

**RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE
SUPERFICIES PAVIMENTADAS POR MEDIO DE LA
TÉCNICA DE ESCANEO LÁSER COMO APOYO A
LA DETECCIÓN DE DAÑOS**

YURI HERCILIA MEJÍA MELGAREJO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2014

RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE SUPERFICIES PAVIMENTADAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE ESCANEÓ LÁSER COMO APOYO A LA DETECCIÓN DE DAÑOS

YURI HERCILIA MEJÍA MELGAREJO

Monografía de grado para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Electrónica

Director:

JORGE HERNANDO RAMÓN SUÁREZ, *MsE.*

Codirector:

HERNÁN PORRAS DÍAZ, *PhD.*

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA

2014

Índice general

Introducción	12
1. Sistemas de adquisición de datos para inspección de daños en pavimentos	14
1.1. Metodología	14
1.2. Sistemas de Gestión de Pavimentos	15
1.3. Recolección de datos	16
1.3.1. Metodologías manuales	17
1.3.2. Sistemas automáticos	18
2. Selección de dispositivos	28
2.1. Requerimientos del sistema	28
2.2. Selección de dispositivos	29
2.2.1. Cámara	29
2.2.2. Lente	33
2.2.3. Proyector de línea láser	34
2.2.4. Filtro óptico	35
2.2.5. Codificador rotatorio	37
3. Integración tecnológica	39
3.1. Conexiones	39
3.2. Acople al vehículo	40
3.3. Presupuesto estimado del prototipo	44

4. Reconstrucción tridimensional	46
4.1. Algoritmo planteado	46
4.1.1. Calibración	46
4.1.2. Escaneo	47
4.2. Algoritmos de la cámara	49
5. Resultados	52
5.1. Reconstrucciones tridimensionales	53
6. Conclusiones	62
7. Apéndice A: Código planteado para extracción de línea láser	64
Bibliografía	66

Índice de figuras

1.1. Etapas de un PMS, adaptado del informe de Zheng y Racca [2] .	16
1.2. El sensor CCD mueve la carga generada de pixel en pixel y la convierte a voltaje en un nodo de salida. El sensor CMOS convierte la carga a voltaje dentro de cada pixel. Fuente: [25].	20
1.3. Configuraciones básicas de los métodos de (a) holografía digital por cambio de fase [32], (b) estereoscopia [33], (c) tiempo de vuelo y el del (d) sensor Kinect [40]	26
1.4. (a) Esquema de un sistema de triangulación láser con proyección lineal. (b) Geometría de triangulación en la que el proyector láser está perpendicular a la superficie	27
2.1. Cámara seleccionada, referencia C4-2040	33
2.2. Representación de la proyección de línea láser, con <i>fan angle</i> = 60° y una altura de 1,73 m	35
2.3. Proyector láser seleccionado, referencia Magnum II 4000	36
2.4. Representación del funcionamiento del filtro óptico pasa banda. La respuesta espectral de la cámara, (a), [55, 56] , se ve limitada por la respuesta del filtro pasa banda, (b), (c), generando la respuesta de la cámara representada por (d)	36
2.5. (a) Codificador rotatorio seleccionado, referencia E50S82500-3-T-24, con la forma de onda de las señales de salida (b)	38

3.1.	Esquema de conexión de los dispositivos. Un inversor de potencia, conectado a la batería del vehículo, alimenta la cámara y el proyector de línea láser. El codificador se alimenta de la cigarrera del vehículo. La salida del codificador se lleva a la entrada de señales que tiene la cámara como señal de activación. Los datos captados por la cámara llegan al computador. La cámara tiene una conexión con el láser que modula la potencia del láser. El láser tiene dos interrupciones, la que genera la cámara y un cable adicional para desconexión manual.	41
3.2.	(a) Esquema del diseño del brazo con medidas. (b) Diseño del sistema de acople en la camioneta	43
3.3.	Acople final en la camioneta	44
4.1.	Patrón triangular de calibración	47
4.2.	Desviación de la línea láser por el patrón de calibración, puntos seleccionados para la regresión lineal	47
4.3.	Matriz de calibración (a) imagen escalada y (b) tridimensional	48
4.4.	Detección de línea láser en la cámara a partir de encontrar la intensidad máxima (a), el centro de la línea umbralizada (b) y el centro de gravedad (c)	51
5.1.	Resultados de reconstrucciones. (a) Imagen escalada, (b) superficie y (c) uno de los perfiles en dirección x de la imagen reconstruida con el algoritmo planteado. (d) Imagen escalada, (e) superficie y (f) uno de los perfiles en dirección x de la reconstrucción con detección del máximo de la línea láser	54
5.2.	Resultados de reconstrucciones. (a) Imagen escalada, (b) superficie y (c) uno de los perfiles en dirección x de la imagen reconstruida con el algoritmo que umbraliza la línea láser. (d) Imagen escalada, (e) superficie y (f) uno de los perfiles en dirección x de la reconstrucción con detección del centro de gravedad de la línea láser	55
5.3.	Imagen escalada de la reconstrucción. Se resalta la región de análisis R	56

5.4. Imagen de la segunda escena, estoperoles viales	57
5.5. Resultados de reconstrucciones del patrón triangular en el pavimento. (a) Imagen escalada, (b) y uno de los perfiles en dirección x de la imagen reconstruida con el algoritmo planteado, captando la escena con un tiempo de integración de $150 \mu\text{s}$. (c) Imagen escalada, (d) y uno de los perfiles en dirección x de la reconstrucción con detección del máximo de la línea láser, captando la escena con un tiempo de integración de $250 \mu\text{s}$	58
5.6. Resultados de reconstrucciones de estoperoles en el pavimento. (a) Imagen escalada, (b) y uno de los perfiles en dirección x de la imagen reconstruida con el algoritmo de umbralizar la línea láser. (c) Imagen escalada, (d) y uno de los perfiles en dirección x de la reconstrucción con detección del centro de gravedad de la línea láser	59
5.7. Ejemplo del efecto de la sombra de un objeto en triangulación láser	60
5.8. Imagen de la tercera escena, daño en el pavimento	60
5.9. Resultados de reconstrucciones de un daño en el pavimento. Imágenes escaladas reconstruidas con el algoritmo planteado (a), con el algoritmo de detectar el máximo de la línea láser (b), con la umbralización de la línea láser (c) y con detección del centro de gravedad de la línea láser (d)	61

Resumen

TITULO: RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE SUPERFICIES PAVIMENTADAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE ESCANEEO LÁSER COMO APOYO A LA DETECCIÓN DE DAÑOS.¹

AUTOR: YURI HERCILIA MEJÍA MELGAREJO ²

PALABRAS CLAVE: Inspección automática de daños superficiales en pavimentos, Sistemas de adquisición de datos, Reconstrucción tridimensional, Triangulación láser.

Los métodos de inspección manual en pavimentos involucran subjetividad, ineficiencia y riesgo de los inspectores durante la adquisición de los datos. En los sistemas automáticos de recolección de datos las imágenes digitales tienen limitaciones por la presencia de sombras e iluminación no uniforme. Además, estos sistemas son costosos y convencionales. Por otro lado, la combinación de datos de intensidad y profundidad mejora la detección de fallas en superficies pavimentadas. En este trabajo se implementa un sistema automático móvil para la generación de modelos tridimensionales de daños en pavimento. El sistema está compuesto por una cámara de escaneo por área de 2048×1088 píxeles con interfaz de comunicación Gigabit Ethernet y velocidad de 340 frames/s, un proyector de línea láser con una longitud de onda de 810 nm, y un codificador rotatorio de 2500 ppr. Se realiza la integración tecnológica de los dispositivos y se acoplan a un vehículo por medio de una estructura. Los dispositivos se disponen en una geometría de triangulación para adquisición de imágenes. Las imágenes de la línea láser deformada por la topografía de la superficie permiten realizar la reconstrucción tridimensional de los daños del pavimento. Se escanean y reconstruyen tres escenarios diferentes. El sistema realiza un escaneo por carril con una precisión de 1 mm/píxel, con una velocidad de hasta 40 km/h

¹Trabajo de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director, Jorge Hernando Ramón Suárez. Codirector, Hernán Porras Díaz.

Abstract

TITLE: THREE DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF PAVEMENT SURFACE BY SCANNING LASER TECHNIQUE AS SUPPORT FOR DAMAGE DETECTION¹

AUTHOR: YURI HERCILIA MEJÍA MELGAREJO ²

KEYWORDS: Automatic inspection of pavement surface damages, Data acquisition systems, Three-dimensional reconstruction, Laser triangulation.

Visual assessment of pavement conditions involves subjectivity, inefficiency, and danger of having people on the roadway to collect data manually. Pavement imaging systems with digital cameras have limitations to discriminate dark areas not caused by pavement distress such as tire marks, oil spills, shadows, and non-uniform illumination. Furthermore, these conventional systems are costly. On another hand, combination of intensity and depth improves pavement surface distresses detection. In this work a mobile automatic system for generating three-dimensional models of pavement damage is implemented. The system integrates an area-scan camera of 2048×1088 pixels with Gigabit Ethernet interface and scan rate of 340 frames/s, a laser line projector of 810 nm, and a rotatory encoder of 2500 ppr. The technological integration of the devices is performed and coupled to a vehicle through a structure. The devices are arranged in a triangular geometry for imaging. Images of the laser line deformed by surface topography allow three-dimensional reconstruction of pavement damage. Three different scenarios are scanned and reconstructed. The system scans a highway lane width of 2 m, with 1 mm/pixel, and the speed until 40 km/h.

¹Research Work

²Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Department of electrical, electronic, and telecommunication engineering. Advisor Jorge Hernando Ramón Suárez. Co-advisor Hernán Porras Díaz.

Introducción

El reconocimiento automático de daños en las vías ha sido un tema de estudio de gran importancia, principalmente por la reducción de pérdidas económicas antes de que los daños sean profundos. Para ayudar con los problemas técnicos de seleccionar los tiempos, métodos y lugares óptimos para la reparación de pavimentos y simultáneamente asignar responsabilidades en el mantenimiento y mejoramiento de las carreteras, con datos y justificaciones técnicas, se han implementado los sistemas de gestión de pavimentos (PMS, del inglés *Pavement Management System*) en la mayoría de las agencias públicas [1].

Una de las áreas clave dentro de los PMS es la inspección de la condición del pavimento y para esto se debe llevar a cabo una adquisición de datos de manera objetiva y precisa [2]. Desde principio de los años ochenta la información ha sido recolectada a través de inspección visual, sin embargo, esta técnica es subjetiva, inconsistente, tediosa y peligrosa. Debido a esto se han desarrollado una serie de métodos para la adquisición y análisis de datos sobre la condición de la superficie del pavimento.

El esquema general del análisis automático y semiautomático de daños superficiales en el pavimento divide los procesos en dos partes principales, en la primera se lleva a cabo la adquisición de los datos georeferenciados y en la segunda parte los datos son almacenados, ya sea para el procesamiento dentro del vehículo o fuera de línea.

Las tecnologías de adquisición de datos pueden dividirse en dos clases generales: imágenes de la superficie a través de fotografías, videos o digitalización, y la medición del perfil longitudinal y transversal del pavimento utilizando diversos sensores sin contacto. A pesar de los esfuerzos de los sistemas de

procesamiento automático de imágenes estos sufren de la presencia de sombras, por ello se han implementado sistemas complejos de iluminación, como el LRIS (del inglés Laser Road Imaging System) que usa cámaras lineales e iluminación láser [3].

En este trabajo se implementa un sistema automático móvil para la generación de modelos tridimensionales de daños en pavimento. El sistema está compuesto por una cámara de escaneo por área de 2048×1088 píxeles con interfaz de comunicación Gigabit Ethernet y velocidad de 340 frames/s, y un proyector de línea láser de 810 nm. Los dispositivos son acoplados a un vehículo por medio de una estructura para obtener la reconstrucción tridimensional de los daños del pavimento a partir del método de triangulación láser. El sistema realiza un escaneo por carril con una precisión de 1 mm/píxel, con una velocidad de hasta 40 km/h.

El documento se divide en seis capítulos. En primer lugar se presenta el estado del arte de los sistemas automáticos para adquisición de datos en superficies pavimentadas. En segundo lugar, el capítulo de selección de dispositivos en el que se presentan los requerimientos del sistema y se describe los dispositivos que lo conforman. El tercer capítulo detalla la integración tecnológica de los dispositivos y el acople al vehículo. Los capítulos cuatro y cinco presentan los resultados y las conclusiones, respectivamente.

Capítulo 1

Sistemas de adquisición de datos para inspección de daños en pavimentos

Los sistemas de captación en superficies pavimentadas cuentan con la última tecnología de cada época, que inician con imágenes analógicas, siguen con captación de imágenes digitales y, finalmente, se utilizan sensores sin contacto como apoyo a los procesos de inspección [1].

Este capítulo pretende determinar cuál es la tendencia en la implementación de sistemas automáticos para recolección de datos en pavimentos, teniendo en cuenta el balance entre información confiable y eficiencia. Para esto se presenta la metodología de desarrollo del estado del arte, una revisión de los PMS, seguida de la descripción de la etapa de adquisición de datos, en que se exponen algunas metodologías y se hace un estudio sobre los principales sistemas de adquisición automática encontrados en la literatura.

1.1. Metodología

Para la selección bibliográfica se realizó una división de temas. En cuanto a fuentes primarias los temas son: gestión de pavimentos, manuales de evaluación de pavimentos y sistemas automáticos de inspección. Para las fuentes

secundarias son: sistemas comerciales, revisiones de técnicas de reconstrucción tridimensional y revisiones de estado del arte en sistemas automáticos para recolección de datos. A partir de esta división se analizaron trabajos de investigación desarrollados en universidades y agencias de transporte, que son descritos en informes o artículos en revistas científicas de electrónica, óptica y procesamiento de imágenes. Además, se incluyen desarrollos comerciales, información encontrada en su mayoría en las páginas Web de las empresas.

1.2. Sistemas de Gestión de Pavimentos

El término Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS, por su sigla en inglés) empezó a usarse haciendo referencia a todo el rango de actividades que envuelve la construcción y el mantenimiento de los pavimentos. Para la *Organization of Economic and Cooperative Development* (OECD) [4], un PMS se define como el proceso de coordinar y controlar un conjunto de actividades de mantenimiento, con el mejor uso de recursos. En el informe *Guidelines for Pavement Management Systems de la American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [5], un PMS es un enfoque sistemático que provee las herramientas de análisis económico e ingenieril requeridas para la toma de decisiones costo-efectivas con respecto a las estrategias de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción.

La Figura 1.1 expone los cuatro pasos del proceso de mantenimiento de pavimentos: recolección de datos, modelos/análisis, criterios/optimización e implementación. El objetivo de la etapa de recolección de datos es mantener un registro de la condición actual de las vías de manera precisa y objetiva. Estos datos, recolectados a través de varios años, pueden analizarse para hacer modelos que permiten predecir la condición futura del pavimento, [6]. Cuando se evalúan estos modelos para decidir las acciones apropiadas, es necesario definir un conjunto de niveles de intervención, de acuerdo con los tipos de datos recolectados, [2]. Diversas soluciones son posibles, cuando se requiere un trabajo de mantenimiento, cada una con su propia curva de desempeño.

Por tanto, el siguiente paso es analizar los costos y los beneficios de las posibles estrategias, dentro de un periodo, estimadas las consecuencias de cierta implementación, [4].

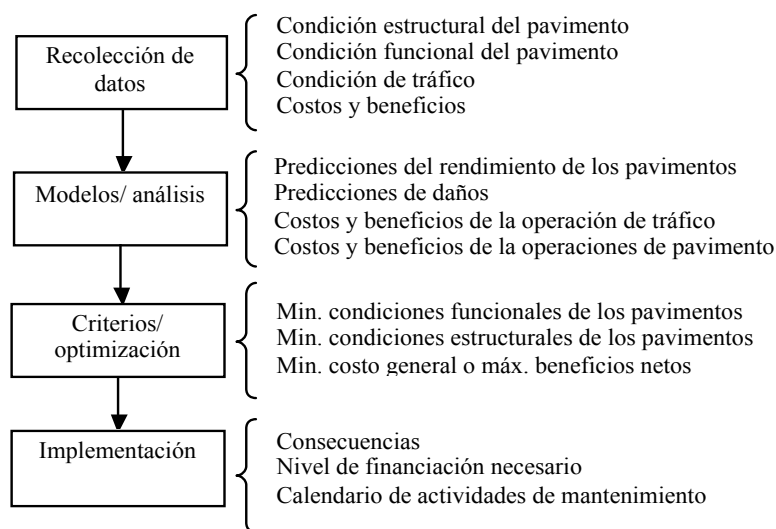


Figura 1.1: Etapas de un PMS, adaptado del informe de Zheng y Racca [2]

1.3. Recolección de datos

La etapa de recolección de datos es de gran importancia dentro del ciclo de gestión de pavimentos, debido a que: es una de las tareas más costosas, la calidad de los datos tiene un efecto crítico en la toma de decisiones y la gestión de la calidad es necesaria para asegurar que los datos cumplan los requisitos que imponen los PMS, [7].

Dentro de los datos concernientes a los PMS, están los datos de inventario, que son de carácter permanente y solo cambian cuando se realizan actividades localizadas. Ejemplos de estos: localización, tipo de carretera, tipo de pavimento, geometría del pavimento y secciones estructurales. También los datos de condición del pavimento, como rugosidad, agrietamiento, resistencia antideslizamiento y otros defectos. Además, los datos de tránsito, que permiten conocer la distribución vehicular, el peso de los ejes de los vehículos y las velocidades de tránsito, [8].

La recolección de datos de condición del pavimento proporciona la información más valiosa para el análisis de rendimiento del pavimento, lo que permite anticipar las necesidades de mantenimiento y rehabilitación, establecer prioridades y asignar fondos, [9]. Las primeras formas de recolectar datos se basan en inspecciones visuales, en las que una cuadrilla de ingenieros se encarga de recorrer las carreteras, observando, clasificando y llenando formatos específicos, de acuerdo con el método de evaluación que realice. Por otro lado, los recientes avances en la tecnología informática en adquisición y procesamiento de imágenes digitales han proporcionado métodos para recopilar e interpretar la información requerida. En las siguientes subsecciones se expone cada metodología.

1.3.1. Metodologías manuales

Hay dos métodos básicos para realizar una inspección manual de condición de pavimento, inspecciones a pie o a través del parabrisas, [9]. En las inspecciones a pie, un evaluador camina por el lado de la vía y llena un formulario donde se registra la cantidad, la extensión y la gravedad de cada daño. Las inspecciones a través del parabrisas son efectuadas dentro de un vehículo.

Mientras las inspecciones a pie son minuciosas e identifican de manera precisa los daños, tienen la dificultad del alto consumo de tiempo. Las inspecciones a través del parabrisas tienen la ventaja de inspeccionar un tramo mayor, sin el peligro que implica caminar por las vías. En los dos tipos de inspección manual se inspeccionan muestras del pavimento. Algunos de los tipos de selección de muestras son: una muestra con intervalo de distancia fijo, selección aleatoria predeterminada y que el evaluador seleccione una muestra representativa.

Para estandarizar la clasificación de los tipos de daños y su gravedad, se han elaborado manuales de inspección. En los principales manuales se clasifican y describen los tipos de daños y se especifican las unidades de medida. Sin embargo, no todos ofrecen la recomendación de un índice de condición del pavimento ni la metodología para seleccionar muestras [10, 11, 12, 13, 14]. La

mayoría sugiere formularios para registrar los datos de evaluación [15, 16] y, por ejemplo, el manual del *South Dakota Department of Transportation-USA* explica la utilización de un *software* que funciona como formulario digital [17].

En Colombia, el método de inspección más utilizado es seguir el manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del Instituto Nacional de Vías, Invías. Sin embargo, también se han usado el manual *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys* y el *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*, [18].

Un caso de estudio es el diagnóstico de pavimentos sobre la malla vial de Bogotá D.C., realizado entre los años 2002 y 2007. La información básica obtenida incluyó longitudes y anchos de calzadas, tipos de superficie del pavimento, fallas, información de IRI y asignación de tráfico, entre otros. En este caso, para la evaluación superficial, los contratistas debieron utilizar el cálculo del PCI, basado en los resultados de un estudio visual de la condición del pavimento, identificando el tipo, la extensión y la gravedad del daño, y a partir de este índice se representan la integridad estructural y la condición de operación superficial, [19].

1.3.2. Sistemas automáticos

A partir del desarrollo tecnológico de diferentes sensores, se han implementando sistemas que permiten la recolección automática de datos relacionados con el estado del pavimento. En una inspección automática, los datos son captados por algún tipo de sensor acoplado a un vehículo; posteriormente, pueden ser analizados por expertos en oficina: sistemas semiautomáticos o procesados directamente por el sistema: sistemas completamente automáticos [20].

El primer enfoque en la adquisición de datos es el uso de imágenes con tecnología analógica. Con el auge de la tecnología digital, se incluyeron en los vehículos de inspección cámaras digitales de dos tipos: cámara de escaneo por área y cámara de escaneo por línea. Finalmente, se incorporan sensores sin contacto que proporcionan datos tridimensionales [1, 21].

Captación de imágenes analógicas

El término analógico se refiere al proceso en el que las imágenes se graban en la superficie de una película por medio de cambios químicos, mecánicos o magnéticos. En cuanto a la captación de imágenes de pavimentos, los dos procesos analógicos más utilizados son la película fotográfica de 35 mm y la cinta de video, [1].

A pesar de que una señal analógica de video puede ser transmitida y copiada usando poco ancho de banda, es difícil de manipular sin que se introduzca ruido en la imagen original. Además, su integración con otro tipo de datos resulta compleja, a menos de que se cuente con un equipo de producción de video de gama alta. Por otro lado, la resolución de una señal de video analógico es baja comparada con algunas alternativas digitales, [21].

El emplear películas fotográficas de 35 mm en inspección de pavimentos fue el método adoptado por el programa LTPP de la *Federal Highway Administration* (FHWA); de aquí su popularidad. En este caso, en lugar de captar un fotograma a la vez, la película usada es expuesta continuamente a la superficie del pavimento en movimiento. La frecuencia de muestreo usada en la digitalización de estas imágenes es de 2048 píxeles en dirección transversal y cuantificación de 8 bits [22, 23]. Algunas agencias eligen el método de la cinta de video, por lo general del estándar S-VHS, [1].

Las películas fotográficas o las cintas de video no tienen una resolución equivalente a una imagen digital; para convertir la información analógica, se requiere un proceso denominado digitalización. En el caso de las películas fotográficas, se emplea un escáner. Según la experiencia del LTPP, la resolución adecuada para digitalizar sus imágenes analógicas es de 2048 píxeles, [21].

Captación de imágenes digitales

Con el avance de la tecnología digital se origina el desarrollo de áreas como procesamiento de imágenes y visión por computadora, debido a que la representación de una imagen requiere millones de palabras de datos, y sin la capacidad de almacenar o procesar esta información sería imposible hablar hoy en día de imágenes digitales, [23].

Una imagen digital es una foto electrónica tomada de una escena conformada por una determinada cantidad de elementos denominados píxeles. A cada píxel se le asigna un valor relacionado con el tono (negro, blanco, matices de gris o color), y se representa por un código binario (ceros y unos). Los dígitos binarios (bits) para cada píxel son almacenados en la computadora; después, ésta interpreta la información para mostrar la imagen que se ve en las pantallas, [24].

Generalmente, las cámaras digitales utilizan sensores tipo CCD (del inglés *Charge-coupled device*) y CMOS (del inglés *complementary metal-oxide-semiconductor*), que realizan una función de muestreo espacial a partir de la acumulación de carga proporcional a la intensidad de luz en cada píxel. En la Figura 1.2, se expone la diferencia entre las dos arquitecturas. Cuando se completa la exposición, el sensor CCD transporta cada paquete de carga del píxel secuencialmente a una estructura de salida común; allí se orienta y envía fuera del chip. En el sensor CMOS, la conversión de carga a voltaje se realiza en cada píxel. Estas diferencias en la lectura y en la salida de datos generan significantes cambios en la arquitectura, capacidades y limitaciones de cada tecnología, [25].

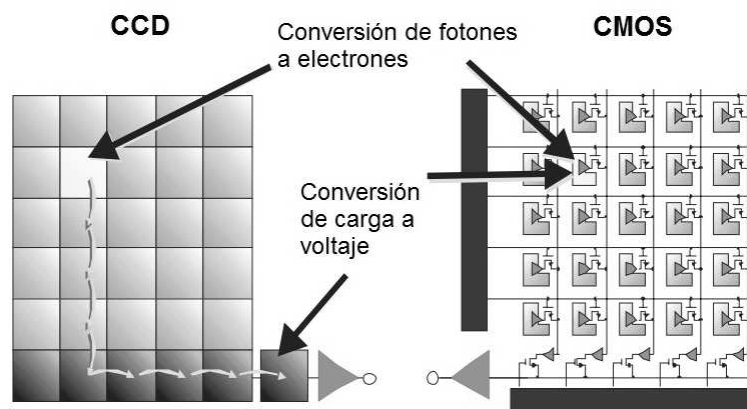


Figura 1.2: El sensor CCD mueve la carga generada de píxel en píxel y la convierte a voltaje en un nodo de salida. El sensor CMOS convierte la carga a voltaje dentro de cada píxel. Fuente: [25].

En general, los sensores CMOS ofrecen una integración superior, menor disipación de potencia y tamaño del sistema a costo de menor calidad en

la imagen. Este tipo de sensor se elige en condiciones de espacio reducido y cuando la imagen tiene bajos requerimientos en calidad. Por otro lado, los sensores CCD ofrecen mejor calidad en las imágenes, a expensas del tamaño del sistema. Son la tecnología preferida en aplicaciones como fotografía digital, industria e imágenes médicas y científicas, [26].

Dentro de los parámetros que se tienen en cuenta para aplicaciones de tecnología digital en pavimentos, se encuentran: tiempo de integración, rango dinámico, profundidad de bit y resolución.

- **Tiempo de integración:** Se refiere al tiempo en el que los píxeles están acumulando carga (luz).
- **Rango dinámico:** Describe la relación entre la máxima y la mínima intensidades de luz medidas en el sensor (blanco y negro, respectivamente).
- **Profundidad de bit:** Se determina por la cantidad de bits utilizados para definir cada píxel. Es proporcional a la cantidad de tonos que pueden ser representados.
- **Resolución:** Es la frecuencia espacial con que se muestrea la escena. Se determina por el número de píxeles leídos en una longitud dada de la escena.

Cuando se emplea una cámara de alta resolución en inspección de pavimentos, es necesario integrarla con lentes gran angulares para cubrir un ancho adecuado sin dejar de cumplir las restricciones de altura. La desventaja de estos lentes es que pueden resultar imágenes con bordes oscurecidos, problema que puede ser disminuido con el uso de software de corrección o iluminando los bordes la escena.

El parámetro de resolución está directamente relacionado con el ancho de las grietas que pueden ser detectadas. Así, por ejemplo, una cámara de 1300 píxeles en dirección transversal al pavimento podrá detectar grietas de hasta 3 mm de ancho, mientras que una de 4096 píxeles, de hasta 1 mm.

Actualmente existen dos tipos de cámaras empleadas para digitalizar las imágenes de pavimento. Estas son conocidas generalmente como cámara de

escaneo por área y cámara de escaneo por línea. En el Cuadro 1.1, se hace una descripción de cada enfoque. Debido a los problemas de iluminación, sincronización con la velocidad del vehículo y montaje de las cámaras de escaneo por área, para las aplicaciones de pavimentos se han seleccionado en su mayoría cámaras de escaneo por línea. Este tipo de cámaras sincroniza la rata de escaneo y la velocidad del vehículo por medio de una señal de activación externa, producen imágenes de longitud ilimitada a una rata de datos más elevada que las cámaras de escaneo por área, debido a que una sola línea como dato puede ser transferida antes de la siguiente exposición.

Captación de datos tridimensionales

La necesidad de modelar un objeto ha impulsado el desarrollo de técnicas para determinar su geometría por medio de reconstrucciones. Reconstruir tridimensionalmente un objeto es tomar información de su superficie, desde una o varias posiciones en el espacio, y originar un modelo digital en un sistema específico de coordenadas.

Hay diferentes métodos de captación de datos tridimensionales, se destacan aquellos que no requieren contacto con el objeto y explotan fenómenos ópticos. El principio básico de estos métodos es la capacidad actual de los sistemas de procesamiento de imágenes que permiten realizar reconstrucciones basados en cambios en proyecciones, como el caso de la luz estructurada; fotografías a diferentes ángulos, como en estereoscopía; o medidas de interferencia; en interferometría o moirè.

La mayoría de defectos en la superficie del pavimento tienen características tridimensionales únicas de varias escalas, tanto en la superficie como en profundidad, por ello se ha prestado especial atención al desarrollo de sistemas que permitan realizar reconstrucción de pavimentos. A pesar de que se han implementado algunos sistemas, no se han conseguido detectar ni clasificar todos los daños de manera totalmente automática, pues aún se requiere una cantidad sustancial de posprocesamiento y de intervención manual, [21].

Entre los primeros trabajos de investigación de reconstrucción tridimensional para superficies pavimentadas se encuentra el de Javidi et al. [31] quienes

	De escaneo por línea	De escaneo por área
Descripción general	El sensor está compuesto por una sola fila de pixeles. Las imágenes se construyen a partir de la secuencia de filas que capta al escanear la escena	El sensor tiene una gran matriz de pixeles, de manera que una imagen bidimensional puede ser generada en un solo ciclo de exposición
Características [27, 28, 29]	<ul style="list-style-type: none"> -No hay limitación de resolución vertical -Capta una nueva línea mientras se terminan de transmitir los datos de la anterior, lo que genera alta velocidad de adquisición -No tiene área de interés específica -Sincronización de velocidad de captación con velocidad de la escena 	<ul style="list-style-type: none"> -Resolución fija para toma de imágenes en un área definida -Capta una nueva imagen hasta que termina de transmitir la anterior -Posibilidad de configurar la captación de regiones de interés en la escena -Utilizada principalmente por su alta resolución en detalle y en conjunto
Aplicación en pavimentos [30]	<ul style="list-style-type: none"> -Facilita la sincronización entre la rata de escaneo y la velocidad del vehículo por medio de una señal de activación externa -Producen imágenes de longitud ilimitada a una rata de datos considerablemente más elevada que las cámaras de escaneo por área 	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere una larga extensión en el montaje para que su campo de visión no sea obstruido -Reduce la rata de captación de datos y limita la velocidad del vehículo. -Dificultad debido a la iluminación no uniforme del área de escaneo

Cuadro 1.1: Especificaciones comunes en los codificadores rotatorios relativos

proponen un sistema basado en la técnica de holografía digital por cambio de fase. Esta técnica consiste en captar la interferencia de dos campos ópticos coherentes que han sido proyectados en diferentes estados a la superficie de un objeto y con estas imágenes de interferencia realizar reconstrucciones [32]. La Figura 1.3(a) ilustra la configuración básica de la holografía digital por cambio de fase. Un haz láser se divide en dos caminos, uno de estos caminos ilumina el objeto, el otro es el haz de referencia colimado que se refleja en el espejo *PZT*. La luz difractada por el objeto se combina con el haz de referencia en el sensor CCD. En el sistema de Javidi et al. se guardan cuatro patrones de interferencia en los que la fase del haz de referencia se varía en cada toma. A pesar de que este sistema es capaz de obtener la profundidad de las grietas e integrar estos datos con imágenes bidimensionales, es sensible a las vibraciones y movimientos de un vehículo. Por otro lado, las reconstrucciones son afectadas por ruido de tipo *speckle*.

Otros trabajos han implementado sistemas con el método de estereoscopia. En este método dos cámaras captan la misma escena desde posiciones conocidas (por ejemplo, C_1 y C_2 en la Figura 1.3(b)), luego empleando matemática basada en triangulación y corrimiento de coordenadas se calcula la posición tridimensional de cualquier punto en la escena (por ejemplo, los puntos P y Q) a partir de la información de las proyecciones de los puntos en las imágenes (por ejemplo, los puntos P'_1 , Q'_1 , P'_2 y Q'_2) [33]. En el caso del sistema de Wang y Gong [34] se realiza un montaje de dos cámaras digitales de 2048 pixeles para cubrir aproximadamente 2 m en dirección transversal al pavimento, con las dos imágenes captadas se plantea una reconstrucción del modelo tridimensional de la superficie. Para la implementación de este trabajo se requiere que los dispositivos de computación tengan un ancho de banda de entrada de por lo menos 100 MB por segundo, por tanto en su momento no implementan el desarrollo tridimensional y proponen el modelo de reconstrucción. En el 2011 Salari y Bao [35] publicaron un trabajo de detección de daños en pavimentos a partir de datos tridimensionales obtenidos por estereoscopia, se enfoca en los algoritmos de detección sin abordar detalles de instrumentación. Se propone como trabajo futuro cuantificar la gravedad de los daños. Aunque el principio de operación de este método es sencillo

existen dificultades en el procesamiento automático para localizar los puntos correspondientes en las dos imágenes.

Yu et al. [36] le dieron otro enfoque a la reconstrucción tridimensional de pavimentos con un sistema que integra sensores comerciales para obtener datos de profundidad, intensidad, posicionamiento, entre otros. El sensor de profundidad que seleccionaron determina la distancia por el método de tiempo de vuelo. En la Figura 1.3(c) se ilustra el concepto, que consiste en emitir un haz láser y captar su reflexión cuando choca con un objeto, el tiempo que tarda la onda desde la transmisión y la recepción es proporcional a la distancia entre el escáner y el objeto. Un espejo rotatorio interno hace que se determine un barrido de distancias en 180° [37]. La desventaja en este prototipo es que no logra medir anchos y profundidades de grietas de pocos milímetros, lo que es requisito en ciertos manuales de inspección, por otro lado, no cuenta con un sensor para obtener perfiles equiespaciados.

Por su parte, Jahanshahi y Jazizadeh [38] emplearon un sensor comercial de bajo costo. El Kinect está compuesto por una cámara RGB, un emisor de infrarrojo y un sensor de infrarrojo. La Figura 1.3(d) ilustra el esquema de triangulación entre el emisor y el receptor de infrarrojo de este dispositivo. El emisor proyecta patrones de puntos en el objeto y un procesador reconstruye un mapa de profundidades de acuerdo a la deformación de los patrones captada por el receptor [39]. Algunas mejoras resultan en emplear lentes que deforman el patrón de acuerdo al desenfoque a diferentes distancias [40]. En el trabajo de Jahanshahi y Jazizadeh se desarrolla un algoritmo en el que se toma un plano de referencia y se resta con la reconstrucción del Kinect de manera que se detectan daños en el pavimento. Este sensor tiene la dificultad de ser sensible a la luz directa del sol, además los resultados encontraron que se debe mejorar el cálculo del ancho y la profundidad de las grietas.

Por último, gran parte de los sistemas implementan el método de luz estructurada. Este método consiste en analizar la deformación que produce la topografía de la superficie en una fuente de luz (usualmente un láser con un patrón específico) que se proyecta sobre ella. La Figura 1.4(a) es una representación tridimensional de la proyección de una haz lineal sobre un objeto y la imagen que captaría el sensor. La Figura 1.4(b) muestra la geometría de

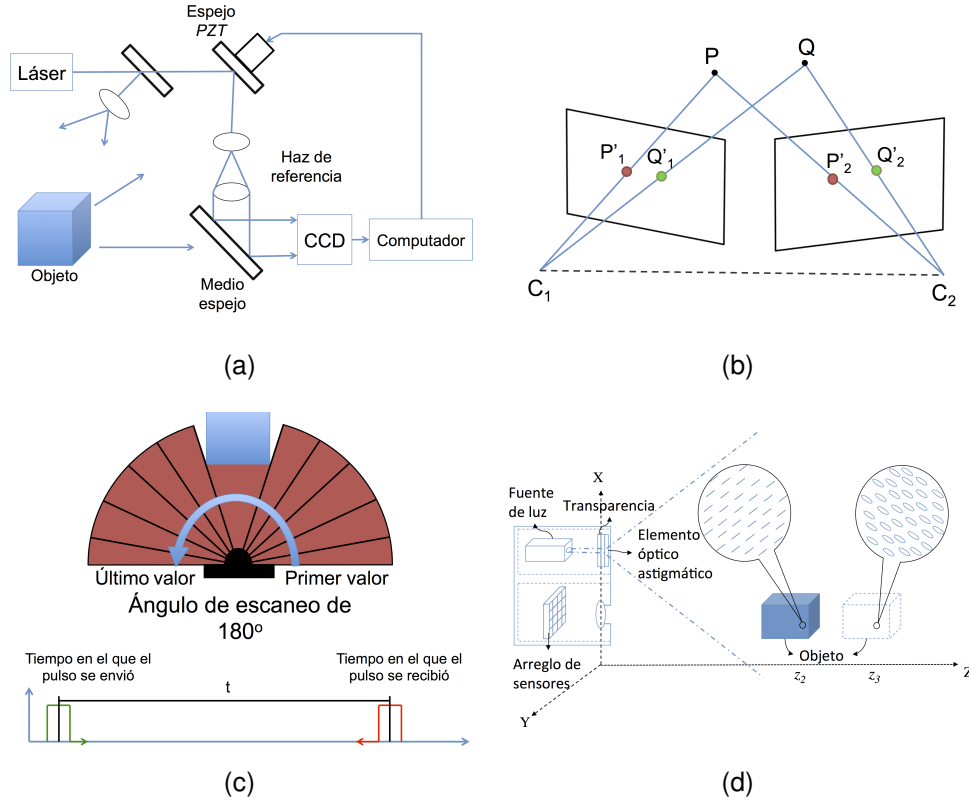


Figura 1.3: Configuraciones básicas de los métodos de (a) holografía digital por cambio de fase [32], (b) estereoscopia [33], (c) tiempo de vuelo y el del (d) sensor Kinect [40]

triangulación del método. Se observa que el cambio de altura del objeto produce un desplazamiento angular ($\Delta\theta$) del haz láser con respecto al ángulo de referencia (θ). Es posible, a partir de la imagen captada, determinar $\Delta\theta$ y calcular el cambio de altura (Δh). Sean d la distancia horizontal entre el láser y la cámara, θ el ángulo entre la recta $O - O_C$ y la recta $O_T - O_C$ y h la altura del sistema láser-cámara, variables conocidas. El punto P_a tiene su imagen en $Y_a(x_a, y_a)$. Según la Figura 1.4(b) $\Delta h = h - n$, en donde $n = d \tan(\theta - \Delta\theta)$ y $\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_a}{f}\right)$, donde f es la focal del lente. Por tanto, el cambio de altura Δh puede expresarse como:

$$\Delta h = h - d \tan\left(\theta - \tan^{-1}\left(\frac{y_a}{f}\right)\right), \quad (1.1)$$

Capítulo 2

Selección de dispositivos

En este capítulo se establecen los requerimientos básicos que se tuvieron en cuenta a la hora de diseñar el sistema y seleccionar los dispositivos. Se realiza una subsección por cada dispositivo describiendo los parámetros de selección.

2.1. Requerimientos del sistema

Dentro de los objetivos del grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas se encuentra el desarrollo de sistemas de adquisición de datos que complementen el análisis de daños en superficies pavimentadas; por tanto, se propuso diseñar e implementar un sistema que permita obtener datos de profundidad para la superficie del pavimento. Se establecen los requerimientos basados en la literatura y las experiencias que ha tenido el grupo en la inspección de pavimentos.

A continuación, se presentan los requerimientos del sistema:

1. Longitud transversal de escaneo de $x = 2$ m, que corresponde a la mitad de un carril vial
2. Resolución máxima del modelo en las tres dimensiones de $dx = 1, dy = 1, dz = 1$ mm. Debido a que un sistema de inspección de daños en pavimento debe ser capaz de detectar grietas finas menores o iguales a 2

mm de ancho en diversas texturas de fondo [48, 49, 46, 30]

3. Adquisición de datos a una velocidad de hasta 40 km/h
4. Altura de los dispositivos con respecto al pavimento menor o igual a 3 m
5. Consumo de potencia adecuado para recibir la alimentación del sistema eléctrico del vehículo
6. El montaje de la estructura debe permitir variar el ángulo y la altura de los dispositivos
7. Invariante a las condiciones climáticas o con iluminación artificial

2.2. Selección de dispositivos

La técnica de triangulación láser requiere un proyector de línea láser con su respectivo sensor. Por otro lado, para que el sistema sea móvil un instrumento debe realizar la sincronización de la obturación de la cámara con la velocidad del vehículo. Los instrumentos principales que integran el sistema son: una cámara de escaneo por área con su lente, un proyector de línea láser, un filtro óptico pasabanda y un codificador rotatorio relativo. En las siguientes subsecciones se muestra la selección de cada dispositivo.

2.2.1. Cámara

Para captar la deformación de la línea láser en la escena es necesario que el sensor cubra un área determinada, por esto la cámara debe ser de escaneo por área. Existen diferentes características a la hora de la selección. Sin embargo, se destacan la resolución, la velocidad de adquisición y la sincronización con la velocidad del vehículo, como las variables a tener en cuenta.

La resolución establece el nivel de detalle con el que se representará una escena en una imagen digital. En este caso la resolución está directamente relacionada con la exactitud en la reconstrucción del daño superficial. Usualmente se determina en dimensiones de pixel o número de pixeles existentes

a lo largo del ancho y el alto de la imagen, su selección depende de la precisión que se quiera captar [50, 51]. Por ejemplo, para una longitud de escaneo de 4 m, una cámara de 1024 píxeles en dirección transversal al pavimento podrá detectar daños de hasta 4 mm de ancho siguiendo la ecuación (2.1), mientras que una de 4096 píxeles, de hasta 1 mm, según la ecuación (2.2).

$$A = \frac{L}{R} = \frac{4000 \text{ mm}}{1024 \text{ píxeles}} = 3,9 \text{ mm/píxel}, \quad (2.1)$$

$$A = \frac{L}{R} = \frac{4000 \text{ mm}}{4096 \text{ píxeles}} = 0,98 \text{ mm/píxel}, \quad (2.2)$$

La precisión que se requiere es de 1 mm y la longitud de la calzada que se cubre es de 2 m, por tanto la resolución de la cámara, en dirección transversal al pavimento, debe ser de mínimo 2000 píxeles.

Por otro lado, teniendo en cuenta el método de triangulación, se debe cubrir un área en la que aparezca el patrón láser deformado. El ancho de las imágenes es proporcional a la deformación máxima que tendrá la línea láser, que está dada por el rango de profundidad que se quiera obtener. Se selecciona una longitud máxima de deformación de 1 m en dirección de la vía, resultando una región de interés de 2000×1000 píxeles, que se obtiene de una cámara con resolución de mínimo 2048×1024 píxeles.

Con el requisito de velocidad de escaneo de 40 km/h y la precisión de 1 mm se requiere tomar una imagen a una tasa de aproximadamente 11,11 kHz, según la ecuación (2.3). Esta velocidad es requerida para la cámara y el codificador rotatorio.

$$v = \left(40 \frac{\text{km}}{\text{h}}\right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) \left(\frac{1000000 \text{ mm}}{1 \text{ km}}\right) = 11111,11 \text{ mm/s} \quad (2.3)$$

En resumen, la cámara debe tener una resolución mínima de 2048×1024 píxeles y una velocidad de 11,11 kHz. Existen modelos comerciales que cuentan con dicha resolución, por ejemplo, la cámara Genie TS-C1920 [52] de Dalsa y la Manta G-223 [53], pero sus tasas de transmisión no superan los 70 fps. La siguiente posibilidad es la de aumentar la velocidad de transmisión con un dispositivo adicional denominado *frame grabber* que permite una velocidad de

hasta 386 fps, un ejemplo de este tipo es la cámara Bonito CL-400 B/C [54].

Sin embargo, a partir de la búsqueda de dispositivos para la aplicación de triangulación láser, se encuentra un tipo de cámaras comerciales con adaptaciones especiales para esta aplicación. Este tipo de cámaras cuenta con la capacidad adicional de detectar la línea láser a partir de una programación de *hardware*, específicamente con una FPGA (de sus sigla en inglés *Field Programmable Gate Array*). Las denominadas cámaras 3D aumentan la velocidad de transmisión, debido a que no envían un frame completo de datos, sino que procesan la toma y transmiten la ubicación de la línea a lo largo de una de las dimensiones, es decir, una sola fila de datos.

El Cuadro 2.1 muestra las especificaciones de las dos cámaras 3D más destacadas en el mercado. La velocidad en estas cámaras depende de la región que se esté analizando. El Cuadro 2.2 muestra dicha variación, manteniendo constante la cantidad de columnas en 2048 y variando el número de filas de la región de interés, para los dos tipos de cámaras mencionados.

De acuerdo a las especificaciones, se selecciona la cámara 3D C4-2040, porque además de cumplir con los requisitos básicos, tiene mayor velocidad de transmisión, diversos puertos para la integración con otros equipos y una resolución por pixel de hasta 10 bits. Esta cámara puede controlar la frecuencia de disparo de un láser y sus obturaciones se pueden sincronizar con entradas digitales de onda cuadrada, por ejemplo un tren de impulsos de máximo 24 V de amplitud. Con esta cámara la configuración 3D permite con una región de escaneo de 2038×32 pixeles, es decir, hasta 32 mm de alto, tener una velocidad de adquisición de hasta 10362 Hz. Para conseguir los 40 km/h del requisito se debe entonces limitar a una zona de hasta 20 mm de profundidad, aproximadamente. La Figura 2.1 muestra una foto de la cámara seleccionada.

El protocolo de comunicación que emplea esta cámara es el *Gigabit Ethernet*, que es una ampliación estándar de Ethernet 802.3 del IEEE, tiene una capacidad de transmisión de 1 Gigabit por segundo de rendimiento [57] siendo suficiente para el sistema, este protocolo se transmite mediante el estándar RS-422 que define niveles de voltaje y especificaciones eléctricas de transmisor/receptor [58].

Referencia de la Cámara	MV-D	C4-2040
Tipo de sensor	CMOS	CMOS
Interfaz de comunicación	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet
Resolución (píxeles)	2048 × 1088	2048 × 1088
Tamaño del píxel (μm)	5,5 × 5,5	5,5 × 5,5
Tamaño del sensor (mm)	11,26 × 5,984	11,26 × 5,984
Resolución ADC (bits)	8	10
Algoritmos 3D	Modo combinado 3D y exploración por líneas	Máximo (Max), umbral (Trsh), centro de gravedad (CoG)
Entrada de obturación	Entrada tipo RS422	Entrada digital, dos entradas optoacopladas, entrada tipo RS422 con terminación 100 Ohm
Rata de adquisición (fps)	340	340
Sincronización para la adquisición	Libre, señal externa, <i>software trigger</i>	Libre, señal externa, <i>software trigger</i>
Entrada digital de <i>trigger</i> (V)	NA	5 o 24
Modulación de la iluminación del láser (kHz)	NA	20
Consumo de potencia	< 6	< 10

Cuadro 2.1: Características de dos cámaras que cumplen los requisitos, [55, 56]

Número de filas	MV-D	C4-2040
8	–	30720
16	–	18778
23	10204	–
32	8184	10362
64	4803	5464
128	2630	2809
256	1380	1424
1009	358	–
1088	–	340

Cuadro 2.2: Velocidad de transmisión para diferentes regiones de interés en frames por segundo o Hz, [55, 56]



Figura 2.1: Cámara seleccionada, referencia C4-2040

2.2.2. Lente

La selección del lente se realiza teniendo en cuenta la distancia focal. Este parámetro es la distancia óptica desde el punto en el que los rayos de luz convergen para formar una imagen nítida de un objeto al sensor digital de la cámara. La distancia focal determina el ángulo de visión de la escena y la amplificación. Cuanto más larga sea la distancia focal, más estrecho es el ángulo de visión y mayor será el aumento. Cuanto más corta sea la distancia focal, mayor será el ángulo de visión y menor será el aumento [59].

A partir de las guías para la selección de lentes [60, 61], teniendo en cuenta el tamaño del sensor de la cámara y la distancia desde la cámara a la superficie se determina la distancia focal del lente, a partir se la expresión (2.4).

$$f = \frac{\omega}{W} D = \frac{11,264 \text{ mm}}{2000 \text{ mm}} 2300 \text{ mm} = 12,95 \text{ mm}, \quad (2.4)$$

donde ω es el ancho del sensor, W es el ancho del objeto, f es la longitud focal y D es la distancia lente-objeto.

La cámara C4-2040 tiene montaje tipo C, el lente con distancia focal más cercana a la requerida y con montaje C es de 12,5 mm. Al seleccionar un lente de 12,5 mm la distancia en donde debe ubicarse la cámara con respecto al objeto es de $D = 222\text{cm}$. La lente seleccionada que cumple de manera cercana la característica de la focal es el lente CF 12.5HA [62].

2.2.3. Proyector de línea láser

La adquisición de datos se realiza en un entorno con iluminación externa. Además, la línea proyectada debe cubrir 2 m de largo, con un ancho de máximo 1 mm para mantener la resolución en profundidad.

En el ambiente de trabajo del sistema la potencia de la luz láser debe superar las fuentes de luz externas. La luz del Sol es la principal fuente en este entorno, tiene una irradiancia de $1360 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$ con un máximo aproximado de $1,37 \text{ mW/mm}^2$ [63]. El haz láser debe abarcar 2 m en la dirección transversal al pavimento con un ancho de 1 mm, el área que cubre es de 2000 mm^2 , por lo tanto la potencia del láser debe ser superior a $(1,37)(2000) = 2740 \text{ mW} = 2,74 \text{ W}$.

En la configuración geométrica del sistema, el láser se ubica perpendicular al pavimento. Para seleccionar el ángulo de abanico (*fan angle*) del proyector de línea láser y la altura a la que se posiciona, se tiene en cuenta que la línea debe tener 2 m de largo, además de tener una distancia de trabajo inferior a 2 m. Para ello, considerando que las opciones usuales de (*fan angle*) en proyectores de alta potencia son de 20° a 70° con intervalos de 10° , los ángulos que mejor se ajustan a la aplicación son 50° , con una altura de 2,14 m; 60° , con 1,73 m de alto; y 70° con 1,42 m, [64, 65, 66, 67]. Se selecciona un (*fan angle*) de 60° , debido a que se acerca a los 2 m, pero no los sobrepasa. En la 2.2 se ilustra el esquema de proyección láser.

Dos láseres que cumplen la mayoría de los requerimientos son el Magnum II 4000 y el LRD-0808-PFR-02000-05, otras opciones son el Husky Laser [64] y el Lasiris PowerLine Laser [67]. Estos últimos presentan características idénticas al Magnum II. En el Cuadro 2.3 se hace una comparación del cumplimiento de los requerimientos de los dos láseres.

Los dos proyectores de línea láser tienen características similares, sin embargo, el láser de referencia LRD-0808-PFR-02000-05, de la empresa LASER-GLOW TECHNOLOGIES, genera una línea con un ancho de entre 4 y 5 mm, que no es conveniente en esta aplicación. El láser Magnum II 4000, de la empresa Mexitek S.A, permite enfocar la línea láser y variar el ancho de forma proporcional a la distancia de trabajo, permitiendo un ancho de 0,7 mm a una

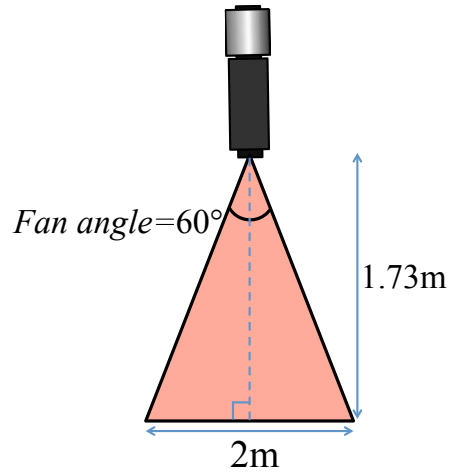


Figura 2.2: Representación de la proyección de línea láser, con *fan angle*= 60° y una altura de 1,73 m

Referencia del proyector láser	Magnum II 4000	LRD-0808-PFR-02000-05
Proveedor	MEXITEK, S.A.	LASERGLOW TECHNOLOGIES
Espesor de la línea láser	Variable con enfoque, permite un mínimo de 0,7 mm	4-5 mm
Longitud de onda	810 nm	808 nm
Potencia	> 2 W	> 2 W

Cuadro 2.3: Características de dos proyectores de línea láser que cumplen los requisitos, [65, 66]

distancia de aproximadamente 2 m. Además, la línea láser que genera tiene una distribución uniforme a diferencia de los otros dispositivos que usualmente generan líneas de tipo gaussiana. Se selecciona el Magnum II 4000 con potencia de salida del haz de 3200 mW y longitud de onda de 810 nm, la Figura 2.3 muestra la foto del láser seleccionado.

2.2.4. Filtro óptico

Como el láser emite a una longitud de onda de 810 nm, puede incluirse en la arquitectura óptica un filtro pasabanda, que permita captar únicamente este



Figura 2.3: Proyector láser seleccionado, referencia Magnum II 4000

rango de espectro.

La Figura 2.4(a) muestra la respuesta espectral de la cámara, la Figura 2.4(c) representa el funcionamiento de limitar la banda de paso a las longitudes de onda del láser, la Figura 2.4(b) representa la respuesta espectral del filtro pasa banda y la Figura 2.4(d) muestra la respuesta de la cámara limitada a la banda de paso del filtro óptico 2.4(d).

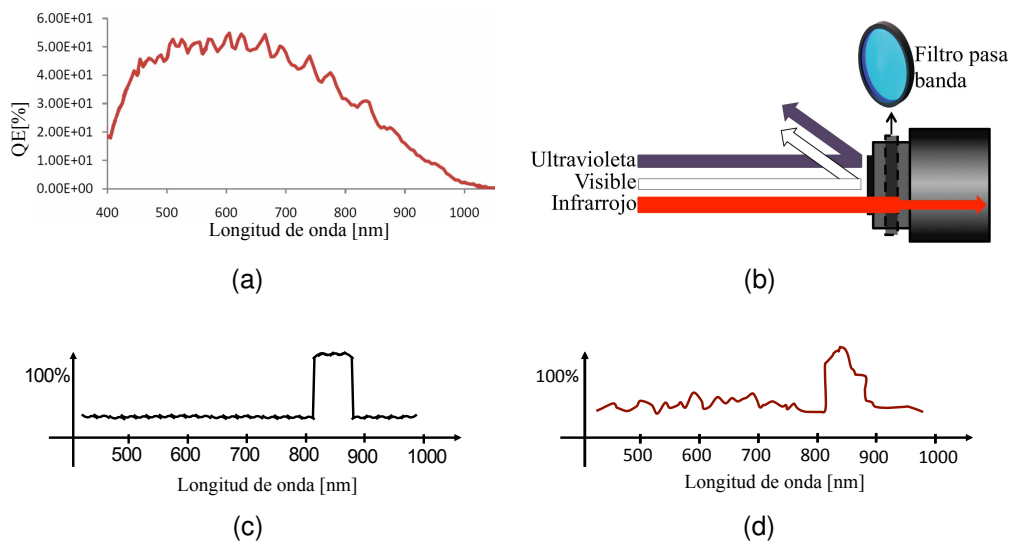


Figura 2.4: Representación del funcionamiento del filtro óptico pasa banda. La respuesta espectral de la cámara, (a), [55, 56], se ve limitada por la respuesta del filtro pasa banda, (b), (c), generando la respuesta de la cámara representada por (d)

La inclusión de un filtro óptico pasa banda dentro de la arquitectura óptica permite que en la imagen captada aparezca únicamente la línea láser deformada lo que facilita su detección en los pasos de procesamiento de imágenes

cuando se reconstruya la superficie.

2.2.5. Codificador rotatorio

Para sincronizar el movimiento de la escena y la obturación de la cámara se emplea un codificador rotatorio que se acopla a una de las ruedas del vehículo y se integra al sistema.

Los codificadores rotatorios son dispositivos electromecánicos que convierten la posición angular de un eje directamente a un código digital. Los tipos de codificadores rotatorios son absolutos o relativos; el primero genera mensajes digitales que representan la posición, la velocidad y la dirección del movimiento del dispositivo, mientras que el segundo tiene como salida una señal de pulsos equitativamente espaciados por revolución (PPR). Se selecciona un codificador rotatorio relativo porque no se requiere una codificación especial para la posición y la velocidad del vehículo, sino tener una señal de pulsos que active la obturación de la cámara.

Con el diámetro de la llanta se puede calcular la cantidad de pulsos por revolución del codificador rotatorio. El vehículo tiene una llanta con un diámetro de 75 cm, es decir, recorre 235,62 cm en una vuelta. Para tener una resolución de 1 mm, el codificador debe generar 2356 PPR. Por otro lado, si en cada revolución el vehículo recorre aproximadamente 2 m, recorrerá 40 km en 20000 revoluciones, por tanto, el codificador deberá soportar más de 333,3 rpm para cumplir con la velocidad de 40 km/h.

En el Cuadro 2.4 se listan las especificaciones que ofrecen los codificadores rotatorios en el mercado.

Finalmente, se selecciona un codificador rotatorio de 2500 PPR, con una salida de fase tipo 3 (estándar), alimentación de entre 12 y 24 V y salida tipo *Totem pole*, caracterizada por baja disipación de potencia. Sus dimensiones son 5 cm de diámetro, con un eje de 8 mm de diámetro que facilita el acople con la llanta. Tiene un máximo de 500 rpm. En la Figura 2.5(a) se muestra el codificador seleccionado y en la Figura 2.5(b) la forma de onda de sus salidas.

Pulsos por revolución	Salida de fase	Tipo de salida	Alimentación (VDC)
> 2356	2: A, B 3: A, B, Z 4: A, A', B, B' 6: A, A', B, B', Z, Z'	1: <i>Totem pole</i> 2: <i>NPN open collector</i> 3: Salida de voltaje L: <i>Line driver output</i>	5: 5 24: 12-24

Cuadro 2.4: Especificaciones comunes en los codificadores rotatorios relativos

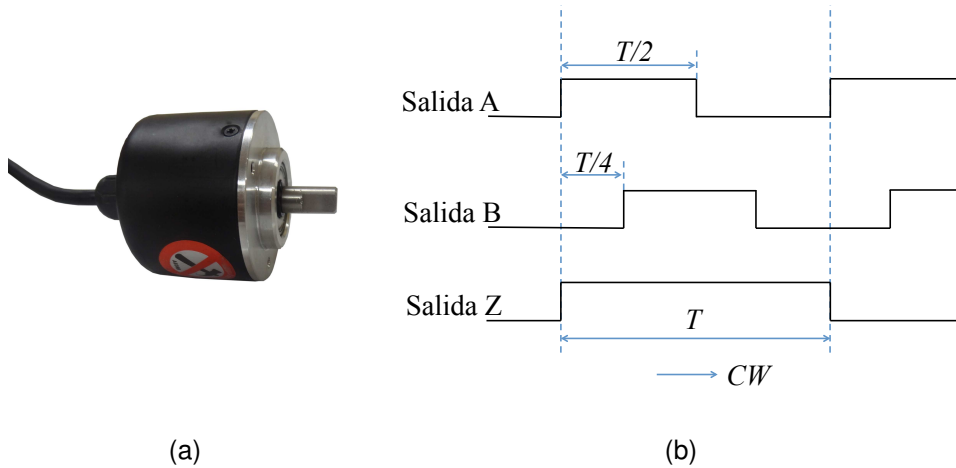


Figura 2.5: (a) Codificador rotatorio seleccionado, referencia E50S82500-3-T-24, con la forma de onda de las señales de salida (b)

Capítulo 3

Integración tecnológica

El siguiente paso, después de la selección de los dispositivos, es su conexión. Esta etapa se denomina integración tecnológica y está relacionada con la alimentación de potencia de los equipos y su conexión de señales.

3.1. Conexiones

El Cuadro 3.1 muestra la demanda de potencia del sistema, que llega a un consumo aproximado de 80 W (6,66 A a 12 VDC). Este consumo se presenta cuando el vehículo está encendido, por tanto, debido a las características de generación de energía es factible el uso directo del sistema eléctrico que tiene el vehículo.

El sistema eléctrico en un vehículo puede dividirse en tres etapas: antes, durante y después del encendido. Cuando el vehículo está apagado y se requiere consumo de energía, la batería es la fuente de potencia. En el momento

Dispositivo	Potencia [Watts]
Cámara	10
Láser	60
Codificador rotatorio	0,72
Cámara lineal (extra)	8,5
Consumo total	79,22

Cuadro 3.1: Consumo de potencia del sistema

del encendido, la batería activa el motor de arranque, éste, a su vez, facilita el encendido de los motores de combustión interna, porque ayuda a vencer la resistencia inercial de las componentes cinemáticas del motor al arrancar, cuando el motor de combustión supera las revoluciones del motor de arranque se desacoplan.

Luego del encendido la batería ha entregado una gran cantidad de potencia en un período corto y necesita ser cargada, esta recarga es posible gracias al alternador que posee el vehículo [68]. Los alternadores son un conductor sometido a un campo magnético variable, que crea una tensión eléctrica inducida, la polaridad depende del sentido del campo y del valor del flujo que lo atraviesa. Esta fuente de energía además de recargar la batería sirve para proporcionar corriente eléctrica a los distintos consumidores del vehículo, cuando el vehículo está encendido [69]. La corriente eléctrica que genera un alternador en un vehículo pequeño varía entre 40 y 60 A. En este caso es suficiente para alimentar las diferentes conexiones de la camioneta y el sistema.

La alimentación de la cámara y del proyector de línea láser se realiza mediante un inversor de potencia que se conecta directamente a las bornas de la batería del vehículo. Mientras que el codificador se alimenta de la cigarrera del vehículo. La salida del codificador se lleva a la entrada de señales que tiene la cámara como señal de activación. Los datos captados por la cámara llegan al computador a partir de comunicación Ethernet. La cámara tiene una conexión con el láser que activa o modula la potencia del láser, en este caso se deja fija a 5 VDC para generar máxima potencia. Finalmente, el láser tiene dos interrupciones, la que genera la cámara y un cable adicional para desconexión manual. La Figura 3.1 muestra el esquema final de conexiones del sistema.

3.2. Acople al vehículo

De acuerdo con el vehículo de inspección utilizado los sistemas de adquisición de datos en pavimentos cuentan con diferentes configuraciones de estructuras para su montaje. El vehículo disponible para la instalación de los dis-

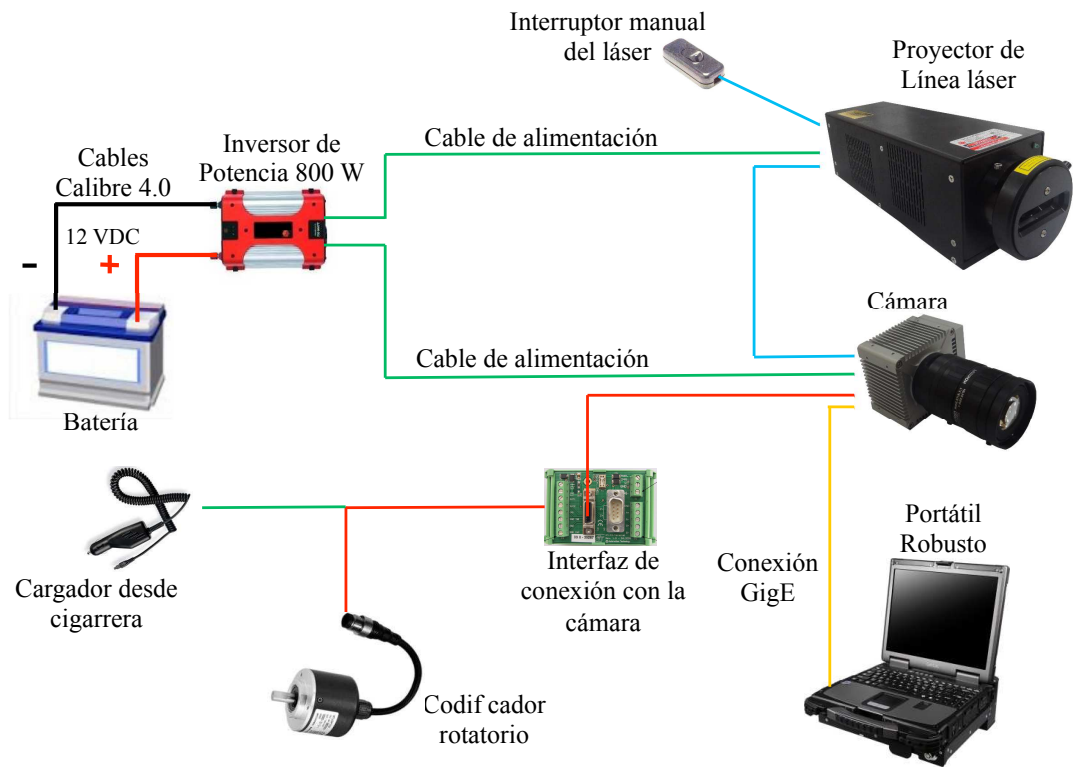


Figura 3.1: Esquema de conexión de los dispositivos. Un inversor de potencia, conectado a la batería del vehículo, alimenta la cámara y el proyector de línea láser. El codificador se alimenta de la cigarrera del vehículo. La salida del codificador se lleva a la entrada de señales que tiene la cámara como señal de activación. Los datos captados por la cámara llegan al computador. La cámara tiene una conexión con el láser que modula la potencia del láser. El láser tiene dos interrupciones, la que genera la cámara y un cable adicional para desconexión manual.

positivos en este proyecto es una camioneta Toyota Hilux 4x4. A continuación, se presentan los requerimientos básicos de la estructura de este proyecto:

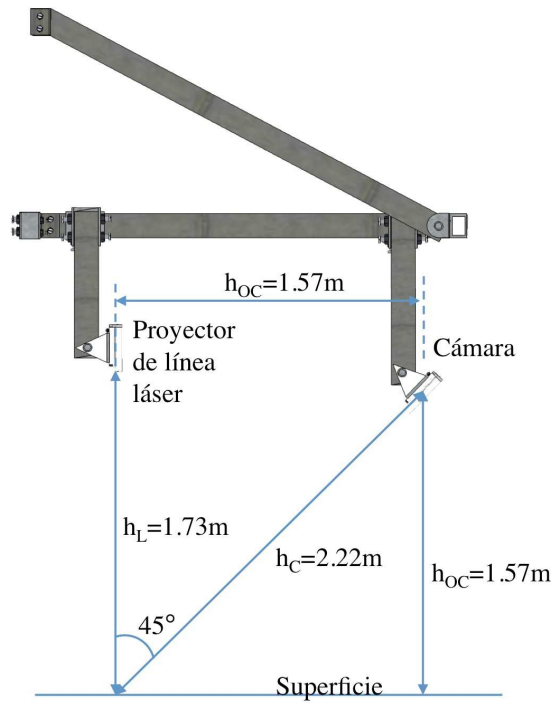
1. Permitir modificar el ángulo de inclinación de la cámara y del proyector de línea láser
2. Permitir modificar la altura de la cámara (h_{OC}) entre 1,4 y 1,7 m
3. Permitir modificar la altura del proyector de línea láser (h_L) entre 1,6 y 1,8 m

-
4. Permitir modificar la distancia entre la cámara y el proyector de línea láser a una distancia máxima de 1,7 m
 5. Proteger la cámara y el proyector de línea láser de la lluvia y los impactos.
 6. Acoplar un sistema de amortiguación para la estructura
 7. Instalar las medidas de precaución y señalización básicas de tránsito
 8. Facilitar el montaje y el desmontaje en la camioneta

Los requisitos de modificar los ángulos, las alturas y las distancia entre los dispositivos se basan en tres razones: la primera es la flexibilidad en la posición y nivelación de los elementos antes de iniciar el escaneo, es posible que en esta etapa se requiera modificar cada uno de los grados de libertad para fijar el nivel correcto; la segunda es dejar la posibilidad de implementar otra geometría de triangulación variando los ángulos; y por último; esta estructura podría usarse para sostener otros elementos, por ejemplo, otra cámara con diferente campo de visión que necesitaría ubicarse a otra altura. Teniendo en cuenta los requerimientos de la estructura y la estabilidad del sistema, se realiza el diseño del brazo que sostiene los equipos, Figura 3.2(a), 3.2(b) y del acople completo a la camioneta, Figura 3.2.

La estructura está elaborada de hierro, recubierta con pintura electrostática. La parte trasera cuenta con un marco que alcanza una altura de 3 m, con el fin de sostener una tercera cámara que requiere esta altura. El marco se sostiene a una defensa provisional por medio de dos amortiguadores de gas. Esta defensa es una réplica de la original y tiene topes en goma. Por la parte superior, el marco se sostiene a la barra antivuelco de la camioneta por medio de dos perfiles fijos en las esquinas superiores del marco y con dos acoples basculantes en el antivuelco, lo que permite imprimirle rigidez a la estructura hacia los lados, pero no les resta acción a los amortiguadores.

Por otro lado, para sujetar los dispositivos, se utiliza una estructura en forma de H, que está unida al brazo. La cámara está alojada en un *housing* y el proyector láser en una caja de protección. Además, para la señalización, se



(a)



(b)

Figura 3.2: (a) Esquema del diseño del brazo con medidas. (b) Diseño del sistema de acople en la camioneta

instalaron cintas reflexivas. Finalmente, se instaló la estructura en la camioneta, como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Acople final en la camioneta

3.3. Presupuesto estimado del prototipo

El presupuesto estimado de la instrumentación del vehículo es de \$62'700000. El Cuadro 3.2 muestra el costo por elemento. El computador que se incluye es de tipo robusto, sin embargo un computador portátil básico también supliría la función de recepción de datos. En comparación, un sensor comercial como el LCMS de Pavemetrics [3], tiene un costo de entre \$470'000000 y \$570'000000, esto es hasta 9 veces más que el prototipo. Este sensor tiene una resolución de 1 mm en las tres dimensiones, alcanza hasta 11200 perfiles por segundo y

Descripción	Costo [Pesos colombianos]
Cámara 3D C4-2040	22'500000
Proyector láser Lasiris Magnum 4000	17'200000
Codificador rotatorio	500000
Computador portátil robusto	20'000000
Estructura de acople al vehículo	2'500000
Inversor, cargador desde la cigarrera y otros complementos	500000
TOTAL	62'700000

Cuadro 3.2: Presupuesto estimado del prototipo

escanea 2 m en forma transversal, por tanto tiene especificaciones parecidas. Sin embargo, se destaca que el sensor comercial incluye *software* de análisis para medir de forma automática algunas características del pavimento.

Capítulo 4

Reconstrucción tridimensional

En este capítulo se describen los dos enfoques para obtener imágenes con datos de profundidad. El primero es tomar una serie de fotografías equiespaciadas de la deformación que produce el objeto en la línea láser, luego a partir de estas fotografías extraer la información topográfica. El segundo es emplear el modo 3D con el que cuenta la cámara, a través de un escaneo se obtiene la imagen de profundidades.

4.1. Algoritmo planteado

La fase de reconstrucción puede dividirse en dos etapas: calibración y escaneo.

4.1.1. Calibración

La función del proceso de calibración es asignar posiciones tridimensionales (x, y, z) a cada pixel en la imagen. En este caso la matriz de calibración se crea a partir del patrón triangular que se muestra en la Figura 4.1, tiene 2 m de largo, por 10 cm de ancho, cada triangulo tiene una altura de 5 cm y una base de 25 cm. La foto se toma desde la cámara a 45° de la perpendicular con el pavimento, además se observa la atenuación que produce el filtro pasabanda, con intensidades máximas de 70 en nivel de gris, en una escala de 1024 nive-

les. Por tanto, el filtro pasabanda cumple con la atenuación requerida para la aplicación (atenuación > 94 % del valor máximo de intensidad).

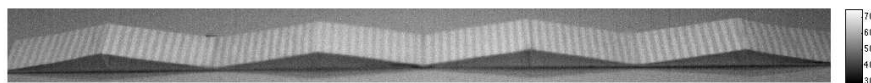


Figura 4.1: Patrón triangular de calibración

Al tomar imágenes de la proyección del láser sobre el patrón se describe la desviación que produce cierta altura a la línea por medio de una ecuación que relaciona los pixeles de la imagen con las alturas. En la Figura 4.2 se ilustra el ejemplo para el patrón triangular. Después de obtener esta relación se genera la matriz de calibración que se muestra en la Figura 4.3. La matriz de calibración es la que permite obtener cada perfil de alturas al multiplicarla punto a punto por imagen con la línea láser extraída en cada toma.

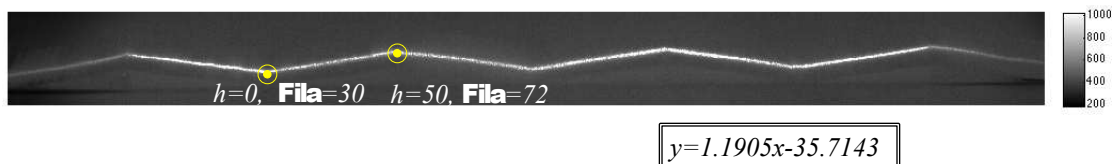


Figura 4.2: Desviación de la línea láser por el patrón de calibración, puntos seleccionados para la regresión lineal

4.1.2. Escaneo

Para la reconstrucción tridimensional de un objeto se deben tomar fotos equiespaciadas a medida que el sistema se desplaza encima de él. Cada una de las fotos presenta la línea láser deformada de acuerdo a la topografía del objeto. Uno de los objetivos de la reconstrucción es encontrar el pixel central que defina la línea a lo largo de la dirección transversal y relacionarlo con un elemento de la matriz de calibración. El siguiente algoritmo ilustra el proceso de reconstrucción:

1. **Lectura de imágenes en la región de interés:** La línea láser ocupa un área específica dentro de cada imagen, que está directamente relaciona-

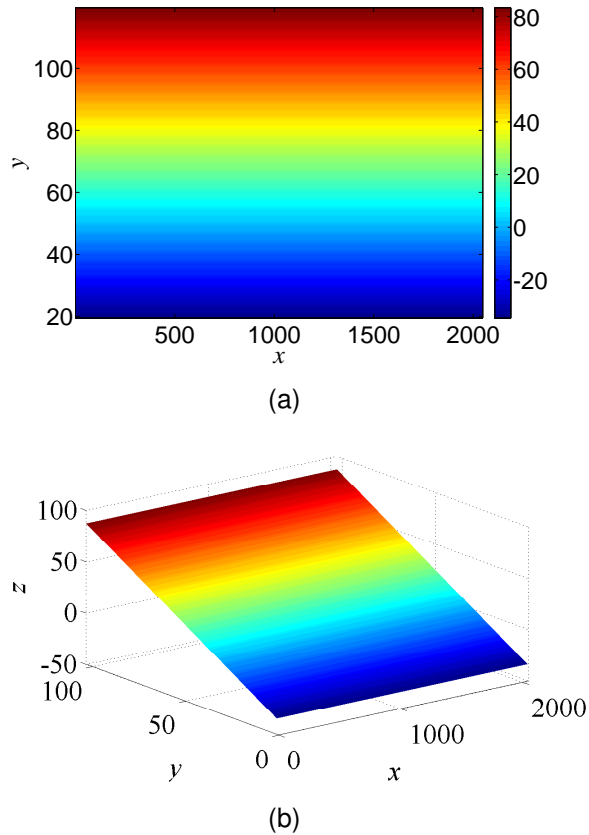


Figura 4.3: Matriz de calibración (a) imagen escalada y (b) tridimensional

da con la altura del objeto que se va a escanear. Por tanto, el primer paso en la reconstrucción es leer las imágenes y limitar la región de interés.

2. **Filtrado para remover ruido de tipo *speckle*:** la interferencia que puede producirse entre frentes de onda coherentes, por ejemplo cuando se ilumina una superficie rugosa con un haz láser, se conoce como *speckle* y puede relacionarse con un tipo de ruido sal y pimienta en imágenes. Este ruido genera puntos aislados con alta intensidad. Los filtros pasabaja tradicionales suavizan la escena, sin embargo, afectan los bordes y no llegan a eliminar este ruido. En el caso del filtro de mediana, éste produce un efecto de suavizado sin afectar los bordes y elimina los pixeles aislados de niveles extremos de gris. Usualmente los filtros en imágenes tienen tamaños de 3×3 , 5×5 , etc. en esta aplicación se usa un filtro de

mediana de 5×5 para obtener un mayor efecto de suavizado.

3. **Localización de la línea láser:** este es el paso más importante en la reconstrucción y consiste en encontrar el pixel del punto central de la línea láser a lo largo de cada columna. En el algoritmo que se plantea se realiza una umbralización de las imágenes, luego se determina el punto medio de la línea a partir de la multiplicación de una matriz de constantes que está enumerando las filas, de manera que detectando el máximo y el mínimo, por columna, se puede encontrar el valor central para cada columna con la siguiente ecuación:

$$PC = Round \left(P_{min} + \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \right), \quad (4.1)$$

donde PC es la posición central de cada columna, P_{min} es la primera frontera de la línea, P_{max} la segunda frontera de la línea y $Round$ redondea la operación al entero más cercano. Al final de este paso se obtiene una imagen binaria, que solo tiene unos en las posiciones centrales de la línea. El algoritmo de extracción de la línea láser planteado se encuentra en el Anexo 1.

4. **Multiplicación de la línea extraída con la matriz de calibración:** La línea que se extrae de cada imagen se multiplica punto a punto por la matriz de calibración, de esta manera se obtiene el perfil de alturas para cada imagen encontrando por columna el valor máximo. En este punto se extrae un vector con el valor de altura en un perfil de 2 m.
5. **Concatenación de perfiles:** Después de obtener perfiles transversales, se concatenan para conformar una imagen de alturas.

4.2. Algoritmos de la cámara

La cámara, además de tener las funcionalidades habituales de una cámara digital de escaneo por área, tiene integrada una FPGA que permite la detección de la línea láser. Cuando la cámara se configura en el modo 3D, se deben

indicar los siguientes parámetros: región de interés, cantidad de perfiles, forma de obturación y tipo de algoritmo.

La región de interés hace referencia a la sección de la escena en la que la cámara buscará la línea láser. Puede seleccionarse de forma gráfica (selección rectangular) o a partir de una entrada por teclado. La cantidad de perfiles está relacionada con las filas que tendrá la reconstrucción final, cada perfil es un vector de alturas que se encuentra a partir de la desviación de la línea láser en cada toma. La forma de obturación puede ser de tipo libre, es decir, la cámara toma la cantidad de perfiles a una velocidad dada, o configurarse para que capte cada imagen a partir de una señal externa. Por último, se selecciona alguno de los siguientes algoritmos para la detección de la línea:

1. **Máxima intensidad:** En este algoritmo la posición central está dada por el pixel que tenga la máxima intensidad a lo largo del eje P en la figura 4.4(a).
2. **Umbralización:** En este algoritmo se umbraliza la imagen y se obtiene el punto central de esa umbralización.
3. **Centro de gravedad:** Es la suma de los productos de la intensidad y la posición a lo largo de P dividida sobre la suma de las intensidades, dada por la ecuación

$$PC_{cog} = \frac{\sum I_p P}{\sum I_p}, \quad (4.2)$$

donde I_p es el valor de intensidad en la fila P , en una columna específica.

No hay mayor detalle en los algoritmos que presenta la cámara porque esta información es reservada por los proveedores.

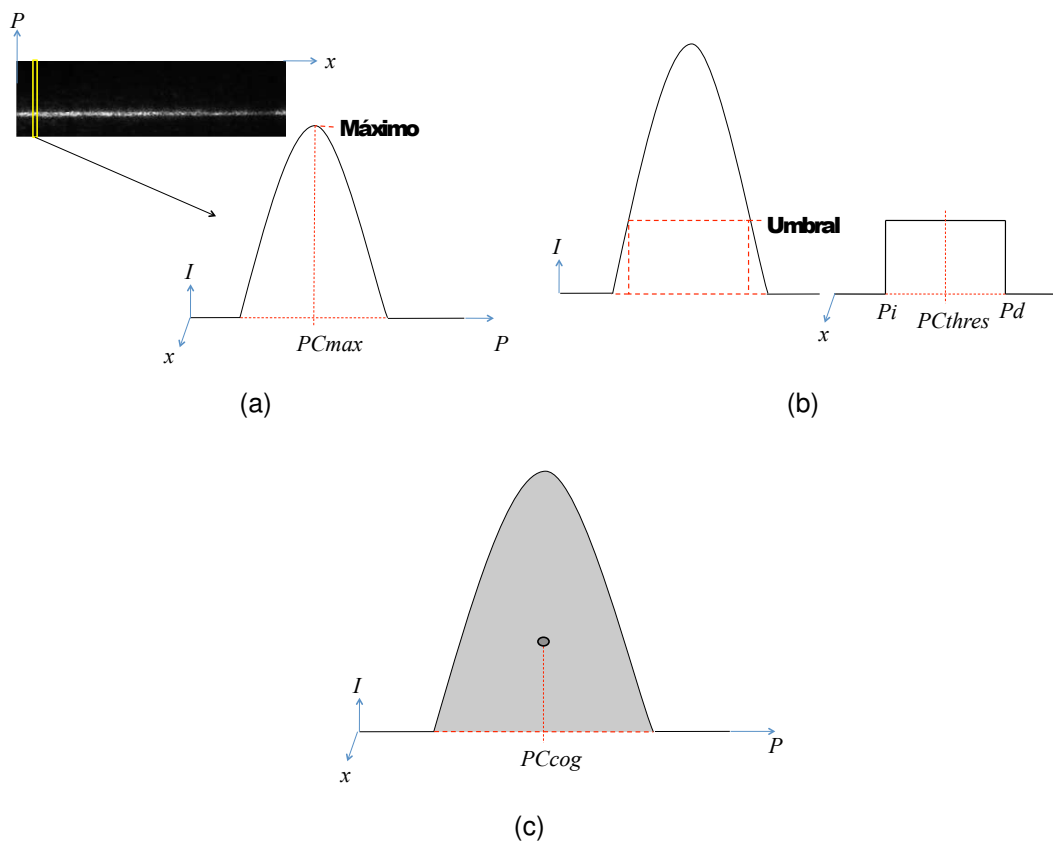


Figura 4.4: Detección de línea láser en la cámara a partir de encontrar la intensidad máxima (a), el centro de la línea umbralizada (b) y el centro de gravedad (c)

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de las reconstrucciones realizadas en campo a partir de los datos obtenidos con el sistema de triangulación láser acoplado a la camioneta. Se seleccionan los mejores resultados de acuerdo al tiempo de integración y región de interés de la cámara.

Uno de los factores clave para el éxito de la reconstrucción tridimensional es la selección del tiempo de integración. Sin embargo, debido a que no se cuenta con una escena en condiciones de iluminación estable se obtiene el tiempo de integración a partir de un cálculo empírico, que consiste en establecer un límite inferior y uno superior, en este caso $50 \mu\text{s}$ y $250 \mu\text{s}$, se hacen las medidas en estos límites, si ninguno de los dos muestra resultados favorables se toma el punto medio, es decir, $150 \mu\text{s}$. Dependiendo de esos tres resultados se establece un nuevo punto medio, determinando cuál de los dos intervalos $[50 \mu\text{s}, 150 \mu\text{s}]$ o $[150 \mu\text{s}, 250 \mu\text{s}]$ tiene mejores resultados. Por ejemplo, si fue el menor intervalo el siguiente valor de tiempo de integración sería el de $100 \mu\text{s}$. Y así sucesivamente hasta encontrar resultados satisfactorios.

Con respecto a la región de interés, ésta puede fijarse por medio del *software* con una herramienta de selección rectangular. En cada caso se ubica el vehículo en la zona de mayor profundidad (mayor desviación de la línea láser) y se selecciona la región de interés.

5.1. Reconstrucciones tridimensionales

El primer objeto que se escanea es el patrón triangular que se describió en el capítulo cuatro. En campo se ubica el patrón triangular en el pavimento se intenta que la camioneta elabore el mismo recorrido al escanear el patrón con los cambios en las variables. Para ello se hacen marcas en las llantas al inicio y al fin del recorrido.

La desviación de la línea láser en el punto medio del patrón es de aproximadamente 103 pixeles, por tanto se selecciona una región de interés de 2000×103 . Se realiza un recorrido para toma de fotos cada 1 mm en tiempos de integración diferentes, $50 \mu\text{s}$, $150 \mu\text{s}$ y $250 \mu\text{s}$. La mejor reconstrucción se obtiene a un tiempo de integración de $250 \mu\text{s}$ en el caso en el que se emplean las imágenes bidimensionales de la línea desviada. Las Figuras 5.1(a), 5.1(b) y 5.1(c) muestran datos de las reconstrucciones realizadas con el algoritmo planteado en el cuarto capítulo. La Figura 5.1(a) es una imagen escalada del resultado de la reconstrucción cada color indica la profundidad, la Figura 5.1(b) ilustra la reconstrucción en una gráfica en tres dimensiones y la Figura 5.1(c) es un perfil en la dirección x de la escena.

En cuanto a las reconstrucciones realizadas con los algoritmos propios de la cámara, también se variaron los tiempo de integración y los mejores resultados se presentan a $250 \mu\text{s}$ para la detección del máximo de la línea láser, Figuras 5.1(d), 5.1(e) y 5.1(f); $150 \mu\text{s}$ para el algoritmo que umbraliza la línea láser, Figuras 5.2(a), 5.2(b) y 5.2(c); y $20 \mu\text{s}$ para el algoritmo que detecta el centro de gravedad de la línea láser, Figuras 5.2(d), 5.2(e) y 5.2(f). Es evidente que la selección del tiempo del tiempo de integración para el algoritmo de centro de gravedad no fue la más adecuada, debido a que los resultados obtenidos no son acordes con la escena.

Para analizar el error en la reconstrucción se selecciona dentro de la imagen la región que se muestra en la Figura 5.3. Esta región cubre los valores máximos y mínimos de uno de los triángulos. Esta imagen se reconstruye a partir de fotos tomadas en forma equiespaciada en la escena, por tanto, si cumple con la precisión establecida la región debería tener información de 100 perfiles del triángulo, debido a que tiene 10 cm de ancho. Además, cada uno de

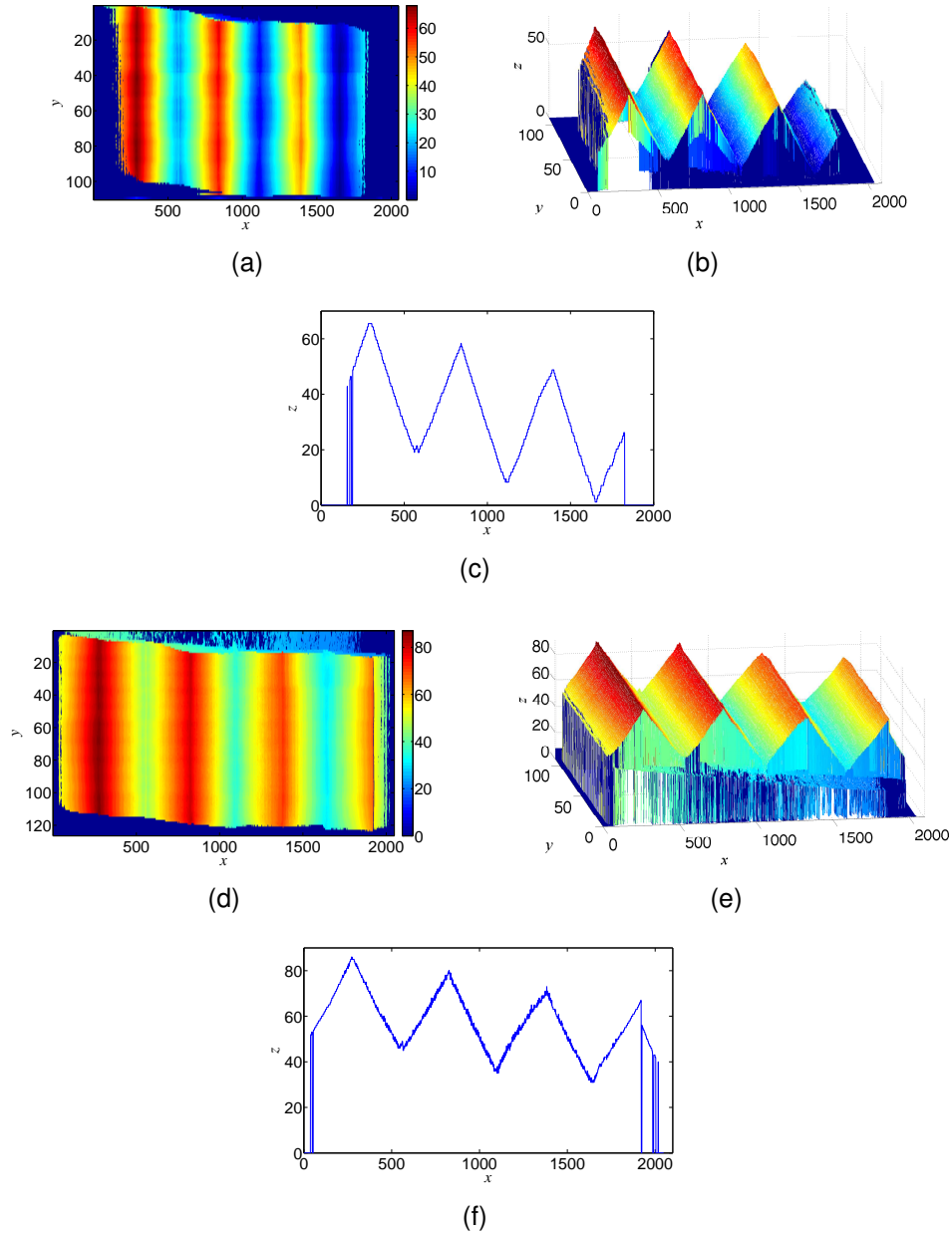


Figura 5.1: Resultados de reconstrucciones. (a) Imagen escalada, (b) superficie y (c) uno de los perfiles en dirección x de la imagen reconstruida con el algoritmo planteado. (d) Imagen escalada, (e) superficie y (f) uno de los perfiles en dirección x de la reconstrucción con detección del máximo de la línea láser

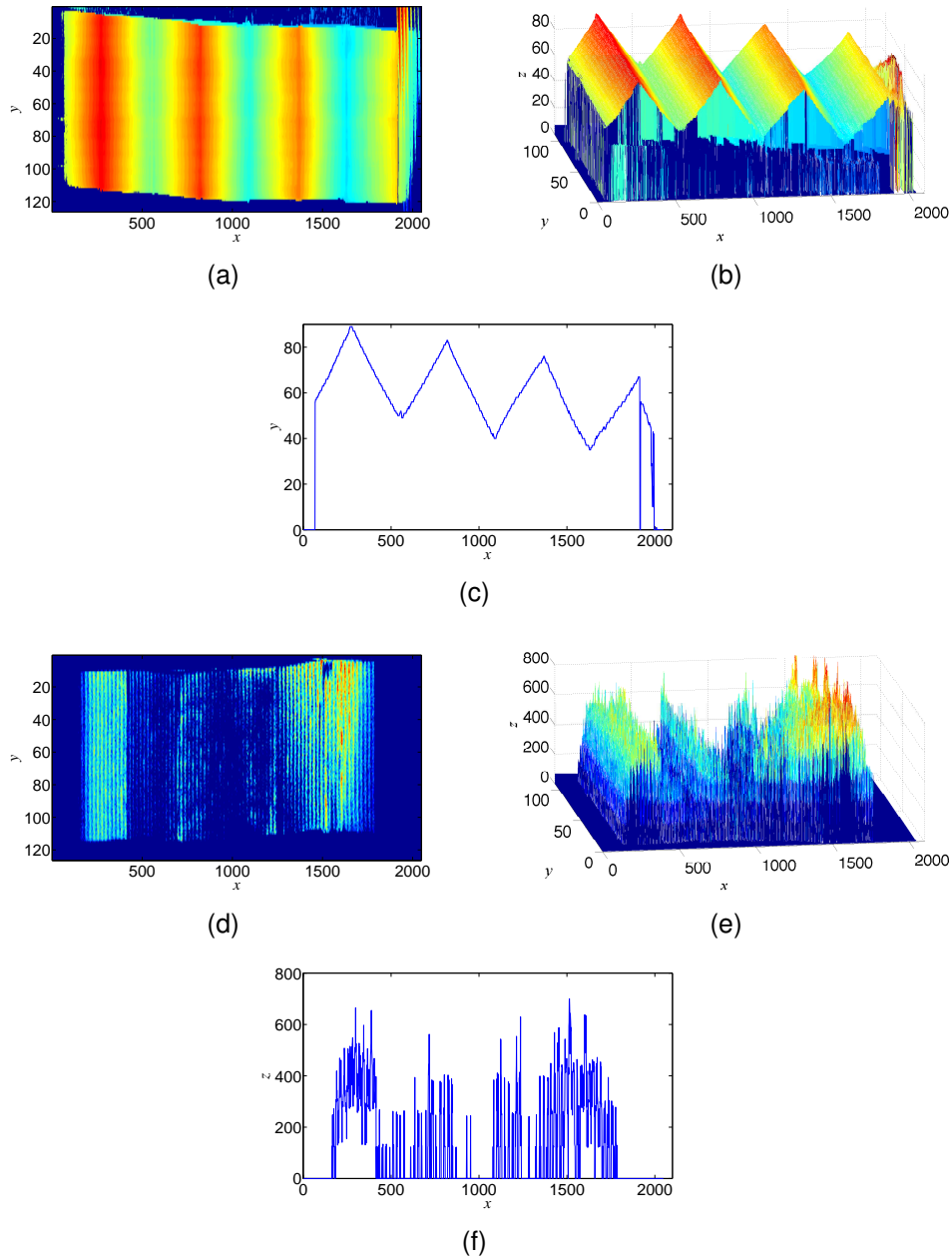


Figura 5.2: Resultados de reconstrucciones. (a) Imagen escalada, (b) superficie y (c) uno de los perfiles en dirección x de la imagen reconstruida con el algoritmo que umbraliza la línea láser. (d) Imagen escalada, (e) superficie y (f) uno de los perfiles en dirección x de la reconstrucción con detección del centro de gravedad de la línea láser

estos perfiles brinda la información de las alturas, en este caso se determina la altura promedio de región, a partir de la ecuación (5.1).

$$h_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{máx}(\mathbf{f}_i^R) - \text{mín}(\mathbf{f}_i^R)), \quad (5.1)$$

Donde \mathbf{f}_i^R es la i -ésima fila dentro de la región R , N es el número de filas que se tienen en cuenta, $\text{máx}(\cdot)$ determina el máximo valor y $\text{mín}(\cdot)$ determina el mínimo valor.

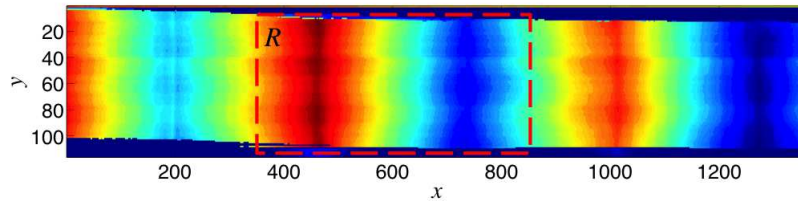


Figura 5.3: Imagen escalada de la reconstrucción. Se resalta la región de análisis R .

La región R tiene un tamaño de 88×517 píxeles, $N = 88$, la altura promedio es de $h_R = 50,69$ mm. El vector de las 88 alturas tiene una desviación estándar de 0.82, por tanto en este caso resulta una tolerancia es de $\pm 0,82$ mm. En cuanto a las filas que se calcula el tamaño promedio de las columnas con valor diferente de cero, éste es de 97,33 filas, con una desviación estándar de 0,47 mm.

La siguiente escena seleccionada es el pavimento con estoperoles viales, como se muestra en la Figura 5.4. De manera similar se escanea un área a diferentes tiempos de integración. Para tomar las imágenes de la línea láser desviada se usa un tiempo de integración de $150 \mu\text{s}$, la reconstrucción se muestra en las Figuras 5.5(a) y 5.5(b). Se observan dos inconvenientes, el primero es que a medida que se aumenta el tiempo de integración la velocidad de transmisión disminuye por tanto puede presentarse pérdida de información cuando el vehículo acelera, y el segundo es que los estoperoles obstruyen parte de la visión de la cámara, por eso la aparición de regiones sin datos coherentes. Este fenómeno de sombra se ilustra en la Figura 5.7, en este caso la cámara no capta la línea porque es una zona invisible.

En las reconstrucciones realizadas con los algoritmos de la cámara los mejores resultados se presentan a $250 \mu\text{s}$ para la detección del máximo de la línea láser, Figuras 5.5(c) y 5.5(d); $250 \mu\text{s}$ para el algoritmo que umbraliza la línea láser, Figuras 5.6(a) y 5.6(b); y $200 \mu\text{s}$ para el algoritmo que detecta el centro de gravedad de la línea láser, Figuras 5.6(c) y 5.6(d). A diferencia del caso de la Figura 5.5(a), cuando se emplean los algoritmos de la cámara no se refleja pérdida de datos a lo largo de la dimensión y .



Figura 5.4: Imagen de la segunda escena, estoperoles viales

Finalmente, la tercera escena seleccionada es el daño que se muestra en la Figura 5.8. La Figura 5.9(a) es la reconstrucción realizada con el algoritmo planteado, con imágenes tomadas a un tiempo de integración de $150 \mu\text{s}$, la Figura 5.9(b) es la reconstrucción con la detección del máximo de la línea láser con tiempo de integración de $60 \mu\text{s}$, la Figura 5.9(c) para el algoritmo que umbraliza la línea láser con tiempo de integración de $60 \mu\text{s}$ y la Figura 5.9(d) con tiempo de integración de $70 \mu\text{s}$. En este caso el escenario tenía mayor iluminación de la luz solar, por tanto el tiempo de integración en la toma de datos se reduce. Una observación relevante es que esta escena presenta elementos adicionales como tierra y hojas. Estos elementos reflejan en forma diferente la luz infrarroja del láser, provocando picos en la escena reconstruida.

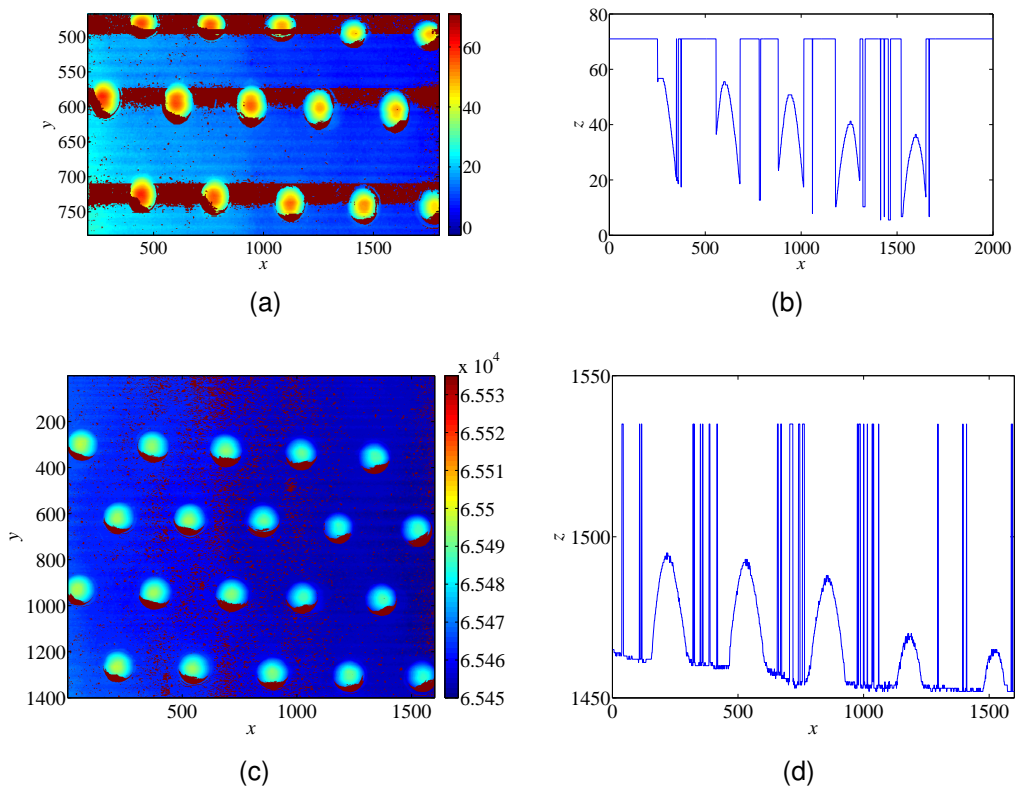


Figura 5.5: Resultados de reconstrucciones del patrón triangular en el pavimento. (a) Imagen escalada, (b) y uno de los perfiles en dirección x de la imagen reconstruida con el algoritmo planteado, captando la escena con un tiempo de integración de $150 \mu\text{s}$. (c) Imagen escalada, (d) y uno de los perfiles en dirección x de la reconstrucción con detección del máximo de la línea láser, captando la escena con un tiempo de integración de $250 \mu\text{s}$

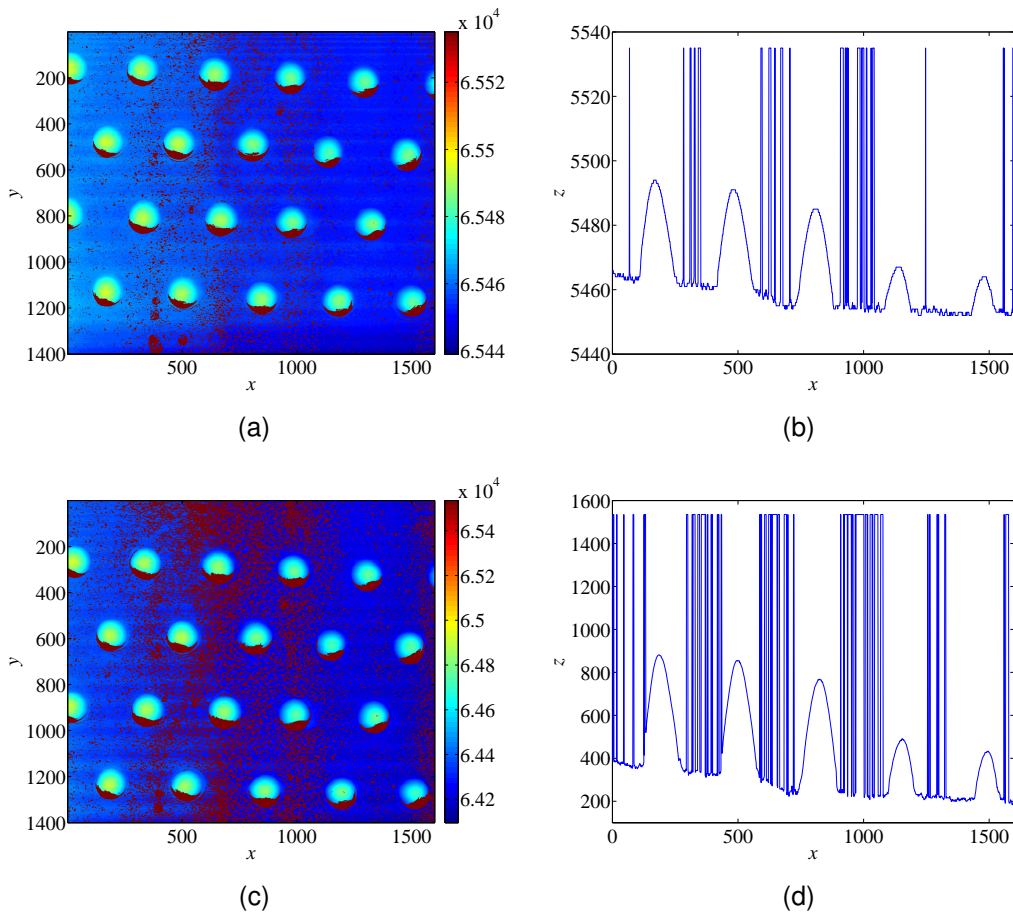


Figura 5.6: Resultados de reconstrucciones de estoperoles en el pavimento. (a) Imagen escalada, (b) y uno de los perfiles en dirección x de la imagen reconstruida con el algoritmo de umbralizar la línea láser. (c) Imagen escalada, (d) y uno de los perfiles en dirección x de la reconstrucción con detección del centro de gravedad de la línea láser

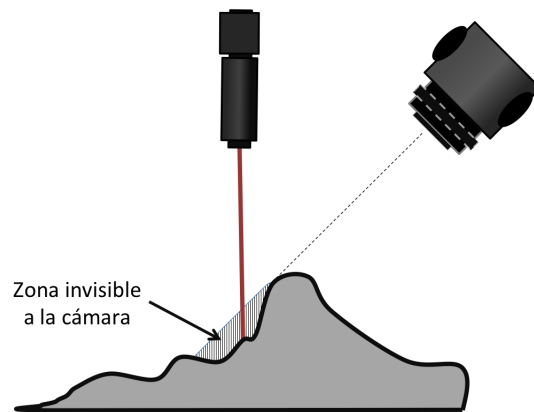


Figura 5.7: Ejemplo del efecto de la sombra de un objeto en triangulación láser



Figura 5.8: Imagen de la tercera escena, daño en el pavimento

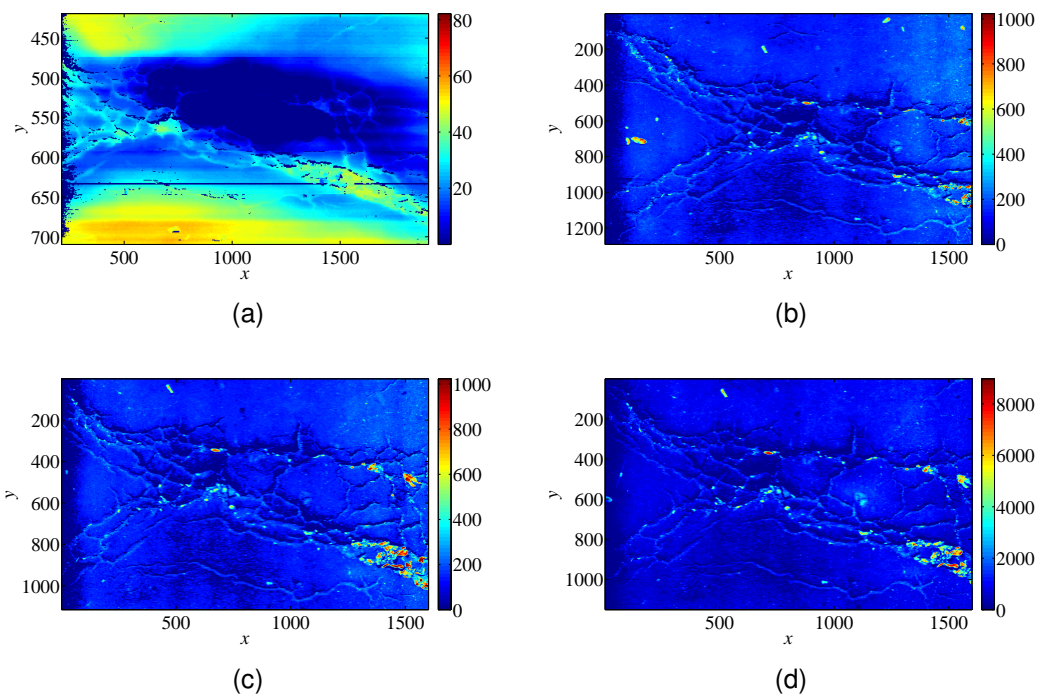


Figura 5.9: Resultados de reconstrucciones de un daño en el pavimento. Imágenes escaladas reconstruidas con el algoritmo planteado (a), con el algoritmo de detectar el máximo de la línea láser (b), con la umbralización de la línea láser (c) y con detección del centro de gravedad de la línea láser (d)

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se llevó a cabo la integración tecnológica de sensores para un sistema de triangulación láser acoplado a una camioneta Toyota Hilux 4×4 . Este sistema permite generar imágenes de profundidades de la superficie del pavimento con precisiones de hasta 1 mm. La precisión en la dimensión x depende de que la cámara cubra 2 m con 2000 píxeles en dirección transversal al pavimento. La precisión en y está relacionada con los pulsos que entrega el codificador y la transmisión de los datos, en el experimento del patrón triangular se captaron en promedio 97,33 filas, en lugar de las 100, una pérdida de aproximadamente 3%. Con respecto a la precisión en la altura, se calcularon, para una altura teórica de 50 mm, medidas experimentales promedio de $50,69 \pm 0,82$ mm.

El parámetro que mayor influencia tiene en los resultados es el tiempo de integración de la cámara de escaneo por área, debido a que afecta directamente la detección de la línea láser y la velocidad de transmisión de las fotografías. Es suficiente con emplear tiempos de integración de entre 150 y 250 μs en condiciones de sombra y de hasta 60 μs con iluminación del Sol.

Aunque se realizaron reconstrucciones con el algoritmo planteado y se obtuvieron resultados parecidos a las realizadas directamente por la cámara, existe un ahorro de tiempo al transmitir únicamente el perfil de alturas en el modo 3D de la cámara lo que permite una mayor velocidad en la adquisición.

El algoritmo planteado requiere transmitir las fotografías de cada toma con una región de interés dada, mientras que el algoritmo 3D transmite el vector de posiciones centrales obtenidas por la FPGA.

El precio del sistema prototipo es de aproximadamente una décima parte de lo que cuesta un sensor comercial con características similares. Para que se pase de la etapa de prototipo a un sistema de inspección de daños se deben incluir sistemas de localización espacial, como GPS o IMU; iluminación artificial, para tener mayor control de la escena; y elementos de señalización adicionales. Podría estudiarse el efecto de la variación en las geometrías de triangulación, además del uso de otra cámara para evitar las sombras en la escena. Por último, es necesario el desarrollo de herramientas *software* que clasifiquen y entreguen el informe sobre la clasificación de daños a partir de las imágenes de profundidad que provea el sistema.

Capítulo 7

Apéndice A: Código planteado para extracción de línea láser

```
function [imgLinea, posC]=extraeLinea(imbw)
%imbw: imagen de entrada de tipo binaria, usualmente obtenida de la
%umbralización
%imgLinea: imagen binaria de salida que tiene un 1 en la posición central
%de la línea láser
%posC: vector de las posiciones centrales
imline=zeros(size(imbw));%matriz que contendrá la línea
%multiplicación de las constantes por la matriz binaria
% Construcción de la matriz de constantes que multiplica
%
% const=[1:size(imbw,2)];
% const1=cat(1, const, const);
% for i=1:size(imbw,1)-2
```

```

%     const1=cat(1, const1, const);
% end
% save('constantesTri100','const1')
load constantesTri100.mat
mult=const1.*imbw;
%Determinar máximos y mínimos sin tomar en cuenta los ceros
[maxf posmax]=max(mult,[],2);

for i=1:size(mult,1)
    [b1] = unique(mult(i,:), 'first');
    B1(i)={b1};
end
for i=1:size(mult,1)
    if (size(B1{i},2)>1)
        posmin(i)=B1{i}(2);%posición del valor mínimo sin contar el cero
    else
        posmin(i)=0;
    end
end
posCentral=round(posmin'+(posmax-posmin')/2); %(posmax+posmin)/2
imgLinea=zeros(size(imbw));
for i=1:2048; imgLinea(i,round(posCentral(i)))=1; end
posC=posCentral;

```

Bibliografía

- [1] Transportation Research Board. *Automated Pavement Distress Collection Techniques*, volume 334. Transportation Research Board National Research, Washington, D.C, 2004.
- [2] Q. Zheng and D. Racca. Support of Pavement Management Systems At The Delaware Department of Transportation. Technical Report December, University of Delaware, 1999.
- [3] Pavemetrics. <http://www.pavemetrics.com/en/lcms.html>, LCMS - Laser Crack Measurement System.
- [4] OECD Expert Group. Pavement Management Systems. Technical report, OECD Road Transportation Research, París, 1987.
- [5] AASHTO. Guidelines for Pavement Management Systems. Technical report, Washington, D.C, 1990.
- [6] L. Mills, N.O. Attoh-Okine, and S. McNeil. Developing pavement performance models for Delaware. In *Transportation Research Board Annual Meeting*. TR, 2012.
- [7] G.W. Flintsch and K.K. McGhee. *Quality management of pavement condition data collection*, volume 401. Transportation Research Board, Washington, D.C, 2009.
- [8] F. Leiva. *Sistemas de soporte para la toma de decisiones en la administración de carreteras*. Posgrado, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica, 2005.

-
- [9] D.H. Timm and J.M. McQueen. A Study Of Manual Vs Automated Pavement Condition Surveys. Technical report, Auburn University, Alabama, 2004.
- [10] J. S. Miller and W. Y. Bellinger. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program. Technical report, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Virginia, Georgetown Pike, 2003.
- [11] J. Coronado. MANUAL CENTROAMERICANO DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS. Technical report, Consejo sectorial de ministros de transporte de Centro América, Secretaría de integración económica centroamericana, Guatemala, 2000.
- [12] A.S. Figueroa, C.F. Flórez, M.P. León, and E.E. Muñoz. MANUAL PARA EL MANTENIMIENTO DE LA RED VIAL SECUNDARIA (PAVIMENTADA Y EN AFIRMADO), 2007.
- [13] Universidad Nacional de Colombia and Instituto Nacional de Vías. MANUAL PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, 2006.
- [14] Oregon Department of Transportation. PAVEMENT DISTRESS SURVEY MANUAL. Technical Report June, Oregon Department of Transportation, United States of America, 2010.
- [15] Departamento de gestión vial. Instructivo de inspección visual de caminos pavimentados. Technical report, Ministerio de obras públicas Gobierno de Chile, Chile, 2004.
- [16] ASTM. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. Technical report, ASTM International, United States, 2008.
- [17] South Dakota Department of Transportation. SDDOT'S ENHANCED PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM, VISUAL DISTRESS SURVEY MANUAL. Technical report, SDDOT, United States of America, 2009.

-
- [18] J.J. Suárez. Análisis comparativo de los métodos para la evaluación de defectos de los pavimentos y su aplicabilidad en carreteras colombianas. Technical report, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2005.
- [19] J. Ríos and I. Martínez. Sistema de administración de pavimentos sobre la ciudad de Bogotá. Technical report, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia, 2009.
- [20] G.D. Cline, M.Y. Shahin, and J.A. Burkhalter. Automated data collection for pavement condition index survey. Technical report, Naval Facilities Engineering Service Center, USA ERDC Construction Engineering Research Laboratory, 2003.
- [21] K.C.P. Wang and O. Smadi. Automated Imaging Technologies for Pavement Distress Surveys. Technical Report E-C156, Transportation Research Board, Washington, D.C, 2011.
- [22] U.S Department of Transportation-Federal Highway Administration. Study of Long-Term Pavement Performance (LTPP): Pavement Deflections, 2006.
- [23] S. Umbaugh. *Computer vision and image processing*. Prentice Hall PTR, United States of America, 1998.
- [24] Universidad de Cornell. <http://www.library.cornell.edu/preservation/tutorial-spanish/contents.html>, Tutorial de Digitalización de Imágenes.
- [25] DALSA Corp. Image Sensor Architectures for Digital Cinematography. Technical report, Waterloo, Canada, 2002.
- [26] D. Litwiller. CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. *Photonics Spectra*, (January), 2001.
- [27] Newton Labs. http://www.newtonlabs.com/line_systems.htm, Comparing Line Scan and Area Scan Technologies, 2013.

-
- [28] Industrial Control System. <http://www.ics-uk.net/technology/technology3.asp>, Area Scan Cameras, Line Scan Cameras.
- [29] STEMMER IMAGING. <http://www.stemmer-imaging.co.uk/en/technical+tips/1100-Line-scan-cameras>, Quality right down the line.
- [30] B. Xu and Y. Huang. Development of an automatic pavement surface distress inspection system. Report, Center of Transportation Research, The University of Texas at Austin, Texas, 2003.
- [31] B. Javidi, D. Kim, and S.E.S. Kishk. A laser-based 3D data acquisition system for the analysis of pavement distress and roughness. Technical Report December, University of Connecticut, Connecticut Transportation Institute, 2004.
- [32] I. Yamaguchi. *Digital Holography and Three-Dimensional Display*. Springer US, 2006.
- [33] R. Klette. Image analysis and object surfaces. Technical Report August, Computer Science Department of The University of Auckland CITR at Tamaki Campus, New Zealand, 1997.
- [34] K.C.P. Wang and W. Gong. Automated pavement distress survey: a review and a new direction. In *Pavement Evaluation Conference*, pages 21–25, Roanoke, Virginia, 2002.
- [35] E. Salari and G. Bao. Automated pavement distress inspection based on 2D and 3D information. In *2011 IEEE Conferencia Internacional sobre Tecnología de Electro / Información (EIT)*, pages 1–4. IEEE, 2011.
- [36] S. Yu, S. Sukumar, A. Koschan, D. Page, and M. Abidi. 3D reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(7):808–818, July 2007.

-
- [37] Sick sensor intelligence. http://www.sick-automation.ru/images/file/pdf/lms_technical_description.pdf, sick laser measurement systems.
- [38] M.R. Jahanshahi and F. Jazizadeh. An Unsupervised Approach for Autonomous Pavement Defect Detection and Quantification Using an Inexpensive Depth Sensor. *Journal of Computing*, (December):743–754, 2012.
- [39] B. Freedman, A. Shpunt, M. Machline, and Y. Arieli. Depth mapping using projected patterns, 2010.
- [40] B. Freedman, A. Shpunt, and Y. Arieli. <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2008155770>, Distance-Varying Illumination and Imaging Techniques for Depth Mapping, 2010.
- [41] L. Bursanescu and F. Blais. Automated pavement distress data collection and analysis: a 3-D approach. In *Proceedings of International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, 1997.
- [42] J. Laurent, M. Talbot, and M. Doucet. Road surface inspection using laser scanners adapted for the high precision 3D measurements of large flat surfaces. In *Proceedings. International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.97TB100134)*, pages 303–310. IEEE Comput. Soc. Press, 1997.
- [43] Z. Yi and M. Rong-gui. A study of pavement roughness measurement system based on laser ranger finder. *2009 International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, 1(2):295–299, 2009.
- [44] X. Yu and E. Salari. Pavement pothole detection and severity measurement using laser imaging. In *Electro/Information Technology (EIT), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2005.
- [45] J. Laurent, J.F. Hébert, D.I. Lefebvre, and Y. Savard. Using 3D laser profiling sensors for the automated measurement of road surface conditions (ruts, macro-texture, raveling, cracks). Technical report, Pavemetrics

-
- Systems inc., INO (National Optics Institute), Ministère des Transports du Québec (MTQ), Canada, 2009.
- [46] Q. Li, M. Yao, X. Yao, and B. Xu. A real-time 3D scanning system for pavement distortion inspection. *Measurement Science and Technology*, 21(1):015702, January 2010.
- [47] Y.C.J. Tsai and F. Li. Critical assessment of detecting asphalt pavement cracks under different lighting and low intensity contrast conditions using emerging 3D laser technology. *Journal of Transportation Engineering*, (May):649–656, 2012.
- [48] M. Gunaratne, S. Amarasiri, and S. Nasser. Investigation of Automated and Interactive Crack Measurement Systems. Report 813, University of South Florida, Tampa, Florida, 2008.
- [49] CSIRO. <http://www.csiro.au/Outcomes/ICT-and-Services/People-and-businesses/RoadCrack.aspx>, Automated detection of road cracks.
- [50] Graphics. <http://www.graphics.com/article-old/digital-photography-fundamentals-understanding-resolution-and-bit-depth>, Digital Photography Fundamentals: Understanding Resolution and Bit Depth, 2011.
- [51] Theia Technologies. How to calculate image resolution. Technical report, Theia Technologies, Wilsonville, 2009.
- [52] TELEDYNE DALSA. <https://www.teledynedalsa.com/imaging/products/cameras/area-scan/genie-ts/G2-GC10-T1921/>, Genie TS-C1920 - Product Detail.
- [53] Allied Vision Technologies. <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/gigabit-ethernet/manta/g-223bc.html>, G-223B/C - Allied Vision Technologies.
- [54] Adept Turnkey. http://www.adept.net.au/cameras/avt/bonito_CL400.shtml, AVT Bonito CL400 B/C — Adept Turnkey Pty Ltd.

-
- [55] Photon focus. User Manual MV1-D2048x1088-3D03-760-G2 3D CMOS camera with GigE interface, 2012.
- [56] Automation Technology GmbH. Hardware Reference Manual Camera C4-2040.
- [57] Total TurnKey solutions. http://www.turnkey-solutions.com.au/cam_prosilica_gige.htm, GigE Vision - Emerging Standard for Machine Vision Cameras, 2008.
- [58] Cimco. http://www.cimco.com/docs/cimco_dnc-max/v6/es/#SerialComStandards, Estándares de comunicación serie, 2012.
- [59] Nikon. <http://www.nikonusa.com/en/Learn-And-Explore/Article/g3cu6o2o/understanding-focal-length.html>, Focal Length — Understanding Camera Zoom & Lens Focal Length — Nikon from Nikon.
- [60] Schäfter+Kirchhoff GmbH. Lenses for Line Scan cameras. Technical report, Schäfter+Kirchhoff GmbH, Hamburg, Germany, 2011.
- [61] RICOH IMAGING COMPANY LTD. <http://www.ricoh-imaging.co.jp/english/products/lens/>, A guide to lens selection, 2009.
- [62] STEMMER IMAGING. <http://www.stemmer-imaging.co.uk/en/products/series/Fujinon.HA#tags/Manual-Lens-C-Mount>, Fujimon.
- [63] G. Kopp and J.L. Lean. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1):n/a–n/a, January 2011.
- [64] NanoLine Laser. <http://www.nanolinelaser.com/pdf/HuskydatasheetV3.pdf>, Husky Laser.
- [65] COHERENT. <http://www.coherent.com/products/?1720/Magnum-II-Laser>, Hoja de datos Lasiris Magnum II, 2009.

-
- [66] Laserglow Technologies. www.laserglow.com, LRD-0808-PFN SERIES INFORMATION SHEET, 2009.
- [67] StockerYale. <http://www.laser2000.de/fileadmin/Produktdaten/LAS /Datenblaetter/powerline.pdf>, Lasiris PowerLine Laser.
- [68] Bosch. Motores de Arranque y Alternadores 2012 I 2013. Technical report, Bosch, Campinas, 2013.
- [69] Aficionados de la mecánica. <http://www.aficionadosalamecanica.net/alternador.htm>, Alternadores y reguladores de tensión, 2012.