

Validation of a Mechanical Model of the Active Scanning Process in the Rat Vibrissal System

Moritz Scharff^{2,3}, Facundo A. Lucianna¹, Alvaro G. Pizá¹, Ana L. Albarracín¹,
Jorge H. Alencastre Miranda³ and Fernando D. Farfán¹

¹Laboratorio de Investigación en Neurociencias y Tecnologías aplicadas (LINTEC), Departamento de Bioingeniería, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET), Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Investigaciones Biológicas, CONICET, Tucumán Argentina

²Technical Mechanics Group, Department of Mechanical Engineering, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany

³Section of Mechanical Engineering, Department of Engineering, Pontifical Catholic University of Peru, Lima, Peru
contact: jfarfan@herrera.unt.edu.ar

Abstract— The rat vibrissal system shows a sophisticated functionality in tactile discrimination, therefore it is analyzed in various works out of the perspective of neuroscience and bioengineering. The present work focuses on the vibrissal system of rodents during tactile exploration in terms of mechanics. In this way, a mechanical model of the natural vibrissa is designed in order to determine the forces and moments at the base while the modeled vibrissa contacts a rough surface. The results of the mechanical simulation are compared to electrophysiological measurements of the afferent activity from vibrissal nerve in consequence of a contact between the vibrissa and real surface. This comparison gives information about the principal relation between mechanical and neuronal signals and furthermore about the electromechanical properties of the system.

Keywords— Electrophysiological validation, biomimetics, vibrissal system.

Resumen— La sobresaliente capacidad de discriminación táctil del sistema vibrisal ha sido motivo de estudio en áreas de las neurociencias y bioingeniería. Este trabajo aborda los aspectos mecánicos de la exploración táctil efectuada a través del sistema vibrisal en roedores. Para ello se propone un modelo mecánico el cual permite predecir/determinar las fuerzas y momentos evocados en la base de la vibrisa durante el contacto activo con superficies rugosas. Asimismo, se realiza una validación electrofisiológica del modelo en base a registros de la actividad aferente del nervio vibrisal, evocados por el contacto activo. La estimación de estos parámetros mecánicos en el folículo vibrisal, no solo permite comprender los procesos que subyacen a la codificación neuronal, sino también aquellos relacionados a la transducción electromecánica del sistema.

Palabras clave— Validación electrofisiológica, biomimética, sistema vibrisal.

I. INTRODUCCIÓN

Las vibrisas son pelos especializados comúnmente implicados en la sensación táctil de algunos animales (especialmente roedores y algunos mamíferos). En particular, las vibrisas de la rata facilitan la exploración y reconocimiento del entorno que las rodea a través de movimientos periódicos hacia adelante y hacia atrás. Estos movimientos son evocados por la contracción voluntaria de pequeños músculos ubicados alrededor de los folículos vibrisales a una frecuencia aproximada de siete veces por segundo (Semba y Egger, 1986). Los estudios acerca de la codificación de la información táctil percibida a través de las vibrisas, proporcionan un importante avance del conocimiento en el área de las neurociencias. Por otro lado, diferentes áreas de la ingeniería también han aprovechado estos conocimientos para el diseño e implementación de nuevos desarrollos tecnológicos (biomimética) (Pearson et al, 2007; Evans et al, 2009; Pearson et al, 2010).

Comprender la manera en que las ratas utilizan sus bigotes para explorar el medio que les rodea, y cómo su cerebro procesa la información, permitiría el desarrollo de robots que imiten esta misma capacidad con diversos fines (Pearson et al, 2010). En experimentos conductuales se ha

demostrado que las ratas mueven sus vibrisas de manera rítmica acorde a la realización de diferentes tareas conductuales (conducta exploratoria, reconocimiento y/o discriminación de objetos y superficies) y que tales movimientos les permite acumular información de lo que les rodea (Fanselow y Nicholelis, 1999). A través de la innervación folicular, las vibrisas envían señales al cerebro relacionadas a la información táctil para luego ser procesada en zonas especializadas llamadas barriles (Woosley y Van der Loos, 1970).

Los folículos vibrisales, donde se asientan cada una de las vibrisas, son estructuras sumamente complejas en las cuales se origina la transducción táctil mecánico/eléctrico. Se especula que la complejidad y funcionalidad de cada folículo depende de la morfología de la vibrisa que soporta, y de su correspondiente disposición espacial en la almohadilla mistacial (Woosley y Van der Loos, 1970). Lo más destacable de estas estructuras es la gran variedad y cantidad de mecanorreceptores, lo cual permite suponer que más de una variable mecánica, resultado de la interacción entre el bigote y el entorno, son transducidas (Lucianna, 2017).

Actualmente, las matemáticas aplicadas, la física teórica y los nuevos métodos computacionales intentan modelar los complicados procesos neuronales de transducción y codificación que subyacen al tacto de las vibrisas con el entorno (Mitchinson et al, 2006; Evans et al, 2009). Estos modelos se basan en observaciones experimentales y son destinados principalmente al desarrollo tecnológico (por ej. robots y/o sensores táctiles). Las diversas aplicaciones de esta tecnología abarcan áreas tales como: la robótica aplicada a situaciones de desastres naturales (para la búsqueda y rescate), aplicaciones militares (por ej. detección de minas), aplicaciones submarinas, espaciales (exploración de superficies terrestres y extraterrestres) (Schultz et al, 2005; Pearson et al, 2007, www.biotact.org).

En este trabajo se propone un modelo mecánico del folículo vibrisal, el cual permite predecir las fuerzas y momentos que actúan sobre los mecanorreceptores durante diferentes protocolos de exploración táctil. La validación electrofisiológica del modelo es realizada a través del registro de las descargas aferentes del nervio vibrisal evocadas por el contacto activo (rozamiento) de una vibrisa con superficies rugosas (Albarracín et al, 2006). La posibilidad de inferir acerca de las fuerzas y momentos actuantes en el interior del folículo permitiría diseñar, biomiméticamente, un sensor unitario que sea parte elemental de un dispositivo de reconocimiento táctil de superficies (Farfán, 2011).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describen los procedimientos experimentales utilizados en la adquisición y procesamiento de las señales aferentes en el nervio vibrisal, el modelo mecánico propuesto y las simulaciones realizadas. Los registros obtenidos a través de la experimentación servirán para la validación electrofisiológica del modelo.

A. Procedimiento quirúrgico

En estos experimentos se usaron ratas Wistar adultas (300 gr – 350 gr). Estas fueron anestesiadas con uretano (130 mg/kg), manteniéndose su temperatura a 37° con una camilla térmica. Las ramas motoras fueron disecadas y seccionadas proximalmente. Luego, para evocar la contracción de los músculos mistaciales, y por consiguiente producir el movimiento artificial de las vibrisas, se colocaron electrodos de estimulación en sus muñones distales. Se identificó y disecó, a través de un microscopio, el nervio vibrisal profundo perteneciente a la innervación de un folículo vibrisal (vibrisa DELTA). Luego el nervio disecado fue seccionado, colocándose un electrodo bipolar para registrar la descarga aferente. Los electrodos de registros, como así también los nervios, fueron sumergidos en un baño de aceite mineral durante la adquisición de la actividad aferente. Todos estos procedimientos fueron llevados a cabo de acuerdo con las recomendaciones de la *Guide for the Care and Use of Laboratory Animals* (National Research Council, NRC).

B. Protocolo experimental

Los movimientos vibrisales (barridos) fueron inducidos por la estimulación eléctrica (pulsos de 30 μ s y 7V de amplitud, a 10 Hz) de las ramas motor del nervio facial. Las diferentes situaciones de rozamiento fueron establecidas enfrentando una superficie rugosa con la vibrisa DELTA, así los movimientos evocados (protracción, hacia adelante,

y retracción, hacia atrás) produjeron una situación de contacto activo. Se establecieron tres niveles de presión, presión 1, la punta de la vibrisa en contacto con la superficie de roce, conservando su curvatura intrínseca. Luego, los niveles de presión 2 y 3 fueron obtenidos acercando la superficie de roce 1 mm y 2 mm hacia la base de vibrisa, respectivamente. Las superficies rugosas fueron lijas de diferentes granulometrías, P1200, P1000 y P600. Cada situación experimental (un nivel de presión con una determinada superficie rugosa) consistió en 50 barridos, registrados en ventanas de 90 ms, y adquiridos a través de un *Digidata 1322A*, Axon Instruments (www.axon.com) a 20 kHz. La identificación de las fases de protracción y retracción de la vibrisa DELTA fue realizada con un sensor fotoresistivo diseñado y construido para tal (Durig et al, 2009).

C. Simulación

La vibrisa DELTA está modelada como un cilindro recto de 0.05 m de longitud y 185.4 μ m de diámetro (valores inspirados en el trabajo de Belli et al (2017)). Se asume un material de comportamiento elástico lineal y homogéneo, con módulo de Young igual a 3000 MPa, 1140 kg/m³ de densidad (Hartmann et al, 2003) y coeficiente de Poisson igual a 0.3.

La posición inicial de la vibrisa es establecida de manera que su base, origen de coordenadas, y el extremo distal forma un ángulo de 5° con respecto al eje y (línea roja Fig. 1). A partir de tal posición, se establece una deformación inicial, correspondiente al nivel de presión 1, que consiste en fijar una distancia η , y una fuerza de contacto en la dirección 'y' (línea verde Fig. 1).

El movimiento vibrisal (barrido) es determinado a partir de una rotación de 10° alrededor del eje z (protracción, línea morada, Fig. 1), y regresando luego a su posición inicial (retracción). Los movimientos y deformaciones de la vibrisa están limitados al plano x-y. Las fuerzas actuantes en la base de la vibrisa (folículo), F_x , F_y y M_z , son obtenidas a partir de la consideración de soporte fijo.

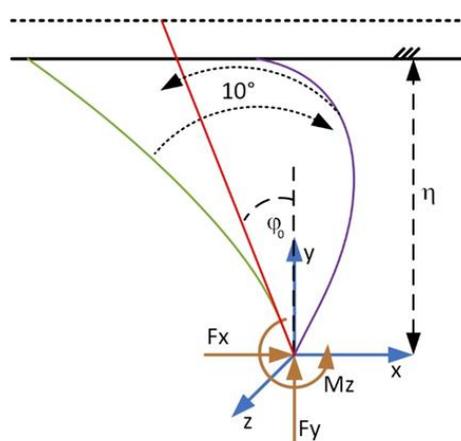


Fig. 1: Modelo de la vibrisa: línea roja – estado inicial; línea verde – estado de inicio; línea morada – estado de regreso; flechas marrones - fuerzas de soporte F_x , F_y , M_z ; η - distancia del soporte de la vibrisa hasta la superficie; φ_0 - pendiente inicial de la vibrisa.

Las simulaciones del proceso fueron implementadas y ejecutadas en ANSYS MECHANICAL v19.1. La vibrisa es modelada con elementos de viga (100 elementos) tipo BEAM188. El contacto entre la superficie y la vibrisa fueron establecidos de acuerdo con el modelo de fricción

Coulomb, y los elementos CONTA176 y TARGE170. El coeficiente de fricción dinámico fue fijado a 0.2, mientras que el estático en 0.22. La simulación incluye tanto efectos dinámicos como deformaciones grandes de la vibrisa.

III. RESULTADOS

A. Registros electrofisiológicos

En la Fig. 2A se observan los registros de actividad aferente durante las diferentes situaciones de rozamiento de la vibrisa DELTA. La actividad mayormente se concentra en el intervalo temporal de 0 a 40 ms, el cual es el tiempo que toma la vibrisa para realizar los movimientos de protracción y retracción. Por inspección, es posible notar que la amplitud de la descarga aumenta con el nivel de presión.

En la Fig. 2B se observan los valores RMS de las señales aferentes, los cuales fueron obtenidos a lo largo de toda la fase de barrido. En cada nivel de presión la amplitud de la señal aumenta con la rugosidad de la superficie, mientras que el efecto debido al incremento del nivel de presión, y para una misma superficie rugosa, también lo hace.

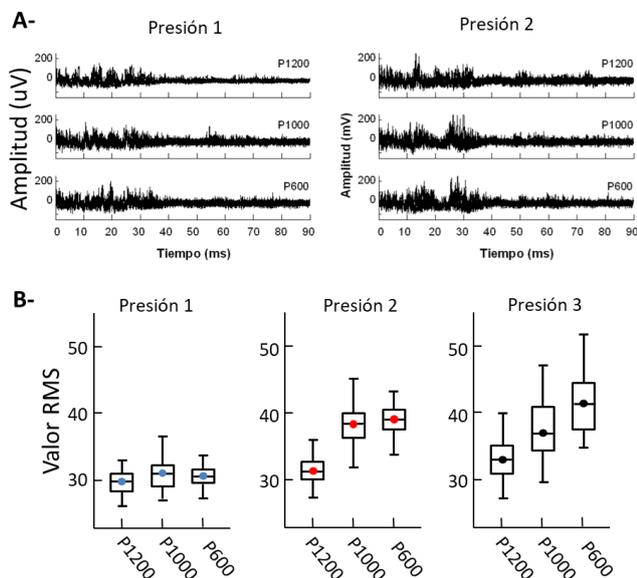


Fig. 2: (A) Registros de actividad aferente durante el rozamiento de la vibrisa DELTA sobre cada una de las lijas y bajo dos diferentes niveles de presión. Diez registros son mostrados para cada situación de rozamiento P1200, P1000 y P600. (B) Valores RMS obtenidos de cada uno de los 50 barridos vibrisales (protracción + retracción).

B. Resultados de la simulación

La Fig. 3 muestra los resultados de una simulación de rozamiento activo entre la vibrisa y una superficie dispuesta de acuerdo con tres niveles de presión. En todos los casos el coeficiente de fricción dinámico fue fijado a 0.2, mientras que el estático en 0.22. Los primeros 20 ms corresponden a la fase protracción, mientras que los subsiguientes 20 ms a la fase de retracción. La componente de fuerza en la dirección x, F_x , muestra diferencias cualitativas en la etapa final de la fase de retracción (intervalo de 35 a 40 ms), mientras que la fuerza en la dirección y, F_y , revela diferencias en el intervalo de 30 a 40 ms. El momento de fuerza es claramente menor para el nivel de presión 3, a lo largo de todo el barrido, debido a la distancia entre la base y el extremo de la vibrisa el cual varía para los diferentes niveles de presión.

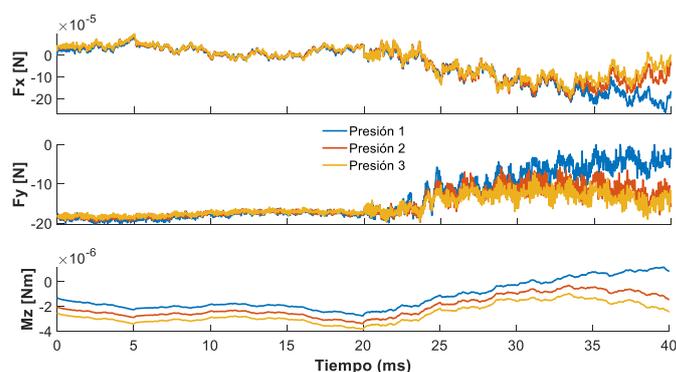


Fig. 3: Fuerzas (F_x y F_y) y momentos de fuerzas en la base de la vibrisa simulada para los tres diferentes niveles de presión: $\eta = 49$ mm (azul); $\eta = 48$ mm (rojo); $\eta = 47$ mm (amarillo).

Cualitativamente se observa una evidente diferencia entre los parámetros fuerza y momento, cuando estos son comparados entre las fases de protracción y retracción. Un análisis del contenido espectral de las F_x y F_y , realizado a través de la estimación de la densidad espectral de potencias (PSD), y el subsiguiente cálculo de la frecuencia mediana (f_{med}), revela que la f_{med} de F_x muestra una disminución con el nivel de presión. Siendo en gran medida debido a las perturbaciones de la fase de retracción (Fig. 4A, izquierda). Contrariamente, es posible observar una forma incremental de f_{med} con el nivel de presión, siendo este efecto ocasionado fundamentalmente en la fase de protracción (Fig. 4B, izquierda). Las variaciones en frecuencia en la serie de tiempo del momento de fuerza, M_z , revelan cambios en la f_{med} únicamente en la fase de retracción (Fig. 4C, izquierda).

En cuanto a la amplitud de las fuerzas a lo largo del tiempo se observa una forma incremental con el nivel de presión (principalmente dado en la fase de retracción) en la dirección x (Fig. 4A, derecha), mientras que en la dirección vertical se observa un efecto de disminución de la amplitud de la fuerza con el nivel de presión (Fig. 4B, derecha).

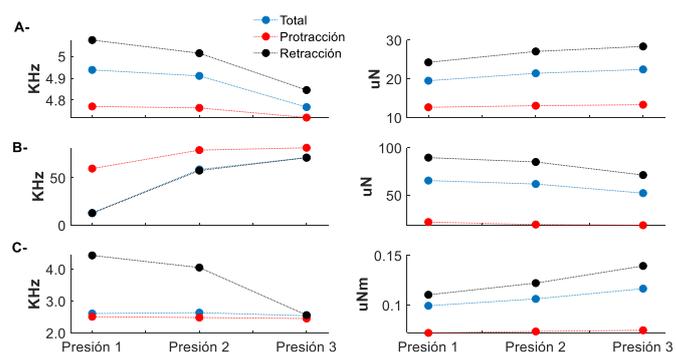


Fig. 4: Análisis de amplitud y frecuencia de los parámetros físicos obtenidos de la simulación. (A) f_{med} de las F_x a lo largo de todo el barrido (azul), protracción (rojo) y retracción (negro), para cada uno de los niveles de presión simulados. A la derecha se observan los valores de amplitud local (alrededor de la componente global) de las F_x obtenidas para cada nivel de presión. (B) Ídem para las F_y . (C) Ídem para los momentos de fuerza, M_z .

C. Actividad electrofisiológica vs simulación

Las gráficas mostradas en la Fig. 5 deben entenderse de la siguiente manera. Experimentalmente se observa que la amplitud de los registros aferentes tiene un efecto incremental con el nivel de presión. Similarmente se observa, en las simulaciones, que aumentando el nivel de

presión la F_x también incrementa su amplitud local. La Fig. 5 (izquierda) muestra la relación entre ambas variables. Más aún, la misma tendencia es observada para todas las superficies de rozamiento. Una tendencia similar es observada para los momentos de fuerzas (Fig. 5, derecha). Estos resultados revelan una relación aproximadamente lineal entre los datos experimentales y las simulaciones realizadas.

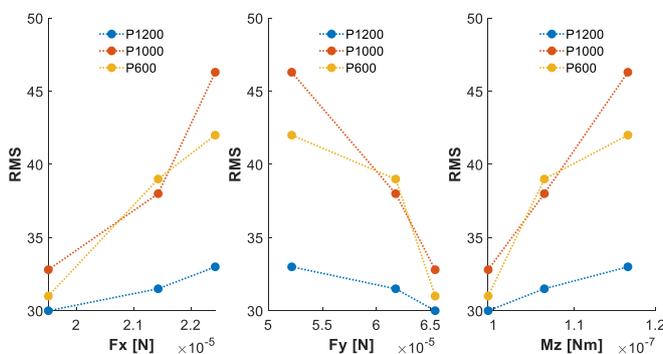


Fig. 5: Relación entre los parámetros calculados en la simulación (F_x , F_y y M_z) vs la amplitud de las señales aferentes (valor RMS promedio).

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan resultados preliminares correspondientes a: 1) simulaciones mecánicas de las fuerzas evocadas en el interior del folículo cuando las vibrisas rozan o palpan superficies rugosas, y 2) la validación electrofisiológica que intenta explicar los resultados obtenidos en las simulaciones.

Es importante resaltar que el análisis en frecuencia aplicado a las series temporales F_x , F_y y M_z , obtenidas en la simulación es de carácter global, debido a que en todo el ancho de banda de estas están incluidas, la frecuencia de barrido 25 Hz ($10^\circ/20ms$), las eigen-frecuencias, las frecuencias debido a eventos de atascamiento-desprendimiento que ocurren en el contacto (eventos *stick-slip*) y perturbaciones que surgen en consecuencia de la discretización de la viga y el tiempo. En cuanto a las eigen-frecuencias, las primeras tres están calculadas con un análisis modal, con valores de: 73.804 Hz; 239.25 Hz; 499.45 Hz.

Las frecuencias debido a los eventos de atascamiento-desprendimiento que ocurren en el contacto no pueden ser evaluados aisladamente debido a los elevados valores de aceleración, y por consiguiente, a los efectos de la inercia. En este sentido, puede observarse en la Fig. 6, que la posición de la punta de la vibrisa con respecto al eje x, mantiene una curva prácticamente sin perturbaciones significativas, para los tres niveles de presión. Tales perturbaciones, relacionadas a los eventos *stick-slip* son características que han sido demostradas experimentalmente por otros autores; sin embargo, en este estudio, tal efecto es despreciable o poco significativo. Una explicación a este controversial resultado puede basarse en que la velocidad del extremo distal del elemento simulado es tan alta que no permite el atascamiento con la superficie.

A pesar de esta observación, los resultados de este estudio ponen en evidencia la posibilidad de modelar el proceso de transducción táctil del sistema vibrisal con el modelo propuesto. Sin embargo, es importante resaltar que el modelo propuesto no tiene en cuenta la curvatura inherente de la vibrisa, su conicidad y la morfología de su

estructura interna. Más aún, y probablemente lo más importante, es el hecho de que el folículo es modelado como una estructura totalmente rígida.

Por otro lado, las fuerzas que se evocan en el interior del folículo sufren transformaciones específicas en el proceso de transducción, dado por los mecanorreceptores, los cuales no fueron tenidos en cuenta en este estudio. Este estudio simplemente muestra una relación cualitativa entre la actividad electrofisiológica y las fuerzas en el interior del folículo. Como trabajo futuro se pretende repetir los experimentos a velocidades más bajas con el fin de pronunciar los efectos de fricción y reduciendo los efectos de la inercia.

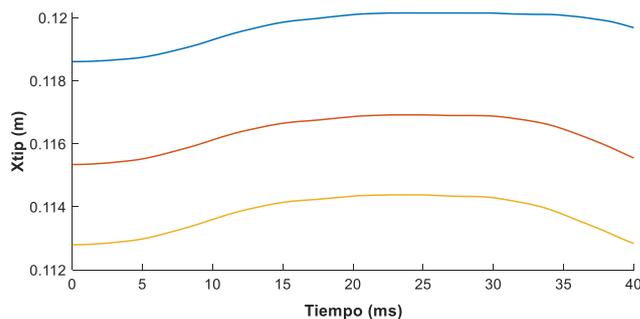


Fig. 6: La posición de la punta de la vibrisa con respecto al eje x está ilustrado por los tres niveles de distancia: $\eta = 49mm$ (azul); $\eta = 48mm$ (rojo); $\eta = 47mm$ (amarillo).

REFERENCIAS

- [1] Semba K, Egger MD (1986) The facial "motor" nerve of the rat: control of vibrissal movement and examination of motor and sensory components. *J Comp Neurol.* 247(2):144-58.
- [2] Fanselow EE, Nicolelis MA (1999) Behavioral modulation of tactile responses in the rat somatosensory system. *J Neurosci.* 19(17):7603-16.
- [3] Pearson MJ, Mitchinson B, Welsby J, Pipe T and Prescott TJ (2010), SCRATCHbot: Active tactile sensing in a whiskered mobile robot, In Proceedings SAB2010, LNAI 6226, pp.93-103, Paris, August 2010.
- [4] Evans M, Fox C, Pearson M and Prescott T (2009) Spectral Template Based Classification of Robotic Whisker Sensor Signals in a Floor Texture Discrimination Task. In: Proceedings of TAROS, Ulster September 2009. pp19-24.
- [5] Pearson M, Pipe A, Melhuish C, Mitchinson B, Prescott T (2007) Whiskerbot: A Robotic Active Touch System Modeled on The Rat Whisker Sensory System. *Journal of Adaptive Behavior.* 15(3), 223-240.
- [6] Van der Loos H (1976) Barreloids in mouse somatosensory thalamus. *Neurosci Lett* 2:1-6.
- [7] Lucianna FA (2018) Dispositivo biomimético multisensorial táctil para la exploración topográfica de superficies. Tesis Doctoral.
- [8] Mitchinson B, Pearson M, Melhuish C, Prescott T (2006) A Model of Sensorimotor Coordination in the Rat Whisker System. In: Proceedings of The International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (ISAB), Rome 25-29 September 2006.
- [9] Schultz AE, Solomon JH, Peshkin MA, Hartmann MJ (2005) Multifunctional whisker arrays for distance detection, terrain mapping, and object feature extraction. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Barcelona, Spain.*
- [10] Albarracín AL, Farfán FD, Felice CJ and Decima EE (2006) Texture discrimination and multi-unit recording in the rat vibrissal nerve. *BMC Neuroscience,* 7:42.
- [11] Farfán FD (2010) Dispositivo de reconocimiento táctil de superficies. Tesis Doctoral.
- [12] H.M. Belli, A.E.T. Yang, C.S. Bresee, and M.J.Z. Hartmann. Variations in vibrissal geometry across the rat mystacial pad: base diameter, medulla, and taper, 2017 *J. Neurophysiol.* 117: 1807-1820, doi:10.1152/jn.00054.2016
- [13] M.J.Z. Hartmann, N.J. Johnson, R.B. Towal, and C. Assad. Mechanical characteristics of rat vibrissae: resonant frequencies and damping in isolated whiskers and in the awake behaving animal,

2003 J. Neurosci. 23(16): 6510-6519, doi:
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-16-06510.2003>



Moritz Scharff es estudiante de doctorado de la Universidad Pontificia Universidad Católica del Perú en Lima y de la Technische Universität Ilmenau de Alemania. Su área de interés son los sensores táctiles, basados en la biomimética de las vibrisas de rata, para la detección y medición de propiedades morfológicas de superficies. Sus actividades académicas son realizadas con fondos de becas DAAD y Thüringer Graduiertenförderung.



Facundo A. Lucianna es Ingeniero Biomédico y Doctor en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente es docente en la Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia (UNT), y en la Universidad Tecnológica Nacional. Es becario posdoctoral CONICET e integrante/investigador del LINTEC. Sus áreas de interés son los sistemas embebidos, análisis numérico y bio-robótica.



Álvaro G. Pizá es Ingeniero Biomédico de la Universidad Nacional de Tucumán y Doctor en Ciencias Biológicas. Actualmente es becario posdoctoral CONICET, Docente en la carrera de Ingeniería Biomédica (UNT) e integrante/investigador del LINTEC. Sus áreas de interés son el procesamiento de señales biomédicas, rehabilitación, deporte y neurociencia computacional.



Ana L. Albarracín es Bióloga y Dra. en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de Tucumán. Docente en la Facultad de Medicina (UNT) e Investigador adjunto CONICET. Es integrante/investigador del LINTEC. Sus áreas de investigación son las neurociencias, electrofisiología animal y Parkinson.



Jorge Hernan Alencastre Miranda es doctor en ingeniería mecánica y fabricación de la Universidad Politécnica de Madrid y Profesor en la Universidad Pontificia Universidad Católica del Perú en Lima en la sección de ingeniería mecánica. Sus áreas de interés son la tela de araña al igual que la vibrisa de la rata. Aparte de los temas inspirados por la biología, trabaja en temas clásicos de ingeniería como vibraciones de máquinas.



Fernando D. Farfán es Ingeniero Electrónico, Magíster en Bioingeniería y Doctor en Ciencias Biológicas. Actualmente es Profesor Adjunto en la carrera de Ingeniería Biomédica (UNT) e Investigador adjunto en CONICET. Es director del LINTEC. Sus áreas de interés son las neurociencias, biomimética, biomecánica y el procesamiento de señales.