

氏名・(本籍)	Izhal Abdul Halin (マレーシア)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	工博甲第 286 号
学位授与の日付	平成 18 年 9 月 22 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 CMOS Time-of-Flight Range Image Sensors (光飛行時間法に基づく CMOS 距離画像センサに関する研究)
論文審査委員	(委員長) 教授 田部道晴 助教授 江上力 教授 三村秀典 教授 川人祥二

論文内容の要旨

Range images are images composed of a set of distance coordinate arranged in a rectangular image grid. Time-of-Flight (TOF) range imaging is a well established method to acquire range images in real time allowing 3D video imaging to be accomplished. Unlike other 3D image acquisition methods such as triangulation, Moire and interferometry, the TOF method eliminates the use of scanning mechanical parts in the imaging system, rendering it to be cost effective. In TOF sensors a controlled light source widely known as the active illumination light source is placed in line with the TOF sensor. TOF is defined as the delay time the light signal travels from its source to objects and back to the sensor. Range is calculated by multiplying the TOF with half of the speed of light constant. This work concentrates in developing purely CMOS TOF range image sensor with high accuracy and range resolution comparable to that of existing TOF range image sensors but with major expansion in the imaging grid. This thesis is organized as follows.

In chapter 2, preliminary knowledge on range imaging is presented giving stress to TOF range imaging. The TOF range imaging can be subdivided into many categories where difference between categories lies in the method of sensing the light traveling time and the type of active illumination light source used. The most popular TOF methods used are the pulse modulation, continuous wave modulation and pseudo-noise modulation. The pulse modulation method has been demonstrated using CCD and CMOS TOF image sensors. A CCD-CMOS hybrid TOF range image sensor using the continuous wave modulation has been demonstrated with an array of 176 × 144 pixels. The best range resolution reported is 1.33mm for a CMOS TOF range image sensor where a laser light pulse was used as the active illumination light source. At the end of chapter 2,

material regarding CMOS image sensors and CCD charge transfer are presented.

Chapter 3 introduces a modified version of the pulse modulation principle to estimate the TOF using the CMOS active pixel TOF sensor. A high gain cascode amplifier is used to separate the light pulse induced photo charge into two capacitors. The charge packets are then converted to signals V_1 and V_2 and read out through an in-pixel source follower.

Through a set of algebraic equations, it is shown that the modified ratio of $V_2/(V_1+V_2)$ is directly related to the TOF. The time delay dependant charge separation has been confirmed via computer simulation.

Chapter 4 discusses the CMOS gates-on-field-oxide TOF sensor which is another design that works using the same principle. Photo charge induced under a photogate is separated into two packets by manipulating the in-pixel electric field via two single layer gates. The packets are readout as corresponding signals V_1 and V_2 via two in-pixel source followers. This pixel incorporates charge draining structures in order to minimize the effect of background illumination on range measurements. From simulation, it is shown that a $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ pixel is possible with a fill factor of 19%. A mathematical formula stating that range resolution is inversely proportional to the number of induced signal charge is derived. Since range resolution is a function of induced optical signal, range resolution is thought to improve by the number of averaged range images. At the end of the chapter, design of the active illumination light source is presented.

In chapter 5, experimental results obtained from the fabricated CMOS gates-on-field-oxide TOF sensor are presented. The sensor was fabricated using a double poly triple metal CMOS process. A QVGA image format comprising of 336×252 pixels was integrated into the sensor chip. Through experiments, theoretical relationship between accuracy and range resolution to signal intensity is proven. The error of measurement is only 1.9% for a measured distance of up to 12.3m at 0.5V signal intensity. By using a 100ns light pulse, range resolution is 2.35cm at 30fps and can be improved to 0.75cm at 3fps for 1.05V of detected signal intensity. Examples of range images are also presented. It is shown that resolution of the range images can be improved using a shorter light pulse and by averaging several frames. The functionality of the background charge draining structures are also presented by analyzing resolution of range images captured with the presence of background illumination superimposed on the active illumination of the system.

In chapter 6 a conclusion is drawn about this work. It is shown that the gates-on-field-oxide structure is suitable for the design of a highly accurate, high spatial and range resolution TOF image sensor. Real time on-chip complete cancellation of background illumination effects is left as a future subject of study.

論文審査結果の要旨

距離画像センサは、ロボットの視覚、情報入力デバイス、防犯システム、車載用等広い用途があり、簡便で高精度な方式が求められている。本論文は、光の機械的走査系が不要で比較的簡単なシステム構成で実現できる光飛行時間(TOF)法に基づく距離画像センサを、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)集積回路技術に基づき実現するための研究を取りまとめたものであり、全6章よりなる。

第1章は、緒言であり、本研究の背景と目的について述べている。第2章では、従来の距離画像計測方式について取りまとめるとともに、それぞれの方式の得失について議論し、TOF法の位置づけを明らかにしている。第3章では、新しいTOF距離画像センサとして、受信パルス光の時間遅れに依存した信号電荷を、高利得アンプと2つのキャパシタを用いた電荷振り分けにより検出する方式を提案している。シミュレーションによって、その動作を確認し、高感度化に必要な増幅器利得などの設計条件を明らかにしている。第4章では、CMOS集積回路におけるフィールド酸化膜上に形成した単層ゲート電極構造により、時間遅れに依存した電荷を検出するTOF距離画像センサについて述べている。従来のCCDを基本とした構造に比べて単純な構造を有することから、画素サイズを小さくでき、高解像度のセンサが実現できること、また、デューティ比の小さい繰り返しパルス光を用いて背景光により発生する電荷を排出する新しい構造を提案しており、これによる背景光の影響の低減効果について述べている。また、提案方式における距離分解能を与える解析式を求め、分解能が信号電荷の総和の平方根に反比例することを示している。第5章では、フィールド酸化膜上のゲート電極構造を用いた方式に関して、約8万画素、画素サイズ $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ の距離画像センサの試作と測定結果について述べている。第4章で求めた距離分解能を与える理論計算式と測定結果がほぼ一致することを示すとともに、試作した距離画像センサにおいて、100ナノ秒のパルス幅の光源を用いた時、30frames/s、1Vの信号電圧において、約2.4cmの距離分解能が得られること、さらにフレーム周波数を下げ平均化処理を用いることで、3frames/sでは0.75cmが得られることを示している。これらは、 $15\mu\text{m}$ 角の微小な画素サイズでミリメートルオーダーの高い距離分解能が得られることを初めて示したものである。第6章は、結言であり本研究により得られた成果をまとめている。

以上のように本論文は、新しい方式のTOF距離画像センサに関し、シミュレーションと試作を通して研究し、距離画像センサとして高い空間解像度の実現と背景光低減により使用環境の影響を受けにくいTOF距離画像センサの実現の可能性を示したものであり、計測及び画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。