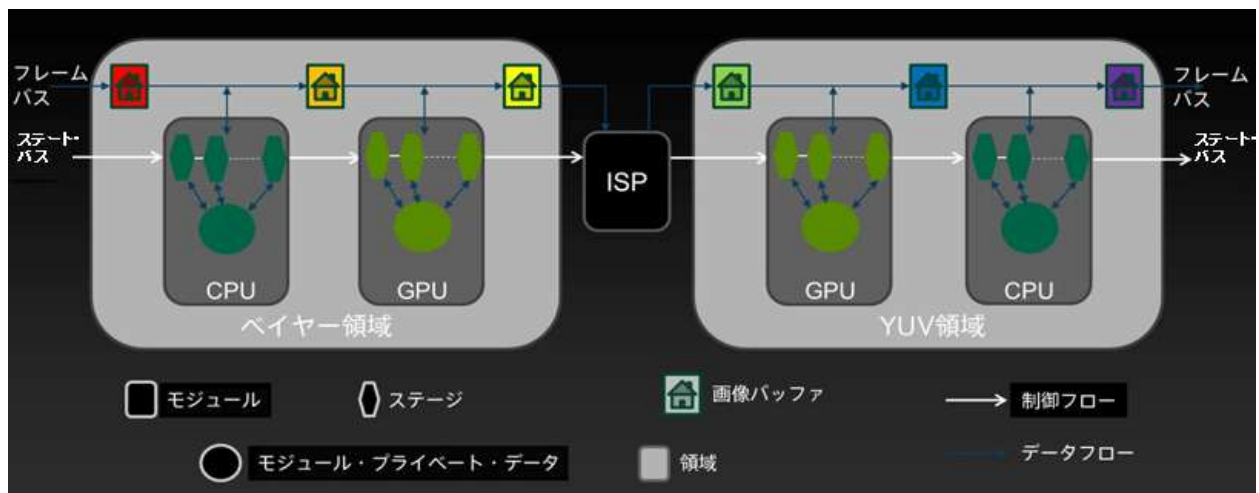


図 12 プロセスフローにステージを追加することで複数のカーネルを積み重ねることが可能

まとめ

モバイル・デバイスの使用が増え続ける中、写真や動画の撮影によるメモリ記録が引き続き、携帯端末の主要用途の一つとなっています。大局的な視点から見ると、過去に撮影された全ての写真の 10%は 2011 年に撮影されました。これはすべてパーソナル・デバイスの利便性と写真撮影の手軽さによるものです。スマートフォン・カメラの使用における次なるトレンドは、コンピューショナル・フォトグラフィによって牽引されることが見込まれます。これにより画質向上が期待されるだけでなく、目に見えた通りの写真や動画を撮影でき、それにより、再び経験することのない、瞬く間に過ぎ去ってしまうあの一瞬を永遠に捉えることが可能になるのです。

NVIDIA® の Chimera™ アーキテクチャは GPU、CPU、ISP に組み込まれている処理能力を駆使し、常時オン HDR などの最新機能を可能にすることで真に驚異的な写真撮影を実現します。

これは、今まさに次世代のスマートフォンや携帯端末に搭載されようとしている豊富な新機能や撮像機能の第一歩にすぎません。

文書改定履歴

改訂番号	摘要

注記

解説、見解、NVIDIA のデザイン仕様、リファレンスボード、ファイル、図面、診断、リスト、その他のドキュメントなど、本ホワイトペーパーで提供する情報は(以下、集合的あるいは個別に「マテリアル」と呼称します)、すべて、「現状のまま」を条件に提供するものです。NVIDIA は、本マテリアルについて、明示的、暗示的、法定的を含む保証を一切行わず、また、権利非侵害、商品性、および特定目的適合性に関するあらゆる黙示保証を明示的に否認します。

記載された情報の正確性、信頼性には万全を期しておりますが、これらの情報の使用の結果に対して、もしくはこれらの情報の使用に起因して第三者の特許またはその他の権利の侵害が発生しても、NVIDIA Corporationは一切の責任を負わないものとします。暗示的か明示的かを問わず、NVIDIA Corporationの特許または特許権に基づいて付与されるライセンスは一切ありません。本文書に記載された仕様は予告なしに変更されることがあります。本文書は、過去に提供されたすべての情報に優先し、これに代わるものとします。NVIDIA Corporationの製品は、NVIDIA Corporationの書面による明示的な許可なくしては、生命維持装置の重要な部品として使用してはなりません。

商標について

NVIDIA、NVIDIAのロゴ、Chimera、Tegraは、米国およびその他の国におけるNVIDIA Corporationの商標または登録商標です。その他の会社名および製品名は各社の商標である可能性があります。

Copyright

© 2013 NVIDIA Corporation. All rights reserved.