

高速カメラによる広帯域光無線通信のための 光源追跡ハードウェアの検討

河合 遼[†] 城 圭太[†] 泉 知論^{†‡} 白木 善史* 鎌本 優*

[†]立命館大学 理工学部 電子情報デザイン学科

[‡]立命館大学大学院 理工学研究科 電子システム専攻

*日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

1. はじめに

人を取り巻く環境全体がコンピューターシステムを構成するアンビエントインテリジェンスの時代が到来しようとしている。このとき、環境に埋め込まれた多数のセンサ群からの情報の集約が課題となる。我々は、複数の点光源と高速カメラを用いた広帯域な光無線通信によりそのようなシステムの実現を目指している[1-2]。

近年の高性能カメラではフレームあたり画素数、時間あたりフレーム数が向上し、毎秒1億画素以上の撮像が可能である。しかし、高画素レートのデータに対して、明るさ・色調補正やノイズ除去フィルタなどの基本画像処理、移動する点光源の認識と追従、エラー訂正や復号などをソフトウェアのみでリアルタイム処理することは困難である。我々は、ソフトウェアと再構成可能ハードウェア上の画像処理アクセラレータからなるシステムを構成し、動作記述言語による高位合成を活用したソフト・ハード協調設計[3]を行う。

2. システム構成

システムは送信系と受信系からなる。送信系では、センサが取得した情報を符号化し点光源の点滅パターンとして送出する。受信系では、複数の送信機の点光源をカメラで撮影し、点光源を検出・追跡し、その点滅パターンを読み取り、復号する。送信系に対して受信系では、光源位置の推定、移動に対する追従、遮蔽・ノイズ対策、点滅タイミングの同期、そしてエラー訂正復号など、計算負荷の大きい処理が必要となる。

我々が開発している受信系のシステム構成を図1に示す。比較的単純で一様なフロントエンド処理(I)を FPGAで行い、複雑で高度なバックエンド処理(II)を PCで行う。FPGA内はさらに、カメラインターフェースやフレーム全体に対する画像処理(A)、特定領域に対する検出・追跡処理(B)、全体制御(C)、の各部に分けられる。(A)部は、非常に高いレートでの処理が要求されるため、ハードウェア記述言語 Verilog HDLにより高度に最適化したハードウェアとして設計する。(B)部は、それよりも若干レ

トが低く、しかし複雑な処理が要求されるため、生産性・柔軟性の高い動作記述言語 Impulse C で設計する。(C)部は、マイクロプロセッサ MicroBlaze によるソフトウェア処理とする。

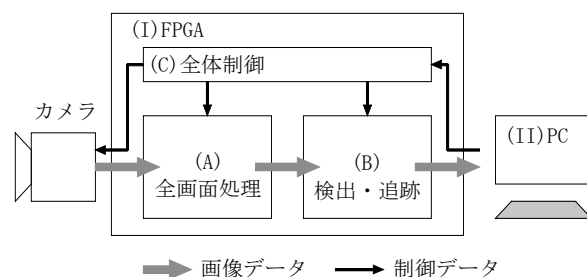


図1：受信系のシステム構成

3. 光源発見・追跡方法

様々な状況、光環境で点滅する送信光源を発見することは容易ではない。これを可能にする高度な推定アルゴリズムの実装には、PC上の高性能プロセッサによるソフトウェア処理が適している。しかし、そのような処理は計算負荷が高く、最新のプロセッサをもってしても高レートの処理は困難である。そのため、ソフトウェアとハードウェアとの連携をはかる。

ハードウェア(A)上で、ソフトウェアの負荷を減らすための間引き処理(フレーム間引き、領域切り出し)を行う。また、ハードウェア(B)上で比較的単純な光源候補領域の検出や追跡を行う。初期状態(喪失状態)では、ハードウェアで間引いたデータに対して、ソフトウェアによる高度な推定アルゴリズムを適用する。このとき、ハードウェアによる候補点検出の支援を受ける(未実装)。光源を発見した後、画面内での移動に追従する。1ms未満の高フレームレートを想定しており、高速処理が要求される反面、1フレームあたりの変化は少ない。比較的単純な追跡アルゴリズムをハードウェア実装することで、これにこたえる。本稿は、この追跡アルゴリズムの高速ハードウェア設計について報告する。

"A trial implementation of a light tracking hardware for wideband optical wireless communication with high-speed camera"

Kawai Ryo[†] Jo Keita[†] Izumi Tomonori^{†‡} Shiraki Yoshifumi* Kamamoto Yutaka*

[†]Department of VLSI Design, Ritsumeikan University

[‡]Department of Electronic Systems, Ritsumeikan University

*NTT Communication Science Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation

4. 光源追跡ハードウェア

図2にブロック図を示す。カメラで撮影された映像は画素(ピクセル)のストリームデータとして入力される。そのままでは非常に高いレートとなってしまったため、まずピクセル間引きモジュールで候補領域を切り出し、さらに入力レートを下げるため1画素単位の入力を n 画素単位(ここでは n=2)にシリアル/パラレル変換する。

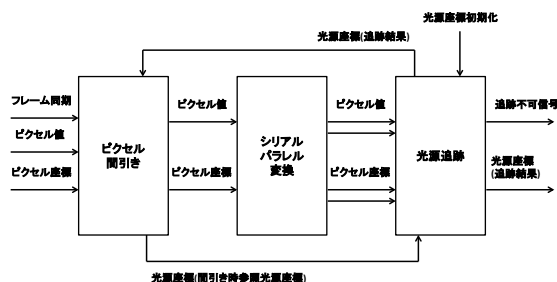


図2: 光源追跡ハードウェアのブロック図

光源追跡ハードウェアは、性能と記述の生産性・柔軟性のバランスを考慮し動作記述言語 Impulse C で設計する。動作記述から高位合成した回路では、通常1入力データあたり数サイクルのスループットに落ちてしまうが、前段の変換モジュールで整合させる。また、処理速度の差を吸収するための FIFO バッファをモジュールの入力側に置く。

光源追跡は、初期状態として光源喪失の状態で作動作を開始する。このとき、PC 上のソフトウェアは低フレームレートの画像を用いて光源を探す。光源候補を発見すると本モジュールに対して初期位置を指示する。本モジュールは、(初期)位置がセットされると、光源候補が中心となるように追跡し、ピクセル間引きモジュールに座標を指示する。また、光源候補の座標と領域内の平均輝度を PC に送出する。

本モジュールは輝度の分布と重心に基づいて光点を追跡するが、消灯時あるいは遮蔽により一時的に見失うこともある。光点を見失っても、一定時間はそれまでの位置と速度に基づき追跡を続ける。一定時間以上光源を再発見できない場合は、光源喪失と判断し、PC 上のソフトウェアに追跡不可信号を送出する。

5. 設計結果

設計した光源追跡ハードウェアモジュールについて、動作記述をハードウェアにコンパイルし、基本性能を評価する。ここでは、フレームサイズは 128×64 画素、追跡対象領域は 16×16 画素とした。合成に際して、ブロックを平坦化して最適化を行う FLATTEN プラグマ指定の有無の2パターンを作成した。合成の対象は東京エレクトロデバイス社製 FPGA ボード SASEBO-G2-11 上の Xilinx 社 Virtex5 FPGA (XC5VLX30-1)とした。

まず、回路シミュレーションによりスループットとレイテ

ンシを確認する。表1に結果をまとめる。FLATTEN プラグマ無しでは18クロックにつき1データ2画素のレートであるが、プラグマ有り3クロックに改善されている。追跡領域の 1/3 ライン程度の入力 FIFO を置けば、毎クロックの画素入力に対応できる。第3列は、追跡領域の最後の画素が入力されてから、追跡結果が出力されるまでのレイテンシである。次フレーム開始までの時間的余裕が 53 クロックより大きければ、追跡結果を次フレームに反映できる。それよりも遅れると、ふたつ後のフレームに反映される。

表1: スループットとレイテンシの評価

FLATTEN	スループット	レイテンシ
無し	2 画素 / 18 クロック	58 クロック
有り	2 画素 / 3 クロック	53 クロック

表2に回路の規模と最大動作周波数を示す。第2～3列は入力 FIFO バッファを除く LUT 数、フリップフロップのビット数、第4列は最大動作周波数である。重心計算の除算を高速処理するため、FLATTEN 有り回路で 1675LUTs, 1020FFs と大きな回路規模となっているが、152MHz/3 クロック×2 画素≒1億画素毎秒の高スループット、53 クロック/152MHz≒350ns の超低レイテンシを達成している。

表2: 回路規模と動作周波数

FLATTEN	#LUT	#FF	Max Freq
無し	1832	1026	157MHz
有り	1675	1020	152MHz

6. まとめ

広帯域光無線通信のための光源追跡ハードウェアの検討を行った。ハードウェア記述言語と高位合成の利点を組み合わせ、高性能と柔軟性を両立したハードウェアモジュールを設計した。回路規模は多少大きいものの高いスループットを確保していることが確認できた。今後は、本モジュールの改良、これを組み込んだシステム全体の構築、PC 側も含めたアルゴリズムとアーキテクチャの改良に取り組む予定である。

参考文献

- [1] Y. Shiraki, Y. Kamamoto, T. Moriya, "Simultaneous reconstruction of undersampled multichannel signals with a decayed and time-delayed common component," in Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), May 2013.
- [2] G. Pablo Nava, Y. Kamamoto, T. G. Sato, Y. Shiraki, N. Harada, T. Moriya, "Image processing techniques for high speed camera-based free-field optical communication," in Proc. 2013 IEEE International Conference on Signal & Image Processing Applications (ICSIPA), Oct. 2013.
- [3] 荒川, 泉, "画像処理用ラインバッファの高位合成系向けライブラリ化設計", 信学技報 RECONF2012-83, 2013 年 1 月.