

MODELADO TRIDIMENSIONAL DEL CUERPO HUMANO A PARTIR DE LOS DATOS DE CUATRO SENSORES RGBD

Isidro Robledo Vega, Daniel Rodríguez Salgado

Tecnológico Nacional de México

Instituto Tecnológico de Chihuahua

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ave. Tecnológico #2909, Col. 10 de Mayo, Chihuahua, México

Tel. +52(614)201-2014

[irobledo, drodriguez] @itchihuahua.edu.mx

RESUMEN.

Este artículo presenta un sistema para escaneo y modelado tridimensional del cuerpo humano. Se utilizan cuatro sensores RGBD para la adquisición de los datos tridimensionales. Las cuatro nubes de puntos adquiridas se fusionan para obtener una sola nube de puntos del cuerpo completo de la persona escaneada. Los datos de la nube de puntos fusionada son filtrados para después realizar una reconstrucción tridimensional y generar un modelo del cuerpo humano completo que pueda ser reproducido por medio de una impresora 3D. El uso de cuatro sensores RGBD permite evitar las oclusiones producidas cuando los sensores no alcanzan a captar algunas regiones del cuerpo.

Palabras Clave: Sensor RGBD, fusión de datos, reconstrucción tridimensional, impresión en 3D.

ABSTRACT.

In this paper we present a system for three-dimensional scanning, reconstruction, modeling and printing of the human body. Four RGBD sensors are used for the acquisition of three-dimensional data. The four acquired pointclouds are fused to obtain a single pointcloud of the entire scanned person's body. The data from the fused pointcloud is filtered to then perform a three-dimensional reconstruction and generate a model of the entire human body that can be reproduced by means of a 3D printer. The use of four RGBD sensors allows avoiding occlusions produced when the sensors fail to capture some regions of the body.

Keywords: RGBD sensors, data fusion, 3D reconstruction, 3D printing.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de Visión por Computadora constituyen una realidad en la que el ser humano día a día busca implementarlos para la solución de diversos problemas, como en medicina, sistemas de inspección, antropometría, manufactura, sistemas de vigilancia, sistemas militares y todos aquellos sistemas en los que se pueda emular el comportamiento de la visión humana. Cada una de estas aplicaciones pertenece a un área específica de estudio en los sistemas de visión comprendiendo temas como: el procesamiento de imágenes y video, sistemas de visión orientados a robótica, reconocimiento de patrones, modelado tridimensional, entre otros.

Particularmente como motivo de estudio, la construcción de un modelo tridimensional de una persona ofrece oportunidades en investigación y desarrollo donde el cuerpo humano es el elemento de estudio, buscando soluciones que mejoren la calidad de vida de las personas como el diagnóstico de enfermedades psicomotrices, elaboración de prótesis. Además de las ventajas que ofrecen los sistemas de escaneo de personas para el entretenimiento, la industria textil y los estudios antropométricos.

Los sistemas de escaneo tridimensional surgen a partir de la técnica de visión en estéreo, la cual proporciona la habilidad de inferir información de la estructura y distancia de una escena en 3D a partir de dos o más imágenes tomadas desde diferentes puntos de vista. Estos sistemas de escaneo se clasifican de acuerdo a la tecnología que utilizan para el proceso de adquisición de datos entre los cuales se encuentran los escáneres de línea laser, los basados en luz estructurada y los sistemas multicámara. [1-4]

La construcción de modelos tridimensionales resulta práctico de implementar con el surgimiento de nuevos dispositivos ópticos, un ejemplo son los sensores de movimiento desarrollados para la industria de los videojuegos, como el sensor Kinect de Microsoft. Estos sensores de movimiento o sensores RGBD son dispositivos capaces de proporcionar datos de color RGB (*Red* - rojo, *Green* - Verde y *Blue* - Azul) y de profundidad (*Depth*) y son una alternativa accesible para el escaneo tridimensional de personas en movimiento. [5]

Dadas estas condiciones, se tuvo la motivación para diseñar y construir un modelo tridimensional del cuerpo humano completo a partir de los datos fusionados de cuatro sensores RGBD, esto llevó a implementar una metodología de investigación para desarrollar un sistema dividido en cuatro etapas: 1.- La captura sincronizada de datos de los cuatro sensores RGBD; 2.- La fusión de datos adquiridos con los cuatro sensores; 3.- La construcción del modelo tridimensional del cuerpo humano y 4.- La impresión del modelo del cuerpo a escala utilizando una impresora 3D que trabajan bajo el principio de modelado por deposición fundida (FDM). [6]

El sistema desarrollado genera un modelo tridimensional del cuerpo humano con una mayor cantidad de información obtenida con cuatro sensores RGBD ubicados y orientados de manera que se reduzcan las oclusiones que generan errores en el modelo, aunado a la idea de que es posible realizar el procesamiento de los datos tridimensionales para aplicaciones innovadoras como es la impresión en 3D, así como la idea de que es posible la construcción de un sistema de escaneo de bajo costo y rápido para la obtención del modelo tridimensional del cuerpo humano.

2. CAPTURA SINCRONIZADA CON CUATRO SENSORES RGBD

Los sensores RGBD utilizados para la adquisición de las nubes de puntos tridimensionales son Kinect V2 de Microsoft. Fueron seleccionados debido a que son accesibles en costo y poseen una interfaz de programación de aplicaciones (API) que permite modificar las características de adquisición. El sensor Kinect captura diferentes flujos de datos, en el sistema desarrollado se utiliza el flujo de datos de color que proporciona imágenes RGB con una resolución de 1920x1080 y el flujo de datos de profundidad que proporciona datos en milímetros codificados en un arreglo de 16 bits y que puede ser visualizado como una imagen en escala de grises con una resolución de 512x424. La Tabla 1 muestra las características funcionales del sensor Kinect V2. [7]

Tabla 1.- Características del sensor Kinect versión 2.

Especificación del Sensor	Descripción	Sensor Kinect Versión 2.
Cámara Infrarroja/ Sensor de Profundidad	Resolución	512 x 424
	Campo de visión	70.6° x 60°
	Rango de operación	0.5 – 4.5 metros
	Técnica de Obtención de datos	Tiempo de vuelo (TOF)
Cámara a Color	Resolución	1920x1080 30 fps
	Campo de visión	84.1° x 53.8°
Latencia Mínima		20 ms.
Conectividad		Puerto USB 3.0

Las características de la Tabla 1 fueron consideradas para el diseño del área de captura. Cada sensor tiene su propio eje coordinado con el origen ubicado en el centro del sensor, el eje X es horizontal y va hacia los lados del sensor, el eje Y es vertical y el eje Z también es horizontal pero va hacia enfrente y hacia atrás del sensor.

El área de captura consiste en el espacio físico en el que los sensores son ubicados con respecto a un origen común S_0 , el cual será el sitio en donde la persona se ubicará para ser escaneada. Después de evaluar diferentes posiciones para los sensores se optó por ubicarlos en forma de cruz, debido a que se reducen las regiones del cuerpo donde los sensores no alcanzan a captar

información. Se situaron los sensores de tal forma que se encuentren uno frente a otro, por pares, orientados hacia el origen S_0 . La Figura 1 muestra el diseño del área de captura en forma de cruz donde los sensores se etiquetan como S1, S2, S3 y S4. La distancia d_1 se fijó en 960 milímetros y corresponde a la distancia desde el suelo hacia el centro de cada sensor sobre el eje Y. La distancia d_2 con un valor de 2000 milímetros corresponde a la distancia desde el centro de cada sensor hasta el origen S_0 sobre el eje Z.

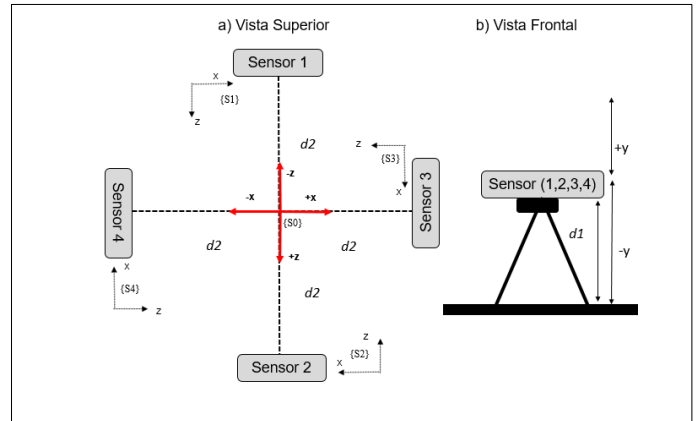


Figura 1.- Área de captura en forma de cruz.

Se requiere de un nivel láser para alinear los tripodes que sostienen los sensores y de una aplicación de calibración que permite ubicarlos a 2000 milímetros del origen S_0 , alineando por pares el eje X de S1 con S2 y de S3 con S4.

La interfase de programación de los sensores obliga a que se use una computadora con un puerto USB 3.0 para conectar cada sensor. Para esto se cuenta con cuatro computadoras Intel NUC D54250WYK, a estas computadoras se les denomina Equipos de Captura. Además se requiere de otra computadora denominada Equipo de Control que envía una señal de inicio a los Equipos de Captura para llevar a cabo la adquisición de datos de manera sincronizada. Los Equipos de Captura obtienen los datos de los sensores y los almacenan con formato de nubes de puntos con color. Esto se logra a partir de un mapeo entre las imágenes obtenidas del flujo de datos de color RGB y las imágenes obtenidas del flujo de datos de profundidad utilizando las funciones de mapeo de datos que proporciona la interfaz de programación de aplicaciones de los sensores.

Los archivos de las nubes de puntos contienen las coordenadas XYZ de cada punto y las componentes de color rojo, verde y azul (RGB) correspondientes. Los archivos de cada Equipo de Captura son transferidos al Equipo de Control al finalizar la adquisición para llevar a cabo el procesamiento posterior. El proceso de captura sincronizada con cuatro sensores RGBD se lleva a cabo en unos pocos segundos, representando una gran ventaja sobre otros sistemas de escaneo del cuerpo humano.

Las aplicaciones de los Equipos de Captura para la adquisición de datos y del Equipo de Control para el envío de la señales de sincronización fueron desarrollados en lenguaje C# sobre la plataforma de Visual Studio de Microsoft.

3. FUSIÓN DE DATOS CAPTURADOS POR LOS CUATRO SENSORES RGBD

Para llevar a cabo el proceso de fusión de datos es necesario aplicar una transformación geométrica a las nubes de puntos de cada sensor para luego fusionarlos en una sola nube de puntos con color. El proceso de fusión de datos fue desarrollado en Matlab utilizando las herramientas para procesamiento y visualización de nubes de puntos.

La transformación geométrica consiste de una rotación (R) seguida de una traslación (T) y se realiza tomando como referencia el sistema coordenado con origen en S_0 mostrado en la Figura 2. Las nubes de puntos de cada sensor serán rotadas y trasladadas de manera que sus ejes coordenados coincidan con los ejes de referencia con origen en S_0 .

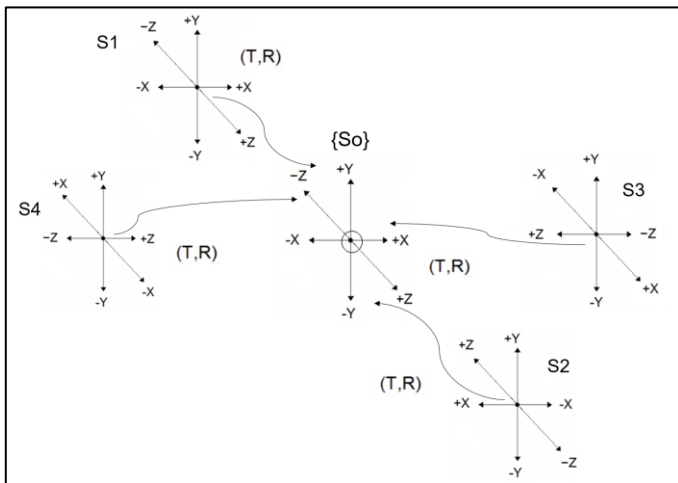


Figura 2.- Sistema coordenado del área en forma de cruz para la fusión de datos.

La transformación geométrica se aplica a cada punto tridimensional de acuerdo a la fórmula:

$$P_T = R P_0 + T \quad (1)$$

Donde P_T es el punto de transformado, R es una matriz de rotación, T es un vector de traslación y P_0 es el punto a transformar. Los parámetros de la matriz de rotación R y el vector de traslación T serán diferentes para cada sensor, ya que su orientación es diferente. Enseguida se describe como se determinaron los parámetros de transformación para cada sensor:

Para el sensor S1.- El sistema coordenado de S_1 tiene la misma orientación que el sistema coordenado de referencia con origen en el punto S_0 , por lo tanto, la matriz de rotación R es la matriz

identidad I . Se aplicará una traslación de -42 milímetros sobre el eje X debido a que la cámara de profundidad está colocada a esta distancia del centro del sensor y una traslación sobre el eje Z de -2000 milímetros. Entonces la ecuación de transformación queda definida de la siguiente manera:

$$P_{T(S1)} = I \cdot P_{O(S1)} + [-42, 0, -2000]^T \quad (2)$$

Para el Sensor S2.- Se realiza una rotación de 180 grados del eje X y el eje Z del sistema coordenado de S_2 para hacerlos coincidir con el sistema coordenado de referencia con origen en el punto S_0 . Se aplicará una traslación de 42 milímetros sobre el eje X debido a que la cámara de profundidad está colocada a esta distancia del centro del sensor y una traslación sobre el eje Z de 2000 milímetros. Entonces la ecuación de transformación queda definida de la siguiente manera:

$$P_{T(S2)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot P_{O(S2)} + [42, 0, 2000]^T \quad (3)$$

Para el Sensor S3.- Se realiza una rotación de $+90$ grados del eje X y el eje Z del sistema coordenado de S_3 para hacerlos coincidir con el sistema coordenado de referencia con origen en el punto S_0 , esto equivale a intercambiar la orientación de los ejes X y Z , es decir, el eje X del sensor ahora será el eje Z y viceversa. Se aplicará una traslación de 2000 milímetros sobre el eje X y -42 milímetros sobre el eje Z . Entonces la ecuación de transformación queda definida de la siguiente manera:

$$P_{T(S3)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_z \\ P_y \\ P_x \end{bmatrix} + [2000, 0, -42] \quad (4)$$

Para el Sensor S4.- Se realiza una rotación de -90 grados del eje X y el eje Z del sistema coordenado de S_4 para hacerlos coincidir con el sistema coordenado de referencia con origen en el punto S_0 . Se aplicará una traslación de -2000 milímetros sobre el eje X y 42 milímetros sobre el eje Z . Entonces la ecuación de transformación queda definida de la siguiente manera:

$$P_{T(S4)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_z \\ P_y \\ P_x \end{bmatrix} + [-2000, 0, 42] \quad (5)$$

Las nubes de puntos transformados de los cuatro sensores se unen para formar una sola nube de puntos fusionados. Si las transformaciones geométricas son correctas, los puntos fusionados formarán superficies bien unidas y uniformes, sin huecos ni escalones entre ellas. La Figura 3 muestra las nubes de puntos de cada sensor antes de ser fusionadas y la Figura 4 muestra la fusión resultante a la cual se le aplican algoritmos de filtrado para eliminar puntos no deseados que pudiesen generar

problemas en la reconstrucción tridimensional y ocasionar que el modelo de la persona escaneada no sea adecuado.

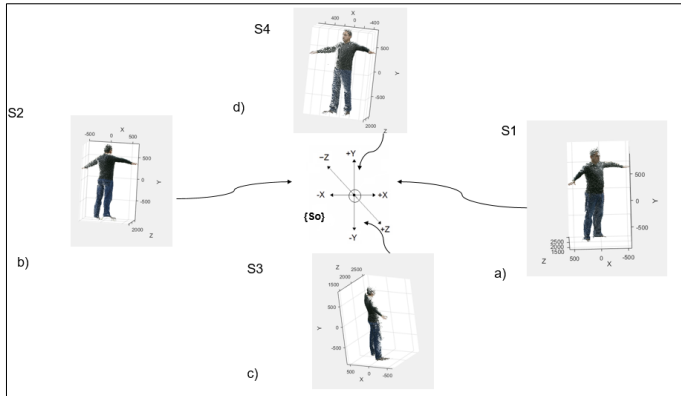


Figura 3.- Nubes de puntos de cada sensor: a) Sensor 1, b) Sensor 2, c) Sensor 3 y d) Sensor 4.

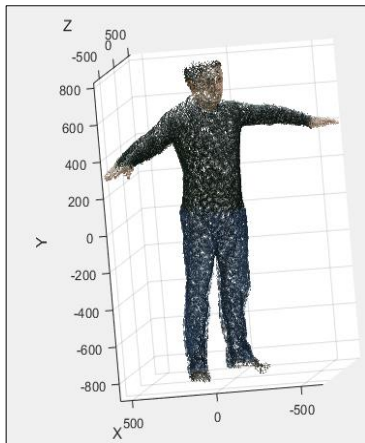


Figura 4.- Nube de puntos fusionados.

La nube de puntos fusionados es almacenada en un archivo con formato poligonal (PLY). El archivo de formato poligonal relaciona las coordenadas XYZ con los vértices de un polígono creado uniendo dichos vértices, a esos polígonos se les denomina caras. Entonces el archivo PLY debe contener la información de los vértices y de las caras formadas. También se puede incluir información de color en el archivo. [9]

Se desarrolló un experimento para evaluar el desempeño del proceso de fusión de datos. Consiste en colocar un pizarrón de color blanco en forma horizontal en el centro del área de captura cerca del suelo con la intención de que sea visto por los cuatro sensores. De esta manera se tiene una superficie plana, se conocen sus dimensiones y localización exacta con respecto a los cuatro sensores. Se definió una región de interés en forma de cubo que contiene la superficie plana y se segmentó del resto de la escena. Una vez extraída la información de la región de interés de las nubes de puntos de cada sensor se llevó a cabo el proceso de fusión de datos aplicando la transformación geométrica a los

datos de cada sensor para después fusionarlos en una sola nube de puntos.

El proceso de evaluación consistió en medir la dispersión de datos en las nubes de puntos tridimensionales de cada sensor de forma individual y hacer lo mismo con la nube de puntos fusionados. De esta manera podemos evaluar si es correcto el proceso de transformación geométrica de las nubes de puntos de los cuatro sensores para alinear las superficies del cuerpo. Si las superficies generadas por los datos transformados no se alinean correctamente el proceso de fusión de datos provocará que la nube de puntos fusionados presente una mayor dispersión comparada con la dispersión presente en las nubes de puntos de cada sensor.

Para medir la dispersión de los datos se ajusto un plano a los puntos tridimensionales de la región segmentada utilizando el método de regresión lineal múltiple. La Tabla 2 muestra los coeficientes calculados del plano ajustado a los datos de la superficie segmentada para cada uno de los cuatro sensores y también para del plano ajustado a los datos fusionados.

Tabla 2.- Resultados de la regresión lineal múltiple para la evaluación del proceso de fusión de datos.

Nube de Puntos	Coefficientes del Polinomio de Regresión	Desviación Estándar (Sy)	Error Estándar Estimado (Sy/x,z)
Sensor 1	[-695.4932 0.0055 -0.005]	3.1250 mm	2.7874
Sensor 2	[-696.3452 -0.0029 -0.023]	4.7122 mm	2.3849
Sensor 3	[-695.6101 -0.0121 0.0026]	4.8616 mm	4.2351
Sensor 4	[-695.7349 -0.0017 -0.0134]	3.5994 mm	2.9144
Datos fusionados	[-696.3654 -0.0025 -0.0104]	4.1888	3.7507

Los planos ajustados a los datos coinciden, con errores mínimos a los valores medidos físicamente de la superficie plana. En cada caso se muestra el cálculo de la desviación estándar de los datos en las nubes de puntos y del Error Estándar Estimado (Sy/x,z) de estos datos con respecto al plano ajustado. Se puede observar que en todos los casos se cumple con el criterio $Sy/x,z < Sy$. Estos resultados permiten establecer que el proceso de fusión es adecuado, ya que el Error Estándar Estimado se encuentran en el orden de pocos milímetros. Este error no es significativo para la generación del modelo tridimensional.

4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO E IMPRESIÓN 3D

La reconstrucción, mallado y creación de superficies del modelo tridimensional requiere mayores recursos computacionales en comparación al de adquisición y fusión de datos, por esta razón se utilizó una computadora Dell modelo G3 que posee una tarjeta de video NVIDIA GeForce GTX 1050 con 4GB de memoria gráfica. Se utilizó el software, MeshLab para la creación del modelo tridimensional a partir de la nube de puntos fusionados almacenada en el archivo PLY. La ventaja de Meshlab sobre

otros programas de modelado tridimensional como Solidworks, Autodesk, Unity o Matlab, es que la construcción del modelo no se basa en herramientas de diseño sino en el manejo directo de algoritmos matemáticos, por lo que se requerirá conocimiento previo de cada uno de ellos y sus parámetros de funcionamiento. El proceso de modelado tridimensional varía en función de la morfología del objeto a reconstruir, para el caso del cuerpo humano se definió una metodología apropiada para que el modelo generado pueda ser enviado a una impresora 3D. Primero se realiza el cálculo de vectores normales a los vértices usando el muestreo por discos de Poisson. Después se realiza la reconstrucción tridimensional por medio del algoritmo de superficies de Poisson, sus parámetros más importantes son la profundidad, el número mínimo de muestras a reconstruir y el filtrado inicial. Luego se realiza un postprocesamiento del modelo tridimensional que incluye suavizado, compactación de caras y filtrado final. Por último, se exporta el modelo generado a un archivo con formato de impresión de estereolitografía (STL). Se eligió el formato STL por ser el más utilizado en las impresoras 3D en el mercado [10-11]. La Figura 5 muestra el modelo tridimensional generado a partir de la nube de puntos fusionados de la Figura 4.

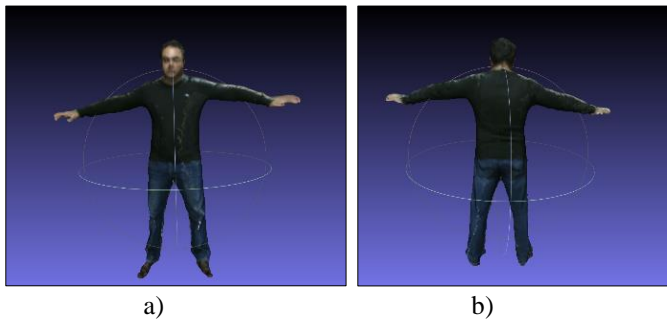


Figura 5.- Modelo tridimensional generado. a) Vista frontal y b) vista posterior.

Para el proceso de impresión 3D se probaron dos diferentes impresoras: la Makerbot 2X Replicator y la Ender 3 Pro. La primera utiliza software del propietario Makerbot y la segunda puede usar diferentes programas, en este proyecto se utilizó el software Cura ya que es gratuito y funciona bien con la impresora Ender 3 Pro. Se utilizó filamento de ácido poliláctico (PLA) en ambas impresoras.

El modelo tridimensional exportado en formato STL es previsualizado para configurar los parámetros de impresión, entre los que se encuentran: la escala de la pieza, el patrón de impresión, la temperatura de fusión del material y si se requiere la adición de estructuras de soporte, así como la densidad del relleno de la pieza y la posición en que la pieza será impresa. La primera prueba de impresión se configuró con los parámetros mostrados en la Tabla 3, se reduce el tamaño original de la persona de acuerdo a los límites del área de impresión y se añade estructura de soporte la cual permita que el modelo de la persona

pueda ser impresa de pie. La Figura 6 muestra el modelo impreso en 3D utilizando la impresora Makerbot y la Figura 7 muestra el modelo impreso en 3D de otra persona utilizando la impresora Ender 3 Pro. La calidad de los modelos impresos es similar aunque existan diferencias en el software de las impresoras.

Tabla 3.- Parámetros para la impresión del modelo 3D.

Parámetro	Valor
Escala	8% del tamaño original
Orientación de la pieza	Persona de Pie
Extrusor	
Temperatura de extrusión	230° C
Diámetro del filamento	1.77 mm
Velocidad de impresión	40 mm/s
Estructuras de Soporte	Aplica
Densidad de Relleno (<i>infill</i>)	10 %
Patrón de Impresión	Hexagonal

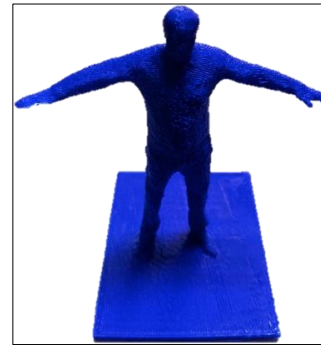


Figura 6.- Modelo 3D de la Figura 5 generado con la impresora Makerbot.



Figura 7.- Modelo 3D de la primera persona de la Tabla 4 generado con la impresora Ender 3 Pro.

Se utilizó el sistema desarrollado para escanear y generar el modelo en 3D de diferentes personas. La Tabla 4 muestra la nube de puntos fusionados y el modelo 3D generado para 6 diferentes personas.

Tabla 4.- Nube de puntos fusionados y modelo 3D de 6 diferentes personas.



6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de escaneo y modelado tridimensional del cuerpo humano que captura de datos con cuatro sensores RGBD. Se desarrollaron las funciones para la fusión de datos tridimensionales capturados por los cuatro sensores y almacenados en forma de nube de puntos. Se llevó a cabo la reconstrucción y la creación de superficies tridimensionales del modelo de la persona capturada a partir de los datos fusionados utilizando el software Meshlab. El modelo tridimensional generado fue almacenado como un archivo con formato de estereolitografía (STL) el cual puede ser procesado por una impresora 3D.

Se evaluó la eficiencia del proceso de fusión de datos demostrando que los datos fusionados de los cuatro sensores no presentan una dispersión mayor a la de cada sensor. Esto se logra solo si se lleva a cabo un proceso de calibración adecuado, que consiste en alinear de forma correcta los planos de los cuatro sensores. Para que el sistema trabaje de forma sincronizada, se requiere que las características computacionales de los Equipos de Captura sea lo más homogénea posible en software y hardware, además de sincronizar el tiempo del sistema de los Equipos de Captura con el del Equipo de Control.

Se presentaron algunas discrepancias en los datos tridimensionales capturados debido a que el cabello humano genera ruido durante el proceso de adquisición ya que no refleja de manera adecuada los rayos infrarrojos, otra discrepancia se presentó al segmentar los pies del suelo, aunque estas discrepancias no representan una dificultad significativa para la creación del modelo tridimensional.

Para mejorar el sistema de escaneo se puede utilizar una estructura fija para la ubicación de los cuatro sensores que facilite el proceso de calibración. Para mejorar el modelado tridimensional se pueden probar diferentes alternativas de algoritmos de reconstrucción y suavizado de superficies, evitando reducir el detalle en los rasgos finos del modelo como la cara y las manos.

7. REFERENCIAS

- [1] H. Daanen, G. J van de Water "Whole Body Scanners", Displays, n° 19, pp. 111-120, 1998.
- [2] S. Paquette, "3D scanning in apparel design and human engineering," in IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 16, no. 5, pp. 11-15, Sept. 1996.
- [3] E. Trucco, A. Verri Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, EE.UU: Prentice Hall, 1998.
- [4] H. Daanen, F.B Ter Haar "3D Whole Body Scanners Revisited", Displays, n° 34, pp. 270-275, 2013.
- [5] V. Velasco, Fusión de Datos de Dos sensores RGBD para generar un modelo de 360 grados del movimiento de una persona, Chihuahua: División de Estudios Profesionales del Instituto Tecnológico de Chihuahua, 2016.
- [6] F. Acuna, D. Rivas, S. Chancusi and P. Navarrete, "Design and Construction of a 3D Printer Auto Controller Wirelessly Through of Free Software," in IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 6, pp. 1893-1898, June 2015
- [7] A. Jana, Kinect For Windows SDK Programming Guide, Birmingham: Packt Publishing, 2012.
- [8] J. Treven, D.M. Córdova Esparza, "Kin2. A Kinect 2 toolbox for Matlab", Science of Computer Programming, vol. 130, n° 30, pp. 97-106, 2016.
- [9] K. McHenry, P. Bajcsy "An Overview of 3D Data Content, File Formats and Viewers", National Center for Supercomputing Applications, University of Illinois, Illinois, 2008.
- [10] M. Corsini, P. Cignoni and R. Scopigno, "Efficient and Flexible Sampling with Blue Noise Properties of Triangular Meshes," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 18, no. 6, pp. 914-924, June 2012.
- [11] M. Kazhdan, M. Bolitho, H. Hoppe "Poisson Surface Reconstruction" de Eurographics Symposium on Geometry Processing, Estados Unidos, 2009, pp. 61-70