

氏名・(本籍)	朴 鍾 皓 (韓国)
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工博甲第 293 号
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 23 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	A Study on Dynamic Range Extension Methods and High Resolution Column Parallel Cyclic ADCs for CMOS Image Sensors. (CMOSイメージセンサの広ダイナミックレンジ化と高分解能カラム並列A/D変換器に関する研究)
論文審査委員	(委員長) 教授 海老澤 嘉 伸 助教授 塩 見 彰 睦 教授 猪 川 洋 教授 川 人 祥 二

論 文 内 容 の 要 旨

A wide dynamic range (WDR) image sensor with linear response is required for many imaging applications such as automobiles, security systems and industrial applications because a wide linear response for entire illumination range with high resolution enables reliable image recognition and signal processing. Consumer-grade CMOS image sensors, however, have a dynamic range of typically around 60dB to 70dB.

Numerous methods to expand the dynamic range of image sensors have been reported for last 10 years. Representative methods of wide dynamic range (WDR) imaging can be clarified by its response type. One is nonlinear response and the other is linear response. However, these WDR image sensors have critical problems to be solved such as image lag, high noise level, deficient dynamic range and SNR dip, etc.. This paper presents new approaches to expand the dynamic range for both the dark and bright region, simultaneously, and improved analog-to-digital converters for column integration in WDR image sensors.

In chapter 2, preliminary knowledge on CMOS image sensors (CIS) and cyclic ADCs is presented giving fundamental principles for recent imaging devices and systems. To investigate pixel structures, working principles and specifications of CMOS image sensors is very helpful to understand a concept of dynamic range expansion method and to develop new devices for wide dynamic range image sensors. Column parallel cyclic ADCs are used to very high speed signal

readout to achieve multiple exposures. In this chapter, basic concepts of CMOS imaging, previous researches for expanding the dynamic range of CMOS image sensors, and fundamental principles of the cyclic A/D converters are described.

Chapter 3 introduces a new active pixel structure with pinned photodiode and direct detection of the photodiode potential using a floating gate structure. In wide dynamic range image sensors, in order to expand the dynamic range to the low illumination level, a pixel structure with pinned photodiode should be employed. The pinned photodiode structure can reduce the dark current significantly, and the reset noise can be canceled by in-pixel charge transfer and correlated double sampling (CDS) at the column readout circuit. Recently, an active pixel sensor with pinned photodiode and in-pixel charge transfer has been reported. However, in this structure, reset and signal levels of the floating diffusion will be varied during the readout operation if the light intensity level is very high. This causes a complicated non-linearity in the photo-conversion curve. The outstanding benefit of the proposed pixel structure compared to the conventional active pixel is that the read signal and reset level are stable during readout operation because our device directly detects the photodiode potential with the floating gate.

Chapter 4 proposes a wide dynamic range CMOS image sensor that expands the dynamic range further to both high and low illumination regions compared with the previous design. To expand the dynamic range to high illumination, a technique of reading extremely short exposure time signal using inverted reset-signal sampling is proposed. The expansion of the dynamic range to low light level corresponds to the reduction of a random noise and other disturbances that degrade the image quality in low light level. Noise due to a capacitive coupling is reduced by simple reset operation. This chapter also introduces an improved cyclic ADC for column integration. A technique for amplifier's offset cancellation greatly reduces the column fixed pattern noise (FPN). A simplified cyclic ADC with 4 larger-size capacitors in fully differential configuration improves the DNL to be full 12-bit resolution. Using these techniques for the dynamic range expansion to high and low light levels, the total linear dynamic range of 153dB is achieved.

In chapter 5, a high-performance column parallel cyclic ADC utilizing an improved low-noise architecture and a digital calibration technique is presented. Errors caused by capacitor mismatches and finite gain of an internal amplifier is calibrated in digital domain. This technique enables a resolution of the column ADCs to be enhanced to 14 bits. Further DR expansion for lower illumination region can be achieved by reducing random noise generated at column circuits. To reduce the random noise, a new-type of cyclic ADC which begins the A/D conversion without S/H mode is proposed. Measured RMS noise of the fabricated ADC is $274\mu\text{V}_{\text{rms}}$. Measured results shows the effectiveness of the proposed ADC structure.

論文審査結果の要旨

最近イメージセンサのダイナミックレンジ拡大が、車載用カメラやセキュリティ用カメラを始め、あらゆる用途で必要とされ、特に低照度における高感度・低ノイズ特性と、太陽光の照度レベルまでカバーする高照度における広いダイナミックレンジを両立できる方式が求められている。本論文は、CMOS イメージセンサの機能性に着目し、低ノイズ特性による低照度領域へのダイナミックレンジ拡大と、十分な高照度領域へのダイナミックレンジ拡大を目的とし、新しい画素構造、ダイナミックレンジ拡大のための撮像方式及びカラム並列型高分解能 A/D 変換方式に関する研究を取りまとめたものであり、全6章からなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的を述べている。第2章では、広ダイナミックレンジイメージセンサに関する基礎的考察として、ダイナミックレンジ拡大の手法とダイナミックレンジを定める性能要因に関して取りまとめている。第3章では、フローティングゲートを検出部に用い、電荷の完全転送によるリセット動作等を用いて低ノイズ化を図るとともに、高照度領域で対数応答特性となることを利用した新しい画素構造の広ダイナミックレンジイメージセンサを提案し、デバイスシミュレーションを用いて、その有用性を明らかにしている。第4章では、1フレームの中で、複数の蓄積時間の信号を高速に読み出し合成する広ダイナミックレンジ撮像方式において、1水平読み出し周期よりも短い信号蓄積を可能にする極短時間信号蓄積方式を提案している。また、この方式に基づく広ダイナミックレンジ化に必須となるカラム並列型 A/D 変換器として、直線性を向上し、オフセット電圧とランダムノイズを低減した新しいサイクリック型 A/D 変換器を提案している。試作により、12ビットにおいて 0.3LSB の微分非直線性を得ており、カラム並列型としては、最も優れた直線性を実現している。また、これらの提案手法を用いて試作された広ダイナミックレンジイメージセンサにおいて、153dB という線形応答方式としては最高のダイナミックレンジを得ている。第5章では、広ダイナミックレンジイメージセンサの低照度における画質の改善を目的とした、高分解能巡回型 A/D 変換器とそのデジタル誤差補正方式を提案している。試作された 14ビット A/D 変換器において、0.85LSB 以下の微分非直線性を得ており、カラム並列型では初めてとなる 14ビット分解能の実現の可能性を示している。

以上のように本論文は、新しいダイナミックレンジ拡大方式とこれを可能にする高速で高分解能の A/D 変換器に関し、シミュレーションと試作を通して研究し、従来困難であった低照度における高感度・低ノイズ特性と極めて広いダイナミックレンジの両立への道を開いたものであり、撮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。