

CMOSイメージセンサのカラム並列型低ノイズ信号読み出し回路に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学大学院電子科学研究科 公開日: 2008-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 榊原, 雅樹 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/1179

氏名・(本籍)	榑 原 雅 樹 (愛知県)	452
学位の種類	博 士 (工 学)	
学位記番号	工博甲第 281 号	
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 24 日	
学位授与の要件	学位規程第 5 条第 1 項該当	
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 ナノビジョン工学	
学位論文題目	CMOSイメージセンサのカラム並列型低ノイズ信号読み出し回路に関する研究	
論文審査委員	(委員長)	
	教授 浅井 秀 樹	教授 下 平 美 文
	教授 杉 浦 敏 文	教授 川 人 祥 二

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、CMOSイメージセンサの信号を、十分なダイナミックレンジを確保しながら低ノイズで読み出すためのカラム並列型信号処理回路に関する研究を取りまとめたものである。

CMOSイメージセンサは、CCDイメージセンサに比較して機能回路の集積化が可能であること、低電圧単一電源で動作、低消費電力などの特徴をもつ。また、埋め込みフォトダイオードの応用により画素デバイスも著しく改善されている。これとあわせて、機能集積が可能である特徴を有効に活用することで、従来にない新しい機能を持ったイメージセンサの実現が期待されている。最も期待されている機能の一つに、信号を低ノイズで読み出す回路の実現がある。CMOSイメージセンサでは、信号の読み出しに画素アンプとカラムアンプ、外部出力のバッファを経由するため、信号読み出し回路の影響を低減することが低ノイズのイメージセンサを実現する上で必要である。カラム並列信号処理回路として増幅機能を持たせることでノイズ特性が大きく改善されることが知られているが、単に増幅機能を持たせるだけでは信号のダイナミックレンジが失われる。本論文では、低ノイズ特性とダイナミックレンジを両立することが可能な3つの信号処理回路を提案し、ノイズ解析、シミュレーション、また実際にイメージセンサを試作することによってその性能評価を行った。

第一の方法は、画素部からの信号を比較器を用いて適応的に増幅することで、ノイズ低減を図りながら、広いダイナミックレンジを確保するものである。画素からの信号が大きい場合は信号の飽和を防ぐために低いゲインで増幅し、逆に信号が小さい場合はカラム以降のノイズに対して耐性を持たせるために高いゲインで増幅をする。この方式を用いることで、信号のダイナミックレンジを確保しつつ低照度時のランダムノイズを抑制することが可能となった。さらにノイズ解析の結果か

ら、カラムで増幅することで増幅後に重畳するノイズを低減できるのみでなく、カラム増幅器自体が発生するノイズも低減できることを明らかにした。また、カラムの増幅器で高い増幅率が設定されると、後段に接続されるA/D変換器の分解能が増幅率倍向上するために、量子化誤差の低減も可能である。画素部に埋め込みフォトダイオードを用い、カラム並列型適応増幅回路を集積したCMOSイメージセンサを実際に試作し、 $263\mu\text{Vrms}$ の低ノイズ特性と71dBの線形ダイナミックレンジが得られることを示した。

第二および第三の方法は、カラム並列型の低ノイズ読み出し回路としてA/D変換機能を持たせることにより、デジタル領域での広いダイナミックレンジと低ノイズ特性の両立を可能とするものである。まず、第二の方法としては Δ 変調型A/D変換器にデジタル積分処理を組み合わせることで、ランダムノイズの低減とともに、ディザリング効果により、量子化ノイズを効果的に低減するカラム並列2重積分型A/D変換器を提案した。状態遷移図を用いた量子化ノイズ低減効果の解析モデルを構築し、これによる理論的解析と乱数を用いたノイズシミュレーションが一致することを示した。また、もっとも効果的に量子化ノイズを低減できるランダムノイズレベル範囲を見出した。その値は参照電圧発生回路とサンプリング容量で決まる熱ノイズが量子化ノイズの低減効果に有効な範囲にあり、ディザリング効果が発生させるランダムノイズは回路自体が発生する熱ノイズを使用することで、効果的に量子化ノイズを低減することが可能である。これにより、原理的には1024ステップで約5bit、分解能が向上できることを示した。この結果は、10bit分解能をもつA/D変換を用いた場合に量子化ノイズ低減効果により15bit相当のダイナミックレンジを実現できることを示す。第三の方法は、ノイズ低減とデジタル領域でのダイナミックレンジの両立のため、アナログ領域で積分処理を適応的にを行いながら高分解能のA/D変換を行うものである。この方式で行う適応積分処理は、カラム1.5bit巡回型A/D変換器に使用する2倍増幅アンプと比較器を用いることでわずかな制御回路をカラムに追加するのみで実現することができ、もともと低消費電力特性と小面積の特徴を持つ巡回型A/D変換器の特徴を最大限に発揮することが可能である。シミュレーションの結果、ランダムノイズは積分回数が増すにつれて入力換算で低減されることがわかり、積分が1回の場合は約 $130\mu\text{Vrms}$ のランダムノイズが発生するが、16回積分が行われた場合は入力換算で約 $30\mu\text{Vrms}$ まで熱雑音を低減できる見通しを得た。実際にデバイスの試作を行い測定を行った結果、画素信号の16回の適応積分と12bit分解能のA/D変換を行った出力は、ランダムノイズが入力換算で約 $66\mu\text{Vrms}$ となり、約82dBの広いダイナミックレンジが得られることがわかった。

論文審査結果の要旨

最近CMOSイメージセンサの性能改善が著しく、低ノイズ性能に関しては、特に高精細動画用途においてCCDを越える性能が実現されつつある。特に、CMOSイメージセンサの特徴であるカラムでの信号増幅を利用し、極めて低ノイズでの信号読みだしが行えることが河合らのノイズ解析により明らかにされている。しかしながら、これまでの読み出し方式では、増幅に伴う信号のダイナミックレンジ不足が課題とされている。本論文は、CMOSイメージセンサの機能性に着目し、信号に重畳するノイズを低減しながら、十分なダイナミックレンジを確保することができるカラム並列信号読み出し回路に関し、シミュレーションによる解析と試作による性能実証に基づく研究を取りまとめたものであり、全6章からなる。

第1章は序論であり、本論文の背景と目的を述べている。第2章では、CMOSイメージセンサにおける低ノイズ信号読みだしに関する基礎的考察として、そのノイズ要因等に関して取りまとめている。第3章では、イメージセンサのカラムにおいて、利得を入力信号の振幅に応じて画素毎に適応的に設定することができる適応ゲインカラム増幅方式を提案し、試作によりその優れた低雑音性能と、71dBの広いダイナミックレンジが両立できることを示している。第4章では、低ノイズ・広ダイナミックレンジ特性に加えて、高分解能A/D変換によるデジタル信号読み出しを可能とする2重積分型カラム並列A/D変換器を提案し、状態遷移図を用いて量子化ノイズの低減効果を解析している。本A/D変換器は、入力信号に対する粗いA/D変換を行うインクリメンタルA/D変換モードと、ノイズ低減により高分解能化を実現するための信号追従平均化モードを有する。イメージセンサ自体が発生するランダムノイズを利用したディザリング効果により、ランダムノイズの標準偏差が0.4LSBから0.5LSBのとき1024回の積分で5bitの改善効果が得られることを、状態遷移図による解析とランダムノイズを用いたシミュレーションにより確認している。第5章では、効果的にランダムノイズを低減し、デジタル領域での十分なダイナミックレンジを持たせる適応積分型カラム並列A/D変換方式を提案している。積分機能を巡回型A/D変換器自体に持たせることで、面積と消費電力の増加なく所望の機能を得ている。基本回路の試作の結果により、16回の適応積分を用いて、入力換算で約 $66\mu\text{V}_{\text{rms}}$ の低雑音性能と、約82dBの極めて広いダイナミックレンジをもったイメージセンサが実現できる可能性を示している。第6章は結論であり、得られた成果をまとめている。

以上のように本論文は、イメージセンサの低ノイズ特性と広いダイナミックレンジと両立することができる信号読み出し回路の有用性を明らかにしたものであり、映像機器の分野に寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士(工学)の学位を授与するに十分な内容を有するものと認める。