

Diseño de un sistema de adquisición de datos para el monitoreo del equilibrio del casco equino durante la locomoción

Design of a data acquisition system for monitoring equine hoof balance during locomotion

Cánepa, Paula Analía^{#1}, Chilo, Juan Manuel^{#2}, De Palma, Viviana Edith^{#3}

[#] *Catedra de Semiología. Departamento de Ciencias Preclínicas. Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad Nacional de La Plata, Argentina*

1 pcanepa@fcv.unlp.edu.ar

2 jchilo@fcv.unlp.edu.ar

3 vdepalma@fcv.unlp.edu.ar

Recibido: 27/03/24; Aceptado: 22/05/24

Resumen— El presente trabajo describe una solución de bajo costo basada en un sistema de adquisición de datos ad hoc, para el monitoreo del equilibrio del casco equino durante la locomoción con fines diagnósticos. El hardware integró un conjunto compuesto por un sensor MPU6050, un procesador ESP32, un módulo de lectura de tarjetas SD y una fuente de alimentación con su correspondiente módulo de carga. Además, se desarrolló una interfaz de aplicación para la interacción del usuario con el sistema y se presenta una solución para la representación de datos en entornos abiertos. Tras su implementación, los resultados demostraron que el sistema es eficiente al proporcionar un registro de datos en tiempo real de la mecánica de la marcha, de igual modo que la obtenida con dispositivos de mayor sofisticación.

Palabras clave: Equinos. Cinemática. Equilibrio del Casco. Sistema de adquisición de datos.

Abstract— This work describes a low-cost solution based on an ad hoc data acquisition system, for monitoring the balance of the equine hoof during locomotion. The hardware integrated an MPU6050 sensor, an ESP32 processor, an SD card reading module and a battery with its charging module. Also, a website was developed for interaction with the system and a solution for data analysis and representation in open environments is presented. After implementation, the results demonstrated that the system is efficient in providing a real-time data record of gait mechanics, in the same way as that obtained with more sophisticated devices.

Keywords: Equine. Kinematic. Hoof balance. Data acquisition system.

I. INTRODUCCIÓN

Los estudios cinemáticos actuales, requieren de instrumentos de medición sensibles, con bajo sesgo de subjetividad que permitan el registro y seguimiento de cambios dinámicos asociados a diversos factores tales como, superficie de pista, aire y sentido de la marcha, técnica de herrado impuesta, tipo de herradura aplicada, entre otros, con el objeto de reducir la prevalencia y los factores de riesgo asociados al desarrollo de lesiones musculoesqueléticas en equinos.

A nivel mundial, el avance de las tecnologías de detección, los sistemas integrados, las tecnologías de comunicación inalámbrica y las nanotecnologías, han creado un entorno favorable para el desarrollo de sistemas inteligentes que permitan monitorear diferentes eventos de la marcha equina facilitando de este modo la detección precoz de enfermedad. Sin embargo, dentro del ámbito regional, el diseño e implementación de tecnología portátil como metodología complementaria para la detección temprana de lesiones musculoesqueléticas en equinos, no ha mostrado el crecimiento esperado conforme al progreso global.

En este trabajo se explora el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos ad hoc, de bajo costo, mediante el empleo de tecnología y herramientas open source y de software libre para su uso potencial en la detección de anomalías en los patrones de la marcha equina. El propósito se centró en diseñar un sistema capaz de registrar variables que permitieran explorar el equilibrio dinámico del casco equino, antes y después de la aplicación de un protocolo de recorte y herrado de rutina a cargo de un herrador profesional.

Los análisis biomecánicos de este tipo permiten una mejor comprensión de la función de los cascos y una base racional y objetiva para comparar la eficacia de los protocolos de recorte y herrado instaurados, entendiéndose que un equilibrio deficiente de los cascos se asocia con una mayor predisposición al desarrollo de claudicación. El sistema se diseñó para registrar la magnitud de velocidad angular de rotación alrededor del eje dorsopalmar (eje x: balanceo), eje lateromedial (eje y: cabeceo), y eje vertical (eje z: guiñada) de los cascos a la marcha de siete equinos. Los datos proporcionados en bruto por el sensor fueron recopilados por el microcontrolador para procesarlos y analizarlos.

Una vez procesados, dado la capacidad de transmisión inalámbrica del dispositivo, la disponibilidad de los mismos se logró mediante el acceso a un sitio web diseñado para tal fin. A su vez, los datos fueron guardados y almacenados en una tarjeta SD permitiendo al usuario efectuar análisis prospectivos o retrospectivos de los datos adquiridos.

Los resultados obtenidos han demostrado que el sistema diseñado constituye una herramienta objetiva, sensible y

eficaz para monitorear del equilibrio vertical, longitudinal y lateral experimentado por los cascos antes y después de la intervención del herrador.

II. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

El hardware del sistema constó de una unidad de medición inercial MPU6050 como único componente de detección, con el objeto de obtener lecturas de salida en términos de aceleración y velocidad angular del casco de siete caballos adultos, durante la marcha al paso sobre una superficie de pista estandarizada; un procesador ESP32, para programar la lógica del desarrollo; un módulo de lectura de tarjeta SD y una fuente de alimentación con su correspondiente módulo de carga.

La programación de la lógica de adquisición, se realizó en el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino®, dado que, al constituir una plataforma de código abierto, se encuentran disponibles múltiples librerías de código reusable permitiendo establecer la comunicación I2C entre el sensor y la placa de desarrollo, codificar el intervalo de tiempo deseado para la obtención de lecturas de salida, efectuar tareas de inicialización, calibrado y filtrado de datos crudos, aplicar técnicas de fusión e integración de los mismos a partir de filtros digitales y, efectivizar la comunicación con los restantes componentes del hardware, estableciendo las vías para la transferencia y almacenamiento de los mismos.

Con el objeto de presentar la información de forma clara al usuario, se diseñó una interfaz de aplicación como vía de acceso para la interacción y monitoreo del sistema. Se utilizó el estándar inalámbrico IEEE 802.11 [1] para la comunicación entre el usuario y el software del sistema, dada la capacidad Wi-Fi integrada de la placa de desarrollo escogida. De este modo, el usuario fue capaz de acceder a la consola de mandos, realizar diferentes acciones tales como, inicializar o detener la grabación de datos, escoger la carpeta en que serán almacenados los mismos, definir el tiempo de grabación o de registro entre datos, reiniciar el sensor, verificar el porcentaje de batería restante del dispositivo y visualizar los datos al tiempo que éstos son adquiridos. A su vez, el empleo de una tarjeta SD permitió almacenar los datos del sensor para ser importados a una plataforma abierta de representación y análisis.

Previo a su implementación, siete caballos adultos fueron mantenidos dentro de un programa de medicina preventiva que además incluía un protocolo de recorte y herrado periódico (c/ 6 semanas) de sus cascos con herradura de hierro convencional, a cargo de un herrador experimentado. El protocolo experimental fue revisado y aprobado por el Comité de Uso y Cuidado de Animales de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad de la Plata.

Para efectuar la instrumentación de los mismos, el dispositivo se montó sobre una cincha la cual se le colocó a cada caballo y, el sensor se fijó a la línea media de la pared dorsal del casco de la extremidad a ser censada. La marcha se examinó de forma subjetiva por personal veterinario con el objeto de descartar la presencia de claudicación. Luego, los caballos fueron conducidos a una velocidad constante (1.35 m/s) durante 15 s, sobre una distancia de 25 m lineales de asfalto, antes y después de la intervención del herrador.

Por cada animal, se registraron un total de 618 a 644 datos/ medición, correspondientes a 8 - 9 ciclos locomotores. Las magnitudes de aceleración y de velocidad angular generadas a partir de la articulación interfalángica distal en función del tiempo, se almacenaron en archivos de texto para su importación a un software libre de representación.

Para simplificar cuestiones de software, se seleccionó la plataforma MegaLogViewer HD Lite 4.5.07® de EFI Analytics, dada su capacidad de admitir registros de datos en diversos formatos. Una vez importados los datos a la plataforma, se obtuvieron de forma inmediata valores medios, lecturas mínimas, máximas y valores delta de cada conjunto, permitiendo a su vez, la visualización de los mismos mediante gráficos de líneas, diagramas de dispersión e histogramas.

Luego, las magnitudes de velocidad angular de rotación media para el cabeceo, balanceo y guiñada registradas de los cascos antes y después de la intervención del herrador, se analizaron estadísticamente a los fines de determinar cambios significativos en el equilibrio vertical, longitudinal y lateral de los cascos y su correlación con la práctica instaurada por el herrador. Para ello, se seleccionó el software estadístico XLSTAT para Microsoft Excel®.

1) *Recolección de Datos*

Los indicadores cinemáticos se obtuvieron sobre cada eje ortogonal, tomando como punto de referencia la articulación interfalángica distal del miembro censado. La magnitud de aceleración en el plano sagital sobre el eje X, se consideró la distancia angular completa entre el movimiento de flexión (breakover point- retracción) y de dorsiflexión (protracción- contacto- apoyo propiamente dicho, apoyo medio) de la articulación interfalángica distal del pie. Los movimientos hacia abajo (área de la curva sinusoidal negativa) y hacia arriba (área de la curva sinusoidal positiva) en relación al plano horizontal registrados por el acelerómetro en el eje Y, representaron el inicio (retracción del miembro) y el final (protracción del miembro) de las fases de elevación y avance de cada zancada, respectivamente. Mientras sobre el eje Z, (movimientos laterales y mediales respecto al plano vertical) se estimaron durante la permanencia del pie en apoyo.

El giróscopo midió la velocidad angular de rotación del casco alrededor del eje dorsopalmar (eje x: balanceo), eje lateromedial (eje y: cabeceo), y eje vertical (eje z: guiñada). La duración relativa a cada periodo y fase del ciclo locomotor comprendió el séptimo indicador.

La escala de medición implementada para la cinemática angular, fue de intervalo, de acuerdo con el siguiente rango: grados de rotación por segundo [°/ s], la magnitud temporal fue establecida en milisegundos [ms] y, la magnitud de aceleración en [G]. Los datos obtenidos se almacenaron en archivos de texto de manera secuencial, registrando el valor de cada variable junto con el momento exacto de su medición.

2) *Representación de Datos*

Los datos en archivos de texto fueron importados a un software libre para su visualización.

El comportamiento de las magnitudes temporales se representó en [ms] como se muestra en la Tabla 1. Los resultados obtenidos han mostrado concordancia con los valores de oscilación total reportados en el año 2013 por Moorman et. al. [2].

Estructurar la información obtenida de este modo permitió examinar el sincronismo en tiempo y en espacio entre las fases de apoyo y de elevación de cada ciclo de la marcha del grupo instrumentado, aportando solidez a la valoración subjetiva previamente efectuada por personal veterinario.

Parámetro temporal	Promedio
valor medio apoyo [ms]	734
valor máximo [ms]	805
valor mínimo [ms]	637
valor medio elevación [ms]	735
valor máximo [ms]	806
valor mínimo [ms]	637
Ciclo locomotor [s]	1.47
valor máximo [s]	1.61
valor mínimo [s]	1.27

Tabla 1.- Magnitudes temporales obtenidas de la población en estudio.

Luego de verificar en la población bajo estudio, el sincronismo de su marcha, la velocidad angular de rotación media para el cabeceo, balanceo y guiñada del casco, se analizó mediante dos ensayos. El primer ensayo se realizó antes de efectuar el recorte y herrado del casco y, el segundo, inmediatamente después de efectuadas las prácticas de acondicionamiento. Esta valoración se realizó a los fines de determinar el grado de equilibrio vertical, longitudinal y lateral experimentado por el pie en apoyo, durante el transcurso ambos ensayos.

Morfológicamente, se considera que un pie se encuentra balanceado o en equilibrio, cuando el ángulo de la pared dorsal del casco es equivalente al ángulo del talón y al eje medio sagital de la segunda falange (eje cuartilla), manteniendo la misma altura a nivel de las caras medial y lateral del talón [3]. Desde la óptica del análisis cinemático, el equilibrio del casco se establece en base a los momentos generados alrededor de los tres ejes ortogonales del pie y, refiere tanto a la forma geométrica del mismo, como a la manera en la que éste y la extremidad, interactúan con la superficie de contacto [4], de modo de distribuir las cargas de manera uniforme.

Estudios anteriores han sugerido que la aplicación a los cascos de herraduras de hierro, tiende a provocar un aumento de la guiñada del casco en dirección lateral durante el apoyo de la marcha [3].

Medición	Velocidad angular	Magnitud media
Primer Ensayo	Giro z [°/s]	-0,28
	Giro x [°/s]	-1,00
	Giro y [°/s]	0,99
Segundo Ensayo	Giro z [°/s]	0,26
	Giro x [°/s]	-0,01
	Giro y [°/s]	2,09

Tabla 2.- Comportamiento medio de las magnitudes de velocidad angular registradas durante los apoyos de los ensayos realizados.

Como se representa en el segundo ensayo de la Tabla 2, las magnitudes medias para el balanceo y guiñada del casco registradas luego del recorte y herrado, fueron cercanas a 0 °/s, indicando el grado de estabilidad lateral y vertical lograda. La magnitud media rotacional registrada alrededor del eje Y fue positiva (2,09 °/s), explicando que, durante esta fase, el pie incrementó su inclinación hacia su aspecto más palmar, por ende, el acondicionamiento efectuado aumentó la superficie de contacto sobre dicha región.

Si bien, los resultados se muestran congruentes con las afirmaciones de Keegan et al. en 2006 [3], la magnitud media de inclinación registrada sobre el eje Y constituye el dato más relevante dado que, este hecho se considera favorable para la correcta distribución de las fuerzas biomecánicas generadas durante el movimiento [5], [6]. En este sentido, las prácticas de recorte y herrado han mostrado tener un efecto inmediato sobre el equilibrio y la estabilidad del casco durante la fase de apoyo [7].

En contraposición, las mediciones efectuadas previamente al recorte y herrado de los cascos reflejaron una disminución del contacto sobre la región palmar, dado que la magnitud media rotacional alrededor del eje Y registrada fue significativamente menor (0,99 °/s). La distribución de la carga durante el apoyo tendió a ocupar el aspecto medial del pie, registrando magnitudes rotacionales de -1,00 °/s alrededor del eje X y de -0.28 °/s, alrededor del eje Z, como se muestra en el primer ensayo de la Tabla 2.

La velocidad angular de rotación media para el cabeceo, balanceo y guiñada de los cascos antes y después de la intervención del herrador, se analizó estadísticamente a los fines de determinar cambios significativos en el grado de equilibrio vertical, longitudinal y lateral experimentado por los cascos y su asociación a la práctica instaurada. El nivel de significancia (*p*) se fijó en 0.05, con un intervalo de confianza del 95%.

En congruencia con los datos reportados por Keegan et al. en el año 2006 [3], el aumento de la guiñada y la disminución del balanceo del casco registrado luego de su recorte y herrado, fueron estadísticamente significativas en comparación con los valores previos al acondicionamiento del casco (*p*= 0.03). La correlación entre los eventos registrados y las practicas instauradas fue significativa (coeficiente de correlación de Pearson = 0.97).

III. CONCLUSIONES

Las técnicas basadas en el empleo de sensores inerciales han incrementado su popularidad como herramienta para la

evaluación objetiva de la locomoción en equinos [8]. Sin embargo, aún en la actualidad existen muy pocas compañías dedicadas a su fabricación y, acceder a los dispositivos comerciales junto al software de representación y licencia de uso asociada, implica para el usuario, un alto costo económico en términos de adquisición y mantenimiento.

En este trabajo se presentó el estudio y desarrollo de un sistema portátil ad hoc, de bajo costo económico y bajo consumo para ser implementado como herramienta complementaria a la práctica clínica equina. Los resultados obtenidos han demostrado un rendimiento prometedor para el uso de esta herramienta en relación con el papel de la Industria 4.0 (en términos de automatización en tecnologías de detección).

AGRADECIMIENTOS

Los autores deseamos agradecer a los ingenieros Marcos Gadze y Martín Rodolfo Chilo por la asistencia técnica recibida en el marco de este desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] E.Y. Song, K. Lee, S. Fick, M. Donmez. An IEEE 1451.5–802.11 standard-based wireless sensor network with embedded WTIM. 1-6. 10.1109/IMTC.2011.5944344. 2011.
- [2] V.J. Moorman, R.F. 2nd Reiser, M.L. Peterson, C.W. McIlwraith, C.E. Kawcak. Effect of forelimb lameness on hoof kinematics of horses at a walk. American journal of veterinary research, vol. 74 (9), pp.1192 - 1197. 2013.
- [3] K. Keegan, J. Satterley, M. Skubic, Y. Yonezawa, J. Cooley, D. Wilson, J. Kramer. Use of gyroscopic sensors for objective evaluation of trimming and shoeing to alter time between heel and toe lift-off at end of the stance phase in horses walking and trotting on a treadmill. American journal of veterinary research, vol. 66, p. 2046. 2006.
- [4] C. Johnston, C. Back. Interacción entre el casco y el suelo: cuando los estímulos biomecánicos desafían los tejidos de la extremidad distal. Equine veterinary journal, vol. 38, pp. 634 – 641. 2006.
- [5] O. Balch, D. Butler. Equilibrio y cojera de los cascos: longitud inadecuada de los dedos, ángulo del casco y equilibrio mediolateral. Practica Veterinaria, vol. 17, pp. 1275 – 1282. 1995.
- [6] B.T. Página, T.L. Hagen. Ruptura del casco y su efecto sobre las estructuras y fuerzas dentro del pie. Equine veterinary journal, vol. 22, pp. 258 – 264. 2002.
- [7] M. Moleman, M.C.V. Van Heel. El crecimiento del casco entre dos sesiones de herrado conduce a un aumento sustancial del momento alrededor de la articulación interfalángica distal, pero no de la proximal. Equine veterinary journal, vol. 38, pp. 170 – 174. 2006.
- [8] F.M. Serra Bragança, S. Bosch, J.P. Voskamp, M. Marin-Perianu, B. J. Van der Zwaag, J. C. M. Vernooij, M. C. V. Van Weeren, W. Back, W. Validation of distal limb mounted inertial measurement unit sensors for stride detection in Warmblood horses at walk and trot. Equine veterinary journal, vol. 49 (4), pp. 545 - 551. 2017.