

Jornadas de Automática

Tratando fluctuaciones de cámaras IR en mapas térmicos de edificios

Adán, Eduardo^a, Campos, Javier^a, Sánchez, Adolfo^a, Adán, Antonio^{a*}

^a Dpto. de Ingeniería E. E. Automática y Comunicaciones, Universidad de Castilla La Mancha. Paseo de la Universidad 4, 13071, Ciudad Real, España.

To cite this article: Adán, Eduardo, Campos, Javier, Sánchez, Adolfo, Adán, Antonio. 2025. Addressing Thermal Camera Variability for Building Thermal Maps. *Jornadas de Automática*, 46.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12061>

Resumen

La temperatura proporcionada por las cámaras de infrarrojo sólo es una temperatura aparente que debería ser corregida de múltiples factores, entre otros, la radiación reflejada o la emisividad del material captado. Sin embargo, la mayor fuente de error procede de la propia precisión (o repetitividad) de la cámara. Este factor habitualmente situado entre el 2% y 5% del valor medido hace que sea el mayor factor de error en el proceso de medida. Aunque ya existen algunas soluciones de carácter estadístico para corregir este error, estas son de muy alto costo computacional y temporal. En este artículo se propone una metodología que reduce significativamente este error residente y aleatorio de las cámaras térmicas, lo que repercute directamente en la calidad y coherencia de los mapas térmicos formados por múltiples imágenes térmicas. Este método ha sido experimentado con éxito en una plataforma digitalizadora térmica compuesta por un LIDAR 3D de larga distancia y dos cámaras infrarrojas.

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

Addressing Thermal Camera Variability for Building Thermal Maps

Abstract

The temperature provided by infrared cameras is only an apparent temperature, which should be corrected for multiple factors, including reflected radiation and the emissivity of the observed material. However, the main source of error arises from the camera's own accuracy (or repeatability). This factor, typically ranging between 2% and 5% of the measured value, constitutes the largest error in the measurement process. Although some statistical methods exist to correct this error, they generally entail high computational and time costs. This article proposes a methodology that significantly reduces the residual and random error inherent in thermal cameras, directly improving the quality and consistency of thermal maps composed of multiple thermal images. The method has been successfully tested on a thermal digitization platform comprising a long-range 3D LiDAR and two infrared cameras.

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

1. Planteamiento del problema

En general, la información térmica en edificaciones es tenida en cuenta para múltiples propósitos como: estudiar el grado de confort térmico, determinar la eficiencia energética, reconocer errores de edificación o detectar zonas de fugas de calor. En los últimos años hay un creciente uso de los llamados modelos térmicos (o mapeados térmicos) en el mundo de la construcción (Ramón *et al.*, 2023). Estos modelos suministran información térmica densa tridimensional de un edificio en el

momento de la toma de datos, información que puede ser utilizada para múltiples aplicaciones. Sin embargo, existe una imprecisión de temperatura en estos modelos debido a la variabilidad no controlada de los valores que proporciona la cámara térmica utilizada en el proceso de escaneo térmico. Este factor de imprecisión, también referido como repetitividad, está entre el 2 % al 5% del valor nominal suministrado por el fabricante (Teledyne, 2024). Por lo tanto, la desviación con respecto al valor cierto puede llegar hasta 2.0°C, lo que es inaceptable. Así, en el ámbito del modelado

térmico de edificios, donde se usa una gran cantidad de imágenes térmicas, este error hace que los modelos térmicos 3D sean frecuentemente térmicamente incoherentes. La incoherencia viene determinada por cambios abruptos de temperatura entre dos imágenes contiguas con una pequeña zona de solape. Si las imágenes son coherentes, la zona de solape de ambas debería ser casi idéntica. La Figura 1 muestra una imagen panorámica compuesta de varias imágenes térmicas usadas para cubrir una franja espacial de $360 \times V^{\circ}$ (V es la FoV de la cámara IR) donde se aprecia notables variaciones entre imágenes contiguas.

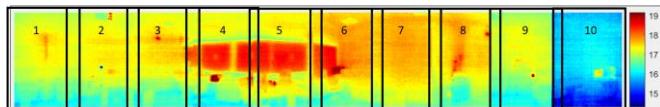


Figura 1: Figura ilustrativa con cambios de temperatura para una composición panorámica 360 de imágenes térmicas. Se observan cambios bruscos de temperatura, especialmente en los frames números #6, #8, #9 y #10.

2. Trabajos relacionados

Existen muy pocas publicaciones que traten y resuelvan el problema anteriormente mencionado, máxime para mapas térmicos de edificios, en el que se parte de las siguientes premisas: escenas de interior, distancias cortas, bajos ángulos de observación de cámara, humedad relativa y temperatura no extremas, y un aceptable aislamiento del edificio.

Existen algunas publicaciones que tratan parcialmente el tema expuesto en la Sección 1. Algunos autores discuten sobre la calibración radiométrica de cámaras termográficas utilizadas en procesos de digitalización SfM (estructura a partir del movimiento) y sobre reconstrucción geométrica de nubes de puntos obtenidas a partir de imágenes de profundidad. Lin et al. (Lin et al., 2018) abordan dos problemas que deben considerarse al calibrar cámaras termográficas. Estos son la no uniformidad temporal, que se refiere a los cambios producidos en la irradiancia del objeto, junto con la temperatura del sensor que depende del tiempo, y la no uniformidad espacial, que es causada por las diferentes respuestas en los píxeles del CCD (dispositivo de carga acoplada). En esta línea, los autores de (Lin et al., 2019) presentan una cámara termográfica que permite el ajuste de diferentes factores relacionados con la temperatura y la humedad ambiental. Sin embargo, señalan que estos tienen relativamente poco efecto en el caso de aplicaciones de corto alcance. El artículo de Zhou et al. (Zhou et al., 2021) comprende un estudio sobre las imprecisiones térmicas que ocurren en cámaras que se utilizan para realizar procesos de videogrametría. Se propone una función de desplazamiento plano para ajustar las temperaturas medidas, y posteriormente se realizan varias pruebas con diferentes orientaciones de la cámara para evitar la deriva térmica causada por el movimiento. Un método similar se propone en (Ling et al., 2022). Este sistema utiliza un divisor de haz junto con una lente convexa y una máscara fotográfica, los cuales compensan la inestabilidad térmica de la cámara. En (Daakit et al., 2018), los autores abordan la distorsión geométrica de imágenes 2D térmicas, pero no consideran otras fuentes de distorsión en la calibración térmica. Malmivirta et al. (Malmivirta et al., 2019) realizan una calibración de cuerpo negro previo para, posteriormente, aplicar una técnica de

calibración basada en aprendizaje profundo. Este método es uno de los métodos capaces de minimizar los cambios térmicos internos dentro de la cámara. Es particularmente útil en aplicaciones que requieren medición térmica continua, en las que la cámara tiende a sobrecalentarse durante su uso. En (Wanh et al., 2021) se realizan varios experimentos con una cámara portátil y un UAV (vehículo aéreo no tripulado), mostrando cómo la temperatura medida con el sensor varía y tarda hasta 60 min en estabilizarse, lo que añade complejidad al procedimiento de medición.

Soluciones cercanas al problema enunciado de variabilidad en la medida son las de Adan et al. (Adan et al., 2023a), en donde primero se realizan correcciones por la de emisividad del objeto y la radiación externa existente y, posteriormente, se toman varias imágenes repetidas sobre las que se realiza un tratamiento estadístico que define una imagen final.

3. Presentación general del método de escaneado térmico en edificios

3.1 Componentes del sistema de digitalización térmica

Para comprender el procedimiento de corrección referido, es esencial conocer el sistema de adquisición de datos (DAS), así como unas nociones del proceso de generación de la nube térmica final.

La plataforma experimental de escaneado térmico consiste en los siguientes componentes (ver Figura 2):

- **Láser escáner 3D LIDAR 3D.** Obtiene coordenadas de un punto del espacio, con un alcance mínimo de 0,6 m y máximo de 60 m. El rango de actuación es de $360^{\circ} \times 300^{\circ}$ (h x v). El sistema tiene un rango de precisión de 4 mm a 10 m con resoluciones de 3, 18 y 65 millones puntos. Es programado utilizando sus propias SDK permitiendo personalizar el proceso de adquisición de datos.
- **Dos cámaras térmicas** dispuestas a bordo del cuerpo de escáner, con resoluciones de 160×120 píxeles y un campo de visión de $71^{\circ} \times 56^{\circ}$ (v x h). Ambas funcionan en un rango de temperatura de entre 10°C y 65°C , y su sensibilidad térmica es de $0,05^{\circ}\text{C}$. La precisión está catalogada como del 5% del valor de lectura, lo que supone una precisión de 1 a 2°C para temperaturas de 20°C a 40°C . La disposición espacial de ambas cámaras es opuesta respecto al eje OY, estando la primera cámara colocada con inclinación $\lambda=0^{\circ}$ en la dirección del eje +OY y la segunda con inclinación $\lambda=55^{\circ}$ en la dirección del eje -OY. Así, al rotar el escáner una vuelta completa (360°), se toman 20 (es decir 10+10) imágenes térmicas, cubriendo así gran parte del campo visible desde una posición del DAS.

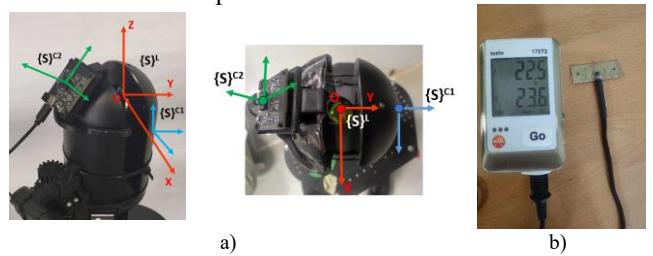


Figura 2: a) Sistema de adquisición de datos (DAS) para construcción de una nube térmica omnidireccional, formada por un LIDAR 3D y dos cámaras térmicas. Todo el sistema gira sobre el eje OZ del LIDAR tomando datos tridimensionales e imágenes térmicas. b) Sensor y sonda de temperatura de contacto.

- **Sensor de temperatura de contacto.** Trabaja con un rango de temperatura apropiado para interiores de edificios de entre -35 °C y +55 °C, y con una precisión de +/- 0.2 °C.

3.2 Fases principales para la obtención de la nube térmica

A continuación, se proporciona una breve referencia a cada una de las siete etapas principales para obtener una nube térmica regularizada del interior de un edificio. El presente artículo se centra en la etapa (3) denominada Preprocesamiento de Datos.

- **Calibración.** Comprende un conjunto de calibraciones realizadas sobre los dispositivos del sistema de adquisición de datos. Específicamente se llevan a cabo las siguientes calibraciones: calibración geométrica de cámaras, calibración de cuerpo negro, calibración de *vignetting*, calibración del conjunto escáner-cámaral y calibración del conjunto escáner-cámaral2.
- **Adquisición de datos.** Se refiere a una sesión de toma y almacenamiento de datos desde una posición del DAS. Los datos recogidos por el DAS son los siguientes: coordenadas XYZ de puntos captados por el dispositivo láser escáner, 20 imágenes térmicas captadas por sendas cámaras térmicas y un dato de temperatura del sensor de contacto.
- **Preprocesamiento de datos.** En esta fase se realiza la corrección de temperatura de cada una de las 20 imágenes térmicas utilizadas y que será tratada en las próximas secciones.
- **Nube térmica Omnidireccional.** Se trata del proceso de asignación de temperatura a los puntos espaciales captados por ambas cámaras térmicas, la generación de ambas nubes térmicas de 360° (llamadas nubes 360T), y el registro y tratamiento de ambas para generar finalmente una nube térmica omnidireccional desde la posición del DAS.
- **Nube térmica de Zona.** En esta etapa se acomete el tratamiento de varias nubes omnidireccionales tomadas en una habitación o sala, para conformar una única nube térmica, que es posteriormente regularizada.
- **Nube térmica de Planta.** El conjunto de nubes de zona se integra en una sola nube de planta, habiendo resuelto previamente problemas de registro y simplificación de nubes térmicas.
- **Nube térmica de Edificio.** Se refiere a la creación de una única nube térmica regularizada del interior del edificio escaneado después de integrar las diferentes nubes de planta calculadas anteriormente.

Hay que recalcar que las fases (5), (6) y (7) se llevan a cabo mediante un robot móvil autónomo llamada MoPAD2 (Adan et al., 2023b).

4. Fase de Adquisición de datos

Aunque la captación de datos se realiza desde varias posiciones del DAS en varias salas y plantas de un edificio, aquí nos referiremos únicamente al proceso de toma de datos desde una posición del sistema.

Asumamos que en una posición del DAS el escáner realiza un barrido en rangos horizontal y vertical de [0°, 360°] y [0°, 90°], respectivamente, siendo θ cercano a -90°, y generando coordenadas X, Y, Z de una cierta nube de puntos P. Ya que |θ| < 90° existe ausencia de datos en un pequeño volumen

cónico por debajo del escáner. Respecto a la información térmica recolectada, a medida que escáner gira en su eje vertical OZ, se adquieren un conjunto de n imágenes térmicas a cada ángulo α , en donde se produce un pequeño solapamiento entre cada par de imágenes contiguas.

Para la cámara térmica no inclinada ($\lambda=0^\circ$) con un FoV vertical V_1 , el sistema cubre una franja angular de $[-V_1/2, +V_1/2]$ al rotar solidario con el escáner. Respecto a la segunda cámara, inclinada un ángulo ($\lambda=55^\circ$) y con una FoV vertical V_2 , ésta cubriría una franja angular de $[\lambda-V_2/2, \lambda+V_2/2]$. En nuestro caso, con un FoV de 71°, el conjunto de las dos cámaras cubre gran parte del espacio visible, llegando a rangos horizontal y vertical de [0,360], [-35.5, 90°], por lo que queda un pequeño espacio del suelo que no sería cubierto.

El procedimiento de obtención de datos es el siguiente:

(1) DAS gira una vuelta completa en su eje vertical y el escáner láser 3D realiza un escaneo de 360° x 300° recopilando coordenadas (X_p, Y_p, Z_p) de puntos de la escena visible, formando la nube original P .

(2) DAS da una segunda vuelta tomando ahora n imágenes térmicas, con paradas cada α° , para cada una de las dos cámaras térmicas. Las coordenadas $(^mX_f, ^mY_f)_k$, de la k -ésima imagen térmica ($k = 1, \dots, 10$) de la m -ésima cámara ($m = 1, 2$) corresponderán a subconjuntos de puntos, $(^mX_p, ^mY_p, ^mZ_p)_k$ los cuales son asignados posteriormente considerando que ha habido una rotación de $k\alpha^\circ$ del DAS. Particularmente, en nuestro caso $k=10$, por lo que se toman imágenes cada 36°, lo que, debido al FoV horizontal de la cámara, supone un solape aproximado entre imágenes de 10°.

Por otra parte, como se ha dicho anteriormente, el sistema cuenta con un sensor de temperatura de contacto de alta precisión proporcionando un valor de referencia T_{ref} .

5. Fase de preprocesado: Corrección térmica

Ya que se cuenta con más de una cámara térmica, el procedimiento de corrección térmica se realiza primero sobre la cámara con $\lambda=0^\circ$, que se llamará *Cámara de Referencia* (notada como C1) y, posteriormente, sobre la segunda cámara con $\lambda=55^\circ$ (notada como C2). Supongamos que $\{^1I_1, ^1I_2, \dots, ^1I_n\}$ y $\{^2I_1, ^2I_2, \dots, ^2I_n\}$, $n = 1, \dots, 10$ son las imágenes térmicas captadas por la primera y segunda cámara en una rotación de 360° sobre el eje OZ del DAS.

5.1 Cámara de Referencia (C1)

La corrección se realiza en dos etapas: (1) Corrección de Off-Set y (2) Corrección por el Algoritmo de Coherencia Térmica de Solapamiento (ACTS), siguiendo las siguientes sub-etapas.

(1) Corrección de Off-Set

- Reconocimiento de la sonda del sensor de contacto en el conjunto $\{^1I_1, ^1I_2, \dots, ^1I_n\}$ y comparación con el valor medido de la cámara. Ya que la sonda del sensor se coloca unos centímetros por encima de un landmark a baja temperatura, el área del sensor es fácilmente detectable en alguna de las 10 imágenes tomadas. Notamos como 1I_r , la imagen donde se encuentra la sonda del sensor de contacto en las coordenadas (i, j) .

- Obtención del offset de temperatura en la imagen detectada 1I_r . La medida de offset es:

$$O = T_{ref} - {}^1I_r(i,j) \quad (1)$$

- Corrección de la imagen 1I_r mediante el offset O, quedando una imagen corregida:

$${}^1I'_r = {}^1I_r + O \quad (2)$$

(2) Corrección ACTS el resto de la $n-1$ imágenes restantes.

Como se ha explicado anteriormente, existe un solapamiento aproximado entre cada par de imágenes contiguas en la secuencia. El algoritmo ACTS tiene por objetivo corregir una imagen teniendo en cuenta la desviación existente de su parte solapada con respecto a la parte dual contigua que ya ha sido corregida previamente. Por lo tanto, las partes solapadas deben ser coherentes en el sentido de ser semejantes, aunque no exactamente iguales ya que la cámara ha rotado (no trasladado) un cierto ángulo entre dos tomas contiguas. Por lo tanto, la parte solapada derecha de ${}^1I'_r$, que llamaremos ${}^1I'_{r,d}$, debe ser semejante a la parte solapada izquierda de la imagen contigua ${}^1I_{r+1}$, que llamamos ${}^1I_{r+1,i}$. Igualmente, en la misma nomenclatura, la imagen parcial solapada izquierda ${}^1I'_{r,i}$, debe ser semejante a la parte solapada derecha ${}^1I_{r-1,d}$.

Sin embargo, por simplicidad, y para descartar ambas partes derecha e izquierda de solapamiento, se considera una secuencia circular de imágenes y se corrige únicamente la parte solapada derecha comenzando por la imagen ${}^1I'_r$ con la izquierda de la imagen ${}^1I_{r+1}$, y así sucesivamente. Por lo tanto, este algoritmo permite propagar la corrección en el siguiente orden:

$$\{ {}^1I_{r+1}, {}^1I_{r+2}, \dots, {}^1I_n, {}^1I_1, {}^1I_2, \dots, {}^1I_{r-1} \} \quad (3)$$

El procedimiento ACTS para la primera corrección en la imagen ${}^1I_{r+1}$. Se siguen los siguientes pasos.

(I) Primera iteración. Inicialización de variables: contador de iteración $k = 1$ y variable acumulada de desviaciones $\mu_{Total} = 0$.

(II) Cálculo de la Imagen Diferencia de Solapamiento de ${}^1I'_{r,d}$

$${}^1D_{r+1,d} = {}^1I'_{r,d} - {}^1I_{r+1,i} \quad (4)$$

(III) Aproximación de los valores de ${}^1D_{r+1,d}$ a una distribución normal de media μ_k y desviación estándar σ_k .

(IV) Actualización de variables

$$k = k + 1 \quad (5)$$

$$\mu_{Total} = \mu_{Total} + \mu_k \quad (6)$$

(V) Corrección de la imagen solapada izquierda ${}^1I_{r+1,i}$, mediante μ_k :

$${}^1I'_{r+1,i} = {}^1I_{r+1,i} + \mu_k \quad (7)$$

(VI) Actualizar ${}^1I_{r+1,i} = {}^1I'_{r+1,i}$

(VII) Si $\mu_k < \beta$, volver al punto (II), siendo β un umbral próximo a 0 (en nuestro caso $\beta = 0.05^\circ C$).

(VIII) Salida de la iteración. Corregir la imagen completa ${}^1I_{r+1}$ haciendo:

$${}^1I'_{r+1} = {}^1I_{r+1} + \mu_{Total} \quad (8)$$

Cuando se repite el algoritmo para cada imagen en la secuencia circular, se realiza una propagación longitudinal de la corrección de temperatura. La salida final es un conjunto imágenes corregido de temperatura.

$$\{ {}^1I'_1, {}^1I'_2, \dots, {}^1I'_n \} \quad (9)$$

5.2 Cámara secundaria (C2)

El algoritmo de corrección del segundo conjunto de imágenes $\{ {}^2I_1, {}^2I_2, \dots, {}^2I_n \}$ de la segunda cámara se basa en la convergencia con las regiones de solapamiento de la primera cámara, $\{ {}^1I'_1, {}^1I'_2, \dots, {}^1I'_n \}$, aplicando el anterior Algoritmo de Coherencia Térmica de Solapamiento.

Ya que el eje óptico de la segunda cámara queda proyectado en el eje -OY, la correspondencia entre imágenes de la primera y la segunda cámara tiene un desfase de 180° que debe ser considerado al asignar emparejamiento de imágenes. El algoritmo de corrección es distinto al anteriormente expuesto, ya que ahora no hay propagación longitudinal de la corrección, sino que la corrección transversal en cada pareja de imágenes solapadas, siendo la imagen de la cámara C1 la de referencia. Por otra parte, las partes solapadas corresponden ahora a la parte superior de la imagen de la cámara C1 con la parte inferior de la imagen de la cámara C2. Por lo tanto, el algoritmo adaptado para dos imágenes emparejadas, en las que mantendremos un subíndice genérico r , e indicando las partes superior e inferior con subíndices respectivos sup e inf , sigue los pasos del algoritmo ACTS. Esto es:

(I) Primera iteración. Inicialización de variables: contador de iteración $k = 1$ y $\mu_{Total} = 0$.

(II) Cálculo de la Imagen Diferencia de Solapamiento de ${}^1I'_{r,d}$.

$${}^1D_r = {}^1I'_{r,sup} - {}^2I_{r,inf} \quad (10)$$

(III) Aproximación de los valores de 1D_r a una distribución normal de media μ_k y desviación estándar σ_k .

(IV) Actualización de variables

$$k = k + 1 \quad (11)$$

$$\mu_{Total} = \mu_{Total} + \mu_k \quad (12)$$

(V) Corrección de la imagen solapada ${}^2I_{r,inf}$, mediante:

$${}^2I'_{r,inf} = {}^2I_{r,inf} + \mu_k \quad (13)$$

(VI) Actualizar ${}^2I_{r,inf} = {}^2I'_{r,inf}$

(VII) Si $\mu_k < \beta$, volver al punto (II), siendo β un umbral próximo a 0 (en nuestro caso $\beta = 0.05^\circ C$).

(VIII) Salida de la iteración. Corregir la imagen completa 2I_r haciendo:

$${}^2I'_r = {}^2I_r + \mu_{Total} \quad (14)$$

Cuando se repite el algoritmo para cada imagen de C2, la salida final es un conjunto imágenes corregido de temperatura. El efecto global es la supresión de los gradientes entre imágenes contiguas, obteniendo el conjunto:

$$\{ {}^2I'_1, {}^2I'_2, \dots, {}^2I'_n \} \quad (15)$$

En la sección 7 se proporciona un ejemplo en el que puede apreciar la corrección producida en ambas cámaras C1 y C2.

6. Formación de la nube omnidireccional térmica corregida

Se denomina nube omnidireccional térmica a la nube de puntos que cubre el espacio visible desde una posición del DAS y en la que todos los puntos poseen una temperatura asignada.

A través de los conjuntos corregidos $\{^1I'_1, ^1I'_2, \dots, ^1I'_n\}$ y $\{^2I'_1, ^2I'_2, \dots, ^2I'_n\}$, se obtienen sendas nubes térmicas parciales. Notar que, ya que proceden de la misma nube de puntos P , ambas nubes ya están registradas. Se desarrolla una fase de integración de temperaturas en una única nube omnidireccional en la que un punto de coordenadas (x_i, y_i, z_i) puede tener asignadas una o dos temperaturas asignadas. En este último caso, la temperatura final asignada será la media de ambas temperaturas. Este proceso y los posteriores están fuera de los objetivos de este artículo y se pueden seguir en la publicación de Adán et al. 2023b.

7. Resultados experimentales

7.1 Corrección térmica en un caso de estudio

En esta sección se muestran los resultados detallados sobre un caso estudio de una sala de 72 m^2 sobre la que se realizó un escaneo térmico desde una sola posición del DAS que fue corregido según lo explicado en la sección 5. En la Figura 3 se muestra la nube de puntos RGB tomada por el LIDAR, el modelo de puntos térmicos original y el modelo corregido. Se aprecia una clara discrepancia de temperatura en algunas de las 20 imágenes térmicas originales tomadas por el DAS.

La Figura 4 muestra la detección del *landmark* en el conjunto $\{^1I_1, ^1I_2, \dots, ^1I_n\}$ de la cámara C1 y el cálculo del offset, de -1.38°C . Abajo, se muestra la corrección de toda la secuencia de imágenes. Notar que la escala de color de temperatura ha variado entre una y otra imagen panorámica.

En la Figura 5 se muestra el resultado de la corrección longitudinal (algoritmo ACTS) en una situación intermedia en donde la imagen #5 ya está corregida y la imagen #6 aun no. Se identifican ambas imágenes dentro de la imagen panorámica. Más abajo se visualiza la zona solapada de la imagen izquierda y la correspondiente en la imagen derecha, antes (se aprecia que son claramente distintas) y después de la corrección. Tener en cuenta que, aunque pueda haber dos imágenes adyacentes que globalmente presenten diferencias térmicas debidas a factores externos (e.g. fuentes térmicas puntuales distintas, distinto material con emisividad diferente o cambios térmicos del entorno próximo), sin embargo, la zona solapada de ambas imágenes debería ser casi idéntica, no dependiendo de los anteriores factores. A su vez se muestran el histograma de la imagen diferencia antes y después de realizar esta corrección. A la derecha se muestra la imagen corregida final. La Figura 6 muestra la imagen panorámica con todas las imágenes de la cámara C1 después del proceso de corrección. Se puede apreciar claramente el cambio mayor producido en las imágenes #6 a #10.

En la tabla 1 se muestran las correcciones medias de temperatura para las 10 imágenes en las dos fases antes referidas. Notar que la temperatura original de la que se parte

es la proporcionada después de realizadas la corrección de cuero negro y la corrección de vignetting.

Como se explicó en la Sección 5, la corrección de la imagen secundaria C2, se basa exclusivamente en el algoritmo ACTS entre las partes superiores de las imágenes de la cámara C1 ya corregidas $\{^1I'_1, ^1I'_2, \dots, ^1I'_n\}$ y las partes inferiores de las imágenes de la cámara C2 por corregir, $\{^2I_1, ^2I_2, \dots, ^2I_n\}$, donde existe el solapamiento. El resultado final puede verse en la Figura 7, en la que se aprecian unas correcciones significativas, alcanzando en algún caso, más de 2°C . Por su parte, la Tabla 2 proporciona los valores medios de la corrección.

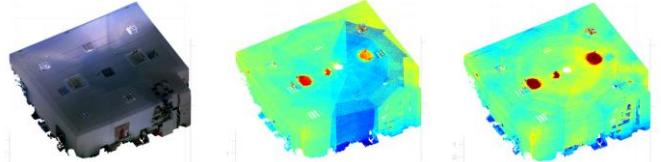


Figura 3. Imagen de la nube de puntos RGB. nube de puntos térmica obtenida antes y después de la corrección.

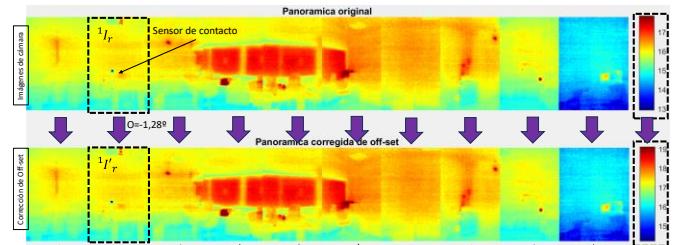


Figura 4. Cámara C1. Determinación de la imagen de referencia 1I_r y resultado de la corrección de offset. Notar que la escala de color de temperatura ha variado entre una y otra imagen panorámica.

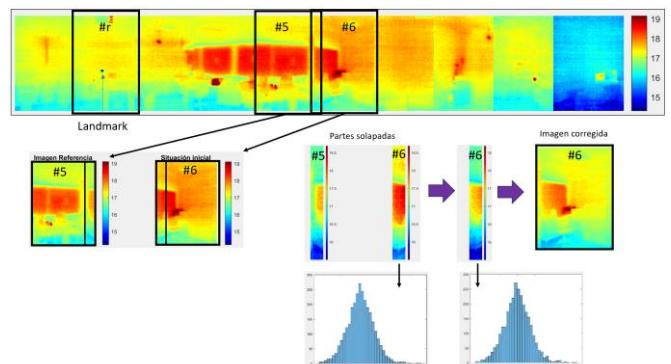


Figura 5. Cámara C1. Detalle de la corrección por desplazamiento del error. Detalle del resultado del algoritmo ACTS para la imagen #6 respecto de la imagen #5. Se visualizan las partes solapadas, la corrección de la parte solapada de #6 y el resultado de la corrección sobre toda la imagen #6. Notar que el *landmark* es detectado en la imagen #2 ($r=2$), por lo que las imágenes #3, #4 y #5 ya aparecen corregidas. b) Los histogramas corresponden a las imágenes de diferencia antes y después de la corrección.

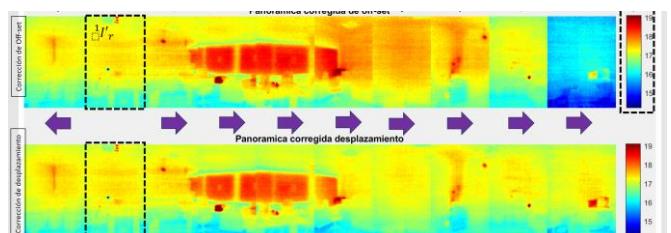


Figura 6. Cámara C1. Resultado de la corrección del desplazamiento del error para todas las imágenes de la imagen panorámica.

Tabla 1. Corrección sobre la cámara C1 (°C)

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Offset	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38
ACTS	-0.07	0.00	0.10	0.17	0.26	0.51	0.42	0.29	-0.09	-1.22
Total	-1.45	-1.38	-1.28	-1.21	-1.12	-0.87	-0.96	-1.09	-1.47	-2.60

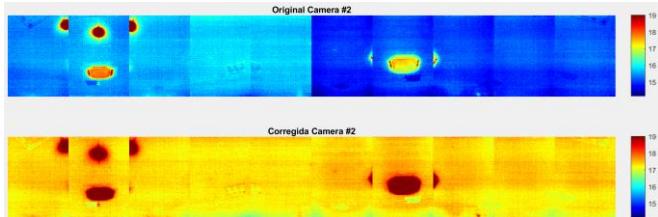


Figura 7: Cámara C2. Resultado de la corrección de la cámara secundaria respecto de la cámara principal. Se aprecia que se produce una notable variación respecto a la temperatura de la cámara de referencia ya corregida.

Tabla 2. Corrección sobre la cámara secundaria (°C)

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Total	-1.97	-1.85	-1.69	-1.50	-1.57	-2.51	-2.37	-2.38	-2.29	-2.23

7.2 Ejemplos de nubes térmicas corregidas

El procedimiento expuesto en este artículo se ha experimentado en multitud de campañas de digitalización térmica de edificios en distintos escenarios con diferentes características. La Figura 8 muestra algunos ejemplos de escenarios de zona, en donde se ha obtenido una nube térmica corregida. En todos ellos se puede observar la ausencia de saltos y discontinuidades de temperatura en el conjunto de imágenes térmicas utilizadas para construir el modelo, lo que proporciona un modelo térmico coherente, fruto del algoritmo presentado en este artículo.

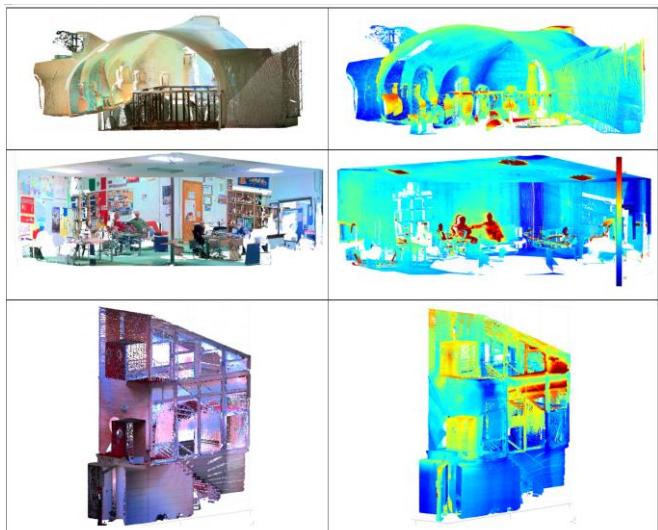


Figura 8. Ejemplos de nube de puntos color (columna izquierda) y térmicas (columna derecha) después de haber aplicado el algoritmo de corrección.

8. Conclusiones

Hasta ahora, no se ha tratado en la literatura el problema de variabilidad aleatoria de la medida de temperatura proporcionada por cámaras de infrarrojos en el proceso de la obtención de nubes térmicas de edificios. Buscando la simplicidad, la mejora de la precisión y la coherencia térmica

del modelo obtenido, el procedimiento presentado en este artículo incluye en el *setup* experimental un sensor térmico de contacto con precisión de 0.2 °C, que ha servido como referencia fundamental en el proceso de corrección. La metodología mostrada se basa en la propagación de la corrección utilizando un conjunto de imágenes térmicas secuenciales que deben conformar el mapa térmico 3D omnidireccional. El objetivo logrado ha sido minimizar la variabilidad de la/s cámara/s, acercándose al valor real de temperatura en la escena 3D reconstruida térmicamente en un momento dado. Este algoritmo ha sido desarrollado en dos cámaras térmicas, pero es fácilmente extensible a un número mayor de ellas.

Por lo que se conoce, no existen otros métodos alternativos al presentado en este artículo en la literatura que traten este problema. En este sentido, se puede concluir que es una solución pionera en el estado del arte.

Agradecimientos

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

Referencias

- Adán, A., Pérez, V., Ramón, A., and Castilla F. J. Correction of Temperature from Infrared Cameras for More Precise As-Is 3D Thermal Models of Buildings. *Applied Sciences* (Switzerland), vol. 13, no. 11, p. 6779, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13116779>.
- Adán, A., López-Rey, A. and Ramón, A.. Robot for thermal monitoring of buildings. *Automation in Construction*, vol. 154, p. 105009, oct 2023. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105009>.
- Daakir, M.; Zhou, Y.; Pierrot Deseilligny, M.; Thom, C.; Martin, O.; Rupnik, E. Improvement of photogrammetric accuracy by modeling and correcting the thermal effect on camera calibration. *ISPRS J. Phot. Remote Sens.* 2019, 148, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.012>.
- Lin, D.; Maas, H.G.; Westfeld, P.; Budzier, H.; Gerlach, G. An advanced radiometric calibration approach for uncooled thermal cameras. *Photogramm. Rec.* 2018, 33, 30–48. <https://doi.org/10.1111/phor.12216>.
- Lin, D.; Jarzabek-Rychard, M.; Tong, X.; Maas, H.G. Fusion of thermal imagery with point clouds for building façade thermal attribute mapping. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2019, 151, 162–175. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.010>.
- Malmivirta, T.; Hamberg, J.; Lagerspetz, E.; Li, X.; Peltonen, E.; Flores, H.; Nurmi, P. Hot or not? robust and accurate continuous thermal imaging on FLIR cameras. *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, PerCom 2019, Kyoto, Japan, 11–15 March 2019.
- Ramón, A., Adán, A. Castilla, F.J. Thermal point clouds of buildings: A review. *Energy and Buildings*, Volume 274, 2022, 112425, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112425>.
- Xing, L.; Dai, W.; Zhang, Y. Improving displacement measurement accuracy by compensating for camera motion and thermal effect on camera sensor. *Mech. Syst. Signal Process.* 2022, 167, 108525. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108525>.
- Teledyne Flir. <https://www.flir.es/discover/rd-science/infrared-camera-accuracy-and-uncertainty-in-plain-language/>. Consultada 12/04/2024.
- Wan, Q.; Brede, B.; Smigaj, M.; Kooistra, L. Factors influencing temperature measurements from miniaturized thermal infrared (Tir) cameras: A laboratory-based approach. *Sensors* 2021, 21, 8466. <https://doi.org/10.3390/s21248466>.
- Zhou, H.F.; Li, Z.Y.; Lu, L.J.; Ni, Y.Q. Mitigating thermal-induced image drift for videogrammetric technique in support of structural monitoring applications. *Struct. Control Health Monit.* 2021, 29, e2869. <https://doi.org/10.1002/stc.2869>.