



Diseño y construcción de un sistema de digitalización 3D aplicando el método de Luz Estructurada para el laboratorio de CAD/CAM de la Universidad de las Fuerzas Armadas

ESPE

Acosta Ramos, Riki Michael y Moyón Amaya, César Ernesto

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación para la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

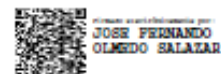
Ing. Olmedo Salazar, José Fernando

11 de febrero de 2021



Document Information

Analyzed document	ACOSTA_RAMOS_RIKI_TESIS_FINAL_PRESENTAR_123.docx (D94767383)
Submitted	2/5/2021 8:15:00 PM
Submitted by	Olmedo Salazar Jose Fernando
Submitter email	jfolmedo@espe.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	jfolmedo.espe@analysis.orkund.com



Sources included in the report

SA	TESIS DANIEL FINAL sa.pdf Document TESIS DANIEL FINAL sa.pdf (D62884037)	1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TRABAJO-DE-TITULACIÓN-ESCÁNER-3D.pdf Document TRABAJO-DE-TITULACIÓN-ESCÁNER-3D.pdf (D27013289) Submitted by: doloza@espe.edu.ec Receiver: doloza.espe@analysis.orkund.com	10
SA	Escrito Tesis Lema_Martinez.docx Document Escrito Tesis Lema_Martinez.docx (D28899868)	1
W	URL: https://docplayer.es/166206512-Diseno-y-desarrollo-de-una-ferula-de-miembro-superi ... Fetched: 11/27/2020 2:17:12 PM	3
W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11896/1/T-ESPEL-MEC-0083.pdf Fetched: 1/6/2021 7:00:46 PM	1
SA	Captura de informacion con laser escaner para la generaci3n de MDT_Paula Pinedo.pdf Document Captura de informacion con laser escaner para la generaci3n de MDT_Paula Pinedo.pdf (D73546955)	2
W	URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_de_luz_estructurada Fetched: 2/4/2020 12:52:37 PM	1
W	URL: https://docplayer.es/6144695-Dispositivo-para-digitalizacion-de-objetos-en-3d-medi ... Fetched: 9/8/2020 8:41:24 AM	1
W	URL: https://docplayer.es/51526738-Trabajo-fin-de-grado-ingenieria-de-telecomunicacion.html Fetched: 3/17/2020 3:52:41 PM	1
SA	Metodología de la Investigación - Jhony Pozo.docx Document Metodología de la Investigación - Jhony Pozo.docx (D18347584)	1
W	URL: https://www.amazon.es/escaner-3d-impresoras-impresi%C3%B3n-escaneo/s?k=escaner+3d& ... Fetched: 2/5/2021 8:19:00 PM	1



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño y construcción de un sistema de digitalización 3D aplicando el método de Luz Estructurada para el laboratorio de CAD/CAM de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE”**, fue realizado por los señores **Acosta Ramos Riki Michael** y **Moyón Amaya César Ernesto**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizando las herramientas de similitud de contenidos; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 11 de febrero de 2021

Atentamente,



Ing. José Fernando Olmedo Salazar

Director

C.C. 1708186307



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Acosta Ramos Riki Michael** y **Moyón Amaya César Ernesto**, con cédulas de ciudadanía nº 1721903258 y 1721122990, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un sistema de digitalización 3D aplicando el método de Luz Estructurada para el laboratorio de CAD/CAM de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 11 de febrero de 2021

Acosta Ramos Riki Michael

C.C.: 1721903258

Moyón Amaya César Ernesto

C.C.: 1721122990



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Acosta Ramos Riki Michael** y **Moyón Amaya César Ernesto**, con cédulas de ciudadanía n° 1721903258 y 1721122990, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un sistema de digitalización 3D aplicando el método de Luz Estructurada para el laboratorio de CAD/CAM de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangoquí, 11 de febrero de 2021

Acosta Ramos Riki Michael

C.C.: 1721903258

Moyón Amaya César Ernesto

C.C.: 1721122990



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Dedicatoria:

Dedico con todo mi corazón mi tesis a mi madre, pues sin ella no lo habría logrado, con tanta lucha y perseverancia estuvo ahí cuando más la necesite. Tu bendición a diario a lo largo de mi vida siempre me protege y me ha llevado por el camino del bien. Por eso te dedico y te ofrezco mi trabajo en ofrenda a tu paciencia y amor, te amo.

Riki Michael Acosta Ramos



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Dedicatoria:

La presente Tesis está dedicada a Dios, pues gracias a él, he logrado culminar la carrera.

A mis padres César Bernardo Moyón Unaicho y Ana María Amaya Velasco, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su incondicional apoyo, amor y consejos para ser una mejor persona.

A mis hermanos y demás familia, por sus palabras y compañía.

A mis queridos amigos, compañeros y todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos.

Moyón Amaya César Ernesto



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Agradecimiento:

A mis padres que han sido muy importantes a lo largo de mi vida estudiantil y de la vida.

A mis hermanas que estuvieron ahí siempre ayudándome en todo para conseguir mis objetivos.

A mis profesores que me inculcaron valores tanto como persona y académicamente para dejar en alto el nombre de nuestra querida Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Riki Michael Acosta Ramos



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Agradecimiento:

Este trabajo agradezco primero a Dios, por ayudarme a culminar una etapa más de mi vida, y no cesan las ganas de decir que es gracias a ti que esta meta está cumplida.

Agradezco a mis padres: César Bernardo Moyón Unaicho y Ana María Amaya Velasco, porque me brindaron su apoyo incondicional, tanto moral y económico para seguir estudiando y lograr la meta trazada, para un futuro comprometedor y ser orgullo para ellos y de toda la familia.

A mis hermanos y demás familia en general por el apoyo que siempre me brindaron día a día en el transcurso de cada año de la carrera Universitaria.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, alma mater de la ciencia y tecnología porque nos están formando para un futuro como Ingenieros en Ingeniería Mecatrónica.

A mis queridos formadores, en especial al Docente tutor del presente trabajo, Ing. Fernando Olmedo, quién ha sido el guía para realizar el presente trabajo de investigación.

Moyón Amaya César Ernesto

Índice de Contenido

Dedicatoria:	6
Dedicatoria:	7
Agradecimiento:	8
Agradecimiento:	9
Índice de Contenido	10
Índice de Tablas.....	16
Índice de Figuras	18
Resumen.....	23
Abstract	24
Capítulo 1	25
Generalidades.....	25
Definición del problema.....	25
Antecedentes	26
Justificación e Importancia.....	27
Objetivos.....	28
Objetivos generales.....	28
Objetivos específicos.....	28
Alcance del proyecto.....	29
Componentes mecánicos.....	29
Plataforma.....	29
Sistema de rotación	30
Sistema de calibración de cámaras.	30

	11
Componentes electrónicos/eléctricos	30
Sistema giratorio	31
Sistema de adquisición de imagen e iluminación	32
Sistema de posicionamiento y desplazamiento de las cámaras y proyector, sistema de calibración.....	32
HMI.....	32
Componentes del sistema de control.....	32
Software para implementación, análisis y simulación	33
Capítulo 2:.....	34
Marco teórico	34
Características básicas de un escáner 3d.....	34
Tipos de escáner 3D	35
Técnicas basadas en el contacto con el objeto	36
Técnica sin contacto con el objeto	36
Activos.....	37
Tiempo de Vuelo	37
Triangulación.....	37
Luz estructurada.....	39
Imagen por resonancia magnética (MRI) y por tomografía computada (CT scanner) .	51
Técnicas pasivas	52
Profundidad de estéreo.....	52
Estructura del movimiento	54
Sistema de Adquisición de imágenes.....	55
Captura de imágenes para la calibración	55

	12
Captura de las imágenes del objeto al proyectar patrones	56
Tipo de patrones seleccionados para proyectarlos sobre el objeto	56
Proceso de calibración	57
Procesamiento digital de imágenes	60
Decodificación de las imágenes capturadas	60
Identificación de las regiones de sombra	60
Decodificación de los patrones	61
Método empleado en el proyecto.....	61
Reconstrucción de la nube de puntos	63
Reconstrucción	63
Transformación de píxel a rayo	63
Triangulación.....	64
Conversión de nube de puntos a malla 3D.....	66
Capítulo 3:.....	68
Diseño Mecatrónico	68
Análisis de los componentes del equipo	68
Metodología de diseño	68
Nivel1: Requerimientos.....	69
Nivel2: Diseño Preliminar del sistema.....	69
Nivel3: Diseño específico.....	69
Nivel 4: Integración del sistema.....	70
Nivel 5: Comprobación de las propiedades	70
Nivel 6: Modelado y Análisis del modelo.....	70
Nivel 7: Producto.....	70

Criterio de diseño	70
Estudio del escaneo por el método de luz estructurada	71
Diseño del escáner 3D por el método de luz estructurada	71
Parámetros técnicos de diseño.....	71
Diseño de plataforma giratoria y estructura mecánica	72
Parámetros de calibración y patrones de proyección de luz	74
Construcción del escáner 3D por el método de luz estructurada.....	74
Plataforma giratoria.....	74
Sistema de adquisición de imágenes	74
Interfaz Humano Máquina.....	75
Desarrollo del software de escaneo y digitalización de la nube de puntos.....	75
Experimentación con la proyección de diversos patrones de luz.....	76
Comparación de resultados y aplicación del sistema de escaneo.....	77
Diseño de los componentes mecánicos	77
Selección de motor	77
Selección motor desplazamiento eje X	77
Selección motor desplazamiento eje Z	81
Plataformas.....	83
Plataforma principal	83
Plataforma giratoria.....	89
Diseño de los componentes eléctricos y/o electrónicos.....	91
Diseño elementos electrónicos principales.....	91
Sistema de escaneo	91
Cámara web Logitech C270 HD	91
Mini Proyector de video HD 720p 1280x720	92

Tarjeta electrónica de control	93
Sensores	94
Sensor Ultrasónico	94
Celda de carga 5 kg	95
Fuente de poder.....	96
Protección eléctrica.....	97
Dimensionamiento del cableado eléctrico.....	98
Conexión de componentes electrónicos	99
Conexión de Drivers	100
Drivers A4988	100
Conexión de Motores	100
Conexión de Sensores	101
Acondicionamiento de sensores:	102
Celda de carga.....	102
Sensor ultrasónico HC SR04.....	106
Diseño de componentes del sistema de Control.....	107
Control Sensor de peso.....	107
Diseño del software.....	109
Diseño de la Interfaz Humano Máquina	110
Descripción de los elementos de la HMI.....	110
Capítulo 4.....	115
Implementación.....	115
Implementación de los componentes mecánicos.....	115
Construcción.....	115

Estructura principal	115
Estructura Giratoria.....	118
Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos	119
Programación e Implementación del sistema de control	125
Código para calibración de las cámaras.....	125
Movimiento de cámaras-proyector y proceso de escaneado.....	127
Capítulo 5:.....	141
Pruebas y Resultados.....	141
Pruebas y resultados del sistema Mecatrónico general.....	141
Escaneo paso a paso	141
Capítulo 6:.....	147
Conclusiones y Recomendaciones	147
Conclusiones.....	147
Recomendaciones y líneas de mejora.....	148
Referencias.....	150
Anexos	154

Índice de Tablas

Tabla 1 Especificaciones Técnicas Atos.....	41
Tabla 2 Especificaciones Técnicas EinScan-SE 3D	42
Tabla 3 Especificaciones Técnicas David sIs-3 Escáner 3D.....	44
Tabla 4 Especificaciones Técnicas Escáner bajo costo.....	45
Tabla 5 Especificaciones Técnicas Escáner láser compacto 3D LPX-60.....	47
Tabla 6 Resultados Escáner Digital con visión estereoscópico.....	48
Tabla 7 Resultados Escáner uso de matlab.....	50
Tabla 8 Resultados Escáner 3D de bajo costo.....	51
Tabla 9 Tabla comparativa de errores de escáneres de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE	51
Tabla 10 Parámetros de diseño del proyecto Escáner 3D Luz Estructurada	72
Tabla 11 Peso de los componentes en el eje X	77
Tabla 12 Especificaciones generales del motor NEMA 17	80
Tabla 13 Peso de los componentes en el eje Z.....	81
Tabla 14 Especificaciones generales del motor NEMA 23	82
Tabla 15 Elementos de Diseño de Plataforma principal	83
Tabla 16 Elementos de diseño de Plataforma Giratoria.....	89
Tabla 17 Datos técnicos Cámara Web Logitech (C270).....	92
Tabla 18 Datos técnicos Mini Proyector de video HD 720p 1280x720.....	93
Tabla 19 Datos técnicos sensor Ultrasónico	94
Tabla 20 Datos técnicos celda de carga 5 kg.....	95
Tabla 21 Consumo eléctrico de los componentes principales del escáner 3D	96
Tabla 22 Requerimiento para la fuente de poder del escáner 3D	97
Tabla 23 Cableado para el escáner 3D	99

Tabla 24 Voltaje de salida de la primera etapa de amplificación	103
Tabla 25 Valores de resistencia del circuito de acondicionamiento de la celda de carga	104

Índice de Figuras

Figura 1 Sistema Mecánico.....	29
Figura 2 Plataforma giratoria.....	30
Figura 3 Sistema Eléctrico/Electrónico.....	31
Figura 4 Sensores y actuadores.....	33
Figura 5 Tipos de reconstrucción 3D.....	35
Figura 6 Técnicas de contacto con el objeto.....	36
Figura 7 Sistema de triangulación.....	38
Figura 8 Proyección y captación luz estructurada.....	39
Figura 9 Patrones binarios.....	40
Figura 10 Escáner Atos.....	41
Figura 11 Precio escáner Atos.....	41
Figura 12 Escáner EinScan-SE 3D.....	42
Figura 13 Precio Escáner.....	42
Figura 14 Escáner David sls-3, escáner 3D.....	43
Figura 15 Precio Escáner.....	44
Figura 16 Escaner bajo costo.....	45
Figura 17 Escáner láser compacto 3D LPX-60.....	47
Figura 18 Escáner láser compacto 3D.....	47
Figura 19 Modelos obtenidos escáneres ESPE.....	48
Figura 20 Modelos obtenidos escáneres ESPE.....	49
Figura 21 Modelos obtenidos escáneres ESPE.....	50
Figura 22 a) Escáner por resonancia magnética. b) Escáner por tomografía computada, respectivamente.....	52
Figura 23 Profundidad de estéreo.....	53

Figura 24 Valores de profundidad.	53
Figura 25 Esquemático representando la técnica SFM.	55
Figura 26 Calibración de cámaras.	56
Figura 27 Formación de la imagen.	57
Figura 28 Tablero de ajedrez empleado para la calibración.	58
Figura 29 Matriz de ecuación de la cámara.	58
Figura 30 Calibración mediante Matlab y posicionamiento de las cámaras	60
Figura 31 Extracción de sombras de un objeto.	61
Figura 32 Mapeado entre pixeles de las cámaras y del proyector.	62
Figura 33 Expresión del pixel direccionado por el rayo.	63
Figura 34 Triangulación de los rayos.	64
Figura 35 Triangulación de los rayos.	64
Figura 36 Pixeles vecinos.	66
Figura 37 Conexiones vecinas del primer nivel.	67
Figura 38 Modelo en V.	68
Figura 39 Sistema de posicionamiento y desplazamiento de las cámaras.	73
Figura 40 Sistema de posicionamiento y desplazamiento del conjunto cámaras-proyector.	73
Figura 41 Posicionamiento y desplazamiento del sistema de adquisición de imágenes.	75
Figura 42 Arquitectura del sistema de escaneo.	76
Figura 43 Motor NEMA 17	80
Figura 44 Motor NEMA 23	83
Figura 45 Plataforma principal escáner 3D Luz estructurada.	83
Figura 46 Base General.	83
Figura 47 Base Motor Central.	84
Figura 48 Base_motor.	84
Figura 49 Base superior.	84

Figura 50 Base motor central.	84
Figura 51 Piñon 2.5 19 dientes.....	85
Figura 52 Acople eje.....	85
Figura 53 Riel de motores de lados.....	85
Figura 54 Correa Síncrona.	85
Figura 55 Polea Síncrona.	86
Figura 56 Transmisión de correas.....	86
Figura 57 Rodela 2mm.	86
Figura 58 Rodela 4mm.	86
Figura 59 Rueda de riel.	87
Figura 60 Soporte base central.	87
Figura 61 Soporte de llantas.....	87
Figura 62 Tornillo r2mmx13mm.....	87
Figura 63 Tubo.....	88
Figura 64 Varilla central.....	88
Figura 65 Tuerca 2mm.....	88
Figura 66 Tuerca 4mm.....	88
Figura 67 Plataforma giratoria	89
Figura 68 Base Giratoria.....	89
Figura 69 Base General.....	89
Figura 70 Rueda interna Ruliman.....	90
Figura 71 Rulimán.....	90
Figura 72 Tornillo 2mm.....	90
Figura 73 Tuerca 2mm.....	90
Figura 74 Cámara web Logitech.....	92
Figura 75 Proyector de video HD 720p.....	92

Figura 76 Shield de Arduino ramps 1,4	94
Figura 77 Sensor Ultrasónico.	94
Figura 78 Celda de carga 5 kg.	95
Figura 79 Fuente de poder LRS-350-12	97
Figura 80 Diagrama de conexión de los componentes electrónicos	99
Figura 81 Diagrama de conexión de drivers A4988 a RAMPS 1.4.....	100
Figura 82 Diagrama de conexión de motores.	101
Figura 83 Diagrama de sensores del escáner 3D.....	101
Figura 84 Diagrama del integrado AD620	102
Figura 85 Circuito no inversor.....	102
Figura 86 Circuito de filtro para el AD620	105
Figura 87 Circuito de acondicionamiento celda de carga 5 [kg]	106
Figura 88 Acondicionamiento del sensor Ultrasónico	107
Figura 89 Diagrama sensor de peso	108
Figura 90 Configuración Celda de carga con la estructura giratoria	108
Figura 91 Diseño HMI	110
Figura 92 Ventana secundaria 1 escáner	111
Figura 93 Ventana secundaria 2 escáner	112
Figura 94 Ventana secundaria 3 decodificación	113
Figura 95 Ventana secundaria 4 finalización proceso de decodificación	114
Figura 96 Parte 1 de la estructura principal	115
Figura 97 Primera parte ensamblada estructura principal	116
Figura 98 Parte 2 de la estructura principal	116
Figura 99 Segunda parte ensamblada estructura principal	117
Figura 100 Estructura principal ensamblada.....	117
Figura 101 Conjunto celda de carga-motor Nema	118

Figura 102	Conjunto de la estructura giratoria.....	118
Figura 103	Estructura giratoria ensamblada	119
Figura 104	Estructura giratoria con peso de 3,5 Kg.....	121
Figura 105	Valores por defecto programa sensor de peso.....	121
Figura 106	Estructura giratoria con peso de 0,227 Kg	124
Figura 107	Valores de peso reales.....	124
Figura 108	Placa del sistema para los motores y controladores.....	125
Figura 109	Objeto colocado en la estructura giratoria	141
Figura 110	Se calibra el sistema con las imágenes tipo tablero ajedrez.....	142
Figura 111	Inicio digitalización.....	142
Figura 112	Toma de imágenes para decodificarlas posición 0°	143
Figura 113	Toma de imágenes para decodificarlas posición 90°	143
Figura 114	Toma de imágenes para decodificarlas posición 180°	143
Figura 115	Toma de imágenes para decodificarlas posición 270°	144
Figura 116	Toma completa de imágenes previo a decodificación.....	144
Figura 117	Decodificación de imágenes	145
Figura 118	Proceso finalizado y obtención modelo 3D.....	145
Figura 119	Resultado segundo objeto escaneado y modelo 3D	146
Figura 120	Resultado tercer objeto escaneado y modelo 3D.....	146

Resumen

El proyecto consiste en el diseño y construcción de un sistema de digitalización 3D aplicando el método de luz estructurada. El proyecto se lo realizó para el laboratorio de CAD/ CAD de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El desarrollo del presente proyecto es con el fin de profundizar en la investigación de la digitalización 3D, y se ha optado por el desarrollo de un sistema de escaneo con luz estructurada que permitirá comparar características técnicas de esta tecnología con tecnologías como la láser y la estereoscópica que fueron desarrolladas en proyectos de investigación dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Los componentes principales del proyecto son la estructura giratoria y la estructura base que soporta las cámaras y el proyector de video. Se realizó una plataforma giratoria automatizada acoplada a un motor para rotar al objeto, esto ayudó a capturar el volumen en sus 360 grados, a su vez se realizó el posicionamiento de las cámaras y del proyector con el objeto a escanear. Se realizó una configuración rotacional-prismática para el posicionamiento de las cámaras, lo que permitió calibrar el ángulo de enfoque y la distancia de las cámaras respecto al proyector, además se realizó un sistema cartesiano de dos grados de libertad para el posicionamiento del conjunto compuesto por las cámaras y el proyector para lograr un enfoque óptimo del sistema con el objeto a escanear. Se construyó la estructura de la plataforma considerando los componentes mecánicos y electrónicos de un sistema de rotación, realizando un acople mecánico entre plataforma-motor, esto ayudó a que la resolución de la representación tridimensional del objeto no cambie en el proceso.

Palabras clave:

- **DIGITALIZACIÓN 3D**
- **LUZ ESTRUCTURADA**
- **ROTACIONAL-PRISMÁTICA**

Abstract

The project consists of the design and construction of a 3D digitization system applying the structured light method. The project was carried out for the CAD / CAD laboratory of the University of the Armed Forces ESPE. The development of this project is in order to deepen the investigation of 3D digitization, and it has been chosen to develop a scanning system with structured light that will allow to compare technical characteristics of this technology with technologies such as laser and stereoscopic which were developed in research projects within the University of the Armed Forces ESPE. The main components of the project are the rotating structure and the base structure that supports the cameras and the video projector. An automated turntable coupled to a motor was made to rotate the object, this helped to capture the volume in its 360 degrees, in turn, the positioning of the cameras and the projector was carried out with the object to be scanned. A rotational-prismatic configuration was made for the positioning of the cameras, which allowed to calibrate the angle of focus and the distance of the cameras with respect to the projector, in addition a Cartesian system of two degrees of freedom was made for the positioning of the set composed of cameras and projector to achieve optimal focus of the system on the object to be scanned. The structure of the platform was built considering the mechanical and electronic components of a rotation system, making a mechanical coupling between the platform-motor, this helped to ensure that the resolution of the three-dimensional representation of the object does not change in the process.

Keywords:

- **3D SCANNING**
- **STRUCTURED LIGHT**
- **ROTATIONAL-PRISMATIC**

Capítulo 1

Generalidades

El capítulo a continuación expone la definición del problema, antecedentes, justificación e importancia, los objetivos y el alcance del proyecto desarrollado. Se referencia la importancia de desarrollar un escáner 3D, y como puede aportar de manera positiva en el ámbito educativo para los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ya que es de fácil uso y de gran utilidad. Se explica como el proyecto aportará soluciones de diseño y procesos reales.

Definición del problema

Obtener un objeto preciso de forma, textura y color, ya sea grande o pequeño, ha sido del interés común de especialistas que tienen la necesidad de estudiar esos objetos para diferentes fines y resolver problemas que se presentan. Las representaciones bidimensionales que utilizan reglas y técnicas de geometría descriptiva y proyectiva han sido una práctica común durante siglos. De estas representaciones 2D debería extraerse la información tridimensional. Esta tarea requirió educación especial, práctica, habilidad e imaginación. Hoy en día estas técnicas han sido reemplazadas por el escaneo digital que se logra mediante escáneres 3D. Los datos recopilados se pueden utilizar para construir modelos digitales tridimensionales útiles para una amplia variedad de aplicaciones. El escaneo digital de objetos ha sido una práctica común durante más de una década. La tecnología láser ha sido el buque insignia de esta actividad, pero también se han utilizado ampliamente otros medios para adquirir información 3D de la superficie de un objeto. Los escáneres de luz modulada, los escáneres pasivos sin contacto, los sistemas fotométricos y los escáneres de silueta son los tipos más conocidos de sistemas que adquieren un gran número de puntos que describen la superficie de interés. Todos estos sistemas funcionan

a diferentes velocidades, con varias densidades y con diferentes precisiones, por lo que cada uno responde a necesidades especiales del mercado.

En la actualidad una alternativa de los escáneres láser más conocidos y dominantes del mercado son los escáneres de luz estructurada. Los escáneres 3D de luz estructurada proyectan un patrón de luz sobre el objeto y detectan la deformación del patrón en el objeto. Básicamente son sistemas ópticos sin contacto, basados casi en su totalidad en los principios de la fotogrametría para transformar pares de imágenes en información de superficie. Son capaces de obtener información de muy alta densidad y muy alta precisión. Para evaluar las capacidades de dicho sistema en condiciones reales de trabajo se realizaron algunas pruebas y sus resultados se analizan y presentan en este documento.

Antecedentes

El escaneo 3D es un proceso de conversión de objetos del mundo real en modelos digitales, en la actualidad, la digitalización de objetos se ha vuelto una tarea de vital importancia en la industria para las tareas de modelado de productos y prototipado rápido, existen diversos sistemas que cumplen con esta necesidad que han evolucionado continuamente. (Hu, 2016)

Con el fin de profundizar en la investigación de la digitalización 3D se ha optado por el desarrollo de un sistema de escaneo con luz estructurada que permitirá comparar características técnicas de esta tecnología con tecnologías como la láser y la estereoscópica que fueron desarrolladas en proyectos de investigación dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y que se detallarán posteriormente, permitiendo así describir las ventajas y desventajas de dichos sistemas.

Justificación e Importancia

El presente proyecto pretende aportar a la investigación sobre la representación tridimensional de objetos, buscando hallar las técnicas y parámetros más eficientes y precisos en lo que se refiere a la digitalización de objetos. Será desarrollado con el método de luz estructurada, con el fin de sentar bases sólidas sobre esta tecnología dentro de la Universidad, lo que ayudará a la realización de trabajos futuros e investigaciones en áreas como el entretenimiento, diseño industrial, ingeniería inversa, prótesis, prototipos, control de calidad, etc.

Si bien el método de escaneo por luz estructurada ya ha sido desarrollado, las proyecciones de los patrones de luz se siguen estudiando, por ende, el proyecto a realizar se enfocará también en la experimentación con diversos patrones de luz, para identificar su incidencia en el resultado final del objeto escaneado.

La investigación se centra en desarrollar un algoritmo para la representación tridimensional de objetos, creando un software que sea capaz de realizar la adquisición y el procesamiento de datos, la reconstrucción del modelo 3D y finalmente la exportación del modelo a formato PLY (Polygon File Format), ya que este formato es uno de los más convencionales para almacenar datos tridimensionales de escáneres 3D, debido a que guarda propiedades como el color y las coordenadas de los puntos que conforman la nube. A diferencia de equipos que se encontraron en la investigación como los escáneres EinsScan, David sIs-3 y Escáner de bajo costo de Rocchini, el sistema propuesto presentará ventajas como la calibración automática del posicionamiento de las cámaras y del proyector respecto al objeto a escanear, ahorrando así tiempo en la ejecución del proceso y asegurando que la precisión de la representación tridimensional del objeto no se vea afectada por intervención del operario, además se diseñará un sistema de iluminación controlado debido a que este tipo de escáner es sensible a las condiciones de iluminación del entorno.

El sistema de escaneo a diseñar y construir ayudará a docentes y estudiantes de la institución, especialmente de las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, con el fin de complementar los conocimientos adquiridos en clases teóricas y enfatizar la parte práctica de la ingeniería mediante prácticas de laboratorio e investigaciones en materias como Procesos de Manufactura, Sistemas CAD/CAM/CAE.

Objetivos

Objetivos generales

Diseñar, construir e implementar un sistema de digitalización 3D aplicando el método de luz estructurada para el laboratorio de CAD/CAM de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Objetivos específicos

- Realizar un estado del arte sobre el escáner 3D de luz estructurada en fuentes bibliográficas y digitales, para obtener conocimiento necesario y generar un sistema que se ajuste a las necesidades y parámetros propuestos en el proyecto.
- Desarrollar diferentes alternativas para dar solución al proceso de escaneado 3D, tomando en cuenta las herramientas, elementos mecánicos, elementos electrónicos y software adecuado para el diseño de un sistema de digitalización 3D.
- Desarrollar un software que enlace todo el proceso de escaneo 3D e integre el sistema de adquisición de datos con la computadora, procese la información de manera que entregue un modelo digital de la forma y color de un objeto.
- Realizar las pruebas de puesta a punto y comparación de resultados del sistema de escaneo, deducir conclusiones y realizar una propuesta de mejoras futuras.

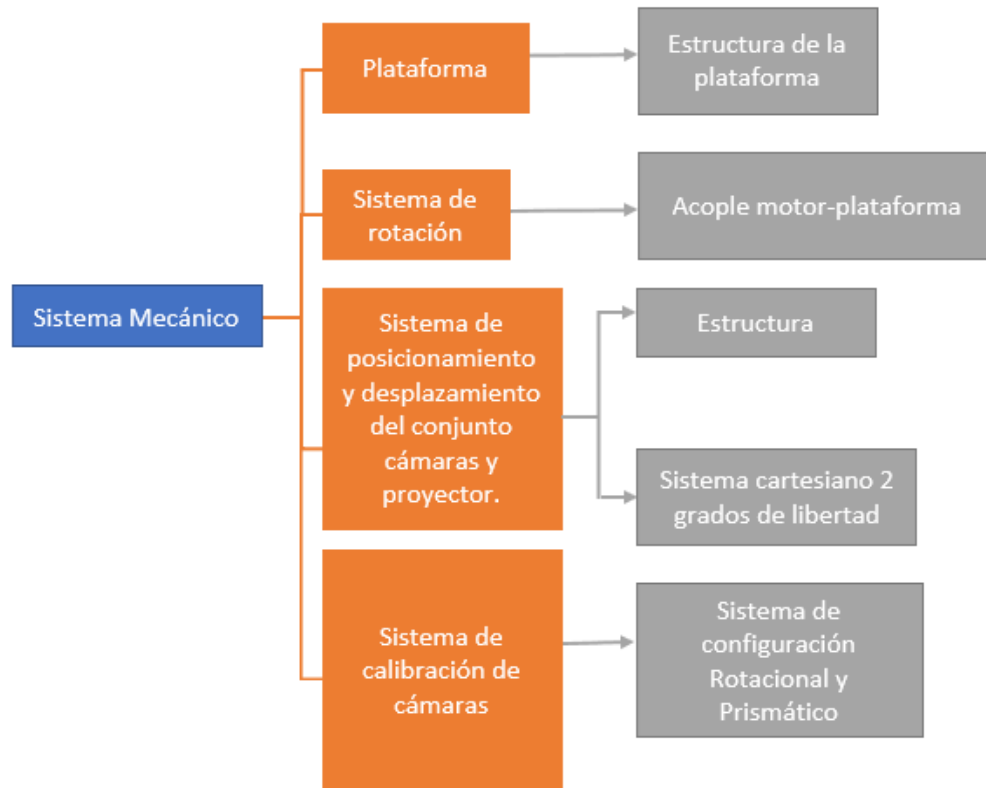
Alcance del proyecto

El presente proyecto pretende alcanzar los aspectos mecánicos, eléctricos/ electrónicos y de control mostrados en el esquema de la figura 1.

Componentes mecánicos

Figura 1

Sistema Mecánico.

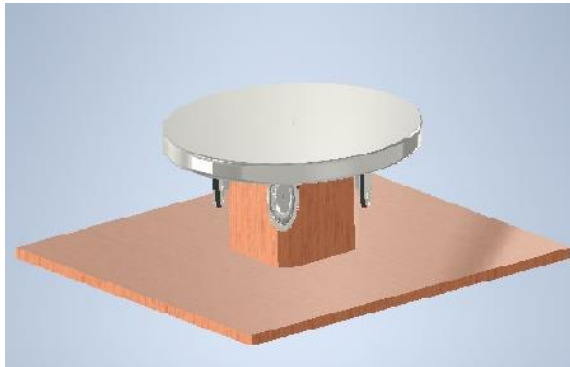


Plataforma

Para el diseño de la plataforma se optará por una estructura robusta, sobre la cual se va a colocar el objeto a escanear, como se presenta en la figura 2.

Figura 2

Plataforma giratoria



Sistema de rotación

Se desarrollará el diseño y construcción de un acople motor-plataforma, logrando así obtener parámetros de velocidad y torque adecuados para el sistema de escaneo.

Sistema de posicionamiento y desplazamiento del conjunto cámaras y proyector.

Se realizará la construcción de un sistema cartesiano con dos grados de libertad para dar movimiento al conjunto compuesto por las cámaras y el proyector.

Sistema de calibración de cámaras.

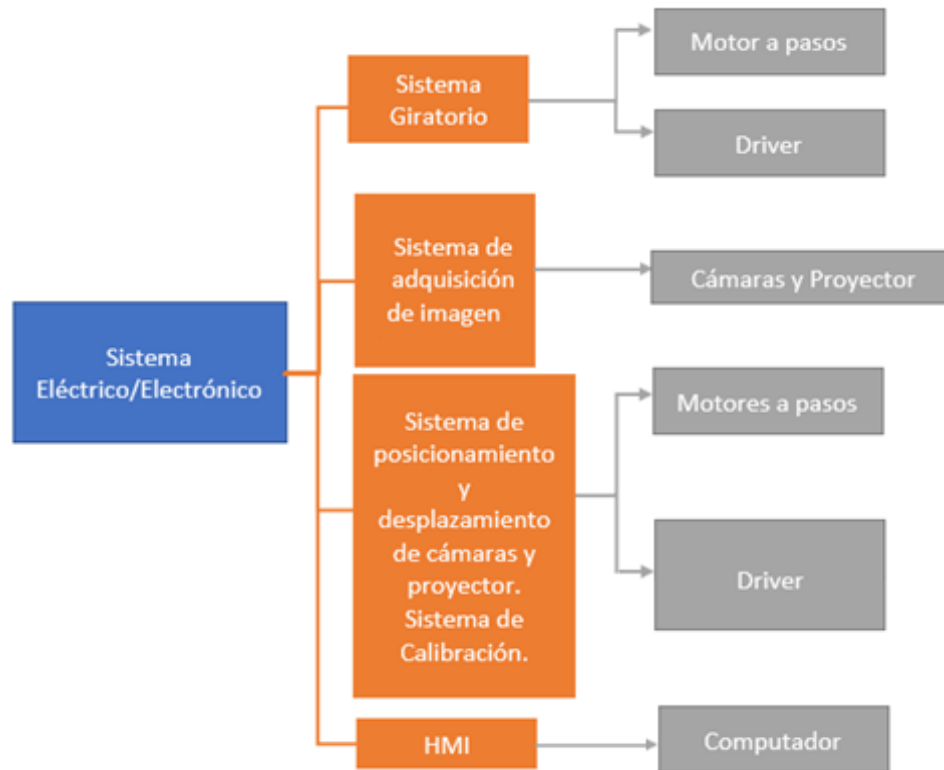
Se realizará la construcción de un sistema de configuración rotacional y prismático, el primer grado de libertad permitirá calibrar el ángulo de enfoque de las cámaras y el segundo permitirá calibrar la distancia de las cámaras respecto al proyector.

Componentes electrónicos/eléctricos

Debido a la implementación del proyecto en una zona no industrial, la máquina funcionará con corriente alterna de 110V a 60Hz para la alimentación del sistema de escaneo. Además de la fuente de 12 VCC para el sistema de control de la máquina. En el esquema de la figura 3.

Figura 3

Sistema Eléctrico/Electrónico.



Sistema giratorio

Es el encargado de dar movimiento a la plataforma.

Motor:

Se utiliza para rotar la plataforma al momento que el sistema de escaneo realiza la adquisición de datos.

Driver:

Se encargará de emitir señales de control para el correcto funcionamiento del motor acoplado

Sistema de adquisición de imagen e iluminación

Cámaras:

Se encargará de ir tomando fotografías secuencialmente en un intervalo de tiempo programado mientras la plataforma va rotando.

Proyector:

Es el encargado de emitir los patrones de luz previamente configurados.

Sistema de posicionamiento y desplazamiento de las cámaras y proyector, sistema de calibración.

Motores a pasos:

Permitirán el movimiento rotacionales y prismáticos del conjunto y de las cámaras.

Driver y Arduino:

Serán los encargados de emitir las señales de control para los motores a pasos.

HMI

Será la encargada de presentar indicadores del proceso, además podremos controlar y monitorear el proceso de escaneo en todas sus etapas.

Computador:

Encargado del procesamiento de la información y de la digitalización de la nube de puntos.

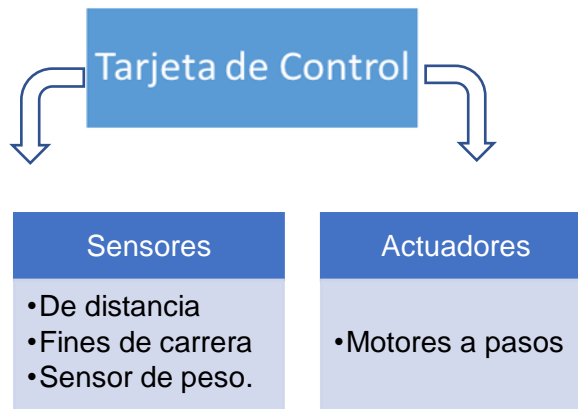
Componentes del sistema de control

El sistema de control de la máquina será implementado utilizando una placa Arduino, encargado de procesar las señales de los sensores y comandar los actuadores, logrando así

mantener controladas las variables del sistema, en la figura 4 presenta los sensores y actuadores de la tarjeta de control.

Figura 4

Sensores y actuadores.



Software para implementación, análisis y simulación

Se creará un software desarrollado en Matlab capaz de:

- Configurar los parámetros de escaneo, como número de capturas realizadas, velocidad de rotación, patrones de luz emitidos por el proyector.
- Iniciar, pausar y detener el proceso de escaneado.
- Procesar la información de las imágenes captadas por las cámaras.
- Reconstruir el modelo tridimensional usando algoritmos del método de luz estructurada.
- Digitalizar la nube de puntos y guardar el modelo 3D en formato PLY.

Capítulo 2:

Marco teórico

En el capítulo a continuación comprende el concepto del proceso de digitalización 3D y las diferentes soluciones que se desarrollan y se usan para alcanzar este fin. Conlleva a la introducción a el proceso de escaneo 3D y los diferentes tipos de escáneres que existe en la actualidad. También plantea el sistema de adquisición de datos, procesamiento de datos y como es el proceso de reconstrucción de la nube de puntos.

Características básicas de un escáner 3d

El propósito del escaneo 3D es recopilar datos de objetos o entornos del mundo real y recrearlos en forma de modelos digitales 3D. Este modelo 3D tiene muchas aplicaciones, desde la producción de películas hasta el diseño industrial y el control de calidad de la producción. (Martín, 2017)

Las principales características que describen a un sistema de digitalización 3D se enlistan a continuación:

- Precisión
- Velocidad
- Resolución
- Seguridad
- Capacidad de captura del objeto

El escáner digital 3D debe tener en cuenta estos parámetros operativos al procesar objetos de diferentes tamaños y texturas, además, debe asegurarse siempre de que la integridad del objeto permanezca intacta al final del procesamiento.

Tipos de escáner 3D

En el campo de la reconstrucción 3D, existe una gran cantidad de soluciones técnicas. En esta sección estudiaremos algunos de ellos.

La Figura 5 muestra la clasificación de los diferentes tipos de técnicas de reconstrucción que existen. En esta sección se mencionarán las principales diferencias entre ellos y se introducirán algunas de sus principales características.

Figura 5

Tipos de reconstrucción 3D.



Nota. Tomado de 3D Real-time Scanning Using a Projector-based Structured Light System, 2017

Según esté en contacto con el objeto, observamos que existen básicamente dos técnicas de escaneado 3D:

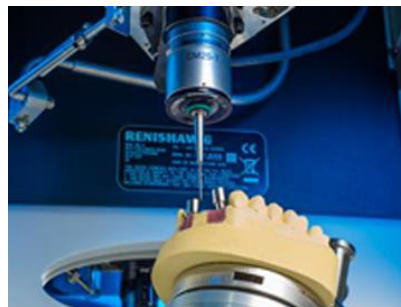
Técnicas basadas en el contacto con el objeto

Esta tecnología requiere el contacto con el objeto a través de una serie de sensores en su superficie para su reconstrucción. Esta técnica tiene algunas desventajas muy obvias. Por un lado, necesitan tocar partes, y las partes pueden modificarse o incluso dañarse, lo que es una gran desventaja en comparación con otro tipo de tecnologías de escaneo 3D. (Jorissen, 2017)

En comparación con otras tecnologías que se explicarán a continuación, la reconstrucción suele ser un proceso lento. Su finalidad principal es controlar el proceso de fabricación, pues nos permite observar si una pieza cumple con las características requeridas. La figura 6 muestra perfectamente el funcionamiento de este tipo de escáner, que incluye un brazo de navegador con una punta sensible al tacto a través del objeto. (Jorissen, 2017)

Figura 6

Técnicas de contacto con el objeto.



Nota. Tomado de Escáner de contacto DS10 innovation, Renishaw apply.

Técnica sin contacto con el objeto

Este tipo de escáner no contacta directamente con el objeto, lo que es ventajoso para estudiar objetos frágiles o de gran valor.

Asimismo, el escáner por método de contacto se puede dividir en 2 subgrupos:

Activos

Este tipo de escáneres arrojan un cierto tipo de señal que es reflejada por el objeto, y la señal reflejada se analiza para capturar la geometría del objeto en estudio. Estas tecnologías se dividen en: (Acuña, 2018)

Tiempo de Vuelo

Estos tipos de sistemas envían pulsos de luz al sujeto y cronometran los pulsos en su viaje desde el transmisor al objeto y desde el sujeto al receptor. Se debe considerar el valor de la velocidad de la luz al calcular este tiempo. Por tanto, la distancia entre el escáner y la superficie viene dada por la expresión:

$$\text{Distancia entre el escáner y la superficie} = \frac{c * T}{2}$$

Donde:

c: velocidad de la luz

T: tiempo de ida y vuelta del pulso luminoso

Este proceso debe realizarse para todos los puntos del objeto y utilizar otros tipos de técnicas ópticas y / o mecánicas. Evidentemente, la precisión de este tipo de sistema dependerá de la precisión con la que se pueda medir el tiempo de pulso, que suele ser del orden de nanosegundos / femtosegundos. Un ejemplo de este tipo de sistema es LIDAR (Light Detector and Ranging). (Acuña, 2018)

Triangulación

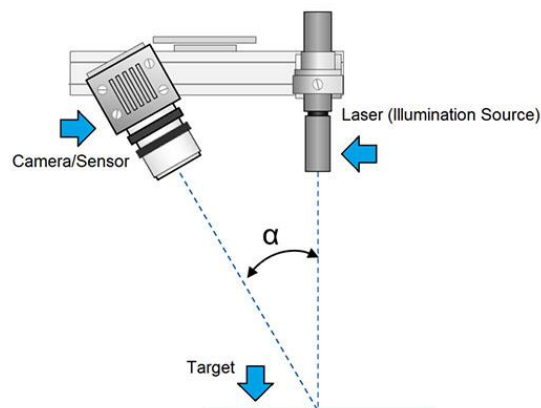
El escáner láser de triangulación 3D emite un rayo láser, que caerá sobre el objeto. Utiliza la cámara para buscar el punto donde aparece el láser en el objeto. Según la distancia del láser que irradia la superficie, el punto aparecerá en una posición u otra del sensor de la cámara para

que se pueda calcular la distancia. El sistema se basa en un punto del láser, cámaras y láser que forman puntos triangulares. (Jorissen, 2017)

Los datos conocidos muestran todas las dimensiones del triángulo, en la que los datos son la distancia entre el láser y la cámara, ángulo de la cámara y el ángulo del emisor láser. Este sistema puede llegar a alcanzar altas precisiones. En términos de escáneres de tiempo de vuelo, los escáneres de triangulación son más precisos, pero tienen un alcance de unos pocos metros, mientras que los escáneres de tiempo de vuelo pueden operar a distancias de hasta kilómetros. El diagrama del sistema de triangulación se puede apreciar en la figura 7. (Jorissen, 2017)

Figura 7

Sistema de triangulación.



Nota: Tomado de Escáner láser 3D o escáner de luz estructurada.

La siguiente es la ecuación básica utilizada para la triangulación:

$$R = B \frac{\sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)}$$

Donde:

R: es la medida de profundidad

B: es la distancia entre el láser y la cámara

Θ : es el ángulo del láser

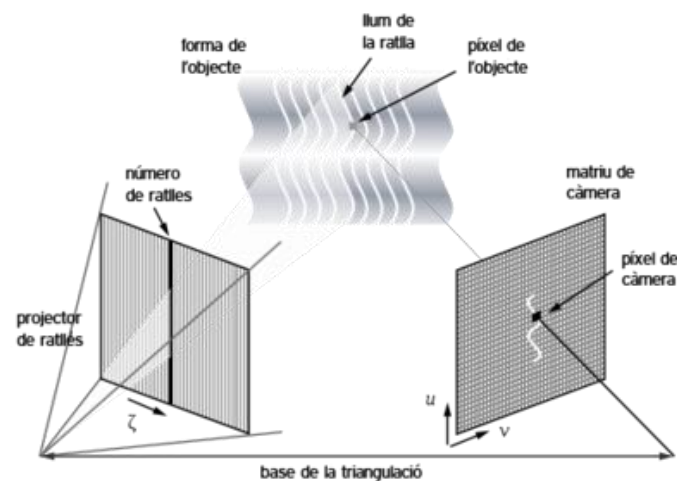
A: es el ángulo que forma la cámara.

Luz estructurada

Esta tecnología es capaz de capturar la forma y características de un objeto mediante la proyección de un patrón de luz, cuyo reflejo es capturado por un sensor que en este caso es una cámara fotográfica y posteriormente determinar la posición de cada punto en el espacio 3D por medio de algoritmos, en la figura 8 se puede apreciar un esquema de la proyección y captación de luz estructurada. (Morillo Romero, 2015)

Figura 8

Proyección y captación luz estructurada



Nota. Tomado de Digitalización 3D con escáner de luz estructurada aplicada al área industrial.

Se utiliza un proyector que ilumina el objeto con patrones de rayas blancas y negras colocadas de manera paralela con anchura variable. Las cámaras registran el patrón de las luces proyectadas. Toman cada patrón y crean una secuencia temporal de los diferentes valores del brillo, en la figura 9 se presentan diferentes tipos de patrones binarios que son emitidos por la luz proyectada. (Morillo Romero, 2015)

Figura 9*Patrones binarios**Nota. Tomado de Digitalización 3D con escáner de luz estructurada aplicada al área industrial.*

Por medio de un análisis de la deformación de las líneas, se obtiene los puntos 3D, en donde la anchura de las líneas es una función de la inclinación del objeto a escanear. Otros factores que aportan información, son la fase y la frecuencia, los cuales pueden ser analizados con la transformada de Fourier. (Morillo Romero, 2015)

Una de las ventajas de los escáneres 3D con tecnología de luz estructurada, es la velocidad de escaneo. En lugar de escanear un punto a la vez, escanean múltiples puntos o el campo entero de visión, lo cual elimina el problema de deformación que se da por el movimiento. (Morillo Romero, 2015)

Escáner 3D por luz estructurada existentes en el mercado

Existe una variedad de escáneres que utilizan el método de luz estructurada, a continuación, se presentan según su costo, precisión, velocidad, resolución, seguridad y capacidad de captura del objeto, que son las principales características de los escáneres.

ATOS

Es un escáner 3D de la empresa GOM, basado en la proyección de patrones de luz para obtener coordenadas 3D exactas y trazables. Este escáner realiza una medición de campo completo y medición 3D basada en puntos. ATOS realiza mediciones en áreas de difícil acceso, haciendo la medición más precisa a comparación de otros escáneres, la figura 10 presenta una fotografía del escáner mencionado. (Winter, 2017)

Figura 10

Escáner Atos.



Nota. Tomado de GOM Atos

Tabla 1

Especificaciones Técnicas Atos

Especificaciones Técnicas	
Precio	<p><i>Figura 11</i></p> <p>Precio escáner Atos.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p><i>Nota. Tomado de GOM Atos</i></p>
Precisión	0,01 mm
Tecnología	Luz estructurada
Tiempo de escaneo	1 s
Formatos de salida	ASC, FBX, OBJ, PLY, STL
Color	si
Peso	Aproximadamente 4 Kg
Capacidad de la mesa	8 Kg
Voltaje de entrada	90-230 v AC
Dimensiones del sensor	340mmx130mmx230mm
Densidad de la malla	5 millones por punto de escaneo
Calibración	Automática

Nota. Tomado de GOM Atos

EinScan-SE 3D

Es un escáner 3D de la empresa CREAR 4D, el cual es multifuncional que utiliza el principio de luz estructurada para una captura de datos 3D más fácil y más rápido.

Utiliza una tecnología de escaneo estructurado y tiene gran poder de reconstrucción de la geometría real del objeto con fino detalle, la figura 12 presenta una fotografía del escáner mencionado. (CREAR 4D, 2004)

Figura 12

Escáner EinScan-SE 3D.



Nota. Tomado de CREAR 4D

Tabla 2

Especificaciones Técnicas EinScan-SE 3D

Especificaciones Técnicas	
Precio	<p><i>Figura 13</i></p> <p><i>Precio Escáner.</i></p> <div style="text-align: right;">  </div> <p><i>Nota. Tomado de CREAR 4D</i></p>
Precisión	≤ 0,1 mm
Tecnología	Luz estructurada
Tiempo de escaneo	8 s
Formatos de salida	ASC, FBX, OBJ, PLY, STL

Especificaciones Técnicas	
Color	si
Peso	4,2 Kg
Capacidad de la mesa	5 Kg
Voltaje de entrada	12 V ; 3,33 A
Dimensiones del sensor	310mmx120mmx130mm
Densidad de malla	Hasta 3000000 x punto escaneo
Calibración	Manual

Nota. Tomado de CREAR 4D

David sls-3, escáner 3D de luz estructurada

Es un escáner 3D de la empresa HP SCAN CERTIFIED PARTNER, genera modelos 3D precisos y muy detallada en cuestión de segundos, funciona con el método de luz estructurada y el método de la línea láser, contiene todo lo necesario para realizar escaneos en 3D con luz estructurada.

El error es sólo alrededor de $\pm 0,2\%$ en relación al tamaño del objeto y también puede capturar los colores con alta calidad, la figura 14 presenta una fotografía del escáner mencionado. (HP 3D Scan Brilliantlycapture reality, s.f.)

Figura 14

Escáner David sls-3, escáner 3D.



Nota. Tomado de HP 3D Scan Brilliantlycapture reality

Tabla 3

Especificaciones Técnicas David sls-3 Escáner 3D

Especificaciones Técnicas	
Precio	<p><i>Figura 15</i></p> <p><i>Precio Escáner.</i></p>  <p><i>Nota. Tomado de HP 3D Scan Brilliantlycapture reality</i></p>
Precisión	0,05 mm
Tecnología	Luz estructurada
Tiempo de escaneo	10s velocidad de computadora
Formas de exportación	OBJ, STL, PLUMA
Color	si
Peso	n/e
Capacidad de la mesa	n/e
Voltaje de entrada	110 V
Dimensiones del sensor	Conjunto 220mmx120mmx200mm
Densidad de malla	Hasta 2300000 por punto de escaneo
Calibración	Manual

Nota. Tomado de HP 3D Scan Brilliantlycapture reality

Escáner 3D de bajo costo basado en luz estructurada

Es un escáner que ha sido desarrollado con dos dispositivos electrónicos comunes, como son una cámara digital y un proyector. Se utiliza un proyector de video para proyectar patrones de luz estructurados en el objeto a escanear. La cámara fotográfica digital se utiliza para adquirir imágenes del objeto bajo iluminación estructurada. Ambos dispositivos están controlados por una herramienta de software que se ejecuta en una PC estándar, que produce la serie de patrones proyectados por el emisor y acciona la cámara, la figura 16 presenta una fotografía del escáner mencionado. (Scopigno, Montani,, Pingi,, Rocchini,, & Cignoni,, 2001)

Figura 16

Escáner bajo costo



Nota. Tomado de A low cost 3D scanner based on structured light

Tabla 4

Especificaciones Técnicas Escáner bajo costo

Especificaciones Técnicas	
Precisión	Aprox $\pm 0,2$ en superficie opaca blanca
Tecnología	Luz estructurada

Especificaciones Técnicas	
Tiempo de escaneo	20s
Formas de exportación	OBJ, STL, PLUMA
Color	si
Peso	n/e
Capacidad de la mesa	n/e
Voltaje de entrada	110 V
Calibración	Manual

Nota. Tomado de A low cost 3D scanner based on structured light

Escáner 3D en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

En la Universidad previamente se han desarrollado tres proyectos relacionados con nuestra propuesta. Uno basado en una mesa giratoria que recolecta datos por visión estereoscópica con una webcam. Los otros dos utilizan de igual forma una mesa rotatoria, pero usan el método de triangulación por láser para la digitalización.

A continuación, se puntualiza los proyectos realizados previamente en la Universidad con sus respectivos resultados:

El escáner PICZA LPX-60 fue adquirido por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, asignado específicamente al laboratorio de CAD/CAM, dicho escáner actualmente se encuentra fuera de uso debido al alto costo de licencias del software recomendado por el fabricante para el procesado de la nube de puntos.

1. Escáner PICZA LPX-60

El PICZA LPX-60 es un escáner tridimensional que se basa en la tecnología que está en la categoría de escáneres sin contacto, para explorar la forma de objetos sólidos. Realiza exploración sin hacer contacto con el objeto explorado, mediante un rayo láser. Esto permite

realizar una exploración más rápida sin tener que preocuparse por posibles daños con el objeto, la figura 17 presenta una fotografía del escáner mencionado. (Roland)

Figura 17


Escáner láser compacto 3D LPX-60.



Nota. Tomado de Roland DG Corporation

Tabla 5

Especificaciones Técnicas Escáner láser compacto 3D LPX-60

Especificaciones Técnicas	
Precio	<p><i>Figura 18</i></p> <p><i>Escáner láser compacto 3D.</i></p> <div style="text-align: right;">  </div> <p><i>Nota. Tomado de Roland DG Corporation</i></p>
Precisión	0,2 mm
Tecnología	Luz estructurada
Tiempo de escaneo	10 s
Formatos de salida	STL, GSF, 3DM
Color	si
Capacidad de la mesa	203 mm de diámetro y 304,8 mm de altura
Voltaje de entrada	110 V

Especificaciones Técnicas

Dimensiones del sensor	140mmx130mmx210mm
Densidad de malla	Hasta 3000000 por punto de escaneo

Nota. Tomado de Roland DG Corporation

2. Diseño y construcción de un Escáner Digital a partir de un sistema de visión estereoscópico para el Laboratorio CNC de la ESPE-L.

Los resultados obtenidos muestran que se logró escanear el objeto propuesto y también se puede apreciar que el objeto escaneado y posteriormente impreso en 3D no tiene el mismo tamaño, la forma varía mucho, tiene limitantes como el peso y el tamaño del objeto a escanear, además presenta un error del 26,68 %, la figura 19 presenta un esquema escáner y una impresión 3D generada a partir del escáner mencionado. (Molina Hidalgo, 2015)

Figura 19

Modelos obtenidos escáneres ESPE.



Nota. Tomado de Diseño y construcción de un Escáner Digital 3D a partir de un sistema de visión estereoscópico para el Laboratorio CNC de la ESPE-L.

Tabla 6

Resultados Escáner Digital con visión estereoscópico

Datos técnicos Escáner Digital con visión estereoscópico	
Costo	\$450
Resolución de cámara	640 x 480 píxeles

Datos técnicos Escáner Digital con visión estereoscópico	
Rango de capacidad de carga del motor	100-500 gramos
Dimensiones	Alto:13;Ancho:13 cm
Error dimensional	26.68%
Calibración escáner	Manual
Posicionamiento escáner	Automático
Aceleración angular del motor	n/e

Nota. Tomado de Diseño y construcción de un Escáner Digital 3D a partir de un sistema de visión estereoscópico para el Laboratorio CNC de la ESPE-L.

3. Diseño e implementación de un sistema para digitalización de objetos 3D mediante el uso de Matlab.

Los resultados obtenidos muestran que se logró escanear el objeto propuesto y presenta un error del 11.33% en cuanto a las dimensiones reales del objeto, también presenta limitantes como el tamaño de los objetos a escanear y el peso, debido a los motores a pasos pequeños con los que fue diseñado, la figura 20 presenta una fotografía y la digitalización de un modelo generado por el escáner mencionado. (Guamán Gualpa & Sosa Guzmán, 2013)

Figura 20

Modelos obtenidos escáneres ESPE.



Nota. Tomado de Diseño de un sistema para digitalización de objetos en 3d mediante el uso de Matlab

Tabla 7

Resultados Escáner uso de matlab

Datos técnicos Escáner uso de matlab	
Resolución de cámara	640 x 480 píxeles
Capacidad del motor	453.59 gramos
Dimensiones requeridas	Radio en la base: 65; altura: 180 mm
Error dimensional	11.33%
Calibración escáner	Manual
Posicionamiento escáner	Automático

Nota. Tomado de *Diseño de un sistema para digitalización de objetos en 3d mediante el uso de Matlab*

4. Diseño y construcción de un prototipo de escáner 3D de bajo costo.

Los resultados del proceso de escaneo del presente tema de tesis que hemos analizado son los más satisfactorios, a diferencia de los otros diseñados y construidos en la Universidad de las Fuerzas Armadas, ya que los errores dimensionales son menores al 5%, puede soportar mayor carga y tiene mayor volumen de trabajo, la figura 21 presenta una fotografía y la digitalización de un modelo generado por el escáner mencionado. (Del Castillo Vivanco, 2017)

Figura 21

Modelos obtenidos escáneres ESPE.



Nota. Tomado de *Diseño y construcción de un prototipo de Escáner 3D de bajo costo*

Tabla 8

Resultados Escáner 3D de bajo costo

Datos técnicos de Escáner 3D de bajo costo	
Costo	\$185.85
Resolución	1600x1200 pixeles
Capacidad de carga del motor	6 kg
Volumen de trabajo	160x160x180 mm
Error dimensional	<5%
Calibración escáner	Manual
Posicionamiento escáner	Automático
Aceleración angular del motor	0.5 [rad/s ²]
Velocidad de motor	0.25 [rad/s]

Nota. Tomado de Diseño y construcción de un prototipo de Escáner 3D de bajo costo

Tabla 9

Tabla comparativa de errores de escáneres de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Escáner	Error porcentual
Diseño y construcción de un Escáner Digital a partir de un sistema de visión estereoscópico para el Laboratorio CNC de la ESPE-L	26.68 %
Diseño e implementación de un sistema para digitalización de objetos 3D mediante el uso de Matlab	11.33%
Diseño y construcción de un prototipo de escáner 3D de bajo costo.	<5%

Imagen por resonancia magnética (MRI) y por tomografía computada (CT scanner)

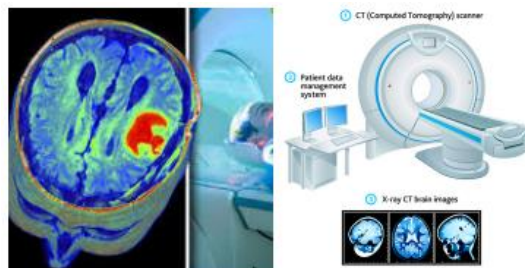
En relación con la resonancia magnética, esta técnica utiliza el fenómeno de la resonancia magnética nuclear para obtener información sobre la estructura y composición del objeto a

analizar. Su principal aplicación es la producción de imágenes médicas. (Siemens healthineers, 2020)

En la tomografía computarizada, la técnica se basa en tomar muchas mediciones de rayos X desde diferentes ángulos para crear imágenes de áreas específicas de un objeto, se puede apreciar ejemplos de ambas técnicas en la figura 22.

Figura 22

a) Escáner por resonancia magnética. b) Escáner por tomografía computada, respectivamente.



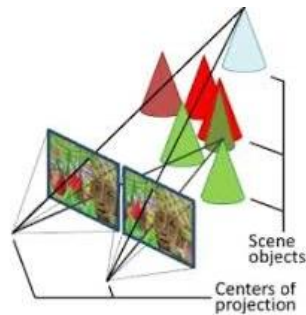
Nota. Tomado de Sistemas de Resonancia Magnética

Técnicas pasivas

Los escáneres pasivos no envían ninguna señal, pero su funcionalidad se basa en la observación de la radiación ambiental reflejada por el objeto. La principal ventaja de este tipo de métodos es que pueden resultar muy económicos porque no requieren ningún hardware especial. En esta clasificación pasiva podemos identificar 2 grupos:

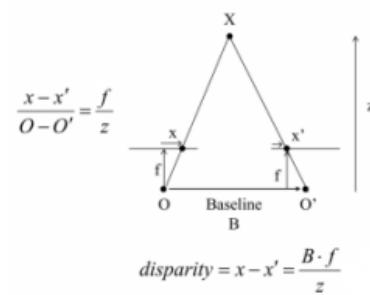
Profundidad de estéreo

Esta técnica requiere 2 cámaras para grabar una escena al mismo tiempo para generar el modelo 3D. Se puede apreciar como las imágenes son proyecciones de puntos 3D sobre una superficie 2D en la figura 23. Los puntos X_1 , X_2 , ... se proyectan en la imagen derecha e izquierda con diferentes coordenadas. (Jorissen, 2017)

Figura 23*Profundidad de estéreo*

Nota. Tomado de Making it work with the stereo-matching technique and texture projection.

Para encontrar los valores de profundidad, triangule y determine la distancia (z) como se muestra a continuación.

Figura 24*Valores de profundidad.*

Nota. Tomado de Making it work with the stereo-matching technique and texture projection.

En este caso,

$$D = \frac{f * b}{d * ps}$$

Siendo:

f: longitud focal

b: línea de referencia

d: valor de disparidad

ps: tamaño de pixel

D: profundidad (depth)

La línea de referencia alude a la distancia entre las cámaras izquierda y derecha. El valor de disparidad se refiere a la diferencia entre las posiciones de los píxeles entre las imágenes de dos cámaras.

La dificultad de este método es ubicar el mismo punto en ambas cámaras (una "coincidencia" entre imágenes)

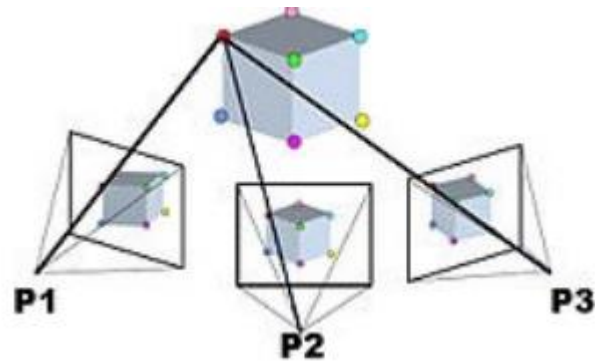
Estructura del movimiento

Esta es una técnica muy efectiva para obtener modelos 3D en el caso de movimiento de cámara u objeto. Debido al movimiento de la cámara o del objeto, la mayoría de los fotogramas de video son diferentes entre sí. Por lo tanto, el valor de profundidad de un fotograma dado se puede estimar analizando la diferencia entre fotogramas consecutivos. Con todo, el proceso incluirá el uso del algoritmo SIFT (un algoritmo de visión artificial para extraer características relevantes de las imágenes) para extraer las singularidades comunes a todas las fotos tomadas.

Esto nos permitirá clasificar estos puntos para reconstruir la imagen desde diferentes ángulos posibles. En la Figura 25, podemos ver cómo se mueve la cámara para tomar diferentes fotogramas, modificando así la posición de las esquinas del cubo (puntos únicos). (Aguirre, 2015)

Figura 25

Esquemático representando la técnica SFM.



Nota. Tomada de Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos

Sistema de Adquisición de imágenes

Para obtener imágenes, es necesario ajustar la cámara y el proyector para que no haya movimiento, ya que esto hará que el sistema se desalinee y ocasione errores en la reconstrucción del objeto. La iluminación de la escena es muy importante. Esto puede causar otros problemas, como identificar sombras, que en realidad no forman parte del patrón. (Aguirre, 2015)

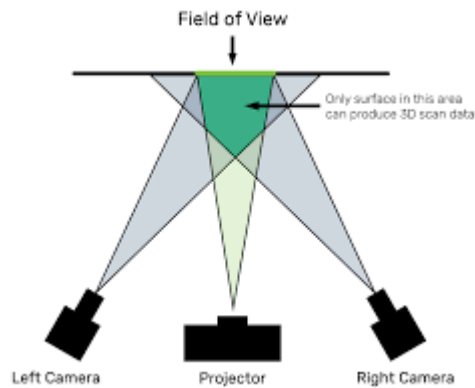
Captura de imágenes para la calibración

La calibración de la cámara y el proyector es un paso clave para obtener el modelo 3D correcto. Por lo tanto, se tomaron una serie de imágenes para su calibración. Después de arreglar todos los elementos, se toma una cantidad suficiente de imágenes (entre 10 y 20) en el tablero de ajedrez. Estas imágenes se tomaron moviendo la placa de circuito y colocándola en diferentes direcciones. Por otro lado, en el caso de una posición fija de la tabla, se utilizan dos cámaras para capturar la última imagen al mismo tiempo. Esto se hace para obtener parámetros externos.

Para cada posición y dirección de la tabla de calibración, se toman imágenes de dos cámaras para tener un punto de referencia común. (Aguirre, 2015)

Figura 26

Calibración de cámaras.



Nota. Tomada de The Basics of the Structured-Light 3D Scanning Process

Captura de las imágenes del objeto al proyectar patrones

Al proyectar cada patrón de imagen, se utilizan dos cámaras para capturar imágenes al mismo tiempo. En este paso, es importante tener en cuenta que, a través de la programación, se debe aplicar un pequeño retraso adicional entre cada cambio de patrón para permitir el tiempo suficiente para procesar la captura de imagen, por lo que no puede mezclar 2 capturas con 2 patrones diferentes juntos. (Aguirre, 2015)

Tipo de patrones seleccionados para proyectarlos sobre el objeto

El primer paso del proceso es codificar la información en un patrón en el dominio del tiempo. Esto implica la generación de patrones de codificación, que pueden identificar de forma única cada píxel del objeto cuando se proyectan secuencialmente sobre el objeto. Existen varios esquemas para codificar información en una secuencia de patrones, pero los más populares son los códigos binarios y los códigos Gray.

Este tipo de código asegura que solo haya un bit de diferencia entre modos consecutivos. Estos patrones se pueden calcular a partir de los datos binarios simplemente copiando el bit más

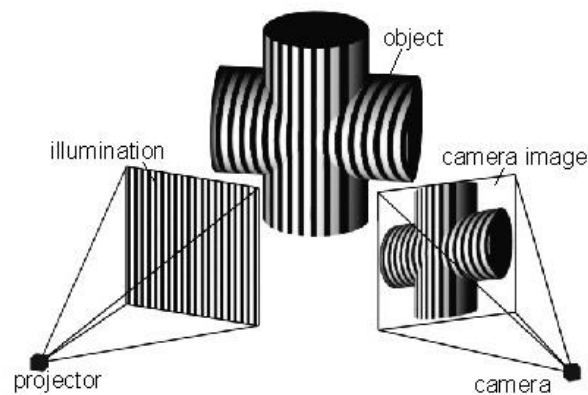
significativo y calculando el XOR del bit actual y el anterior para los bits restantes. La codificación gris se considera la mejor opción. (Aguirre, 2015)

Proceso de calibración

Una parte importante de la tecnología 3D es la calibración de cámaras y proyectores, que es esencial para determinar la precisión de los sistemas 3D. Cuando la luz reflejada en la escena pasa a través del objetivo (a través de la apertura) e interactúa con el sensor de luz, forma la imagen de la cámara. Si no existe tal sensor de luz, la luz convergerá en un solo punto llamado centro de proyección, como se muestra en la Figura 27. (Aguirre, 2015)

Figura 27

Formación de la imagen.



Nota. Tomada de Guía de Escáner por Luz Estructurada

Se puede pensar en un proyector como una cámara invertida donde los rayos de luz emanan de un punto y luego interactúan con la escena.

Tanto en la cámara y proyector, si se conoce la geometría del sistema cuando se toma la imagen, la luz se puede asociar con píxeles específicos. La geometría se define mediante un conjunto de parámetros internos y externos, que se obtienen mediante calibración geométrica.

Dado que la mayoría de los sistemas de imágenes 3D utilizan sensores ópticos 2D, la calibración de la cámara establece el proceso de asociar píxeles en una imagen 2D (en coordenadas de cámara) con líneas rectas en el espacio 3D (en coordenadas del mundo real). Coloque el punto del objeto a lo largo de la línea.

Para calibrar la cámara se utilizan objetos con características geométricas conocidas. En nuestro ejemplo, se utiliza un tablero de ajedrez, como se muestra en la Figura 28. (Fernández, 2018)

Figura 28

Tablero de ajedrez empleado para la calibración.



Nota. Tomado de Digitalizador 3D para diagnóstico y tratamiento de pie plano.

Al tomar fotografías del tablero de ajedrez en diferentes posiciones y direcciones, podemos calcular los parámetros internos y externos. En la siguiente ecuación, puede ver la matriz de la cámara C , que incluye todos los parámetros de calibración que afectan linealmente al sistema. Otros parámetros (como la distorsión de la lente) no se han introducido en esta ecuación. (Aguirre, 2015)

Figura 29

Matriz de ecuación de la cámara.

$$C = \begin{bmatrix} \alpha & -\alpha \cot \theta & u_0 \\ 0 & \frac{\beta}{\sin \theta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{113} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{32} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix}$$

Nota. Tomado de 3D Real-time Scanning Using aProjector-based Structured Light System

El primer término se refiere a los parámetros intrínsecos (parámetros de la cámara) y el segundo término se refiere a los parámetros externos (parámetros que dependen de la posición de la cámara).

En dicha matriz de la figura 29 los parámetros son:

α : kfx ,

β : kfy ,

Siendo:

f_x y f_y : son distancias focales en el eje x e y respectivamente.

Θ : es el ángulo de sesgo,

u_0 y v_0 : representa un punto principal en los ejes x e y respectivamente

r y t : determinan la rotación y la traslación de la cámara

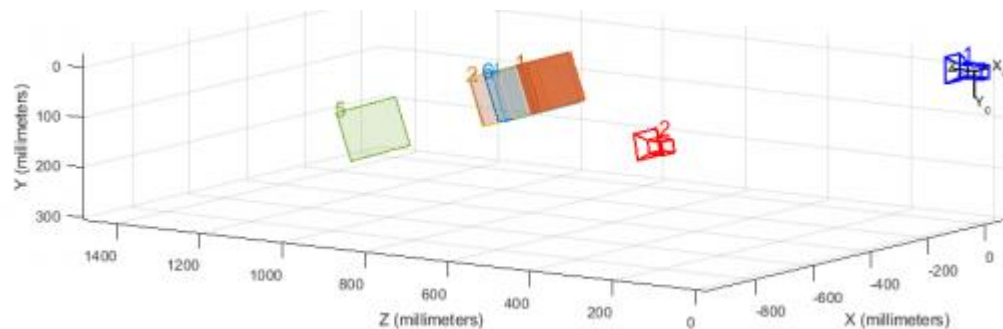
Los parámetros inherentes también incluyen coeficientes de deformación: se utilizan tres coeficientes para la deformación radial y dos coeficientes para la deformación tangencial. Aunque teóricamente, la matriz C de la cámara se puede calcular a partir de una sola imagen, se recomienda tomar de 10 a 20 imágenes de la tabla de calibración en diferentes direcciones y posiciones para minimizar los errores en el cálculo. (Aguirre, 2015)

Para calcular los parámetros externos de cada cámara, se deben haber calculado los parámetros internos. Utilice la imagen en el origen del sistema de referencia especificado para calcular la rotación y la traslación. Por esta razón, todas las cámaras del sistema deben capturar la escena al mismo tiempo para tomar la misma posición y orientación del patrón de calibración. De esta forma, se puede utilizar el mismo origen de coordenadas para correlacionar el movimiento entre cámaras, es decir, rotación y traslación. (Aguirre, 2015)

La Toolbox de Matlab se utiliza para realizar la misma calibración. Los resultados tras el proceso de calibración son muy similares a los obtenidos antes. Pero la Toolbox también proporciona un gráfico para visualizar las posiciones de la cámara y el tablero de ajedrez en diferentes posiciones, como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Calibración mediante Matlab y posicionamiento de las cámaras



Nota. Tomada de Desarrollo de un escáner 3D mediante cámaras estereoscópicas e iluminación láser

Procesamiento digital de imágenes

Decodificación de las imágenes capturadas

Identificación de las regiones de sombra

Dado que la cámara ve el objeto desde un ángulo diferente al del proyector, habrá áreas de sombra que deben ignorarse durante la reconstrucción. Esto se puede lograr proyectando imágenes en blanco y negro sobre el objeto. Un píxel de sombra es un píxel de sombra en el que la diferencia de intensidad entre las dos imágenes capturadas es menor que un cierto umbral, que se definirá según las condiciones de iluminación del entorno en el que se produzca la captura. (Aguirre, 2015)

Puede ver un ejemplo de extracción de sombras de objetos en la Figura 31 a continuación. Se puede observar que el área representada por el negro es el área que pertenece al área sombreada, por lo que no se toma en consideración en la reconstrucción.

Figura 31

Extracción de sombras de un objeto.



Nota. Tomada de Escaneo 3D, escanear objetos brillantes o muy oscuros

Decodificación de los patrones

Existen varias estrategias para reconstruir la imagen a partir de la luz reflejada por el objeto. Un buen principio es agregar marcas de profundidad al patrón de franjas obtenido, recordando que cualquier desplazamiento de franjas se puede convertir directamente en coordenadas 3D. Para ello, el reconocimiento de patrones debe realizarse por separado, por ejemplo, utilizando el conteo de rayas (mediante métodos de reconocimiento de patrones).

Otro procedimiento consiste en proyectar la mitad del estándar en blanco y la otra mitad en negro para generar una secuencia binaria de códigos Gray y asignar un valor a cada muestra codificada. De esta manera, se puede refinar la información de profundidad relativa de un píxel en relación con sus píxeles vecinos. Una vez que se adquiere la profundidad de todos los píxeles, se puede reconstruir el objeto tridimensional. (Aguirre, 2015)

Método empleado en el proyecto.

El desarrollo de la decodificación del patrón de proyección es necesario para poder asociar los píxeles de la imagen capturada por la cámara con los mismos píxeles del proyector.

Como se mencionó anteriormente, el patrón emitido sigue la secuencia Gray. El proceso de decodificación sigue los pasos que se discutirán a continuación. Primero, debe tenerse en cuenta que, para cada píxel, la coordenada x (valor decimal decodificado por el patrón horizontal) y la coordenada y (valor decimal decodificado por el patrón vertical) se utilizarán para obtener el valor decimal.

Cabe señalar que se han generado 10 patrones horizontales y 10 patrones verticales, por lo que se agrupan los patrones pareados. Para cada píxel, se comprobará si la diferencia de intensidad entre los mismos píxeles en las dos imágenes está dentro del rango válido, en cuyo caso la diferencia es menor que un cierto umbral. El resultado de cada píxel será un 0 o 1 de 10 bits, dependiendo de si el píxel está en el rango correcto. Posteriormente, lo único que se debe hacer es pasar estos 10 bits a su valor decimal. Este proceso debe repetirse para todos los píxeles de las 2 cámaras utilizando el patrón horizontal (proporcionado por X_{dec}) y el patrón vertical (valor Y_{dec}). Por lo tanto, para cada píxel de cada cámara, se realizará la decodificación X_{dec} , Y_{dec} . (Aguirre, 2015)

En la Figura 32 se muestra una imagen, en la que se puede ver el sistema utilizado para decodificar cada punto de la imagen.

Figura 32

Mapeado entre píxeles de las cámaras y del proyector.



Nota. Tomada de 3D Real-time Scanning Using a Projector-based Structured Light

Reconstrucción de la nube de puntos

Reconstrucción

Transformación de píxel a rayo

El haz de luz de la cámara es una línea en el espacio que comienza en el centro de la proyección de la cámara y se denomina rayo. El rayo se puede definir por su vector de punto y dirección. Para obtener el vector de dirección, debe haber 2 puntos: el primer punto es el centro de la cámara (0,0,0) o de proyección, y el segundo punto es el punto correspondiente al píxel por el que pasa la luz. Esto se puede lograr usando la siguiente expresión: (Aguirre, 2015)

Figura 33

Expresión del píxel direccionado por el rayo.

$$q_{pixel}^{camara} = C^{-1}x \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Donde C es la matriz de la cámara. Después, se debe cambiar el sistema de referencia de estos puntos (desde las coordenadas de la cámara hasta las coordenadas del mundo físico). Para ello se utilizan los parámetros externos obtenidos calibrando la cámara.

$$q = R^{-1}xq^{camara} - R^{-1}xT$$

Donde:

R: la matriz de rotación

T: vector de translación.

Por tanto, el rayo correspondiente al píxel p está definido de la siguiente forma:

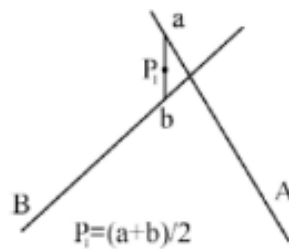
$$R_p = \langle p_{center}, v_{dir} \rangle, conv_{dir} = p_{pixel} - p_{centro}$$

Triangulación

Luego, lo que se procede hacer es triangular los puntos. Dado un píxel en la imagen correspondiente a la cámara 1 y el píxel correspondiente en la imagen correspondiente a la cámara 2, se forman los rayos de ambos, y se debe calcular el punto de intersección. A veces, la luz no se cruza completamente, sino que pasa muy de cerca. Para solucionar esta situación, se traza un segmento de línea perpendicular a los dos con la distancia lo más pequeña posible, y el punto medio del segmento de línea se considerará como el punto de intersección. En las imágenes 34 y 35 se muestran dos diagramas esquemáticos del proceso de triangulación. (Fernández, 2018)

Figura 34

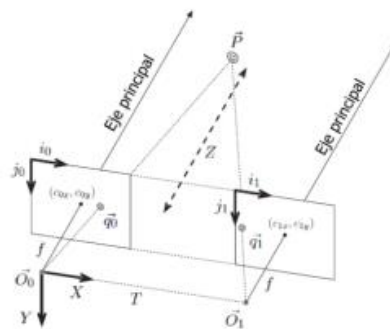
Triangulación de los rayos.



Nota. Tomada de 3D Real-time Scanning Using a Projector-based Structured Light

Figura 35

Triangulación de los rayos.



Nota. Tomada de 3D Real-time Scanning Using a Projector-based Structured Light

A continuación, se explicará en detalle el cálculo de la intersección de los rayos de luz utilizando la ecuación. Consideramos los rayos A y B pasando por los puntos p y q y cuyos vectores de dirección son: u y v.

$$a = p + s * u$$

$$b = q + t * v$$

s y t son valores escalares.

El segmento que conecta los puntos a y b es perpendicular a los rayos y por tanto el producto escalar de sus vectores es 0.

$$(a - b) * u = 0$$

$$(a - b) * v = 0$$

Juntamos las 4 ecuaciones anteriores, para así poder hallar s y t, se obtiene:

$$w * u + s * u * u - t * v * u = 0$$

$$\vec{w} * \vec{v} + s * \vec{v} * \vec{u} - t * \vec{v} * \vec{v} = 0$$

$$\vec{w} = p - q$$

$$s = \frac{\vec{w} * \vec{u} * \vec{w} * \vec{u} - \vec{u} * \vec{u} * \vec{w} * \vec{v}}{\vec{v} * \vec{u} * \vec{v} * \vec{u} - \vec{v} * \vec{v} * \vec{u} * \vec{u}}$$

$$t = \frac{\vec{v} * \vec{u} * \vec{w} * \vec{u} - \vec{u} * \vec{u} * \vec{w} * \vec{v}}{\vec{v} * \vec{u} * \vec{v} * \vec{u} - \vec{v} * \vec{v} * \vec{u} * \vec{u}}$$

Habiendo sacado los puntos s y t, el punto de intersección se calcula de manera sencilla, siendo este el punto medio del segmento que forma s y t:

$$P_i = \frac{(p + s * \vec{u}) + (q + t * \vec{v})}{2}$$

Para cada par de rayos, el punto de intersección se calcula de esta manera, evitando los problemas que pueda causar un par de rayos disjuntos.

Conversión de nube de puntos a malla 3D

Una vez que ya se tiene todos los puntos que representan la escena escaneada, se debe generar una malla tridimensional donde los puntos (vértices) se conectan entre sí para producir arcos y caras.

Hay muchos métodos con diversa complejidad. En este caso, se hallará un método de conversión rápida que aprovecha la relación espacial entre los puntos 3D y los píxeles del proyector. Los vecinos del píxel p se consideran los 8 píxeles circundantes, donde los vecinos colocados en la misma fila o columna que p son los vecinos del primer nivel, y la diagonal son los vecinos del segundo nivel, como se muestra en la Figura 36. (Fernández, 2018)

Figura 36

Píxeles vecinos.

2nd	1st	2nd
1st	p	1st
2nd	1st	2nd

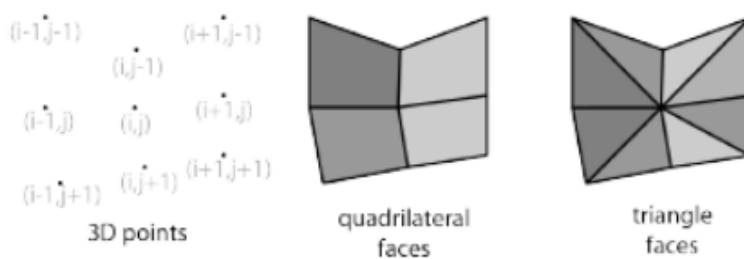
Nota. Tomada de 3D Real-time Scanning Using a Projector-based Structured Light

Los puntos de los píxeles adyacentes están conectados iterativamente entre sí para formar caras, y estas caras pueden tener la forma de un triángulo o un cuadrilátero. Para formar una superficie triangular, los píxeles adyacentes de primer y segundo nivel están conectados entre sí, mientras que una superficie cuadrilátera solo necesita estar conectada al primer nivel

adyacente, como se muestra en la Figura 37. Las mallas con caras triangulares son más complejas que los cuadriláteros. (Fernández, 2018)

Figura 37

Conexiones vecinas del primer nivel.



Nota. Tomada de 3D Real-time Scanning Using a Projector-based Structured Light

Si ninguna de las cámaras puede ver algunos píxeles, el método descrito puede introducir agujeros en la cuadrícula de salida. Este método es versátil y bastante rápido porque se realiza en el espacio de imagen del proyector y es muy efectivo para la mayoría de las áreas de escena. (Fernández, 2018)

Capítulo 3:

Diseño Mecatrónico

En el presente capítulo, se realiza el análisis de cada componente del proyecto, y la metodología de diseño con la cual se va a realizar el proyecto, además se diseña cada parte del sistema de escaneo 3D como son los componentes mecánicos, electrónicos y componentes del sistema de control. También se diseña el software de proyecto y el monitoreo del proceso y su respectiva simulación de resultado.

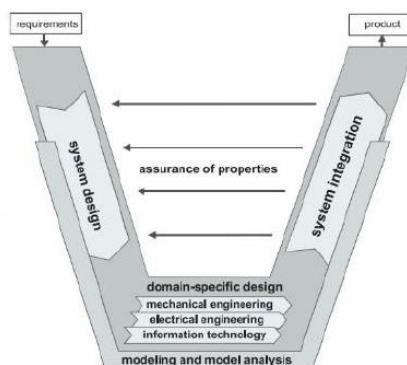
Análisis de los componentes del equipo

Metodología de diseño

Basándose en la Metodología Mecatrónica, desarrollo de modelo en V, como se muestra en la figura 38. Representa la descomposición de las necesidades y la creación de las especificaciones del sistema. También representa la integración de las piezas y su verificación.

Figura 38

Modelo en V.



Nota. Tomada de App Ute.

Esta norma propone un modelo en V para describir la secuencia de niveles en los sucesivos ciclos de diseño de un sistema mecatrónico.

Nivel1: Requerimientos

- El sistema debe ser capaz de reproducir movimientos en los ejes X y Z respectivamente.
- El sistema debe soportar el peso de un objeto no mayor a 4,5 kg.
- Es necesario que cuente con actuadores como motores a pasos para realizar los movimientos en los ejes que se han diseñado.
- Es necesario que la ejecución del programa de control sea realizada por un dispositivo programable, robusto y confiable.
- El sistema debe poseer un proceso automático de escaneo.

Nivel2: Diseño Preliminar del sistema

El sistema estará compuesto por dos partes, una estructura que contendrá el sistema de posicionamiento de las cámaras, y el otro que conformará la plataforma giratoria que contiene el objeto a escanear. El sistema se enlazará por medio de un software que crearemos con algoritmos que se adapten al proceso.

La utilización de software garantiza la flexibilidad para ser adaptado a cualquier sistema operativo y su costo es accesible.

Nivel3: Diseño específico

La estructura del sistema de escaneo está conformada de materiales resistentes para dar soporte al proceso. La estructura debe ser diseñada de tal manera que sea robusta y que ayude a proteger a los componentes que conforman el sistema de escaneo.

Nivel 4: Integración del sistema

El sistema integrará la parte mecánica con la parte electrónica ya que los componentes tanto mecánicos como electrónicos nos ayudan a desarrollar una estructura estática y dinámica estable para el escáner.

Nivel 5: Comprobación de las propiedades

Se comprobará de forma continua la adecuación e integración de los procesos mecánicos y electrónicos y el diseño óptimo de los mismos, y se dará seguimiento a los progresos realizados a la solución concebida inicialmente y sus requisitos.

Nivel 6: Modelado y Análisis del modelo

Una vez realizado el diseño en un software CAD, se procederá a realizar una simulación previa, para luego analizar si existe fallas y poder sacar conclusiones y resolver cualquier problema que se presente. Si en un caso de presentarse problemas en la simulación, se procederá a realizar un rediseño para corregir cualquier tipo de problemas en el sistema.

Nivel 7: Producto

EL último nivel será cuando el escáner esté terminado y listo para ser puesto en marcha.

Criterio de diseño

El proyecto consiste en el diseño y construcción de un sistema de digitalización 3D aplicando el método de luz estructurada, para lo cual se llevará a cabo lo siguiente:

- Estudio del escaneo por el método de luz estructurada.
- Diseño del escáner 3D por el método de luz estructurada.
- Construcción del escáner 3D por el método de luz estructurada.

- Desarrollo del software de escaneo y digitalización de la nube de puntos.
- Experimentación con la proyección de diversos patrones de luz.
- Comparación de resultados y aplicación del sistema de escaneo.

Estudio del escaneo por el método de luz estructurada.

Se realizará el estudio del método de escaneo por luz estructurada, para analizar las deformaciones de los patrones de luz producidas por la intersección del objeto, con el fin de obtener modelos matemáticos que sirvan de base para el desarrollo de algoritmos a ser implementados en el software, además dicho estudio proporcionará información para el diseño mecánico y electrónico del sistema de escaneo.

Diseño del escáner 3D por el método de luz estructurada.

Parámetros técnicos de diseño

La precisión del escáner depende directamente de la calidad del proyector de video, la calidad de la cámara fotográfica, la calibración del escáner y del material del objeto a escanear.

El precio de proyectores y cámaras de alta calidad son muy elevados, esto representa una limitante para la elaboración del proyecto con una alta precisión y resolución de escaneo, es por ello que se centrará en la parte investigativa del método de escaneo y de los patrones de proyección de luz, sin embargo, basándose en las investigaciones como la de Rocchini y Montani donde se construyó un escáner de bajo costo por el método de luz estructurada, y las investigaciones realizadas en la Universidad, el proyecto tendrá como base los parámetros mostrados en la tabla 10, que a su vez durante la ejecución del mismo se enfatizará en mejorarlos.

Tabla 10

Parámetros de diseño del proyecto Escáner 3D Luz Estructurada

Parámetros de diseño Escáner 3D de Luz Estructurada	
Precisión	0,1 mm
Error	< 5%
Tiempo de escaneo	20 s
Color	SI
Resolución	1280x720 pixeles
Campo de visión	300x300 mm
Volumen de trabajo	20-300 mm ³
Peso máximo objeto	4,5 Kg
Plataforma	Diámetro de 300 mm
Calibración	Automática
Formato de salida	PLY
Voltaje de entrada	110 V

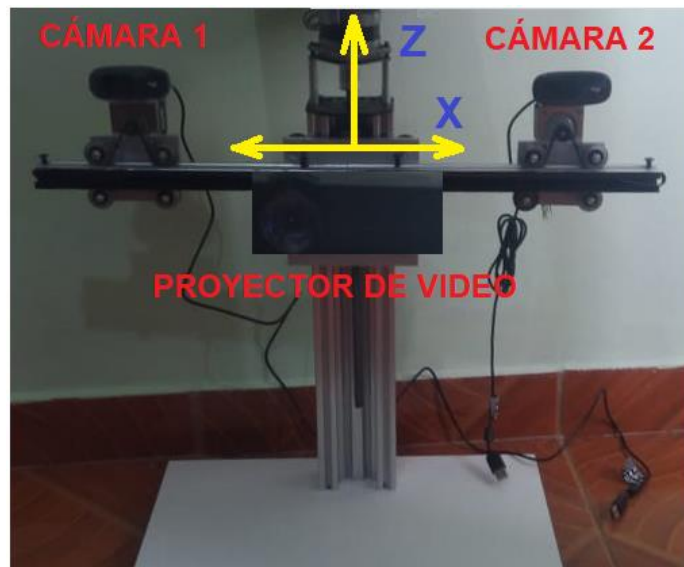
Diseño de plataforma giratoria y estructura mecánica

Se realizará el diseño de una plataforma giratoria automatizada acoplada a un motor para rotar al objeto, esto ayudará a capturar el volumen en sus 360 grados, a su vez se realizará el diseño óptimo de posicionamiento de las cámaras y del proyector con el objeto a escanear.

Se diseñará una configuración rotacional-prismática para el posicionamiento de las cámaras, lo que permitirá calibrar el ángulo de enfoque y la distancia de las cámaras respecto al proyector, además se diseñará un sistema cartesiano de dos grados de libertad para el posicionamiento del conjunto compuesto por las cámaras y el proyector para lograr un enfoque óptimo del sistema con el objeto a escanear, como se aprecia en las figuras 39 y 40.

Figura 39

Sistema de posicionamiento y desplazamiento de las cámaras.

**Figura 40**

Sistema de posicionamiento y desplazamiento del conjunto cámaras-proyector.



Parámetros de calibración y patrones de proyección de luz

Se diseñarán patrones de calibración o plantillas, según las dimensiones del objeto a escanear. La calibración será un proceso automático, esto quiere decir que las cámaras se moverán hasta lograr el enfoque que permita obtener una escala real del objeto a escanear.

Se diseñarán secuencias temporales de patrones de luz, que serán mostrados por el proyector con el fin de registrar la imagen que produce el patrón sobre el objeto a escanear.

Construcción del escáner 3D por el método de luz estructurada

Plataforma giratoria.

Se construirá la estructura de la plataforma considerando los componentes mecánicos y electrónicos que formaran parte del sistema de rotación, realizando un acople mecánico entre plataforma-motor y un óptimo control de velocidad para que el tiempo de escaneado se encuentre dentro de los 20 segundos, esto ayudará a que la resolución de la representación tridimensional del objeto no se vea afectada durante el proceso de escaneo.

Sistema de adquisición de imágenes

El sistema de adquisición de imágenes estará compuesto por dos cámaras que recibirán la información producida por los patrones de luz que emite el proyector.

Se construirá los sistemas de posicionamiento de las cámaras y del conjunto cámaras-proyector, cumpliendo los parámetros que se especificaron en la etapa de diseño.

Las cámaras rotarán alrededor del eje Z para calibrar el ángulo de enfoque y se desplazarán en el eje X para calibrar el cuadro de captura del objeto, a su vez todo el conjunto compuesto por las cámaras y el proyector se desplazará en el eje Z dependiendo de la altura del objeto a escanear y se trasladará en el eje Y dependiendo del volumen del mismo, como se aprecia en la figura 41.

Figura 41

Posicionamiento y desplazamiento del sistema de adquisición de imágenes.



Interfaz Humano Máquina

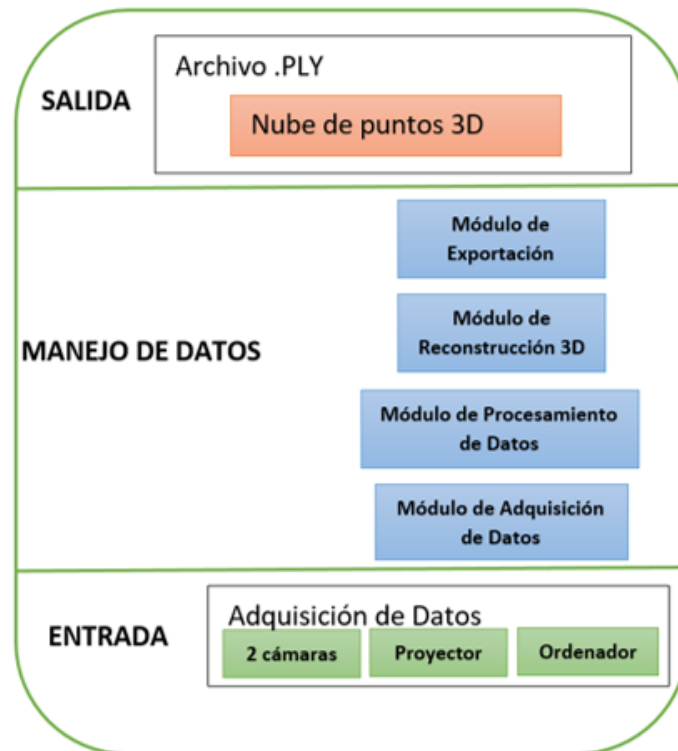
Se construirá una HMI que nos permita la interacción y operación del escáner, por ende, se podrá monitorear, controlar y observar indicadores de avance del proceso.

Desarrollo del software de escaneo y digitalización de la nube de puntos.

En la figura 42 podemos observar la arquitectura del sistema, donde el manejo de datos muestra los componentes que va a tener el software como son los módulos de adquisición de datos, procesamiento de datos, reconstrucción 3D y exportación.

Figura 42

Arquitectura del sistema de escaneo.



Experimentación con la proyección de diversos patrones de luz.

Una vez realizada la construcción del sistema de escaneo, se procederá a realizar la experimentación con las diversas técnicas que existen para la proyección de patrones de luz, como son las siguientes:

- Multiplexado en Tiempo
- Codificación Directa

Así se logrará identificar la incidencia de dichos patrones de proyección en el resultado del escaneo final de un objeto, considerando su forma y material.

Comparación de resultados y aplicación del sistema de escaneo.

Se evaluará porcentualmente los errores de cada parametrización, comparando el dimensionamiento de la nube de puntos del objeto escaneado con el dimensionamiento real del mismo. Para esto se requerirá de un software CAD que posee diversas herramientas de dimensionamiento, esto ayudará a obtener medidas de la nube de puntos previamente exportada.

Diseño de los componentes mecánicos

Selección de motor

Selección motor desplazamiento eje X

Para el cálculo del peso que va a soportar, se toma un aproximado del componente que interfieren directamente, en la tabla 10 se desglosa el peso y cantidad de los mismos. Conocidos estos pesos, se procede a determinar el peso total que va a soportar la estructura en el eje X.

Tabla 11

Peso de los componentes en el eje X

Componente	Peso [kg]	Cantidad	Peso Total [kg]
Estructura	2	1	2
Guia Lineal	0,3	1	0,3
Riel	0,2	2	0,4
Motor a pasos	0,4	3	1,2
			3,9

Como se observa en la Tabla 11, la suma de los componentes da un peso total aproximado de 3,9 [kg], al cual se lo multiplica por un factor de seguridad de 2, con el fin de controlar anticipadamente las incertidumbres de diseño. De esta forma se obtiene la masa [m]

con la cual se va a desarrollar el cálculo y dimensionamiento de componentes estructurales y funcionales del escáner. (Budynas, Shigley, & Nisbett, 2008)

$$m_x = 2 * 3,9 [kg]$$

$$m_x = 7,8 [kg]$$

Para calcular el torque necesario de los motores a pasos encargados del desplazamiento de las cámaras, se determina la fuerza ejercida por el conjunto dada por:

$$F_x = (W_z + \mu_{aa} * W_x) * g$$

Con el fin de garantizar un diseño confiable se multiplica a dicha fuerza por un factor de carga de 2, según se recomienda en Budynas. (Budynas, Shigley, & Nisbett, 2008)

$$F_x = 2 * (W_z + \mu_{aa} * W_x) * g$$

Donde:

F_x : fuerza de carga sobre los apoyos del conjunto X-Z, en N;

W_x : componente del peso en X, en kg;

W_z : componente del peso en Z, en kg;

μ_{aa} : coeficiente de fricción acero con acero, adimensional;

g : gravedad, en [m/s²]

$$W_z = m_z * \cos(90)$$

$$W_z = 7,8 [kg] * 0$$

$$W_z = 0 [kg]$$

$$W_x = m_z * \sin(90)$$

$$W_x = 7,8 [kg] * 1$$

$$W_x = 7,8 [kg]$$

$$F_x = 2 * (0 + 0,15 * 5,51) * 9,8$$

$$F_x = 16,2 [N]$$

Una vez que se conoce la fuerza necesaria para mover el conjunto de cámaras en el plano x, se determina el torque necesario para desplazar las cámaras, tomando en cuenta un brazo de 0,14 [m] y su radio de 0,07[m], utilizando un sistema de transmisión.

$$\tau_{xz} = r_p * F_x$$

Donde:

τ_{xz} : torque necesario para desplazar el conjunto X-Z, en Nm;

r_p : radio acción, en m;

$$\tau_{xz} = 0,07 [m] * 16,2[N]$$

$$\tau_{xz} = 1,134 [N.m]$$

Dado que este torque total τ_{xz} será distribuido en dos motores paso a paso, se calcula el torque por motor (τ_{pm}):

$$\tau_{pm} = \frac{\tau_{xz}}{\# \text{ de motores}}$$

$$\tau_{pm} = \frac{1,134 [N.m]}{2}$$

$$\tau_{pm} = 0,567 [N.m]$$

Según el análisis de los cálculos realizados, se requiere un motor que tenga un τ_{pm} 0,567 Nm, para lo cual se selecciona un motor NEMA 17 de las características indicadas en la Tabla 12, que cumple con las especificaciones necesarias de torque para la manipulación del conjunto X-Z.

Tabla 12

Especificaciones generales del motor NEMA 17

Especificaciones Generales					
Modelo	Norma	Ángulo de	Corriente	Torque	Peso [kg]
	NEMA	paso	[A]	[N.m]	
17HD4800	17	1,8°	1,7	0,59	0,38

Figura 43

Motor NEMA 17



Nota. Tomado de Motor paso a paso 14 Kg/cm, Nema 23 BricoGeek

Al implementar dos motores de 0,59 Nm de torque, resulta un torque total de 1,18 Nm que cumple con el requerimiento de diseño para la traslación del conjunto X-Z.

Debido a que el peso es similar al que debe soportar la Estructura giratoria, se implementó el motor NEMA 17, ya que la plataforma giratoria, soporta solamente 5 [kg] de peso más la base circular.

Selección motor desplazamiento eje Z

Para el dimensionamiento del motor del eje Z es necesario conocer el torque τ_z requerido para mover el conjunto cámaras-proyector y sus componentes de máximas dimensiones. Debido a que el escáner en su estructura tiene un peso de 8,02 [kg] como se muestra en la tabla 13:

Tabla 13

Peso de los componentes en el eje Z

Componente	Peso [kg]	Cantidad	Peso Total [kg]
Cámara	1,81	2	3,62
Proyector	2,5	1	2,5
Guia Lineal	0,3	1	0,3
Riel	0,2	2	0,4
Motor a pasos	0,4	3	1,2
			8,02

$$F_z = 2 * (m_z * \mu_{sa}) * g$$

Donde:

F_z : fuerza máxima de carga en el eje Z, en N;

m_z : peso de conjunto cámaras-proyector y demás componentes, en kg;

μ_{sa} : Coeficiente de fricción, adimensional;

g : gravedad, en [m/s²]

$$F_z = 2 * (8,02 * 0,13) * 9,8$$

$$F_z = 20,85 [N]$$

Con la fuerza F_z , se calcula el torque necesario para desplazar dicha masa tomando en cuenta el diámetro del rodillo. Para el diseño del rodillo se considera que este no debe exceder la altura de la estructura principal, razón por la que se dimensiona el rodillo para un radio de 35 [mm]. Comparando con el catálogo del fabricante Rodillos Codimar, el radio mínimo para un rodillo en este tipo de aplicaciones es de 25 mm, validando de esta forma el radio de 35 mm para esta máquina. (Codimar)

$$\tau_z = r_B * F_z$$

Donde:

τ_z : torque necesario para el movimiento del eje Z, en Nm;

r_B : radio del rodillo, en m;

$$\tau_z = 0,035 * 20,85$$

$$\tau_z = 0,73 [N.m]$$

Conociendo el torque $\tau_z = 0,73 [N.m]$, se analiza comercialmente que el motor NEMA 23 de $\tau_z = 0,75 [N.m]$, de torque cuyas características se describen en la Tabla 14.

Tabla 14

Especificaciones generales del motor NEMA 23

Especificaciones Generales					
Modelo	Norma	Ángulo de	Corriente	Torque	Peso [kg]
	NEMA	paso	[A]	[N.m]	
57BYG059A	23	1,8°	1,1	0,75	2,9

Figura 44*Motor NEMA 23*

Nota: Tomado de 57BYG059A Nema23 Y Axis Step Motor 104oz.in For Cutting Plotter

El motor NEMA 23 cumplen con las necesidades técnicas y resulta ser económicamente más conveniente que otras opciones, por lo que se emplea estos componentes.

Plataformas

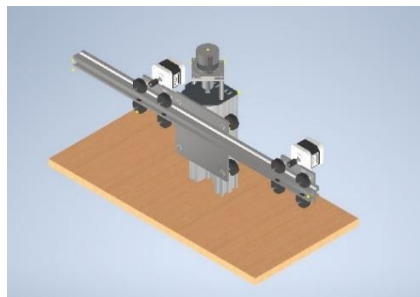
Plataforma principal

Tabla 15

Elementos de Diseño de Plataforma principal

Figura 45

Plataforma principal escáner 3D Luz estructurada.

**Figura 46**

Base General

Base General

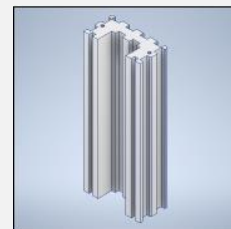


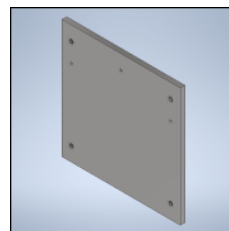
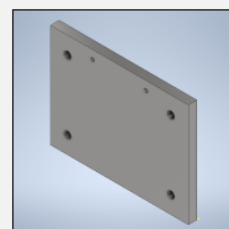
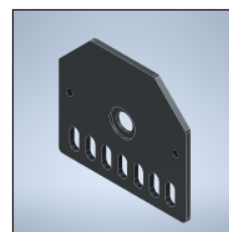
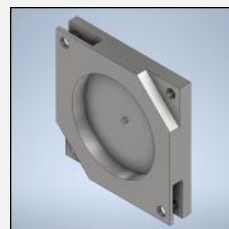
Figura 47*Base Motor Central.***Base Motor Central****Figura 48***Base_motor.***Base_motor****Figura 49***Base superior.***Base superior****Figura 50***Base motor central.***Base motor central**

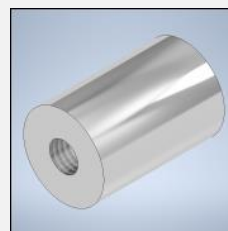
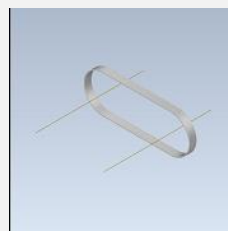
Figura 51*Piñon 2.5 19 dientes.***Piñon 2.5 19 dientes****Figura 52***Acople eje***Acople eje****Figura 53***Riel de motores de lados.***Riel de motores de lados****Figura 54***Correa Síncrona.***Correa Síncrona**

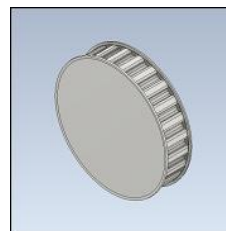
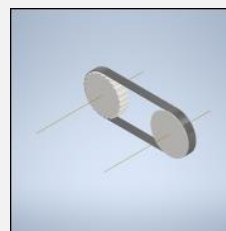
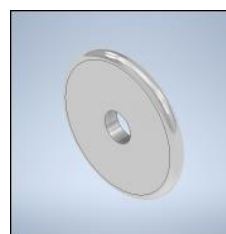
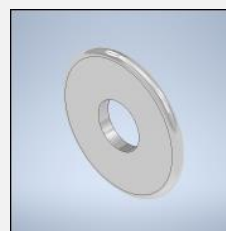
Figura 55*Polea Síncrona.***Polea Síncrona****Figura 56***Transmisión de correas.***Transmisión de correas****Figura 57***Rodela 2mm.***Rodela 2mm****Figura 58***Rodela 4mm.***Rodela 4mm**

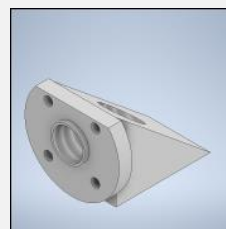
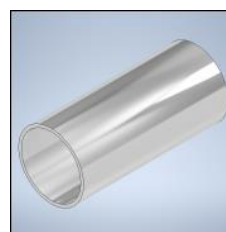
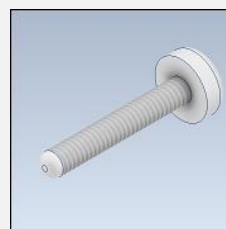
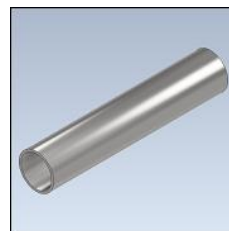
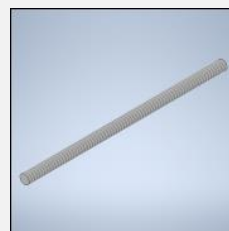
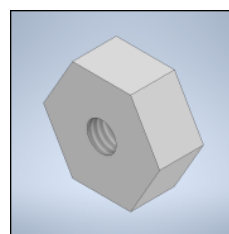
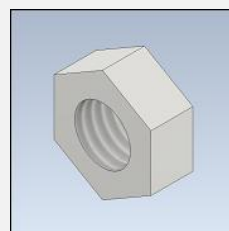
Figura 59*Rueda de riel.***Rueda de riel****Figura 60***Soporte base central.***Soporte base central****Figura 61***Soporte de llantas.***Soporte de llantas****Figura 62***Tornillo r2mmx13mm.***Tornillo r2mmx13mm**

Figura 63*Tubo.***Tubo****Figura 64***Varilla central.***Varilla central****Figura 65***Tuerca 2mm.***Tuerca 2mm****Figura 66***Tuerca 4mm.***Tuerca 4mm**

Plataforma giratoria

Tabla 16

Elementos de diseño de Plataforma Giratoria

Figura 67

Plataforma giratoria

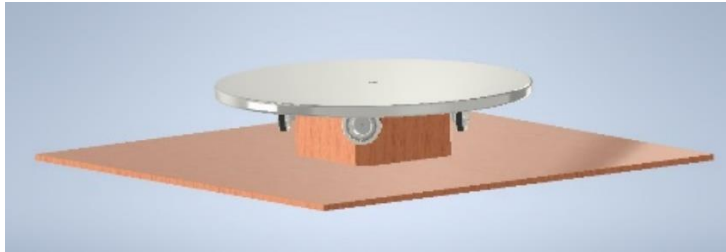


Figura 68

Base Giratoria

Base Giratoria

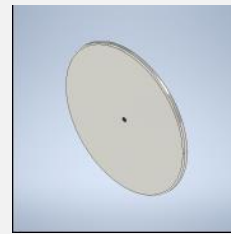


Figura 69

Base General

Base General

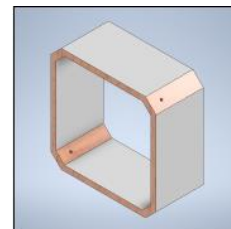
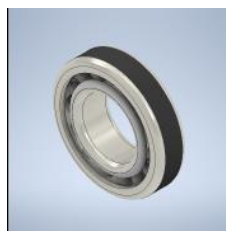
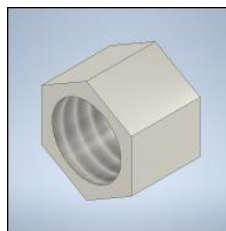


Figura 70*Rueda interna Ruliman***Rueda interna Ruliman****Figura 71***Rulimán***Rulimán****Figura 72***Tornillo 2mm***Tornillo 2mm****Figura 73***Tuerca 2mm***Tuerca 2mm**

Diseño de los componentes eléctricos y/o electrónicos

Diseño elementos electrónicos principales

El diseño del escáner 3D requiere de la selección y acoplamiento electrónico para su funcionamiento, y se ha realizado un análisis de cada componente que va a ser utilizado para su mejor comprensión. Los componentes electrónicos a considerar en este dimensionamiento son:

- Sistema de escaneo
- Tarjeta electrónica de control
- Sensores
- Fuente de poder
- Protección eléctrica
- Cableado

Sistema de escaneo

El sistema de escaneo 3D está formado de 2 componentes principales.

Alimentación: está encargado de dar energía a todo el conjunto cámaras-proyector.

Escaneo: Esta compuesta por las cámaras y el proyector de video.

Cámara web Logitech C270 HD

Se utilizan 2 cámaras web iguales (C270), como la mostrada en la figura 74. Las cámaras utilizadas son de gama media, y son muy accesibles ya que son de costo accesible, y tienen la capacidad de capturar imágenes de hasta 1280x720 pixeles.

Figura 74*Cámara web Logitech**Nota. Tomada de videoconferencias HD, LOGITECH***Tabla 17***Datos técnicos Cámara Web Logitech (C270)*

Datos técnicos Cámara Web Logitech (C270)	
Resolución máx	720p/30 fps
Tipo de enfoque	foco fijo
Tecnología de lente	estándar
Campo visual	60°

*Nota. Tomada de videoconferencias HD, LOGITECH***Mini Proyector de video HD 720p 1280x720****Figura 75***Proyector de video HD 720p**Nota. Tomada de Proyector 720p clasificación y opinión, Penalwebcom*

El proyector se utiliza para generar los patrones sobre el objeto a ser escaneado. El presente proyector presenta una resolución similar al de las cámaras de 1280x720, es importante porque eso ayuda a la calibración. Es conveniente que la resolución de la cámara sea igual o mayor al del proyector para ser capaces de capturar toda la pantalla y reconstruir el objeto 3D correctamente.

Tabla 18

Datos técnicos Mini Proyector de video HD 720p 1280x720

Datos técnicos Mini Proyector de video HD 720p 1280x720	
Resolución física	1280x720 píxeles
Distancia de proyección (m)	1,2 ~ 3,8 metros
Brillo	2800 lúmenes

Nota. Tomada de Proyector 720p clasificación y opinión, Penalwebcom

Tarjeta electrónica de control

Para el funcionamiento del escáner 3D, es necesario dimensionar la tarjeta electrónica. En el diseño es común emplear microcontroladores, entre estos el Arduino por su fácil programación y costos accesibles. El objetivo del Arduino es controlar el manejo de sensores, actuadores y drivers. Además, es indispensable considerar los componentes adicionales para la tarjeta electrónica, como los denominados shields, que son dispositivos que permiten extender las capacidades de los microcontroladores. El shield debe contar con los puertos necesarios para controlar 5 motores, 3 sensores de posición, 2 termistores y la interfaz HMI.

Figura 76

Shield de Arduino ramps 1,4



Nota: Tomado de Tomado de CuteDigi, RAMPS 1.4 RepRapp Arduino Mega Pololu Shield For 3D printer Rep

Sensores

Sensor Ultrasónico

El sensor ultrasónico, es un sensor de distancia que lo elegimos, debido a la necesidad de posicionamiento y su señal es muy importante ya que con la distancia que genera, el conjunto cámaras-proyector de video se ubican en la posición correcta para escanear el objeto.

Figura 77

Sensor Ultrasónico.



Nota. Tomado de HC-SR04 sensor de distancia ultrasónico, GeekFactory

Tabla 19

Datos técnicos sensor Ultrasónico

Datos técnicos sensor Ultrasónico

Alimentación	5 volts
---------------------	---------

Datos técnicos sensor Ultrasónico

Rango de medición	2 cm a 400 cm.
Frecuencia del pulso	40 Khz
Señal de disparo	10uS.
Interfaz sencilla	Solamente 4 hilos Vcc, Trigger, Echo, GND.
Corriente de alimentación	15 mA.
Apertura del pulso ultrasónico	15°
Dimensiones del módulo	45x20x15 mm.

Nota. Tomado de HC-SR04 sensor de distancia ultrasónico, GeekFactory

Celda de carga 5 kg

El presente sensor fue seleccionado, ya que se ajusta a las características técnicas que buscamos que es para la plataforma giratoria y que condiciona el peso de los objetos a ser escaneados.

Figura 78

Celda de carga 5 kg.



Nota. Tomada de Sensor Fuerza Peso, Eneka

Tabla 20

Datos técnicos celda de carga 5 kg

Datos técnicos celda de carga 5 kg

Carga	5 Kg.
Impedancia de entrada	1115 ± 10% Ω.

Datos técnicos celda de carga 5 kg

Tensión máxima de funcionamiento	15 VDC.
Impedancia de salida	1000 \pm 10% O.
Dimensiones	12.7 x 12.7 x 75mm (3,15 x 0,5 x 0,5")
Material	Aleación de aluminio

. Nota. Tomada de Sensor Fuerza Peso, Eneka

Fuente de poder

Para la alimentación del sistema es indispensable seleccionar una fuente de poder con la potencia suficiente para alimentar a cada uno de los componentes que forman parte del escáner 3D.

Tabla 21

Consumo eléctrico de los componentes principales del escáner 3D

Dispositivo	Voltaje [V]	Corriente [A]	Cantidad
Motor NEMA 17	12	1,7	3
Motor NEMA 23	12	1,1	1
Estructura	12	3,3	1
Componentes de control	12	1	1

Asumiendo un factor de seguridad de 2 para demanda de corrientes pico, se obtiene el requerimiento de la fuente de poder para el escáner 3D, detallado en la Tabla 22.

Tabla 22

Requerimiento para la fuente de poder del escáner 3D

Voltaje [V]	Corriente [A]	Factor de Seguridad [A]	Potencia [W]
12	14	28	336

Debido a la necesidad de una fuente de 336 W, se selecciona una fuente LRS- 350-12 como muestra la Figura 79, cuyas características principales son 350 W, 12 V y 29 A, cumpliendo así los parámetros requeridos en el diseño.

Figura 79

Fuente de poder LRS-350-12



Nota: Tomado de Tomado de Wehopower

Protección eléctrica

Para la protección eléctrica de los componentes contra picos en la corriente de alimentación se dimensiona un fusible mediante la siguiente expresión:

$$P_{sal} = V_{in} * I_{in} * f_p$$

Donde:

P_{sal} : potencia de salida de la fuente, en W;

V_{in} : voltaje RMS de entrada de la fuente, en V;

I_{in} : corriente RMS de entrada de la fuente, en A;

f_p : factor de potencia, adimensional;

Despejando I_{in} se obtiene:

$$I_{in} = \frac{P_{sal}}{V_{in} * f_p}$$

$$I_{in} = \frac{350}{110 * 1}$$

$$I_{in} = 3,18 [A]$$

Con la corriente de entrada a la fuente, se calcula la corriente pico I_p .

$$I_p = I_{in} * \sqrt{2}$$

$$I_p = 3,18 [A] * \sqrt{2}$$

$$I_p = 4,5 [A]$$

Como resultado del cálculo realizado, se selecciona un fusible de 5 A a 125 V.

Dimensionamiento del cableado eléctrico

Bajo la premisa de que la demanda de corriente más alta en el sistema de control es de 1,7 A, en el motor NEMA 17 y en la corriente de la fuente es de 28 A, se selecciona el cableado AWG que muestra la Tabla 23. (Table)

Tabla 23

Cableado para el escáner 3D

Función	AWG	Diámetro [mm]	Resistencia [Ohms]	Corriente Máxima [A]
Control	17	1,15	5,06	2,9
Alimentación	7	3,67	0,5	30

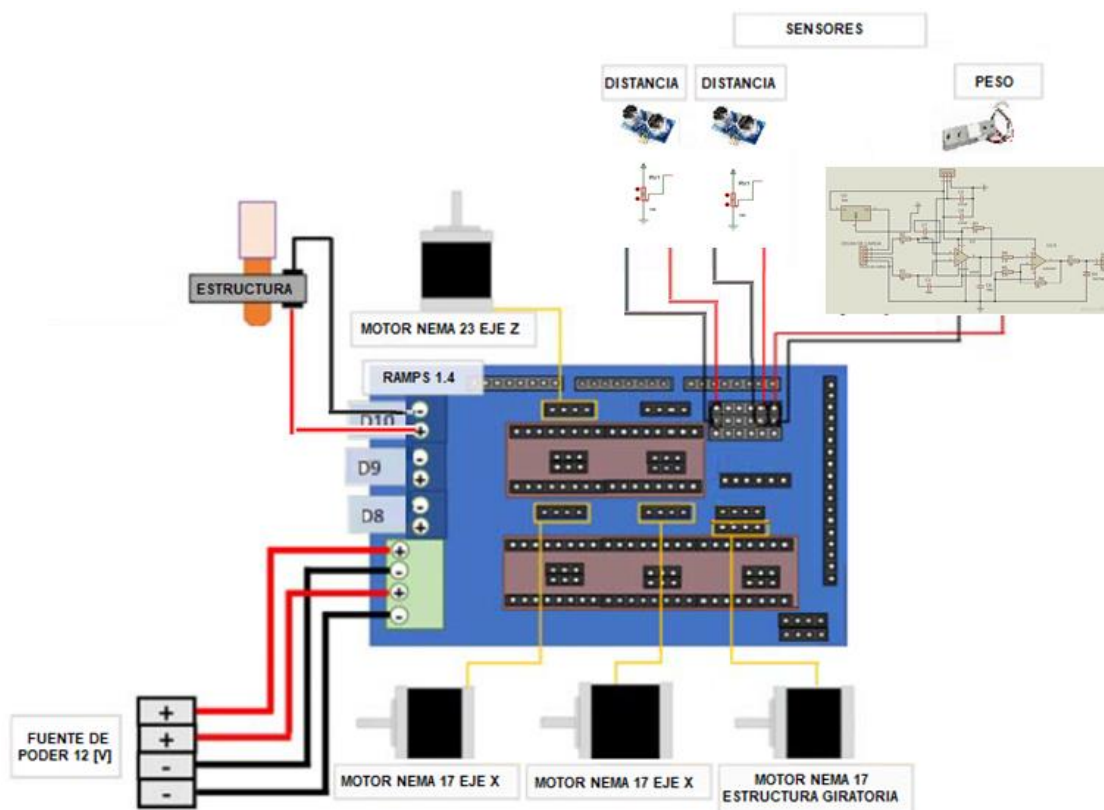
Nota: Tomado de American Wire Gauge Conductor Size Table

Conexión de componentes electrónicos

Para la conexión de los dispositivos electrónicos mencionados en la sección se realiza el diagrama de conexiones indicado en la Figura 80.

Figura 80

Diagrama de conexión de los componentes electrónicos



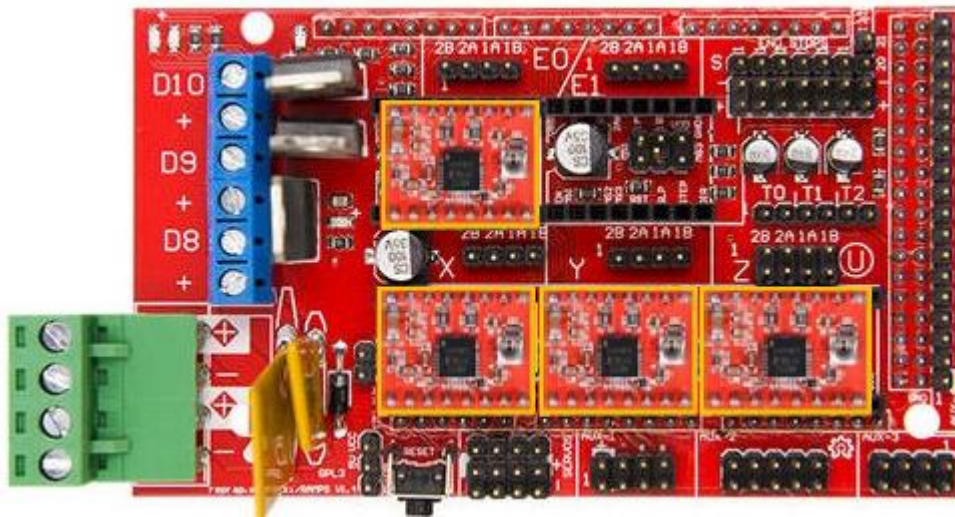
Conexión de Drivers

Drivers A4988

Para controlar los motores NEMA 17 de 1,7 A y NEMA 23 de 1,1 [A] es necesario conectar los drivers A4988 a la RAMPS 1.4 como indica la Figura 81.

Figura 81

Diagrama de conexión de drivers A4988 a RAMPS 1.4

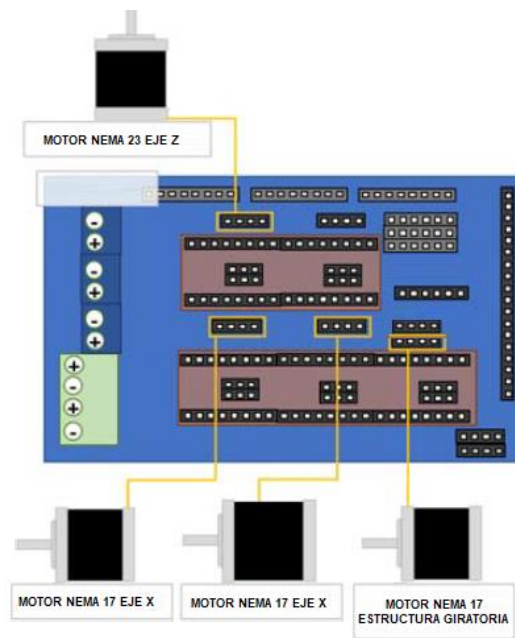


Conexión de Motores

El escáner 3D cuenta con 3 motores NEMA 17 de 1,7 [A]; de los cuales se usan dos para el eje X, y otro se utiliza para la plataforma giratoria. Estos motores se conectan a la salida de la RAMPS correspondiente a los drivers A4988. Además, se utiliza un motor NEMA 23 de 1,1 [A] para el movimiento del eje Z que eleva y descende el conjunto cámaras-proyector. El diagrama de conexión se lo puede ver en la Figura 82.

Figura 82

Diagrama de conexión de motores.

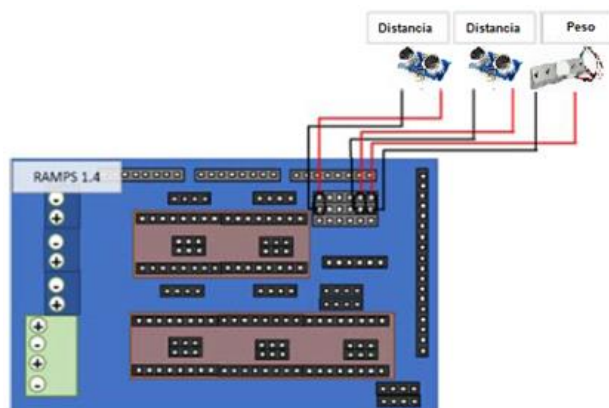


Conexión de Sensores

Los sensores de distancia y de peso a ser utilizados se conectan como muestra la Figura 83, debido a que de esto dependerá para que el conjunto se desplace dependiendo del tamaño del objeto a escanear.

Figura 83

Diagrama de sensores del escáner 3D



Acondicionamiento de sensores:

Celda de carga

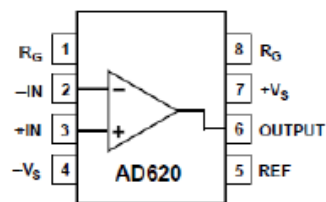
El acondicionamiento de las señales consta de 3 etapas que se detallan a continuación:

Primera etapa

Se utiliza el amplificador de instrumentación AD620 cuya ganancia viene dada por el fabricante y su diagrama se indica en la Figura 84. En esta etapa se planea tener una ganancia aproximadamente de 100.

Figura 84

Diagrama del integrado AD620

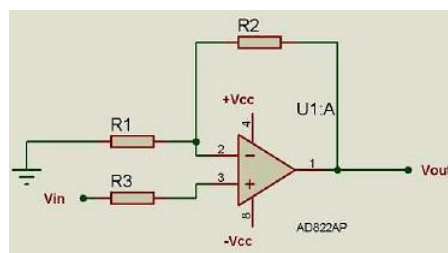


Segunda etapa

Se plantea llegar a un voltaje de salida entre 3,5 y 5 [V] en cada una de las celdas, de modo que la señal se amplifique notablemente para pequeñas variaciones de peso aplicadas. En la figura 85 se puede observar el circuito general del amplificador no inversor.

Figura 85

Circuito no inversor



Primera etapa:

$$G = 1 + \frac{49,4 K}{R_G}$$

Donde:

G : Ganancia

R_G = Resistencia de ganancia

Reemplazando el valor de ganancia deseada se obtiene el valor de resistencia requerido:

Utilizando un valor estándar:

$$R_G = 470 [\Omega] \rightarrow G = 106$$

Los valores de voltaje a la salida de la primera etapa se observan en la tabla 24.

Tabla 24

Voltaje de salida de la primera etapa de amplificación

Celda de carga	Peso [g]	Salida [mV]	Peso [g]	Salida [mV]
5 [Kg]	0	499	2902	710

Etapa no inversora:

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) * V_{in}$$

Reemplazando el valor de voltaje de entrada y salidaa se tiene:

$$5 [V] = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) * 0,71[V]$$

Despejando la relación de ganancia se tiene:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{5}{0,71} - 1$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 6,04$$

Determinando un valor arbitrario para R_2 se obtiene el valor de R_1

Si $R_2 = 33 \text{ [K}\Omega\text{]}$

$$R_1 = 4,7 \text{ [K}\Omega\text{]} \rightarrow G = 6,02$$

Comprobando el valor de salida que se obtiene con las resistencias determinadas se tiene:

$$V_{in} = 6,02 * 0,71 \text{ [V]}$$

$$V_{in} = 4,27 \text{ [V]}$$

Tabla 25

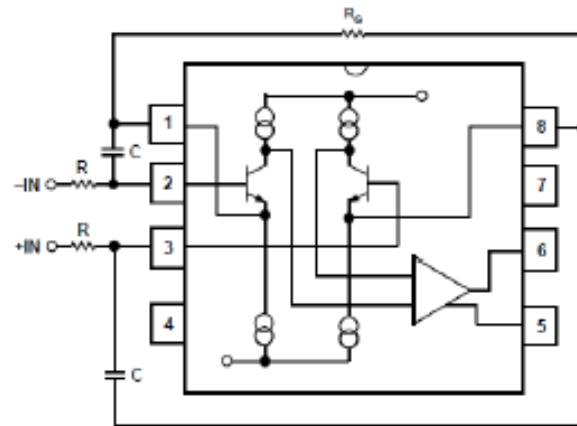
Valores de resistencia del circuito de acondicionamiento de la celda de carga

Etapa 1 Amplificador de Instrumentación	
R_G	4,7 [KΩ]
Etapa 2 No inversora	
R_1	4,7[KΩ]
R_2	33 [KΩ]

Las señales acondicionadas están expuestas al ruido, ya sea debido al rizado de la fuente utilizada o a interferencias externas, por otro lado, aún los mejores amplificadores de instrumentación no poseen rechazo en modo común para frecuencias mayores a 20 [kHz] entonces es necesario la implementación de un filtro pasa bajo. El fabricante del circuito integrado AD620 recomienda utilizar la configuración que se observa e la figura 86.

Figura 86

Circuito de filtro para el AD620



El fabricante presenta la ecuación que se observa:

$$RC = \frac{1}{2\pi f}$$

Y manifiesta que:

$$f \geq \text{ancho de banda del AD620 (120 [kHz] y } C \leq 150 \text{ [pF])}$$

Entonces se definen los siguientes valores:

$$f = 120 \text{ [kHz] y } C = 100 \text{ [pF]}$$

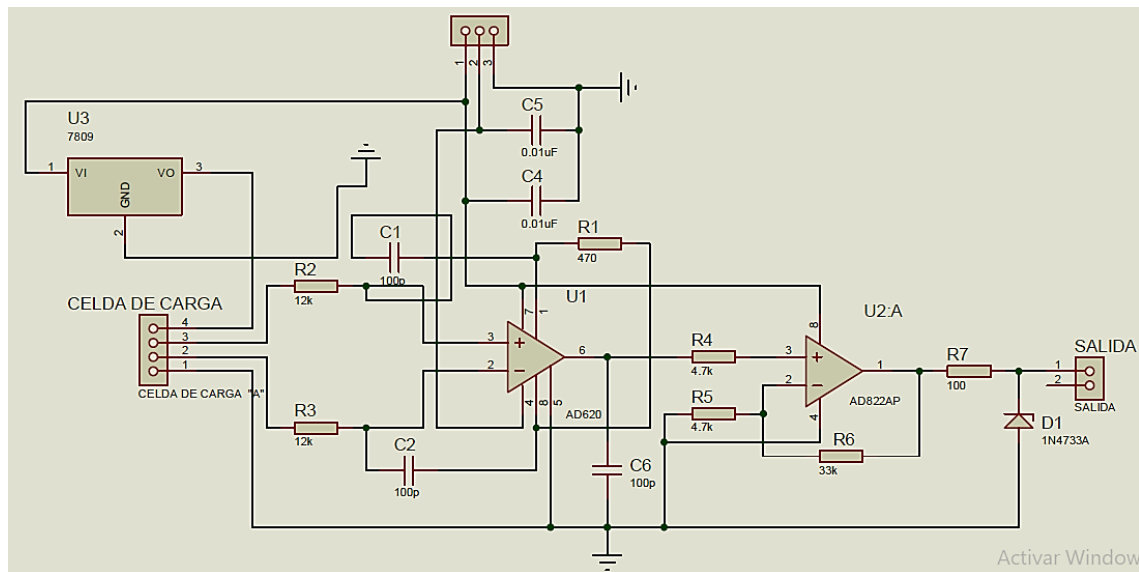
$$\rightarrow R = 12 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

También se colocan capacitores de 0,01 [uF] entre las fuentes de alimentación y tierra.

En la figura 87 se indica el circuito completo de acondicionamiento para la celda de carga.

Figura 87

Circuito de acondicionamiento celda de carga 5 [kg]



Sensor ultrasónico HC SR04

Para calcular la distancia se toma en cuenta la mitad del valor de la velocidad del sonido, esto es debido a que la señal se dirige hacia al objeto y rebota hacia el sensor, es decir hace un doble recorrido. La distancia a obtener con el sensor HC SR04 se muestra en la siguiente ecuación, en donde se muestra la relación que existe entre la distancia y el tiempo que transcurre al enviar y recibir la señal del pin retorno.

$$d = \frac{C * t}{2}$$

En donde:

d = Distancia con sensor HC SR04 (m)

C = Velocidad de propagación (m/s)

t = Tiempo de retorno de señal ultrasónica (s)

En la siguiente ecuación se muestra la distancia convertida en centímetros. Dicho valor ha sido obtenido al reemplazar la velocidad de propagación del sonido a través del aire por su constante igual a 340m/s, y se efectuar la conversión de unidades, para trabajar con la distancia en centímetros y el tiempo en microsegundos.

$$d(cm) = \frac{340 [m]}{2 [s]} * t[s] * \frac{100 [cm]}{1} * \frac{1 [s]}{1000000 [us]}$$

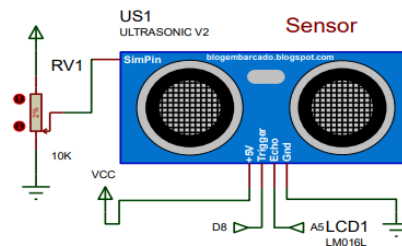
$$d(cm) = \frac{170 * 100 [cm]}{1000000 [us]} * t[us]$$

$$d(cm) = \frac{t[us]}{58}$$

Para el acondicionamiento del sensor se realiza una configuración sencilla con un potenciómetro como se muestra en la figura 88.

Figura 88

Acondicionamiento del sensor Ultrasónico



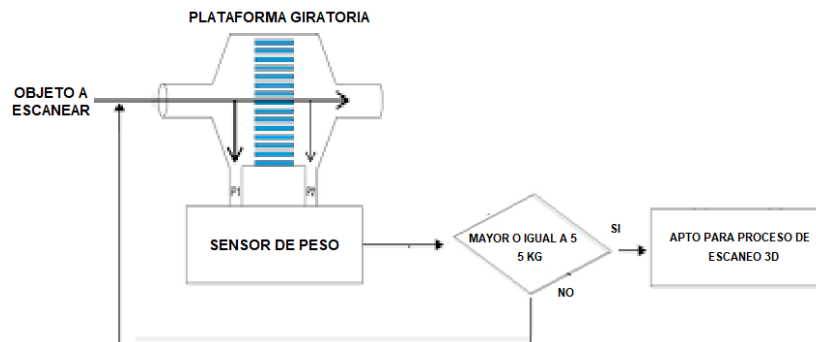
Diseño de componentes del sistema de Control

Control Sensor de peso

En nuestro proyecto el sensor de peso que en nuestro caso es una celda de carga de 5 kg, está adaptado a la base de la plataforma giratoria (circular) para el motor Nema, el cual será uno de los actuadores de la planta; teniendo como resultado el siguiente diagrama.

Figura 89

Diagrama sensor de peso

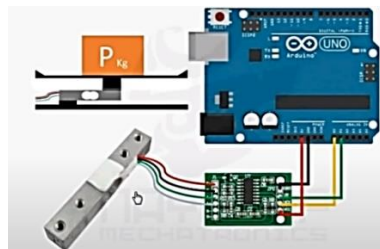


En la figura 89 podemos observar la configuración de la celda de carga de 5 Kg como está ubicada en el proyecto, a continuación, se detallará como es la configuración.

El sistema de la plataforma giratoria consta de un soporte para la celda de carga, sobre el soporte esta la celda fijada en un extremo, mientras que en el otro extremo, podemos encontrar el motor Nema acoplado a la celda de carga y este a su vez soporta la base donde se colocarán los objetos a ser escaneados, quedando así una configuración tipo balanza que inicializará el proceso si se cumple con las condiciones fijadas que no debe ser mayor a 4,5 kg, cabe resaltar que tanto el motor Nema como la base circular tienen un peso que está siendo procesado en el programa y previamente se lo encerrará para no producir datos erróneos en el sistema.

Figura 90

Configuración Celda de carga con la estructura giratoria



Nota. Tomada de transmisor de celda de carga HX711, Naylamp

Diseño del software

El software se lo realizará en el programa Matlab ya que la programación de Matlab se lleva a cabo mediante un lenguaje que es muy parecido a lenguajes de alto nivel como BASIC o C++. También de usar los toolbox para resolver problemas que se generen

TOOLBOX

El Toolbox de Matlab es un conjunto de funciones (almacenadas en archivos m), Proporcionan algoritmos para resolver diferentes tipos de problemas. Además, tiene una interfaz Gráficos para que los usuarios sin experiencia puedan usar fácilmente la caja de herramientas sin Código de explotación.

Esta librería es empleada en el proyecto debido a su gran potencial y las numerosas funciones que tiene definidas para el tratamiento de imágenes, extracción de parámetros de calibración de las cámaras, manejo fácil de las cámaras entre otras. Todo el código se ejecuta en una computadora portátil con procesador i5, conectando las cámaras a los puertos USB de este y el proyector a la salida VGA.

Diseño de la Interfaz Humano Máquina

Figura 91

Diseño HMI



Descripción de los elementos de la HMI

1. Título

En la primera parte tenemos la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y título del proyecto que realizamos

2. Calibración

En esta parte se calibrará de manera automática el proceso una vez colocado el objeto correctamente en la plataforma giratoria, antes de iniciar el proceso de escaneo 3D.

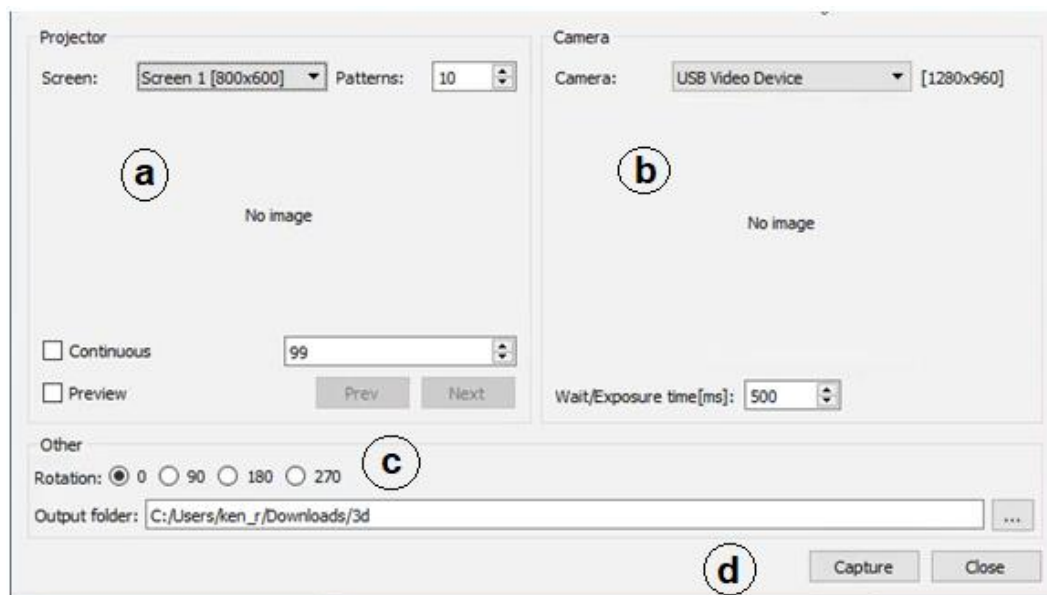
3. Escanear 3D

En esta parte se redirecciona a otra ventana que dará inicio al proceso de escanear 3D por el método de luz estructurada, adicional a esto el sistema no iniciará si previamente no se realizó el debido proceso de calibración.

A continuación, se presentan las ventanas para el proceso de escaneo 3D.

Figura 92

Ventana secundaria 1 escáner



a) Zona del proyector

En esta zona se puede visualizar el proyector de video que tenemos y la función que realiza al momento de escanear los objetos, la cual es proyectar el patrón de imagen para el reconocimiento mediante el programa.

b) Zona de las cámaras

En esta zona se visualiza el objeto a escanear para ver si cumple con las condiciones de escaneo propuestas.

c) Rotación de objetos

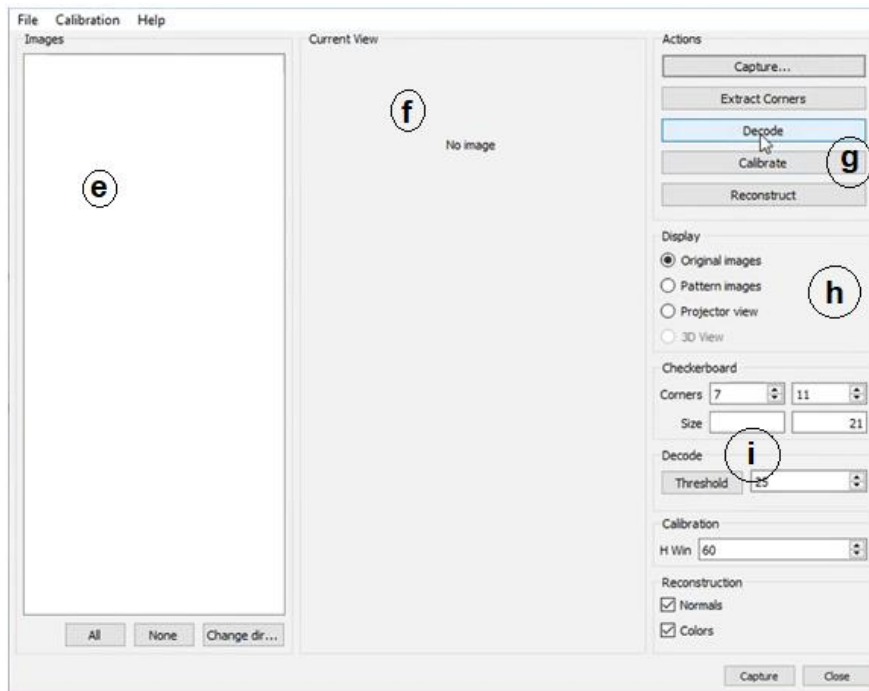
En esta zona observamos el avance del proceso cuando la plataforma comienza a girar hasta capturar el objeto.

d) Guardar imágenes

Se selecciona donde van a ser guardadas el archivo ply que se obtiene en el proceso de escaneo de objetos.

Figura 93

Ventana secundaria 2 escáner



e) Zona de almacenamiento de imágenes

Se van guardando las imágenes que se van capturando para posteriormente ser procesadas por el programa para la reconstrucción del objeto en 3D.

f) Zona visual del objeto a escanear

Se puede observar el objeto colocado en la plataforma giratoria y el proceso de escaneo en tiempo real.

g) Funciones principales de escaneo

En esta parte de la ventana principal se tiene funciones como: captura de imágenes, extracción de esquinas, decodificación, calibración y por último la reconstrucción 3D del objeto.

h) Selección de visualización

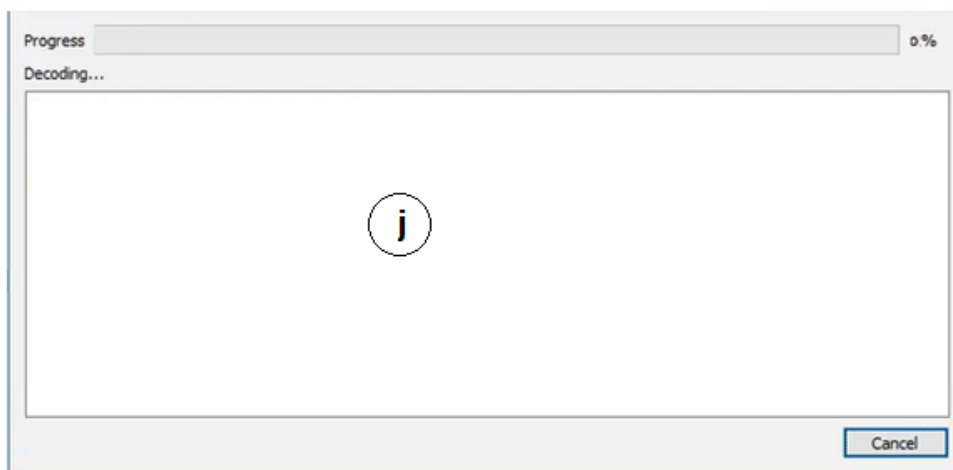
Podemos elegir la visualización de las cámaras, la del proyector o del objeto.

i) Ajustes

Ajustamos los parámetros de escaneo para hacer que el proceso sea más eficiente.

Figura 94

Ventana secundaria 3 decodificación

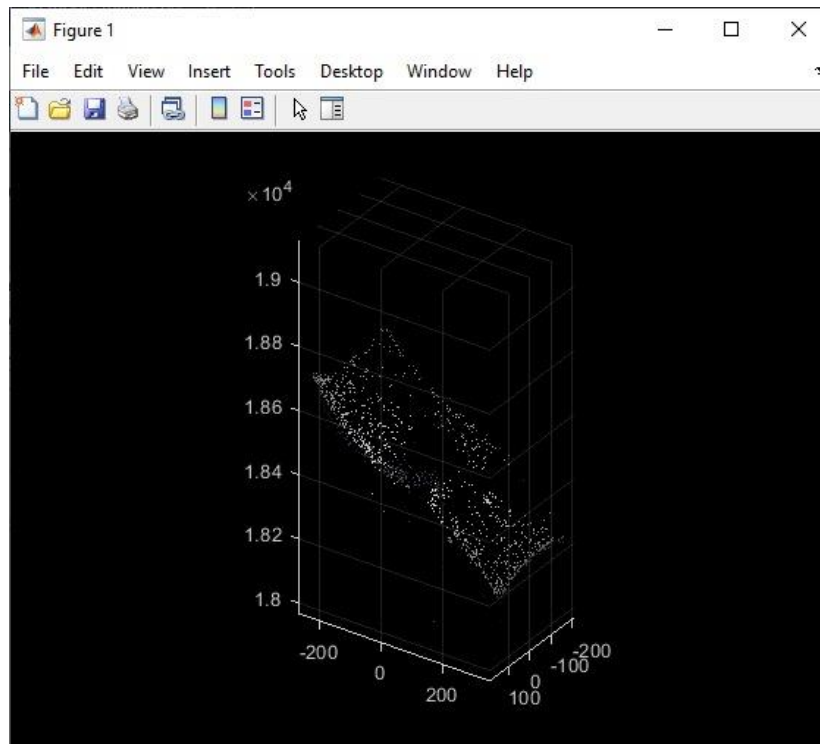


j) Visualización proceso de decodificación

Se observa el proceso de decodificación de las imágenes tomadas en el paso anterior.

Figura 95

Ventana secundaria 4 finalización proceso de decodificación



k) Visualización objeto 3D

En esta zona se puede observar el objeto 3D cuando termina el proceso de escaneo 3D.

4. Autores

En esta parte colocamos el nombre los dos integrantes del proyecto de titulación.

5. Cerrar

En esta parte se cierra el programa de escáner 3D.

Capítulo 4

Implementación

En el presente capítulo se detalla la construcción de los componentes que forman parte del sistema de operación del escáner 3D. Se realiza la integración del sistema de control y de potencia con la parte mecánica del proyecto. Se realiza la programación del sistema de control con algoritmos de funcionamiento de todo el sistema conjunto.

Implementación de los componentes mecánicos

Construcción

Estructura principal

A lo largo de este proceso el cual diseñamos todos los elementos mecánicos, ensamblamos todos los componentes y se tiene:

En la figura 96 podemos observar los componentes principales de la estructura ya que sirven para el desplazamiento en el eje z, y son el tornillo sin fin, un acople para el tornillo y el motor Nema.

Figura 96

Parte 1 de la estructura principal



En la figura 97 podemos apreciar cómo queda el ensamble del componente de la estructura principal que son los más importantes, ya que es aquí donde el sistema se va a desplazar en el eje Z para el posicionamiento vertical del conjunto cámaras-proyector de video.

Figura 97

Primera parte ensamblada estructura principal



En la figura 98 podemos apreciar los elementos de la segunda parte de la estructura principal que da movimiento a las cámaras y hace soporte para el proyector de video.

Figura 98

Parte 2 de la estructura principal



En la figura 99 observamos como queda ensamblada la segunda parte de la estructura principal que da movimiento a las cámaras para su enfoque con el objeto a escanear.

Figura 99

Segunda parte ensamblada estructura principal



En la figura 100, observamos el resultado final de la estructura principal que se ha construido sin la colocación de las cámaras y el proyector.

Figura 100

Estructura principal ensamblada



Estructura Giratoria

En esta parte detallaremos las partes mecánicas por las que está compuesta la estructura giratoria. Como se observa en la figura 101, se implementó un acople para el motor y la celda de carga, para crear un sistema similar a una balanza, que permita el bloqueo si el objeto es muy pesado y pueda causar algún tipo de problema en el proceso.

Figura 101

Conjunto celda de carga-motor Nema



En la figura 102, se muestra la base de madera giratoria en la cual se va a colocar los objetos a ser escaneados y esta a su vez se va a fijar al motor Nema para dar los giros en los 4 principales puntos que son 0° , 90° , 180° y 270° para la toma de imágenes y procesarlas. Todo el sistema giratorio se va a colocar en una caja de madera como se observa en la figura, que va a contener por protección los elementos principales de esta configuración.

Figura 102

Conjunto de la estructura giratoria



En la figura 103 se muestra el resultado de ensamblar todos los elementos de la plataforma giratoria que va a soportar un peso alrededor de 4,5 Kg ya que al estar acoplados tanto el motor como la base circular de madera que tienen cada uno un peso de 0,25 y 0,27 Kg respectivamente, los dos genera un peso que se debe considerar al momento de realizar las mediciones y posteriormente realizar una configuración en el programa principal para encerrar estos valores y evitar que el proceso arranque con un peso mayor al permitido.

Figura 103

Estructura giratoria ensamblada



Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos

Primero para el sensor de peso tendremos que realizar la configuración electrónica y comunicación, que se muestra a continuación:

Lo primero que debemos hacer es calibrar el sensor, que prácticamente es encontrar el valor de la escala que se tendrá; básicamente encontrar el valor de conversión.

Para este paso consideramos un objeto de peso que conocemos, es decir sabemos el peso real del objeto. Para este proceso se recomienda el peso de un objeto que se aproxime al valor máximo de medición de la celda de carga.

Código Arduino calibración de la celda de carga

```
#include "celda.h"

const int OK=A1;

const int MA=A0;

celda peso;

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  peso.begin(OK, MA);

  Serial.print("Lectura del valor del ADC:t");

  Serial.println(peso.read());

  Serial.println("No colocar objetos sobre la base giratoria");

  Serial.println("Destarando...");

  peso.set_scale(); //La escala es 1

  peso.tare(20); //El peso actual =Tare.

  Serial.println("Coloque objeto de peso real:");

}

void loop() {

  Serial.print("Valor por defecto: t");

  Serial.println(peso.get_value(10),0);

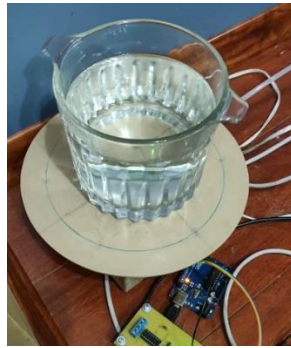
  delay(100); }
```


El programa corre sin colocar un peso de calibración, pues al inicio de programa calcula la tara.

Después de abrir el monitor serial y esperar para que reste la tare, se coloca el objeto de 3,5 Kg.

Figura 104

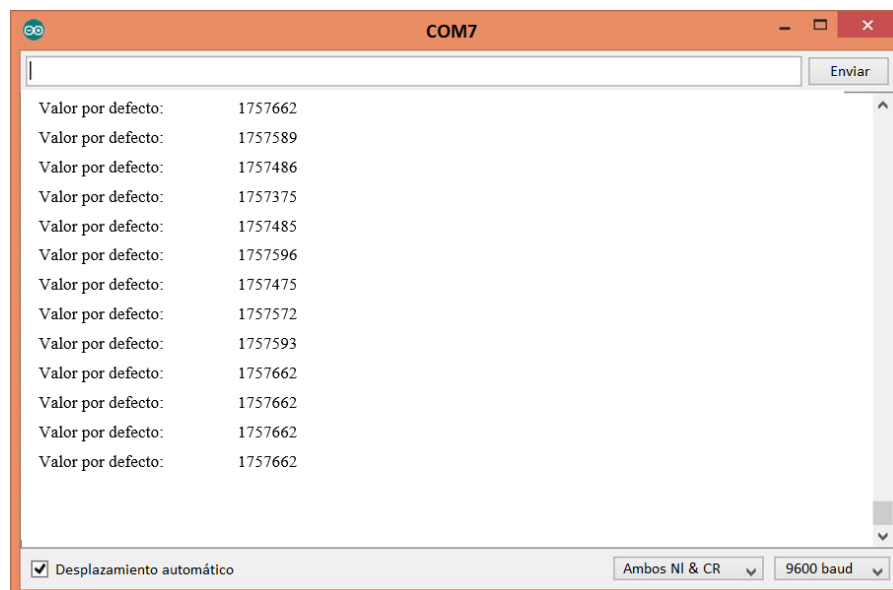
Estructura giratoria con peso de 3,5 Kg



Después de poner el peso en la balanza, en el monitor serial se mostrarán las lecturas del peso, son lecturas sin escalar, por lo que les deben aparecer números grandes.

Figura 105

Valores por defecto programa sensor de peso



Utilizando uno de estos valores que tenemos en la imagen, o a su vez con el promedio para que a escala o tenga tantos errores, se procede a usar la siguiente fórmula:

$$Escala = \frac{Valor\ por\ defecto}{Peso\ real}$$

El valor del peso, se colocará de acuerdo a nuestro requerimiento, si bien puede ser 3,5 kg o 3500 gramos respectivamente.

Entonces el valor de la Escala que usaremos es:

$$Escala = \frac{1757662}{3,5}$$

$$Escala = 502189,14$$

Con este valor de la escala, procedemos a programar el sketch que vamos a utilizar para el proceso de escaneo.

Código final obtención peso real de la celda de carga

```
#include "celda.h"
```

```
const int OK=A1;
```

```
const int MA=A0;
```

```
celda peso;
```

```
void setup() {
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  peso.begin(OK, MA);
```

```
  Serial.print("Lectura del valor del ADC: ");
```

```
Serial.println(peso.read());

Serial.println("No colocar objetos sobre la base giratoria");

Serial.println("Procesando...");

Serial.println("...");

peso.set_scale(502189,14); // Valor de escala

peso.tare(20); //El peso actual es considerado Tare.

Serial.println("Preparados para pesar ");

}

void loop() {

    Serial.print("Peso objeto: ");

    Serial.print(peso.get_units(20),3);

    Serial.println(" kg");

    delay(500);

}
```

A continuación, se presenta el peso de el mismo objeto de vidrio, sin agua, y se realiza la medición por medio del programa previamente realizado y se tiene ya listo para condicionar el peso de los objetos que se vayan a colocar en la base giratoria.

Figura 106

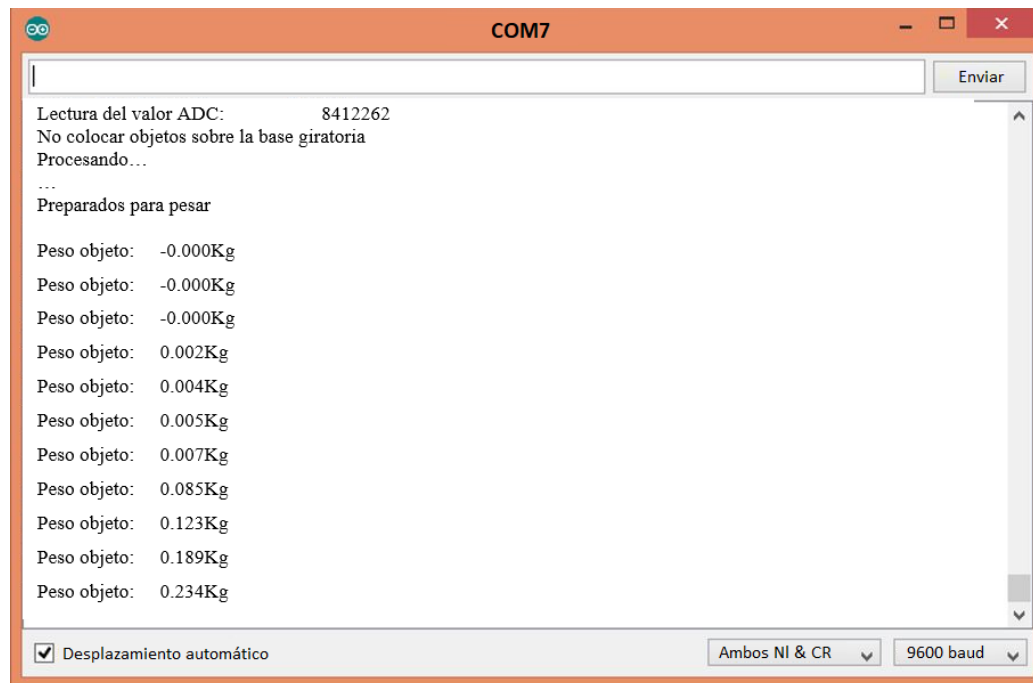
Estructura giratoria con peso de 0,227 Kg



El peso del objeto sin agua pesa 0,227 Kg en valor real ya que pesa 0,5 libras, y con esto comprobamos que el sensor esta calibrado para entregar valores de peso reales para el proceso.

Figura 107

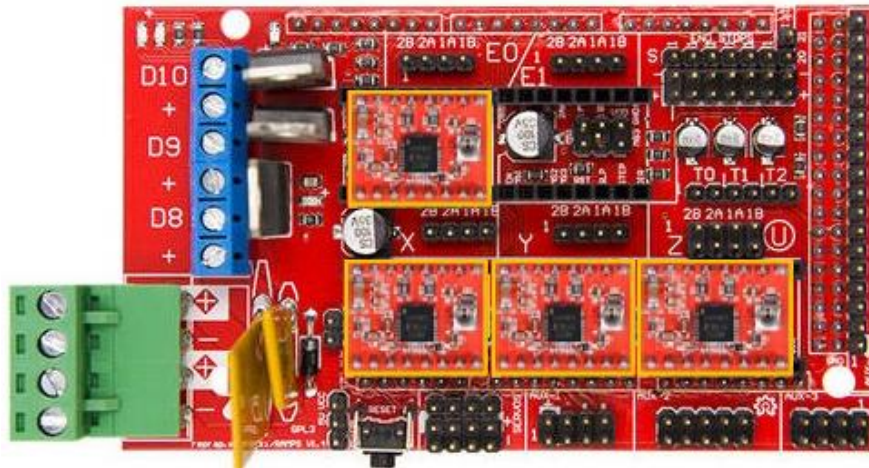
Valores de peso reales



En la figura 108 podemos observar la placa de los motores con sus respectivos controladores para ser manipulados en el programa según corresponda ubicar el conjunto dependiendo del tamaño de los objetos a escanear.

Figura 108

Placa del sistema para los motores y controladores



Programación e Implementación del sistema de control

Código para calibración de las cámaras

% Se definen las imágenes a procesar

```
imageFileNames = {'D:\Scanner 3D\PicturesCalibration\WIN_20200718_19_17_44_Pro.jpg',...
```

% Detector de tableros de ajedrez en las imágenes

```
[imagePoints, boardSize, imagesUsed] = detectCheckerboardPoints(imageFileNames);
```

```
imageFileNames = imageFileNames(imagesUsed);
```

% Generación de coordenadas de las esquinas de los cuadrados

```
squareSize = 19; % en 'mm'

worldPoints = generateCheckerboardPoints(boardSize, squareSize);

% Calibración de la cámara

[cameraParams, imagesUsed, estimationErrors] = estimateCameraParameters(imagePoints,
worldPoints, ...

    'EstimateSkew', false, 'EstimateTangentialDistortion', false, ...

    'NumRadialDistortionCoefficients', 2, 'WorldUnits', 'mm', ...

    'InitialIntrinsicMatrix', [], 'InitialRadialDistortion', []);

% Ver errores de reproyección

h1=figure; showReprojectionErrors(cameraParams);

% Visualizar ubicaciones de patrones

h2=figure; showExtrinsics(cameraParams, 'CameraCentric');

%Mostrar errores de estimación de parámetros

displayErrors(estimationErrors, cameraParams);

originalImage = imread(imageFileNames{1});

undistortedImage = undistortImage(originalImage, cameraParams);
```

Movimiento de cámaras-proyector y proceso de escaneado

% Establecer parámetros de iluminación estructurados.

objName = 'test'; % nombre del objeto (debe corresponder a un directorio de datos)

seqType = 'Gray'; % tipo de secuencia de luz estructurada ('Gray' or 'bin')

dSampleProj = 1; % factor de submuestreo (es decir, resolución mínima del sistema)

projValue = 128; % Gray code intensidad

minContrast = 0.2; % umbral de contraste mínimo (para patrón de código Gray)

screenIndex = 2; % índice de la pantalla del proyector (1 = primero, 2 = segundo, etc.)

frameDelay = 0.3; % frame delay (en segundos)

% Configure los parámetros de reconstrucción.

dSamplePlot = 100; % down-sampling rate para visualización de nubes de puntos Matlab

distReject = Inf; % distancia de rechazo (para la eliminación de valores atípicos)

saveResults = true; % habilitar / deshabilitar la salida de resultados

% Defina la (s) cámara (s) para usar con la Caja de herramientas de adquisición de imágenes.

camName = {'winvideo'};

camID = [1];

%camFormat = {'RGB24_1600x1200'};

camFormat = {'MJPEG_1280x800'};

Parte I: Projete la secuencia del código Gray para recuperar los planos de iluminación.

% Cargue los datos de calibración.

```
load('./calib/calib_results/calib_cam_proj.mat');
```

% Obtenga las propiedades de visualización del proyector.

```
if ~exist('window','var')
```

```
    clear Screen; Screen('Preference', 'SkipSyncTests', 1);
```

```
    Screen('Preference','SuppressAllWarnings',true);
```

```
    window = Screen('OpenWindow',screenIndex,projValue*[1 1 1]);
```

```
    rect = Screen('Rect',window);
```

```
    height = rect(4); width = rect(3);
```

```
end
```

% Genere patrones de franjas de código Gray verticales y horizontales.

% Nota: P {j} contiene los patrones de código Gray para "orientación" j.

% offset (j) es el desplazamiento de fila / columna de entero para P {j}.

% I {j, i} son las texturas OpenGL correspondientes al bit i de P {j}.

% J {j, i} son las texturas OpenGL de la inversa de I {j, i}.

```
if ~exist('I','var') || ~exist('J','var')
```

```
    if strcmp(seqType,'Gray')
```



```

[P,offset] = graycode(width/dSampleProj,height/dSampleProj);

else

[P,offset] = bincode(width/dSampleProj,height/dSampleProj);

end

I = {}; J = {};

for j = 1:2

    for i = 1:size(P{j},3)

        I{j,i} = Screen('MakeTexture',window,projValue*imresize(P{j}{:,:i},dSampleProj));

        J{j,i} = Screen('MakeTexture',window,projValue*imresize(1-P{j}{:,:i},dSampleProj));

    end

end

% clear P;

end

% Inicialice la (s) cámara (s) y asigne almacenamiento.

% Nota: asegúrese de optimizar la configuración de la cámara.

% A {j, i} es la imagen de la cámara de I {j, i}.

% B {j, i} es la imagen de la cámara de J {j, i}.

if ~exist('camera','var')

    camera = camInit(camName,camID,camFormat);

end

```

```
A = cell(size(I));

B = cell(size(I));

% Mostrar mensaje para comenzar a escanear.

if ~exist('allOn','var') || ~exist('allOff','var')

    allOn = Screen('MakeTexture',window,projValue*ones(height,width,'uint8'));

    allOff = Screen('MakeTexture',window,zeros(height,width,'uint8'));

end

Screen('CopyWindow',allOn>window,rect,rect);

Screen('Flip',window);

clc; disp(['Structured Light for 3D Scanning']);

disp('Place object and press stop button in preview window to continue...');

camPreview(camera)

% Inicialice la pantalla del proyector y adquiera imágenes "todo encendido" y "todo apagado".

%Screen('HideCursorHelper',window);

Screen('CopyWindow',allOn>window,rect,rect);

Screen('Flip',window); pause(frameDelay);

T{1} = camCapture(camera);

Screen('CopyWindow',allOff>window,rect,rect);
```

```
Screen('Flip',window); pause(frameDelay);

T{2} = camCapture(camera);

% Visualice / capture imágenes usando el proyector y la (s) cámara (s) PGR.

disp('Scanning object...');

disp('+ Displaying structured light sequence...');

for j = 1:size(I,1)

    for i = 1:size(I,2)

        % Muestra y captura el patrón de franjas de código Gray actual.

        Screen('CopyWindow',I{j,i},window,rect,rect);

            Screen('Flip',window); pause(frameDelay);

        A{j,i} = camCapture(camera);

        Screen('CopyWindow',J{j,i},window,rect,rect);

            Screen('Flip',window); pause(frameDelay);

        B{j,i} = camCapture(camera);

    end

end

end
```

```

% Desactiva la visualización de pantalla completa.

%Screen('ShowCursorHelper',window);

Screen('CopyWindow',allOff>window,rect,rect);

Screen('Flip',window);

% clear I J;

% Estimar la etiqueta de columna / fila para cada píxel (es decir, decodificar códigos Gray).

% Nota: G {j, k} es el código Gray estimado para la "orientación" j y la cámara k.

% D {j, k} es la estimación de fila / columna de entero.

% M {j, k} es la máscara por píxel (es decir, píxeles con suficiente contraste).

disp('+ Recovering projector rows/columns from structured light sequence...');

G = cell(size(A,1),length(camera));

D = cell(size(A,1),length(camera));

M = cell(size(A,1),length(camera));

C = inv([1.0 0.956 0.621; 1.0 -0.272 -0.647; 1.0 -1.106 1.703]);

C = C(1,:);

for k = 1:length(camera)

    for j = 1:size(A,1)

        G{j,k} = zeros(size(T{1}{1},1),size(T{1}{1},2),size(A,2),'uint8');

        M{j,k} = false(size(T{1}{1},1),size(T{1}{1},2));

        for i = 1:size(A,2)

```

% Convertir par de imágenes a escala de grises.

```
%grayA = rgb2gray(im2double(A{j,i}{k}));
```

```
%grayB = rgb2gray(im2double(B{j,i}{k}));
```

```
grayA = imlincomb(C(1),A{j,i}{k}(:,:,1),...
```

```
    C(2),A{j,i}{k}(:,:,2),...
```

```
    C(3),A{j,i}{k}(:,:,3),'double');
```

```
grayB = imlincomb(C(1),B{j,i}{k}(:,:,1),...
```

```
    C(2),B{j,i}{k}(:,:,2),...
```

```
    C(3),B{j,i}{k}(:,:,3),'double');
```

% Elimina todos los píxeles que no superen el umbral de contraste.

```
M{j,k}(abs(grayA-grayB) >= 255*minContrast) = true;
```

% Estime el bit actual de código Gray del par de imágenes.

```
bitPlane = zeros(size(T{1}{1},1),size(T{1}{1},2),'uint8');
```

```
bitPlane(grayA(:,:,i) >= grayB(:,:,i)) = 1;
```

```
G{j,k}(:,:,i) = bitPlane;
```

```
end
```

```
if strcmp(seqType,'Gray')
```

```
    D{j,k} = gray2dec(G{j,k})-offset(j);
```

```
else
```

```
    D{j,k} = bin2dec(G{j,k})-offset(j);
```

```

    end

    D{j,k}(~M{j,k}) = NaN;

end

end

%clear A B G grayA grayB bitPlane;

% Elimina estimaciones de columnas / filas no válidas.

% Nota: Esto excluirá los píxeles si falta la columna o la fila.

% D {j, k} es la columna / fila para la "orientación" j y la cámara k.

% mask {k} es la máscara general por píxel para la cámara k.

mask = cell(length(camera));

for k = 1:length(camera)

    mask{k} = M{1,k};

    for j = 1:size(D,1)

        if j == 1

            D{j,k}(D{j,k} > width) = NaN;

        else

            D{j,k}(D{j,k} > height) = NaN;

        end

    end

    D{j,k}(D{j,k} < 1) = NaN;

```

```

for i = 1:size(D,1)

    D{j,k}(~M{i,k}) = NaN;

    mask{k} = mask{k} & M{i,k};

end

end

end

% Muestra la columna / fila del proyector recuperada.

figure(1); clf;

set(gcf,'Name','Recovered Projector Column Indices');

imagesc(cat(2,D{1,:})); axis image off; colormap(jet(256));

set(gca,'Pos',[0 0 1 1]); drawnow;

figure(2); clf;

set(gcf,'Name','Recovered Projector Row Indices');

imagesc(cat(2,D{:})); axis image off; colormap(jet(256));

set(gca,'Pos',[0 0 1 1]); drawnow;

figure(3); clf;

set(gcf,'Name','Reference Image for Texture Mapping');

imagesc(cat(2,T{1}{:})); axis image; colormap(jet(256));

set(gca,'Pos',[0 0 1 1]); drawnow;

```

Parte II: reconstruir la superficie usando la intersección de línea-plano.

% Reconstruir puntos 3D utilizando la intersección con los planos de iluminación.

% Nota: Reconstruye a partir de todas las cámaras en el primer sistema de coordenadas de cámara.

```
vertices = cell(1,length(Nc));
```

```
colors = cell(1,length(Nc));
```

```
disp('+ Reconstructing 3D points...');
```

```
for i = 1:length(Nc)
```

```
    idx = find(~isnan(D{1,i}) & ~isnan(D{2,i}));
```

```
    [row,col] = ind2sub(size(D{1,i}),idx);
```

```
    npts = length(idx);
```

```
    colors{i} = 0.65*ones(npts,3);
```

```
    Rc = im2double(T{1}{i}(:, :, 1));
```

```
    Gc = im2double(T{1}{i}(:, :, 2));
```

```
    Bc = im2double(T{1}{i}(:, :, 3));
```

```
    vV = intersectLineWithPlane(repmat(Oc{i},1,npts),Nc{i}(:,idx),wPlaneCol(D{1,i}(idx,:)));
```

```
    vH = intersectLineWithPlane(repmat(Oc{i},1,npts),Nc{i}(:,idx),wPlaneRow(D{2,i}(idx,:)));
```

```
    vertices{i} = vV';
```

```
    rejectIdx = find(sqrt(sum((vV-vH).^2)) > distReject);
```

```
    vertices{i}(rejectIdx,1) = NaN;
```



```
vertices{i}(rejectIdx,2) = NaN;
```

```
vertices{i}(rejectIdx,3) = NaN;
```

```
colors{i}(:,1) = Rc(idx);
```

```
colors{i}(:,2) = Gc(idx);
```

```
colors{i}(:,3) = Bc(idx);
```

```
end
```

Parte III: muestra los resultados de la reconstrucción y guarda los resultados.

```
% Estado de visualización.
```

```
disp('+ Displaying results and exporting VRML model...');
```

```
% Muestra los resultados de la calibración del proyecto / cámara.
```

```
procamCalibDisplay;
```

```
% Muestra la nube de puntos 3D recuperada (con color por vértice).
```

```
% Nota: Convierta a mapa de color indexado para usar con FSCATTER3.
```

```
for i = 1:length(Nc)
```

```
    C = reshape(colors{i},[size(colors{i},1) 1 size(colors{i},2)]);
```

```
    [C,cmap] = rgb2ind(C,256);
```

```
    hold on;
```

```
        fscatter3(vertices{i}(1:dSamplePlot:end,1),...
```

```
                vertices{i}(1:dSamplePlot:end,3),...
```

```
-vertices{i}(1:dSamplePlot:end,2),...  
  
    double(C(1:dSamplePlot:end)),cmap);  
  
hold off;  
  
axis tight; drawnow;  
  
end  
  
% Cree directorios de datos de salida (si no existen).  
  
if ~exist(['./data/',seqType],'dir')  
  
    mkdir(['./data/',seqType]);  
  
end  
  
if ~exist(['./data/',seqType,'/',objName],'dir')  
  
    mkdir(['./data/',seqType,'/',objName]);  
  
end  
  
for i = 1:length(camera)  
  
    if ~exist(['./data/',seqType,'/',objName,'/v',int2str(i)],'dir');  
  
        mkdir(['./data/',seqType,'/',objName,'/v',int2str(i)]);  
  
    end  
  
end
```

```
% Exportar la nube de puntos de color como un archivo VRML.
```

```
% Nota: Intercambie las coordenadas xey para j3DPGP.
```

```
clear idx; mergedVertices = []; mergedColors = [];
```

```
for i = 1:length(Nc)
```

```
    idx{i} = find(~isnan(vertices{i}(:,1)));
```

```
    vertices{i}(:,2) = -vertices{i}(:,2);
```

```
    vrmlPoints(['./data/',seqType,'/',objName,'/v',int2str(i),'.wrl'],...
```

```
        vertices{i}(idx{i},[1 2 3]),colors{i}(idx{i},:));
```

```
    mergedVertices = [mergedVertices; vertices{i}(idx{i},[1 2 3])];
```

```
    mergedColors = [mergedColors; colors{i}(idx{i},:)];
```

```
end
```

```
if length(Nc) > 1
```

```
    vrmlPoints(['./data/',seqType,'/',objName,'/merged.wrl'],...
```

```
        mergedVertices,mergedColors);
```

```
end
```

```
% Guarde secuencias de iluminación estructuradas capturadas.
```

```
if saveResults
```

```
    disp('+ Saving structured light image sequence...');
```

```
    for camIdx = 1:length(camera)
```

```
        dataDir = ['./data/',seqType,'/',objName,'/v',int2str(camIdx),'/'];
```

```
imwrite(T{1}{camIdx},[dataDir,num2str(1,'%0.02d'),' .bmp']);

imwrite(T{2}{camIdx},[dataDir,num2str(2,'%0.02d'),' .bmp']);

frameIdx = 3;

for j = 1:2

    for i = 1:size(A,2)

        imwrite(A{j,i}{camIdx},[dataDir,num2str(frameIdx,'%0.02d'),' .bmp']);

        frameIdx = frameIdx + 1;

        imwrite(B{j,i}{camIdx},[dataDir,num2str(frameIdx,'%0.02d'),' .bmp']);

        frameIdx = frameIdx + 1;

    end

end

end

end

disp(' ');
```

Capítulo 5:

Pruebas y Resultados

En el presente capítulo se realiza pruebas del escáner 3D mediante luz estructurada, los errores que hay en el sistema se analiza los resultados del sistema mecatrónico realizado.

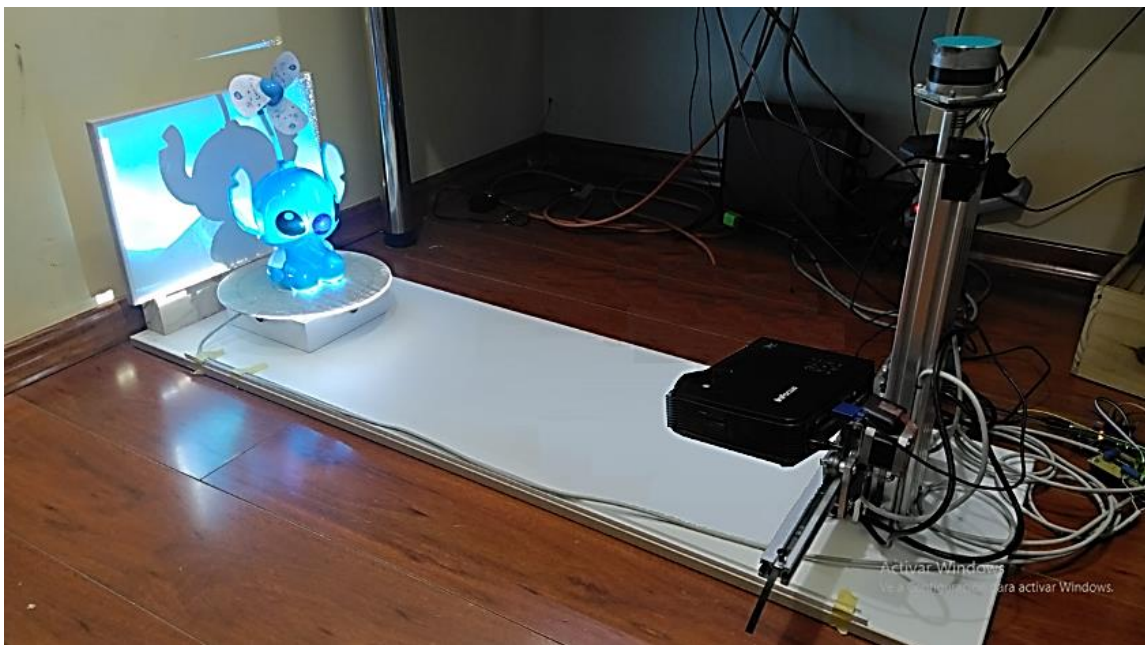
Pruebas y resultados del sistema Mecatrónico general.

Escaneo paso a paso

1. Colocamos el objeto en la estructura giratoria

Figura 109

Objeto colocado en la estructura giratoria

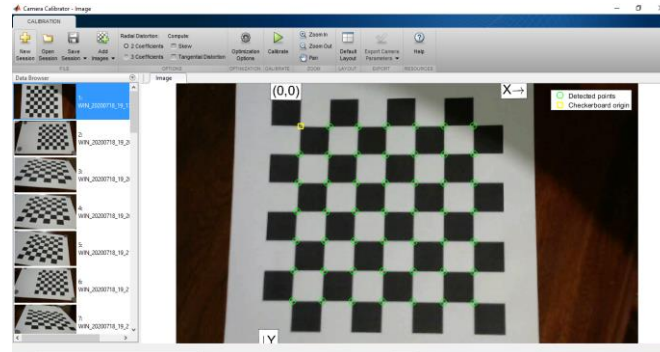


2. Se inicia el posicionamiento del conjunto cámaras proyector dependiendo de la altura del objeto.

3. Se calibra las cámaras con la app calibration de Matlab.

Figura 110

Se calibra el sistema con las imágenes tipo tablero ajedrez



4. Empieza el proceso de escaneo 3D, en esta parte, la plataforma gira en sus 4 principales puntos que son 0° , 90° , 180° y 270° , en cada punto realiza la toma de imágenes para posteriormente ser procesadas y decodificadas

Figura 111

Inicio digitalización

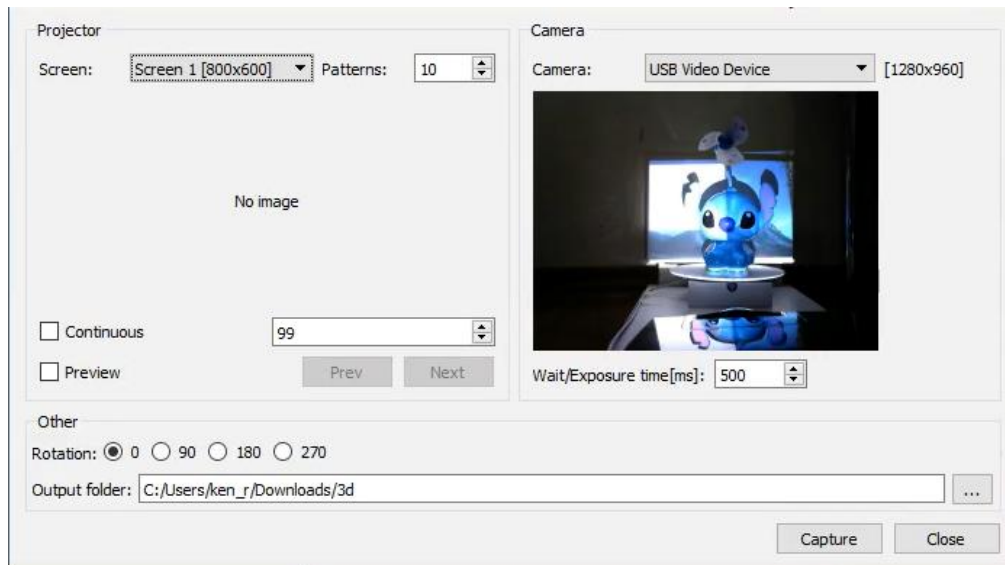


Figura 112

Toma de imágenes para decodificarlas posición 0°

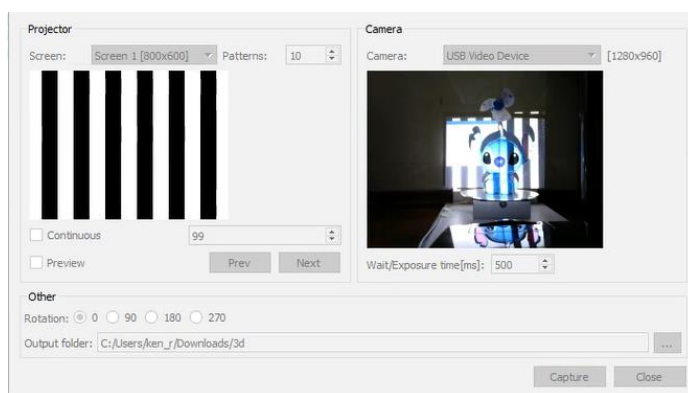


Figura 113

Toma de imágenes para decodificarlas posición 90°

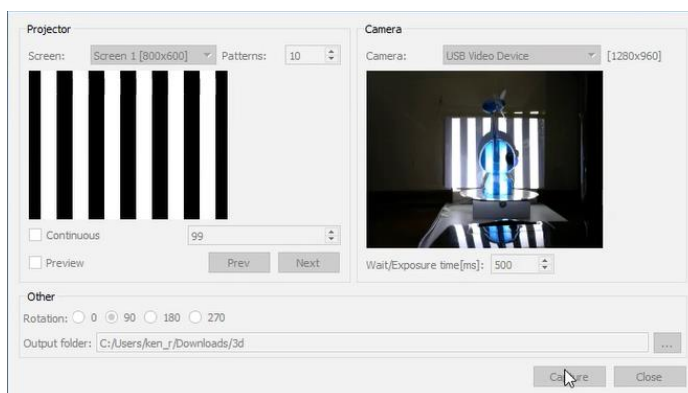


Figura 114

Toma de imágenes para decodificarlas posición 180°

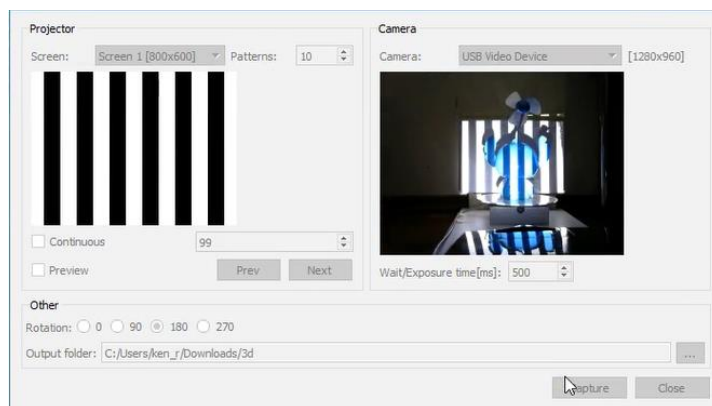
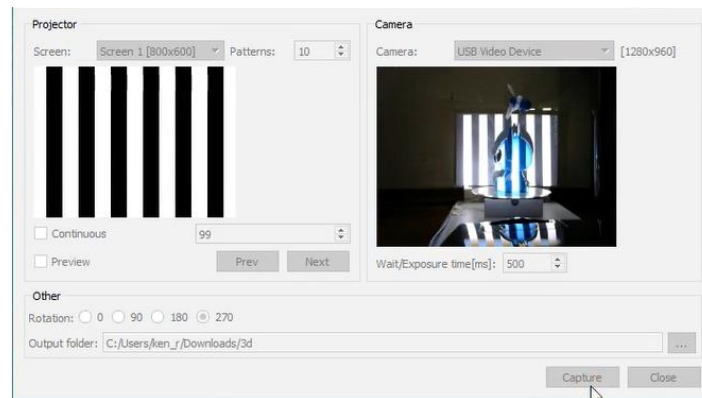


Figura 115

Toma de imágenes para decodificarlas posición 270°



- Una vez que ya se han tomado las imágenes, inicia el proceso de decodificación para la reconstrucción del objeto 3D.

Figura 116

Toma completa de imágenes previo a decodificación

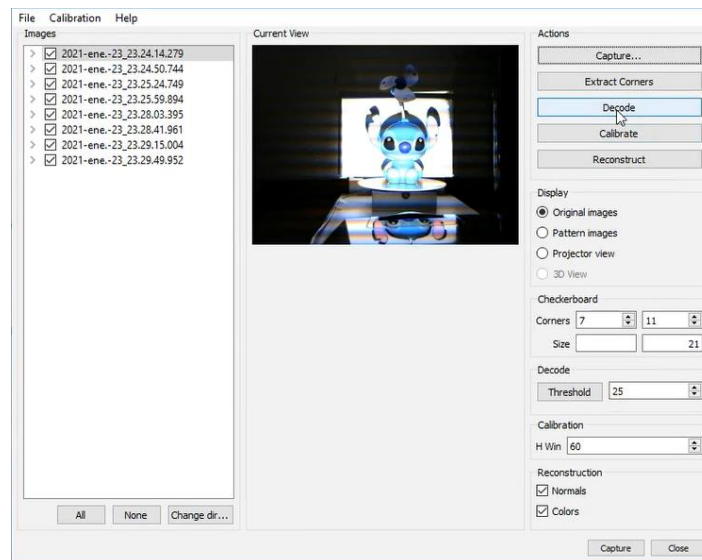
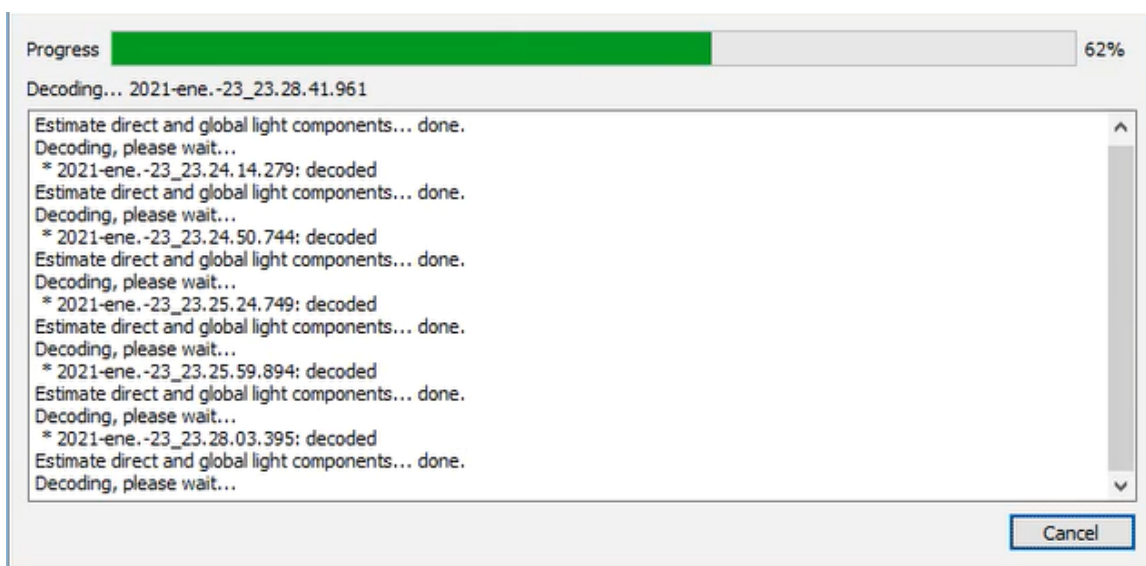


Figura 117

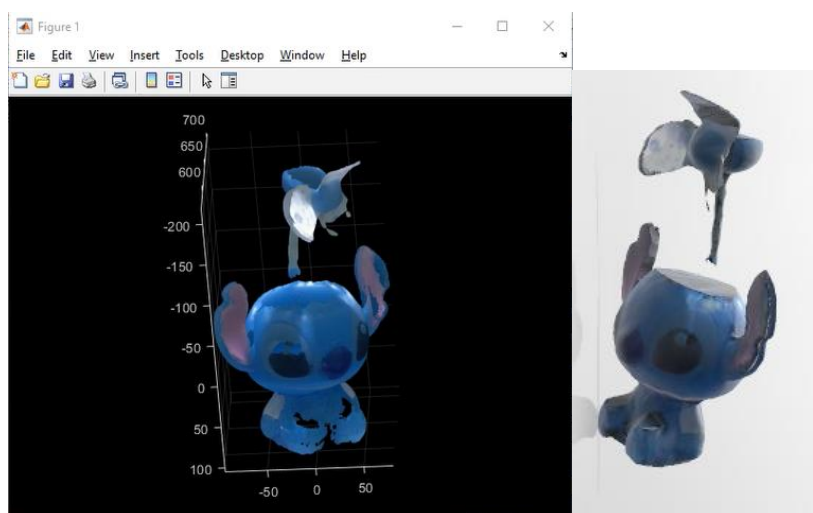
Decodificación de imágenes



6. Una vez finalizada la decodificación de las imágenes capturadas por la cámara, se obtiene el objeto en 3D y el resultado final del proceso.

Figura 118

Proceso finalizado y obtención modelo 3D



En las figuras 119 Y 120 a continuación se observa el resultado de escanear otros dos objetos satisfactoriamente.

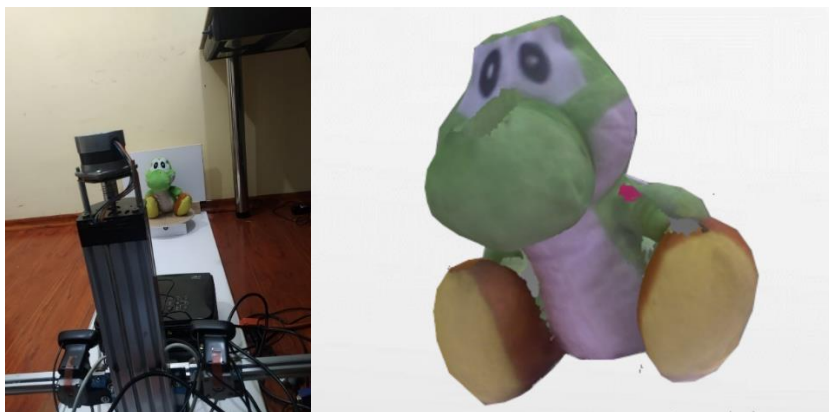
Figura 119

Resultado segundo objeto escaneado y modelo 3D



Figura 120

Resultado tercer objeto escaneado y modelo 3D



Capítulo 6:

Conclusiones y Recomendaciones

En el presente capítulo se realiza un análisis a fondo de todo el proyecto en donde se obtiene conclusiones, recomendaciones y posibles trabajos futuros como mejoras en el proyecto de titulación.

Conclusiones

Al comenzar el proyecto nos propusimos una serie de objetivos, en este punto concluiremos si hemos llegado a una solución óptima:

En la presente tesis se ha realizado un estudio a profundidad sobre la tecnología basado en luz estructurada, y se ha conseguido la información necesaria para la realización del escáner 3D.

Se ha podido entender los diferentes conceptos de escáner 3D que existe en el mercado y analizando los escáneres desarrollados antes en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se ha podido tener ideas sólidas para el desarrollo del proyecto de investigación.

Analizando los diferentes escáneres realizados en la Universidad de las Fuerzas Armadas, se ha logrado obtener un error menor al 5% en la precisión del escáner.

Se realizó de manera óptima una configuración prismática para el desplazamiento de las cámaras, basado en esta configuración se permitió calibrar el ángulo de enfoque óptimo y la distancia de las cámaras con el proyector para que se visualice el objeto.

Se realizó un sistema cartesiano de dos grados de libertad, para los diferentes tamaños de los objetos a escanear que no deben superar los 30 cm, ya que esa es la distancia que la estructura principal se desplaza en el eje Z, y no se podría visualizar el objeto completo.

El programa ha sido realizado en Matlab 2019 que es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo de programación que cumple con características para realizar algoritmos para el presente proyecto, la programación ha funcionado de manera satisfactoria cumpliendo así con el posicionamiento de las cámaras acorde con el tamaño del objeto, así como también la calibración automática y el movimiento de la plataforma giratoria para hacer las capturas de imagen y obtener un objeto en 3D.

El diseño de la HMI permitió la interacción y operación del escáner con el usuario siendo una plataforma amigable para su uso.

Se ha llegado a la conclusión que para poder escanear de manera óptima y tener resultados satisfactorios es disponer de condiciones apropiadas como el lugar, ya que si se está expuesto a una zona con mucha iluminación puede darse falsas reconstrucciones, en nuestro planteamiento inicial se propuso un sistema de iluminación para dar claridad a la escena, pero en el desarrollo del proyecto se llegó a la conclusión que para tener una óptima visualización del objeto a escanear, tiene que ser en un lugar oscuro, o que la luz no sea muy intensa.

Recomendaciones y líneas de mejora

No se debería colocar en la plataforma objetos mayores a 5 kg debido al sensor de peso colocado para que el motor de la estructura giratoria no tenga fallas al momento de realizar el giro y o haya fallas en los tiempos de escaneado propuestos.

Para un escaneado satisfactorio, es recomendable tener una zona para escanear los objetos, que haya poca luz para no presentar falsas reconstrucciones del objeto y el error de escaneo sea grande.

Es recomendable no colocar objetos más que sobrepasen los 30x 30 cm, ya que es la distancia que está programada para que tenga un buen enfoque y no haya dificultades al momento de hacer las tomas con la cámara y no de malos resultados al momento de generar el objeto 3D.

Futuros trabajos que se podrían realizar:

- Una línea de mejora, bastante interesante es extender los ejes de posicionamiento para que se pueda escanear objetos más grandes, y a su vez hacer una plataforma giratoria más resistente para objetos más pesados.
- A futuro se puede modificar el software para que la plataforma giratoria sea gire constantemente y para hacer más tomas con la cámara y que la precisión sea mejor y el error sea menor.
- Se podría incorporar un brazo robótico a la plataforma giratoria, para que, al momento de escanear el objeto, gire en todas las direcciones y de esa manera existirá menos error ya que el escáner barrerá con todos los lugares posibles del objeto.

Referencias

- 3D Natives*. (2020 de Diciembre de 20). Obtenido de El sitio web de la impresión 3D:
<https://www.3dnatives.com/es/escaner-laser-3d-escaner-luz-estructurada-mejor-080820192/#!>
- Acuña, F. (2018). *Manufactura digital mediante escaneado 3D*. Sangolquí.
- Adept Turnkey*. (26 de Diciembre de 2020). Obtenido de Making it work with the stereo-matching technique and texture projection: http://www.adept.net.au/news/newsletter/201211-nov/article_3D_stereo.shtml
- Aguirre, N. (2015). *Procesamiento de imagenes*. Cantabria.
- Bezos, J. (s.f.). *Amazon Business*. Recuperado el 18 de Octubre de 2019, de <https://www.amazon.es/escaner-3d-impresoras-impresi%C3%B3n-escaneo/s?k=escaner+3d&rh=n%3A6684215031&page=3>
- Bonilla, V. (s.f.). *App UTE*. Recuperado el 19 de Octubre de 2019, de https://app.ute.edu.ec/content/5155-114-4-1-6-19/Examen_Final_Metodologia.pdf
- BricoGeek*. (s.f.). Obtenido de Motor paso a paso 14 Kg/cm, Nema 23 : <https://tienda.bricogeek.com/motores-paso-a-paso/639-motor-paso-a-paso-14-kg-cm.html>
- Budynas, R. G., Shigley, J., & Nisbett, J. (2008). *Mechanical engineering design*. Boston, McGraw-Hill: Eighth edition.
- Changzhou Jingkong Motor & Electric Appliance Co., L. (s.f.). *JKONGMOTOR*. Obtenido de <https://www.jkong-motor.com/sale-11522714-nema-23-stepper-motor-57byg059a-nema23-y-axis-two-phase-hybrid-stepper-motor-104oz-in-low-noise.html>

Codimar. (s.f.). Codimar Rodillos.

CREAR 4D. (2004). Recuperado el 16 de Octubre de 2019, de <https://www.crear4d.com/producto/einscan-se-elite/>

Del Castillo Vivanco, D. I. (2017). *Diseño y construcción de un prototipo de Escáner 3D de bajo costo*. Sangolquí, Ecuador: Tesis de Grado, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, UFA.

Eneka. (s.f.). Obtenido de Sensor Fuerza Peso: <https://www.eneka.com.uy/robotica/sensores/fuerza-peso/celda-de-carga-50kg-7539-7540-detail.html>

Fernández, F. M. (2018). *Generación de modelos 3D mediante luz estructurada*. Cantabria.

GeekFactory. (s.f.). Obtenido de HC-SR04 sensor de distancia ultrasónico : <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/hc-sr04-sensor-de-distancia-ultrasonico/>

Guamán Gualpa, K. G., & Sosa Guzmán, A. D. (2013). *Diseño e implementación de un sistema para digitalización de objetos en 3d mediante el uso de Matlab*. Sangolquí, Ecuador: Tesis de Grado, Departamento de Eléctrica y Electrónica, UFA.

Heinrich Woerner GmbH. (s.f.). *DecoWoerner Newsletter*. Recuperado el 20 de Octubre de 2019, de <https://www.decowoerner.com/es/Accesorios-de-tienda-10897/Herramientas-y-material-10877/Plataformas-giratorias-11642.html>

HP 3D Scan Brilliantlycapture reality. (s.f.). Recuperado el 16 de Octubre de 2019, de <https://www8.hp.com/us/en/campaign/3Dscanner-resellers/overview.html>

Hu, R. (2016). *Design of 3D Laser Scanner and Calibration Objects*. Ohio, USA: Undergraduate Program in Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University.

innovation, Renishaw apply. (20 de Diciembre de 2020). Obtenido de Escáner de contacto DS10 : <https://www.renishaw.es/es/escaner-de-contacto-ds10--32394>

Jorissen, S. (2017). *3D Real-time Scanning Using a Projector-based Structured Light.*

Martín, J. (2017). *EcuRed.* Obtenido de https://www.ecured.cu/Scanner_3d

Molina Hidalgo, M. Á. (2015). *Diseño y construcción de un Escáner Digital 3D a partir de un sistema de visión estereoscópico para el Laboratorio CNC de la ESPE-L.* Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Morillo Romero, M. Á. (2015). *Digitalización 3D con escáner de luz estructurada aplicada al área.* Tesis, Sevilla.

Penalwebcom. (s.f.). Obtenido de Proyector 720p clasificación y opinion: <https://www.penalbaweb.com/proyector-720p-mejores/>

Polyga. (s.f.). Recuperado el 26 de Diciembre de 2020, de The Basics of the Structured-Light 3D Scanning Process: <https://www.polyga.com/3d-scanning-101/>

Roland. (s.f.). *Roland DG Corporation.* Recuperado el 17 de Octubre de 2019, de http://support.rolanddga.com/docs/documents/departments/technical%20services/manuals%20and%20guides/lpx-60_use_sp.pdf

SANTOS, F. D. (2018). *DIGITALIZADOR 3D PARA DIAGNOSTICO Y TRATAMIENTO DE PIE PLANO.* MISANTLA, VERACRUZ.

Scopigno, R., Montani,, C., Pingi,, P., Rocchini,, C., & Cignoni,, P. (2001). *A low cost 3D scanner based on structured light.* Pisa, Italy: Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione (ISTI)‡– Consiglio Nazionale delle Ricerche, C.N.R.

Siemens healthineers. (23 de Diciembre de 2020). Obtenido de Siemens healthineers:
<https://www.siemens-healthineers.com/ec/magnetic-resonance-imaging>

Table, A. W. (s.f.). *American Wire Gauge Conductor Size Table*. Obtenido de <https://www.solaris-shop.com>

Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., & Abellan, A. (2016). *Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos*. Coruña-España.

Tresde. (s.f.). Obtenido de Escaneo 3D, escanear objetos brillantes o muy oscuros:
<https://tresde.pe/escaneo-3d-como-escanear-objetos-brillantes-o-muy-oscuros/>

Winter, D. (2017). *GOM*. Recuperado el 16 de Octubre de 2019, de <http://www.gom.com>

Anexos