Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

Estudio de cámaras de tiempo de vuelo (ToF) para aplicaciones en exteriores

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Autor: Daniel Montagud Cortés

Tutor: Carlos Andrés Luna Vázquez

2018

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones

Trabajo Fin de Grado

Estudio de cámaras de tiempo de vuelo (ToF)
para aplicaciones en exteriores.

Autor: Daniel Montagud Cortés
Tutor: Carlos Andrés Luna Vázquez

Tribunal:

Presidente: Manuel Mazo Quintas

Director: Carlos Andrés Luna Vázquez

Vocal: Emilio José Bueno Peña

Calificación: …….

Fecha: ……...

Agradecimientos

"Todo parece imposible hasta que se hace"

Nelson Mandela

Después de mucho esfuerzo, por fin cierro una etapa muy importante en mi vida. Me gustaría agradecer tanto a mi familia (Papa, Mama y Raúl) como a mi pareja (Marina) todo el apoyo depositado en mí durante todos estos años. Gracias por todo. Os quiero mucho.

Agradezco también la ayuda recibida por parte de mi tutor (Carlos), profesores del grupo GEINTRA (Manolo, Cristina, Marta, Javi y Dani) y por supuesto a todos mis compañeros que me han apoyado y animado hasta el final (David Casillas, David Fuentes, Fran Vega, Juan Ignacio Fraile, Sara Luengo y Manuel Jiménez). Gracias a todos.

Por último, dedicar este Trabajo Fin de Grado a mis abuelos (Lucía, Rafael, María y Juan).

Resumen

El objetivo de este proyecto es verificar las posibilidades y limitaciones para la detección de objetos 3D en espacios exteriores, de dos cámaras de tiempo de vuelo (ToF) de alta resolución espacial.

Para ello, se realizan pruebas con objetos de varios tamaños, ubicados a diferentes distancias y para distintas condiciones ambientales, como pueden ser cambios de iluminación ambiental, efectos de la radiación solar, presencia de lluvia, etc. Además, se estudia el comportamiento de las cámaras ante la presencia de efectos de multicamino y objetos en movimiento.

Palabras clave: Cámaras de tiempo de vuelo, detección de objetos 3D, información de profundidad.

Abstract

The aim of this project is to verify the possibilities and limitations for the detection of 3D objects in outdoor spaces for two time of flight cameras (ToF) with high spatial resolution.

For this purpose, tests are carried out with objects of various sizes, located at different distances and for different environmental conditions, such as changes in environment ilumination, like solar radiation effects, rainfall presence, etc. In addition, the behavior of the cameras are studied in the presence of multipath effects and moving objects.

Keywords: Time of flight cameras, 3D object detection, depth information.

Resumen extendido

En este proyecto se aborda el estudio del comportamiento de dos modelos de cámaras ToF comerciales de alta resolución espacial, en espacios exteriores, con el fin de obtener conclusiones acerca de sus prestaciones antes condiciones ambientales adversas, así como la presencia de objetos que puedan generar efectos de multicamino y de objetos en movimiento.

Las cámaras ToF producen un mapa de profundidad, en la que cada píxel contiene la distancia entre el sensor y el punto correspondiente en la escena.

Este tipo de cámaras se pueden utilizar en diferentes campos de aplicación, como pueden ser sistemas de vigilancia, escaneado 3D de objetos y estructuras, detección de objetos que puedan suponer un peligro para la circulación de vehículos, automoción, ayuda a la navegación de robots en exteriores, etc.

Tras realizar un estudio sobre el funcionamiento de las cámaras de tiempo de vuelo, y las características y problemas que presentan, se llevará a cabo un análisis específico de las dos cámaras que se van a utilizar, enfocado principalmente en el comportamiento que experimentan en aplicaciones exteriores.

El primer paso es familiarizarse con las cámaras de tiempo de vuelo que se van a emplear y comprender su funcionamiento. Para ello, es necesario realizar un estudio de las características de ambas cámaras, analizando la información proporcionada por cada uno de los fabricantes de las mismas.

El siguiente paso es la puesta en funcionamiento de las dos cámaras y las posibilidades de configuración de los distintos parámetros que ofrecen.

Acto seguido, se realizarán varias pruebas de captación, comenzando en un espacio interior, en concreto el espacio inteligente proporcionado por el grupo GEINTRA.

Posteriormente, se implementarán algoritmos de procesamiento de imágenes con el propósito de mejorar los resultados en la obtención de las imágenes de profundidad.

Para concluir, se instalarán las cámaras en el exterior para realizar diferentes pruebas que permitan sacar conclusiones evidentes sobre el comportamiento y limitaciones de dichas cámaras en presencia de condiciones ambientales adversas, objetos de diferentes tamaños, diferentes distancias cámara-objeto, etc.

Índice general

Resumen 6
Abstract 8
Resumen extendido 10
Índice general 12
Índice de figuras 14
Índice de tablas 17
Lista de acrónimos 19
1. Introducción 21
1.1. Objetivos 21
1.2. Estructura del documento 22
2. Fundamentos teóricos 25
2.1. Principio de funcionamiento de las cámaras de tiempo de vuelo (ToF) 25
2.2. Técnicas de modulación utilizadas por las cámaras ToF 26
2.2.1. Cámaras de modulación continua (CWM) 27
2.2.2. Cámaras de modulación pulsada (PM) 29
2.2.3. Cámaras de modulación pseudonoise (PN) [2] 30
2.3. Fuentes de error en las cámaras ToF 32
2.3.1. Errores sistemáticos 32
2.3.2. Errores no sistemáticos 32
2.4. Calibración de las cámaras ToF 33
2.5. Cámara Basler ToF 34
2.5.1. Introducción 34
2.5.2. Componentes de la cámara Basler ToF 35
2.5.3. Principio de funcionamiento 37
2.5.4. Factores que influyen en la medida de la distancia 38
2.5.5. Campos de aplicación de la cámara Basler ToF 42
2.5.6. Especificaciones de la cámara Basler ToF 43
2.6. Cámara ToF StarForm de Odos Imaging 44
2.6.1. Introducción 44
2.6.2. Componentes de la cámara ToF de Odos Imaging 45
2.6.3. Principio de funcionamiento 46
2.6.4. Campos de aplicación de la cámara Odos Imaging 47
2.6.5. Especificaciones de la cámara de Odos Imaging 48

3. Puesta en funcionamiento de las cámaras de tiempo de vuelo (ToF) 52
3.1. Cámara Basler ToF 52
3.1.1. Estudio en un espacio interior 52
3.1.2. Estudio en un espacio exterior 74
3.2. Cámara ToF Starform de Odos Imaging 79
4. Conclusiones y líneas futuras 84
4.1. Conclusiones 84
4.2. Líneas futuras de desarrollo 85
Manual de usuario 87
A.1. Cámara Basler ToF 87
A.1.1. Instalación Software [*Sección 7.1 de la referencia* 6] 87
A.1.2. Instalación Hardware [*Sección 7.2 de la referencia* 6] 88
A.1.3. ToF IP Configurator 89
A.1.4. Pylon Viewer ToF 89
A.2. Cámara Starform 3D de Odos Imaging 91
A.2.1. Instalación Software [*Sección 4.2.1 de la referencia* 11] 91
A.2.2. Instalación Hardware [12] 91
A.2.3. Odim streamer [*Sección 4.3 de la referencia* 11] 93
Pliego de condiciones 94
B.1. Requisitos para la cámara Basler ToF 94
B.1.1. Requisitos Hardware [*Sección 3.4 de la referencia* 6] 94
B.1.2. Requisitos Software [*Sección 3.5 de la referencia* 6] 94
B.2. Requisitos para la cámara Odos Imaging ToF 95
B.2.1. Requisitos Hardware [*Sección 4.1 de la referencia* 11] 95
B.2.2. Requisitos Software [*Sección 4.1 de la referencia* 11] 95
Presupuesto 96
C.1. Costes del equipamiento utilizado 96
C.2. Costes de mano de obra 96
C.3. Costes totales 97
Bibliografía 99

Índice de figuras

Figura 1.1: Pasos a seguir para el desarrollo del proyecto 22
Figura 2.1: Principio básico de una cámara ToF 25
Figura 2.2: Técnica de modulación continua de una cámara ToF 27
Figura 2.3: Técnica de modulación pulsada de una cámara ToF 29
Figura 2.4: Medida del tiempo de ida y vuelta en modulación pulsada 29
Figura 2.5: Técnica de modulación pseudonoise de una cámara ToF 31
Figura 2.6: Modulación pseudonoise mediante m-secuencia 31
Figura 2.7: Calibración de las cámaras ToF 33
Figura 2.8 a) Imagen 2D de intensidad 34
Figura 2.8 b) Imagen 3D de profundidad 34
Figura 2.9: Cámara Basler ToF 34
Figura 2.10: Componentes de la cámara Basler ToF 35
Figura 2.11: Principio de funcionamiento de la cámara Basler ToF 37
Figura 2.12: Influencia de la luz dispersa 39
Figura 2.13: Efecto multicamino 40
Figura 2.14: Efecto que produce el rango de no ambigüedad 41
Figura 2.15: Diferentes aplicaciones de la cámara Basler ToF 42
Figura 2.16 a) Imagen de intensidad 2D 44
Figura 2.16 b) Imagen de profundidad 3D 44
Figura 2.17: Sistema de visión 3D real.IZTM VS-1000 44
Figura 2.18: Componentes de la cámara ToF de Odos Imaging 45
Figura 2.19: Principio de funcionamiento básico de tiempo de vuelo 46
Figura 2.20: Diferentes aplicaciones de la cámara de Odos Imaging 47
Figura 3.1: Parámetros Image Format Control 53
Figura 3.2: Imagen de profundidad representada en escala de grises 53
Figura 3.3: Imagen de profundidad representada en escala de grises modificando la ROI 54
Figura 3.4: Imagen de profundidad representada en escala de grises con un rango de 0 – 3 m 54
Figura 3.5 a) Imagen de profundidad en escala de colores (0 - 13,320 m) 55
Figura 3.5 b) Imagen de profundidad en escala de colores (3 - 13,320 m) 55
Figura 3.5 c) Imagen de profundidad en escala de colores (0 - 3 m) 55
Figura 3.5 d) Imagen de profundidad en escala de colores (3 - 7 m) 55
Figura 3.6: Origen de coordenadas de la cámara ToF 56
Figura 3.7: Imagen de intensidad 2D 56

Figura 3.8: Imagen de confianza 57
Figura 3.9: Parámetros Acquisition Control 57
Figura 3.10: Parámetros Acquisition Control con Exposure Auto en Off 58
Figura 3.11 a) Imagen de profundidad en escala de grises (Exposure Time = 25 ms) 58
Figura 3.11 b) Imagen de profundidad en escala de grises (Exposure Time = 2 ms) 58
Figura 3.12: Imagen de intensidad con Exposure Time = 2 ms 58
Figura 3.13: Parámetros Image Quality Control 59
Figura 3.14 a) Imagen de profundidad en escala de grises (Confidence Threshold = 0) 59
Figura 3.14 b) Imagen de profundidad en escala de grises (Confidence Threshold = 28000) 59
Figura 3.15: Imagen de profundidad en escala de grises sin aplicar filtro espacial ni temporal 60
Figura 3.16: Imagen de profundidad en escala de grises sin aplicar Range Filter 60
Figura 3.17 a) Imagen de profundidad en escala de grises (Outlier Tolerance = 6000) 61
Figura 3.17 b) Imagen de profundidad en escala de grises (Outlier Tolerance = 2000) 61
Figura 3.17 c) Imagen de profundidad en escala de grises (Outlier Tolerance = 24000) 61
Figura 3.17 d) Imagen de profundidad en escala de grises (Outlier Tolerance = 65536) 61
Figura 3.18 a) Imagen de profundidad en escala de colores (Outlier Tolerance = 6000) 61
Figura 3.18 b) Imagen de profundidad en escala de colores (Outlier Tolerance = 65536) 61
Figura 3.19: Sistema de coordenadas de la cámara Basler ToF 62
Figura 3.20: Librerías, variables globales y clases del programa implementado 63
Figura 3.21: Programa principal main 64
Figura 3.22: Función Init_Config( ) 65
Figura 3.23: Función Acquisition ( ) Parte 1 66
Figura 3.24: Función Acquisition ( ) Parte 2 67
Figura 3.25: Función Acquisition ( ) Parte 3 67
Figura 3.26: Función Acquisition ( ) Parte 4 68
Figura 3.27: Función Acquisition ( ) Parte 5 69
Figura 3.28: Función Acquisition ( ) Parte 6 69
Figura 3.29: Función Acquisition ( ) Parte 7 70
Figura 3.30: Función Close ( ) 70
Figura 3.31: Visualización del terminal tras ejecutar el programa implementado 71
Figura 3.32: Fragmento como ejemplo de correción de los NaN 72
Figura 3.33: Imágenes obtenidas con la cámara de Basler ToF 73
Figura 3.34: Imágenes de profundidad en espacio exterior con alta intensidad de luz solar 74
Figura 3.35: Imagen de profundidad en escala de grises utilizando filtro interferencial 75
Figura 3.36: Imágenes de profundidad en espacio exterior con baja intensidad de luz solar 75

Figura 3.37: Imágenes de profundidad en espacio exterior con baja intensidad de luz solar restringiendo la ROI 76
Figura 3.38: Imágenes tomadas en un espacio exterior a media tarde 76
Figura 3.39: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la noche. Confidence Threshold = 688 77
Figura 3.40: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la noche. Confidence Threshold = 688, Outlier Tolerance = 65536 77
Figura 3.41: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la noche. MinDepth = 4 m, MaxDepth = 13,320 m 77
Figura 3.42: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la tarde utilizando el algoritmo implementado 78
Figura 3.43: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la noche utilizando el algoritmo implementado 78
Figura 3.44 a) Imagen de profundidad en escala de grises (apertura mínima) 79
Figura 3.44 b) Imagen de profundidad en escala de grises (apertura máxima) 79
Figura 3.45: Valor de los parámetros de la cámara para realizar las pruebas 79
Figura 3.46: Imágenes tomadas a una distancia de 1 m (Apertura Mínima) 80
Figura 3.47: Imágenes tomadas a una distancia de 3 m (Apertura Mínima) 80
Figura 3.48: Imágenes tomadas a una distancia de 6 m (Apertura Mínima) 80
Figura 3.49: Imágenes tomadas a una distancia de 1 m (Apertura Media) 81
Figura 3.50: Imágenes tomadas a una distancia de 3 m (Apertura Media) 81
Figura 3.51: Imágenes tomadas a una distancia de 6 m (Apertura Media) 81
Figura 3.52: Imágenes tomadas a una distancia de 1 m (Apertura Máxima) 82
Figura 3.53: Imágenes tomadas a una distancia de 3 m (Apertura Máxima) 82
Figura 3.54: Imágenes tomadas a una distancia de 6 m (Apertura Máxima) 82
Figura A.1: Parte posterior de la cámara con los diferentes conectores 88
Figura A.2: Aplicación ToF IP Configurator 89
Figura A.3: Aplicación pylon Viewer ToF 90
Figura A.4: Parte posterior del sensor real.IZTM SE-1000. 92
Figura A.5: Parte posterior del módulo de iluminación real.IZTM IL-0900. 92
Figura A.6: Sistema real.IZTM VS-1000 conectado 93
Figura A.7: Aplicación odim_streamer 93

Índice de tablas

Tabla 2.1: Especificaciones de la cámara Basler ToF 43
Tabla 2.2: Especificaciones del módulo sensor real.IZTM SE-1000 48
Tabla 2.3: Especificaciones del módulo sensor real.IZTM IL-0900 49
Tabla 2.4: Especificaciones del modo intensidad 49
Tabla 2.5: Especificaciones del modo rango 50
Tabla 4.1: Píxeles no válidos de las imágenes de la Figura 3.33 84
Tabla 4.2: Píxeles no válidos de las imágenes de las Figuras 3.42 y 3.43 85
Tabla C.1: Coste del equipamiento Hardware 96
Tabla C.2: Coste del equipamiento Software 96
Tabla C.3: Coste del mano de obra 96
Tabla C.4: Coste total del presupuesto 97

Lista de acrónimos

ADC	Analog Digital Converter
API	Application Programming Interface
CCD	Charged Coupling Devices
CDMA	Code Division Multiple Access
CMOS	Complimentary Metal Oxide Semiconductor
CWM	Continuous Wave Modulation
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
FPGA	Field Programmable Gate Array
GigE	Gigabit Ethernet
IP	Internet Protocol
IR	Infrared Radiation
PM	Pulse Modulation
PN	Pseudo Noise
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NaN	Not a Number
NIR	Near Infrared Radiation
OS	Operating System
RGB	Red Green Blue
ROI	Region Of Interest
SDK	Software Development Kit
TOF	Time OF Flight

Capítulo 1

1. Introducción

En los últimos años, ha surgido una clase de dispositivos llamados Time of Flight (ToF) con el fin de ofrecer una nueva alternativa a los diseñadores de sistemas de visión artificial. [1]

La potencialidad de una cámara ToF permite su utilización en aplicaciones industriales (sistemas de vigilancia, detección de objetos, vehículos autónomos, escaneado 3D de objetos y estructuras, aplicaciones biomédicas, etc.) para capturar tanto una representación 2D de una escena como los datos de profundidad asociados. [1]

Se suelen denominar como sensores 2.5D, para destacar el hecho de que el mapa de distancias obtenido sólo proporciona información de la superficie visible de los objetos situados enfrente de la cámara.

El principio básico de los sensores de tiempo de vuelo es medir el tiempo que necesita un pulso de luz en viajar desde la fuente de luz hasta el objeto destino y volver al sensor. Su principio de funcionamiento se detalla en el apartado 2.1.

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es verificar la capacidad y limitaciones para la detección de objetos 3D en espacios exteriores, de las dos cámaras de tiempo de vuelo comerciales que se van a emplear.

Para ello, se contemplarán objetos de distintos tamaños, ubicados a diferentes distancias de la cámara, en presencia de los distintos factores ambientales, como puedan ser la lluvia, efectos de la radiación solar, cambios de iluminación ambiental, etc. Además, se busca obtener las prestaciones de las cámaras cuando aparecen efectos de multicamino y objetos en movimiento.

La finalidad es sacar conclusiones acerca de la potencialidad y limitaciones cuando se utilizan estas cámaras ToF para aplicaciones en espacios exteriores, en las que la información de profundidad pueda ser un aspecto importante para el análisis de la escena.

A continuación, se exponen los pasos a seguir en este análisis para llegar a conseguir las conclusiones oportunas (Figura 1.1).

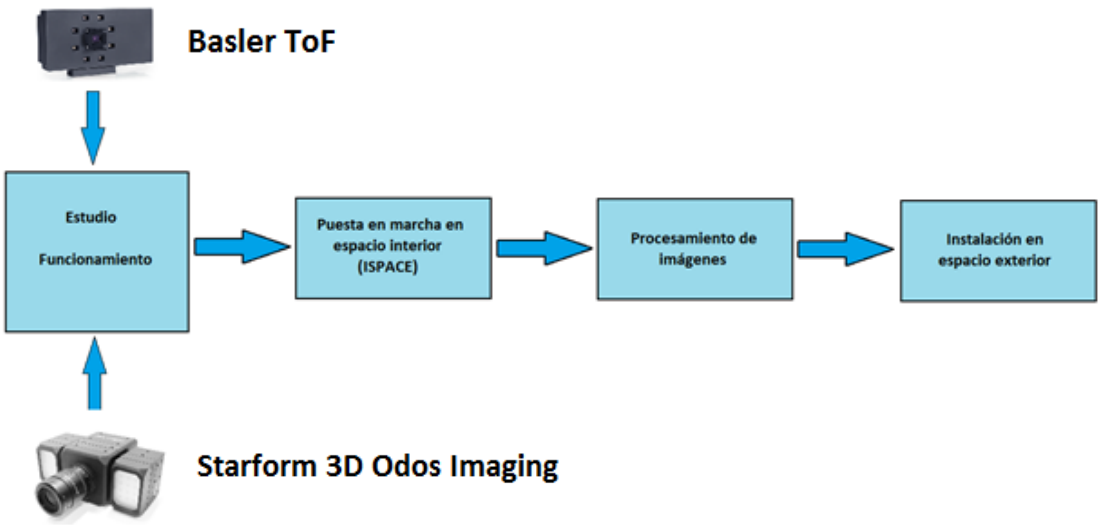


Figura 1.1: Pasos a seguir para el desarrollo del proyecto.

1. Estudio de las dos cámaras ToF que se van a utilizar y comprender su funcionamiento.
2. Puesta en funcionamiento de las cámaras, comenzando en un espacio interior (espacio inteligente del grupo GEINTRA), con el fin de analizar las posibles configuraciones de los diversos parámetros que ofrecen.
3. El siguiente paso es implementar algoritmos basados en el procesamiento de imágenes con el objetivo de mejorar los resultados en la obtención de la información de profundidad.
4. Por último, se instalarán las cámaras en un espacio exterior para realizar diferentes pruebas que permitan obtener conclusiones sobre el comportamiento y limitaciones de las mismas, en presencia de distintas condiciones ambientales, objetos de diferentes tamaños, diferentes distancias entre la cámara y los objetos, etc.

1.2. Estructura del documento

Este trabajo se va a dividir en tres capítulos estructurados de la siguiente forma:

- Fundamentos teóricos
  En este capítulo se realiza una presentación de las cámaras de tiempo de vuelo (ToF). Se explica cúal es su principio de funcionamiento, las diferentes técnicas de modulación que se pueden emplear, las distintas fuentes de error que pueden aparecer en estos sensores, así como su calibración para reducir los efectos producidos por dichas fuentes de error. Después, se realiza un estudio en profundidad de las dos cámaras ToF comerciales (Basler y Odos Imaging) que se van a utilizar para el desarrollo de este proyecto.

- Puesta en funcionamiento de las cámaras de tiempo de vuelo (ToF)
  Este capítulo expone la puesta en marcha de las dos cámaras ToF empleadas con el fin de obtener conclusiones acerca de las prestaciones y limitaciones que presentan en espacios exteriores. Se presentan también los resultados obtenidos con ambas cámaras.

- Conclusiones y líneas futuras
  En este último capítulo, se enumeran las conclusiones obtenidas con la realización de este trabajo y las siguientes líneas de investigación que se puedan tomar como punto de partida.

Capítulo 2

2. Fundamentos teóricos

Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, la finalidad de este proyecto es realizar un estudio de las cámaras de tiempo de vuelo, dos modelos comerciales en particular, y analizar los resultados que se obtienen al utilizarlas en espacios exteriores.

En este capítulo se va a comenzar hablando del principio básico de funcionamiento de las cámaras ToF para ofrecer un enfoque general y entender como operan estos dispositivos. Después, se exponen los distintos tipos de modulación que pueden utilizar las cámaras ToF, dando una espeial importancia a las que operan con luz pulsada, puesto que se corresponden con el tipo de modulación que utilizan las dos cámaras comerciales que se van a estudiar. Por último, se explica en detalle el funcionamiento, características, componentes, aplicaciones y especificaciones asociadas a cada una de estas dos cámaras.

2.1. Principio de funcionamiento de las cámaras de tiempo de vuelo (ToF)

Las cámaras de tiempo de vuelo (ToF) son sensores que permiten medir las profundidades de los puntos de una escena (Figura 2.1). Primero, se ilumina la escena con un láser controlado o fuente de LED, lo que se conoce como señal emitida, y luego se analiza la señal recibida en el sensor cuando es reflejada por los objetos que conforman la escena.

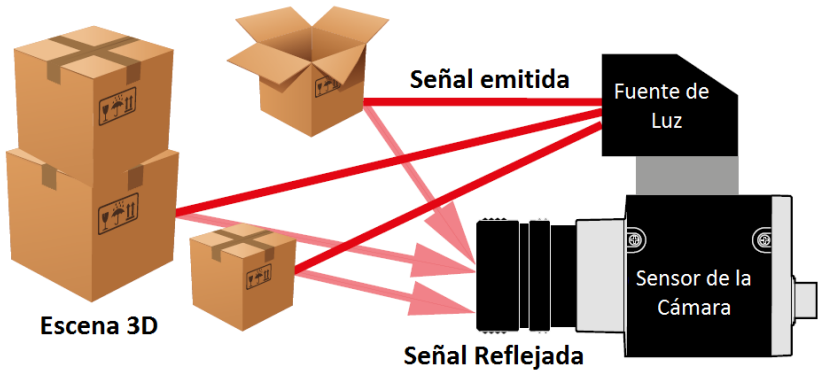


Figura 2.1: Principio básico de una cámara ToF. [8]

En función del tipo de señal emitida por el emisor surgen diversas tecnologías: modulación de onda continua, modulación pulsada y modulación pseudonoise. Estas técnicas se explican en detalle en la sección 2.2.

Algunas de las ventajas que ofrecen las cámaras de tiempo de vuelo frente a la utilización de múltiples cámaras convencionales como puedan ser los sistemas de triangulación pasiva y activa son las siguientes: [1] y [2]

- Solamente es necesaria una cámara, por lo que no es necesario medir parámetros extrínsecos tales como la posición relativa y la orientación de varias cámaras.
- Tiempo real.
- Escasa dependencia de la iluminación ambiental.
- Escasa dependencia de la textura de objetos.
- No hay necesidad de integrar una fuente de luz externa adicional, puesto que los objetos son iluminados por una fuente de luz que está sincronizada con la cámara.

Sin embargo, las cámaras ToF también presentan algunas desventajas: [1]

- Las cámaras basadas en técnicas de modulación continua presentan sensores de menor resolución que aquellas utilizadas más típicamente en el sector de la visión artificial.
- Las cámaras que utilizan modulación pulsada ofrecen una resolución mucho mayor, pero la resolución de profundidad que ofrecen a velocidades de 30 fotogramas por segundo no es más de +/- 1 cm sobre distancias de trabajo entre 0,5 y 5 m.

2.2. Técnicas de modulación utilizadas por las cámaras ToF

Inicialmente, la primera serie de cámaras ToF que se introdujeron en el mercado se basó en la medición de profundidad utilizando una técnica que se conoce como modulación de onda continua (CWM), la cual realiza el cálculo de las diferencias de fase entre la luz emitida por una fuente de luz y la luz capturada por el sensor de la cámara. Estas cámaras se pueden encontrar en compañías como Mesa Imaging, Ifm Electronic y PMD. [1]

Sin embargo, en los últimos años, se ha introducido una nueva técnica en las cámaras ToF, conocida como modulación pulsada. En dicha técnica, la cámara activa un módulo de iluminación que emite intensos pulsos de luz, los cuales son reflejados desde los objetos que se encuentran dentro de la escena. Este tipo de cámaras se encuentan disponibles en compañías como Odos Imaging y Basler. [1]

Estas últimas cámaras que utilizan una modulación pulsada son las que se utilizarán para el desarrollo de este proyecto.

A continuación, se explican en detalle las distintas técnicas de modulación que emplean las cámaras ToF.

2.2.1. Cámaras de modulación continua (CWM)

Los sensores de profundidad de luz continua obtienen la distancia a partir de medida de la diferencia de fase entre las señales emitida y recibida. Su principio de funcionamiento se muestra en la Figura 2.2.

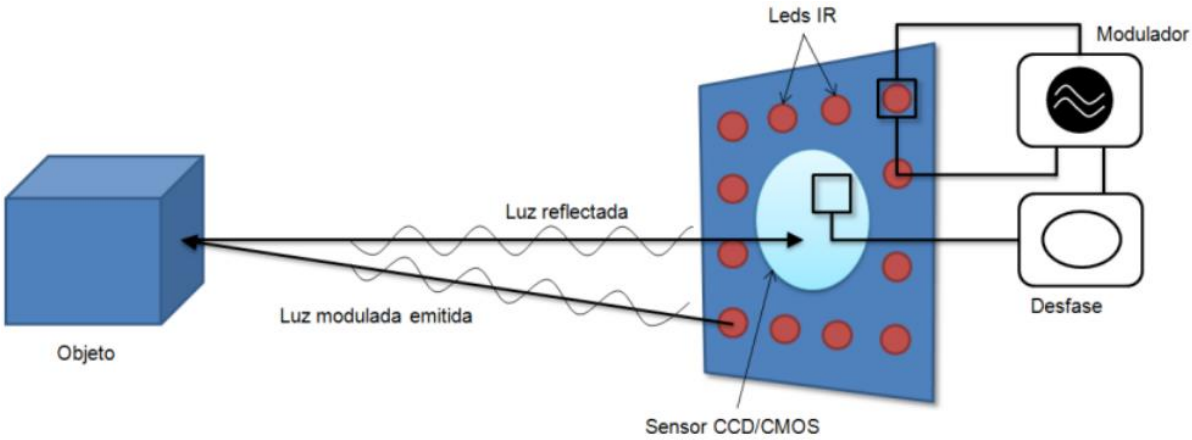


Figura 2.2: Técnica de modulación continua de una cámara ToF. [17]

Estos sensores normalmente operan en espacios interiores y las mediciones que son capaces de realizar suelen ser bastante más cortas que las que puedan ser realizadas con los sensores de luz pulsada.

En dicha modulación, un emisor de luz de LED ´s emite luz sobre un objeto y se realiza la medición de la diferencia de fase entre las señales emitidas y recibidas.

La señal utilizada para la modulación de la luz emitida puede ser una onda sinusoidal de la forma: [2]

$$e(t) = A_0\, sen(\omega t) = A_0\, sen(2\pi f t)$$

siendo A_0 la amplitud de la potencia emitida y f la frecuencia de modulación de la señal emitida.

La señal recibida tiene un desplazamiento de fase debido al viaje de ida y vuelta que realiza la señal de luz emitida. Además, la señal recibida es afectada por la reflectividad del objeto, la atenuación a lo largo del camino óptico y la iluminación de fondo. [2]

Dicha señal recibida se puede representar de la siguiente forma:

$$r(t) = O + a_0 \cdot Ksen\big(\omega(t + t_d)\big) = O + a_0 \cdot Ksen(\omega t + \beta)$$

donde:

- O es el offset añadido a la señal recibida debido a la iluminación de fondo y a la componente continua de la luz IR. [4]
- a_0 es la amplitud de la señal recibida. [4]
- K es la atenuación de la potencia de la señal recibida causada por la reflexión y los efectos de la óptica. [4]

- t_d es el tiempo de ida y vuelta de la señal luminosa a un punto de la escena.
- $\beta = wt_d$ es el desplazamiento de fase a través del cual es posible obtener la información de distancia. [4]
- ω es la pulsación de modulación, $\omega = 2\pi f$.

Para simplificar la expresión anterior, si definimos B_0 como $a_0 \cdot K$, entonces la señal recibida queda de la siguiente manera:

$$r(t) = O + B_0\, sen(\omega t + \beta)$$

siendo B_0 la amplitud de la potencia recibida. Dado que la distancia "d" desde la cámara al punto de incidencia de la escena viene dada por (suponiendo que los trayectos de ida y vuelta son iguales, $d_{total} = d_{ida} + d_{retorno} \approx 2d$):

$$\beta = \omega t_d = 2\pi f\, \frac{2d}{c} \quad => \quad d = \beta \frac{c}{4\pi f}$$

Para un desplazamiento de fase $\beta = 2\pi$, se obtendría la distancia máxima posible (distancia de no ambigüedad): [2]

$$d_{max} = 2\pi\, \frac{c}{4\pi f} = \frac{c}{2f}$$

siendo c la velocidad de la luz, y f la frecuencia de modulación. Se supone que la intensidad de iluminación es suficiente para iluminar la escena a distancias iguales o superiores a la de no ambigüedad.

Es dificil medir directamente el desfase entre la señal emitida y la recibida. Por ello, se emplean sistemas de correlación en cada sensor del receptor. La función de correlación se define de la siguiente manera: [4]

$$\rho = K_{int} \frac{1}{T} \int_0^T u_m(t+\tau) r(t) dt = K_{int} \left(\frac{B_0}{\pi} \cos(\beta + \tau) + \frac{O}{2} \right)$$

donde B_0, β y O son valores desconocidos. K_{int} tiene en cuenta el número total de periodos T integrados durante el tiempo de integración del sensor. En la práctica, $T_{int} = nT$, siendo n un valor en el orden de los miles (20000). [2]

2.2.2. Cámaras de modulación pulsada (PM)

Los sensores de profundidad de luz pulsada están compuestos por un emisor de luz y receptores de luz. El sensor envía pulsos de luz emitidos por diodos LED´s y se realiza la medida del tiempo que tardan dichos pulsos de luz en regresar al sensor, obteniendo así la distancia de los objetos (Figura 2.4).

La Figura 2.3 muestra el principio básico de funcionamiento de las cámaras que utilizan modulación pulsada.

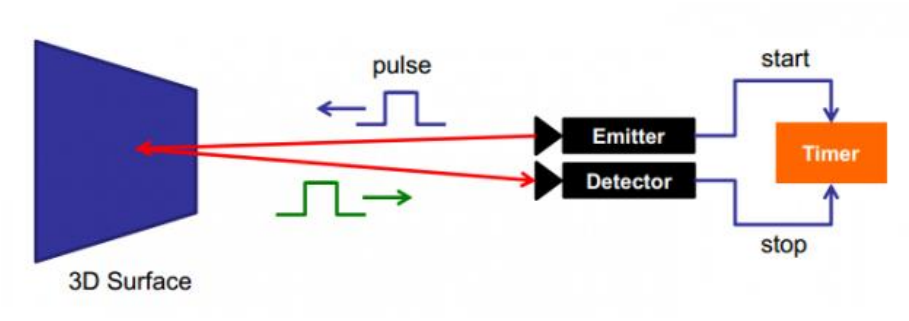


Figura 2.3: Técnica de modulación pulsada de una cámara ToF. [18]

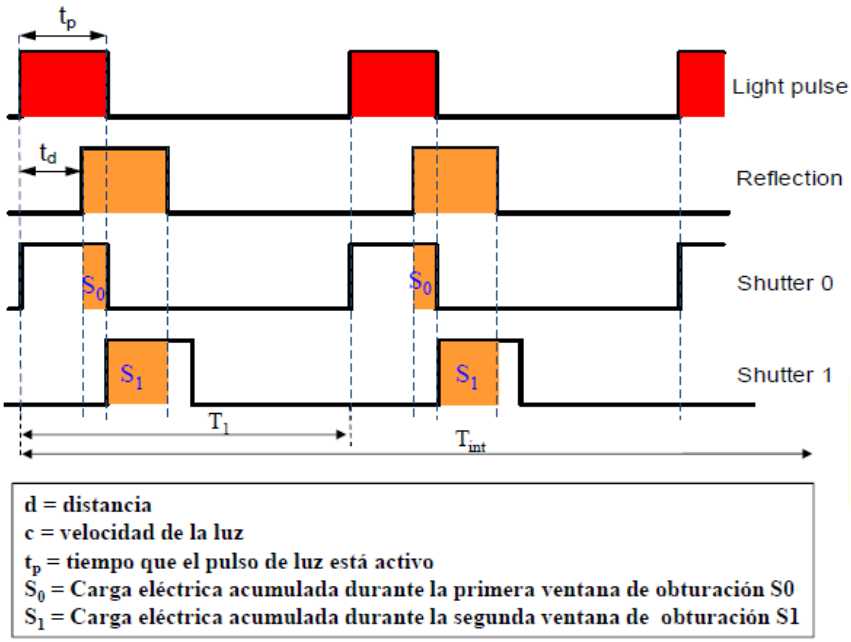


Figura 2.4: Medida del tiempo de ida y vuelta en modulación pulsada. [2]

Suponiendo que los trayectos de ida y vuelta son iguales:

$$d_{total} = d_{ida} + d_{retorno} \approx 2d$$

el tiempo de ida y vuelta, t_d, se define como:

$$t_d = \frac{2d}{c}$$

Por otro lado, según la Figura 2.4, se tiene que:

$$S_0 = K(t_p - t_d)$$

$$S_1 = Kt_d$$

Finalmente la distancia viene dada por la siguiente expresión: [*Sección 6.1 de la referencia* 6]

$$d = \frac{c \cdot t_p}{2}\left(\frac{S_1}{S_1 + S_0}\right)$$

El valor máximo de este registro, d_{max} sería:

$$d_{max} = \frac{c \cdot t_p}{2}$$

Este último valor es el que limita el rango de no ambigüedad de la cámara. Puede aumentarse incrementando el tiempo que el pulso de luz está activo.

Idealmente, este tipo de cámaras pueden ser utilizadas en espacios exteriores, bajo condiciones adversas, debido a que la energía emitida es mucho mayor que la del medio que lo rodea. Sin embargo, hay factores que afectan bastante en la obtención de medidas, de los cuales se hablará más adelante.

Las cámaras tanto de Basler como de Odos Imaging iluminan escenas y captan luz en el espectro IR cercano. Esto se debe a que la resolución de la imagen de profundidad de estas cámaras es cuatro veces mayor que sus equivalentes RGB. Además, la luz IR es menos intrusiva que la luz visible, pues es invisible para el ojo humano reduciendo así la fatiga del operador.

Las ventajas de utlizar modulación pulsada son las siguientes [2]:

- Transmisión de gran cantidad de energía en un tiempo muy corto.
- Disminuye la influencia de la iluminación de fondo.
- Alta relación señal/ruido con valor medio bajo de potencia óptica.
- Permite realizar medidas a larga distancia .

Sin embargo, algunos de los inconvenientes en este tipo de modulación son [2]:

- El receptor debe tener un gran ancho de banda.

En las secciones 2.5 y 2.6 se explicarán en detalle las dos cámaras de tiempo de vuelo utilizadas en este proyecto, las cuales emplean la técnica de modulación pulsada.

2.2.3. Cámaras de modulación pseudonoise (PN) [2]

En este tipo de modulación la luz es modulada en intensidad mediante una secuencia PN. Hay muchos tipos diferentes de secuencias PN: secuencias de longitud máxima (maximal-lenght, m-sequences), Gold, Hadamard-Walsh, Barker, etc.

Como puede observarse en la Figura 2.5, la obtención de la distancia se consigue mediante la correlación de la intensidad de la luz incidente con dos versiones desplazadas en el tiempo de la secuencia PN.

Esta técnica facilita el uso de múltiples cámaras simultáneamente (CDMA) y en un mismo entorno.

En cámaras ToF generalmente se utilizan secuencias de longitud máxima m-secuencias debido a sus óptimas propiedades de auto-correlación, factor clave para obtener la distancia.

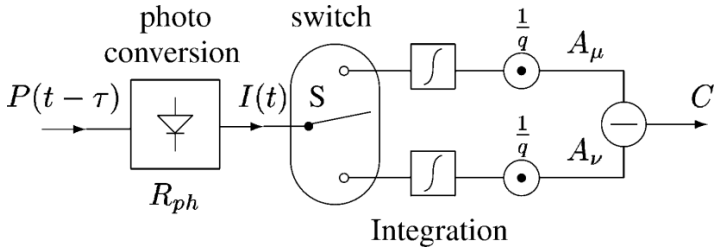


Figura 2.5: Técnica de modulación pseudonoise de una cámara ToF. [2]

$$C(-\tau) = A_\mu - A_\upsilon = \frac{R_{ph}}{q} \int_{t_0}^{t_0+T} P(t-\tau) \cdot S(t) dt$$

donde A_μ y A_υ son dos valores individuales de integración en términos de número de electrones, P(t) describe las caracteristicas de tiempo de la señal de potencia óptica en el píxel con un retraso de τ, y S(t) es la secuencia binaria bipolar que controla el

interruptor. S puede ser +1 o -1. El parámetro R_{ph} denota la capacidad óptica de respuesta del píxel en unidades de A/W.

A continuacíon, en la Figura 2.6 se representa el algoritmo de secuencias de longitud máxima.

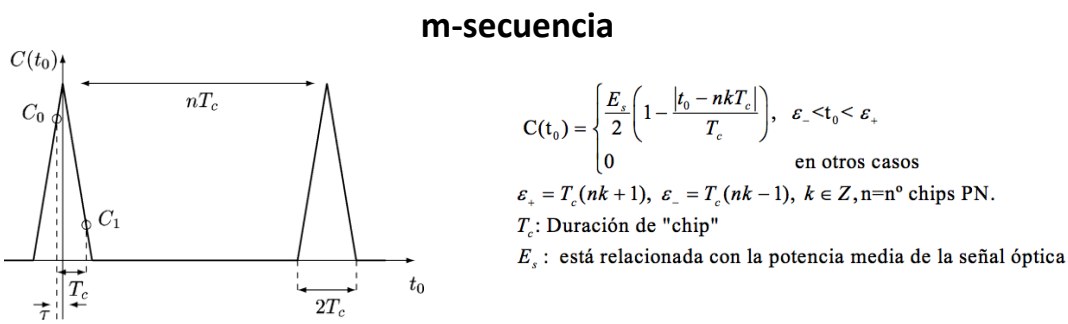


Figura 2.6: Modulación pseudonoise mediante m-secuencia. [2]

Desplazamiento nulo en la secuencia:

$$C_0 = C(t_0 = -\tau) = \frac{E_S}{2}\left(1 - \frac{\tau}{T_c}\right)$$

Desplazamiento T_c en la secuencia:

$$C_1 = C(t_0 = -\tau + T_c) = \frac{E_S}{2}\frac{\tau}{T_c}$$

Las siguientes expresiones muestran como obtener la distancia:

$$\tau = \frac{C_1}{C_0 + C_1} T_c \qquad d = \frac{C_1}{C_0 + C_1}\frac{cT_c}{2} \qquad => \qquad d_{max} = \frac{cT_c}{2}$$

2.3. Fuentes de error en las cámaras ToF

Los valores de profundidad que se obtienen con los sensores de las cámaras ToF pueden ser distorsionados como consecuencia de las distintas fuentes de ruido a las cuales se ven sometidos dichos sensores. Esto genera dos tipos de fuentes de error:

2.3.1. Errores sistemáticos

Los errores sistemáticos de las cámaras ToF tienen una gran influencia en la precisión y fiabilidad de las medidas de profundidad realizadas, de aquí la necesidad de calibrar los errores sistemáticos en las mismas. [2]

Este tipo de errores, generalmente aparecen en los procesos de transformación de la luz recibida a señal y en la fabricación del sensor. [2]

Los errores sistemáticos más representativos que aparecen en las cámaras ToF son los siguientes: [2]

- **Photon shot noise**: ruido de disparo que genera variaciones en el número de electrones de los MOSFET.
- **Wiggling error**: este error de movimiento se debe básicamente a la existencia de señales sinusoidales no perfectas.
- **Temperature related**: error como consecuencia de las variaciones en la temperatura, que producen desajustes en el material del semiconductor.
- **Fixed Pattern Noise**: error debido a ruidos de patrón fijo en determinados píxeles.
- **Reflectivity and amplitude variations**: error que aparece por causa de las variaciones de amplitud y reflectividad.

Como solución a estos errores, la mayoría de fabricantes de las cámaras comerciales proponen compensaciones vía hardware.

2.3.2. Errores no sistemáticos

Dentro de este tipo de errores, destacan los siguientes: [2]

- **Scattering light**: las reflexiones de luz dentro de la lente y del sensor de la cámara pueden generar dispersión de luz.
- **Multipath effect**: el efecto Multicamino genera interferencias cuando la luz se refleja en varias ocasiones, falseando así la medida de la distancia.
- **Motion artifacts**: error producido en la cámara por objetos en movimiento.
- **Flying pixels**: píxeles voladores en las discontinuidades de los objetos de la escena. Este error puede ser corregido descartando los píxeles a lo largo de los rayos paralelos a la dirección de visualización.
- **Depth ambiguity**: ambigüedad en la distancia cuando se supera la máxima distancia fiable de la cámara. Algunas propuestas para corregir este error, están basadas en la utilización de la imagen de amplitud.

2.4. Calibración de las cámaras ToF

La calibración surge como consecuencia de las distintas fuentes de error que presentan las cámaras ToF en la actualidad.

Mediante calibración se permite reducir los efectos de algunos errores sistemáticos, y mejorar así los resultados. [2]

La distorsión de profundidad genera como medidas superficies curvas, en lugar de planos. [2]

Los patrones de calibración para los sensores ToF suelen requerir equipos especiales debido a la dificultad de diseño que presentan. [2]

Algunas de las alternativas enfocadas a la calibración de las cámaras ToF son las siguientes: [2]

- Patrón de calibración de tablero de ajedrez.
- Correspondencias de puntos de mundo a imagen.
- **Estimación lineal de parámetros intrínsecos** / extrínsecos. [2]
  Para obtener los parámetros intrínsecos de la cámara (), se puede emplear la imagen de amplitud.

$$X(coord\ 3D) = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}; X = \frac{(x - x_0)Z}{f_x}; Y = \frac{(y - y_0)Z}{f_y}; (x, y) = coord\ pixélicas$$

$$\begin{pmatrix} \frac{(x - x_0)Z}{f_x} \\ \frac{(y - y_0)Z}{f_y} \\ Z \end{pmatrix}^T => \begin{pmatrix} \frac{(x - x_0)}{f_x} \\ \frac{(y - y_0)}{f_y} \\ 1 \end{pmatrix} => \tilde{X}$$

Si se normaliza $\tilde{X}$ a un vector de longitud unidad queda: $X = \|\tilde{X}\| \cdot d$

Figura 2.7: Calibración de las cámaras ToF. [2]

- Optimización no lineal.

2.5. Cámara Basler ToF

La cámara Basler ToF es la primera que se va a estudiar para la realización de este proyecto. Está basada en la técnica de modulación pulsada, comentada en la sección anterior.

2.5.1. Introducción

Esta cámara pulsada proporciona tanto una imagen 2D de nivel de grises (Figura 2.8 a)) como una imagen de profundidad 3D (Figura 2.8 b)) en una sola toma. Además, ofrece un amplio rango de medidas que va desde los 0,5 m hasta los 13 m. [5]

Figura 2.8 a) Imagen 2D de intensidad. [20]

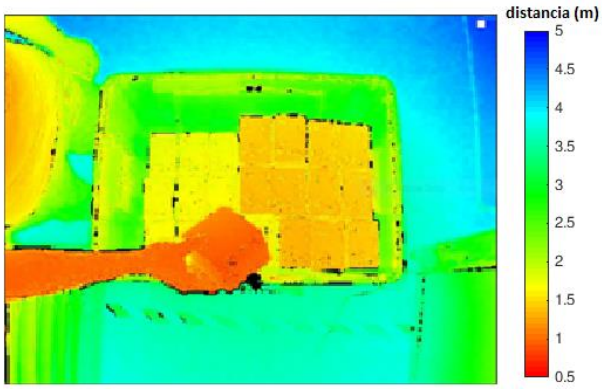


Figura 2.8 b) Representación de profundidad en una escala de colores. [20]

En la Figura 2.8 b) el rango de medidas va desde los 0,5 m hasta los 5 m.

Tiene una resolución espacial de 640 x 480 píxeles y entrega 20 fotogramas por segundo. [8]

Incorpora una fuente de luz NIR compuesta por 8 LED´s (Figura 2.9), con lo cual, no se ve afectada por la luz ambiental interior. Cabe mencionar que está optimizada para su utilización en aplicaciones interiores. [5]

Figura 2.9: Cámara Basler ToF. [5]

2.5.2. Componentes de la cámara Basler ToF

En este apartado se enumeran los diferentes componentes que incorpora la cámara (Figura 2.10):

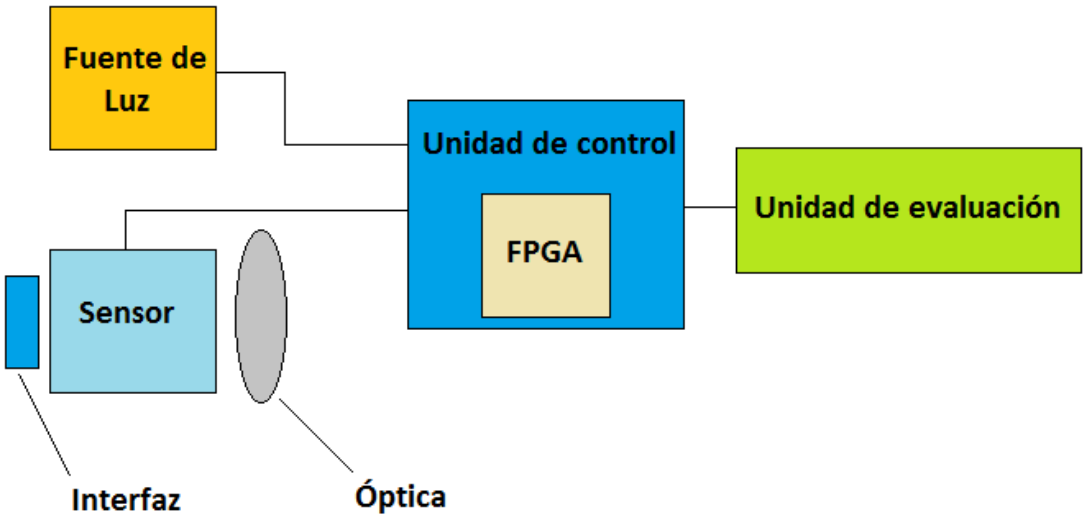


Figura 2.10: Componentes de la cámara Basler ToF.

- **Fuente de luz** [8]

  El módulo de iluminación ilumina la superficie que se desea medir permitiendo tiempos de exposición cortos y altas velocidades de captura de fotogramas.

  Durante la adquisición de imágenes, la fuente de luz enciende y apaga los LED´s miles de veces, siendo cada pulso de una duración de pocos nanosegundos. El parámetro que controla la cantidad de pulsos que se mandan por cada imagen es el tiempo de exposición.

  Para conseguir mediciones precisas, el fabricante se encarga de calibrar estas cámaras con el objetivo de tener pulsos de luz con duraciones idénticas.

  Además, se debe verificar que la seguridad de los ojos está garantizada incluso en el supuesto de algún fallo.

  Como se comentó anteriormente, la luz que utiliza esta cámara se encuentra dentro del espectro infrarrojo cercano, siendo invisible para el ojo humano.

- **Sensor** [8]

  El sensor de imagen que utiliza esta cámara es un CCD fabricado por la compañía Panasonic.

  El obturador del sensor está sincronizado con los pulsos de luz hasta que se obtiene la suficiente carga en el sensor. Una vez acumulada, se pasa a un ADC de 12 bits y se transfiere a la unidad de evaluación.

- **Unidad de control** [8]

  La cámara incluye una FPGA que se encarga de controlar la sincronización entre el envío de pulsos de luz y la apertura y cierre del obturador del sensor. La conversión de las cargas del sensor se envía posteriormente a la unidad de evaluación.

- **Unidad de evaluación** [8]

  Este módulo permite obtener un perfil de intensidad, un mapa de profundidad y las coordenadas espaciales para los objetos.

  La imagen de intensidad representa el brillo como un número entero de 16 bits para cada píxel. En este punto, es clave la longitud de onda que incorpora la fuente de luz de la cámara, en este caso, con un valor de 850 nm.

  El mapa de profundidad muestra la distancia que hay entre los objetos y el sensor de la cámara, como un número entero de 16 bits por cada píxel. Es decir, representan el tiempo de ida y vuelta que necesita el pulso de luz para regresar al sensor, el cual puede verse influenciado por los diferentes efectos que experimenta la luz en el camino. Esta información de profundidad puede representarse también como un mapa de colores con 8 bits, lo que supone una mejora a la hora de visualizar los datos: las superficies más cercanas son rojas y las más lejanas, azules.

  La imagen de confianza proporciona una escala de errores en el mapa de profundidad, un entero de 16 bits por cada píxel. La medición es menos precisa cuanto mayor sea ese número.

  La nube de puntos está formada por tres números de 32 bits con coma flotante por cada píxel. Equivalen a las coordenadas espaciales en un sistema cartesiano. El valor de las coordenadas se indica en milímetros. El fabricante se encarga de una óptima calibración para conseguir que estas medidas sean lo más precisas posible.

  Los píxeles que tienen un valor alto en el mapa de confianza indican que la medida es poco fiable y se representan como distancia nula o NaN (Not a Number). El umbral de confianza puede ser modificado por el usuario.

- **Óptica** [8]

  Es recomendable no manipular parámetros relativos a la óptica de la cámara, puesto que han sido calibrados por el fabricante previamente.

  La lente incorpora un filtro de paso banda óptico, que únicamente permite el paso de longitudes de onda empleadas por la propia fuente de luz de la cámara.

- **Interfaz** [8]

  La cámara dispone de una interfaz Gigabit Ethernet para realizar la conexión al PC. Los estándares que utiliza son GigE Vision y GenICam.

2.5.3. Principio de funcionamiento

La cámara Basler ToF permite medir distancias enviando pulsos de luz desde una fuente de luz integrada y midiendo el tiempo que tardan dichos pulsos en regresar al sensor de la cámara. Por lo tanto, cuanto más tarda el pulso de luz reflejada en llegar al sensor, mayor es la distancia, y viceversa. [*Ver sección 6.1 de la referencia* 6] y [8]

Como ya se dijo más arriba, esta cámara emplea la técnica de luz pulsada. En el momento en el que los pulsos de luz son registrados por el sensor, éste convierte la carga eléctrica generada por la energía luminosa en los píxeles del sensor, en información de distancia.

En la Figura 2.11 se muestra cómo se abren y cierran las ventanas de obturación según los pulsos de luz.

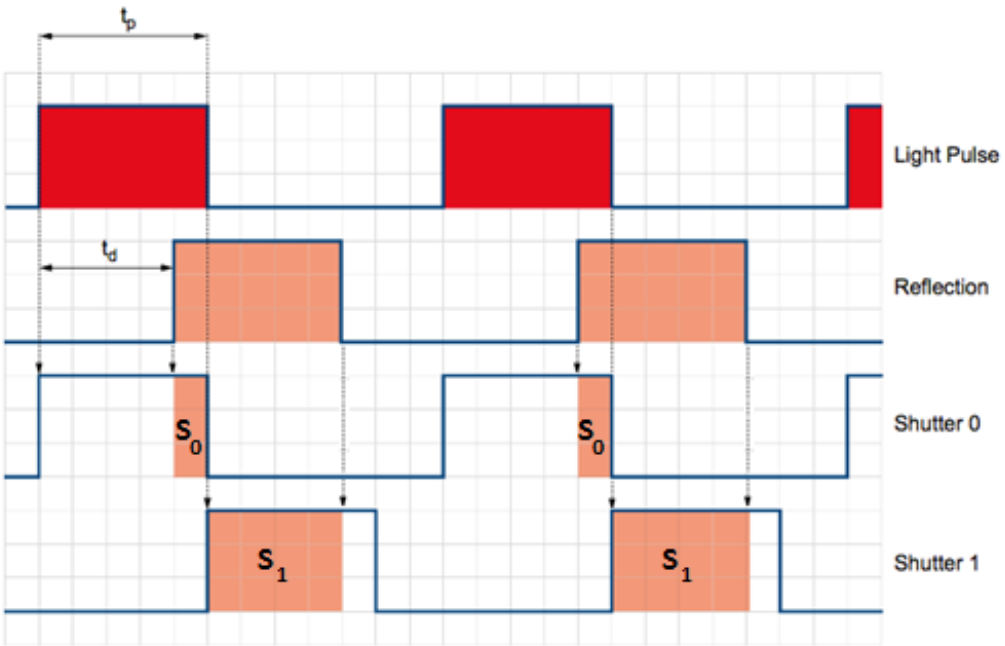


Figura 2.11: Principio de funcionamiento de la cámara Basler ToF. [*Sección 6.1 de la referencia* 6]

Cuando se activa la cámara, todos los LED´s se encienden simultáneamente durante un periodo de tiempo específico (t_p) y la energía reflejada desde el objeto se recoge en cada píxel del sensor utilizando dos ventanas de obturación con el mismo t_p. [*Sección 6.1 de la referencia* 6]

El proceso de emisión de pulsos de luz, y apertura y cierre de ventanas de obturación, se repite hasta que se completa el tiempo de exposición. [*Sección 6.1 de la referencia* 6]

A continuación, se muestra la expresión para calcular la distancia a partir de los datos recogidos: [2]

$$2d = c \cdot t_d$$

$$S_0 = K(t_p - t_d) \quad \Rightarrow \quad d = \frac{c \cdot t_p}{2}\left(\frac{S_1}{S_0 + S_1}\right)$$

$$S_1 = K \cdot t_d$$

donde d es la distancia, c es la velocidad de luz, t_p es el periodo de tiempo en el que el pulso de luz está activo, $S0$ es la carga eléctrica acumulada durante la primera ventana de obturación $S0$, y $S1$ es la carga eléctrica acumulada durante la segunda ventana de obturación $S1$. [*Sección 6.1 de la referencia* 6]

El rango de no ambigüedad está limitado por el valor máximo de un registro. [2]

$$Capacidad\ registro = d_{max} \rightarrow Para\ d_{real} = d_{max} + x \rightarrow$$
$$la\ cámara\ proporciona\ d = x$$

Un contador se activa y cuando alcanza un valor (se corresponde con la distancia de no ambigüedad), se pone de nuevo a cero.

2.5.4. Factores que influyen en la medida de la distancia

En esta sección se va a hablar de los diferentes factores que pueden aparecer y por lo tanto influir, a la hora de realizar medidas con las cámaras de tiempo de vuelo. Algunos de estos factores son: [*Sección 6.2 de la referencia* 6] y [8]

- **Luz ambiente**

  Como la medición de la distancia ToF se basa en la reflexión de la luz emitida por la cámara, cualquier luz adicional (fuentes de luz artificial o luz solar) puede repercutir en los resultados.

  A pesar de que la cámara es capaz de medir la luz ambiente y después restarla de la energía de luz total que reciben los píxeles, esto sigue suponiendo un problema. ¿Por qué? Porque un píxel en el sensor sólo puede contener una cantidad limitada de carga eléctrica. Si esta capacidad se agota por luz ambiental, disminuye el espacio para la reflexión del pulso de luz y, como consecuencia, la relación señal-ruido disminuye.

Para reducir esta influencia, se utiliza un filtro de paso banda óptico que, únicamente permite pasar la luz que pertenezca al mismo espectro que la fuente de luz incorporada por la cámara. De esta manera, las fuentes de luz artificial no suelen ser un problema, pues operan en un espectro diferente.

Por el contrario, la luz solar es activa en todo el espectro y, por ejemplo, en días soleados puede alcanzar una intensidad luminosa significativa. En este escenario, se requiere tomar una serie de medidas adicionales para proteger la cámara de sobreexposiciones.

- **Luz dispersa**

La luz dispersa ocurre debido a reflexiones no deseadas dentro de la lente de la cámara o detrás de ella.

Aunque se tiene un cuidado especial durante el proceso de fabricación de las cámaras, la luz dispersa no puede ser eliminada por completo.

Las superficies brillantes que se encuentran muy cerca de la fuente de luz generan rápidamente luz dispersa. Este problema ocurre a pesar de que las superficies no se encuentren en el campo de visión del sensor.

Por ejemplo, si una cámara se coloca en el centro de una mesa, la luz dispersa que se produce puede distorsionar en la medición de la distancia.

En la imagen de intensidad, la luz dispersa produce un desvanecimiento en el contraste de la imagen.

La solución ante este inconveniente puede ser garantizar que el espacio que hay delante de la cámara está libre de objetos altamente reflectantes, o incluso el uso de una cubierta para la lente.

La Figura 2.12 muestra el efecto que produce la luz dispersa.

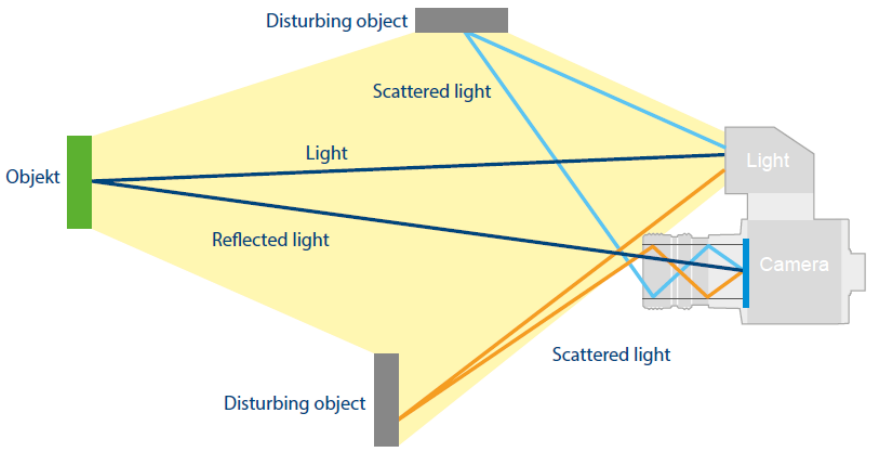


Figura 2.12: Influencia de la luz dispersa. [8]

- **Temperatura**

La temperatura tiene una gran influencia a la hora de conseguir mediciones de distancia fiables.

El rango de funcionamiento de la cámara en función de la temperatura va desde los 0ºC hasta los 50ºC.

Por lo tanto, es importante que la cámara funcione en condiciones de temperatura estables. Temperaturas y/o fluctuaciones extremas deben de ser evitadas.

La cámara necesita un tiempo de calentamiento. Éste suele ser de aproximadamente 20 minutos. Es aconsejable esperar dicho tiempo antes de iniciar la adquisición de imágenes.

Si es posible, es una buena opción mantener enfriada la cámara a través de un ventilador.

- **Reflexiones múltiples (Efecto multicamino)**

Para que la medición de una distancia sea precisa, sólo se consiguen datos fiables cuando la luz se refleja una única vez. Cualquier luz que se refleje varias veces, por otros objetos en el campo de visión de la cámara o del entorno en general, puede distorsionar la medición.

Formas cóncavas, como las esquinas de una habitación o el interior de una taza de café, son particularmente problemáticas, ya que el pulso de luz puede rebotar en diferentes superficies, aumentando así el tiempo hasta que es recibido por el sensor.

Espejos y superficies altamente reflectantes también pueden llevar a múltiples reflexiones, o incluso pueden desviar el pulso de luz completamente.

Un caso ideal sería un reflejo brillante, uniforme y difuso de una pared en una habitación negra vacía.

La Figura 2.13 muestra el efecto que se produce cuando existen múltiples reflexiones.

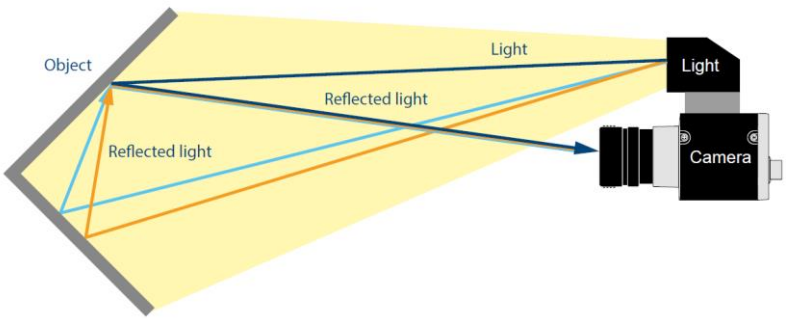


Figura 2.13: Efecto multicamino. [8]

- **No ambigüedad**

  El rango de no ambigüedad de la cámara Basler ToF es de 0 – 13,320 m. Esto significa que las distancias de los objetos medidos dentro de este rango representan las distancias verdaderas de los objetos.

  El problema aparece más allá de los 13,320 m, puesto que la cámara lo considera como un área no definida. El efecto producido es que cada 13,320 m, comienza un nuevo intervalo de medición.

  La Figura 2.14 representa el efecto que tiene el rango de no ambigüedad.

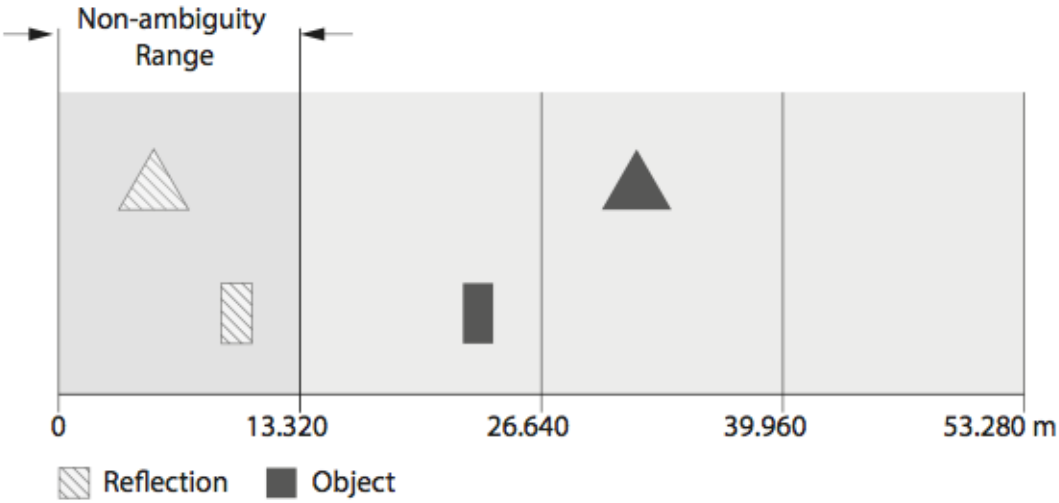


Figura 2.14: Efecto que produce el rango de no ambigüedad. [*Sección 6.2.6 de la referencia* 6]

  Si por ejemplo, un objeto se encuentra a 15,320 m de la cámara, la distancia se mide como 2 m.

  Puede ser interesante cambiar la región de interés (ROI) con el fin de reducir los resultados ambiguos, reduciendo el rango de medición disponible.

2.5.5. Campos de aplicación de la cámara Basler ToF

La cámara ToF de la compañía de Basler puede ofrecer sus prestaciones en diversas áreas de aplicación (Figura 2.15) como pueden ser: [5]

- **Vehículos autónomos**
  Para este tipo de aplicaciones, la cámara Basler ToF puede emplear la información de profundidad con el fin de evitar obstáculos o asistir en la navegación y, además, la información 2D para procesado de imágenes.

- **Aplicaciones médicas**
  En este sector, puede ser de utilidad para la monitorización o posicionamiento de pacientes en sistemas por resonancia magnética. La tercera dimensión que ofrece este tipo de cámaras abre un abanico de posibilidades para aplicaciones relacionadas con la biometría.

- **Automatización logística**
  Tareas que engloban tanto asistencia para el envío de paquetes, escaneo de volumen o etiquetado como asistencia de robots para equipaje y enrutamiento de cajas.

- **Automatización de fábricas y robótica**
  La cámara Basler ToF puede utilizarse en sistemas para la recolección de basura: permite encontrar, seleccionar, montar objetos, así como detectar objetos peligrosos o ubicados de forma incorrecta. También es interesante para el control en el proceso de fabricación ayudando de esta manera en la inspección de calidad.

Figura 2.15: Diferentes aplicaciones de la cámara Basler ToF. [5]

2.5.6. Especificaciones de la cámara Basler ToF

A continuación, se detallan las especificaciones de la cámara Basler ToF: [5] y [*Sección 3.1 de la referencia* 6]

Parámetro	Especificación
Tamaño del Sensor (H x V)	640 x 480 píxeles
Tipo de Sensor	Panasonic MN34902BL - NIR
Tamaño de la óptica	1/4"
Lente	3.6 mm
Campo de visión (H x V)	57º x 43º
Máxima tasa de adquisición	20 fps
Mono / Color	Mono
Longitud de onda	850 nm (± 30 nm)
Rango de no ambigüedad	0 m – 13.325 m
Precisión absoluta	± 1 cm
Repetibilidad	(1 σ): 8 mm
Deriva con la temperatura	0.7 mm / K
Perturbación de la luz externa	Por encima de 15 kLux
Interfaz de comunicación	Gigabit Ethernet (1000 Mbits/s) GigE Vision GenICam
Componentes de imagen	Imagen de rango Imagen de intensidad Mapa de confianza
Formato de píxeles	Coord3D_C16 (imagen de rango) Mono16 (imagen de intensidad) RGB8 (imagen de rango) Confidence16 (mapa de confianza) Coord3D_ABC32f (nube de puntos, imagen de rango)
Sincronización	Libre funcionamiento, disparo externo, disparo software
Control del tiempo de exposición	Programable vía API, Auto Mode
Digital I / O	1 entrada / 1 salida
Temperatura de funcionamiento	0 ºC hasta 50 ºC
Temperatura de almacenamiento	-20 ºC hasta 80 ºC
Peso	~ 450 g
Dimensiones (L x W x H)	141,9 mm x 61.5 mm x 76,4 mm
Enfriamiento	Pasivo, sin ventilador
Grado de protección	IP30
Conformidad	CE, RoHS, GenICam, GigE Vision, FCC, Eye Safety EN 62471:2008
Requisitos de alimentación	24 VDC (± 10 %)
Consumo de energía	15 W media, 29 W pico (1.2 A @ 24 VDC)

Tabla 2.1: Especificaciones de la cámara Basler ToF. [*Sección 3.1 de referencia* 6]

2.6. Cámara ToF StarForm de Odos Imaging

Esta cámara es la segunda en ser analizada en este documento. Al igual que la cámara Basler ToF, este dispositivo utiliza la técnica de modulación pulsada.

2.6.1. Introducción

Esta cámara, se conoce como sistema de visión 3D *real.IZ™ VS-1000*.

La imagen 2D de intensidad (Figura 2.16 a)) se puede utilizar para extraer información de características y bordes que, combinada con la información de profundidad 3D (Figura 2.16 b)), permite comprender completamente cualquier escena. [10]

Figura 2.16 a) Imagen de intensidad 2D. [10]

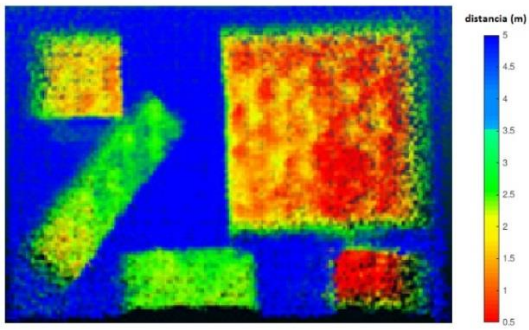


Figura 2.16 b) Representación de profundidad en una escala de colores. [10]

Su iluminación mediante LED´s, además de los tiempos de exposición cortos a los que opera el sensor de la imagen, ofrecen capacidad de capturar imágenes 3D hasta en situaciones donde la luz ambiental tiene un alto nivel de intensidad. Para operar en condiciones difíciles, existe la posibilidad de incorporar unidades de iluminación adicionales. [10]

Su configuración es la que se muestra en la Figura 2.17: un módulo de sensor *real.IZ™ SE-1000* (cuadro azul) y dos módulos de iluminación láser *real.IZ™ IL-0900* (cuadros amarillos).

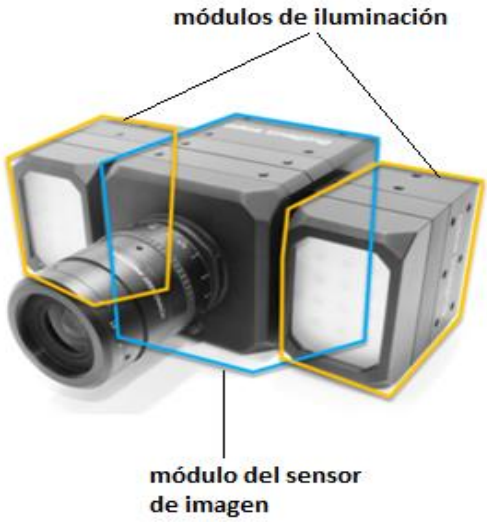


Figura 2.17: Sistema de visión 3D *real.IZ™ VS-1000*. [16]

2.6.2. Componentes de la cámara ToF de Odos Imaging

A continuación se detallan los principales componentes que forman parte del sistema de visión 3D *real.IZ™ VS-1000* (Figura 2.18):

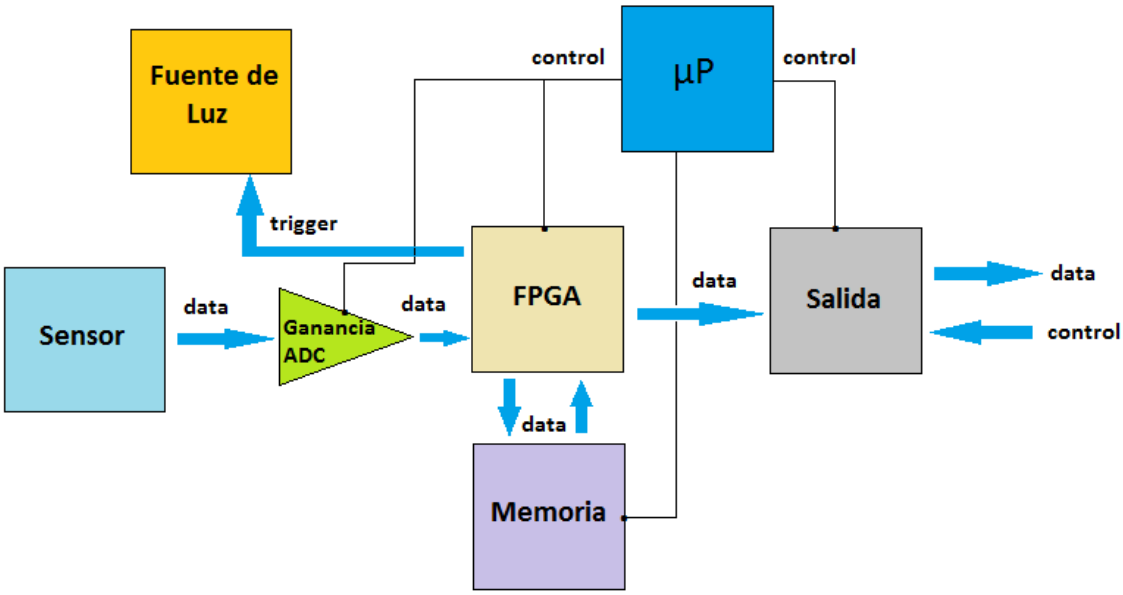


Figura 2.18: Componentes de la cámara ToF de Odos Imaging.

- **Módulos de iluminación láser *real.IZ™ IL-0900*** [12]

  Cada módulo de iluminación incorpora doce LED´s que funcionan a una longitud de onda de 905 nm, que se corresponde con el espectro infrarrojo invisible.
  Estos módulos emiten pulsos cortos de luz, que son detectados después por el sensor de imagen con el fin de obtener el tiempo de ida y vuelta que emplea la luz en llegar a los objetos dentro de la escena y regresar al sensor de la cámara.

  Estos módulos están disponibles en tres configuraciones según las ópticas de difusión (15º, 30º o 60º). En este proyecto se van a emplear los correspondientes a 30º (OI-IL-0930). Esta opción proporciona un excelente compromiso entre el ángulo de iluminación y el rango debido a que la intensidad de la luz láser está inversamente relacionada con el ángulo de dispersión.

- **Sensor de imagen *real.IZ™ SE-1000*** [12]

  Este sensor está basado en un CMOS con una resolución de 1280 x 1024 píxeles. Cada píxel es capaz de discriminar el tiempo que tarda un pulso de luz en llegar al sensor.
  La señal a la salida del sensor se amplifica y convierte a un valor digital y se transfiere al procesador.

- **Lente de objetivo** [12]
  Para la realización de este proyecto se ha elegido un objetivo con una distancia focal de 25 mm (Navitar DO-2595).

Este sistema de visión incorpora un microprocesador dentro de un módulo FPGA, el cual se encarga de procesar y filtrar la salida de datos del sensor de imagen. Existe también una región de memoria interna para funcionar como buffer de imagen. [12]

El módulo procesador es el responsable de controlar los módulos de iluminación y del sensor de imagen. A su vez, el microprocesador integrado gestiona la FPGA y el módulo formateador de salida, siendo este último necesario para transportar la salida de datos adecuadamente a través de la interfaz compatible con GigE Vision. [12]

2.6.3. Principio de funcionamiento

Este sistema de visión utiliza luz pulsada para medir la distancia de los objetos dentro de una escena. [9]

Los módulos de iluminación emiten pulsos cortos de luz que iluminan la escena. La luz se refleja desde los objetos, y el tiempo de ida y vuelta para el pulso de luz se mide en cada píxel.

La luz de los objetos más cercanos llega antes a la cámara que la luz de los objetos más lejanos. Finalmente, se genera una imagen por la matriz de 1280 x 1024 píxeles en el sensor de imagen. [9]

En la Figura 2.19 se puede contemplar el principio de funcionamiento de esta cámara ToF.

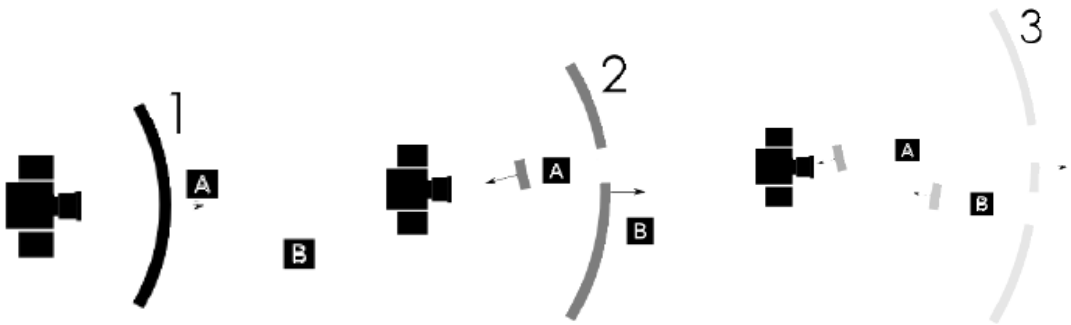


Figura 2.19: Principio de funcionamiento básico de tiempo de vuelo. [9]

2.6.4. Campos de aplicación de la cámara Odos Imaging

Algunas de las aplicaciones en las que puede ser utilizada esta cámara ToF (Figura 2.20) son las siguientes: [10]

- **Gestión de logística**
  El uso de esta cámara ToF puede ser de gran utilidad a la hora de clasificar, dimensionar y perfilar paquetes a través de la imagen de profundidad, mientras que con la imagen de intensidad se pueden realizar funciones como rastreo, registro y seguridad.
  Además, pueden emplearse para la optimización del espacio en el transporte de mercancías, operaciones de embalaje y desembalaje eficiente, etc.

- **Automatización en fábricas**
  Combinar aquí las imágenes que proporciona este tipo de cámaras puede emplearse en sistemas de comprobación de presencia, para verificar la correcta carga de cajas o artículos, información detallada XYZ, orientación de objetos, etc.

- **Automatización en el sector de la agricultura**
  Es un área interesante puesto que el uso de imágenes de profundidad e imágenes 2D pueden contribuir a la identificación del tamaño y la ubicación exacta de cada pieza de fruta o verdura.

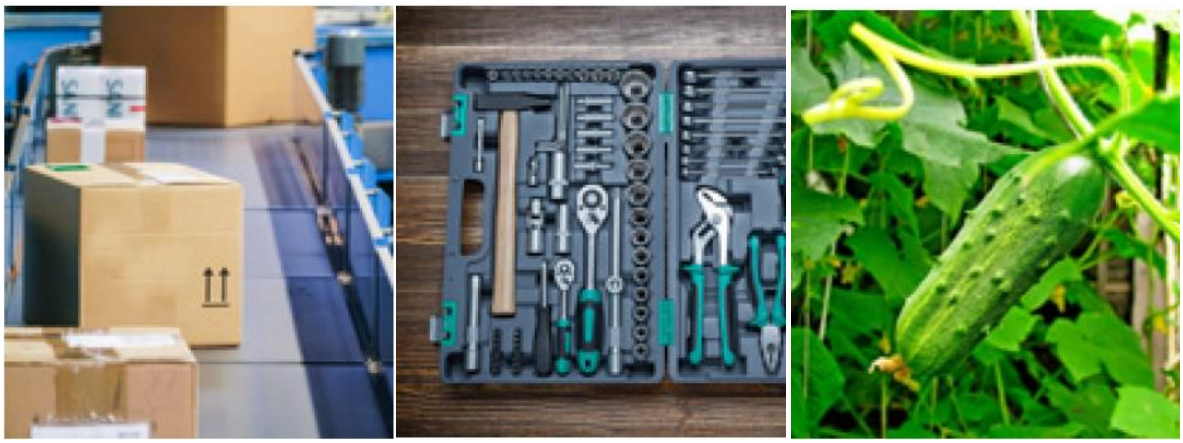


Figura 2.20: Diferentes aplicaciones de la cámara de Odos Imaging. [10]

2.6.5. Especificaciones de la cámara de Odos Imaging

En este apartado se exponen las especificaciones de los distintos módulos que componen la cámara ToF. [10]

- **Sensor de Imagen**

Parámetro	Especificación
Resolución	1280 x 1024 píxeles, ROI definida por usuario
Tipo	CMOS obturador global, exploración progresiva
Tamaño de píxel	14 µm x 14 µm
Formato de óptica	1 1/3”, 23 mm diagonal
Filtro óptico de entrada	No (puede ser añadido si se requiere)
Montura de la lente	C-mount (CS a través del anillo adaptador)
Masa	900 g (lente excluida)
Datos de intensidad	10 bits (nativo, salida 16 bit)
Datos de rango	16 bits
Tasa de adquisición (intensidad) a máxima resolución	25 fps (típico, sobre GigE, en PC)
	452 fps (típico, interno)
Máxima tasa de adquisición (rango)	17 fps (cero acumulaciones, sobre GigE, en PC)
Mínimo tiempo de exposición	10 µs
Temperatura de funcionamiento	-20º hasta 50º
Temperatura de almacenamiento	-20º hasta 60º
Estándar de interfaz hardware	GigE Vision
Cumplimiento de normas	CE, RoHS (2011/65/EU)
Requisito de alimentación	12 VDC
Consumo de energía	15 W (típico)
Modos de captura	Intensidad, rango, intensidad-rango (entrelazado)

Tabla 2.2: Especificaciones del módulo sensor *real.IZ™ SE-1000*. [10]

- **Módulo de iluminación**

Parámetro	Especificación
Tipo	Diodo LED
Longitud de onda	905 nm
Máxima anchura del pulso	230 ns
Mínima anchura del pulso	40 ns
Tasa de repetición máxima	8 kHz
Configuraciones ópticas	15º, 30º, 60º
Número de diodos láser	12 por módulo
Típica energía de pulso dirigida	0.25 µJ
Clasificación	Clase 1 (IEC 60825:2)
Masa	250 g
Requisito de alimentación	12 VDC
Consumo de energía	5 W (típico) / 25 W (máximo)
Sincronización	Sincronizar señales IO para evitar interferencias

Tabla 2.3: Especificaciones del módulo sensor *real.IZ™ IL-0900*. [10]

- **Modo Intensidad**

Parámetro	Especificación
Tipo de imagen	Monocroma, luz ambiental
Control de exposición	Continuo, disparado por SW, disparado por HW, tiempo de exposición programable
Tasa de adquisición de fotogramas	450 fps máxima (resolución completa, modo de almacenamiento) 30 fps (resolución completa, sólo en modo intensidad)
Profundidad de bits	10 bit (interno) 16/14/12/10/8 bit (formatos de datos GigEVision)
Formato de datos	Datos de imagen estándar compatibles con GigEVision

Tabla 2.4: Especificaciones del modo intensidad. [10]

- **Modo Rango**

Parámetro	Especificación
Tipo de medida	Tiempo de vuelo / luz pulsada
Tasa de adquisición de fotogramas	Hasta 30 fps, dependiendo de la precisión / ROI
Profundidad de bits	16 bit (interno) 16/14/12/10/8 bit (formatos de datos GigEVision)
Formato de datos	Datos de imagen estándar de GigEVision que contienen profundidad
Sólo en rango	Imagen del mapa del rango relativo
Formato de datos	Imágenes secuenciales estándar de GigEVision
Intensidad – rango	Contiene tipo de metadata, ID, marca de tiempo
Rango de operación	50 cm – 8 m (se puede ampliar con el uso de módulos de iluminación adicionales)
Precisión ambiente	Hasta 1 cm, dependiendo de la operación
Inmunidad de la luz	Apto para exteriores con un filtro adecuado

Tabla 2.5: Especificaciones del modo rango. [10]

Capítulo 3

3. Puesta en funcionamiento de las cámaras de tiempo de vuelo (ToF)

Una vez que se ha expuesto el principio de funcionamiento de las dos cámaras de tiempo de vuelo comerciales que se van a emplear, detallado en los apartados 2.5 y 2.6, se va a indicar la puesta en marcha de ambas cámaras con el objetivo de obtener conclusiones sobre las limitaciones y prestaciones que presentan.

3.1. Cámara Basler ToF

Esta cámara va a ser la primera en ser analizada en este proyecto. Como punto de partida, con el fin de familiarizarse con la cámara, se pondrá en funcionamiento en un espacio interior controlado, en concreto en el ISPACE proporcionado por el grupo GEINTRA de la Universidad. Se realizará un estudio sobre las diferentes configuraciones que ofrece ajustando los distintos parámetros de la cámara. Además, se tomarán varias capturas de imagen, y se analizarán los resultados.

Una vez controlada en un espacio interior, se pasará a una puesta en marcha en un espacio exterior, con el objetivo de evaluar el comportamiento de esta cámara ToF en aplicaciones exteriores.

3.1.1. Estudio en un espacio interior

Antes de comenzar, es necesario realizar la instalación del dispositivo en el laboratorio del ISPACE. Para ello, consular las secciones A.1.1 y A.1.2 del manual de usuario, en el cual se detalla paso a paso como llevar a cabo la instalación hardware y software de la cámara Basler ToF.

Para adquirir las primeras imágenes y cambiar los ajustes de la cámara se utiliza la aplicación que proporciona Basler, en este caso para Linux, **pylon Viewer** (ToF). Para configurar correctamente la dirección IP de la cámara y ejecutar esta aplicación, consultar los apartados A.1.3 y A.1.4 del manual de usuario.

Dentro del panel de características que ofrece la cámara ToF, se van a analizar los tres grupos de parámetros que aportan información relevante a la hora de capturar imágenes con la cámara:

- **Image Format Control** [*Ver sección 8.4 de la referencia* 6]
  Este conjunto de parámetros (Figura 3.1) permite definir la región de interés (ROI) de las imágenes y seleccionar la componente de imagen que se desea visualizar.

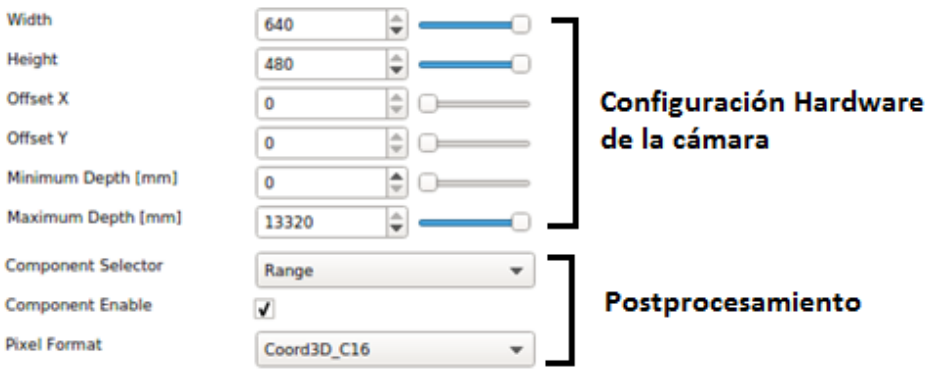


Figura 3.1: Parámetros Image Format Control.

La cámara ToF genera 3 componentes diferentes:

- **Range**
  Se corresponde con la imagen de profundidad, y representa la distancia radial en cada píxel entre el objeto y la cámara, o lo que es equivalente, el tiempo que transcurre desde el envío de un pulso de luz y la recepción de la luz reflejada en el sensor. Los píxeles soportan los siguientes formatos:

  - **Coord3D_C16**: Imagen monocromática con valores enteros sin signo de 16 bits. Las áreas más oscuras representan objetos cercanos a la cámara, mientras que las áreas más claras representan objetos más lejanos. Los objetos fuera del rango de medición aparecen como negro. Esta imagen es la que se corresponde con la Figura 3.2.

Figura 3.2: Imagen de profundidad representada en escala de grises.

Con los parámetros Width y Height se puede configurar el tamaño de la región de interés de las imágenes. Al disminuir la ROI, aumenta la frecuencia de captura máxima. También es posible modificar la posición de la ROI a través de Offset X

y Offset Y. Por ejemplo, con un Width = 320, Height = 240, Offset X = 160 y Offset Y = 120, se obtiene una imagen como la de la Figura 3.3.

Figura 3.3: Imagen de profundidad representada en escala de grises modificando la ROI.

Minimum Depth y Maximum Depth se utilizan para definir la distancia de la ROI. El rango disponible es de 0 a 13,320 m, que se corresponde con el rango de no ambigüedad de la cámara. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la cámara no toma medidas válidas a menos de 0,5 m. Por ejemplo, en la Figura 3.4 se ha configurado una Minimum Depth = 0 m y una Maximum Depth = 3 m. Los datos que se encuentren fuera de ese rango son descartados. Se puede comprobar que los objetos situados a más de 3 m son descartados por la cámara (píxeles en color negro a partir de esa distancia).

Figura 3.4: Imagen de profundidad representada en escala de grises con un rango de 0 – 3 m.

Elegir una ROI que se adapte a la escena deseada lo más cerca posible, puede minimizar los problemas generados por resultados ambigüos.

- **RGB8**: Se consigueuna mejor visualización de la imagen a través de las componentes rojo, verde y azul como enteros de 8 bits. Las áreas rojas representan objetos cercanos, las verdes objetos intermedios, y las azules objetos lejanos a la cámara. Al igual que en la componente anterior, los objetos fuera del rango de medición aparecen en la imagen como negro. En la Figura 3.5 a) se representa la imagen de profundidad (mapa de color) con el rango completo que ofrece la cámara, mientras que en las Figuras 3.5 b), 3.5 c) y 3.5 d) se muestran varias capturas pertenecientes a distintos rangos de medición.

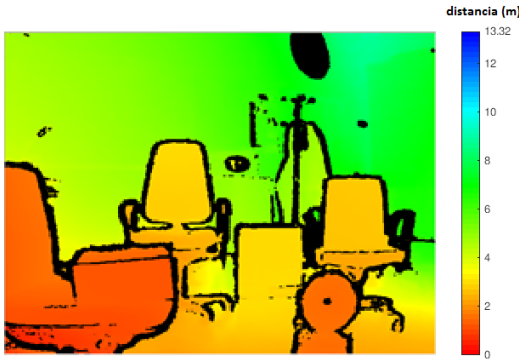


Figura 3.5 a) Imagen de profundidad en escala de colores (0 – 13,320 m).

Figura 3.5 b) Imagen de profundidad en escala de colores (3 – 13.320 m).

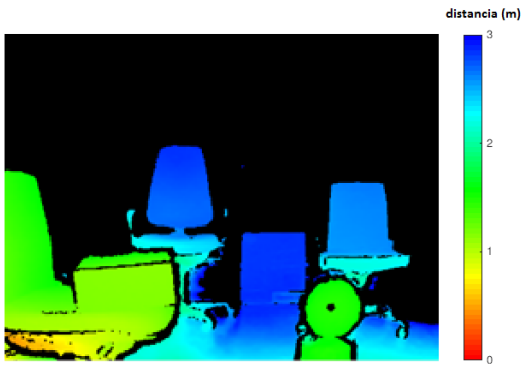


Figura 3.5 c) Imagen de profundidad en escala de colores (0 – 3 m).

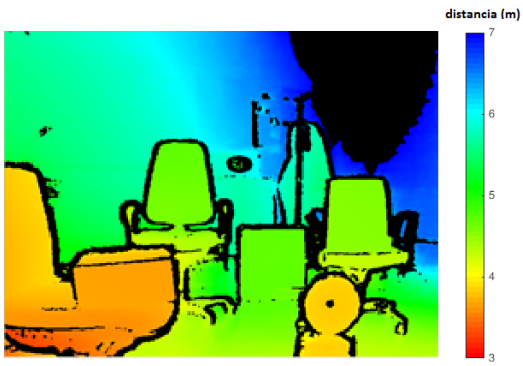


Figura 3.5 d) Imagen de profundidad en escala de colores (3 – 7 m).

- **Coord3D_ABC32f:** Representa la nube de puntos con valores de coma flotante de 32 bits. Cada punto contiene las coordenadas XYZ de la superficie (en mm). El orden de la imagen es línea por línea y píxel por píxel. Los píxeles que contienen datos no fiables de distancia o fuera de la ROI muestran las coordenadas con un valor de NaN. La Figura 3.6 muestra el origen del sistema de coordenadas. La API pylon Viewer ToF no permite visualizar esta componente.

Al intentarlo aparece el siguiente mensaje:

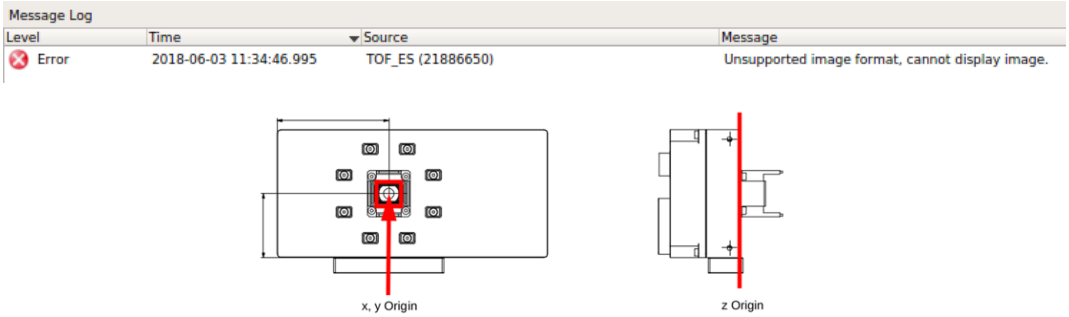


Figura 3.6: Origen de coordenadas de la cámara ToF. [*Sección 3.3 de la referencia* 6]

- **Intensity**

  Se corresponde con la imagen de intensidad, y representa el brillo de los pulsos de luz reflejada como valores enteros de 16 bits por cada píxel. Esta componente permite verificar los píxeles sobre/infra saturados de la imagen. Ante este efecto, es recomendable ajustar el tiempo de exposición o la posición de la cámara y comprobar si mejora la imagen. El formato de píxeles disponible es:

  - **Mono16**: Imagen monocromática con valores enteros sin signo de 16 bits. La Figura 3.7 representa dicha imagen.

Figura 3.7: Imagen de intensidad 2D.

- **Confidence map**

  Se corresponde con el mapa de confianza, y representa una medida de fiabilidad de la medida de profundidad tomada en cada píxel. Cuanto mayor sea este valor más fiable será la medida. Se consideran tanto la luz ambiente como la luz generada por la cámara ToF. El formato de píxeles disponible es:

  - **Confidence16**: Imagen monocromática con valores enteros sin signo de 16 bits. La Figura 3.8 muestra esta imagen.

Figura 3.8: Imagen de confianza.

En la configuración por defecto, se generan datos de rango en el formato Coord3D_C16. Para habilitar otras componentes de imagen, hay que utilizar los parámetros Component Selector y Component Enable (Figura 3.1). El pylon Viewer ToF sólo puede mostrar una componente a la vez, con lo cual, si se desea mostrar otra componente de imagen, primero hay que deshabilitar el resto de componentes, luego seleccionar la nueva componente de imagen, y por último, habilitarla.

- **Acquisition Control** [*Ver sección 8.3 de la referencia* 6]
  Este conjunto de parámetros permite controlar la adquisición de imágenes. La configuración por defecto de los mismos es la que se muestra a continuación en la Figura 3.9.

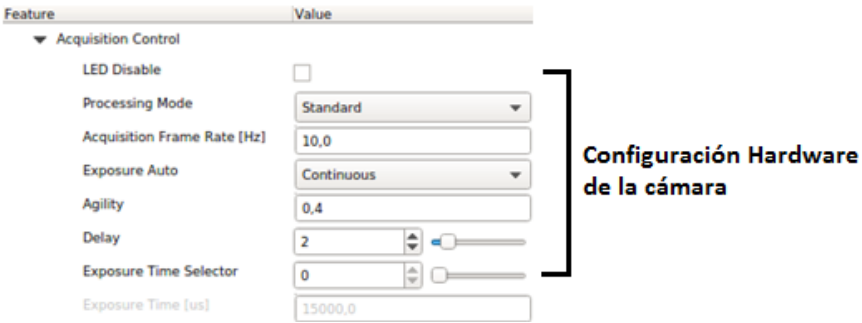


Figura 3.9: Parámetros Acquisition Control.

Si se selecciona el parámetros LED Disable, entonces se apagan los LED´s de la cámara y en consecuencia, la ventana de visualización se muestra en negro.

Acquisition Frame Rate es la tasa de salida a la que se generan imágenes. Si se reduce este valor, la adquisición de frames será más lenta, y por el contrario, si se aumenta, la adquisición será más rápida.

El parámetro Exposure Auto permite utilizar o no el control automático de la exposición. Si se configura como continuo (Figura 3.9), la duración de la exposición es adaptada por la cámara para conseguir la velocidad de fotogramas deseada. Sin embargo, si se establece en Off, es el parámetro Exposure Time el que controla la duración de la exposición (Figura 3.10).

Si Exposure Auto está en modo continuo, se puede emplear el parámetro Agility para determinar la rapidez con la que el mecanismo de exposición reacciona ante los cambios en la escena capturada.

Si Exposure Auto está en modo Off, el tiempo de exposición se controla a través del parámetro Exposure Time. Un tiempo de exposición de 25 ms quiere decir que, para capturar una imagen, la cámara envía pulsos de luz en sucesión rapida durante 25 ms. Esto puede ser de utilidad cuando las imágenes que se capturan muestran sobresaturación de los píxeles.

Figura 3.10: Parámetros Acquisition Control con Exposure Auto en Off.

En la Figura 3.11 a) se representa una captura con un tiempo de exposición de 25 ms, mientras que en la Figura 3.11 b) se muestra la misma imagen con un tiempo de exposición de 2 ms. Como resultado, en la primera se obtiene una mejor imagen puesto que la duración a la que se exponen los pulsos de luz es mayor.

Figura 3.11 a) Imagen de profundidad en escala de grises (Exposure Time = 25 ms).

Figura 3.11 b) Imagen de profundidad en escala de grises (Exposure Time = 2 ms).

La Figura 3.12 se corresponde con una imagen de intensidad en la que se ha modificado el valor del tiempo de exposición. Se puede comparar con la Figura 3.7, y observar que al disminuir el tiempo de exposición, la imagen pierde bastante información.

Figura 3.12: Imagen de intensidad con Exposure Time = 2 ms.

- **Image Quality Control** [*Ver sección 8.5 de la referencia* 6]
  Este conjunto de parámetros permite mejorar la visualización y la calidad de los datos de la nube de puntos que genera la cámara. La configuración por defecto de estos parámetros es la que se muestra en la Figura 3.13.

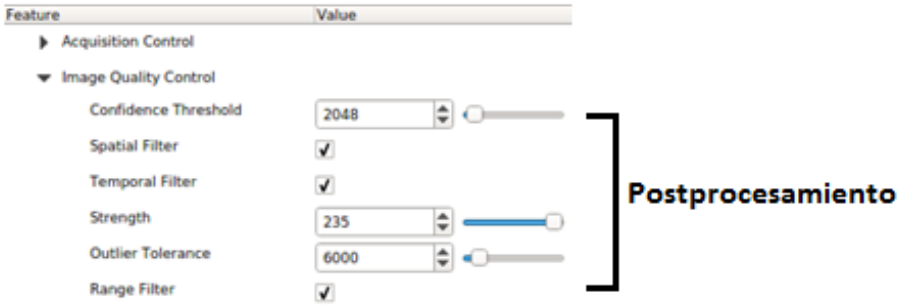


Figura 3.13: Parámetros Image Quality Control.

Para que los píxeles se tengan en cuenta en la medición de la distancia, éstos tienen que exceder el valor especificado en el parámetro Confidence Threshold.

En las siguientes capturas, se representa una imagen con un valor de 0 en el umbral de confianza (Figura 3.14 a)), y otra con un valor de 28000 (Figura 3.14 b)).

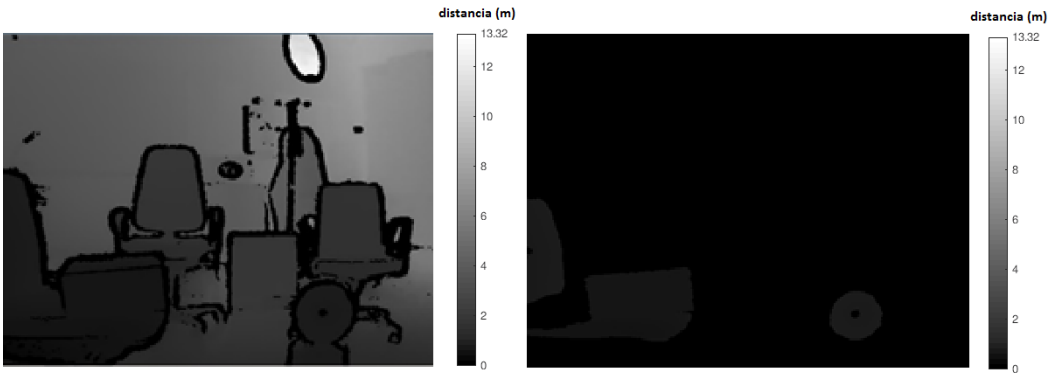


Figura 3.14 a) Imagen de profundidad en escala de grises (Confidence Threshold = 0).

Figura 3.14 b) Imagen de profundidad en escala de grises (Confidence Threshold = 28000).

Como resultado, los píxeles con valores por encima del umbral de confianza son considerados fiables, mientras que los valores por debajo de dicho umbral, tomarán un valor de 0 o NaN, dependiendo del formato elegido para los datos de rango.

El parámetro Spatial Filter utiliza los valores de los píxeles vecinos para filtrar el ruido espacial en una imagen. Esto crea superficies más lisas y los bordes de los objetos quedan intactos.

El Temporal Filter emplea los valores del mismo píxel en diferentes puntos en el tiempo con el fin de filtrar el ruido temporal en una imagen.

En la Figura 3.15 se puede observar una captura de imagen en la que ambos filtros han sido deshabilitados.

El parámetro Strenght define hasta que punto llega la memoria del filtro temporal. Valores altos pueden resultar en artefactos en movimiento y, valores bajos reducen el efecti del filtro.

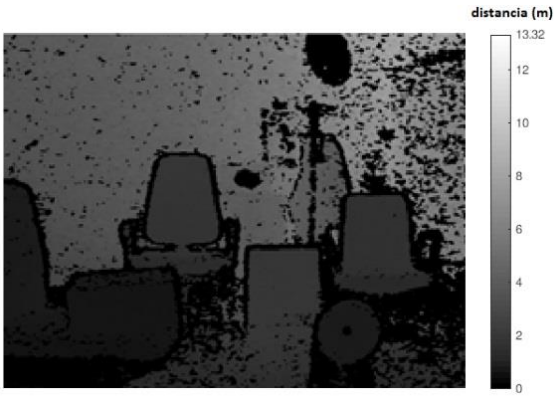


Figura 3.15: Imagen de profundidad en escala de grises sin aplicar filtro espacial ni temporal.

El filtro de rango emplea la información de profundidad calculada a partir de los píxeles vecinos para filtrar el ruido en los datos de rango. Para que funcione, el filtro espacial debe estar habilitado.

Si se deshabilita el Range Filter, la imagen resultante sería la que se muestra en la Figura 3.16.

Figura 3.16: Imagen de profundidad en escala de grises sin aplicar Range Filter.

El último parámetro a tratar es Outlier Tolerance. Éste define por cuanto la profundidad de un píxel, en valores de gris de la imagen de rango, permite diferir de la de sus píxeles vecinos. Los valores atípicos se consideran como inváidos y en consecuencia, el valor del píxel será cero en la imagen de rango y NaN en la nube de puntos. Un valor bajo implica menor variación entre los valores de gris de los píxeles.

En las Figuras 3.17 a), 3.17 b), 3.17 c) y 3.17 d) se representan distintas capturas de imagen estableciendo diferentes valores para el parámetro Outlier Tolerance.

Figura 3.17 a) Imagen de profundidad en escala de grises (Outlier Tolerance = 6000)

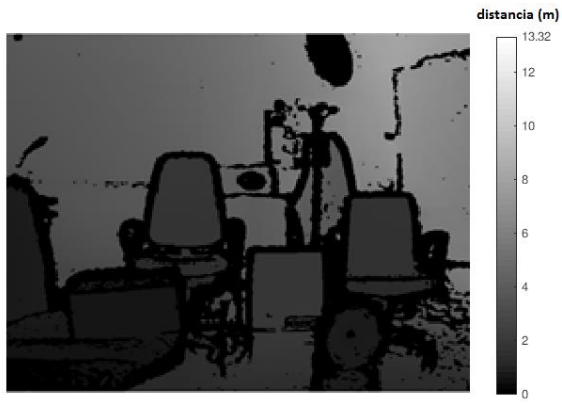


Figura 3.17 b) Imagen de profundidad en escala de grises (Outlier Tolerance = 2000)

Figura 3.17 c) Imagen de profundidad en escala de grises (Outlier Tolerance=24000)

Figura 3.17 d) Imagen de profundidad en escala de grises (Outlier Tolerance=65536)

Por otro lado, las Figuras 3.18 a) y 3.18 b) representan la imagen de profundidad con el mapa de color con diferentes valores de Outlier Tolerance.

Figura 3.18 a) Imagen profundidad en escala de color (Outlier Tolerance=6000)

Figura 3.18 b) Imagen profundidad en escala de color (Outlier Tolerance=65536)

A continuación se expone cómo se lleva a cabo el cálculo de la distancia. (*Ver Sección 8.6 de la referencia* 6)

En primer lugar, se define el sistema de coordenadas de la cámara Basler ToF (Figura 3.19).

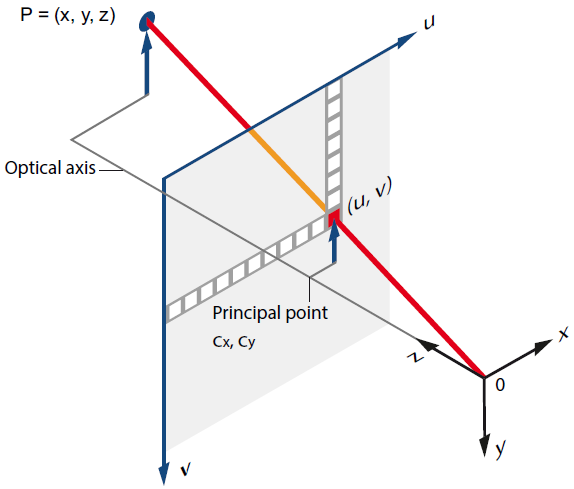


Figura 3.19: Sistema de coordenadas de la cámara Basler ToF. (*Sección 8.6.3 de la referencia* 6)

Un punto en el espacio 3D se define a través de las coordenadas cartesianas X, Y y Z, donde X representa la anchura, Y la altura y Z la profundidad.

Por otro lado, u y v representan las coordenadas de un píxel en el plano imagen del mapa de rango 2D. Además, el punto central del plano imagen se representa como (C_x, C_y).

Por último, la distancia radial se define como la distancia que hay entre un punto en el espacio 3D y el origen del sistema de coordenadas, en este caso (C_x, C_y).

Para calcular las coordenadas 3D es necesario aplicar las siguientes expresiones: (*Ver Sección 8.6.3 de la referencia* 6)

$$Z = \frac{z}{0xFFFF} \cdot (D_{max} - D_{min}) + D_{min}$$

$$X = \frac{u - C_x}{f} \cdot Z \qquad Y = \frac{v - C_y}{f} \cdot Z$$

donde z es el valor de rango de un píxel, D_{max} es la profundidad máxima, D_{min} la profundidad mínima, f la distancia focal y C_x, C_y el punto central del plano imagen como se mencionó anteriormente.

Para calcular la distancia radial, expresada en milímetros, se emplea la siguiente expresión:

$$Distancia\ (mm) = D_{min} + (ValorPixel\ \cdot (D_{max} - D_{min}))/65535$$

siendo $ValorPixel$ el valor expresado en 16 bits de cada píxel de la imagen *Coord3D_C16* (imagen de profundidad representada en escala de grises).

Tras analizar los resultados que se obtienen a través de la aplicación **pylon Viewer** (ToF), se va a implementar un algoritmo para mejorar dichos resultados.

En todas las capturas anteriores se puede observar que aparecen numerosos píxeles cuyos valores no son válidos. Esto es un inconveniente, ya que a la hora de interpretar los datos de profundidad, se tienen bastantes zonas de la imagen sin información de distancias. Los píxeles no válidos en la imagen de profundidad (**Coord3D_ABC32f**) aparecen con un valor NaN.

Por lo tanto, la idea es trabajar desde la imagen de profundidad en un entorno de desarrollo software, en este caso, Eclipse, e implementar un algoritmo que permita recorrer todos los píxeles de la imagen, y corregir aquellos que sean píxeles erróneos.

A continuación, se va a explicar en detalle el programa desarrollado en C++, y después se presentarán los resultados obtenidos. Para la implementación de este programa se ha tomado como ayuda la guía de programación que proporciona la compañía de Basler. [7]

El acceso a la cámara se realiza a través de un productor *GenTL*, una biblioteca dinámica que implementa una interfaz de software estandarizada. A veces, operar directamente con el productor *GenTL* resulta incómodo, por lo que Basler proporciona la biblioteca *ConsumerImplHelper*, biblioteca de C++ que sirve como una API fácil de usar y proporciona acceso al productor Basler de *GenTL*. El acceso a la biblioteca es proporcionado principalmente por la clase *CToFCamera*. En la Figura 3.20 se observa como hay que incluir dicha biblioteca.

```
#include <ConsumerImplHelper/ToFCamera.h>
#include <iostream>
#include <vector>
#include <limits>
#include <iomanip>

#include <opencv2/opencv.hpp>
#include <opencv2/core/core.hpp>
#include <opencv2/highgui/highgui.hpp>

using namespace GenTLConsumerImplHelper;
using namespace GenApi;
using namespace cv;
using namespace std;

FILE *doc;
FILE *doc1;
FILE *doc2;
int image;

class Sample
{
public:
    void Init_Config();
    void Acquisition();
    void Close();
private:
    CToFCamera camera;
};
```

Figura 3.20: Librerías, variables globales y clases del programa implementado.

Además, se incluyen también las librerías de OpenCV necesarias para trabajar con el procesamiento de imágenes. El módulo *Core* incluye estructuras de datos básicas (p.e. estructura de datos *Mat*) y funciones básicas de procesamiento de imágenes. Por otro

lado, el módulo *Highgui* ofrece funciones sencillas de interfaz de usuario, varios códecs de imagen y video, capacidad de captura de imagen y video, manipulación de ventanas de imagen, etc. Se definen también una serie de variables globales y una clase *Sample* que se utilizarán más adelante.

El programa principal (*main*) se muestra en la Figura 3.21.

```
int main(int argc, char* argv[])
{
    for(image = 1;image < 30;image++)
    {
        Sample BaslerToF;
        int exitCode = EXIT_FAILURE;
        try
        {
            BaslerToF.Init_Config();
            BaslerToF.Acquisition();
            BaslerToF.Close();
            exitCode = EXIT_SUCCESS;
        }
        catch(GenICam::GenericException& e)
        {
            cerr << "Exception occurred: " << endl << e.GetDescription() << endl;
            exitCode = EXIT_FAILURE;
        }
        if(CToFCamera::IsProducerInitialized())
            CToFCamera::TerminateProducer();

        sleep(0.5);
        if(image == 30)
        {
            cout << endl << "Press Enter to exit." << endl;
            while (cin.get() != '\n');
            return exitCode;
        }
    }
}
```

Figura 3.21: Programa principal main.

El bucle *for* permite capturar tantas imágenes como el usuario indique (en este caso, 29 imágenes). Lo primero que se hace es definir una clase *Sample* del tipo *BaslerToF*, clase previamente definida. Si no se genera ningún error, entonces se ejecutan las siguientes funciones:

- **Init_Config ( ):** esta función se encarga de inicializar la cámara y establecer los valores deseados por el usuario de los parámetros configurables de la cámara ToF.
- **Acquisition ( ):** función que permite realizar la adquisición de una imagen y almacenar las coordenadas 3D correspondientes a cada uno de los píxeles.
- **Close ( ):** función que libera los recursos de la cámara ToF.

Por último, cuando se captura la última imagen, presionando la tecla *ENTER*, se termina el programa.

Ahora, se van a explicar en profundidad las tres funciones mencionadas anteriormente.

- **Init_Config ( )** (Figura 3.22)
  El primer paso es cargar e inicializar el productor *GenTL*. Esto se hace llamando al método *CToFCamera :: InitProducer()*. Después, se utiliza el método *OpenFirstCamera()* para establecer una conexión de red con el dispositivo.

```
void Sample::Init_Config()
{
    CToFCamera::InitProducer(); //Initialize the GenTL producer
    camera.OpenFirstCamera();

    //Device Control
    CIntegerPtr ptrDeviceCalibOffset =camera.GetParameter("DeviceCalibOffset");
    CEnumerationPtr ptrDeviceTemperatureSelector = camera.GetParameter("DeviceTemperatureSelector");
    ptrDeviceCalibOffset->SetValue(0);
    ptrDeviceTemperatureSelector->FromString("SensorBoard");

    //Image Format Control
    CIntegerPtr ptrWidth = camera.GetParameter("Width");
    CIntegerPtr ptrHeight = camera.GetParameter("Height");
    CIntegerPtr ptrOffsetX = camera.GetParameter("OffsetX");
    CIntegerPtr ptrOffsetY = camera.GetParameter("OffsetY");
    CIntegerPtr ptrDepthMin = camera.GetParameter("DepthMin");
    CIntegerPtr ptrDepthMax = camera.GetParameter("DepthMax");
    CEnumerationPtr ptrComponentSelector = camera.GetParameter("ComponentSelector");
    CBooleanPtr ptrComponentEnable = camera.GetParameter("ComponentEnable");
    CEnumerationPtr ptrPixelFormat = camera.GetParameter("PixelFormat");
    ptrWidth->SetValue(640);
    ptrHeight->SetValue(480);
    ptrOffsetX->SetValue(0);
    ptrOffsetY->SetValue(0);
    ptrDepthMin->SetValue(0);
    ptrDepthMax->SetValue(13320);
    ptrComponentSelector->FromString("Range");
    ptrComponentEnable->SetValue(true);
    ptrPixelFormat->FromString("Coord3D_ABC32f");
    ptrComponentSelector->FromString("Intensity");
    ptrComponentEnable->SetValue(true);
    ptrPixelFormat->FromString("Mono16");

    //Acquisition control
    CBooleanPtr ptrLedDisable = camera.GetParameter("LedDisable");
    CEnumerationPtr ptrProcessingMode = camera.GetParameter("ProcessingMode");
    CFloatPtr ptrAcquisitionFrameRate = camera.GetParameter("AcquisitionFrameRate");
    CEnumerationPtr ptrExposureAuto = camera.GetParameter("ExposureAuto");
    CFloatPtr ptrAgility = camera.GetParameter("Agility");
    CIntegerPtr ptrDelay = camera.GetParameter("Delay");
    CIntegerPtr ptrExposureTimeSelector = camera.GetParameter("ExposureTimeSelector");
    CEnumerationPtr ptrTriggerMode = camera.GetParameter("TriggerMode");
    CCommandPtr ptrTriggerSoftware = camera.GetParameter("TriggerSoftware");
    CEnumerationPtr ptrTriggerSource = camera.GetParameter("TriggerSource");
    CFloatPtr ptrTriggerDelay = camera.GetParameter("TriggerDelay");
    ptrLedDisable->SetValue(false);
    ptrProcessingMode->FromString("Standard");
    ptrAcquisitionFrameRate->SetValue(10.0);
    ptrExposureAuto->FromString("Continuous");
    ptrAgility->SetValue(0.4);
    ptrDelay->SetValue(2);
    ptrExposureTimeSelector->SetValue(0);
    ptrTriggerMode->FromString("Off");
    ptrTriggerSoftware->Execute(false);
    ptrTriggerSource->FromString("Software");
    ptrTriggerDelay->SetValue(0.0);

    //Image Quality Control
    CIntegerPtr ptrConfidenceThreshold = camera.GetParameter("ConfidenceThreshold");
    CBooleanPtr ptrFilterSpatial = camera.GetParameter("FilterSpatial");
    CBooleanPtr ptrFilterTemporal = camera.GetParameter("FilterTemporal");
    CIntegerPtr ptrFilterStrength = camera.GetParameter("FilterStrength");
    CIntegerPtr ptrOutlierTolerance = camera.GetParameter("OutlierTolerance");
    ptrConfidenceThreshold->SetValue(2048);
    ptrFilterSpatial->SetValue(true);
    ptrFilterTemporal->SetValue(true);
    ptrFilterStrength->SetValue(235);
    ptrOutlierTolerance->SetValue(6000);

    //Digital IO Control
    CEnumerationPtr ptrLineSelector = camera.GetParameter("LineSelector");
    CBooleanPtr ptrLineInverter = camera.GetParameter("LineInverter");
    CFloatPtr ptrLineDebouncerTime = camera.GetParameter("LineDebouncerTime");
    CEnumerationPtr ptrUserOutputSelector = camera.GetParameter("UserOutputSelector");
    CBooleanPtr ptrUserOutputValue = camera.GetParameter("UserOutputValue");
    CIntegerPtr ptrUserOutputValueAll = camera.GetParameter("UserOutputValueAll");
    ptrLineSelector->FromString("Line1");
    ptrLineInverter->SetValue(false);
    ptrLineDebouncerTime->SetValue(0.0);
    ptrUserOutputSelector->FromString("UserOutput1");
    ptrUserOutputValue->SetValue(false);
    ptrUserOutputValueAll->SetValue(0);

    cout << "Connected to camera " << camera.GetCameraInfo().strDisplayName << endl;
}
```

Figura 3.22: Función Init_Config( ).

El resto del código que aparece en la función permite acceder a los parámetros de la cámara y modificarlos si se desea. La cámara está configurada con el valor por defecto de los parámetros. El único que se ha modificado es el formato de la componente de rango, que en lugar de ser *Coord3D_C16*, es *Coord3D_ABC32f*.

El método *GetParameter()* y los punteros inteligentes del *GenApi* se utilizan para obtener acceso a los parámetros de la cámara. Los nombres y tipos de parámetros se pueden encontrar utilizando los paneles de documentación del pylon Viewer (ToF).

Los tipos de punteros inteligentes disponibles son: *CIntegerPtr*, *CFloatPtr*, *CEnumerationPtr* y *CBooleanPtr*, dependiendo del tipo de datos de los parámetros.

Mencionar también que para establecer cierto valor en un parámetro se utiliza el método *SetValue ()* para parámetros enteros, de coma flotante y booleanos, y el método *FromString ()* para parámetros de enumeración.

- **Acquisition ( )** (Figura 3.23)
  En primer lugar, se define un vector de estructuras *BufferParts parts*, cuyas estructuras contienen un puntero a la profundidad real y los datos de la imagen, así como la anchura y la altura de la imagen. Posteriormente, con la llamada al método *GrabSingleImage* se lleva a cabo la adquisición de un único frame. Este método se almacena en *ptrGrabResult*, el cual contiene la información de los datos capturados.
  Se define tanto la anchura como la altura de la imagen, así como una serie de variables que se utilizarán más adelante.

```
void Sample::Acquisition()
{
    //Acquire One Single Image
    BufferParts parts;
    GrabResultPtr ptrGrabResult = camera.GrabSingleImage( 1000, &parts );
    const int width = (int) parts[0].width;
    const int height = (int) parts[0].height;
    float nan;
    float corregidos = 0;
    float suma_vecinos;
    float vecinos_validos;
    float valor;

    if ( ptrGrabResult->status == GrabResult::Ok )
    {
        cout << "Image has been acquired" << endl;
    }
    else
    {
        // Handle possible error during image acquisition here ..
        cerr << "Failed to grab an image." << endl;
    }
    //Save the 3D data
    Mat Z(480,640,CV_32FC1);
    Mat Z_aux(480,640,CV_32FC1);
    Mat intensity(480,640,CV_16UC1,parts[1].pData);
```

Figura 3.23: Función Acquisition ( ) Parte 1.

Después se verifica que la imagen ha sido adquirida satisfactoriamente, leyendo *ptrGrabResult*. En caso contario, se advierte con un mensaje indicando que la captura ha fallado. El estado debe comprobarse antes de acceder a los datos de la imagen.

Se definen también tres matrices: dos de ellas que trabajaran con los datos de profundidad, y una que lo hará con los datos de intensidad de la imagen.

A continuación (Figura 3.24), se definen varias cadenas de caracteres (*strings*), en las cuales se almacenarán imágenes relativas a los datos de profundidad e intensidad, y archivos de texto con dichos datos de profundidad e intensidad respectivamente.

```
//Strings
stringstream ss;
ss << image;
string depth_data;
string depth_checked;
string intensity_data;
string depth_image;
string intensity_image;
string depth_imageRGB;
string depth_img("images/depth_");
string depth_OK("images/depth_OK_");
string intensity_img("images/intensity_");
string depth_imgRGB("images/depthRGB_");
string image_n = ss.str();
string png(".png");
string dat(".dat");
depth_data = depth_img + image_n + dat;
depth_checked = depth_OK + image_n + dat;
intensity_data = intensity_img + image_n + dat;
depth_image = depth_img + image_n + png;
intensity_image = intensity_img + image_n + png;
depth_imageRGB = depth_imgRGB + image_n + png;
```

Figura 3.24: Función Acquisition ( ) Parte 2.

Luego, tal y como se muestra en la Figura 3.25, se abre un fichero de texto con el fin de almacenar la coordenada z de cada uno de los píxeles que conforman la imagen. *Coord3D* es una estructura que contiene las coordenadas 3D más un indicardor, que puede ser interrogado para comprobar la validez de los datos.

```
doc = fopen(depth_data.c_str(),"w");
for (int row = 0; row < height; row++)
{
    for (int col = 0; col < width; col++)
    {
        CToFCamera::Coord3D *p3DCoordinate = (CToFCamera::Coord3D*) parts[0].pData + row * width + col;
        fprintf(doc,"%f \t\n",p3DCoordinate->z);
        Z.at<float>(row,col)= p3DCoordinate->z;
    }
}
fclose(doc);
```

Figura 3.25: Función Acquisition ( ) Parte 3.

En el momento en el que se han almacenado los datos correspondientes con la coordenada z de la imagen, es la hora de realizar la implementación del algoritmo que permita encontrar y corregir aquellos píxeles de la imagen que tengan un valor no válido en cuanto a información de profundidad se refiere. Dicho algoritmo se representa en la Figura 3.26.

```
for (int x = 0; x < height; x++)
{
    for (int y = 0; y < width; y++)
    {
        if(Z.at<float>(x,y) != Z.at<float>(x,y)) //Check for a NaN
        {
            nan = 0;
            suma_vecinos = 0;
            vecinos_validos = 0;
            valor = 0;
            int pixeles = 3;
            for(int L = 1; L < 30; L++)
            {
                for(int i = x-L; i < x+(L+1); i++)
                {
                    for (int j = y-L; j < y+(L+1); j++)
                    {
                        if ((i < 0) or (j < 0) or (i >= height) or (j >= width))
                            nan++;
                        else if(Z.at<float>(i,j) != Z.at<float>(i,j))
                            nan++;
                        else
                            suma_vecinos = suma_vecinos + Z.at<float>(i,j);
                    }
                }
                if(nan == (pixeles * pixeles))
                {
                    pixeles = pixeles + 2;
                    nan = 0;
                    suma_vecinos = 0;
                    vecinos_validos = 0;
                    valor = 0;
                }
                else
                {
                    vecinos_validos = (pixeles * pixeles) - nan;
                    valor = suma_vecinos/vecinos_validos;
                    Z_aux.at<float>(x,y) = valor;
                    break;
                }
            }
        }
    }
}
```

Figura 3.26: Función Acquisition ( ) Parte 4.

Los dos primeros bucles *for* se emplean para recorrer todos los píxeles de de la imagen. Después, se comprueba uno a uno para comprobar si se trata de un píxel no válido (NaN). En el caso de ser así, se inicializan varias variables: *nan* se corresponde con el número de píxeles no válidos, *suma_vecinos* representa la suma de los vecinos respecto del píxel no válido a procesar, *valor* se utiliza para calcular la media de dicha suma, y *pixeles* se emplea para inicializar una matriz de 3x3. Acto seguido, se comienza a recorrer esa máscara 3x3 en base al píxel erróneo. Según se vaya encontrando algún píxel no válido dentro de esa matriz se incrementa el valor *nan*, y cuando finalmente no se encuentre, se calcula la suma de los vecinos de aquellos píxeles que sean válidos.

Finalmente, si el número de píxeles no válidos resulta ser el mismo que los valores que conforman la máscara que se está aplicando, entonces se incrementa el tamaño de la máscara, se restablecen las variables y se vuelve a

ejecutar el algoritmo. Si por el contrario, el número de píxeles no válidos no coincide con los elementos de la máscara, entonces se calcula el número de píxeles validos que hay disponibles, se calcula la media y se pasa dicho valor al píxel que se acaba de procesar. Dicho esto, se sigue ejecutando el algoritmo en busca del resto de píxeles no válidos.

En la Figura 3.27 se muestra un algoritmo que permite detectar cúantos píxeles no válidos hay en la imagen, y cúantos de ellos han sido corregidos después de procesar el algoritmo detallado en la Figura 3.26.

```
nan = 0;
for (int x=0;x<height;x++)
{
    for (int y=0;y<width;y++)
    {
        if(Z.at<float>(x,y) != (Z.at<float>(x,y)))
            nan++;
        if(Z_aux.at<float>(x,y) != 0)
            corregidos++;
    }
}
cout << "Pixels not valid \t" << nan << endl;
cout << "Pixels checked \t\t" << corregidos << endl;
```

Figura 3.27: Función Acquisition ( ) Parte 5.

El siguiente paso es almacenar en la matriz donde se guardaron los datos de profundidad (matriz *Z*), los datos corregidos correspondientes a las posiciones en las que se encontraban los píxeles no válidos. De esta forma se obtiene la matriz final con toda la información de profundidad.

Además se crean dos archivos en los cuales se almacenan los datos correspondientes a la información de profundidad corregida y la información de intensidad de la imagen.

El código que implementa esto último se representa en la Figura 3.28.

```
for (int x = 0; x < height; x++)
{
    for(int y = 0; y < width; y++)
    {
        if(Z.at<float>(x,y) != Z.at<float>(x,y))
            Z.at<float>(x,y) = Z_aux.at<float>(x,y);
    }
}

doc1 = fopen(depth_checked.c_str(),"w");
doc2 = fopen(intensity_data.c_str(),"w");
for (int row = 0; row < height; row++)
{
    for (int col = 0; col < width; col++)
    {
        fprintf(doc1,"%d \t\n",int(Z.at<float>(row,col)));
        fprintf(doc2,"%u \t\n",intensity.at<unsigned short int>(row,col));
    }
}
fclose(doc1);
fclose(doc2);
```

Figura 3.28: Función Acquisition ( ) Parte 6.

Por último, únicamente falta la interpretación de los resultados. Se definen 3 matrices para trabajar con los datos obtenidos. Primero se convierte la matriz *Z* a una matriz del mismo tamaño con valores enteros sin signo de 16 bits (*Z16*). A continuación, se buscan los valores mínimos y máximos de los elementos que componen la matriz *Z16* y se realiza un escalado para tener una representación más clara de la información de profundidad *(Z16_aux*). Luego se realiza un suavizado de la imagen usando la función *blur* que proporciona openCV, resultando en la matriz *Z16F*. Los argumentos de esta función son: imagen origen, imagen destino, tamaño del kernel a utilizar para el suavizado, el punto *Point (-1,1)* indica que la referencia está en el centro del kernel, y por último el tipo de borde usado para extrapolar píxeles fuera de la imagen. Se crea también otra matriz (*Z8*) para representar en ella la imagen de profundidad con un mapa de color y poder ver la información en distintos colores en función de la distancia a los objetos.

Finalmente, se representa y almacena la imagen de profundidad (escala de gris y mapa de color) y la imagen de intensidad (Figura 3.29).

```
    Mat ZColor(480,640,CV_16UC1);
    Mat Z16F(480,640,CV_16UC1);
    Mat Z16;
    Z.convertTo(Z16,CV_16UC1);
    double min,max;
    Point minloc,maxloc;
    minMaxLoc(Z16, &min, &max, &minloc, &maxloc);
    Mat Z16_aux = Z16*(65535/max);
    blur(Z16_aux,Z16F,Size(3,3),Point(-1,-1),BORDER_DEFAULT);

    namedWindow("Depth",CV_WINDOW_AUTOSIZE);
    imshow("Depth",Z16F);
    Mat Z8=Z16.clone();
        minMaxLoc(Z8, &min, &max, &minloc, &maxloc);
        Z.convertTo(Z8,CV_8UC1,255.0/(max-min),-min*255.0/(max-min));
    applyColorMap(Z8,Z8,COLORMAP_RAINBOW);
        namedWindow("8",CV_WINDOW_AUTOSIZE);
        imshow("8",Z8);
    namedWindow("Intensity",CV_WINDOW_AUTOSIZE);
    imshow("Intensity",intensity);

    imwrite(depth_image, Z16F);
    imwrite(intensity_image, intensity);
    imwrite(depth_imageRGB, Z8);

    waitKey(500);
}
```

Figura 3.29: Función Acquisition ( ) Parte 7.

- **Close ( )** (Figura 3.30)

  Por último, esta función es la encargada de liberar y cerrar los recursos de la cámara ToF.

```
void Sample::Close()
{
    camera.Close();
}
```

Figura 3.30: Función Close ( ).

Después de haber expuesto en detalle el programa para mejorar los datos de profundidad captados por la cámara Basler ToF, se van a presentar los resultados obtenidos en el ISPACE.

Cuando se ejecuta el programa desde el terminal, se obtendría un resultado como el que se muestra en la Figura 3.31.

```
daniel.montagud@kinectC1: ~/workspace/Borrador/src
daniel.montagud@kinectC1:~/workspace/Borrador/src$ ./Borrador
Connected to camera TOF_ES (21886650)
Image has been acquired
Pixels not valid        57132
Pixels checked          57132
Connected to camera TOF_ES (21886650)
Image has been acquired
Pixels not valid        48063
Pixels checked          48063
```

Figura 3.31: Visualización del terminal tras ejecutar el programa implementado.

Se puede observar que en un primer instante se realiza una conexión con la cámara, y después se captura una imagen. En la primera imagen por ejemplo, el número de píxeles no válidos serían 57132. Son muchos píxeles erróneos, pero tras procesar el algoritmo implementado se corrigen la totalidad de dichos píxeles. Las imágenes y la información quedarían alamacenadas en la carpeta que se ha especificado previamente.

Ahora, se va a mostrar un pequeño fragmento de cada uno de los tres archivos que se almacenan (Figura 3.32). Dicha figura está puesta como ejemplo de correción de los NaN.

Los números que aparecen a la izquierda de las columnas se corresponden con el número de píxel. La resolución espacial de la cámara Basler ToF es de 640x480, por lo que se obtienen 307200 píxeles por cada imagen capturada.

La primera columna se corresponde con los datos de intensidad de la imagen. Se trata de valores enteros de 16 bits, en las que los valores más bajos son los píxeles más oscuros, y los más altos son los píxeles más brillantes.

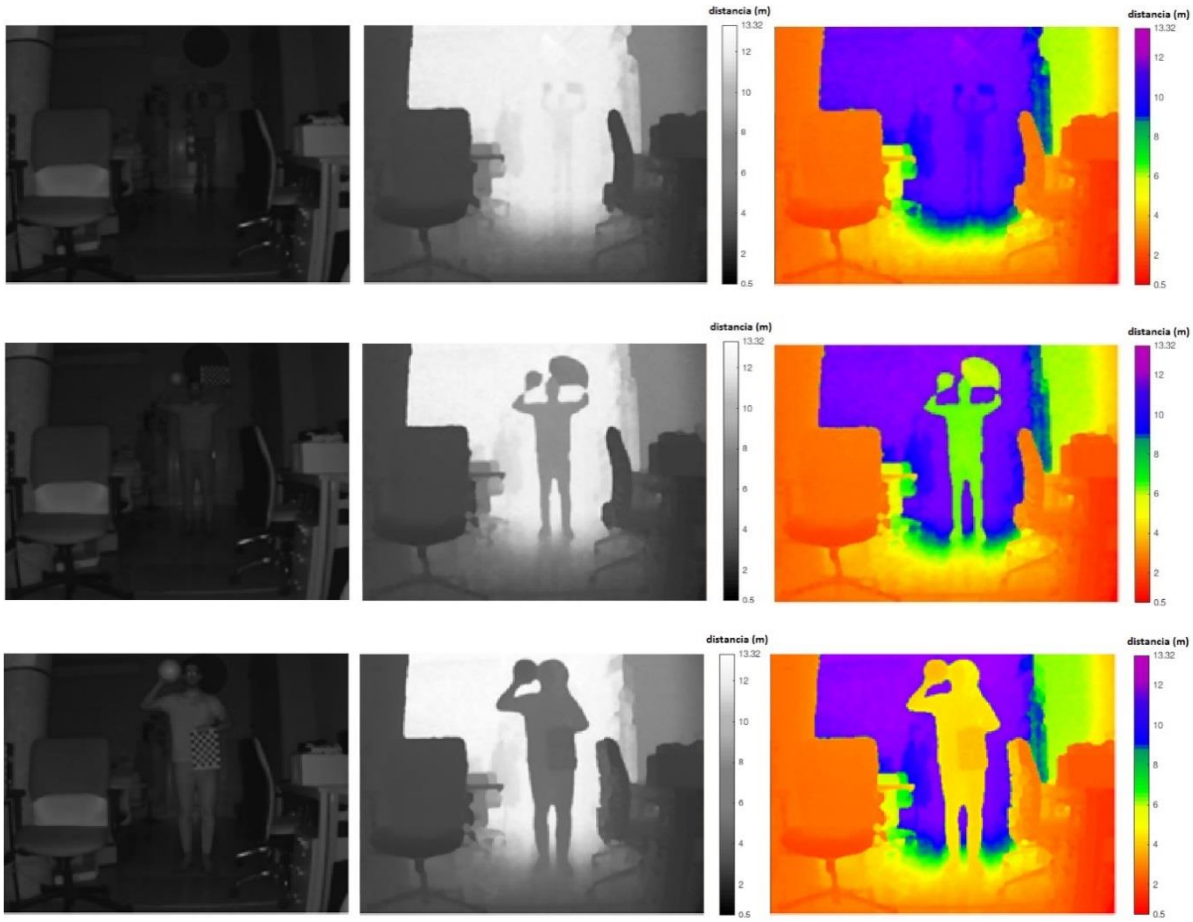
La segunda se corresponde con los datos reales de profundidad capturados por la cámara ToF. Los valores están representados en mm, y puede observarse como en ciertas zonas aparecen píxeles no válidos.

Por último, en la tercera columna aparecen los datos de profundidad corregidos. Los valores se han redondeado. Además, se puede apreciar como en las zonas donde los píxeles eran no válidos, tras el procesamiento del algoritmo se consigue una aproximación calculando la media de los píxeles vecinos, teniendo así información en toda la escena.

148704	10620	148704	3655.674316	148704	3655
148705	10652	148705	3657.870117	148705	3657
148706	10684	148706	3660.863037	148706	3660
148707	10712	148707	3669.081299	148707	3669
148708	10748	148708	3676.891602	148708	3676
148709	10785	148709	3682.079590	148709	3682
148710	10812	148710	3686.455566	148710	3686
148711	10967	148711	3692.234863	148711	3692
148712	11132	148712	3699.216553	148712	3699
148713	11289	148713	3701.155273	148713	3701
148714	11476	148714	3707.318359	148714	3707
148715	11490	148715	3720.328613	148715	3720
148716	11524	148716	3740.391357	148716	3740
148717	11168	148717	nan	148717	3730
148718	10712	148718	nan	148718	3731
148719	10190	148719	nan	148719	3722
148720	9968	148720	nan	148720	3716
148721	9899	148721	nan	148721	4714
148722	10056	148722	nan	148722	4725
148723	10212	148723	nan	148723	4727
148724	10524	148724	nan	148724	4733
148725	10503	148725	4727.612305	148725	4727
148726	10616	148726	4749.612793	148726	4749
148727	10461	148727	4749.389648	148727	4749
148728	10464	148728	4745.721191	148728	4745
148729	10297	148729	4745.476562	148729	4745
148730	10236	148730	4746.433105	148730	4746
148731	9916	148731	4761.326172	148731	4761
148732	9608	148732	4776.819824	148732	4776
148733	9183	148733	nan	148733	4776
148734	8268	148734	nan	148734	4780
148735	6712	148735	nan	148735	4978
148736	5828	148736	nan	148736	5791
148737	5613	148737	nan	148737	5791

Figura 3.32: Fragmento como ejemplo de correción de los NaN. La primera columna representa los valores de intensidad de cada píxel, la segunda los valores reales de profundidad, y la tercera los valores de profundidad con los NaN corregidos.

Para concluir este apartado, se representan los resultados de las imágenes obtenidas tras unas cuantas capturas con la cámara Basler ToF (Figura 3.33).



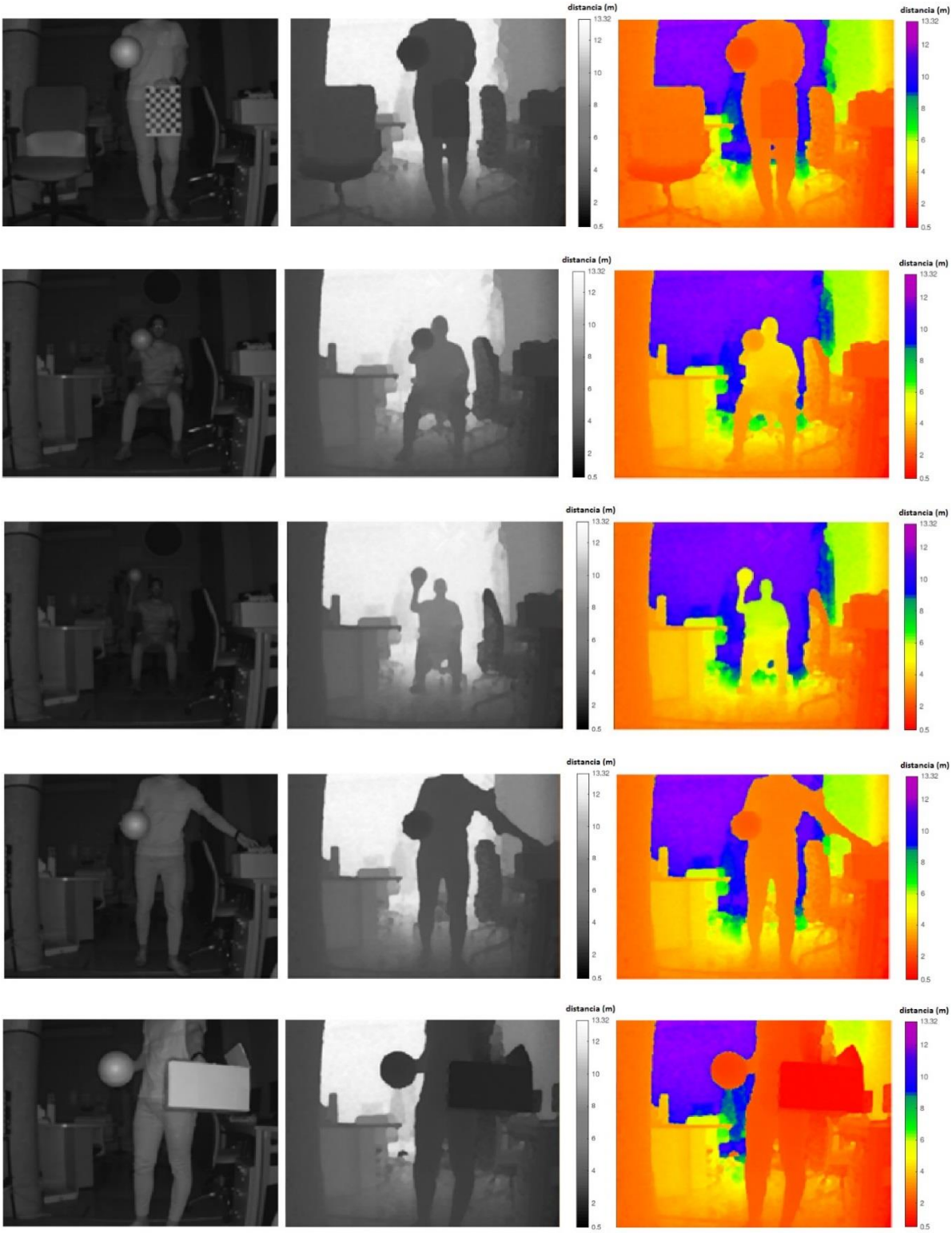


Figura 3.33: Imágenes obtenidas con la cámara de Basler ToF. La primera columna representa la imagen de intensidad, la segunda el mapa de profundidad en una escala de grises y la tercera representa el mapa de profundidad en una escala de colores.

3.1.2. Estudio en un espacio exterior

Una vez se ha realizado el estudio de la cámara en un espacio interior controlado, se pasó a un espacio exterior para ver los resultados que se obtienen en estos entornos.

Su montaje se ha realizado en el patio exterior de la tercera planta de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá.

En primer lugar, mencionar que la cámara dispone de un grado de protección IP30, por lo que no es recomendable utilizar la cámara en lugares donde se pueda mojar.

Por otro lado, la compañía advierte que la cámara Basler ToF está optimizada para un uso en espacios interiores. En condiciones donde la luz solar es intensa presenta dificultades de funcionamiento y sobre todo si las fuentes de luz son muy intensas y están en el rango del infrarrojo cercano (850 nm). Con lo cual, en estas condiciones las mediciones serán imprecisas. La compañía indica que está trabajando en un modelo ToF para un uso en espacios exteriores. [*Pregunta 18 de la referencia* 21]

Dicho esto, efectivamente al probar el funcionamiento de la cámara Basler ToF en un entorno exterior, el comportamiento no ha sido bueno. Se ha llevado un seguimiento de las capturas tomadas en diferentes condiciones ambientales, pero en el momento en el que incide con cierta intensidad la luz solar, la cámara pierde prácticamente la visibilidad de la escena. La Figura 3.34 acredita lo mencionado hasta el momento con una imagen capturada cuando la radiación solar está en su máximo esplendor. Se representan las imágenes correspondientes con el mapa de profundidad en escala de grises y en escala de colores, puesto que son las afectadas. La imagen de intensidad se visualiza sin ningún tipo de problema.

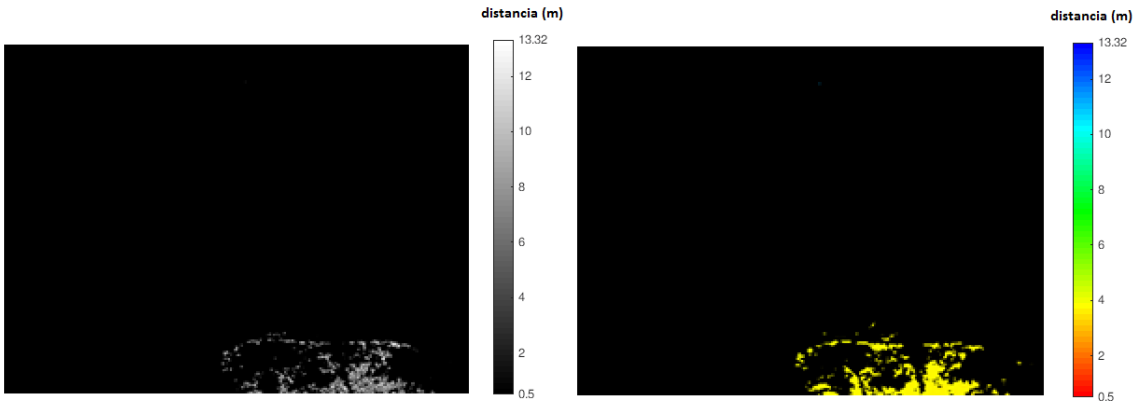


Figura 3.34: Imágenes de profundidad en espacio exterior con alta intensidad de luz solar (la primera representada en escala de grises y la segunda en escala de colores).

También se ha utilizado un filtro interferencial externo para analizar el comportamiento que tiene en la cámara, pero el resultado ha sido desfavorable, tal y como se muestra en la Figura 3.35.

Figura 3.35: Imagen de profundidad en escala de grises utilizando filtro interferencial.

Cabe mencionar que, en todas las imágenes capturadas con la cámara en un espacio exterior, el algoritmo implementado que se detalló previamente no es válido porque las imágenes tienen prácticamente la mayoría de los píxeles con un valor no válido, con lo cual no es posible realizar una corrección de estos.

En condiciones en las que la intensidad de luz solar no es elevada, se ha conseguido obtener algunas imágenes de profundidad algo más aceptables. Para su obtención, se ha establecido el parámetro *Confidence Threshold* con el valor mínimo (0). De esta forma, se tienen en cuenta todos los píxeles que excedan dicho valor. Esto es necesario puesto que si se mantiene el valor por defecto (2048), se pierden tantos píxeles que prácticamente no existe información en la imagen capturada.

Colocando en el campo de visión de la cámara un macetero y una caja (Figura 3.36) se han obtenido los siguientes resultados:

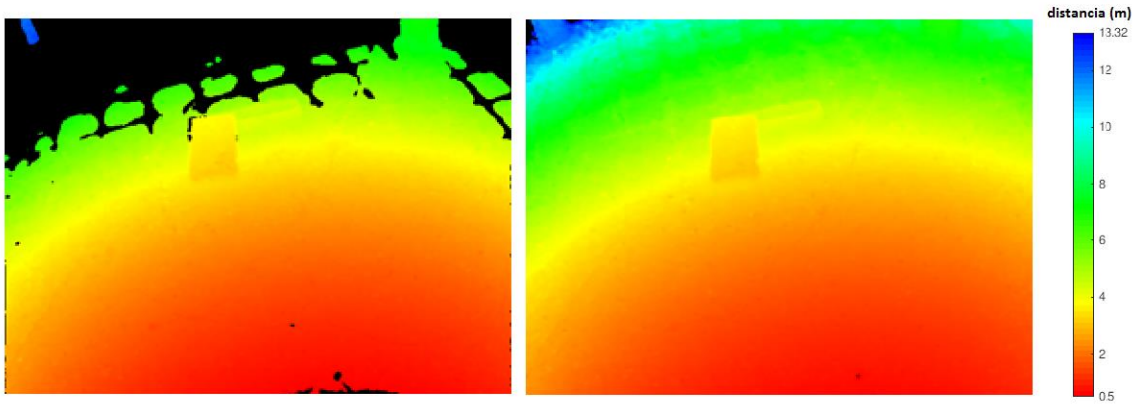


Figura 3.36: Imágenes de profundidad en espacio exterior con baja intensidad de luz solar.

Se puede observar como a una distancia media se encuentran los objetos colocados, y algo más lejos se pueden apreciar algunas de las columnas del patio.

Si en este escenario se restringe la ROI, se pueden obtener las imágenes que se muestran en la Figura 3.37.

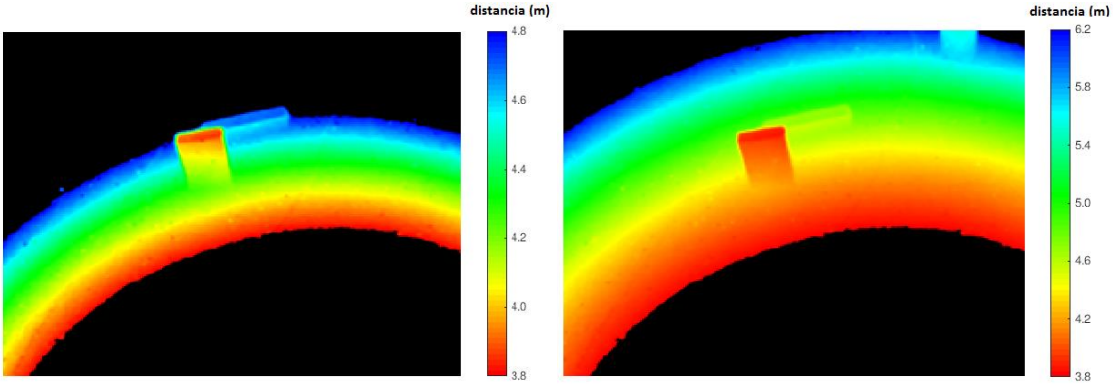


Figura 3.37: Imágenes de profundidad en espacio exterior con baja intensidad de luz solar restringiendo la ROI.

En la primera de ellas se ha establecido la profundidad mínima en 3,8 m y la profundidad máxima en 4,74 m, y en la segunda imagen 3,8 m y 6,15 m respectivamente. Toda la información fuera de dichas regiones de interés es descartada por la cámara ToF.

A continuación, se presentan más pruebas realizadas cuando la intensidad de la luz solar no es elevada.

En la Figura 3.38 se muestra una captura tomada a media tarde en los distintos formatos disponibles. En el campo de visión de la cámara se ha colocado un macetero seguido de un banco.

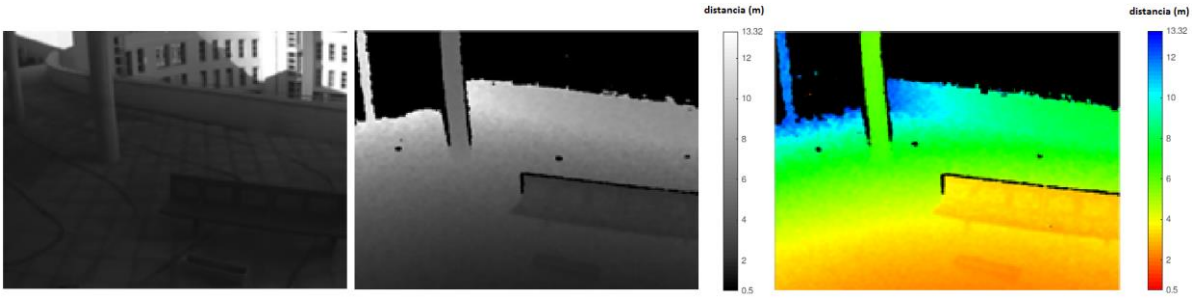


Figura 3.38: Imágenes tomadas en un espacio exterior a media tarde.

La primera captura se corresponde con la imagen de intensidad, y la segunda y tercera con la imagen de profundidad, con los formatos escala de gris y mapa de color respectivamente. En este escenario, el parámetro *Confidence Threshold* se ha establecido también con un valor de 0.

En las Figuras 3.39, 3.40 y 3.41 se ha contemplado el mismo escenario, pero las pruebas han sido realizadas por la noche, y se ha jugado con varios parámetros internos de la cámara ToF. Procediendo de igual forma que antes en primer lugar aparece la imagen de intensidad, seguida de la imagen de profundidad representada tanto con escala de grises como con mapa de color.

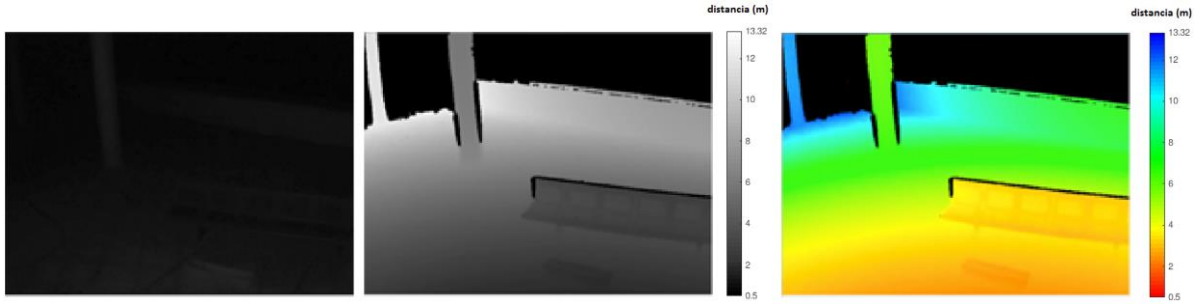


Figura 3.39: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la noche.
Confidence Threshold = 688.

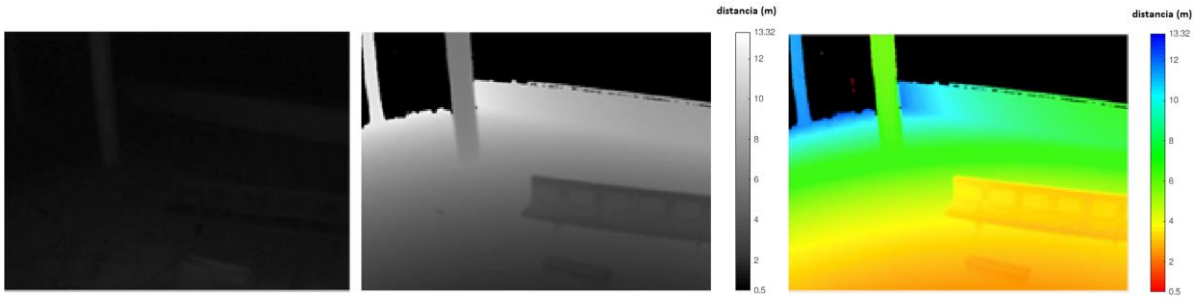


Figura 3.40: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la noche.
Confidence Threshold = 688, *Outlier Tolerance* = 65536.

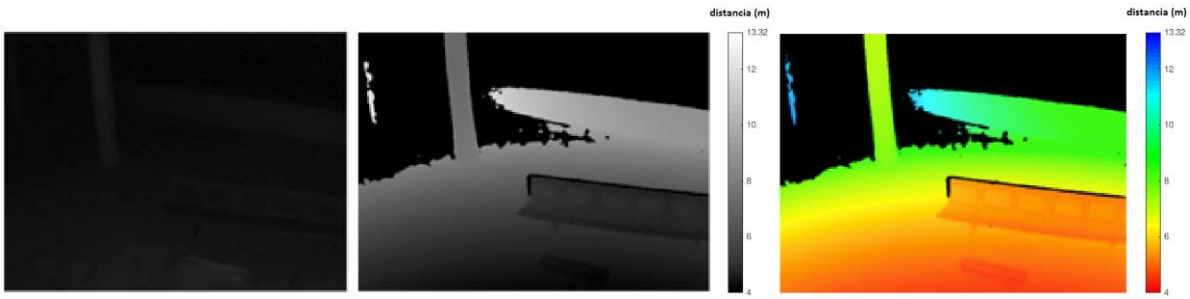


Figura 3.41: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la noche.
MinDepth = 4 m, *MaxDepth* = 13,320 m.

Por último, en las Figuras 3.42 y 3.43 se representan las capturas tomadas tanto por la tarde como por la noche en el mismo escenario, aplicando el algoritmo que se explicó en la sección anterior.

Se puede apreciar que los resultados no tienen nada que ver con los obtenidos en un espacio interior. Esto se debe a que, al aparecer tantos píxeles no válidos en la imagen, es muy difícil corregir todos ellos, y por tanto se siguen perdiendo muchos píxeles de la imagen.

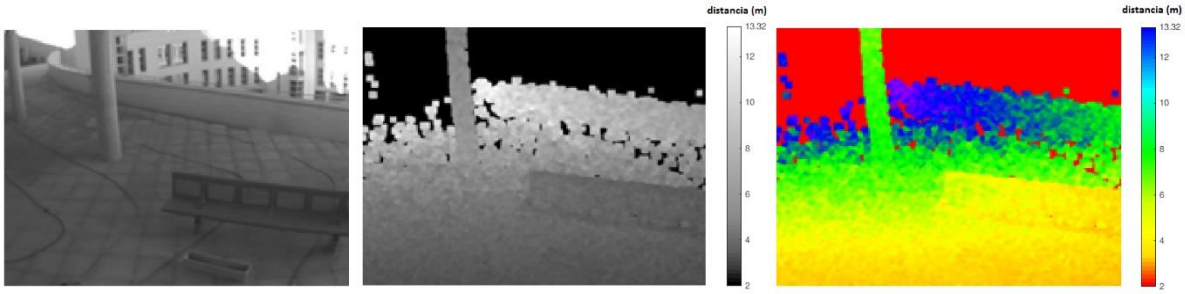


Figura 3.42: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la tarde utilizando el algoritmo implementado.

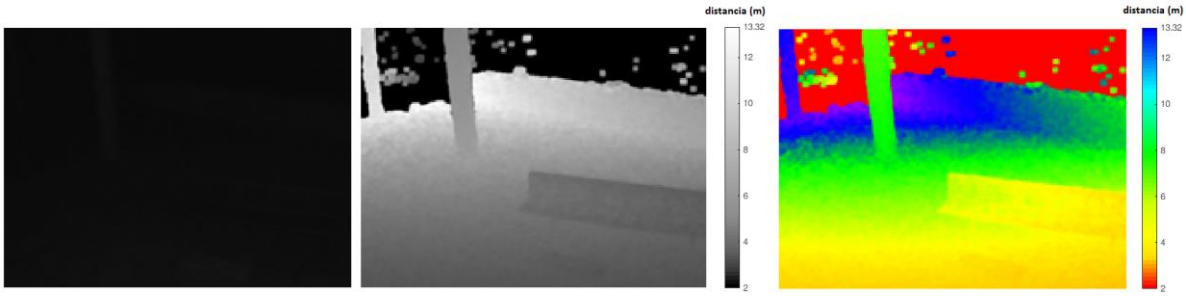


Figura 3.43: Imágenes tomadas en un espacio exterior por la noche utilizando el algoritmo implementado.

Mencionar que en ambos casos se ha reducido el parámetro *Confidence Threshold* y, además se ha restringido la ROI.

Como conclusión, decir que los resultados no han sido muy buenos. Quizás, una posible alternativa sería montar la cámara en una carcasa, la cual proteja en cierta medida al dispositivo frente a la radiación solar. Sin embargo, antes de instalarlo en una carcasa protectora, es necesario tener en cuenta la refrigeración de la cámara, es decir, sería conveniente montar algún mecanismo que permita el enfriamiento de la cámara. Además, es importante evitar la luz difusa, garantizando que no existen partes de la carcasa reflectantes cerca de la lente. [*Pregunta 21 de la referencia* 21]

3.2. Cámara ToF Starform de Odos Imaging

Las siguientes capturas de imagen se corresponden con los datos de profundidad, con los valores por defecto de los parámetros de la cámara.

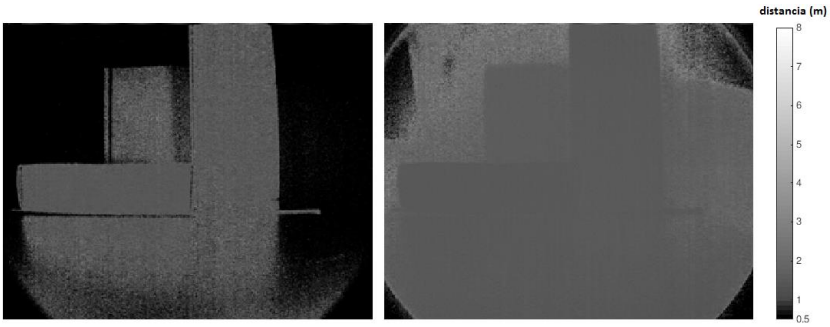


Figura 3.44 a) Imagen de profundidad en escala de grises (apertura mínima)

Figura 3.44 b) Imagen de profundidad en escala de grises (apertura máxima)

En la Figura 3.44 a) se ha obtenido configurando la apertura de la lente al mínimo mientras que en la Figura 3.44 b) se ha ajustado con la apertura al máximo. En ambas, se ha enfocado la escena lo máximo posible. Se puede observar como aparecen cortes en las cuatro esquinas de las imágenes.

Hay algún problema de enfoque en la lente. Puede ser debido a un posible defecto de fabricación a la hora de montar el sensor CMOS en la cámara, da la sensación de no estar a la distancia adecuada respecto con la lente.

El resultado obtenido no es bueno. Aparecen muchos píxeles no válidos (píxeles de color negro), y además se obtienen imágenes bastante desenfocadas.

Por este motivo se ha decidido realizar varias capturas tomando como punto de partida un escenario en el cual se coloca como patrón un tablero de ajedrez. La idea es dejar fijos los parámetros de la cámara y el enfoque de la lente (máximo enfoque) y después, ir modificando la apertura de la lente (mínima, media y máxima) y la distancia del tablero a la cámara (1, 3 y 6 metros).

La Figura 3.45 muestra el valor de los parámetros que se ha utilizado para la realización de estas pruebas.

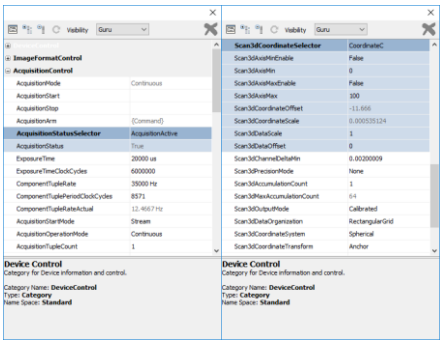


Figura 3.45: Valor de los parámetros de la cámara para realizar las pruebas.

- APERTURA MÍNIMA

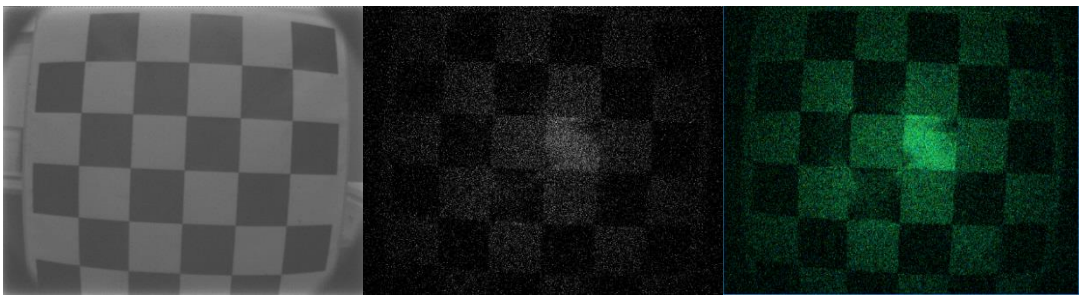


Figura 3.46: Imágenes tomadas a una distancia de 1 m (Apertura Mínima). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

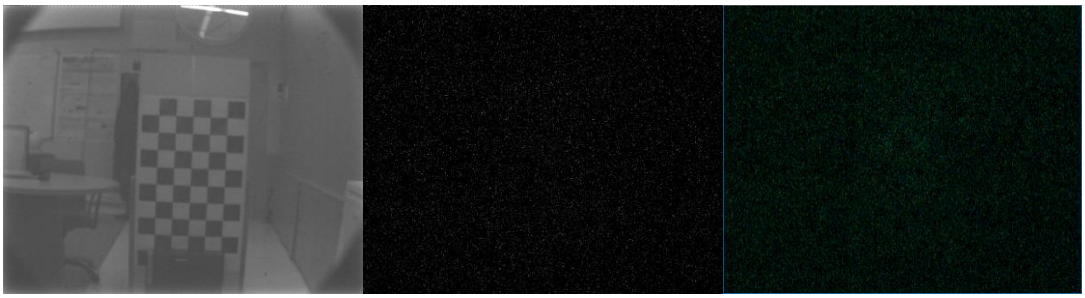


Figura 3.47: Imágenes tomadas a una distancia de 3 m (Apertura Mínima). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

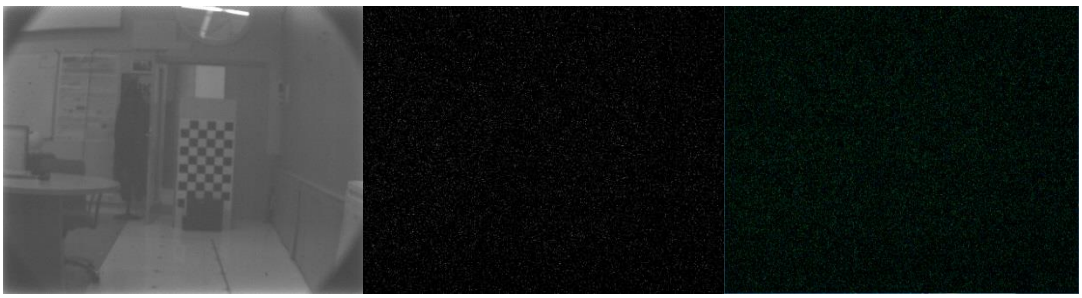


Figura 3.48: Imágenes tomadas a una distancia de 6 m (Apertura Mínima). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

En las Figuras 3.46, 3.47 y 3.48 se puede observar como con una apertura mínima, se consigue la mejor imagen de intensidad (puesto que evita que entre alta intensidad de luz), pero sin embargo la información de profundidad se va perdiendo conforme se va alejando el objetivo de la cámara. Al ajustar una apertura mínima de la lente, el sensor sólo recoge la información que se encuentra muy cerca de la cámara.

- APERTURA MEDIA

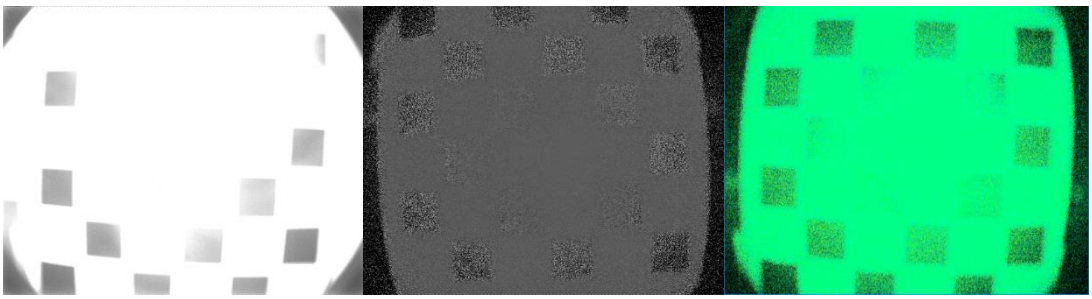


Figura 3.49: Imágenes tomadas a una distancia de 1 m (Apertura Media). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

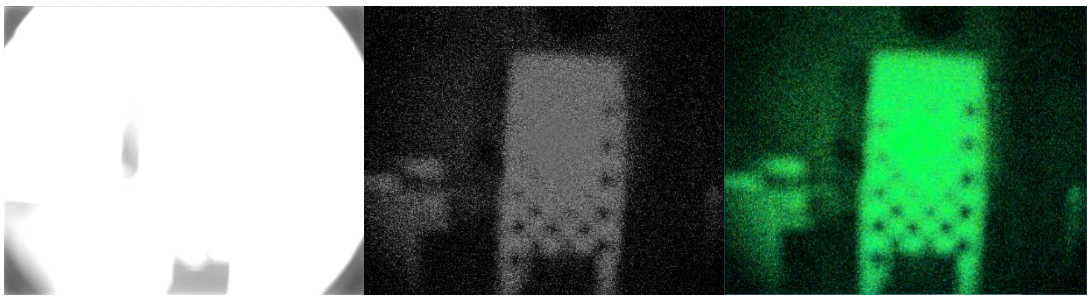


Figura 3.50: Imágenes tomadas a una distancia de 3 m (Apertura Media). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

Figura 3.51: Imágenes tomadas a una distancia de 6 m (Apertura Media). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

En las Figuras 3.49, 3.50 y 3.51 se puede ver como con una apertura media de la lente, empeora la calidad de la imagen de intensidad puesto que entra más luz, pero las imágenes de profundidad mejoran, aunque siguen siendo malos resultados.

- APERTURA MÁXIMA

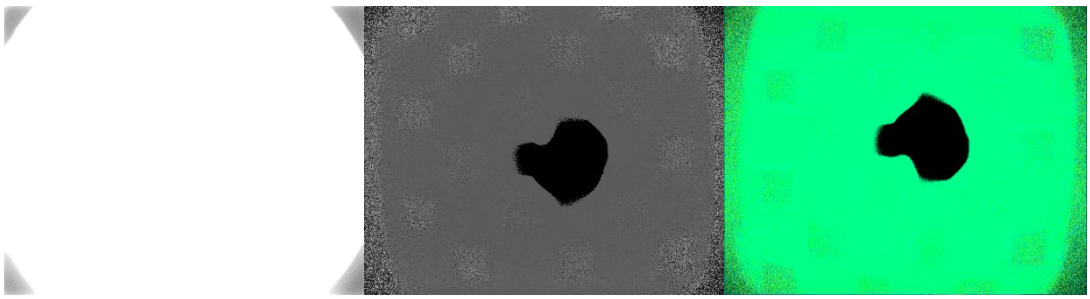


Figura 3.52: Imágenes tomadas a una distancia de 1 m (Apertura Máxima). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

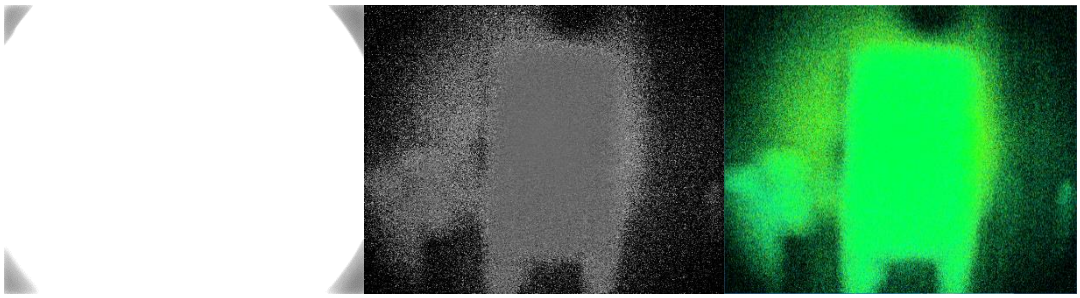


Figura 3.53: Imágenes tomadas a una distancia de 3 m (Apertura Máxima). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

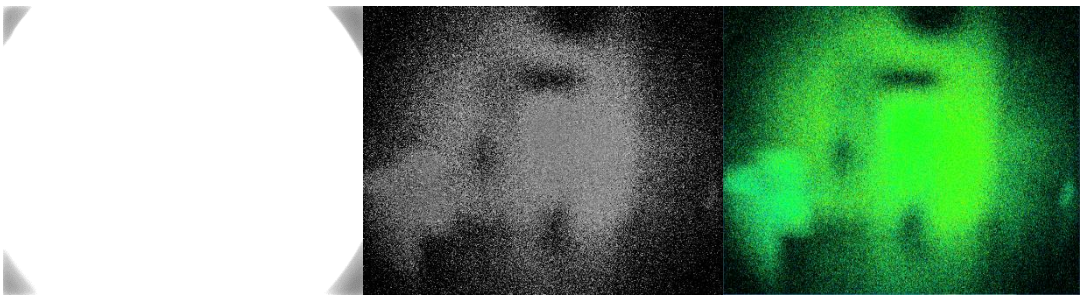


Figura 3.54: Imágenes tomadas a una distancia de 6 m (Apertura Máxima). La primera imagen se corresponde con la imagen de intensidad mientras que la segunda y tercera con la imagen de profundidad representada en escala de grises y colores respectivamente.

Por último, en las Figuras 3.52, 3.53 y 3.54 estableciendo una apertura máxima de la lente, la imagen de intensidad no se visualiza debido a la gran cantidad de luz entrante, y la información de profundidad es algo mejor que en los casos anteriores, pero igualmente siguen siendo resultados bastante malos.

Debido a los malos resultados obtenidos con esta cámara ToF en un espacio interior controlado, se ha tomado la decisión de no montar este dispositivo en un espacio exterior, no pudiendo estudiar así sus prestaciones en aplicaciones en espacios exteriores.

Capítulo 4

4. Conclusiones y líneas futuras

En este último capítulo se exponen las conclusiones y los logros que han sido conseguidos con la realización de este proyecto. Se enumeran también una serie de posibles líneas futuras de trabajo.

4.1. Conclusiones

Este proyecto se ha enfocado en el estudio de dos cámaras de tiempo de vuelo (ToF) comerciales con el propósito de sacar conclusiones sobre las prestaciones que ofrecen en aplicaciones interiores y exteriores.

En primer lugar se ha analizado la cámara ToF de la compañía de Basler. Se puede decir, que en un entorno interior, este dispositivo ofrece muy buenas prestaciones a la hora de obtener información de profundidad, puesto que las fuentes externas de luz en estos espacios no suponen, en condiciones normales de iluminación, problema alguno en la adquisición de imágenes. Además, la información de profundidad va acompañada de una imagen de intensidad de una gran calidad, lo que permite reconocer cualquier objeto dentro del campo de visión de la cámara ToF. Sin embargo, cabe mencionar que aparecen bastantes píxeles no válidos en la imagen, como consecuencia de las distintas fuentes de error que aparecen en este tipo de cámaras. En la Tabla 4.1 se muestra la cantidad de píxeles no válidos correspondientes con las imágenes capturadas de la Figura 3.33 antes de ser corregidos. Este no es un probema importante ya que se puede solucionar mediante un algoritmo que se encarga de recorrer todos los píxeles de la imagen, comprobar cuáles son los no válidos, y una vez detectados, corregirlos realizando una media de los píxeles vecinos de cada píxel erróneo. Con este algoritmo se consigue una imagen en espacios interiores con información de profundidad bastante aceptable.

Imagen	Píxeles no válidos	% de píxeles no válidos
1	46003	14,97 %
2	56548	18,4 %
3	56835	18,5 %
4	53451	17,39 %
5	51985	16,92 %
6	55256	17,98 %
7	48322	15,72 %
8	48463	15,77 %

Tabla 4.1: Píxeles no válidos de las imágenes de la Figura 3.33

Sin embargo, en espacios exteriores, la imagen de intensidad sigue siendo de gran calidad, pero la información de profundidad se ve muy afectada debido a la luz solar que satura la cámara. Se ha conseguido obtener alguna captura relativamente aceptable en cuanto a detección de objetos se refiere, pero en condiciones donde la luz solar es débil y ajustando algunos parámetros internos de la cámara. En la Tabla 4.2 se muestra la cantidad de píxeles no válidos correspondientes con las imágenes capturadas de las Figuras 3.42 y 3.43 antes de ser corregidos.

Imagen	Píxeles no válidos	% de píxeles no válidos
Capturada por la tarde	158270	51,52 %
Capturada por la noche	71329	23,21 %

Tabla 4.2: Píxeles no válidos de las imágenes de las Figuras 3.42 y 3.43

La cámara ToF de la compañía de Odos imaging no funciona bien. Hay un defecto de fabricación que no se ha resuelto, y por tanto, no permite obtener información aceptable. Debido a esto, se ha decidido no realizar un estudio de dicha cámara, simplemente se han incluido varias pruebas que demuestran que no funciona correctamente.

4.2. Líneas futuras de desarrollo

En esta sección se exponen algunas posibles líneas de trabajo a partir del estudio realizado en este proyecto.

- Implementar un algoritmo que ofrezca la posibilidad de inicializar la cámara Basler ToF con valores concretos de los parámetros internos que incorpora, en base a las necesidades del usuario. Estos valores serán pasados como argumentos de una función de inicialización a través de la consola de la computadora.

Apéndice A

Manual de usuario

En este manual de usuario se presenta tanto la instalación software como hardware de cada una de las dos cámaras utilizadas, para poder interactuar con ellas y llevar a cabo la adquisición de imágenes.

A.1. Cámara Basler ToF

A.1.1. Instalación Software [*Sección 7.1 de la referencia* 6]

Para operar con la cámara Basler ToF se necesita el paquete de software apropiado en base al sistema operativo que se esté utilizando. En este proyecto, el sistema operativo empleado es Linux (64 bits). Al instalar el paquete de software, se instalarán los siguientes componentes:

- **pylon Viewer (ToF)**: aplicación que permite visualizar y cambiar la configuración de los parámetros de la cámara en OS Linux.
- **ToF IP Configurator**: muestra la configuración IP actual de la cámara y el adaptador de red, y permite modificarlo.
- **GenTL Producer**: permite operar con bibliotecas de procesamiento de imágenes de terceros.
- **Code samples:** la carpeta de instalación contiene muestras de código que ilustran cómo usar la API de la cámara.
- **ToF Programmer´s Guide:** guía para escribir código con la cámara Basler ToF.

A continuación, se muestra el procedimiento para la instalación del software **Basler ToF Driver** en el directorio */opt/BaslerToF*. Necesita permisos de administrador para escribir en */opt*.

1. Desinstale cualquier software de ToF Driver que haya instalado con anterioridad.
2. Extraiga el archivo **basler-tof-driver-x.x.x-<ARCH>.tar.gz** en su directorio home. Mencionar que x.x.x se corresponde con la versión del driver.

   tar –C ~-xzf basler-tof-driver-x.x.x-<ARCH>.tar.gz

3. Cambie al directorio que contiene el archivo INSTALL:
   cd ~/BaslerToF-driver-x.x.x

4. Copie el directorio *BaslerToF* al directorio */opt*.

sudo cp –r BaslerToF /opt

5. Ejecute el siguiente comando para probar su cámara:

/opt/BaslerToF/bin/PylonViewerApp

A.1.2. Instalación Hardware [*Sección 7.2 de la referencia* 6]

Para instalar la cámara Basler ToF siga los siguientes pasos:

1. Monte la cámara con un soporte adecuado.
2. Conecte un extremo del cable GigE en el conector RJ45 de la cámara y el otro extremo en un puerto Ethernet que se encuentre en la misma subred que su PC.
3. Inserte el enchufe de 12 pines del cable de alimentación en el conector de 12 pines de la cámara.
4. Enchufe el cable de alimentación a una toma de corriente. Si se enciende el LED verde, la cámara está lista para ser utilizada.
5. Es recomendable enchufar o desenchufar el cable de alimentación en el conector de 12 pines de la cámara cuando no está enchufada a la toma de corriente. Esto puede evitar posibles daños en la cámara.
6. Después de 20 minutos, la cámara alcanza una temperatura de funcionamiento estable.

En la Figura A.1 se pueden observar los diferentes conectores que incorpora la cámara.

Figura A.1: Parte posterior de la cámara con los diferentes conectores. [19]

A.1.3. ToF IP Configurator

Para abrir este componente se debe ejecutar el siguiente comando:

```
daniel.montagud@kinectC1: ~
daniel.montagud@kinectC1:~$ /opt/BaslerToF/bin/IpConfigurator
```

La cámara aparecerá debajo del adaptador de red como se puede ver en la Figura A.2.

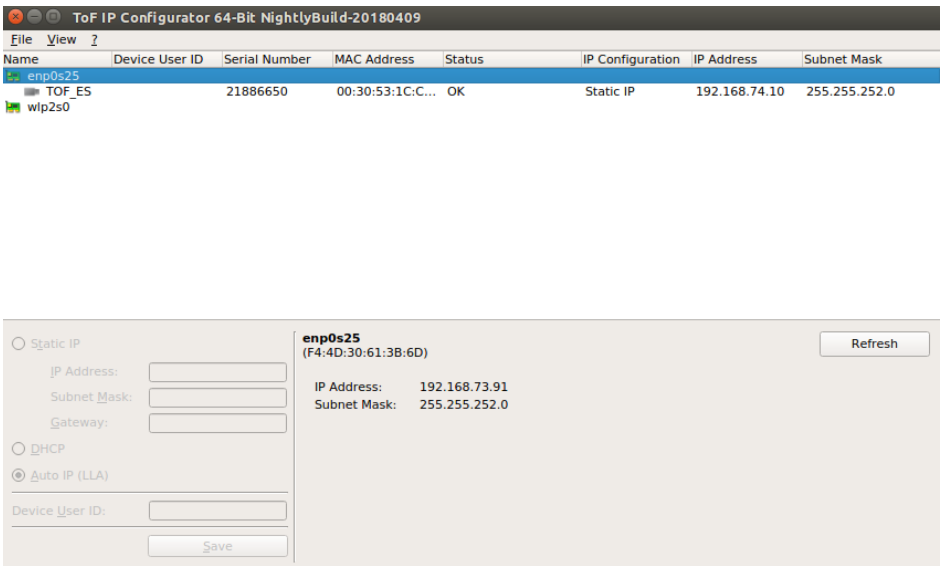


Figura A.2: Aplicación ToF IP Configurator.

La cámara está configurada para usar DHCP y obtener así una dirección IP. Si no hay un servidor DHCP disponible, entonces se asignará automáticamente una IP. En el caso de que la asignación de la dirección IP falle, se puede asignar una dirección IP de forma manual.

A.1.4. Pylon Viewer ToF

Para abrir esta aplicación y comenzar la adquisición de imágenes siga los siguientes pasos:

1. Conecte la cámara como se detalló en el apartado A.1.2.
2. Inicie el pylon Viewer ToF ejecutando el siguiente comando:

```
daniel.montagud@kinectC1: ~
daniel.montagud@kinectC1:~$ /opt/BaslerToF/bin/PylonViewerApp
```

3. La cámara aparecerá en el panel de dispositivos, debajo de GigE GenTL (ToF). Si no se mostrara, puede ser debido a problemas con la dirección IP. Para solucionar problemas con la dirección IP, consultar A.1.3.
4. Seleccione la cámara. Inicie la cámara haciendo doble clic sobre ella.
5. Inicie la adquisición de imágenes seleccionando disparo continuo. Por defecto, en el área de visualización aparecerá la imagen de rango Mono 16 (Coord3D_C16).

En la Figura A.3 se puede visualizar la ventana de la aplicación pylon Viewer ToF con sus distintas barras de herramientas.

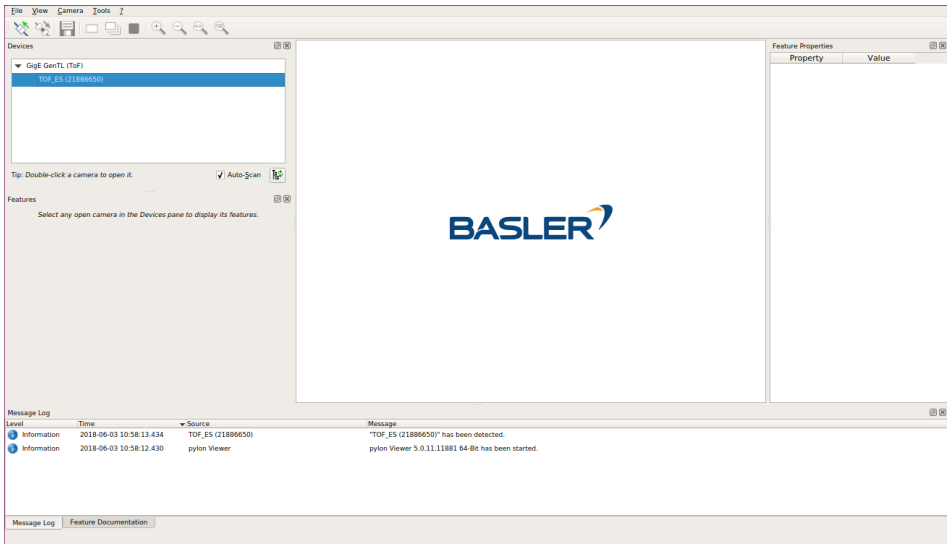


Figura A.3: Aplicación pylon Viewer ToF.

A.2. Cámara Starform 3D de Odos Imaging

A.2.1. Instalación Software [*Sección 4.2.1 de la referencia* 11]

Esta cámara utiliza un paquete de desarrollo software (SDK) proporcionado por Pleora Technologies. Para la realización de este proyecto, esta cámara ha sido utilizada en el SO de Windows 8. Siga los pasos que se detallan a continuación para una correcta instalación del paquete de desarrollo software:

1. Ejecute ***ebus_sdk_3.1.9.3133.exe***, el cual extraerá los archivos necesarios para la instalación.
2. Inicie la instalación haciendo clic en ***Next***. Acepte el acuerdo de la licencia y haga clic de nuevo en ***Next***.
3. Acepte la carpeta de instalación por defecto o cámbiela por una que prefiera. Después haga clic en ***Next***.
4. Presione ***Install*** para comenzar la instalación del *eBUS* SDK, y espere mientras se realiza la instalación.
5. Haga clic en ***Finish*** para completar la instalación.
6. *eBUS* SDK proporciona además controladores optimizados para adaptadores Gigabit Ethernet (*eBUS* Universal Pro). Si esto es necesario, entonces:
   a) Localice la herramienta de instalación del controlador.
   b) Ejecute el programa. Una ventana mostrará los adaptadores presentes.
   c) Seleccione la interfaz del adaptador a la que *eBUS* Universal Driver debe aplicarse y haga clic en ***Install***.

Una vez instalado, se puede encontrar información acerca del eBUS SDK en la carpeta *INSTALL/eBUS SDK/Documentation*.

Tras haber instalado *eBUS* SDK, es necesario instalar la aplicación ***odim_streamer***. Para ello, solo hay que copiar el archivo binario a un directorio apropiado y ejecutarlo haciendo doble clic en el mismo.

El código fuente completo de la aplicación se proporciona en el directorio *odim_samples*, el cual incluye también ejemplos.

A.2.2. Instalación Hardware [12]

Para instalar la cámara Starform 3D de Odos Imaging siga los siguientes pasos:

1. Conecte el sistema *real.IZ™ VS-1000* al PC a través del puerto Gigabit Ethernet del sensor.
2. Conecte las interfaces *Ilumination Input Sync* de los módulos de iluminación a las interfaces *Sensor Output Sync* del sensor (cables para la transferencia de datos).

3. Conecte las interfaces *Ilumination Input IO / Power* de los módulos de iluminación a las interfaces *Sensor Output IO / Power* del sensor (cables para la fuente de alimentación).
4. Por último, conecte el cable de alimentación al conector *Sensor Power Input* del sensor y a una toma de corriente.

Para identificar todos los conectores de ambos módulos (sensor e iluminación) observe las Figuras A.4 y A.5.

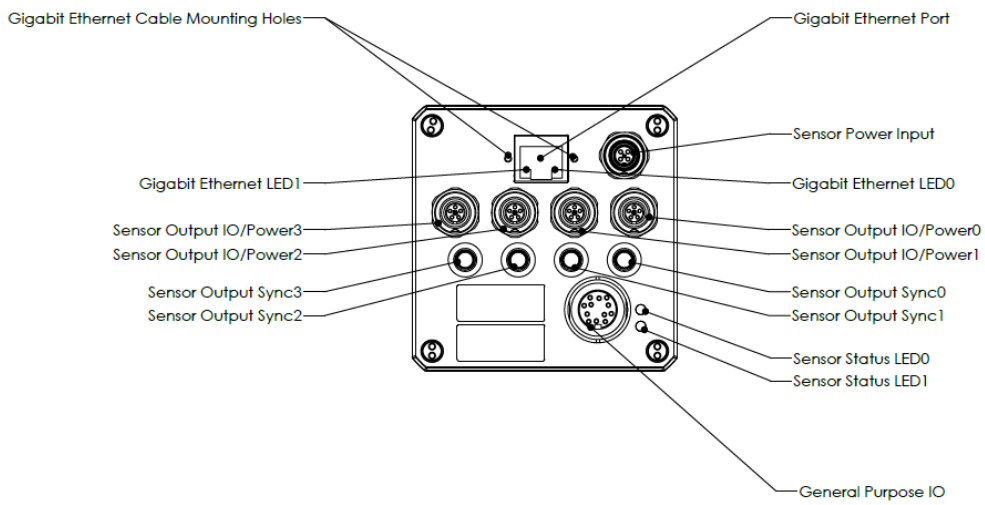


Figura A.4: Parte posterior del sensor *real.IZ*^{TM} *SE-1000*. Conectores disponibles. [12]

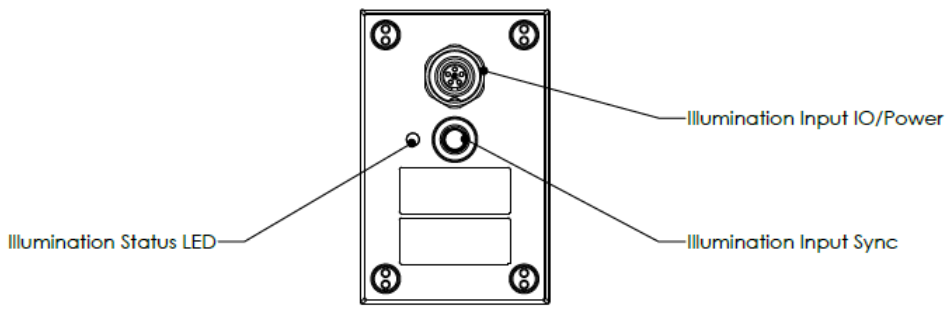


Figura A.5: Parte posterior del módulo de iluminación *real.IZ*^{TM} *IL-0900.* Conectores disponibles. [12]

Al estar completamente conectado, el sistema *real.IZ*^{TM} *VS-1000* quedaría como se muestra en la Figura A.6.

Figura A.6: Sistema *real.IZ™ VS-1000* conectado. [16]

A.2.3. Odim streamer [*Sección 4.3 de la referencia* 11]

Para abrir esta aplicación y comenzar la adquisición de imágenes siga los siguientes pasos:

1. Ejecute la aplicación haciendo doble clic en ***odim_streamer.exe***.
2. Presione el botón ***Select / Connect***.
3. Seleccione el sistema *real.IZ™ VS-1000* y configure la dirección IP requerida por el host.
4. Pulse ***Create Display*** para crear una ventana de visualización.
5. Haga clic en ***Play*** para reproducir contenido.
6. Accede a ***Device Control*** para ajustar los parámetros del dispositivo.

En la Figura A.7 se puede visualizar la ventana de la aplicación odim_streamer.

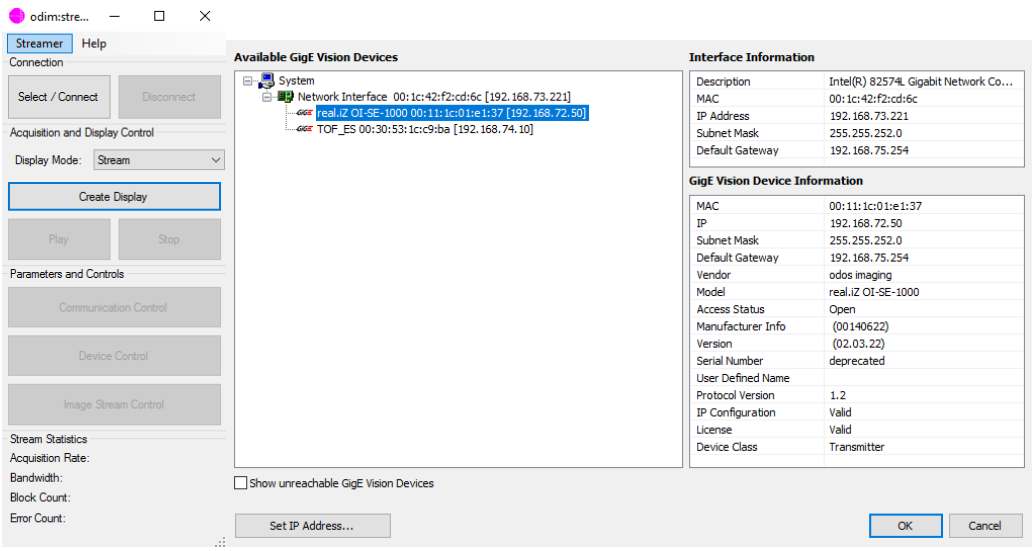


Figura A.7: Aplicación odim_streamer.

Apéndice B

Pliego de condiciones

Para la realización de este proyecto es necesario tener en cuenta los requisitos mínimos a nivel de hardware y de software para las diferentes cámaras de tiempo de vuelo empleadas en el mismo.

B.1. Requisitos para la cámara Basler ToF

B.1.1. Requisitos Hardware [*Sección 3.4 de la referencia* 6]

- Procesador Intel i5 2.4 GHz o superior
- Puerto Gigabit Ethernet
- 4 GB de memoria RAM como mínimo
- Adaptador de red Intel Pro-100 (recomendado)
- Soporte para la cámara

B.1.2. Requisitos Software [*Sección 3.5 de la referencia* 6]

- Windows 7 32-bit
- Windows 7 64-bit (recomendado)
- **Linux** (x86, **x64**) – Utilizado para la realización del proyecto (**Ubuntu 14.04.1 LTS**)
- Driver Basler ToF que incluye lo siguiente: ToF Viewer (sólo en Windows), pylon Viewer ToF (sólo en Linux), ToF IP Configurator, GenICam GenTL producer
- Librería OpenCV 2.4.6.1
- Compilador GNU GCC

B.2. Requisitos para la cámara Odos Imaging ToF

B.2.1. Requisitos Hardware [*Sección 4.1 de la referencia* 11]

- Procesador de 32 o 64 bits
- Puerto Gigabit Ethernet
- 2 GB de memoria RAM
- 120 MB de memoria libre en el disco duro

B.2.2. Requisitos Software [*Sección 4.1 de la referencia* 11]

- **Microsoft Windows 8** – Utilizado para la realización del proyecto
- Microsoft Windows 7 (SP1)
- Microsoft Windows XP (SP3)
- Microsoft Windows 2008 Server
- Red Hat Enterprise Linux
- Visual Studio 8, Visual Studio 9, Visual Studio 10
- .NET usando Visual Studio 10, versión 4.0 .NET framework
- GCC Red Hat Enterprise Linux 6
- eBUS SDK Driver
- Odim Streamer Program

Apéndice C

Presupuesto

C.1. Costes del equipamiento utilizado

- Equipamiento Hardware:

Concepto	Cantidad	Coste unitario	Subtotal (€)
PC HP Intel NUC Core i7	1	500€	500€
Basler ToF	1	2000€	2000€
StarForm Odos Imaging	1	7000€	7000€
Coste total HW			**9500€**

Tabla C.1: Coste del equipamiento Hardware.

- Equipamiento Software:

Concepto	Cantidad	Coste unitario	Subtotal (€)
Ubuntu 16.04 LTS	1	0€	0€
Librería OpenCV 2.4.13	1	0€	0€
Software Basler ToF	1	0€	0€
eBUS SDK (Odos Imaging)	1	0€	0€
Eclipse SDK	1	0€	0€
Microsoft Office (Word)	1	150€	150€
Coste total SW			**150€**

Tabla C.2: Coste del equipamiento Software.

C.2. Costes de mano de obra

Concepto	Cantidad	Coste unitario	Subtotal (€)
Desarrollo Software	180	60€/hora	10800€
Mecanografiado del documento	140	15€/hora	2100€
Coste total mano de obra			**12900€**

Tabla C.3: Coste del mano de obra.

C.3. Costes totales

Concepto	Subtotal (€)
Equipamiento Hardware	9500€
Recursos Software	150€
Mano de obra	12900€
Coste total presupuesto	**22550€**

Tabla C.4: Coste total del presupuesto.

El importe total relativo al presupuesto se corresponde con una cantidad de: VEINTIDOSMIL QUINIENTOS CINCUENTA EUROS

En Alcalá de Henares, a 2 de Julio de 2018.

Daniel Montagud Cortés.

Bibliografía

[1] Dave Wilson, "Time of Flight Cameras Take on Industrial Applications", Novus Light Technologies Today, 15 de Junio de 2015, http://www.novuslight.com/time-of-flight-cameras-take-on-industrial-applications_N4237.html

[2] Manuel Mazo, Carlos Luna, Cristina Losada, "Cámaras de Tiempo de Vuelo (Cámaras ToF)", Departamento de Electrónica, Universidad de Álcala.

[3] Miles Hansard, Seungkyu Lee, Ouk Choi, Radu Horaud. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications. Springer, pp.95, 2012, SpringerBriefs in Computer Science, ISBN 78-1-4471-4658-2. <10.1007/978-1-4471-4658-2>. <hal-00725654>.

[4] Raquel García Jiménez, "Detección y conteo de personas, a partir de mapas de profundidad cenitales capturados con cámaras ToF", Trabajo Fin de Grado, Universidad de Alcalá, 2015.

[5] Basler Time-of-Flight Camera, Basler AG, No. 05, 08/2017, ID 2200000022, https://www.baslerweb.com/fp-1507879569/media/downloads/documents/brochure/BAS1708_ToF_Brochure_EN_SAP0022_No5_web.pdf

[6] Basler ToF Camera User´s Manual, Basler AG, AW001338, version 10, 9/04/2018, https://www.baslerweb.com/fp-1523277387/media/downloads/documents/users_manuals/AW00133810000_Tof_GigE_UM.pdf

[7] Basler ToF Driver Package 1.4.0, C++ Programmer´s Guide, Basler AG, https://www.baslerweb.com/fp-1523344902/media/downloads/software/tof_software/Basler_ToF_CppProgrammersGuide_1.4.0.pdf

[8] Martin Gramatke, "High-Resolution Time-of-Flight Cameras", Basler AG, 12/2015, https://www.baslerweb.com/fp-1500013998/media/en/downloads/documents/white_papers/BAS1511_White_Paper_ToF.pdf

[9] Ritchie Logan, "Relationship Between Ilumination Diffusers and Objective Lenses", Odos Imaging, version 1.0, 29 de Agosto, 2016.

[10] 3D time-of-flight cameras, Odos Imaging, http://www.odos-imaging.com/wp-content/uploads/2016/05/starform_3d_camera_brochure_web_2016011.pdf

[11] 3D Time-of-Flight Camera, User Guide, StarForm™, Odos Imaging, version 1.3.1, 19 de Agosto, 2016, http://www.odos-imaging.com/wp-content/uploads/2016/08/starform_user_guide_20160819.pdf

[12] 3D Tome-of-Flight Camera, Hardware Guide, StarForm™, Odos Imaging, version 1.1.0, 16 de Agosto, 2016, http://www.odos-imaging.com/wp-content/uploads/2016/08/starform_hardware_guide_20160816.pdf

[13] Radu Horaud, Miles Hansard, Georgios Evangelidis, Menier Cl´ement. An Overview of Depth Cameras and Range Scanners Based on Time-of-Flight Technologies. Machine Vision and Applications Journal, 2016.

[14] Radu Horaud, "Three-Dimensional Sensors, Lecture 3: Time of Flight Cameras (Continuous Wave Modulation)", http://perception.inrialpes.fr/~Horaud/Courses/pdf/Horaud_3DS_3.pdf

[15] Radu Horaud, "Three-Dimensional Sensors, Lecture 4: Time of Flight Cameras (Pulse Light Modulation)", http://perception.inrialpes.fr/~Horaud/Courses/pdf/Horaud_3DS_4.pdf

[16] Hu Xinyu (Cher), "Primary Studies on the real.IZ VS-1000 3D Vision System", Laboratory for Embedded and Programmable Systems, http://lepsucd.com/?p=491

[17] J.R. Ruiz-Sarmiento, C. Galindo, J. González-Jiménez, "Cámaras basadas en tiempo de vuelo. Uso en la mejora de métodos de detección de caras", Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, 2011, http://mapir.uma.es/papersrepo/2011/2011-raul-Jornadas_CEA-Camaras_basadas_en_Tiempo_de_Vuelo.pdf

[18] Tiempo de vuelo, Bashny.Net, https://bashny.net/t/es/271646#

[19] Basler ToF Camera – Back view, Basler AG, https://www.baslerweb.com/en/news-press/press-images/

[20] Basler Time-of-Flight (ToF) Camera: Enabling Smart Warehouse, SODAVISION, https://www.sodavision.com/basler-time-of-flight-tof-camera-enabling-smart-warehouse/

[21] Basler ToF Camera – Frequently Asked Questions (FAQ), Basler AG, https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/3d-cameras/time-of-flight-camera/tof-faq/

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

Universidad de Alcalá