

Diseño y control de una cabina automatizada para la captura de imágenes de miembro inferior residual transtibial

M. A. López Pérez^{1*}, B. Alemón¹, M. Ballesteros¹, R. Q. Fuentes Aguilar¹, J. Huegel¹

¹Tecnológico de Monterrey. Escuela de Ingeniería y Ciencias. Zapopan, Jalisco. México

*A00343779@itesm.mx

Abstract— This paper presents the design of an automated cabin for thermal image capture. The device aims to improve precision during the capture and processing of the image in an isolated space. The thermographic pictures are used in the analysis of the residual human limb for transtibial amputee subjects. This study could serve as a non-invasive method seeking a correlation between the quality of the socket and the thermal activity on the amputee stump. The proposed cabin provides a standard process to acquire thermal images of the regions of interest from the participant stump reducing human errors, the variance between samples, and provides an isolated workspace to reduce environmental noise. The methodology includes the computed assisted design of all mechanical elements, the electronic instrumentation for the automation, the interface, and the control algorithm to regulate the thermal camera movements, and numerical simulations to depict the functionality.

Palabras clave—Cabina automatizada, imágenes de miembro inferior residual, diseño de sockets, amputados transtibiales, termografía.

I. INTRODUCCIÓN

El socket protésico es una estructura que sirve como conexión mecánica al cuerpo humano, en este caso a la persona que ha sufrido una amputación. Hoy en día, el diseño y manufactura de sockets protésicos es un procedimiento artesanal muy especializado. Debido a esto, la calidad de los sockets hechos por protesistas puede ser inconsistente [1]. Por otra parte, en una encuesta hecha por Hagberg y Branemark, 97 participantes con amputación transfemoral reportaron que el calor generado y la excesiva transpiración impactaba negativamente en su calidad de vida y en la comodidad del uso de sus prótesis [2].

Algunos estudios relacionados con sockets protésicos se enfocan en el desarrollo de técnicas para medir o mejorar la calidad de los sockets y, en consecuencia, la calidad de vida de los pacientes [1-5]. El estudio presentado por J. Perry [6] consistió en una herramienta para el desarrollo de nuevas prótesis que acomodan las cargas térmicas que surgen de actividades cotidianas mediante la implementación de un modelo térmico de un miembro residual y su prótesis. Los resultados mostraron que altas temperaturas cutáneas están localizadas cerca de tejido muscular, este modelo propuesto puede ser usado para diseñar sistemas protésicos.

De acuerdo con la investigación de Cutti *et al.* los cambios térmicos durante la marcha incrementan la temperatura en

1.1 +/- 0.7 °C en el muñón y más significativamente en el porcentaje de humedad que varía de 4.1 +/- 2.3% [7]. Además, los diagnósticos térmicos y las mediciones de presión interfacial del muñón son métodos que permiten un diagnóstico rápido que ayuda en el diseño de sockets para personas con una amputación transtibial [8], [9].

La termografía es una técnica usada para determinar temperatura y variaciones térmicas. En el campo médico, la termografía es usada para asistir en muchos problemas médicos como la detección de tejido adiposo, cambios térmicos en el pie diabético e insuficiencia vascular [10], [11]. La importancia de la termografía se encuentra en el hecho de que es un método no invasivo y de bajo costo que se usa para medir la temperatura de la piel. El proceso para adquirir los termogramas es generalmente manual y se realiza en un ambiente no controlado. Otra situación importante es la luz ambiente no controlada y la presencia de otros objetos que interfieren durante el proceso de captura de los termogramas, reduciendo con ello la calidad de los resultados y aumentando el tiempo de procesamiento de las imágenes [8], [12], [13].

Este trabajo de investigación propone el diseño y control de una cabina automatizada para la captura de termogramas para el muñón de sujetos con amputaciones transtibiales.

El objetivo principal es desarrollar una cabina automatizada funcional y manufacturable para mejorar los resultados del procesamiento de imágenes del análisis termográfico de miembros residuales de personas con amputación transtibial. Esto podría reducir el ruido térmico y de luminancia del ambiente y definir un proceso uniforme para obtener la información dentro de un espacio de tiempo fijo. La automatización del proceso de adquisición de imágenes es realizada por un algoritmo de control proporcional derivativo clásico (PD), de tal forma que el dispositivo sigue una trayectoria preestablecida donde el usuario puede seleccionar el número de imágenes, con este dato y un tiempo fijo se calcula una trayectoria suave de referencia para la parte móvil donde se fija la cámara [14], [15], [16].

La cabina propuesta aquí está diseñada pero no limitada para aplicaciones de termografía. Con una pequeña modificación en el algoritmo de control, el diseño propuesto puede ser usado en aplicaciones de fotogrametría [17], [18]. La principal diferencia con dispositivos utilizados para fotogrametría es que para las imágenes de termografía con el

método actual solo necesita hacer una captura cada 45 grados, con 4 imágenes térmicas. En resumen, las principales contribuciones y novedades del prototipo propuesto son:

- 1) **Diseño de estructura portable que permite el análisis de miembros residuales de personas con amputación transtibial dentro de un espacio de trabajo adecuado.**
- 2) **Adquisición automatizada de imágenes térmicas y selección de modo de operación para la funcionalidad del dispositivo.**
- 3) **Un algoritmo de control para asegurar el seguimiento de la trayectoria de la plataforma móvil.**
- 4) **La instrumentación electrónica, incluyendo los sensores, actuadores, fuentes de poder y el microcontrolador para funcionalidad.**
- 5) **Un prototipo virtual para probar la funcionalidad del diseño propuesto.**

II. METODOLOGÍA

La Fig. 1 muestra un diagrama con la metodología de trabajo para el desarrollo de la cabina automatizada. El primer paso en la metodología consiste en la identificación y definición de las características clave que deben ser consideradas en cada paso del desarrollo. Después, el diseño estructural es propuesto junto con el mecanismo para realizar el movimiento de la cámara y paralelamente la instrumentación y el diseño del sistema de control. Justo después de definir los requerimientos, se realiza un diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) formal de los elementos. A partir de los diseños en CAD y la implementación del sistema de control se pueden hacer simulaciones numéricas para validar los resultados. La fase de implementación de software ayuda a la integración de todas las fases anteriores para coordinar los movimientos con el diseño de control propuesto. Finalmente, los planos de ensamble y manufactura son generados para la futura construcción del dispositivo.

La siguiente subsección explica el primer paso en el proceso de diseño de la cabina y la definición de los puntos críticos del sistema, esto ayuda a visualizar el alcance general del proceso de diseño.

A. Requerimientos del sistema.

Para establecer los requerimientos de la cabina, primero se revisa el proceso manual para la captura de imágenes térmicas. Este empieza con la colocación de un trípode con la cámara en una posición predefinida y se toma la captura de la imagen térmica, después el trípode es movido a otra posición predefinida. El tiempo del proceso depende de que tan rápido mueva la cámara de posición el usuario, lo cual afecta la calidad de los termogramas. Es notable que el ruido de fondo afecta la precisión del análisis termográfico.

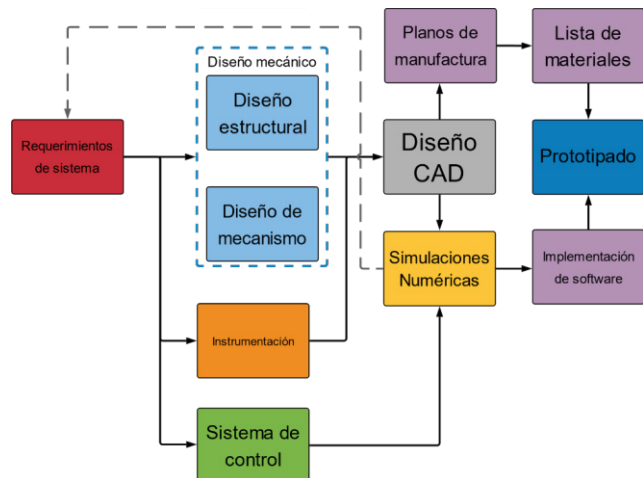


Fig. 1. Diagrama que muestra la metodología propuesta para el desarrollo de una cabina funcional y manufacturable para la captura de imágenes térmicas.

Con base en lo anterior, los siguientes requerimientos del sistema fueron establecidos y validados:

- 1) **Tiempo de proceso:** El tiempo total del proceso debe de ser menor a dos minutos.
- 2) **Control:** El sistema cuenta con un microcontrolador para el control de la cabina y la comunicación con una interfaz en la computadora.
- 3) **Aislamiento:** La cabina tiene una cubierta externa que previene que la luz interfiera en la captura de las imágenes.
- 4) **Portabilidad:** La cabina puede ser desplegada con facilidad.
- 5) **Instrumentación:** La cabina debe de contar con el actuador, sensor y componentes electrónicos que permitan realizar el movimiento circular y permitan el control desde la PC.
- 6) **Movimiento:** La cámara se mueve con una trayectoria suave sobre un riel circular, la trayectoria debe permitir la toma de un número establecido de capturas en un tiempo fijo.

La siguiente sub-sección describe el diseño mecánico de la cabina automatizada de acuerdo con los requerimientos de sistema.

B. Diseño mecánico

Las características principales, como el tamaño del riel o el perfil estructural usado para la estructura externa, se definieron con base en los requerimientos del sistema. Para el diseño de la plataforma móvil, la forma del riel es sumamente importante. Los rieles comerciales para cámaras tienen bandas dentadas para mover la cámara de un lado a otro. En el caso de un riel circular, se tiene la opción viable de usar un motor de corriente directa con encoder para controlar la posición de la plataforma. Haciendo uso de rodillos-guía, la plataforma puede mantenerse en el riel mientras se mueve. Los planos de las piezas requeridas para la construcción de la cabina se hicieron utilizando el

software de diseño Solidworks®. Todas las dimensiones relevantes para la manufactura están incluidas en los planos de manufactura de cada pieza. Junto con el diseño mecánico, la selección de los sensores, actuadores y otros componentes electrónicos es una parte esencial de la metodología. La siguiente subsección contiene los detalles de la instrumentación propuesta.

C. Instrumentación de la cabina

La instrumentación es requerida para generar las condiciones apropiadas para la implementación del sistema de control. La Fig. 2 muestra un diagrama con las conexiones. Se implementó un encoder para estimar la posición de la plataforma al conocer las revoluciones del actuador. Este actuador se seleccionó como un motor de corriente directa (CD) (4.4:1 motor de engranes con encoder). La comunicación entre la computadora y los otros elementos del sistema se realiza mediante la tarjeta principal, por medio de comunicación serial. El microcontrolador seleccionado para este dispositivo es el STM32F103C8T6 de STMicroelectronics®, el cual es adecuado para un extenso rango de aplicaciones [19]. El optoacoplador aísla a los componentes de bajo voltaje de los de alto voltaje y permite el control del motor de corriente directa mediante el uso de un puente-H, el módulo HR0112 tiene un puente-H L298N con la capacidad adecuada para controlar el motor seleccionado. Además, una interfaz gráfica es implementada para facilitar el control de la cámara. El control para regular el movimiento es incorporado en el código de la interfaz gráfica, la siguiente subsección describe el funcionamiento de la interfaz de usuario.

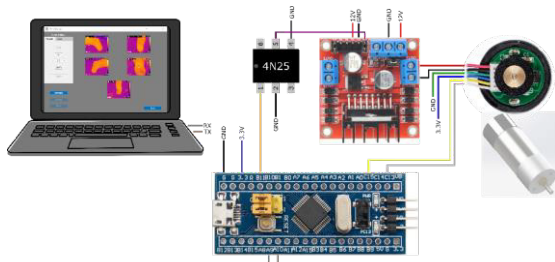


Fig. 2. Diagrama de conexión de la instrumentación electrónica.

D. Implementación de software

Para controlar el proceso de captura de imágenes térmicas se desarrolló una interfaz de usuario con la ayuda de Matlab® Appdesigner toolbox. Esta interfaz de usuario hace el proceso más amigable con el usuario. Primero, el usuario introduce la información del participante con amputación y selecciona un directorio de trabajo. Después, el usuario puede seleccionar entre hacer la captura de forma manual o automática, inmediatamente después de que el proceso es completado las imágenes se guardan en el directorio de trabajo previamente seleccionado. Esta interfaz de usuario es portable y puede ser instalada en una computadora personal sin la necesidad de tener instalado

Matlab®. La Fig.3 muestra la ventana principal de la aplicación.

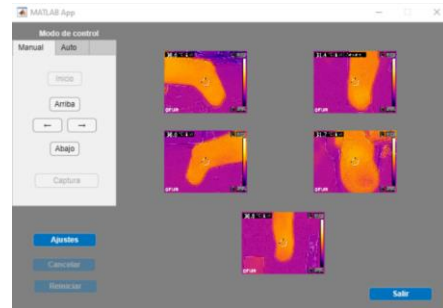


Fig. 3. Ventana principal de la interfaz de usuario desarrollada para interactuar con la plataforma.

III. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos con la metodología propuesta. La cabina automatizada está compuesta por una plataforma móvil que a su vez está compuesta de dos partes que se separan para permitir que esta se monte en el riel.

A. Prototipo virtual de la cabina.

La Fig. 4 muestra una imagen renderizada del diseño CAD de la cabina con todos los elementos estructurales para satisfacer los requerimientos de diseño.

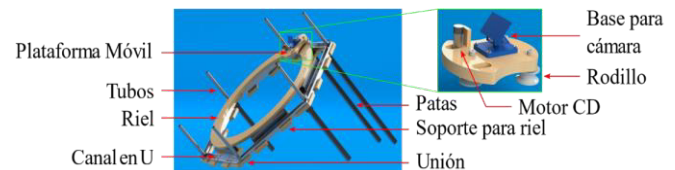


Fig. 4. Ensamblaje de la estructura y las partes principales de la cabina automatizada para la captura de imágenes de miembro inferior residual transtibial.

Sobre los rieles se coloca la base para la cámara. Los tubos redondos se usan para sostener la tela usada para hacer una cubierta exterior que evite el paso de la luz al interior para así aislar el muñón del participante. Los canales en U fueron seleccionados para la estructura de la cabina porque permiten esconder los tubos redondos cuando se encuentran replegados, permitiendo que la cabina ocupe menos espacio para su almacenamiento. Las patas cuentan con bisagras en su unión con la estructura de la cabina, lo cual cumple con dos propósitos, permitir cambiar la inclinación de la cabina para el ajuste al muñón del sujeto y permitir una posición de las patas en la que la cabina pueda ser almacenada en un espacio reducido.

B. Pruebas virtuales de funcionamiento

Para realizar las simulaciones numéricas del funcionamiento de la cabina se desarrolló un prototipo virtual usando Matlab® y Simscape® toolbox. El prototipo virtual considera el modelo CAD con todas las

características físicas del sistema, permitiendo pruebas del algoritmo de control y la interfaz desarrollada antes de las pruebas finales en el dispositivo final. El resultado de la implementación de la señal de control PD para el seguimiento de trayectoria de la plataforma se muestra en la Fig. 5, donde θ es la posición angular de la plataforma móvil.

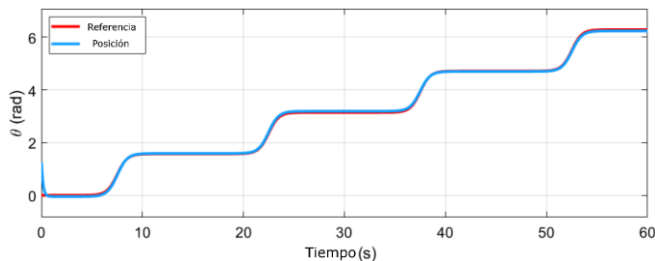


Fig. 5. La gráfica muestra la señal de referencia en rojo y la posición real del sistema de control en azul.

IV. DISCUSIÓN

El dispositivo diseñado cumple con los requerimientos establecidos, al menos en simulación. La forma y los materiales seleccionados permiten que sea un dispositivo portable y ajustable al muñón de los sujetos y permite la automatización del proceso que se lleva de forma manual actualmente. El control propuesto logró resolver el seguimiento de una trayectoria deseada. Además, la trayectoria propuesta tiene el número de pasos necesarios para la captura de las cuatro imágenes que actualmente utiliza el proceso de análisis termográfico para el muñón de amputados transtibiales. El objetivo principal de la cabina propuesta en este trabajo guarda ciertas similitudes con el proceso implementado por Salazar para capturar imágenes del rostro de un participante para generar un modelo 3D [17]. Es posible ampliar el alcance inicial que se tenía de la cabina automatizada realizando adecuaciones al algoritmo de control. Como trabajo futuro se pretende realizar la construcción del dispositivo para integrar todos los subsistemas y realizar pruebas en campo. Respecto a la parte del software diseñado, la interfaz gráfica desarrollada para controlar la cámara fue probada con éxito en una sesión con dos participantes.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el diseño de una cabina funcional y automatizada para asistir en la captura de imágenes térmicas para mejorar el diseño de sockets protésicos. El dispositivo consiste en una plataforma que se mueve sobre un riel circular. El movimiento es controlado mediante una interfaz de usuario diseñada para manipular la cabina implementando el algoritmo de control incorporado en esta. Además, las funciones propuestas para la trayectoria deseada permiten al usuario incrementar el número de muestras para otras posibles aplicaciones como la

generación de un modelo 3D del miembro residual del participante con amputación.

REFERENCIAS

- [1] K. M. Moerman, D. Solav, D. Sengeh, and H. Herr, "Automated and Data-driven Computational Design of Patient-Specific Biomechanical Interfaces," 2016.
- [2] K. Hagberg and R. Brånemark, "Consequences of non-vascular trans femoral amputation," *Prosthetics & Orthotics International*, vol. 25, no. 3, pp. 186–194, 2001.
- [3] G. Colombo, S. Filippi, C. Rizzi, and F. Rotini, "A new design paradigm for the development of custom-fit soft sockets for lower limb prostheses," *Computers in Industry*, vol. 61, no. 6, pp. 513–523, 2010.
- [4] G. Colombo, G. Facoetti, D. Regazzoni, and C. Rizzi, "A full virtual approach to design and test lower limb prosthesis: *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 8, no. 2, pp. 97–111, 2013.
- [5] S. Strike and M. Hillery, "The design and testing of a composite lower limb prosthesis," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 214, no. 6, pp. 603–614, 2000.
- [6] J. Peery, G. Klute, J. Blevins, and W. Ledoux, "A three-dimensional finite element model of the transibial residual limb and prosthetic socket to predict skin temperatures," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 14, pp. 336–343, sep 2006.
- [7] A. G. Cutti, P. Perego, M. C. Fusca, R. Sacchetti, and G. Andreoni, "Assessment of lower limb prosthesis through wearable sensors and thermography," *Sensors*, vol. 14, no. 3, pp. 5041–5055, 2014.
- [8] E. A. Huff, W. R. Ledoux, J. S. Berge, and G. K. Klute, "Measuring residual limb skin temperatures at the skin-prosthesis interface," *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, vol. 20, no. 4, pp. 170–173, 2008.
- [9] S. I. Aguila, G. J. Sánchez, E. E. Sauvain, B. Alemon, R. Q. Fuentes-Aguilar, and J. C. Huegel, "Interface pressure system to compare the functional performance of prosthetic sockets during the gait in people with trans-tibial amputation," *Sensors*, vol. 20, p. 7043, dec 2020.
- [10] A. Kirimtat, O. Krejcar, A. Selamat, and E. Herrera-Viedma, "FLIR vs SEEK thermal cameras in biomedicine: comparative diagnosis through infrared thermography," *BMC Bioinformatics*, vol. 21, mar 2020.
- [11] A. Gatt, C. Formosa, K. Cassar, K. P. Camilleri, C. D. Raffaele, A. Mizzi, C. Azzopardi, S. Mizzi, O. Falzon, S. Cristina, and N. Chockalingam, "Thermographic patterns of the upper and lower limbs: Baseline data," *International Journal of Vascular Medicine*, vol. 2015, pp. 1–9, 2015.
- [12] J. Živcák, R. Hudák, V. Rajt'úková, *et al.*, "Biomechanical and thermographic analysis in the transtibial prosthesis socket–stump interface," *Acta Mechanica Slovaca*, vol. 19, no. 2, pp. 18–26, 2015.
- [13] L. E. Diment, M. S. Thompson, and J. H. Bergmann, "Comparing thermal discomfort with skin temperature response of lower-limb prosthesis users during exercise," *Clinical Biomechanics*, vol. 69, pp. 148–155, 2019.
- [14] D. Cruz-Ortiz, M. Ballesteros-Escamilla, I. Chairez, and A. Luviano, "Output Second-order Sliding-mode Control for a Gecko Biomimetic Climbing Robot," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 633–646, 2019.
- [15] R. Q. Fuentes-Aguilar and I. Chairez, "Adaptive tracking control of state constraint systems based on differential neural networks: A Barrier Lyapunov function approach," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 31, no. 12, pp. 5390–5401, 2020.
- [16] M. F. Ballesteros-Escamilla, D. Cruz-Ortiz, I. Chairez, and A. Luviano-Juárez, "Adaptive output control of a mobile manipulator

hanging from a quadcopter unmanned vehicle,” *ISA Transactions*, vol. 94, pp. 200–217, 2019.

[17] R. Salazar-Gamarra, R. Seelaus, J. V. L. da Silva, A. M. da Silva, and L. L. Dib, “Monoscopic photogrammetry to obtain 3d models by a mobile device: a method for making facial prostheses,” *Journal of Otolaryngology - Head & Neck Surgery*, vol. 45, may 2016.

[18] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, Introduction. *Close range photogrammetry and 3D imaging.de*, 3rd edition, De Gruyter 2019.

[19] STMicroelectronics, *RM0008 Reference manual*, 21 ed., Feb. 2021.