

## 論文の内容の要旨

### Smart Image Sensors and Associative Engines for Three Dimensional Image Capture

(3次元画像取得のためのスマートイメージセンサと連想プロセッサに関する研究)

氏名 大池 祐輔

本論文では、3次元画像取得を目的としたスマートイメージセンサと連想プロセッサに関する研究成果を示す。近年の映像情報メディアの3次元化と家庭への普及はめざましく、3次元コンピュータグラフィックを駆使した映画やテレビだけでなく、家庭用ゲーム機やパソコンによる3次元映像のインタラクティブな操作は日常のものとなってきている。今後もあらゆる場面で急速に映像情報メディアの3次元化が進むと考えられ、要素技術のひとつである3次元情報の入力技術や画像処理技術にも、高速化や高解像度化、柔軟な視覚機能などが要求されている。3次元画像取得は、主に距離計測のためのイメージセンサと、得られた情報から3次元画像を再構成する画像処理から成る。距離計測は、古典的な両眼立体視法や、光伝搬法(レーダ法)、光切断法などの手法が一般に用いられるが、その距離精度や空間解像度、撮影速度などはイメージセンサの性能によるところが大きいのである。現在主流のCCDやCMOSイメージセンサは、2次元画像においては100万画素を超える解像度に至っているが、それに匹敵する高品質な距離画像を高速に取得することは未だ実現されておらず、距離計測の機能を集積化したスマートイメージセンサの研究が進められている。また、距離計測イメージセンサが高品質な3次元画像を取得できるようになれば、それにとともに、膨大な距離画像データを高速に処理できるプロセッサが必要となる。そして、メモリとプロセッサの性能差を縮め、並列化によって効率的なデータ処理を実行できる連想プロセッサが、将来の3次元画像処理に必要であると考えられる。

第2章では、実時間・高解像度3次元イメージセンサのための高速有意画素検出手法と回路を提案する。本手法は画素値の読み出しにダイナミック論理回路を用いて、画素値を時間領域に変換、アクセスした画素の相対的な遷移タイミングで有意画素を検出する。さらに、時間解像度を上げることで有意画素の輝度分布を同時に取得することができ、投射光の中心位置検出精度を向上できる。従来の3次元イメージセンサと異なり、一般的なCMOSイメージセンサと同様の画素構造を適用可能であり、画素サイズの小型化と高解像度化にも有利である。提案手法を用いて640×480画素3次元イメージセンサを設計、試作した。測定により、3次元画像を最大65.1枚/秒で取得することができ、1200mmの距離にある物体を0.87mmの距離精度で計測できることを示した。従来の最も高速な3次元イメージセンサに対して、より高速かつ高解像度な3次元画像取得を実現した。さらに、解像度拡張により1024×786画素の3次元イメージセンサを試作、より高解像度かつ高精

度な実時間 3 次元画像取得システムを実現した。また、この高速有意画素検出手法における背景光外乱、行選択タイミングのずれ、トランジスタばらつきの影響による、閾値余裕の拡大や検出エラーなどを抑える手法と回路を提案する。投射光のない状態で露光をし、アクセスした各画素の遷移タイミングから、その画素値を推定する。推定された画素値はリセット電圧として即座にアクセスされた画素にフィードバックされ、次のフレームでは背景光成分がキャンセルされる。さらに、リセット電圧生成に用いられた遷移タイミングは、行選択タイミングのずれや各画素のトランジスタばらつきなども反映されているため、これらのばらつきも同時にキャンセルすることが可能である。352×288 画素の 3 次元イメージセンサに実装した。本手法においても一般的な CMOS イメージセンサの画素構造を適用可能であり、解像度を損なうことなく高速な 3 次元画像取得を実現する。これらのアクセス手法および回路方式は、これまでに実現の困難であった実時間かつ高解像度・高精度な 3 次元画像取得を可能とする。

第 3 章では、探索信号の伝搬による行並列有意画素検出手法と 1000 枚/秒の距離計測速度を目指した超高速距離計測イメージセンサを提案する。センサ面上で結像したシート光の位置を効率的に取得する手法として、センサ面内で行並列に有意画素を検出し、アドレス情報のみを出力する距離計測イメージセンサを設計、試作した。試作イメージセンサは 2 値化回路、有意画素探索回路、アドレス取得回路などを含む 375×365 画素と、行並列アドレス演算回路、センサ制御回路と PLL などから構成される。最大 394.5 kHz のフレームアクセス速度を実現し、十分な投射光強度が得られた場合、最大で 1052 枚/秒の超高速距離計測が実現できることを示した。提案手法および回路方式は、物体の破壊や変形の監視、部品の高速検査、高速動物体の追跡など、非常に高速かつ高精細な距離画像を必要とする将来の応用分野を切り拓くと考えられる。

第 4 章では、画素並列変調光検波型イメージセンサを提案する。本イメージセンサは、強い背景光外乱の中でも安全な強度の微弱投射光を検出することを目的とする。電流型背景光抑圧回路を画素内に有し、変調投射光に対して画素並列検波をすることで、屋内外のさまざまな背景光外乱のもとで、微弱な投射光の位置を検出することができる。試作した 120×110 画素ポジションセンサは、背景光強度に対する検出可能な投射光強度が -18 dB 以下という高感度投射光検出を、48 dB 以上の背景光範囲で実現した。検波周波数と一致した成分のみを検出するため、高い選択性を有し、複数光源を用いた計測システムなどにも容易に適用可能である。

第 5 章では、画素並列変調光検波方式の拡張として、RGB 変調混合光の投射による、カラーフィルタレスの画素単位カラー情報取得イメージセンサを提案する。提案画素回路は背景光成分による飽和を抑え、かつ、変調光成分に線形に入射光強度を取得することが

できる。背景光の強度や色によらず対象物体の色情報を取得できる。また、検波機能を位相検出回路として利用することで、光伝搬法による距離計測にも応用できる。試作した  $64 \times 64$  画素カラーイメージセンサは、物体本来の色情報とおおまかな距離情報を得ることに成功し、物体抽出などと合わせた画像認識へ応用可能であることを示した。さらに、投射光あるいは LED など発光源に符号化した情報を乗せることで、シーン画像と物体の位置、ID、付加情報などを同時に取得できるイメージセンサを提案する。試作した  $128 \times 128$  画素イメージセンサは、拡張現実システムへの応用に向けた従来のイメージセンサよりも、高速かつ安定して ID 情報を取得できることを示した。

第 6 章では、ハミング距離を用いた高速かつ容量拡張性の高いデジタル連想プロセッサを提案する。探索信号伝搬を用いた不一致ビットの探索と、同期回路による順次マスク処理、さらに探索経路の階層化などにより、容量拡張性に優れた高速なデジタル連想プロセッサの概念、アーキテクチャ、回路方式を提案した。0.18  $\mu\text{m}$  CMOS プロセスを用いた  $64 \text{ bit} \times 32 \text{ word}$  の試作では、正確なハミング距離にもとづく高速検索を実現し、さらに、1.0 V 以下での低電圧動作が可能であることも実証した。

第 7 章では、第 6 章で提案したハミング距離連想プロセッサのさらなる容量拡張を目指し、パイプライン型プライオリティ決定回路と階層的な複数チップ構成を提案する。連想プロセッサの大きな問題でもある乏しい容量拡張性を、提案したデジタル連想プロセッサは解決しているものの、利用可能なチップサイズは限界があるため、一般的な SRAM や DRAM などと同様、複数チップ構成での容量拡張性の向上が必須である。従来の連想メモリ/プロセッサでは、相対的な最小距離検索の機能を実現しているが、正確なハミング距離をともなわないため、チップ間での比較には大きな演算コストが必要であった。提案手法では、全て同じマスクから製造された各連想プロセッサチップを、階層的に接続するだけで、高速かつ大容量なハミング距離検索処理を実行できることを示した。

第 8 章では、3 次元画像に対する演算処理などでより有効な、マンハッタン距離にもとづく連想プロセッサを提案する。階層型の探索信号伝搬経路を同様に実装し、重み付き探索クロックをワード並列に管理・供給することで、高速かつ容量拡張性に優れたマンハッタン距離連想プロセッサを実現できる。8 bit  $\times$  32 element を 64 word 持つ試作チップを 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS プロセスを用いて試作した。本来必要な膨大な演算を並列かつ効率的に実行することで、高速な最小距離データの検出や、範囲内データの抽出、全データの並べ替えなどが可能であることを示した。

第 9 章では、3 次元画像に対する連想処理について述べる。距離画像からの 3 次元的な物体抽出処理に注目し、連鎖型探索アルゴリズムを第 8 章のマンハッタン距離連想プロ

セッサを拡張することで実現、高速な処理が可能であることを示した。

これらの結果が示すように、提案フレームアクセス手法、光検出手法、回路方式、システム方式によって、高速、高解像度かつロバストな3次元画像取得システムを実現できることを示した。また、提案デジタル連想プロセッサは、高速な距離検索かつ高い容量拡張性を実現した。これらのスマートイメージセンサおよび連想プロセッサに関する成果は、3次元画像取得システムの発展に大きく寄与し、高品質3次元映像を活用する将来の応用分野を切り拓くきっかけとなると考えられる。