

Sistema estéreo RGB-térmico para digitalización térmica 3D de corto alcance

Sánchez, A. *, Adán E., Adán A.

Grupo de Robótica Blanda y Visión por Computador 3D. Universidad de Castilla La Mancha. Ciudad Real, España

Resumen

Este trabajo describe el desarrollo y la validación experimental de un sistema capaz de generar nubes de puntos térmicas tridimensionales densas, como etapa previa a la construcción de modelos térmicos completos de objetos y escenas de dimensiones reducidas. La solución propuesta se fundamenta en la fusión de tres sensores de imagen —dos cámaras RGB y una cámara térmica— integrados en una configuración portátil y de fácil despliegue. El enfoque metodológico incorpora un procedimiento de calibración automática que introduce aportaciones novedosas respecto a trabajos anteriores, incrementando la precisión, la robustez y la repetibilidad del sistema, al tiempo que disminuye la dependencia de intervenciones manuales o de configuraciones específicas del entorno. Asimismo, el artículo presenta la aplicación de usuario desarrollada para gestionar el funcionamiento del dispositivo y expone diversos casos de estudio que evidencian sus capacidades y su potencial de aplicación.

Palabras clave: Percepción y sensores, Programación y visión, Integración de sensores y percepción.

Portable RGB–Thermal Stereo System for Short-Range 3D Digitization

Abstract

This work describes the development and experimental validation of a system that generates dense three-dimensional thermal point clouds as a preliminary stage toward the construction of complete thermal models of small-scale objects and scenes. The proposed solution is based on the fusion of three imaging sensors—two RGB cameras and one thermal camera—integrated into a portable and easily deployable configuration. The methodological approach incorporates an automatic calibration procedure that introduces novel contributions compared to previous works, enhancing the accuracy, robustness, and repeatability of the system while reducing reliance on manual interventions or environment-specific configurations. Furthermore, the article presents the user application developed to manage the operation of the device and describes several case studies that demonstrate its capabilities and application potential.

Keywords: Perception and sensing, Programming and Vision, Sensor integration and perception.

1. Introducción

Las técnicas basadas en sistemas estéreo térmicos han experimentado un crecimiento sostenido en los últimos años como solución a la obtención de información tridimensional en condiciones de baja iluminación, escenas nocturnas o entornos visualmente degradados (Mouats et al. 2015), (Hu et al. 2025), (Q. Zhang et al. 2024). A diferencia de los sistemas puramente visibles, estas configuraciones permiten operar independientemente de la iluminación solar, manteniendo capacidad de estimación geométrica en escenarios adversos. El término thermal stereo engloba tanto sistemas compuestos por dos cámaras térmicas que permiten calcular mapas de disparidad y profundidad (Hu et al. 2025), como configuraciones híbridas RGB-térmico orientadas a la estimación de profundidad multispectral (Guo, Kong, and Gu

2024) o incluso a la reconstrucción térmica tridimensional (Mouats et al. 2015).

En una primera línea de investigación se sitúan los sistemas multimodales que combinan cámaras térmicas, cámaras RGB y sensores LiDAR. En el trabajo de odometría estéreo térmica (Mouats et al. 2015), se emplea un par de cámaras térmicas para estimar movimiento y reconstrucción 3D, demostrando que es posible obtener información de profundidad y reconstrucción térmica 3D con prestaciones comparables al espectro visible. Por su parte, ThermoStereoRT (Hu et al. 2025) propone un método de correspondencia estéreo térmica en tiempo real que recupera explícitamente un mapa de disparidad a partir de dos imágenes térmicas rectificadas, orientado a aplicaciones dinámicas como drones o robótica móvil. En el ámbito híbrido, el enfoque multispectral no supervisado (Guo, Kong, and Gu 2024) combina una cámara

visible y una térmica para producir estimaciones de profundidad, integrando consistencia temporal y espacial sin necesidad de ground truth denso. Asimismo, en el trabajo basado en autoencoder multimodal (MANet) (Q. Zhang et al. 2024), se aborda la correspondencia térmico-visible para mejorar la estimación de profundidad nocturna, utilizando calibración asistida por LiDAR, lo que refuerza la obtención robusta de mapas de profundidad en condiciones de bajo contraste térmico.

Una segunda línea fundamental corresponde a los procedimientos de calibración geométrica y multispectral, condición que es necesaria para garantizar coherencia espacial entre modalidades. Zhang et al. proponen patrones específicos con emisividades diferenciadas para mejorar la detección de características en el dominio térmico (Y. Zhang et al. 2013), permitiendo estimaciones precisas de parámetros intrínsecos y extrínsecos, y facilitando la posterior reconstrucción geométrica. Otros trabajos introducen placas con orificios circulares detectables tanto en nube de puntos LiDAR como en imagen térmica, empleando los centros como características comunes para resolver la calibración extrínseca LiDAR-térmica con bajo error de reproyección (J. Zhang et al. 2019), (J. Zhang et al. 2023). Estas estrategias no generan directamente profundidad térmica, pero constituyen la base para la fusión coherente que permite posteriormente obtener nubes de puntos coloreadas térmicamente o mapas de profundidad alineados. En aplicaciones de teledetección visible-térmico (Piccinelli et al. 2024), se proponen técnicas robustas frente a reflexiones especulares e inversión de contraste, facilitando la integración en UAV y garantizando precisión geométrica en entornos exteriores. Asimismo, el enfoque de calibración IR para construcción de mapas densos de profundidad (Gschwandtner et al. 2011) demuestra que, tras calibrar sensores IR y LiDAR, es posible realizar upsampling de mapas de profundidad a la resolución térmica, habilitando representaciones densas alineadas con la imagen infrarroja.

En cuanto a aplicaciones, el impacto de estas tecnologías es transversal. En robótica móvil, el conjunto de datos STheReO (Yun et al. 2022) promueve el desarrollo de SLAM térmico estéreo, permitiendo estimación de trayectoria y mapeo en escenarios donde los sistemas visibles fallan. En el ámbito de la digitalización autónoma de edificios (Adán et al. 2019), se han desarrollado plataformas que integran escáner láser y adquisición térmica para generar nubes de puntos térmicas densas y modelos térmicos 3D completos del interior de edificaciones. De forma complementaria, robots como MoPAD2 (Adán, López-Rey, and Ramón 2023) realizan adquisiciones repetidas en el tiempo para producir modelos térmicos tridimensionales comparables, orientados a caracterización energética.

En la línea de patrimonio arquitectónico, el trabajo descrito en (Adamopoulos et al. 2020) no se basa estrictamente en estéreo térmico puro, pero sí combina calibración multispectral y fotogrametría para realizar mapeo térmico 3D, es decir, proyectar textura térmica sobre modelos geométricos reconstruidos, facilitando su integración en entornos HBIM o HGIS. Las aplicaciones se extienden a medicina y ciencias del deporte (Andrés López et al. 2024), donde los sistemas estéreo multimodales permiten segmentación automática en dominio térmico, posibilitando análisis cuantitativos sobre regiones anatómicas, lo que abre la puerta a futuras reconstrucciones 3D

térmicas corporales. Finalmente, en ecología, el sistema ThermalTracker-3D (Matzner, Warfel, and Hull 2020) emplea dos cámaras térmicas para obtener trayectorias tridimensionales de aves y murciélagos en parques eólicos marinos, demostrando la viabilidad de reconstrucción espacial térmica en entornos exteriores y a largas distancias.

En conjunto, la literatura evidencia que el estado del arte abarca desde la obtención directa de mapas de disparidad y profundidad térmica, pasando por reconstrucción 3D térmica y odometría, hasta la generación de nubes de puntos térmicas y mapeo térmico tridimensional en aplicaciones reales.

2. Contribuciones

Las principales contribuciones de este trabajo radican en aspectos que, hasta donde alcanza nuestro conocimiento, no han sido abordados de forma conjunta en la literatura existente. En primer lugar, se propone una arquitectura original en la que la geometría tridimensional se obtiene exclusivamente mediante estéreo RGB de alta resolución, mientras que la información térmica se asocia posteriormente a dicha geometría mediante la calibración precisa entre las dos cámaras RGB del sistema estéreo y la cámara térmica. A diferencia de otros enfoques que dependen de estéreo térmico directo, LiDAR o configuraciones multimodales complejas, nuestra solución desacopla la reconstrucción geométrica de la adquisición radiométrica, permitiendo generar nubes de puntos térmicas densas con mayor detalle espacial. En segundo lugar, se introduce un método de calibración extrínseca propio, diseñado específicamente para configuraciones RGB-térmico portátiles, que destaca por su robustez, precisión y repetibilidad, reduciendo significativamente la intervención manual y la dependencia de patrones o configuraciones específicas del entorno. En tercer lugar, el sistema es capaz de generar información tridimensional térmica en tiempo real, lo que amplía su aplicabilidad en tareas que requieren retroalimentación inmediata. Finalmente, frente a la mayoría de soluciones previas orientadas a escenarios de gran escala, robótica móvil o UAV, nuestra propuesta se centra deliberadamente en la digitalización térmica de corto alcance, dirigida a objetos y escenas de dimensiones reducidas (por ejemplo, inferiores a $1,5 \times 1,5 \times 1,5$ m), donde se requiere alta densidad geométrica, precisión espacial y coherencia térmico-geométrica para la construcción de modelos térmicos completos.

3. Sistema estéreo RGB-térmico

El sistema SRTS (Stereo RGB-Thermal System) se compone de dos elementos: una cámara estereoscópica y una cámara de infrarrojos, elementos que son descritos brevemente en los siguientes epígrafes.

3.1 Cámara estereoscópica

Para la adquisición de información tridimensional del entorno en forma de nubes de puntos, se emplea la cámara estereoscópica ZED 2i mostrada en la Figura 1. La cámara está equipada con dos sensores en el espectro visible (RGB1 y RGB2) y cuenta con sistema de detección de profundidad basado en una red neuronal. Además, está dotada de un giroscopio y un barómetro integrados. El dispositivo posibilita finalmente el cálculo de coordenadas 3D de la nube de puntos

de la escena en tiempo real a partir de un mapa de profundidad generado.



Figura 1: Cámara estereoscópica ZED 2i.

En ensayos realizados con la cámara estereoscópica se determina que el rango de distancias óptimas para su operación se encuentra entre 0,5 y 1,5 metros, obteniendo desviaciones relativas con respecto a la posición real de objetos de entre 0,12 % y 0,4 %, respectivamente. El sistema implementado permite atenuar la variación de profundidad registrada entre fotogramas contiguos, lo que resulta en una reducción de la distorsión y el ruido presente en las imágenes, particularmente en contextos estáticos. Además, se facilita una funcionalidad que filtra puntos con un error excesivo.

3.2 Cámara térmica

La cámara térmica empleada es una cámara infrarroja que trabaja en la banda de infrarrojo lejano. Es una tCam-mini de código abierto diseñada para la recopilación de datos radiométricos mediante un módulo de imagen térmica Lepton 3.5 de 160x120 píxeles. Este módulo facilita la obtención de datos que contienen información sobre la temperatura de cada píxel de la imagen capturada por la cámara.

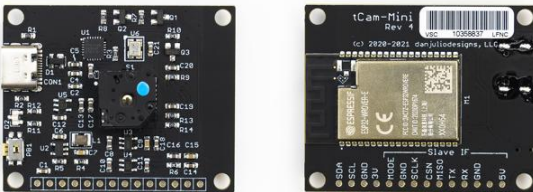


Figura 2: Cámara térmica tCam-mini.

3.3 Dispositivo acoplado.

La configuración del acoplamiento entre las cámaras puede observarse en la Figura 3. La cámara térmica se encuentra montada en la vertical de la Cámara_RGB1 del sistema estéreo, ya que, por defecto, este se utiliza como sistema de referencia universal, en el que se lleva a cabo el proceso de obtención del mapa de profundidad que, posteriormente, es utilizado para generar la nube de puntos. La ubicación de la cámara térmica está, por tanto, alineada con el eje OY del sistema de referencia, minimizando así la distorsión durante la superposición de las imágenes.

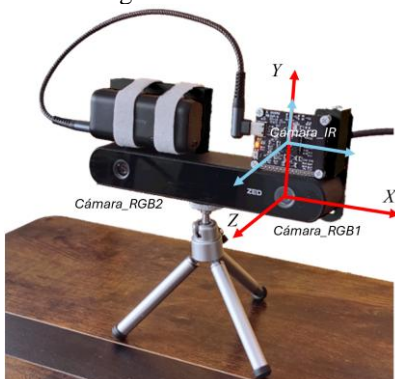


Figura 3: Acoplamiento entre la cámara estereoscópica y la cámara térmica.

3.3 Obtención de la nube térmica

La obtención de la nube térmica se realiza mediante la asociación de la temperatura de puntos 3D, calculados por el sistema estéreo, a puntos correspondientes en la imagen térmica. Para conseguir esta asociación, se realiza la calibración extrínseca entre los sistemas Cámara_RGB1 y Camara_IR. Resuelta la transformación proyectiva de la imagen térmica, se asignan coordenadas 3D a píxeles 2D en la imagen de Camara_IR.

El cálculo de la matriz de calibración se lleva a cabo de la siguiente manera. Se utiliza un pequeño LED instalado en el extremo de una fina barra de carbono, que actúa como fuente emisora visible y térmica, que se posiciona en la escena como marcador de referencia. Este punto luminoso es fácilmente reconocible tanto por Cámara_RGB1 (ya que es un punto de luz de color nítido blanco), como por Camara_IR (ya que es un punto radiante que emite calor), de modo que el problema de correspondencia es solucionado de forma automática. Como de cada píxel de Cámara_RGB1 se conocen sus coordenadas 3D, la asociación de punto 3D con el pixel proyectado en Camara_IR está solucionado. El procedimiento se repite teniendo cuidado de colocar el LED a distintas profundidades. De esta manera, se obtienen dos listas de coordenadas (en la práctica de 10 a 15) correspondientes y la matriz de calibración extrínseca es finalmente calculada. La Figura 4 muestra las imágenes de Camara_RGB1, Camara_IR y nube de puntos RGB, en donde se destaca en todas ellas el puntero LED introducido en la escena.

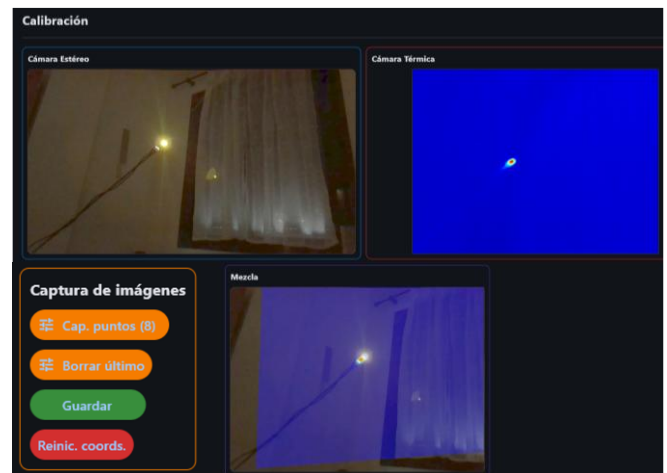


Figura 4: Captura de coordenadas de un punto de referencia LED para el cálculo de la matriz de calibración externa. De izquierda a derecha se visualiza las imágenes de Camara_RGB1, Camara_IR y nube RGB, en las que se aprecia claramente el LED en la escena.

A continuación, la nube térmica obtenida se puede guardar en un formato estándar (por ejemplo, *ply*) que contiene, además de las coordenadas de los puntos, sus valores RGB y temperatura asociada. La Figura 5, muestra una escena en la que se aprecia, mediante una paleta de color, la temperatura de varios objetos. En amarillo y anaranjado corresponde a un fondo de madera que tiene un gradiente de temperatura en un rango de 18 a 19 °C. En la parte interior se aprecian las temperaturas de tres piezas de fruta, viéndose tonos verdosos (17 a 17,5°C) y azulados (16 a 16,3°C).

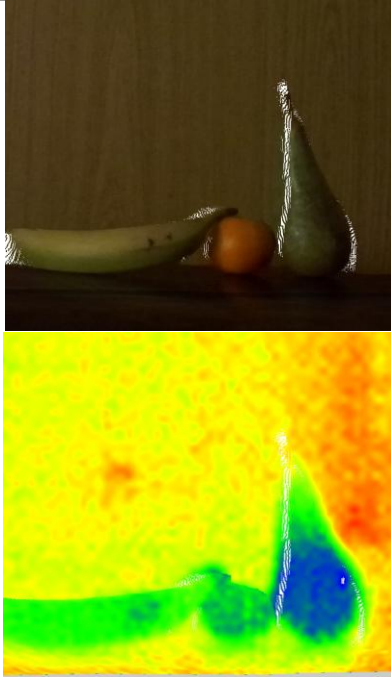
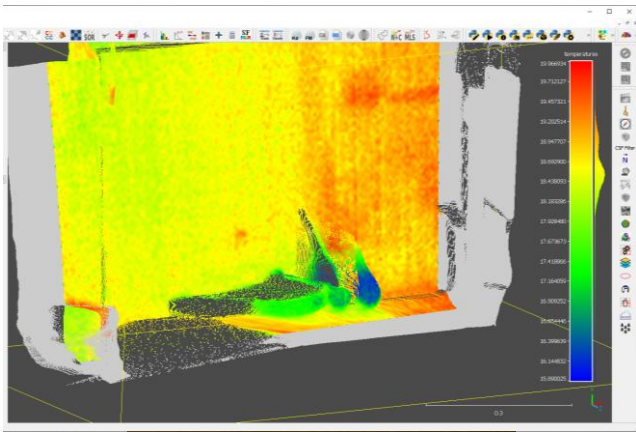


Figura 5: Nube térmica capturada de una escena y detalles de la nube RGB y su nube térmica dual

4. Desarrollo experimental

4.1. Aplicación de gobierno del sistema

Con el propósito de facilitar el manejo del sistema estéreo RGB-térmico se ha desarrollado una aplicación con componentes básicos en las fases: captura y almacenamiento de la nube de puntos térmica, calibración del sistema y visualización de la nube de puntos RGB y la nube térmica.

La interfaz gráfica (ver Figura 6) ha sido desarrollada mediante el lenguaje de programación Python y librerías open3D y Numpy, y con el framework Flet. Esta interfaz posibilita además la visualización en tiempo real de las imágenes de todas las cámaras, fotograma a fotograma, y captura del último fotograma para cálculo de la nube térmica. Las principales funcionalidades de la interfaz son:

- *Visualizador*

Se encarga de mostrar en tiempo real las imágenes obtenidas por la cámara estereoscópica y por la cámara térmica, así como una superposición de los datos de ambas cámaras, una vez aplicada una matriz de calibración externa.

La representación visual de las temperaturas se efectúa mediante una paleta de falso color (jet). Al picar en cualquier

punto de la imagen térmica, se visualiza y obtiene la temperatura del píxel correspondiente. Esta funcionalidad será utilizada con el fin de calibrar la temperatura registrada por la cámara térmica, como se explica a continuación.

- *Calibración térmica de la Camara_IR*

Debido a la imprecisión de un 2% del valor nominal en las cámaras termográficas, la interfaz proporciona un procedimiento de calibración térmica, de modo que el error en la medida sea reducido a 0,3°C. Para ello, se cuenta con una sonda térmica de dicha precisión colocada sobre la escena y que es utilizada como referencia de temperaturas. Con la funcionalidad de visualización se obtiene la temperatura de un punto próximo a la sonda y se obtiene el offset respecto a la referencia. Se trata, por tanto, de una corrección de offset de temperatura.

- *Calibración y captura de datos*

Existe la funcionalidad de “iniciar captura”, donde se inician los streams de las cámaras estereoscópica y térmica en dos hilos independientes para ejecutar los procesos de captura en paralelo al hilo principal del programa y así no bloquear la interfaz. Con esta funcionalidad se arranca la del procedimiento de calibración, cargando en disco la matriz de calibración del sistema.

La funcionalidad de “detener captura” finaliza los streams de ambas cámaras terminando los hilos en los que se están ejecutando.

- *Creación de las nubes de puntos*

La nube de puntos se crea en cada frame automáticamente utilizando la API de la cámara ZED. A esa nube de puntos, que contiene únicamente las coordenadas 3D de cada punto y el color RGB capturado por la cámara, se le añaden los datos térmicos obtenidos por la cámara térmica y transformados como se ha descrito anteriormente. Estos datos térmicos se añaden a la nube de puntos como un campo escalar de temperaturas.

Para garantizar la consistencia de los datos en los procesos de lectura y escritura de los mismos, se utiliza en los hilos creados un sistema de bloqueo (lock) que previene el acceso, ya sea para lectura o escritura, de recursos compartidos entre los hilos y el programa principal, en este caso de los datos obtenidos de ambas cámaras, en momentos determinados. Esto garantiza la sincronización de los fotogramas de ambos dispositivos en el momento de generar la nube térmica y guardarla en el disco duro.

- *Almacenamiento de las nubes de puntos*

La funcionalidad de “guardar nube de puntos”, se habilita únicamente cuando se han iniciado los flujos de captura de ambas cámaras. Se tiene la opción de guardar en disco la nube de puntos integrada (RGB+térmica) creada a partir del último frame capturado de la cámaras estereoscópica y térmica.

La nube de puntos integrada se guarda en un formato estándar (ply, txt, xyz, etc), siendo una nube multicanal con atributo escalar adicional que contiene coordenadas tridimensionales de los puntos visualizados de la escena referidas al sistema de referencia universal, los valores RGB asociados a cada punto y su valor de temperatura en grados Celsius. Estos archivos en formato abierto pueden ser importados por diverso software de visualización y tratamiento de nubes de puntos, como por ejemplo CludCompare, Leica Cyclone, Autodesk ReCap o MeshLab.

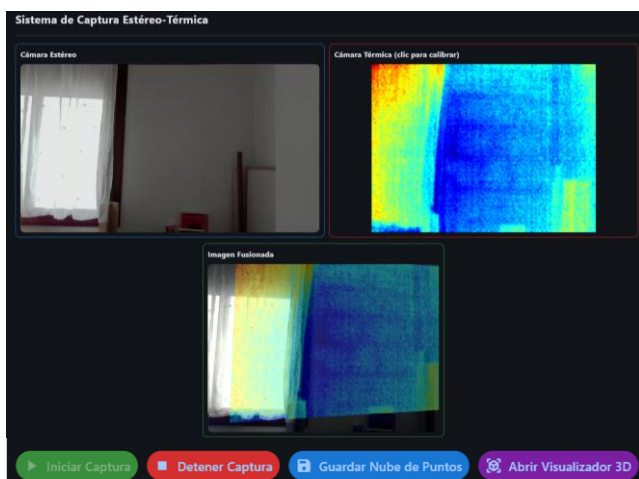
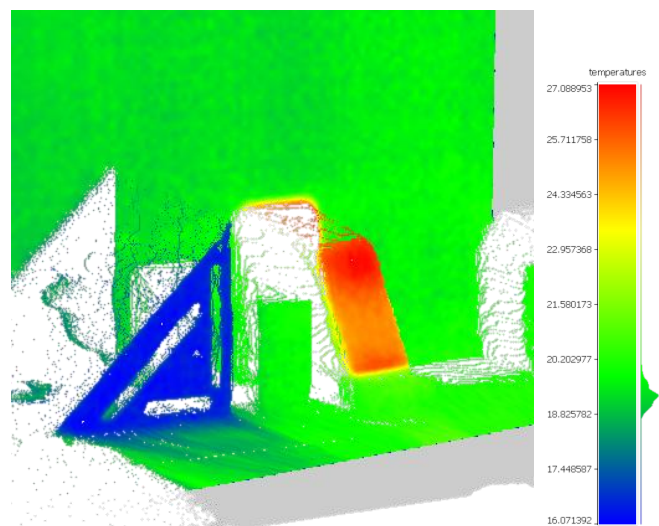


Figura 6: Vista general de la interfaz desarrollada.



b)

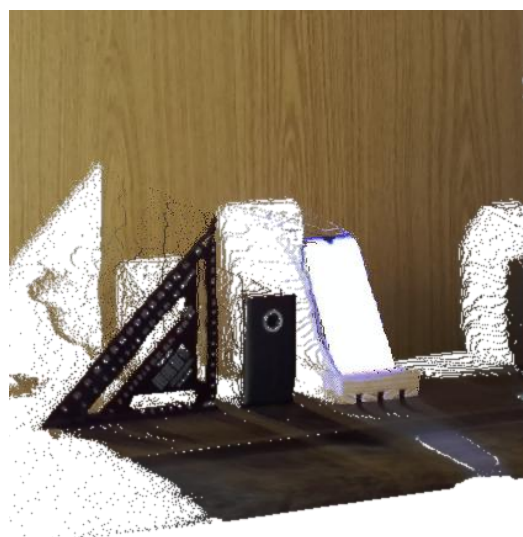
Figura 7: Escena 1. Nube de puntos color y nube de puntos térmica dual

4.2. Tests y resultados

En esta sección se muestran dos casos de estudio llevados a cabo con el sistema estéreo RGB-térmico haciendo uso de las posibilidades que brinda la aplicación de usuario creada.

En el primer caso, se digitalizó una escena en donde había un claro contraste de temperaturas entre varios objetos. La escena consistió en cuatro elementos: un fondo y suelo de madera, una escuadra, una batería externa y un smartphone, situados a unos 75 cm del sistema de cámaras. Figura 7 a) muestra la nube de puntos RGB obtenida por la cámara estéreo, mientras que la Figura 7 b) presenta la nube térmica conseguida.

La escuadra de madera fue previamente enfriada para poder apreciar una mayor diferencia de temperatura con los otros componentes. La batería externa, al no estar en uso, presentó una temperatura similar a la del fondo y suelo de la escena. Por su parte, el smartphone, en estado encendido, presentó claramente la mayor de las temperaturas registradas.



a)

En la Tabla 1 se muestran el número de puntos que componen cada uno de los tres objetos escaneados, así como su superficie captada y densidad. Con estos datos se puede decir que se alcanza una alta densidad de más de un punto por cada mm^2 de superficie.

Tabla 1: Densidad de puntos de la escena 1

Objeto	Nº puntos	Sup.frontal (cm^2)	Densidad (pts/ cm^2)
Escuadra	22872	147.3	155.27
Batería	9893	90	109.92
Smartphone	13540	105	128.95

En el segundo caso de estudio, se llevó a cabo la reconstrucción térmica tridimensional de un pie humano. Para ello se realizaron seis tomas desde distintas posiciones del sistema estéreo RGB-térmico. Después de realizar un registro de las correspondientes nubes de puntos, se generó una única nube térmica. La Figura 8 muestra el modelo de puntos RGB y su dual térmico.

El conjunto de datos térmicos obtenidos se compone de 147031 puntos, y las temperaturas registradas en la nube térmica que corresponde al pie está en un rango de $27\text{ }^\circ\text{C}$ y $33\text{ }^\circ\text{C}$, estando en concordancia con las temperaturas superficiales de la piel humana medida con una cámara LWIR (Long-Wave Infrared) de 8–14 micrómetros. Según las referencias (Ring and Ammer 2012) y (Lahiri et al. 2012) el rango temperaturas en la zona de dorso del pie es de $[30, 33]\text{ }^\circ\text{C}$, en la planta del pie de $[28, 32]\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que en los dedos es $[25, 30]\text{ }^\circ\text{C}$. Por su parte, la zona correspondiente al suelo es claramente menor, en torno a $22\text{ }^\circ\text{C}$.

Notar que el modelo visualizado en la Figura 8 corresponde a un modelo en bruto y sin postproceso. Faltaría llevar a cabo procesos de suavizado y regularización 3D para proporcionar una nube de puntos más homogénea, filtrando componentes de alta frecuencia.

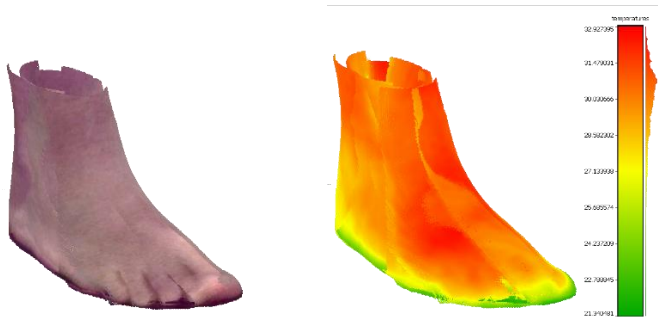


Figura 8: Nube de puntos RGB y térmica.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado y validado experimentalmente un sistema portátil estéreo RGB-térmico orientado a la digitalización tridimensional de corto alcance con información radiométrica asociada. A diferencia de la mayor parte de los enfoques del estado del arte, centrados en estéreo térmico directo o en configuraciones multimodales de gran escala basadas en LiDAR o plataformas móviles, la solución propuesta desacopla la reconstrucción geométrica de la adquisición térmica. La geometría se obtiene mediante estéreo RGB de alta resolución y la temperatura se asocia posteriormente a cada punto 3D mediante una calibración extrínseca entre una de las dos cámaras RGB del sistema estéreo y la cámara térmica. Este procedimiento de calibración, basado en la detección automática de un punto luminoso y caliente en la escena, constituye una solución rápida, práctica y robusta.

Los resultados experimentales muestran que el sistema es capaz de generar nubes de puntos térmicas densas en tiempo real, con alta coherencia geométrica y térmica en rangos de operación entre 0,5 y 1,5 metros, en donde la corrección térmica implementada permite mejorar la precisión radiométrica hasta valores de 0,3 °C.

El sistema puede resultar especialmente adecuado para inspección, reconocimiento y localización de objetos en entornos oscuros o para digitalización térmica de escenas de pequeñas dimensiones en varios campos de actuación. Como líneas futuras, se plantea la automatización de integración de múltiples vistas para la generación de modelos térmicos 3D completos regularizados y la utilización del sistema en aplicaciones de gemelos digitales térmicos de objetos.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los proyectos PID2022-141275OB-C21 (CIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE) y SBPLY23180225000113, cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Referencias

Adamopoulos, Efstathios, Monica Volinia, Mario Giroto, and Fulvio Rinaudo. 2020. "Three-Dimensional Thermal Mapping from IRT Images for Rapid Architectural Heritage NDT." *Buildings* 2020, Vol. 10, 10 (10): 1–18. <https://doi.org/10.3390/buildings10100187>.

Adán, Antonio, Alejandro López-Rey, and Amanda Ramón. 2023. "Robot for Thermal Monitoring of Buildings." *Automation in Construction*

154 (October): 105009. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2023.105009>.

Adán, Antonio, Samuel A. Prieto, Blanca Quintana, Tomás Prado, and Juan García. 2019. "An Autonomous Thermal Scanning System with Which to Obtain 3D Thermal Models of Buildings." In *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*, 489–96. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00220-6_58.

Andrés López, Daniel, Barlo Hillen, Markus Nägele, Perikles Simon, and Elmar Schömer. 2024. "StereoThermoLegs: Label Propagation with Multimodal Stereo Cameras for Automated Annotation of Posterior Legs during Running at Different Velocities." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2024 149:19 149 (19): 11349–60. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13343-w>.

Gschwandtner, Michael, Roland Kwitt, Andreas Uhl, and Wolfgang Pree. 2011. "Infrared Camera Calibration for Dense Depth Map Construction." *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 857–62. <https://doi.org/10.1109/IVS.2011.5940515>.

Guo, Yubin, Hui Kong, and Shuo Gu. 2024. "Unsupervised Multi-Spectrum Stereo Depth Estimation for All-Day Vision." *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 9 (1): 501–11. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3331387>.

Hu, Anning, Ang Li, Xirui Jin, and Danping Zou. 2025. "ThermoStereoRT: Thermal Stereo Matching in Real Time via Knowledge Distillation and Attention-Based Refinement." *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3766–72. <https://doi.org/10.1109/ICRA55743.2025.11127815>.

Lahiri, B. B., S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, and John Philip. 2012. "Medical Applications of Infrared Thermography: A Review." *Infrared Physics and Technology* 55 (4): 221–35. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.007>.

Matzner, Shari, Thomas Warfel, and Ryan Hull. 2020. "ThermalTracker-3D: A Thermal Stereo Vision System for Quantifying Bird and Bat Activity at Offshore Wind Energy Sites." *Ecological Informatics* 57 (May): 101069. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101069>.

Mouats, Tarek, Nabil Aouf, Lounis Chermak, and Mark A. Richardson. 2015. "Thermal Stereo Odometry for UAVs." *IEEE Sensors Journal* 15 (11): 6335–47. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2456337>.

Piccinelli, Nicola, Giacomo De Rossi, Claudia Daffara, and Riccardo Muradore. 2024. "A Passive Stereo Calibration Technique for Visible-Thermal, Low-Resolution Imaging in Remote Sensing Applications." *Measurement* 231 (May): 114647. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114647>.

Ring, E. F.J., and K. Ammer. 2012. "Infrared Thermal Imaging in Medicine." *Physiological Measurement* 33 (3). <https://doi.org/10.1088/0967-3334/33/3/R33>.

Yun, Seungsang, Minwoo Jung, Jeongyun Kim, Sangwoo Jung, Younghun Cho, Myung Hwan Jeon, Giseop Kim, and Ayoung Kim. 2022. "STheReO: Stereo Thermal Dataset for Research in Odometry and Mapping." *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* 2022-October: 3857–64. <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981857>.

Zhang, Jun, Yiyao Liu, Mingxing Wen, Yufeng Yue, Haoyuan Zhang, and Danwei Wang. 2023. "L2V2T2Calib: Automatic and Unified Extrinsic Calibration Toolbox for Different 3D LiDAR, Visual Camera and Thermal Camera." *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings* 2023-June. <https://doi.org/10.1109/IV55152.2023.10186657>.

Zhang, Jun, Ran Zhang, Yufeng Yue, Chule Yang, Mingxing Wen, and Danwei Wang. 2019. "SLAT-Calib: Extrinsic Calibration between a Sparse 3D LiDAR and a Limited-FOV Low-Resolution Thermal Camera." *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2019*, December, 648–53. <https://doi.org/10.1109/ROBIO49542.2019.8961462>.

Zhang, Quan, Yiran Li, Le Yang, Yi Zhang, Zechao Li, Xiaoyu Chen, and Jing Han. 2024. "Thermal-Visible Stereo Matching at Night Based on Multi-Modal Autoencoder." *Infrared Physics & Technology* 136 (January): 105010. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.105010>.

Zhang, Yu, Lincheng Shen, Dianle Zhou, Daibing Zhang, and Chengping Yan. 2013. "Camera Calibration of Thermal-Infrared Stereo Vision System." *Proceedings - 2013 4th International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, ISDEA 2013*, 197–201. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2013.449>.