

## 論文内容の要旨

論文題目： 高機能イメージセンサによる多眼動画像処理とダイナミックレンジ拡大に関する研究

氏名： 大井 隆太郎

近年、イメージセンサはデジタルスチルカメラや、ビデオカムコーダ、携帯電話など、数多くの民生用機器に用いられており、一般の人々にとって身近な存在となっている。もともとイメージセンサはテレビジョン放送や製品検査をはじめとする産業用途などの限られた分野で用いられていたが、イメージセンサの低コスト化、高画質化に伴い、その用途は拡大を続けている。

イメージセンサの発展の方向には、素子自体の特性を向上させる高性能化と素子に何らかの機能を付加する高機能化の2つの方向が考えられる。本論文では、後者に焦点を当てた研究を行った。受光素子と並列処理機構とを撮像面上に統合し、イメージセンサ内部において、固有の処理を行うスマートイメージセンサの研究が過去20年近くにわたって行われている。通常のイメージセンサと異なり、スマートイメージセンサ上では画像本来の2次元性を有効に利用した並列処理を行うことにより、処理速度、システムとしての統合性などの面で、従来システムに無い優れた性能を実現している。反面、スマートセンサでは限られたスペースに処理アルゴリズムを作りこむことが必要であり、画素数やS/N、各画素の開口率などの基本性能を犠牲とすることや、処理の精度、汎用性などの課題があった。

一方、近年の汎用プロセッサの発達も著しく、数年前までは特殊なハードウェアを使用しなければ実現不可能であった、VGAサイズでビデオレートの動画像に対し、単純な処理であれば家庭用の汎用PCの能力で処理できるレベルに到達している。汎用プロセッサを用いたデジタル処理は、その精度とアルゴリズムの柔軟性の点で優位であり、しかも、年々

その能力が向上する。ただし、その構成は柔軟性に欠け、全画素読出しを行うイメージセンサと汎用プロセッサを使用する従来方式の画像処理システムにおいて、両者をつなぐビデオ信号の伝送系はセンサから処理部への一方通行である。イメージセンサチップ自身はプロセッサでの処理内容に応じて変化することは無く、単なる情報の送出器に過ぎない。外部からイメージセンサ自体に与えることができるパラメータは電子シャッターの設定時間程度に限られ、それはイメージセンサの画素アレイ全体に対して均一に与えられるいわば大局的なパラメータのみである。

ここで、プロセッサからイメージセンサチップ自体へフィードバックできる情報をもう少し増やすと画像処理システム全体のパフォーマンスが大きく向上すると考えられる。例えば画素アレイの特定エリアごとに解像度や感度を変化させて読み出すことで、イメージセンサからプロセッサへ送られるデータ量を抑えたり、システム全体のダイナミックレンジを向上させたりする効果が期待される。

本論文ではイメージセンサの撮像面上に局所的な制御機構を統合することにより、画像処理システム全体の性能向上を図る2つの高機能イメージセンサを検討し、その有効性を確認することを目的としている。具体的には、多眼動画画像処理システムおよび広ダイナミックレンジ撮像システムにおいて、システム全体として性能向上を図る。共に、イメージセンサ外部の処理部から小規模な制御情報をイメージセンサにフィードバックする構成で、センサ側は、その制御情報に基づいて、画素アレイ内の領域毎に解像度や感度を局所的に変更する機能を持つ。イメージセンサに設ける追加の制御機構はセンサ自体の物理的性能を極力犠牲としない構成とし、イメージセンサ上でなければ成立しない機能、後段の処理では事実上困難な機能に限定した。

ランダムアクセスイメージセンサは、現代の高速汎用プロセッサでも、そのデータ量ゆえに実時間処理が難しい多眼動画画像処理に使用し、効率の良い処理を行うことを目的としたセンサである。局所的な読出しと局所的な解像度制御の機能を持つ。

可変感度イメージセンサは、イメージセンサの各画素の感度を外部からアクティブに変化させることで、リニア応答蓄積型イメージセンサにおいて情報が失われる原因である画素の飽和現象を予防し、結果的に広ダイナミックレンジシーンの撮像を可能とする機能を持つセンサである。

本論文では提案する2つの高機能イメージセンサのプロトタイプを実際に設計、試作し、その特性を検証した。さらに、これらのプロトタイプチップを用いることで、従来型画像処理システムでは取得が困難であったシーンの取得を行う為のプロトタイプシステムをそれぞれ設計、試作してその有効性の確認を行った。

## ○ランダムアクセスイメージセンサ

コンピュータグラフィックスの分野で注目されている LFR システムは、大規模な多視点画像を使用することで写実性の高い任意視点画像を合成できる。この LFR システムを動きのあるシーンに適用する際には入力部のデータ量が膨大であり実時間処理が難しい状況にあった。このような LFR システムにランダムアクセスイメージセンサを用いることで、入力部のボトルネックを解消でき実時間 LFR システムへとつながる。このような多眼動画像処理システムに使用するために、イメージセンサ側に必要な機能は、画素独立なランダムアクセス読み出し、全画素同時リセット、高速な読み出し応答速度、十分なセンサ物理特性の 4 つに集約される。CMOS 構成によるランダムアクセスイメージセンサのプロトタイプチップでは想定される読み出しレートである毎秒 60 フィールドの速度に対して十分に余裕のある回路設計を行った。さらに回路を元にした CMOS $0.8\mu\text{m}$  プロセスでのレイアウト設計を行い、画素サイズ  $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$  で  $128\times 128$  画素からなるプロトタイプチップを試作した。二層メタルのプロセスで、開口率は約 21%となった。

試作したプロトタイプチップでは、シリアル選択方式およびパラレル選択方式双方による画像検証において、毎秒 60 フレームでの切り出し出力が可能であることを確認した。さらに、高速ランダムアクセスに適しているシリアル選択方式を用いた検証により毎秒 330 フレームでの選択出力動作が可能であることを確認した。また、画素回路を使用したテストにより、サンプル&ホールド回路において多眼動画像処理システムにおいて想定される 1 フィールド期間である  $16.7\text{ms}$  の適切なホールド動作を確認した。

ランダムアクセスイメージセンサを用いた第 1 のアプリケーションとしてセンサを 16 個用いた、 $4\times 4$  眼実時間 LFR システムのプロトタイプを試作した。イメージセンサのアドレスを制御するためのコントロール回路は単一の FPGA へ実装した。また、実時間 LFR システムにおける視点入力部は Linux 上の X ウィンドウシステムを用いるグラフィカルユーザインターフェースを作成した。このシステムによる実空間物体の任意視点画像合成実験では仮想視点位置の入力から、レンダリング結果の提示までの全てのプロセスを毎秒 60 フレームにおいて実時間処理可能であることを確認した。ランダムアクセスイメージセンサを使用して画素を局所的に読み出す方式では、プロセッサ負荷を軽減して、高速な処理が可能である優位性を確認した。

ランダムアクセスイメージセンサを用いた第 2 のシステムとして、複数動物体の同時追跡システムを実装した。広いエリアをモニタリングする際、従来のモータ制御によるパンチルト・ズームカメラを使用した場合、視点の切り替えに要する時間が長く一度の一つのオブジェクトしか追跡することができなかったが、このシステムではスタティックなカメラアレイによる高速な視点切り替えにより複数物体の同時追跡可能になる。カメラアレイが持つ幾何的、光学的歪の補正のため、予め被写体平面近くで撮影したキャリブレーションボードの歪測定から変換行列を求め、以後の処理でこの補正值を使用した。背景差分を基

本とする動物体追跡のアルゴリズムでは、連続領域の大きいものから順に優先度をつけてユーザに提示する構成とした。実験により、被写体平面上で反対方向に動く2つのオブジェクトを同時追跡させて毎秒約5フレームの速度が得られることを確認した。

#### ○容量選択型可変感度イメージセンサ

今日のリニア応答型イメージセンサを用いたシステムでは、不足するダイナミックレンジを補うために、フレーム毎に均一な感度制御をおこなうが、同一フレーム中に高輝度、低輝度混載のシーンでは、適切な露光条件を設定できない場合がある。同一フレーム内に複数の感度を持つ画素を混載させる可変感度イメージセンサでは、画素毎に感度の異なるフィルタを配置した場合と同様な、時間方向の処理を行わない広ダイナミックレンジ化が達成できる。単純かつロバストな感度の変更方式として、画素内キャパシタの選択によりフォトダイオードの等価容量を増減させる方式を採用した。さらに設計した回路をもとにCMOS0.6 $\mu$ mプロセスでレイアウト設計を行い、200 $\times$ 200画素からなるプロトタイプを試作した。三層メタルのプロセスで、画素ピッチは20 $\mu$ m、開口率は約24%となった。

容量選択型可変感度イメージセンサの直線応答領域において、低感度側が高感度側に比べ電圧値で-6dBの感度であることを実験により確認した。さらに、PC上のソフトウェアによるオフライン処理により、プロトタイプイメージセンサの各行の感度をアクティブに制御し、従来型のフレーム内均一制御では適切な露出設定ができない広ダイナミックレンジシーンにおいて、明領域、暗領域双方に適した露出で撮像が可能であることを確認し、本センサの優位性を示した。

画像処理システムにおいて、露光時間という大局的なコントロールしか受け付けなかった従来のイメージセンサに対し、局所的な感度制御機能または局所的な読み出し制御機能を付加する事で画像処理システム全体のパフォーマンス向上が可能であることを明らかにしたことが、本論文の主たる成果である。