ción. El tipo de iluminación utilizado es proporcionado por un tubo de luz UV-A de 20 W para piezas especulares y una lámpara de luz IR para piezas transparentes y translúcidas.

Ya que los objetos adquiridos en todos los experimentos son los mismos, siempre se utiliza el lente TELE. La iluminación ambiental es controlada ubicando el objeto dentro de una caja negra sobre una tornamesa. Una vez es aislado de la luz natural, este se ilumina con luz UV-A o luz IR según sea el caso. Si la iluminación natural no es controlada, es decir, que el objeto no es iluminado únicamente por el tipo de luz deseada (UV-A o IR), los aportes de otras fuentes de luz afectan el comportamiento de la superficie adquirida, por tanto, los resultados no serían igual de confiables a los obtenidos al aislar la pieza.

La luz UV-A o luz negra, es la forma de denominar a un tipo especial de lámpara que emite radiación ultravioleta. La amplitud de onda de la luz ultravioleta es una onda larga y solo una pequeña porción de esta luz es visible. Las luz negra producida por los tubos fluorescentes, tiene el mismo proceso de fabricación que los tubos fluorescentes de luz blanca o visible. La diferencia consiste en el material interno, en lugar de utilizar fósforo se rellena con un cristal de coloración púrpura-azulado que lleva el nombre de cristal de Wood. El cristal de Wood está conformado por un óxido de níquel con cobalto el cual hace un efecto de pantalla bloqueando el espectro de luz visible sobre los 400 nanómetros.
La lámpara infrarroja es un tipo de lámpara incandescente reforzada con propiedad de radiación infrarroja. Emite menos rayos visibles que una lámpara normal, y está diseñada para transformar energía de entrada en rayos infrarrojos con energía térmica.

Geometría de Adquisición

Después de realizar varios experimentos en los cuales se cambió la posición del objeto respecto al escáner y a la fuente de luz; y teniendo en cuenta las especificaciones recomendadas para el óptimo funcionamiento del lente escogido respecto a la distancia sensor - objeto y medidas del objeto, se definió la siguiente disposición:

1. El objeto es aislado de cualquier tipo de luz diferente a la luz proporcionada por la lámpara UV-A o la IR, según sea el caso. Para esto se diseñó una caja en la cual el objeto y la

lámpara son colocados, de esta forma la superficie del objeto solo es iluminada por el tipo de luz deseada. Todas las superficies de la caja son negras mate, con el fin de evitar posibles perturbaciones ópticas que afecten las tomas hechas por el sensor CCD.

2. En el caso de objetos especulares, la lámpara de luz UV-A es ubicada dentro de la caja, en la parte superior de la misma, para superficies transparentes y translúcidas se ubica la lámpara de luz IR detrás de el objeto a adquirir. La localización de la fuente de luz en ambos casos fue determinada de esta manera, después de realizar varias pruebas en diferentes posiciones, buscando que la iluminación sobre la vista tomada en ese instante por el escáner fuera uniforme.

3. Mantener la ubicación espacial del objeto respecto al escáner, facilita el proceso de registro de las imágenes de rango en una etapa posterior a la adquisición. Por esta razón se utiliza una tornamesa, la cual rota la pieza en grados precisos ordenados mediante un software especializado. De esta forma la única variación en distancias, durante la adquisición de las vistas necesarias para reconstruir cada pieza, será la rotación en el eje Y. El objeto es soportado sobre una base que le da 45° de inclinación respecto al eje X, para evitar auto oclusiones.

4. La caja con el objeto adentro se colocó sobre una mesa que tiene 70 cm de altura. Dependiendo de la altura a la que esté ubicado el objeto, es determinada la altura del escáner. La altura del escáner respecto a la del objeto debe ser mayor, ya que es la única forma de garantizar la total cobertura de la pieza por parte del láser y el sensor CCD, para el proceso de triangulación.

5. El escáner de rango está sostenido por un trípode robusto a 100 cm del piso, las distancias respecto al suelo tanto para la pieza como para el escáner se mantuvieron constantes para todas las piezas adquiridas, ya que las dimensiones de estas se encuentran dentro del mismo rango.

6. La distancia estipulada entre el escáner y la mesa donde está ubicado el objeto fue de 100 cm. Este valor se estableció dentro de los rangos de distancia especificados por el fabricante para el lente utilizado y como resultado de varias pruebas a diferentes distancias que arrojaron un mejor funcionamiento con esta.

Al comparar la Figura 4.2a con la Figura 4.3a, se puede observar como el brillo producido por este tipo de superficies disminuye al iluminar la pieza con luz UV-A. Al igual que en el caso de 2D, para la adquisición en 3D se percibe la diferencia en la información adquirida (ver Figura 4.3b) respecto a la obtenida en condiciones de iluminación no controladas. La imagen de rango obtenida con la disposición expuesta en el Experimento 2, presenta más y mejor calidad de información que la producida en el Experimento I. El problema de la transmisión total de la luz que se presentaba en el experimento anterior con las piezas transparentes y translúcidas, se ve solucionado con el Experimento II. Las Figuras 4.3d y 4.3f muestra como con la radiación IR el sensor obtiene información de estas superficies, ya que la fuente de iluminación proporcionada disminuye el porcentaje de transmitancia y aumenta el porcentaje de reflexión; de esta forma el sensor puede captar la geometría del objeto.

4.1.3 Experimento III: Adquisición Pieza Pintada y sin condiciones de iluminación controlada (Ground Truth)

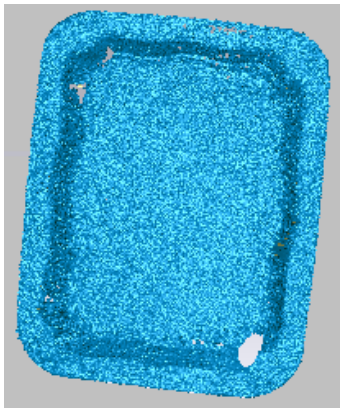
Este experimento es realizado para validar la información obtenida con la técnica de adquisición propuesta (Experimento II). Para llevar a cabo la adquisición de la información considerada como Ground Truth, se sigue el mismo procedimiento que en el Experimento I. La diferencia es que ahora la pieza es manipulada, al pintarla o cubrirla con un polvo blanco. Al cubrir el objeto con esta sustancia, se busca disminuir los efectos adversos producidos por las propiedades ópticas de los materiales no homogéneos. La Figura 4.4 contiene los resultados en 2D y 3D de este experimento, tanto para el caso de transparentes como para el de especulares.

La información proporcionada por el Ground Truth es utilizada para evaluar los resultados del modelo 3D registrado obtenido con las condiciones de iluminación controlada.

4.2 Análisis y Discusión de Resultados

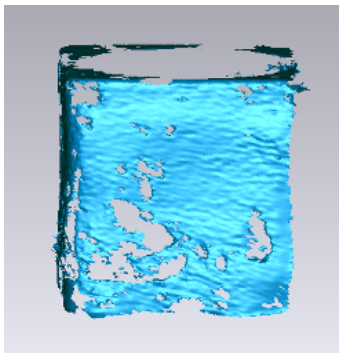
En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos después de registrar las imágenes de rango obtenidas en los experimentos descritos en la Sección anterior. El modelo 3D completo se construye con un software especializado, siguiendo el proceso de reconstrucción

(a) Pieza especular (2D)

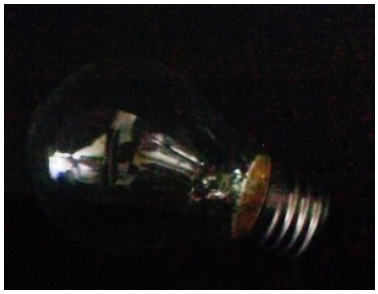


(b) Pieza especular (3D)

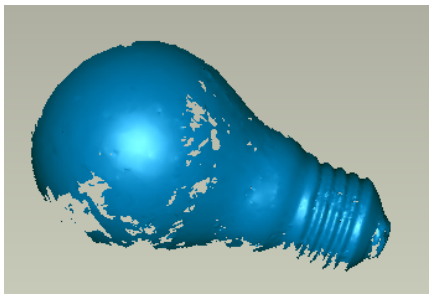
(c) Pieza translúcida (2D)



(d) Pieza translúcida (3D)



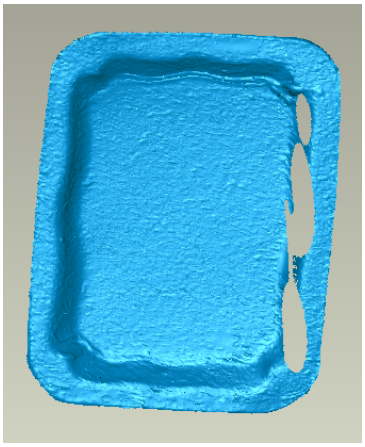
(e) Pieza transparente (2D)



(f) Pieza transparente (3D)

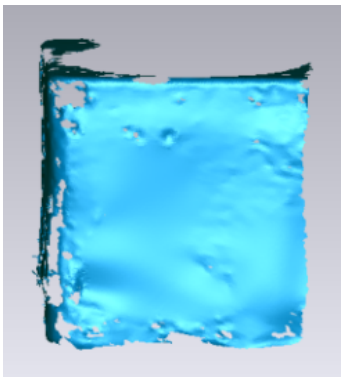
Figura 4.3: Resultados de adquisición implementando el Experimento II

(a) Pieza especular (2D)



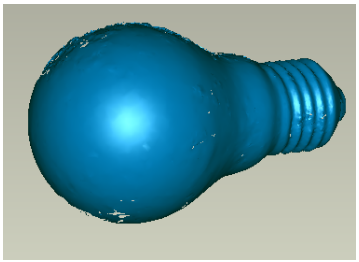
(b) Pieza especular (3D)

(c) Pieza translúcida (2D)



(d) Pieza translúcida (3D)

(e) Pieza transparente (2D)



(f) Pieza transparente (3D)

Figura 4.4: Resultados de adquisición implementando el Experimento III

detallado en el Capítulo 2. El software utilizado para la reconstrucción e integración de las mallas de triángulos que conforman el modelo final es el Geomagic Studio® v.10.

Los objetos adquiridos con la técnica propuesta se presentan así, objetos especulares: metal plateado, metal dorado y cerámica (ver Figura 4.5), objetos transparentes y translúcidos (ver Figura 4.6).

Figura 4.5: Objetos especulares. (a),(b) Metal plateado (c),(d) Metal dorado (e),(f) Cerámicas

El modelo reconstruido es almacenado en el formato .*wrl para posteriormente ser cargado con el software Geomagic Qualify® v.7, con este programa se realiza el análisis cualitativo de los modelos adquiridos, comparando el modelo 3D obtenido con la técnica de adquisición propuesta y el modelos 3D obtenido con el Experimento 3 (Ground Truth).

Figura 4.6: Objetos transparentes y translúcidos. (a),(b) Translúcidos (c),(d) Transparentes

La Figura 4.7 ilustra la comparación entre la reconstrucción con la técnica propuesta de las piezas especulares y la reconstrucción de la misma pieza con la superficie pintada. Los resultados obtenidos en la comparación encajan razonablemente bien, como se observa en las Tablas 4.1 - 4.6. En estas tablas se detallan la distancia en mm (representado en rangos de valores) entre los puntos de la imagen obtenida con las técnicas planteadas y el Ground Truth, es decir, que los datos de la última columna corresponde al porcentaje (%) de puntos que al ser comparados tienen como distancia entre ellos un valor del rango indicado en la columna 1 de cada tabla. Se observa como el máximo porcentaje de desviación que se presenta es de 0.441 en el caso de una de las piezas cerámicas, y en todas las piezas los mayores porcentajes de desviación están en promedio entr 0.0 y 0.007.

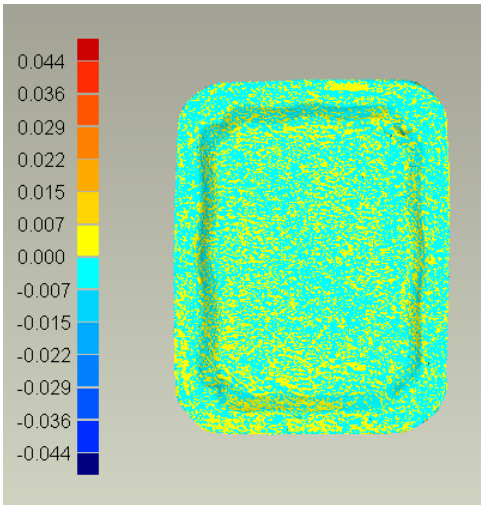
Al igual que para los objetos especulares, la comparación de los resultados obtenidos con la técnica de iluminación IR se observan en la Figura 4.8, en las Tablas 4.7 - 4.10 se presenta el resultado del porcentaje de desviación, aunque el valor máximo es un poco mayor al presentado en las piezas especulares, aún así es un valor bajo que representa un resultado bastante aceptable en la reconstrucción de la geometría del objeto. Los mayores porcentajes de desviación se encuentran entre el rango de 0.0 a 0.699.

El error de distribución entre las dos reconstrucciones (Experimento 2 y Experimento 3) presenta un valor promedio de 0.034 mm.

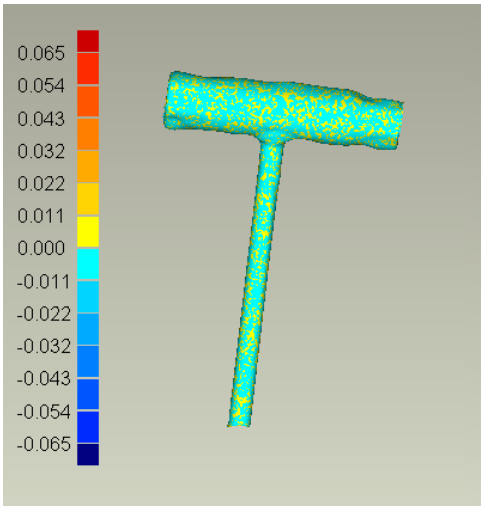
>=Min	**<Max**	**# Puntos**	**%**
-0.015	-0.007	0	0.000
-0.007	0.000	5928	11.488
0.000	0.007	45675	88.512
0.005	0.015	0	0.000

Tabla 4.1: Porcentaje de Desviación Figura 4.7a

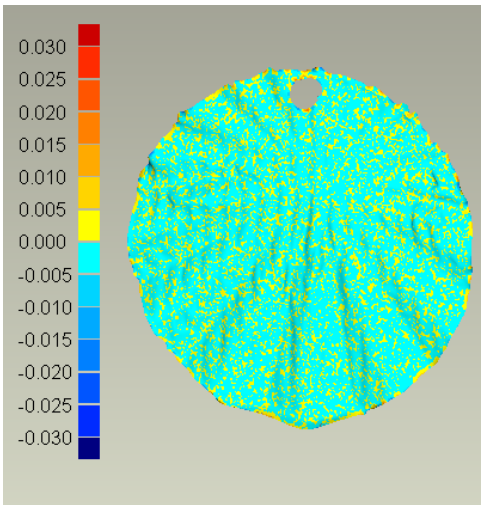
Las diferencias entre el modelo adquirido con la técnica propuesta, y el modelo ideal representado por el Ground Truth, radican principalmente en las regiones de los bordes. Esta situación se debe al ángulo del escáner respecto al objeto en el proceso de adquisición. La



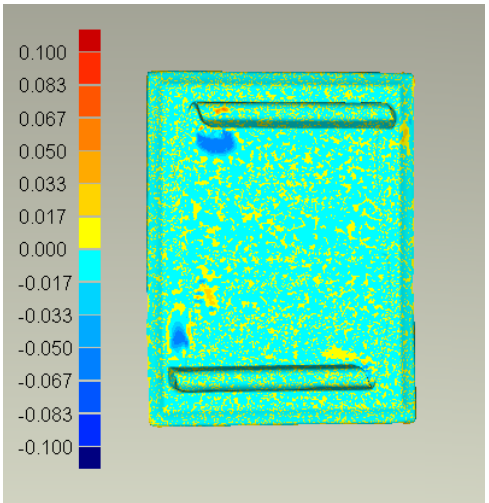
(a) Comparación objeto Figura 4.5a



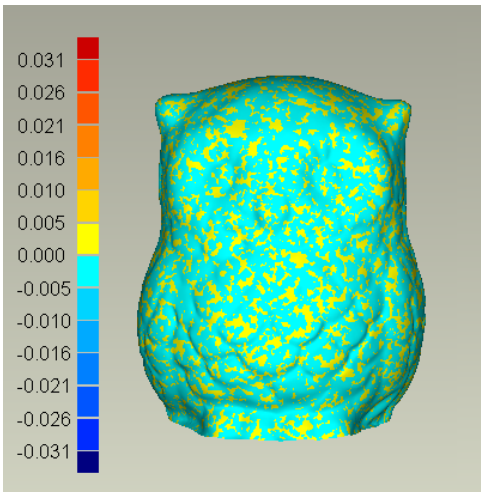
(b) Comparación objeto Figura 4.5b



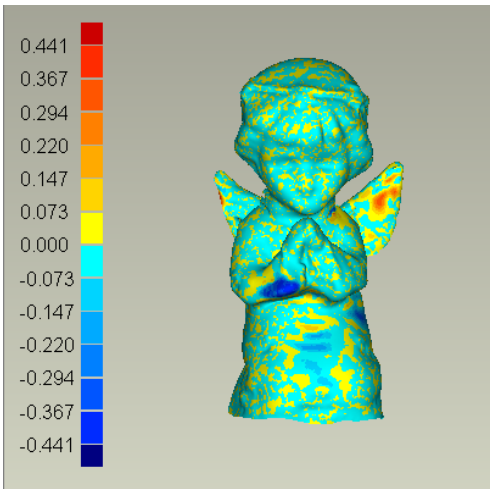
(c) Comparación objeto Figura 4.5c



(d) Comparación objeto Figura 4.5d

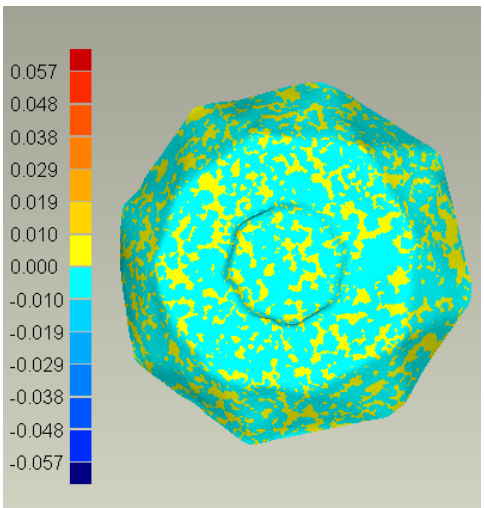


(e) Comparación objeto Figura 4.5e

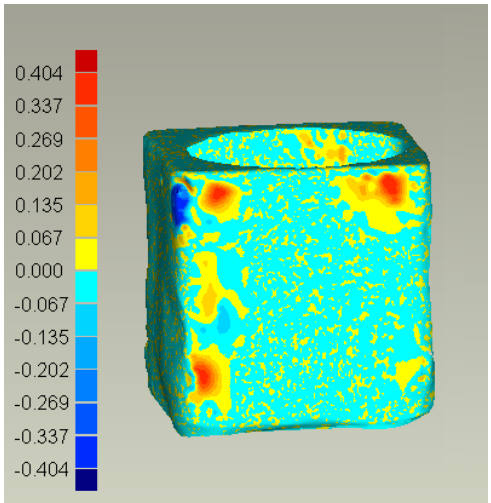


(f) Comparación objeto Figura 4.5f

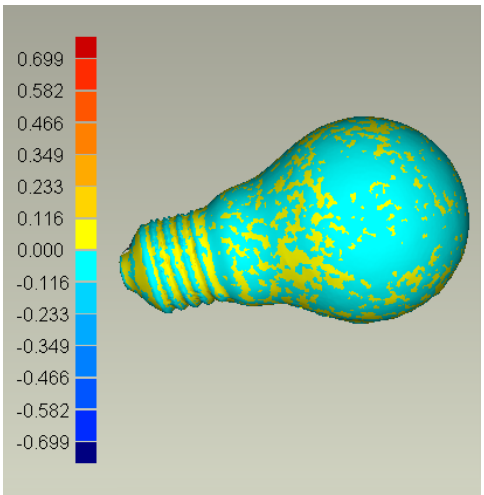
Figura 4.7: Comparación entre resultados Experimentos 2 y 3 para los objetos especulares



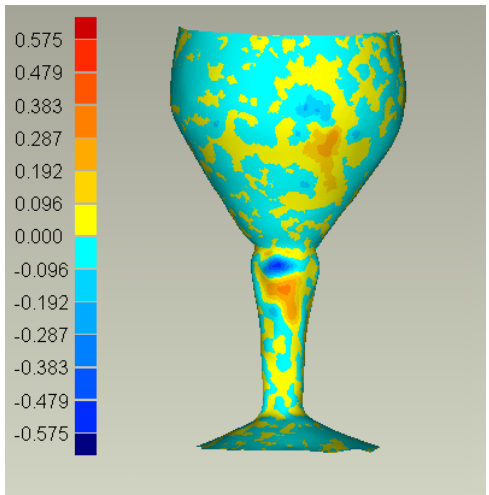
(a) Comparación objeto Figura 4.6a



(b) Comparación objeto Figura 4.6b



(c) Comparación objeto Figura 4.6c



(d) Comparación objeto Figura 4.6d

Figura 4.8: Comparación entre resultados Experimentos 2 y 3 para los objetos transparentes y translúcidos

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.022	-0.011	0	0.000
-0.011	0.000	15690	48.656
0.000	0.011	16557	51.344
0.011	0.022	0	0.000

Tabla 4.2: Porcentaje de Desviación Figura 4.7b

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.025	-0.020	0	0.000
-0.020	-0.015	8	0.016
-0.015	-0.010	66	0.129
-0.010	-0.005	202	0.394
-0.005	0.000	25458	49.642
0.000	0.005	25267	49.270
0.005	0.010	193	0.376
0.010	0.015	81	0.158
0.015	0.020	8	0.016
0.020	0.025	0	0.000

Tabla 4.3: Porcentaje de Desviación Figura 4.7c

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.083	-0.067	0	0.000
-0.067	-0.050	126	0.068
-0.050	-0.033	228	0.122
-0.033	-0.017	463	0.248
-0.017	0.000	88456	47.419
0.000	0.017	96751	51.866
0.017	0.033	371	0.199
0.033	0.050	92	0.049
0.050	0.067	55	0.029
0.067	0.083	0	0.000

Tabla 4.4: Porcentaje de Desviación Figura 4.7d

relevancia de la disposición del escáner en relación a la pieza y a la fuente de iluminación, se demostró realizando un barrido de adquisición a diferentes ángulos. Conservando el resto de las disposiciones planteadas en los respectivos experimentos, se adquirió la misma vista de un objeto moviendo el escáner cada 15° respecto a la posición del objeto. La Tabla 4.11 muestra

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.010	-0.005	0	0.000
-0.005	0.000	17090	49.463
0.000	0.005	17461	50.537
0.005	0.010	0	0.000

Tabla 4.5: Porcentaje de Desviación Figura 4.7e

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.441	-0.367	29	0.052
-0.367	-0.294	52	0.093
-0.294	-0.220	69	0.123
-0.220	-0.147	139	0.248
-0.147	-0.073	325	0.580
-0.073	0.000	26050	46.506
0.000	0.073	28633	51.118
0.073	0.147	389	0.694
0.147	0.220	145	0.259
0.220	0.294	132	0.236
0.294	0.367	44	0.079
0.367	0.441	6	0.011

Tabla 4.6: Porcentaje de Desviación Figura 4.7f

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.019	-0.010	0	0.000
-0.010	0.000	4695	50.527
0.000	0.010	4597	49.473
0.010	0.019	0	0.000

Tabla 4.7: Porcentaje de Desviación Figura 4.8a

el número de triángulos que posee la malla de cada vista obtenida en los diferentes ángulos en que se posiciona el escáner para el objeto de la Figura 4.5a y la Tabla 4.12 para el objeto de la Figura 4.6c.

La adquisición con la pieza de la Figura 4.5a pintada tuvo como resultado 405652 triángulos y la malla obtenida con la luz UV-A y el escáner en la posición recomendada tiene 389947 triángulos, es decir que la información obtenida aplicando la técnica propuesta es bastante cercana al Ground Truth. También se observa que la disposición del escáner es relevante en la

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.404	-0.337	37	0.039
-0.337	-0.269	47	0.049
-0.269	-0.202	49	0.052
-0.202	-0.135	77	0.081
-0.135	-0.067	337	0.355
-0.067	0.000	43813	46.131
0.000	0.067	48713	51.290
0.067	0.135	920	0.969
0.135	0.202	410	0.432
0.202	0.269	240	0.253
0.269	0.337	193	0.203
0.337	0.404	139	0.146

Tabla 4.8: Porcentaje de Desviación Figura 4.8b

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.699	-0.582	2	0.019
-0.582	-0.466	4	0.039
-0.466	-0.349	3	0.029
-0.349	-0.233	33	0.318
-0.233	-0.116	382	3.681
-0.116	0.000	5036	48.521
0.000	0.116	4569	44.022
0.116	0.233	314	3.025
0.233	0.349	26	0.251
0.349	0.466	7	0.067
0.466	0.582	3	0.029
0.582	0.699	0	0.000

Tabla 4.9: Porcentaje de Desviación Figura 4.8c

obtención de buenos resultados, ya que con los resultados de las Tablas 4.11 y 4.12 se puede concluir que a medida que el objeto no está al frente del escáner (posición 0°), la cantidad y calidad de la información capturada por el sensor decrece.

>=Min	<Max	# Puntos	%
-0.575	-0.479	6	0.113
-0.479	-0.383	11	0.207
-0.383	-0.287	19	0.358
-0.287	-0.192	20	0.377
-0.192	-0.096	66	1.245
-0.096	0.000	2635	49.698
0.000	0.096	2263	42.682
0.096	0.192	147	2.773
0.192	0.287	110	2.075
0.287	0.383	24	0.453
0.383	0.479	0	0.000

Tabla 4.10: Porcentaje de Desviación Figura 4.8d

Angulo	Distancia	# Triángulos
75°	90 cm	152048
60°	90 cm	234797
45°	90 cm	285552
15°	90 cm	343511
0°	90 cm	389947
-15°	90 cm	277824
-45°	90 cm	225903
-60°	90 cm	192317
-75°	90 cm	150217

Tabla 4.11: Adquisición de una vista realizando un barrido de ángulos (Figura 4.5a)

Angulo	Distancia	# Triángulos
75°	90 cm	225392
60°	90 cm	301640
45°	90 cm	345552
15°	90 cm	363274
0°	90 cm	425614
-15°	90 cm	357268
-45°	90 cm	318313
-60°	90 cm	275617
-60°	90 cm	215617

Tabla 4.12: Adquisición de una vista realizando un barrido de ángulos (Figura 4.6a)

5 Conclusiones y Trabajo Futuro

La reconstrucción 3D de objetos especulares, transparentes y translúcidos, es una tarea que representa bastantes dificultades para la visión en computador, debido a la alta reflectividad en el caso de las superficies especulares y a la baja reflectividad de las superficies transparentes y translúcidas. Los métodos basados en triangulación que emplean como fuente de iluminación lámparas que irradian luz perteneciente al espectro visible, no son eficientes para este tipo de materiales. Este documento propone una nueva técnica de adquisición para construir modelos 3D precisos de objetos que representan condiciones ópticas adversas, tales como las presentes en objetos metálicos, cerámicas, transparentes y translúcidos.

La técnica propuesta utiliza como dispositivo de captura el escáner de rango Vivid 9i y como fuente de iluminación luz UV-A para el caso de superficies especulares, y luz IR para superficies transparentes y translúcidas. La técnica se centra en controla la iluminación en el espacio de captura, ya que de esta forma se reducen los efectos adversos causados por la alta reflectividad presente en las superficies especulares y la baja reflectividad propia de los materiales transparentes. La longitud de onda de la luz UV-A tiene la propiedad de reducir el brillo que producen las superficies y que es captada por el sensor. El caso contrario sucede con la luz IR, la cual tiene como propiedad disminuir la transmitividad de la luz cuando hacen contacto con un medio transparente o translúcido, lo que quiere decir que la reflectividad de la superficie incrementa lo suficiente para poder ser observado por el sensor del dispositivo de captura.

Solucionado estos inconvenientes, es posible reconstruir piezas que antes no podían ser adquiridas, generando modelos 3D confiables y apropiados para diversas aplicaciones en el área

de la academia y la industria. La principal ventaja de la técnica propuesta es que los objetos pueden ser digitalizados de forma no invasiva con resultados que en promedio tienen un error de desviación menor a 0.2. Las técnicas no invasivas son necesarias en aplicaciones donde los objetos no pueden ser manipulados, como es el caso de piezas de la Herencia Cultural expuesta en museos.

Uno de los posibles trabajos futuros es extender esta técnica a la adquisición de otro tipo de materiales con superficies ópticamente adversas, como espejos y líquidos.

Bibliografía

[1] P. K. Rastogi, *Optical Measurement Techniques and Applications.* Artech House, 1997. 2

[2] R. S. Sirohi and S. C. Chau, *Optical Methods of Measurement.* New York: Dekker, 1999. 2

[3] F. Chen, G. M. Brown, and M. Song, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods," *Optical Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 10 – 22, 2000. 2

[4] M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita, H. Takai, and Y. Takahashi, "Frequency-multiplex fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 22, pp. 5347 – 5354, 1997. 2

[5] O. A. Skydan, M. J. Lalor, and D. R. Burton, "Technique for phase measurement and surface reconstruction by use of colored structured light," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 29, pp. 6104 – 6117, 2002. 2

[6] *Non-Contact 3D Digitizer VIVID 9i/VI-9i*, Konica Minolta. Manual de instrucciones. 5, 10

[7] J. Gómez, "Integración de imágenes de rango para la obtención de modelos faciales," Master's thesis, 2003. 8, 10

[8] P. J. Besl, "Active, optical range imaging sensors," *Mach. Vision Appl.*, vol. 1, no. 2, pp. 127 – 152, 1988. 8

[9] T. Masuda and N. Yokoya, "A robust method for registration and segmentation of multiple range images," Feb 1994, pp. 106 – 113. 8

[10] B. L. Curless, "New methods for surface reconstruction from range images," Ph.D. dissertation. 8, 13

[11] M. Hebert, "Active and passive range sensing for robotics," vol. 1, 2000, pp. 102 – 110. 9

[12] L. L. A. Tomaka, M. Tarnawski and B. Lisniewska-Machorowska, "Digital dental models and 3d patient photographs registration for orthodontic documentation and diagnostic purposes," *Computer Recognition Systems 2*, vol. 45, pp. 645 – 652, 2007. 10

[13] J. Branch, "Reconstrucción de objetos de forma libre a partir de imágenes de rango empleando una red de parches nurbs," Ph.D. dissertation, 2006. 11

[14] A. Myers, "Introductory literature review surface reconstruction from three dimensional range data," University of Adelaidey, Tech. Rep., 1999. 17

[15] S. Mahadevan, H. Pandzo, M. Bennamoun, and L. Williams, "A 3d acquisition and modelling system," in *ICASSP '01: Proceedings on IEEE International Conference of the Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001.* Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2001, pp. 1941 – 1944. 17

[16] J. Davis, D. Nehab, R. Ramamoorthi, and S. Rusinkiewicz, "Spacetime stereo: A unifying framework for depth from triangulation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 27, no. 2, pp. 296 – 302, 2005. 17

[17] F. Blais, "Review of 20 years of range sensor development," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 13, no. 1, pp. 231 – 243, 2004. 17

[18] I. Ihrke, K. N. Kutulakos, H. P. A. Lensch, M. Magnor, and W. Heidrich, "State of the art in transparent and specular object reconstruction," in *In STAR Proceedings of Eurographics*, 2008, pp. 87 – 108. 17

[19] T. Bonfort, P. Sturm, and P. Gargallo, "General specular surface triangulation," in *Proceedings of the Asian Conference on Computer Vision, Hyderabad, India*, vol. II, jan 2006, pp. 872 – 881. 18

[20] M. Tarini, H. P. A. Lensch, M. Goesele, and H.-P. Seidel, "3d acquisition of mirroring objects using striped patterns," *Graph. Models*, vol. 67, no. 4, pp. 233 – 259, 2005. 18, 19

[21] D. E. Zongker, D. M. Werner, B. Curless, and D. H. Salesin, "Environment matting and compositing," in *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1999, pp. 205 – 214. 18

[22] Y.-Y. Chuang, D. E. Zongker, J. Hindorff, B. Curless, D. H. Salesin, and R. Szeliski, "Environment matting extensions: towards higher accuracy and real-time capture," in *SIGGRAPH '00: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 2000, pp. 121 – 130. 18

[23] K. Pulli, "Multiview registration for large data sets," in *In Proceedings on Second International Conference 3-D Digital Imaging and Modeling, 1999.*, 1999, pp. 160 – 168. 18

[24] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, "Efficient variants of the icp algorithm," in *In Proceedings on Third International Conference 3-D Digital Imaging and Modeling.*, 2001, pp. 145 – 152. 18

[25] C. Rocchini, P. Cignoni, F. Ganovelli, C. Montani, P. Pingi, and R. Scopigno, "Marching intersections: an efficient resampling algorithm for surface management," in *SMI 2001 International Conference on Shape Modeling and Applications*, May 2001, pp. 296 – 305. 18

[26] P. Cignoni, C. Montani, and R. Scopigno, "A comparison of mesh simplification algorithms," *Computers & Graphics*, vol. 22, pp. 37 – 54, 1997. 18

[27] J. Wang and K. J. Dana, "Relief texture from specularities," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 28, no. 3, pp. 446 – 457, 2006. 19

[28] K. Dana, "Brdf/btf measurement device," in *In Proceedings on Eighth IEEE International Conference Computer Vision, 2001.*, vol. 2, 2001, pp. 460 – 466. 19

[29] T. Chen, M. Goesele, and H.-P. Seidel, "Mesostructure from specularity," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006.*, vol. 2, 2006, pp. 1825 – 1832. 20

[30] W.-C. Ma, T. Hawkins, P. Peers, C.-F. Chabert, M. Weiss, and P. Debevec, "Rapid acquisition of specular and diffuse normal maps from polarized spherical gradient illumination,"