

Sistema de reconstrucción y despliegue 3D con control de perspectiva sin contacto

Acosta, Violeta¹

violeta.acosta8348@alumnos.udg.mx

García, Edgar²

edgar.garcia4785@alumno.udg.mx

Languren, Giselle²

giselle.languren4254@alumnos.udg.mx

¹Ingeniería Fotónica, Universidad de Guadalajara, México.

²Ingeniería Robótica, Universidad de Guadalajara, México.

2 de septiembre de 2024

1. Introducción

Resumen: Se propone la construcción de una interfaz holográfica utilizando reflexión de luz para visualizar en tres dimensiones objetos digitalizados a través de la técnica de proyección de franjas. La digitalización completa de los objetos de prueba se obtiene uniendo múltiples reconstrucciones parciales usando el algoritmo ICP (Iterative Closest Point). La interfaz propuesta fue equipada con sensores ultrasónicos para control de perspectiva del objeto a través de gestos manuales. La caja holográfica con control sin contacto tendrá un diseño simple y económico que permitirá ser utilizada en escuelas y museos, para mostrar objetos y manejarlos de forma dinámica e intuitiva.

Palabras clave: Digitalización, Tridimensional, Proyección de franjas, Perspectiva, Holografía.

Actualmente, existen múltiples tecnologías de visualización y control de objetos y escenas 3D, como Microsoft y la red neuronal hNet, que se emplean principalmente para fines de investigación. El principal problema con las tecnologías existentes es su costo y poca accesibilidad, ya que están privatizadas, y solo tienen acceso ciertas empresas o universidades. Esta situación impide que los avances en tecnologías 3D puedan adquirirse en lugares y aplicaciones de impacto significativo, como escuelas, museos, hospitales, pequeñas y medianas empresas.

En este proyecto se propone la creación de una interfaz holográfica que permita visualizar en tres dimensiones objetos digitalizados a través de la técnica de proyección de franjas. El dispositivo propuesto estará equipado con sensores ultrasónicos para control de perspectiva del objeto a través de gestos manuales. La caja holográfica con control sin contacto podrá ser utilizada principalmente en escuelas y museos, para desplegar objetos y manejarlos de forma dinámica e intuitiva, permitiendo a las personas aprender sobre diversos temas.

Índice

1. Introducción	1
2. Metodología	1
2.1. Geometría proyectiva	1
2.2. Homografías, calibración y triangulación	2
2.3. Corrimiento de fase	4
2.4. Unión de nubes de puntos	4
2.5. Despliegue holográfico	4
3. Resultados	5
4. Discusión	7
5. Conclusiones	7

2. Metodología

2.1. Geometría proyectiva

Geometría proyectiva permite representar de forma lineal espacios y objetos sujetos a transformaciones de perspectiva. Debido a que las cámaras realizan transformaciones de perspectiva al capturar un objeto desde diferentes puntos de observación, el estudio de geometría proyectiva es de gran importancia en el área de visión por computadora.

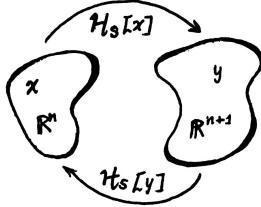


Figura 1: Transformación entre coordenadas cartesianas y coordenadas homogéneas (espacio proyectivo).

La geometría proyectiva hace uso de coordenadas homogéneas para representar puntos y líneas en el espacio. Emplearemos el operador \mathcal{H} para convertir objetos dados en coordenadas cartesianas a sus equivalentes en coordenadas homogéneas. Particularmente, un punto en el espacio n -dimensional, dado en coordenadas cartesianas por el vector \mathbf{x} , es equivalente al vector de coordenadas homogéneas

$$\mathbf{y} = \mathcal{H}[\mathbf{x}] \quad (1)$$

en $n + 1$ dimensiones. La Fig. 1 presenta una descripción gráfica del operador de coordenadas homogéneas. La ecuación característica que define el proceso de trasformación entre coordenadas cartesianas y homogéneas es

$$\mathcal{H}_s^{-1}[\mathbf{x}] = \frac{s}{\mathcal{S}[\mathbf{y}]} \mathcal{H}_s^{-1}[\mathbf{y}], \quad (2)$$

donde \mathcal{S} es el operador escala. Cabe señalar que el operador de coordenadas homogéneas incluye la representación de puntos ideales, los cuales son vectores $(n + 1)$ -dimensionales con escala cero.

Antes de proceder con la digitalización de objetos es necesario comprender cómo funciona la captura de imágenes en una cámara. Todos los puntos de un objeto o escena visible emiten rayos de luz en todas direcciones. El modelo más simple para representar cómo una cámara captura una imagen consiste en el modelo *pinhole*, que se ilustra en la Fig. 2. En este modelo, los rayos de la escena son bloqueados excepto aquel que cruza por el pinhole y llega hasta el plano imagen donde se detecta como un punto. Este proceso se repite para todos los puntos de la escena, formando así la imagen completa de la escena. En las cámaras modernas, el plano de imagen se encuentra en la película fotográfica o en un sensor electrónico [1].

El modelo básico de una cámara pinhole consta de un centro óptico C , donde convergen todos los rayos de la proyección, y un plano de imagen R en el cual la imagen es proyectada. Este plano de imagen está ubicado a una distancia focal f del centro óptico y es perpendicular al eje z [2].

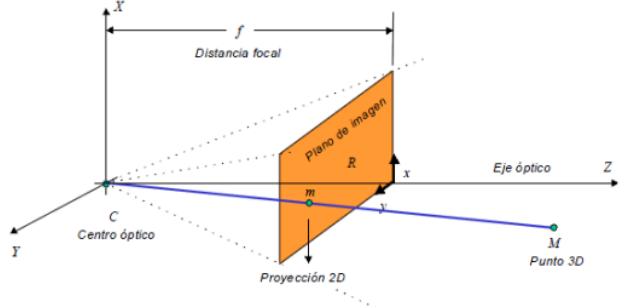


Figura 2: Modelo geométrico de una cámara *pinhole*.

Para ubicar un punto en un plano, se emplean varias matrices, como la matriz de rotación, la matriz de parámetros intrínsecos de la cámara y el vector de traslación. Es por ello que, durante el proceso de formación de imágenes, donde se busca determinar varias características del plano escena, resulta de suma relevancia conocer la matriz de la cámara

$$C = KL, \quad (3)$$

la cual incluye tanto los parámetros intrínsecos K (tamaño de pixel y longitud focal, por ejemplo) como los parámetros extrínsecos $L = [R^T, -R^T t]$ (orientación y posición) de la cámara.

2.2. Homografías, calibración y triangulación

Para determinar los parámetros de una cámara, cuando los puntos a detectar pertenecen a un plano distinto, se requiere trasformar los puntos escena a puntos en el plano de la imagen. Para esto, primero se considera que los puntos del plano cámara se pueden convertir al plano de referencia luego de aplicar una rotación y una traslación a los valores de su matriz asociada. Bajo tales consideraciones se define la matriz homografía como

$$G = K[\bar{r}_1, \bar{r}_2, -R^T t]. \quad (4)$$

expresada a su vez por los valores:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} \\ g_{21} \\ g_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1 & \mathbf{g}_2 & \mathbf{g}_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde, para la mayoría de los casos prácticos, se puede asumir

$$g_{33} = 1. \quad (6)$$

La columna \mathbf{g}_3 define la imagen del origen del plano de referencia. La representación de la relación de las

coordenadas físicas con respecto a las coordenadas pixel se expresa del siguiente modo:

$$\boldsymbol{\mu} = \mathcal{H}^{-1}[G\mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]], \quad (7)$$

o bien,

$$\boldsymbol{\rho} = \mathcal{H}^{-1}[G^{-1}\mathcal{H}[\boldsymbol{\mu}]]. \quad (8)$$

Para cada correspondencia dada $\boldsymbol{\rho} \leftrightarrow \boldsymbol{\mu}$, se tiene las relaciones

$$\begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{g}_1^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \\ \bar{g}_2^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \\ \bar{g}_3^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{g}_3^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]} \begin{bmatrix} \bar{g}_1^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \\ \bar{g}_2^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Puesto que el objetivo radica en ajustar la cantidad de incógnitas, que hasta el momento han sido percibidas, con la cantidad de observaciones necesarias, para con ello estimar el número de homografías requeridas, se recurre a la siguiente ecuación:

$$Ax = y. \quad (10)$$

Para definir las ecuaciones bajo este modelo se aplica el método de descomposición de valores singulares, con el cual se obtienen dos matrices ortogonales y una matriz diagonal que contiene valores singulares, las generalidades de este procedimiento se muestran a continuación:

$$\begin{bmatrix} \bar{g}_1^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \\ \bar{g}_2^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{g}_3^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \mu_x \\ \bar{g}_3^T \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}] \mu_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

o, equivalentemente,

$$\begin{bmatrix} \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T & \mathbf{0}_3^T & -\mu_x \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T \\ \mathbf{0}_3^T & \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T & -\mu_y \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{g}_1 \\ \bar{g}_2 \\ \bar{g}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_2. \quad (12)$$

Usando el vector auxiliar

$$h = \begin{bmatrix} g_{31} \\ g_{32} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

tenemos

$$\begin{bmatrix} \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T \bar{g}_1 & -\mu_x (\boldsymbol{\rho}^T h + 1) \\ \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T \bar{g}_2 & -\mu_y (\boldsymbol{\rho}^T h + 1) \end{bmatrix} = \mathbf{0}_2, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T \bar{g}_1 & -\mu_x \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T h \\ \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T \bar{g}_2 & -\mu_y \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{bmatrix} = \mathbf{0}_2, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T & \mathbf{0}_3^T & -\mu_x \boldsymbol{\rho}^T \\ \mathbf{0}_3^T & \mathcal{H}[\boldsymbol{\rho}]^T & -\mu_y \boldsymbol{\rho}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{g}_1 \\ \bar{g}_2 \\ h \end{bmatrix} = \boldsymbol{\mu}. \quad (16)$$

Cabe destacar que en esta última expresión, se tiene ya un vector de dimensión 8×1 , alcanzando una relación coherente entre el número de incógnitas y el numero de observaciones.

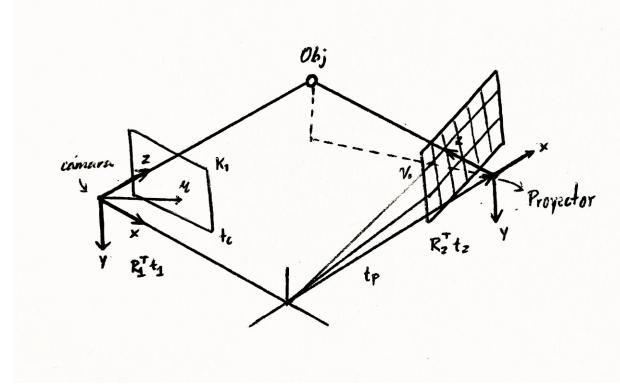


Figura 3: Determinación de puntos por triangulación.

Una técnica eficaz para realizar lo anterior es la de calibración cámara-proyector. Es importante aclarar que para fines de análisis matemático, un proyector se comporta de la misma manera que una cámara. Esta técnica consiste en sobreponer 2 tableros de ajedrez. Un tablero físico de color amarillo se coloca en el plano de referencia y se le proyecta encima uno color cyan [3]. Se toma cierta cantidad de imágenes de ambos tableros sobrepuertos, cambiando de pose el tablero amarillo cada vez. Estas imágenes se ingresan a procesadores de imágenes automáticos donde se pueden obtener los puntos de correspondencia requeridos para la calibración [4].

Una vez ubicados los distintos puntos en el plano se procede a encontrar la posición en el eje z de los objetos digitalizados. Este proceso requiere realizar triangulación utilizando un vector de dirección de la cámara a un punto determinado del objeto y otro vector del proyector hacia el mismo punto [5]. Tomando en cuenta la intersección entre los vectores de dirección desde dos puntos (cámara y proyector) es posible determinar la profundidad del punto que se está analizando, como se aprecia en la Fig. 3.

El procedimiento de triangulación descrito se puede seguir matemáticamente a través de las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu}_1 &= \mathcal{H}^{-1}[K_1[R_1^T, -R_1^T \mathbf{t}_1] \mathcal{H}[\boldsymbol{p}]], \\ \boldsymbol{\mu}_2 &= \mathcal{H}^{-1}[K_2[R_2^T, -R_2^T \mathbf{t}_2] \mathcal{H}[\boldsymbol{p}]], \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= \mathbf{t}_1 + \lambda_1 R_1 K_1^{-1} H[\boldsymbol{\mu}_1] = \mathbf{t}_1 + \lambda_1 \mathbf{d}_1, \\ \mathbf{p} &= \mathbf{t}_2 + \lambda_2 R_2 K_2^{-1} H[\boldsymbol{\mu}_2] = \mathbf{t}_2 + \lambda_2 \mathbf{d}_2. \end{aligned} \quad (18)$$

De modo que

$$[\mathbf{d}_1 \quad \mathbf{d}_2] \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1, \quad (19)$$

que puede reescribirse en la forma $Ax = y$, donde $A = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2]^T$, $\mathbf{x} = [\lambda_1, \lambda_2]^T$, y $\mathbf{y} = \mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1$. De esta

forma, es posible calcular las incógnitas λ_1 y λ_2 como

$$\mathbf{x} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{y}. \quad (20)$$

Siguiendo este desarrollo, obtenemos el modelo matemático que define el punto de interés en términos de los puntos de correspondencia entre la posición relativa de la cámara y del proyector:

$$\mathbf{p} = \frac{1}{2}(\mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_2 + \lambda_1 \mathbf{d}_1 + \lambda_2 \mathbf{d}_2). \quad (21)$$

2.3. Corrimiento de fase

El método de proyección de franjas (FP, por sus siglas en inglés, *fringe projection*) consiste en proyectar sobre un objeto patrones de intensidad en forma de franjas o líneas, capturar y analizar los patrones que inciden en el objeto y finalmente, tras el análisis correspondiente, determinar las mediciones y perfiles tridimensionales del objeto [6]. Para recuperar las coordenadas pixel del proyector se siguió el siguiente procedimiento algebraico:

$$\begin{aligned} I_1 &= a + b \cos(\phi + 0) = a + b \cos(\phi), \\ I_2 &= a + b \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) = a - b \sin(\phi), \\ I_3 &= a + b \cos(\phi + \pi) = a - b \cos(\phi), \\ I_4 &= a + b \cos(\phi + \frac{3\pi}{2}) = a + b \sin(\phi), \end{aligned} \quad (22)$$

de donde se deduce

$$\tan(\phi) = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{2b \sin(\phi)}{2b \cos(\phi)}, \quad (23)$$

y que permite obtener la fase envuelta como

$$\phi_w = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right). \quad (24)$$

2.4. Unión de nubes de puntos

En un escenario típico, dadas dos nubes e puntos A y B , se desea determinar cuánto se parecen entre sí. Por lo general, uno de los objetos puede sufrir ciertas transformaciones, como traslación, rotación y/o escala, para que coincidan también con el otro objeto como sea posible [7]. Esto se puede realizar mediante diferentes métodos, uno de ellos consiste en la obtención de puntos de correspondencia, que son coordenadas que representan la misma información desde dos perspectivas diferentes (obtenidas manual o automáticamente). Con estos puntos, se calcula la matriz de rotación y su vector de traslación utilizando un algoritmo de optimización.

En este proyecto, se empleó el algoritmo iterativo del punto más cercano (ICP, del inglés *Iterative Closest*

Point), que es ampliamente utilizado, debido a su simplicidad, buen desempeño en la práctica, y que proporciona la matriz de rotación y su vector de traslación sin necesidad de puntos de correspondencia [8].

Dados dos nubes de puntos A y B en R^d (también conocidas como forma de datos y forma de modelo, respectivamente), deseamos minimizar una función de costo

$$\phi(A + t, B), \quad (25)$$

sobre todas las traslaciones t de A con respecto a B . El algoritmo comienza con una traslación arbitraria que alinea A con B (de manera poco óptima) y luego realiza repetidamente mejoras locales que siguen realineando A con B , mientras se disminuye la función de costos hasta que no sea posible ninguna mejora [7].

2.5. Despliegue holográfico

La holografía es un método de recuperación integral de la información relativa al campo de irradación difundido por un objeto real, lo que permite obtener imágenes ópticas tridimensionales de distintos tipos de objetos [9].

Al principio de este método ocurre una interferencia entre la onda emitida por el medio de proyección y una onda de referencia conocida (medio material, entre el medio emisor y receptor), al combinar ambas ondas su patrón interferencial queda registrado en el material de soporte para procesos fotosensibles (lámina de acetato), dando lugar al holograma.

De esta forma, el holograma forma una imagen tridimensional del objeto, aún cuando éste no se encuentre allí, pues se dispone de su onda y es ésta la que alcanza los ojos del usuario. Este frente de onda (imagen reconstruida) es prácticamente indistinguible de la onda original procedente del objeto y puede producir todos los efectos visuales del haz primitivo [10].

Con el fin de manipular el ángulo desde el cual se observan los objetos digitalizados, es necesario diseñar una interfaz para el control de perspectiva. En este caso se optó por el uso de sensores ultrasónicos, que no requieren contacto con el dispositivo holográfico, y de esta manera se obtenga una interacción dinámica.

Un sensor ultrasónico funciona enviando ondas ultrasónicas hacia un objeto mediante un emisor, las cuales rebotan y son captadas por un receptor como se muestra en la Fig. 4. Al conocer la velocidad de propagación de la señal es posible calcular la distancia entre el objeto y el sensor tras medir el tiempo en el cual una señal se propaga desde el emisor al receptor.

Si se aplica este procedimiento de manera continua a un objeto en movimiento, es posible calcular cuan-

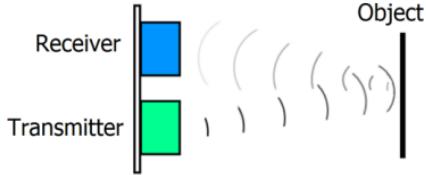


Figura 4: Principio de detección de movimiento usando un emisor y un receptor ultrasónico [11].

do y en qué dirección se está moviendo. Esto resulta útil, ya que esa información se puede interpretar como movimiento, en el cursor de la computadora y de esta manera manipular la perspectiva de las nubes de puntos sin necesidad de contacto físico con el dispositivo.

3. Resultados

En este proyecto se usó una cámara IDS UI-3880CP-C y un proyector Epson W39, como se muestra en la Fig. 5(a). El sistema se calibró aplicando el método de tableros de colores sobrepuertos, donde se utilizó un tablero impreso de color amarillo con un tamaño de 180×258 mm con 7×10 cuadros. La resolución de la cámara fue de 2076×3088 píxeles y la del proyector de 800×1280 píxeles. Se tomaron 12 imágenes rotando y trasladando el tablero amarillo de diferentes maneras para posteriormente procesarlas en la aplicación Checkboard Detector en Matlab. En esta aplicación, se detectaron las esquinas de los cuadros del tablero en los canales rojo y azul.

Una vez obtenidos estos puntos de cada tablero, se diseñaron distintas funciones en Matlab que calculaban los puntos rho y mu de cada fotografía tomada para la calibración. Estos puntos calculados se utilizaron como parámetros de entrada en otra función que retornaba las homografías calculadas, con las cuales se obtenían los parámetros intrínsecos de la cámara y el proyector, así como la matriz de rotación y el vector de translación.

Con la cámara y el proyector calibrados, se procedió a digitalizar el maniquí que se observa en la Fig. 5(b). Para ello, se empleó la técnica de proyección de franjas. Los parámetros utilizados para esta técnica incluyeron la proyección de 4 rejillas con 12 desplazamiento de fase y una frecuencia de fase máxima de 12 píxeles por franja. Este proceso se repitió 21 veces, rotando ligeramente el maniquí sobre su eje cada vez, con el fin de capturar imágenes desde múltiples los ángulos.

Una vez obtenidas las imágenes desde los 21 ángulos distintos, se creó una nube de puntos para cada uno.

Las Figs. 5(c) y 5(d) muestran dos de las nubes obtenidas, frontal y lateral, respectivamente. Esto se logró utilizando funciones programadas en Matlab que permitieron realizar el proceso de demodulación de fase y triangulación. Es importante mencionar que, para la creación de dichas nubes, se debe tomar en cuenta el color de la imagen para obtener una mejor resolución y nubes de puntos con mayor información, lo cual permite una mejor unión de puntos posteriormente.

Una vez teniendo las 21 nubes de puntos se utilizó la función `pcregistericp` de Matlab que aplica el algoritmo ICP para alinear y posteriormente unir las diferentes perspectivas con el fin de obtener el modelo 360°. Esta función recibe tres argumentos:

- nube base,
- nube a alinear (ambas nubes en formato ply), y
- el parámetro

`Metric = "pointToPlaneWithColor",`

Este parámetro especifica la métrica de minimización y la información de color en las nubes de puntos para encontrar la transformación.

Como resultado, se obtiene la información de la transformación rígida utilizada, un objeto con la nueva nube de puntos alineada y un valor de error. En nuestro proyecto, solo es necesaria la nube de puntos alineada.

Posteriormente se utilizó la función de Matlab `pcmerge` para crear una nueva nube generada por la unión de la nube base y la nube alineada. La función recibe como argumentos de entrada: la nube base, la nube alineada, y un parámetro de paso que especifica la definición con la que se creará la nueva nube. El resultado de la unión se convierte en la nueva base y se selecciona una nueva perspectiva para unir, repitiendo este proceso para las 21 nubes obtenidas hasta llegar al modelo a 360°, que se muestra en la Fig. 5(e).

Se realizaron pruebas con dos sensores ultrasónicos HC-SR04 conectados a la computadora a través de un Arduino, el cual procesaba la distancia detectada por los sensores y, mediante una conexión serial con Matlab, se recibían dichos datos. Una vez obtenidas las distancias, estas se utilizaban para interpretar si las manos del usuario se acercaban o se alejaban del sensor. Se implementó la librería de Matlab

`'awt.Java.Robot'`

para rotar la imagen sobre los ejes X y Y, según fuese el movimiento efectuado por el usuario. La función de dicha librería radica en el manejo de la interfaz gráfica de usuario únicamente utilizando código, por lo que para rotar la imagen sobre el eje Y se posicionaba el cursor en el centro de la pantalla y se arrastraba de

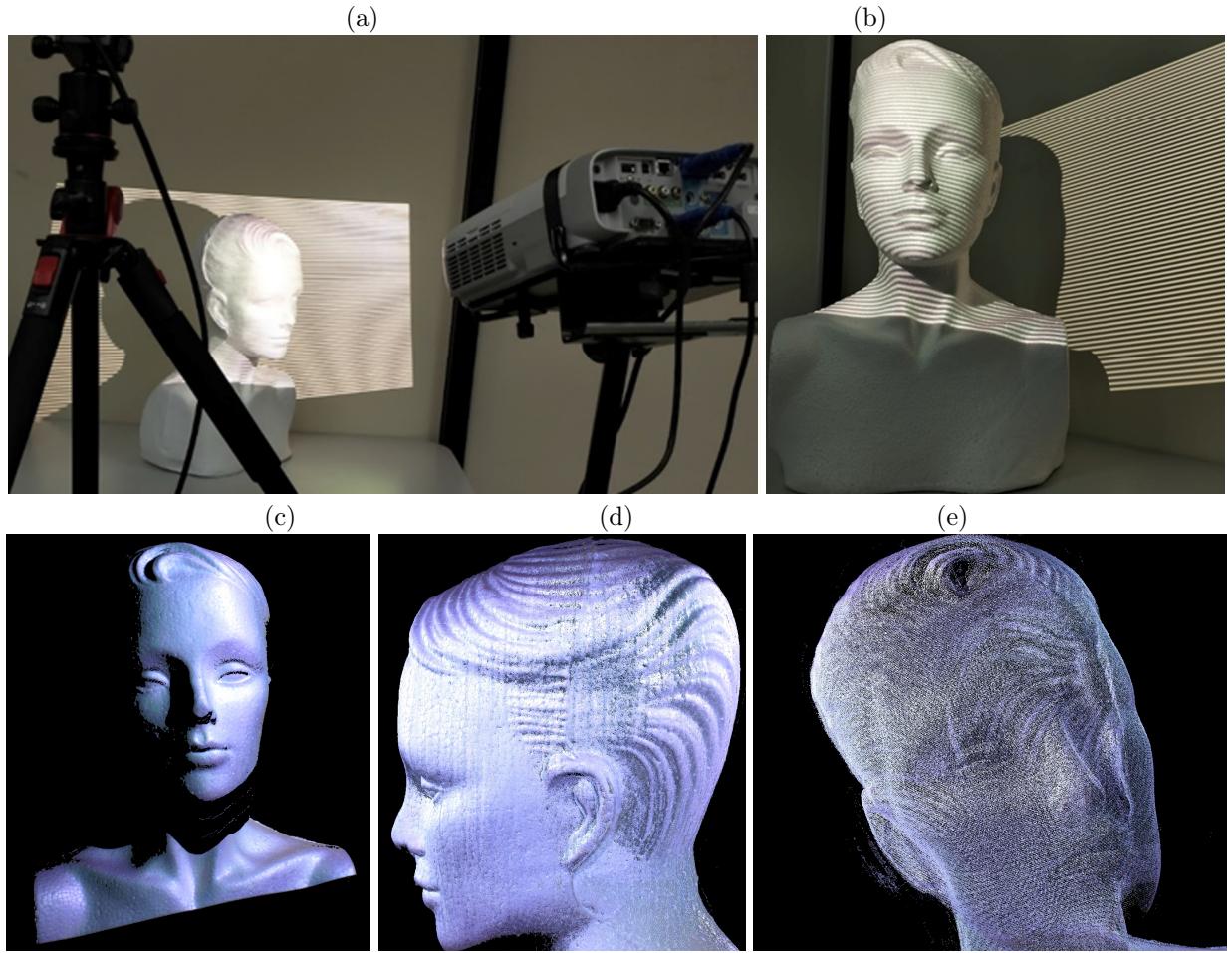


Figura 5: (a) Sistema cámara-proyector para digitalización 3D por proyección de franjas. (b) Maniquí usado como objeto de prueba para reconstrucción 3D. (c) Vista frontal de la digitalización del maniquí. (d) Vista lateral de la digitalización del maniquí. (e) Nube de puntos 360°.

lado a lado. Para las rotaciones sobre el eje X, también se iniciaba colocando el cursor en el centro de la pantalla y se arrastraba hacia arriba o abajo, dependiendo del movimiento de la mano. Estos movimientos se realizaban sobre una ventana de "pcviewer" de Matlab, la cual era inicializada al principio del programa ya con la nube de puntos de 360 grados cargada.

De manera simultánea al acondicionamiento de los sensores, se comenzó con el diseño de la interfaz holográfica, la cual consistió en una caja holográfica hecha de cartón y una lámina de acetato, elemento encargado de producir el efecto óptico. Dicho dispositivo, además, contó con un espacio específico para colocar los sensores previamente mencionados. En la Fig. 6 se pueden observar los planos que se diseñaron para construir de la caja holográfica, atendiendo a nuestros requerimientos dimensionales, principalmente debidos al tamaño de la pantalla de la computadora utilizada para el despliegue de las digitalizaciones.

El la parte inferior del prototipo, vea el plano de vista frontal, se colocó la computadora, misma que contenía el programa encargado de mostrar la digitalización del objeto y procesar los datos proporcionados por los sensores. Conforme a las dimensiones especificadas en los planos, resulta destacable la posición angular de la lámina de acetato con respecto a la pantalla, la cuál es de 45 grados, pues de acuerdo con la ley de reflexión, la luz proveniente de la pantalla proyectora se reflejará sobre el acetato con un ángulo igual al del rayo de luz incidente, así, al reflejarse a 45 grados con respecto al acetato, el usuario percibirá una imagen coherente que además, proporciona la ilusión de una imagen tridimensional debido a la transparencia del acetato. Un aspecto no especificado en los planos pero que resulta de interés es el color negro de las paredes del prototipo, que permite absorber los rayos de luz que se reflejan desde el acetato hacia las paredes internas, además de evitar que estos se sigan reflejando, lo que ayuda a aislar los reflejos

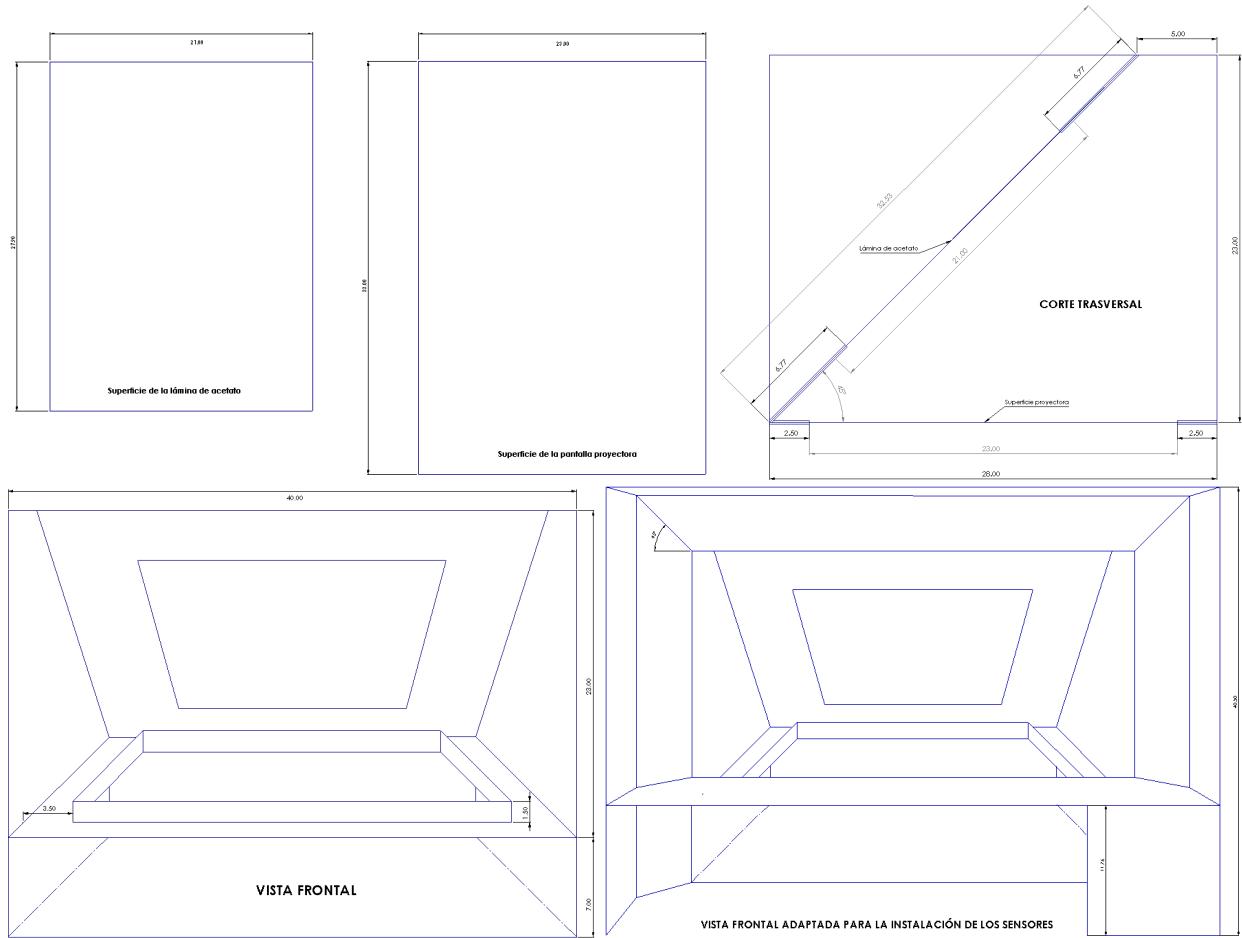


Figura 6: Planos del prototipo.

de luz hacia el acetato, para después ser percibidos por el usuario con mayor claridad.

Con la finalidad de que el prototipo con el sistema de control operativo se muestre ordenado, se decidió ocultar los cables y el Arduino, dejando expuestos únicamente los sensores. Finalmente, el prototipo terminado del sistema de reconstrucción y despliegue 3D con control de perspectiva sin contacto se muestra en la Fig. 7.

4. Discusión

El método de proyección de franjas es de gran utilidad para el estudio de objetos delicados, digitalizaciones 3D de obras de arte, hallazgos arqueológicos y otros objetos donde el contacto físico debe evitarse. Sin embargo este método no es muy práctico para la digitalización de escenarios completos.

La unión de diferentes perspectivas para generar nubes de puntos a 360° presenta complicaciones, el procedimiento puede generar resultados imprecisos si no

se selecciona un cambio de orientación adecuado entre nubes y si el objeto no cuenta con información suficiente. Sin embargo, el uso del algoritmo ICP logra un proceso más eficiente que la selección de correspondencias manuales.

El prototipo de despliegue holográfico muestra resultados favorables, siendo la iluminación externa el principal problema encontrado.

5. Conclusiones

Mediante el desarrollo del presente proyecto se adquirieron aprendizajes relativos a las técnicas de luz estructurada, desde sus principios algebraicos hasta sus aplicaciones y limitaciones. En la etapa de implementación se realizó la digitalización tridimensional de objetos. Asimismo, como eje complementario al proceso de reconstrucción, se diseñó y construyó un dispositivo holográfico equipado con dos sensores ultrasónicos que permitieron manipular la perspectiva del objeto proyectado rotándolo sobre los ejes X y

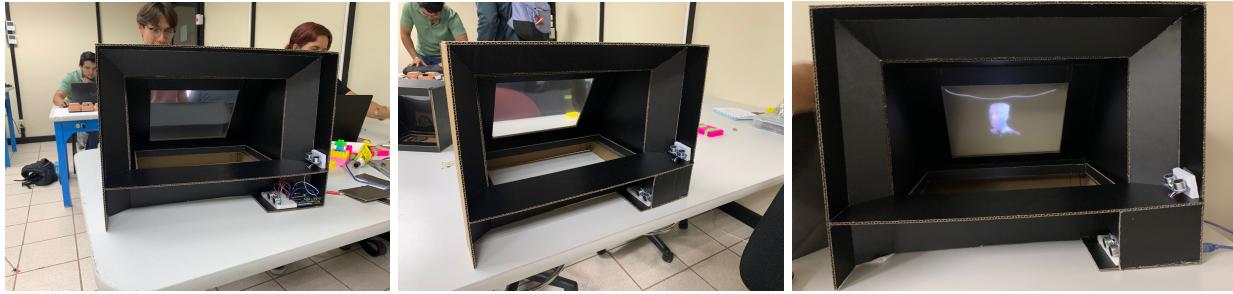


Figura 7: (Izda) Prototipo con sensores expuestos. (Centro) Prototipo de la interfaz holografica terminado. (Dcha) Prototipo operativo con interfaz activa.

Y, sin necesidad de contacto físico con la interfaz de control. Una característica importante del diseño del prototipo final fue que resultara económico, accesible e intuitivo tanto para la enseñanza como para la visualización de información y de procesos complejos, donde el manejo de una perspectiva tridimensional resulte funcional y beneficioso para nuestra comunidad.

Como trabajo a futuro, se plantea integrar el sistema propuesto al área educativa, cultural, e industrial, para este objetivo será necesario establecer mejoras tanto en el prototipado como en el sistema de control de perspectiva, así como automatizar el método de digitalización para una implementación óptima.

Referencias

- [1] R. J. Salazar, “El modelo de la cámara pinhole.” http://www.rjuarezs.com/t_pinhole.html [Accessed: 10/08/2024].
- [2] F. Valdivielso Miranda, L. Montesano del Campo, and J. Civera Sancho, “Reconocimiento y registro 3D de objetos conocidos en una escena,” 2010.
- [3] R. Juarez-Salazar and V. H. Diaz-Ramirez, “Flexible camera-projector calibration using superposed color checkerboards,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 120, pp. 59–65, 2019.
- [4] R. Juarez-Salazar, S. Esquivel-Hernandez, and V. H. Diaz-Ramirez, “Are camera, projector, and camera-projector calibrations different?,” *Appl. Opt.*, vol. 62, pp. 5999–6006, Aug 2023.
- [5] R. Juarez-Salazar, G. A. Rodriguez-Reveles, S. Esquivel-Hernandez, and V. H. Diaz-Ramirez, “Three-dimensional spatial point computation in fringe projection profilometry,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 164, p. 107482, May 2023.
- [6] A. Silva Mejía, “Reconstrucción 3d de objetos, empleando proyección de patrones binarios y algoritmos de corrimiento de fase,” Master’s thesis, Universidad de Guadalajara, 2015.
- [7] E. Ezra, M. Sharir, and A. Efrat, “On the performance of the icp algorithm,” *Computational Geometry*, vol. 41, no. 1, pp. 77–93, 2008. Special Issue on the 22nd European Workshop on Computational Geometry (EuroCG).
- [8] P. Besl and N. D. McKay, “A method for registration of 3-d shapes,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 239–256, 1992.
- [9] R. Toledo, G. M. Vega Cruz, A. Zaldo, J. Lunazzi, and D. Magalhães, “Fundamentación del holograma como un medio de enseñanza de la física,” *Latin-American Journal of Physics Education*, 01 2008.
- [10] A. Belendez, “Holografía: ciencia, arte y tecnología,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, p. 16, 4 2009.
- [11] V. A. Zhmud, N. O. Kondratiev, K. A. Kuznetsov, V. G. Trubin, and L. V. Dimitrov, “Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1015, p. 032189, may 2018.