

Determinación de tipo de pie mediante el procesamiento de imágenes*

Foot Type Measurement System by Image Processing

Recibido: 15 de diciembre de 2015 - Aceptado: 4 de abril de 2016

Para citar este artículo: L. Luengas, M. Díaz, J. González «Determinación de tipo de pie mediante el procesamiento de imágenes», Ingenium, vol. 17. n.º 34, pp. 147-161, mayo, 2016.



Lely Adriana Luengas C.**
María Fernanda Díaz H.***
José Luis González M.****

Resumen

El pie es una parte mecánica integral de la extremidad inferior, realiza una función tanto estática como dinámica, da el soporte para la bipedestación y permite realizar actividades varias de una manera suave y estable. Existe una relación directa entre el estado de la anatomía del pie, el tipo de afectación de las articulaciones adyacentes y el desempeño general de la persona; de allí que el estudio del tipo de pie sea de gran importancia para conocer la sustentación básica del cuerpo humano. El procesamiento de imágenes se utiliza en sectores industriales con el fin de extraer determinadas características o parámetros de un proceso. Los métodos cuantitativos de evaluación de la huella plantar son de ayuda en la identificación de las características morfológicas del pie y aportan información sobre posibles lesiones riesgosas. En este artículo se muestra el desarrollo de un sistema basado en el procesamiento de imágenes el cual determina si un pie es normal, cavo o plano. En primer lugar se estudiaron los protocolos existentes para determinar el tipo de pie, seleccionando el índice de Hernández-Corvo debido a las prestaciones para el

* Detección de parámetros antropométricos del pie humano. Grupo de investigación METIS. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

** Ph. D. (c). en Ingeniería, Universidad Javeriana. M. Sc. en Ingeniería Eléctrica. Profesora Universidad Distrital Francisco José de Caldas. E-mail: lalengasc@udistrital.edu.co

*** M. Sc. (c). en Ciencias de la Información, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Coordinadora académica Ingeniería Mecatrónica, Universidad Piloto de Colombia. E-mail: mdiaz@unipiloto.edu.co

**** Arquitecto, Universidad de Los Andes, docente de planta Universidad Piloto de Colombia. E-mail: Joseluisgm2@hotmail.com

procesamiento de imágenes, paso seguido se realizó el análisis de imágenes y se generó un aplicativo que muestra el tipo de pie del sujeto examinado. Se hizo valoración de la herramienta propuesta, obteniendo error del 6 % sobre las mediciones realizadas

Palabras clave

Huella plantar, podobarometría, morfología del pie.

Abstract

Foot is an integral mechanical part of lower limb, performs a function both static and dynamic, provides support for standing and allows for various activities in a smooth and stable manner. There is a direct relationship between the state of the anatomy of the foot, the type of involvement of adjacent joints and overall performance of the person; hence the study of foot type is very important to know the basic sustenance of the human body. Image processing is used in industrial sectors in order to extract certain characteristics or parameters of a process. Quantitative assessment methods of the footprint are helpful in identifying the morphological characteristics of the foot and provide information on possible hazardous injuries. This article describes the development of a system based on image processing which determines whether a foot is normal, cavus or flat. First, existing protocols were studied to determine the foot type, selecting the Hernández-Corvo index due to benefits for image processing. Then, image analysis was performed and an application that shows the foot type of the examined subject was developed. Assessment of the proposed tool was made, obtaining 6% error with respect to the measurements made.

Keywords

Plant footprint, podobarometrics methodology, morphology of the foot.

Introducción

El cuerpo humano forma una cadena cinemática que inicia en la cabeza y termina en los pies. Los pies, como elemento terminal, deben proveer estabilidad y soporte. Una malformación localizada en el pie puede ocasionar la distribución defectuosa de los pesos a nivel de otras articulaciones y generar patologías, con consecuencias a corto, mediano y largo plazo. Las condiciones del trabajo muscular están determinadas por la conformación plantar permanente, a partir de la acción presente tanto en estática como en dinámica. Así, el pie humano como una compleja estructura multiarticular formada por huesos, articulaciones y tejidos blandos, juega un papel fundamental en la función biomecánica de la extremidad inferior [1]–[3].

La baropodometría permite cuantificar la distribución de presiones en la huella plantar, lo cual permite determinar el tipo de pie que posee una persona. Esta técnica puede ser muy útil como complemento de otras técnicas de diagnóstico y exploración en el momento de llevar a cabo un diagnóstico preciso de la patología del pie [1], [4]. La posibilidad de registrar el valor de las presiones en cualquier punto de la huella plantar, refleja de una

forma fiel las modalidades de carga del pie y resulta fundamental en el conocimiento de la biomecánica del pie y de la marcha. La obtención de estos valores permite prevenir las deformaciones y tratar las alteraciones funcionales. Se han propuesto varios métodos para el análisis de la biomecánica del pie, y para estudiar la morfología podal, los propósitos han sido el poder prevenir ciertas lesiones con prescripción médica ortopédica, clasificación de tipo de pie y observar las posibles consecuencias de postura en el resto del cuerpo. Entre los métodos se encuentran el ángulo tibio-calcáneo con goniómetro, la altura del dorso del pie, el índice del arco o «Arch Index», el índice del arco modificado, el índice de la impresión del pie o «Foot Postural Index», el ángulo del arco o de la huella, el ángulo del arco longitudinal o «Longitudinal Arch Index», el índice en valgo o «Valgus Index», el índice de Hernández-corvo. Este último se ha considerado un método de bajo coste y facilidad de uso para realizar análisis de la huella plantar [5], [3].

La obtención de los parámetros morfológicos de la huella plantar es un proceso realizado, en la mayoría de los casos, de forma manual, lo cual lleva a registros subjetivos. La incursión de la tecnología en los procesos clínicos permite obtener datos cuantificables, objetivos y fiables, mediante una exploración sencilla y rápida. Se han realizado propuestas para la evaluación cuantitativa de la huella plantar a partir de imágenes que hacen uso de algoritmos de análisis sofisticados, pero se necesita de un especialista para llevar a cabo el proceso [1], [3], [5]–[7].

En Colombia la baropodometría no es una rama de la medicina que se encuentra masificada y que se contemple como herramienta de diagnóstico y control de rehabilitación dentro del sistema de salud, por lo que no es común ver laboratorios con métodos e instrumentación para análisis de huella plantar de fácil acceso al público en general.

En este artículo se desarrolla una propuesta asistida por computador para la extracción de parámetros morfológicos a partir de la obtención del registro de huella plantar, toma como base el Índice de Hernández-Corvo por sus características de uso. La aplicación hace uso de técnicas de segmentación basadas en el color, la detección de borde mediante un operador óptimo y la selección de puntos característicos mediante métodos de optimización discreta. En primera instancia se muestran aspectos clínicos del pie, luego se dan conceptos básicos de procesamiento de imágenes, a continuación la metodología empleada, después los resultados alcanzados y por último las conclusiones a las que se llegaron con la investigación.

Aspectos clínicos del pie

El pie es una estructura tridimensional variable, base del servomecanismo antigravitatorio y que constituye una pieza fundamental para la posición bipodal y la marcha humana, es el resultado de la transformación del pie prensil de los monos en un pie estático de apoyo [1]–[3], [8]. El pie tiene 28 huesos articulados entre sí para moverse sincronizadamente. Esta parte del cuerpo humano actúa como una plataforma de soporte capaz de aguantar cargas repetitivas mayores al peso corporal, adaptarse a diferentes tipos de terreno y a diversas velocidades de desplazamiento. El pie absorbe y transmite las fuerzas de reacción del suelo al resto del cuerpo, sus cualidades únicas le permiten ser muy rígido o bastante

flexible, dependiendo de la situación a la que se encuentra expuesto. Las actividades físicas hacen presente un estrés mecánico sobre el que el pie responderá adaptativamente, atendiendo a los parámetros intrínsecos de su contexto [2], [9].

La funcionalidad del pie humano está claramente influenciada por su estructura [2], [9]–[11]. El arco interno de la bóveda plantar y los puntos de apoyo en talón y metatarsianos, permiten que el pie sea capaz de sostener todo el peso del cuerpo. La altura del arco longitudinal interno tiene influencia sobre otras estructuras del cuerpo, como las de la espalda [12]–[15]. La importancia de identificar el tipo de pie radica en la necesidad de detectar posibles anomalías realizando una valoración del aparato locomotor. Las mediciones del pie se suelen hacer con la intención de ayudar en el descubrimiento de factores de riesgo y lesiones. Los problemas ortopédicos del pie son bastante frecuentes y los parámetros morfológicos del pie ayudan a evaluar una condición podológica. Estos parámetros permiten estudiar estrategias y para tomar decisiones a nivel clínico y deportivo.

Existen tres tipos básicos de pie: normal, plano y cavo, como se muestra en la Figura 1. El pie normal presenta un arco en la parte media del pie. El pie plano presenta un cambio en la forma del pie donde no se tiene un arco normal al estar parado, se presenta una disminución de la altura del arco longitudinal plantar (también llamado bóveda plantar). El pie cavo es una anomalía del pie que se caracteriza por un arco más pronunciado de lo normal. Cada tipo de pie presenta una determinada forma de huella plantar, la Figura 1 muestra el tipo de huella según el pie [16]–[18].



Figura 1: Tipos de pie y huellas de los diferentes tipos de pie de un pie normal [16] [17]

La huella plantar proporciona un instrumento válido para analizar la estructura del pie, pues es el reflejo del estado de las estructuras anatómicas. El fotopodograma permite obtener registros válidos, duraderos y de alta calidad de la huella plantar, recogiendo el contorno del pie que se apoya y aportando una impresión de la huella plantar sobre papel

fotográfico. La pedigrafía, por su parte, es una técnica similar que utiliza una sustancia grasa y de color para imprimir la huella sobre una hoja de papel [1].

El Índice de Hernández-Corvo permite determinar el tipo de pie mediante un protocolo establecido, así el pie se tipifica según las medidas obtenidas a través de la imagen plantar, dando como resultado seis posibilidades que abarcan desde el pie plano hasta el pie cavo extremo [19]. Este índice presenta una buena precisión, tanto en la realización como en la clasificación del tipo de pie [6], [13]. Sobre cada huella se aplica el protocolo de valoración que se describe a continuación.

1. Marcación de los puntos 1 y 1' en las prominencias internas del antepié y del retropie respectivamente, figura 2A.
2. Unión de los puntos 1 y 1' para formar el trazo inicial, figura 2B.
3. Marcación de los puntos 2 y 2' en el extremo anterior y posterior de la huella respectivamente, figura 2C.
4. Trazado de dos líneas perpendiculares al trazo inicial que pasen por 2 y por 2'.
5. La distancia entre la línea que pasa por 2 y el punto 1 se llama medida fundamental (mf), 2D.
6. Trazado de tres líneas perpendiculares al trazo inicial que pasen por las divisiones de la medida fundamental (se les denomina de arriba abajo 3, 4 y 5), figura 2E.
7. Trazado de una línea entre 3 y 4 perpendicular a 3 (y paralela al trazo inicial), que pase por el punto más externo del pie. Se llama línea 6, Figura 2F.
8. Medición del valor X, que es la distancia entre el trazo inicial y la línea 6 y que corresponde a la anchura del metatarso.
9. Trazado de la línea 7, paralela al trazo inicial, que pasa por el punto más externo de la línea 4, Figura 2F.
10. Trazado de la línea 8, paralela al trazo inicial, que pasa por el punto más externo del pie de la línea 5, 2F.
11. Medición de la distancia entre la línea 8 y el trazo inicial.
12. Trazado de la línea 9 paralela al trazo inicial y que pasa por el punto más externo de la zona interna entre 4 y 5, Figura 2F.
13. Medición de la distancia Y, entre 9 y 7.
14. Medición de la distancia entre la línea 9 y el trazo inicial.
15. Se calcula el %X según la Ecuación 1.

$$\%X = \frac{(X - Y)}{X} * 100$$

Ecuación 1

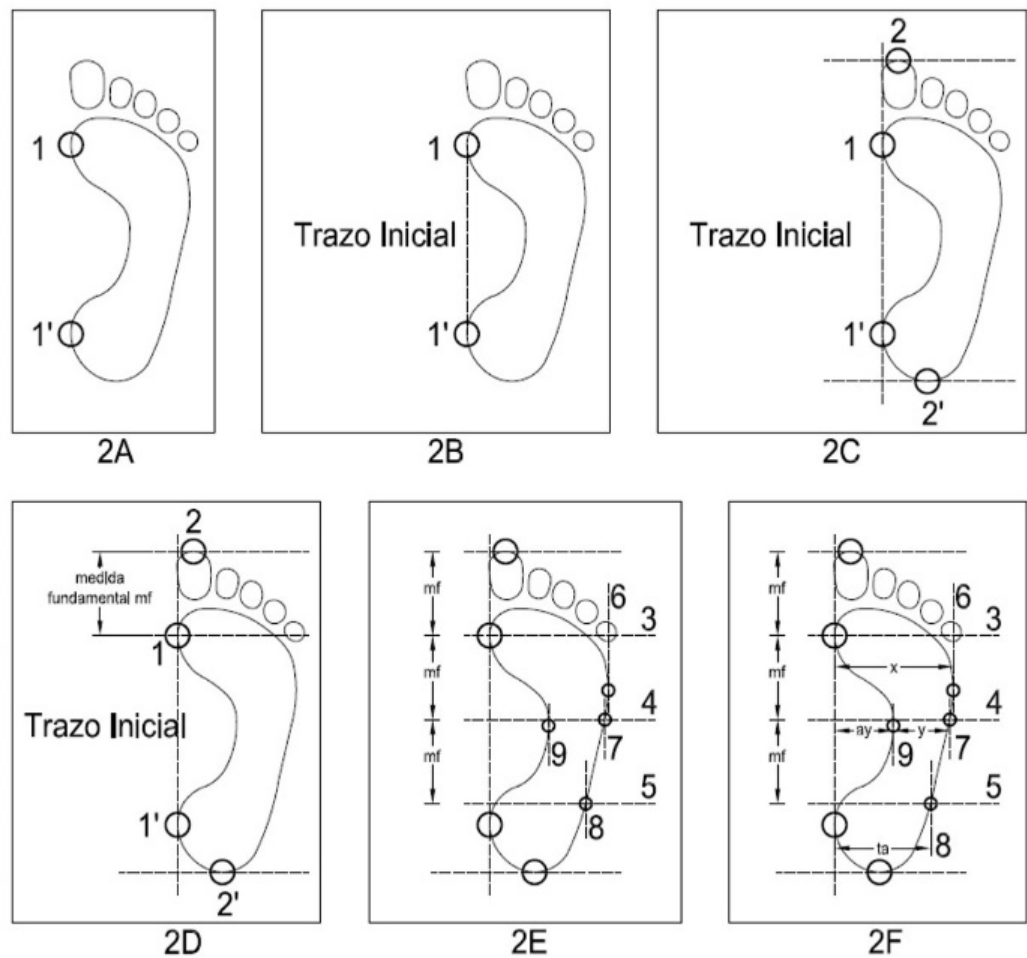


Figura 2: Protocolo de Hernández-Corvo [5]

La valoración del pie se da según el valor obtenido en la ecuación 1, el porcentaje se muestra en la tabla 1.

%X	TIPO DE PIE
0-34	Plano
35-39	Plano - Normal
40-54	Normal
55-59	Normal - Cavo
60-74	Cavo
75-84	Cavo fuerte
85-100	Cavo extremo

Tabla 1: Valoración del pie según el índice de Hernández-Corvo

Análisis y procesamiento de imágenes

Una imagen es un arreglo bidimensional de píxeles con diferente intensidad luminosa o escala de grises, entendiéndose píxel como el elemento básico de una imagen. Si la intensidad luminosa de cada píxel de una imagen se representa por n bits, existirán entonces 2^n tonalidades diferentes de grises.

Entonces, la «imagen monocromática» que hace referencia a una función de intensidad de luz bidimensional $f(x, y)$, donde x e y indican las coordenadas espaciales y el valor de f en cualquier punto (x, y) es proporcional a la luminosidad (o nivel de gris) de la imagen en dicho punto. Una imagen digital es una imagen (función) $f(x, y)$ que ha sido discretizada tanto en coordenadas espaciales como en luminosidad. Una imagen digital puede ser considerada como una matriz cuyos índices de renglón y columna identifican un punto (un lugar en el espacio bidimensional) en la imagen y el correspondiente valor de elemento de matriz identifica el nivel de gris en aquel punto, es decir, una imagen se puede describir como un arreglo matricial. El procesamiento digital de imágenes es el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información [20]–[22].

En el procesamiento de imágenes se utilizan técnicas cuyo objetivo fundamental es obtener, a partir de una imagen origen, otra final cuyo resultado sea más adecuado para una aplicación específica mejorando ciertas características de la misma que posibilite efectuar operaciones del procesado sobre ella. A estas técnicas se le denominan filtros para imágenes, los principales objetivos que se persiguen con la aplicación de filtros son:

- Suavizar la imagen: reducir la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
- Eliminar ruido: eliminar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos y cuyo origen puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen como en el de transmisión.
- Realzar bordes: destacar los bordes que se localizan en una imagen.
- Detectar bordes: detectar los píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.

Los filtros más utilizados son los de paso bajo (suavizan la imagen), de paso alto (aumentan el contraste), los filtros direccionales (detectan en la imagen estructuras que siguen una determinada dirección) y los de detección de bordes (permiten identificar y aislar objetos con propiedades homogéneas dentro de la imagen).

Métodos

La evaluación de la huella plantar a partir de imágenes es un proceso de tipo geométrico, se basa en el protocolo establecido por Hernández-Corvo. En primer lugar se realiza la toma de impresión de la huella plantar en una hoja. Posteriormente esta impresión se captura

en una imagen mediante una cámara web, se procesa y mediante una interfaz gráfica se entregan los resultados de los parámetros morfológicos de la huella plantar. La Figura 3 muestra el diagrama de bloques del sistema propuesto.

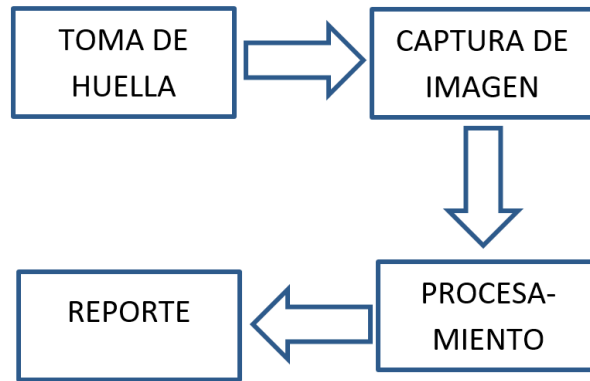


Figura 3: Diagrama de bloques para la determinación de parámetros morfológicos de la huella plantar

Toma de huella

Con tempera, tinta para sellos o en papel termográfico se marca la huella sobre un folio en blanco, procurando no arrastrar el pie y no arrugar el folio para que la huella sea lo más precisa posible. Esta imagen se procesará y arrojará como resultado el tipo de pie presentado por la persona. En la figura 4 se muestra un ejemplo de toma de huella.



Figura 4: Toma de huella realizada usando papel termográfico.

Captura y procesamiento de la imagen

Para la captura de la imagen de la huella se colocan dos marcas de color negro en un fondo blanco (marcas de posición) donde se ubica la hoja o plantilla que contiene la impresión de la huella, estas marcas sirven como referencia. La imagen capturada con la cámara debe quedar con la longitud del largo de la huella en forma vertical.

Con las marcas de posición se obtiene el factor de escalamiento, utilizado para calcular las longitudes largo y ancho del pie, también sirven para ubicar la imagen y que el procesamiento sea el adecuado, ver figura 5.

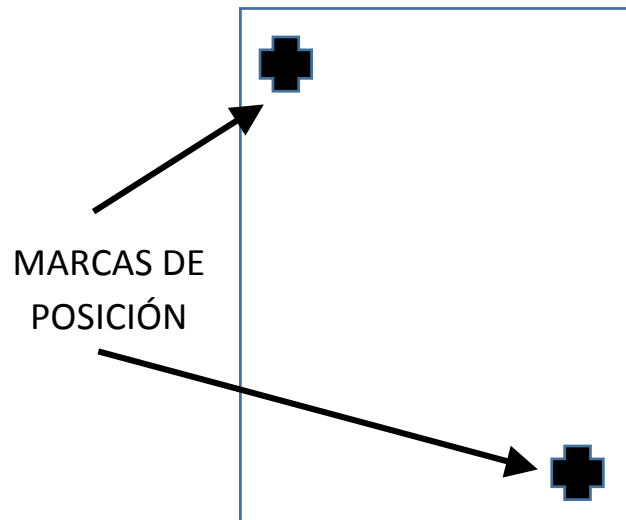


Figura 5: Marcas de posición para obtener el factor de escalamiento

La imagen se almacena como una matriz RGB de 640 x 480 píxeles. Con un proceso de umbralización fija se obtiene una imagen binarizada [20], [21], [23], [24]. Para eliminar ruido binario y suavizar el contorno, se aplica una apertura morfológica [20], [22]. Para la detección de borde se usa el operador Canny [20], [24]–[26], así se eliminan las marcas de posición y queda únicamente la huella plantar, la cual es almacenada en una nueva matriz.

En esta nueva matriz se realiza una búsqueda por columna para encontrar el primer valor no nulo y se almacenan los datos que presentan la primera variación, de esta forma se obtienen dos puntos horizontales que dan el valor del ancho del pie en píxeles. De la misma forma pero la búsqueda por fila, se obtienen las filas donde se presenta el cambio de valor (color) en alguno de sus píxeles, y con esto se obtiene una medida vertical en píxeles que corresponde al largo de la huella. Halladas las medidas en píxeles de largo y ancho se multiplican cada una por el factor de escalamiento y de esta manera se obtienen en milímetros las medidas de largo y ancho.

Con la información de la matriz se extrae la huella de la imagen en escala de grises para la detección de las zonas de presión plantar, figura 6. A esta nueva imagen se le aplica el protocolo de Hernández-Corvo, que se explica a continuación. Con base en la Figura 2 se puede deducir que los puntos corresponden a valores extremos del borde, entonces con el uso de técnicas de detección de borde de la zona de interés y de optimización se hallan los puntos extremos para así aplicar un algoritmo y determinar cada parámetro morfológico.



Figura 6: Imagen de la huella después del procesamiento

En primera instancia se revisa por columna y se hallan los puntos de menor valor que corresponden a 1 y 1' en las prominencias internas del antepié y del retropié, es decir los píxeles de los puntos límite de los metatarsianos y del talón medial. Con la revisión de píxeles por fila se halla el largo del pie y se pueden ubicar los puntos 2 y 2'. Luego se segmenta de acuerdo a la distribución de la presión plantar, en la figura 7 se muestran los diferentes segmentos. Con la segmentación de la figura se aplica la ecuación (1) y se obtiene el tipo de pie.

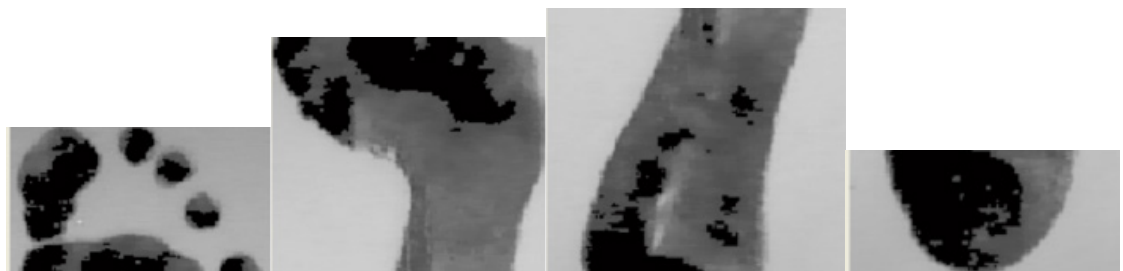


Figura 7: Segmentación de la huella del pie según el protocolo de Hernández-Corvo

Se diseñó y desarrollo una interfaz gráfica donde se realiza el procesamiento de la imagen para obtener los parámetros morfológicos de la huella plantar, al ejecutar el código se inicia la cámara, al accionar el botón de calcular parámetro se realiza la toma de la imagen y el procesamiento descrito. En la interfaz se muestra la imagen, el valor del largo y ancho del pie y el tipo de pie, ver figura 8.



Figura 8: Interfaz desarrollada para determinar el tipo de pie a partir de una impresión plantar

Resultados y discusión

Se obtuvo un sistema para calcular los parámetros antropométricos de la huella plantar, tales como largo y ancho e indicación del tipo de pie. Se realizaron pruebas para observar el funcionamiento, en la figura 9 se muestra la toma de huella y la obtención de esta en el papel.



Figura 9. Toma de la huella plantar

La captura de la imagen con las marcas de posición se muestra en la figura 10, allí se observa que la imagen está vertical y dentro de las marcas, esto para poder tener buena posición de la imagen y hacer que el tratamiento de esta sea el adecuado.



Figura 10: Captura de la imagen de la huella plantar con las marcas de posición

Se hicieron pruebas con diez sujetos, cinco hombres y cinco mujeres, la tabla 2 muestra la distribución del grupo. El grupo de validación del instrumento estuvo compuesto por sujetos con edades entre 9 y 50 años, sin alteraciones musculo-esqueléticas o neurológicas que impidieran la participación en el estudio.

N.º SUJETO	SEXO	EDAD
1	F	15
2	F	33
3	F	45
4	F	45
5	F	40
6	M	9
7	M	15
8	M	42
9	M	50
10	M	34

Tabla 2: Datos de los sujetos que participaron en la verificación del funcionamiento de la herramienta desarrollada.

Al realizar las pruebas de largo y ancho del pie se comprobó que el valor arrojado por el sistema es cercano al valor medido manualmente, presentando un porcentaje de error máximo de 3 %. La tabla 3 muestra la comparación entre los valores medidos en forma manual y los dados por el sistema de los sujetos que participaron en la verificación del sistema.

MEDICIÓN MANUAL (mm)		MEDICIÓN CON SISTEMA (mm)		ERROR (%)	
L	A	L	A	L	A
246	87	247.1	86.44	0.45	0.64
244	85	245.2	83.62	0.49	1.62
223	82	224.2	82.87	0.54	1.06
231	84	230.4	83.1	0.26	1.07
197	77	199.1	79.23	1.07	2.90
210	89	209.5	89	0.24	0.00
209	86	209	86.5	0.00	0.58
246	90	245	90.3	0.41	0.33
260	95	261	95.2	0.38	0.21
258	95	258.6	95	0.23	0.00

Tabla 3: Datos de las mediciones realizadas, se compara la medición manual con la del sistema propuesto y se muestra el error arrojado por el sistema

En cuanto al tipo de pie, se hicieron pruebas con el mismo grupo poblacional de diez sujetos. Cuatro de los sujetos presentan pie plano en alguno de sus pies, este dato está confirmado por un especialista médico. No se tienen sujetos con pie cavo dentro del grupo examinado. La tabla 4 muestra los resultados de las mediciones.

SUJETO	TIPO DE PIE DERECHO	TIPO DE PIE IZQUIERDO
1	Normal	Normal
2	Normal	Normal
3	Normal	Plano
4	Plano	Plano
5	Plano	Plano
6	Plano	Plano
7	Normal	Normal
8	Normal	Normal
9	Plano	Normal
10	Plano	Normal

Tabla 4: Datos de los sujetos que participaron en la verificación del funcionamiento de la herramienta desarrollada.

Para determinar el error al establecer el tipo de pie, a un mismo sujeto se le realizaron cinco veces el análisis de tipo de pie, en promedio se tuvo un error por sujeto, pero al calcular el error de todas las mediciones y de todos los sujetos se obtuvo un acierto del 94 % y por tanto error del 6 %.

Conclusiones

Se realizó el procesamiento de imágenes para medir y calcular el largo y ancho de la huella plantar, parámetros antropométricos esenciales para el análisis morfológico del pie. Adicionalmente, la herramienta desarrollada permite establecer el tipo de pie de una persona.

Los resultados obtenidos con la propuesta permiten afirmar que es posible realizar de forma objetiva el proceso de determinación de parámetros morfológicos de la huella plantar, haciendo uso de herramientas tecnológicas, en este caso de procesamiento de imágenes.

El sistema tiene un porcentaje de error del 3 % en los parámetros antropométricos del pie y del 6 % al detectar el tipo de pie, lo cual puede deberse a la posición de la cámara y la resolución de la misma.

Para el registro de la huella plantar se debe realizar con un papel adecuado, que permita obtener una huella nítida, factor esencial para el tratamiento de imágenes.

En el desarrollo se presentaron dificultades en la obtención del factor de escalamiento, debido a la distancia entre la imagen y la cámara, de allí que se optó por utilizar las marcas de posición, con estas, su posición y dimensión, fue posible tener un adecuado factor. Sin embargo, se debe tener un ángulo adecuado para la toma de las imágenes para que no se presenten distorsiones.

Las herramientas tecnológicas prestan un gran servicio a diferentes sectores, en este caso en el ámbito médico, ya que gracias a ellas se tienen sistemas objetivos de medición, como es el presentado en este desarrollo.

En el futuro, con esta base se desarrollará un sistema que permita determinar el tipo de pie según la huella plantar sin necesidad de registro, es decir, solo con procesamiento de imágenes. Así mismo se incluirán sujetos con pie tipo cavo.

Referencias

- [1] A. Martínez Assucena, J. Pradas Silvestre, M. D. Sánchez Ruiz, and M. F. Peydro de Moya, "Plantillas instrumentadas. Utilidad clínica", *Rehabilitación*, vol. 39, n.º 6, pp. 324-330, Jan. 2005.
- [2] N. Wierzeszen, "Análisis de la actividad muscular en posición bípeda y durante la marcha", Universidad del País Vasco, 2005.
- [3] R. G. Nielsen, M. S. Rathleff, C. M. Moelgaard, O. Simonsen, S. Kaalund, C. G. Olesen, F. B. Christensen, and U. G. Kersting, "Video Based Analysis of Dynamic Midfoot Function and its Relationship with Foot Posture Index scores" *Gait Posture*, vol. 31, n.º 1, pp. 126-130, 2010.
- [4] R. Ballesteros, M. Atin, P. Martín, S. Mnoz, and R. Valero, "Relationship between Clinical Measures and Podobarometrics in Evaluation of Pediatric Flat Foot", *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, vol. 57. Elsevier Masson SAS, pp. e128-e129, 2014.
- [5] S. L. Diéguez, A. Jesús, L. Sánchez, M. Luisa, Z. Sánchez, and E. J. Martínez-lópez, "Análisis de los diferentes métodos de evaluación de la huella plantar", *Retos. Nuevas Tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*, vol. 19, n.º figura 1, pp. 49-53, 2011.
- [6] C. Ferrin, X. Magdalena, and H. Loaiza, «Determinación semiautomática de parámetros morfológicos de la huella plantar mediante el procesamiento digital de imágenes», *Rev. Sist. Telemática*, vol. 11, pp. 9-26, 2013.

- [7] T. C. Pataky, "Spatial resolution in plantar pressure measurement revisited", *J. Biomech.*, vol. 45, pp. 2116-2124, 2012.
- [8] R. Viladot, O. Cohí, and S. Clavell, *Ortesis y prótesis del aparato locomotor*, Volume 2. Barcelona, Elsevier España: 1989.
- [9] M. Nordin and V. Frankel, *Biomecánica básica del sistema muscoesquelético*, 3rd ed. Madrid: McGraw-Hill, 2001.
- [10] J. L. McCrory, M. J. Young, a. J. M. Boulton, and P. R. Cavanagh, "Arch index as a predictor of arch height", *Foot*, vol. 7, pp. 79-81, 1997.
- [11] T. Y. Shiang, S. H. Lee, S. J. Lee, and W. C. Chu, "Evaluating Different Footprint Parameters as a Predictor of Arch Height", *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 17, n.º 6, pp. 62-6, Jan.
- [12] S. Bouisset and M. Do, "Posture , Dynamic Stability , and Voluntary Movement Posture, Stabilité Dynamique et Mouvement Volontaire", *Neurophysiol. Clin.*, vol. 38, pp. 345-362, 2008.
- [13] S. C. Vázquez, "Ánalysis de la marcha humana con plataformas dinamométricas. Influencia del transporte de carga", Universidad Complutense de Madrid, 2002.
- [14] M. R. Hawes, W. Nachbauer, D. Sovak, and B. M. Nigg, "Footprint Parameters as a Measure of Arch Height", *Foot Ankle Int.*, vol. 13, n.º 1, pp. 22-26, Jan. 1992.
- [15] W. C. Chu, S. H. Lee, W. Chu, T. J. Wang, and M. C. Lee, "The Use of Arch Index to Characterize Arch Height: a Digital Image Processing Approach", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 42, n.º 11, pp. 1088-93, Nov. 1995.
- [16] "Ortopedia" [Online]. Available: <http://3.bp.blogspot.com/-FociT3uPZDM/ThE0Y6HY7GI/AAAAAAAAAAo/ZZQ9G4Gkl14/s1600/TIPOS+DE+PIE.png>. [Accessed: 15-Dec-2015].
- [17] "Síntomas y tratamiento del pie cavo" [Online]. Available: <http://runningtherapycenter.com/sintomas-y-tratamiento-del-pie-cavo/>. [Accessed: 15-Dec-2015].
- [18] C. García, "Pie plano flexibe" 2012. [Online]. Available: www.traumatologiainfantil.com/es/pie/pies_planos. [Accessed: 15-Dec-2015].
- [19] R. Hernández Corvo, *Morfología funcional deportiva: sistema locomotor*. Madrid: Paidotribo, 1989.
- [20] L. A. Luengas, *Laboratorio virtual de destilación apoyado en un sistema de captura de movimiento*. Bogotá: UD, 2013.
- [21] R. Keys, "Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing" *IEEE Trans. Acoust.*, vol. 29, n.º 6, pp. 1153-1160, 1981.
- [22] W. K. Pratt, *Digital Image Processing: PIKS Inside*, vol. 5. 2001.
- [23] R. González and R. Woods, "Digital image processing", *Prentice Hall*, p. 190, 2002.
- [24] L. Luengas, G. Sánchez, and N. Vásquez, "Laboratorio virtual de química soportado en un dispositivo electrónico de interacción", *J. Syst. Cybern. Informatics*, pp. 30-36, 2009.
- [25] E. Nadernejad, S. Sharifzadeh, and H. Hassanpour, "Edge Detection Techniques: Evaluations and Comparisons", *Appl. Math.*, vol. 2, n.º 31, pp. 1507-1520, 2008.
- [26] C. Ridola and A. Palma, "Functional Anatomy and Imaging of the Foot", *Ital. J. Anat. Embryol.*, vol. 106, n.º 2, pp. 85-98, Jan.g