

第7章

CMOSイメージ・センサで読み込んだ画像のエッジ検出を行う 画像処理回路の製作

山際伸一, José Germano

本誌付属FPGA基板の画像処理回路への活用例を紹介する。ここでは、CMOSイメージ・センサから画像を読み込み、読み込んだ画像データに対してエッジ検出処理を行う。処理後の画像は、シリアル通信でパソコンに転送して表示する。エッジ検出アルゴリズムには、Sobelフィルタを用いる。(編集部)

デジタル・カメラや携帯電話のように、イメージ・センサを搭載する小型の機器が増えています。このような携帯機器では、小型化によって受ける制約を、画像処理などの技術で補うことが求められます。光学的に優れたレンズは、どうしても大きくなってしまいます。ひずみや手ぶれの補正、デジタル・ズームといった機能を画像処理で実現することは、製品を小型化する上で重要な技術となります。

画像処理は、CPUで動作するソフトウェアで実現するこ

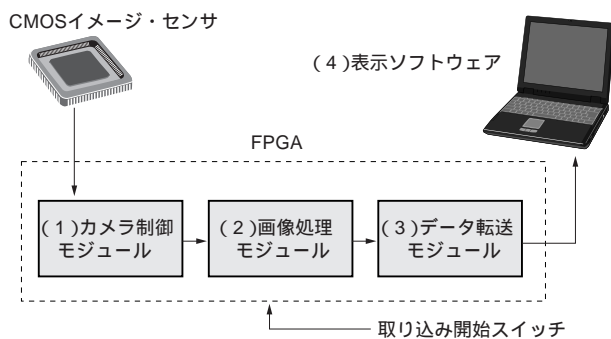


図1 画像処理システムの構成

カメラ制御モジュール、画像処理モジュール、データ転送モジュール、表示ソフトウェアから構成される。

とも可能です。しかしCPU処理能力によるフレーム・レートの制約から、カクカク動くと感じられてしまうことがあります。

そこで画像処理アルゴリズムをハードウェアで実装することが欠かせない技術になります。消費電力の点でも、CPUによるソフトウェア処理よりも、特化されたハードウェアのほうが低消費電力を図れます。

本稿では、CMOSイメージ・センサから取り込んだ画像を処理するアプリケーションを紹介します。Spartan-3Eには18ビットの整数乗算器がハード・マクロで内蔵されているため、掛け算を頻繁に使う画像処理などのデジタル信号処理に適します。

1. システム設計

システム全体の構成を図1に示します。

- カメラ制御モジュール
- 画像処理モジュール
- データ転送モジュール
- 表示ソフトウェア

から構成されます。

カメラ制御モジュールは、CMOSイメージ・センサからの画素値を読み取ります。その画素値は、画像処理モジュールに転送され、画像処理を行います。画像処理後のデータは、データ転送モジュールによりFPGA外部に送出し、パソコンの表示ソフトウェアで表示します。

今回は、画像処理モジュールでエッジ検出処理を施して

Keyword

FPGA, CMOSイメージ・センサ, 画像処理, エッジ検出, Sobelフィルタ, OV9650, SCCB, I²C-bus, Open Cores, WISHBONE

みます。

● 設計仕様を決める

ここで設計仕様として、以下の事柄を考慮します。

(1) 輝度を画素値として用いる

今回は、画素値として輝度を使用します。従って、白黒画像を扱うこととなります。CMOSイメージ・センサは、8ビットの輝度データを出力します。

フルカラー画像を扱いたい場合は、RGBのそれぞれの画素値に対して同じ処理を個別に行えば可能です。

(2) 画像サイズ

今回は、128 × 64ピクセルの画像を扱います。画素値は8ビットですから、8Kバイトの画像データをハードウェアで扱うこととなります。

(3) できるだけデータをバッファリングしない

近年のFPGAは多くのメモリを搭載していますが、画像処理アプリケーションでは十分とは言えません。付属FPGA基板に搭載されているXC3S250Eのメモリ・ブロックは約192Kビット(約24Kバイト、パリティを除く)しかありません。従って、QVGA(320 × 240ピクセル)の画像すら扱えないこととなります。

今回は、1フレーム分の画素データではなく、画像処理モジュールにおける計算に必要な最低限度の画素データだけをバッファリングします。入力されてきたデータに対して順次計算を行って、その結果を次々とデータ転送モジュールから出力します。

128 × 64ピクセルの画像の場合、すべての画像をバッファリングすることも可能ですが、大きな画像を扱うことが可能なように、すべてのモジュールにバッファを置かないようにします。しかし、データ転送モジュールでは表示ソフトウェアの性能に左右されてしまうので、バッファを置くようにします。

● エッジ検出アルゴリズムはSobelフィルタ

画像処理モジュールに実装するエッジ検出アルゴリズムを考えます。

画像処理では、ピクセルの値を色の濃さとして捉えるため、「濃度値」とも言います。エッジ検出処理では、この濃度値に高低差を大きく付けることとなります。つまり、あるピクセルの濃度値が、周囲のピクセルの濃度値と比べて変化が大きいときには、そのピクセルの濃度値をより大

きくします。反対に変化が小さい場合には、より小さくする計算をします。あるピクセルを中心としてその周辺の濃度値から新たな濃度値を求めるので、畳み込み演算(コンボリューション)とも呼ばれます。

エッジ検出には、Sobelフィルタ、Prewittフィルタ、2次元FIR(finite impulse response)フィルタ、2次元IIR(infinite impulse response)フィルタなど、多くアルゴリズムが提案されています。ここでは、2次元のエッジ検出とノイズ耐性の良さなどの理由から、頻繁に用いられる方法の一つであるSobel(ソベル)フィルタを用います。

Sobelフィルタは、あるピクセルの周辺ピクセルの濃度の微分を求め、それを新たな濃度値とします。つまり、周辺のピクセルとの濃度値の差分を加算することで、計算対象のピクセルの濃度値を強弱させます。この差分は2次元に対して行われますので、垂直方向の係数行列Vと水平方向の係数行列Hのそれぞれを、対象となるピクセルとその周辺からなる行列Iの対応する各成分を掛け算し、足し合わせた値の絶対値になります。この演算の数式と概念を図2にします。

図2の数式から分かるように、Sobelフィルタをハードウェアに実装するためには、掛け算回路が多数必要になります。この計算をFPGAに実装することを考えると、論理ブロックで掛け算回路を実現するのではなく、Spartan-3Eのようにハード・マクロの乗算器を持つFPGAが理想的といえます。

$$I = \begin{matrix} \begin{matrix} P_0 & P_1 & P_2 \\ P_3 & P_4 & P_5 \\ P_6 & P_7 & P_8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$P = \left| \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 I_{ij} V_{ij} \right| + \left| \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 I_{ij} H_{ij} \right|$$

$$V = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

上の計算では、下のような3 × 3画素の中心におけるグラディエント()を求めているとイメージできる。

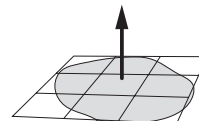


図2 Sobelフィルタ

ピクセルP₄とその周辺のピクセルからなる3 × 3の行列Iから、垂直方向の係数行列Vと水平方向の係数行列Hを用いてP₄のエッジを強調した濃度値Pを求める。I_{ij}, V_{ij}, H_{ij}は、それぞれ行列I, V, Hの各要素を示す。