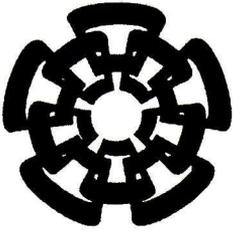




CT 780-SS1  
Don. 2014



Centro de Investigación y de Estudios Avanzados  
del Instituto Politécnico Nacional  
Unidad Guadalajara

# **Propiocepción Sintética para Entidades Virtuales Antropomorfas**

**CINVESTAV  
IPN  
ADQUISICION  
LIBROS**

Tesis que presenta:  
**Daniel Eduardo Madrigal Díaz**

para obtener el grado de:  
**Maestro en Ciencias**

en la especialidad de:  
**Ingeniería Eléctrica**

Director de Tesis  
**Dr. Félix Francisco Ramos Corchado**

CLASIF..	CT 00684
ADQUIS..	CT-180-SSI
FECHA:	22-07-2014
PROCED..	Don. - 2014
	\$ _____

10: 214218-2001

# **Propiocepción Sintética para Entidades Virtuales Antropomorfas**

**Tesis de Maestría en Ciencias  
Ingeniería Eléctrica**

Por:

**Daniel Eduardo Madrigal Díaz**

Ingeniero en Sistemas Computacionales

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora

2006-2011

Becario de CONACYT, expediente no. 263567

Director de Tesis

**Dr. Félix Francisco Ramos Corchado**

# Agradecimientos

A mi familia por su cariño y apoyo durante todo este tiempo.

A Andrea por ser esa persona que siempre me apoya en cada instante de mi vida.

A mis amigos Tonatiuh, Miguel, Rafael, Agustín y Alejandro por hacer mi estancia en el CINVESTAV una experiencia inolvidable.

A Gustavo por ayudarme a comprender el problema y por su compañerismo durante toda la investigación.

A mi asesor el Dr. Félix por permitirme ser parte del grupo de investigación y hacerme comprender que siempre existe una manera sencilla de realizar las cosas.

A CONACYT por el apoyo económico durante estos dos años, lo cual permitió realizar esta investigación.

# Índice de General

<b>Índice de General</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Glosario</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Definición del Problema . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	3
1.3. Objetivos de la Tesis . . . . .	4
1.3.1. Objetivo General . . . . .	4
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	4
1.4. Propuesta . . . . .	5
1.5. Organización del Documento . . . . .	6
<b>2. Sistema Propiocetivo Biológico</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción . . . . .	7
2.2. Mecanorreceptores . . . . .	8
2.2.1. Mecanorreceptores Cutáneos . . . . .	8
2.2.1.1. Disco de Merkel . . . . .	8
2.2.1.2. Corpúsculo de Meissner . . . . .	8
2.2.1.3. Corpúsculo de Pacini . . . . .	9
2.2.1.4. Terminales de Ruffini . . . . .	9

2.2.2.	Propioceptores	9
2.2.2.1.	Propioceptores Musculares	10
2.2.2.1.1.	Huso Muscular	10
2.2.2.1.2.	Órgano Tendinoso de Golgi	11
2.2.2.2.	Mecanorreceptores Articulares	11
2.2.2.2.1.	Receptor Articular de Tipo 1	11
2.2.2.2.2.	Receptor Articular de Tipo 2	12
2.2.2.2.3.	Receptor Articular de Tipo 3	12
2.2.2.2.4.	Receptor Articular de Tipo 4	12
2.2.3.	Conclusiones	13
2.3.	Vías de Comunicación	13
2.3.1.	Vía de Comunicación Columna Dorsal-Lemnisco Medial (Consciente)	14
2.3.2.	Vía de Comunicación Somatosensorial al Cerebelo (Inconsciente)	15
2.3.2.1.	Tracto Espinocerebeloso Posterior (Dorsal)	15
2.3.2.2.	Tracto Cuneocerebeloso	16
2.3.2.3.	Tracto Espinocerebeloso Anterior (Ventral)	16
2.3.2.4.	Tracto Espinocerebeloso Rostral	17
2.3.2.5.	Conclusiones	17
2.4.	Neuronas Motoras Inferiores	17
2.4.1.	$\alpha$ Neurona Motora	19
2.4.2.	$\gamma$ Neurona Motora	19
2.5.	Potenciales de Acción	20
2.5.1.	Conclusiones	21
<b>3.</b>	<b>Otras Aproximaciones al Sistema Propioceptivo</b>	<b>25</b>
3.1.	Introducción	25
3.2.	Arquitecturas Cognitivas	26
3.2.1.	iCub	26
3.2.2.	CLARION	27



5.3. Primer Caso de Estudio: Estudio de Mecanorreceptores	52
5.3.1. Mecanorreceptor de Adaptación Lenta: Disco de Merkel	53
5.3.2. Mecanorreceptor de Adaptación Rápida: Corpúsculo de Meissner	53
5.3.3. Conclusiones	54
5.4. Segundo Caso de Estudio: Movimiento de una Extremidad	54
5.4.1. Conclusiones	55
<b>6. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>61</b>
6.1. Conclusiones .	61
6.2. Trabajo Futuro	62
<b>A. Publicaciones</b>	<b>65</b>
<b>Referencias</b>	<b>99</b>

# Índice de Tablas

2.1. <b>Resumen Mecanorreceptores:</b> Características principales de los mecanorreceptores.	24
5.1. <b>Tabla de Resultados Mecanorreceptor de Adaptación Lenta:</b> Comparativa entre los resultados experimentales y los obtenidos del modelo	53
5.2. <b>Tabla de Resultados Mecanorreceptor de Adaptación Rápida:</b> Comparativa entre los resultados experimentales y los obtenidos del modelo	54



# Índice de Figuras

- 2.1. **Taxonomía de los mecanorreceptores:** Clasificación de los mecanorreceptores que participan en la propiocepción, esto en base a la información recopilada en este capítulo. 13
- 2.2. **Vías de Comunicación Propioceptiva:** Diagrama formado por las vías de comunicación utilizadas para el flujo de información propioceptiva en el sistema nervioso central. 18
- 2.3. **Hipótesis final de entrada común[26]:** Las  $\gamma$  neuronas motoras como unidades integradoras de información para el ajuste del huso muscular, a este proceso se le conoce como sistema fusimotor [45]. 20
- 2.4. **Etapas de un Potencial de Acción:** Este esquemático muestra de manera gráfica las etapas por las que pasa un potencial de acción. Del punto "A" al "B" se encuentra el periodo prepotencial, ya que el potencial de membrana aun no supera el umbral. Los puntos "B", "C" y "D" muestran un potencial de acción, lo cual corresponde a el periodo de depolarización. Como se puede ver en la figura del punto "B" al "C" el potencial de la neurona se hace más positivo para luego volverse negativo (del punto "C" al "D" ). Después de que se ha generado un spike, el potencial de la neurona queda cargado de manera negativa, esto ocurre del punto "E" al "F" durante este periodo la neurona no puede generar otro potencial de acción. Una vez concluidas estas etapas la neurona esta lista para generar un nuevo potencial de acción, es decir que este proceso vuelva a ocurrir. 22

- 3.1. **Arquitectura iCub:** Versión 0.4 de la arquitectura cognitiva de iCub 27
- 3.2. **Arquitectura CLARION:** Diagrama de la arquitectura cognitiva CLARION. 28
- 3.3. **Arquitectura Soar:** Diagrama de la arquitectura cognitiva Soar versión 9. 30
- 3.4. **Arquitectura del sistema de control por retroalimentación mé-  
dular** 31
- 3.5. **Huso Muscular McMahan:** Modelo de huso muscular propuesto por McMahan. 32
- 3.6. **Arquitectura para el agarre robótico táctil y propioceptivo.** 33
- 3.7. **Arquitectura de Control “Acciones concretas”:** Sistema de control utilizado para la ejecución de acciones utilizada por la arquitectura “agarre robótico táctil y propioceptivo” 34
- 3.8. **Modelo Matemático del Órgano Tendinoso de Golgi:** Modelo del huso muscular propuesto por Mileusnic et al.[43]. El modelo esta compuesto por tres modelos de fibras musculares, las de tipo “*Bolsa<sub>1</sub>*” “*Bolsa<sub>2</sub>*” y “*Cadena*” Este modelo produce dos aferencias y es capaz de funcionar sin la activación del sistema fusimotor. 36
- 3.9. **Modelo Matemática Modificado de McMahan:** Modelo propuesto por Mileusnic et al.[43] de las fibras musculares utilizado para recrear el comportamiento del huso muscular. Este modelo es una versión modificada del propuesto por McMahan 37
- 3.10. **Modelo Matemática del Órgano Tendinoso de Golgi:** Modelo propuesto por Mileusnic y Loeb.[42] de las fibras musculares utilizado en para recrear el comportamiento del huso muscular. Este modelo es una versión modificada del propuesto por McMahan 37
- 4.1. **Arquitectura del Sistema Propioceptivo Sintético para Entidades Virtuales:** Este modelo fue creado en base a los fundamentos encontrados en la literatura del área de neurociencias, fisiología y biología. 41

- 4.2. **Modelo de Mecanorreceptores Cutáneos:** Estos receptores sensoriales se encargan de informar la fuerza que se esta aplicando en la piel. 43
- 4.3. **Modelo del Huso Muscular:** El estímulo que evoca una respuesta de este sensor son las eferencias provenientes de las gamma neuronas motoras que inervan a las fibras musculares intrafusales y el estiramiento de la fibra muscular en la cual se encuentra. 45
- 4.4. **Modelo de Músculo:** El huso muscular que se localiza dentro del músculo es estimulado por los cambios de longitud de las fibras musculares que conforman al músculo. Para calcular la fuerza que el músculo aplica en el receptor se considera el cambio de longitud que este tiene.  $K_m$  es la constante de elasticidad del músculo,  $x_o$  es la longitud en reposo del músculo y  $x_a$  es longitud actual del músculo, medido en  $m$ . 46
- 4.5. **Modelo del Órgano Tendinoso Golgi:** Estos receptores sensoriales se encargan de informar la fuerza que el músculo esta generando durante la contracción muscular. 48
- 5.1. **Comparativa de Resultados Mecanorreceptor de Adaptación Lenta:** Gráficas que muestran los resultados experimentales y los obtenidos del modelo base para mecanorreceptores cutáneos. El receptor utilizado para la prueba es el disco de Merkel. 57
- 5.2. **Comparativa de Resultados Mecanorreceptor de Adaptación Rápida:** Gráficas que muestran los resultados experimentales y los obtenidos del modelo base para mecanorreceptores cutáneos. El receptor utilizado para la prueba es el corpúsculo de Meissner. 58
- 5.3. **Simulación de un Brazo Virtual:** Esta figura muestra el desarrollo de una simulación para la activación de los propioceptores. La imagen 5.3(a) nos muestra el estado inicial de la simulación. Las imagenes 5.3(b) y 5.3(c) muestran la evolución de la simulación. 59



# Glosario

**Aferencia:** Transmisión aferente.

**Antropomorfo:** Que tiene apariencia o forma humana.

**Arquitectura:** Diseño y especificación de un sistema.

**Arquitectura cognitiva:** Es un plano arquitectónico que especifica las estructuras necesarias para crear sistemas inteligentes.

**Astas dorsales:** Ensanchamiento de la sustancia gris de la médula espinal localizada en la parte dorsal.

**Astas ventrales:** Ensanchamiento de la sustancia gris de la médula espinal localizada en la parte ventral.

**Campo receptivo:** Es la región del espacio en la cual un receptor es capaz de percibir un estímulo.

**Cognición:** Es la facultad de procesar información, la cual es obtenida por medio de la percepción.

**Culling:** En gráficos tridimensionales, es el proceso de remover partes no visibles desde un punto de vista.

**Encoders:** Dispositivo usado para convertir una posición angular en un código digital.

**Entidad virtual:** Ser que está inmerso dentro de un ambiente virtual.

**Estímulo:** Acción que ocasiona la reacción o respuesta de un organismo.

**Extensión:** El aumento del ángulo entre dos huesos.

**Fibras extrafusales:** Son las fibras musculares localizadas fueran de la cápsula del huso muscular.

**Fibras intrafusales:** Fibras musculares localizadas dentro de la cápsula del huso muscular.

**Fisiología:** Es la ciencia que estudia las funciones de los seres orgánicos.

**Flexión:** El decremento del ángulo entre dos huesos.

**Función cognitiva:** Unidad de funcionamiento de la mente.

**Huso muscular:** Receptor sensorial localizado dentro las fibras intrafusales del músculo esquelético, es el encargado de reportar la longitud y velocidad del músculo.

**Ipsilateral:** Del latín ipse, mismo, y lotus, lado.

**Kuayolotl:** Es una arquitectura cognitiva creada para dotar a las criaturas virtuales las habilidades necesarias para exhibir comportamientos creíbles de manera autónoma.

**Mecanorreceptores:** Receptor sensorial especializado en reaccionar ante estímulos mecánicos.

**Médula espinal:** Masa localizada dentro de la columna vertebral, es la vía de comunicación encargada de enviar impulsos desde y hacia el cerebro.

**Modelo:** Representación esquemática de un sistema, el cual facilita la comprensión y estudio del mismo.

**Músclo esquelético:** Tejido que se encuentra en la mayoría de los animales. El movimiento de la estructura osea es generado por medio de la contracción de este tipo de músculo.

**Neurociencias:** Es la ciencia encargada del estudio del sistema nervioso, los componentes que lo conforman y las funciones que realizan.

**Neurona:** Son un tipo de células del sistema nervioso central.

**Neurona motora:** Neurona encargada de hacer sinapsis con las fibras musculares. De esta manera se puede controlar el movimiento muscular.

**Nocicepción:** Es la detección de estímulos nocivos y potencialmente dañinos.

**Organo tendinoso de Golgi:** Receptor sensorial encontrado entre la unión de músculo y tendón, su función es la de reportar la fuerza aplicada en los músculos.

**Percepción:** Es la identificación, interpretación y organización de la información sensorial con el propósito de representar y entender el ambiente.

**Propiocepción:** Proceso de aporte de información al sistema nervioso central respecto a la posición y el movimiento.

**Propioceptores:** Grupo de receptores sensoriales formado por los mecanorreceptores articulares, el órgano tendinoso de Golgi y los huso musculares.

**Receptores articulares:** Receptores sensoriales localizados en las articulaciones y en los ligamentos circundantes.

**Receptor sensorial:** Terminaciones nerviosas especializadas en la recepción de estímulos.

**Sistema motor:** Parte del sistema nervioso central que esta encargado de la realización de movimientos.

**Sistema nervioso central:** Parte del sistema nervioso que se encarga de integrar la información que recibe, con el propósito de regular y coordinar las diferentes partes del cuerpo.

**Spikes:** Pulso eléctrico utilizado en la comunicación entre tejidos.

# Resumen

En la actualidad, el interés y la necesidad por tener entidades virtuales que exhiban comportamientos similares a los de los humanos se ha incrementado de manera considerable, ya que las aplicaciones que estas entidades pudieran tener son vastas e interesantes. Un claro ejemplo en el que las entidades virtuales pueden ser de mucha utilidad, es el contestar preguntas del tipo: ¿Cómo sería la vida si . . . ?, ¿Cómo reaccionarían un grupo de personas ante determinada situación?. Por medio de simulaciones y con la ayuda de las entidades virtuales inteligentes podríamos obtener algunas respuestas a estas interrogantes.

Para lograr que las entidades virtuales puedan comportarse de manera similar a los humanos es necesario dotarlas con ciertas habilidades cognitivas como: La percepción, atención, planeación, memoria, toma de decisiones, emociones. Estas habilidades nos permiten percibir el mundo y aprender de el, pero esa capacidad estaría limitada a menos que pudiéramos realizar acciones para interactuar con nuestro ambiente. Para resolver ese problema, los seres vivos cuentan con el sistema motor, el cual, es el encargado de controlar, planear y ejecutar los movimientos. Pero, uno de los mayores requerimientos del sistema motor para realizar sus tareas, son mecanismos que le permitan saber la posición del cuerpo y si se esta ejecutando un movimiento o no. Específicamente hablando, uno de esos mecanismos es el sistema propioceptivo, el cual, es el encargado de proporcionar toda la información aferente que proviene de la área interna periférica del cuerpo, que participa en el control de la postura, en la estabilidad articular y en otras sensaciones consientes.

En este trabajo se propone un modelo computacional del sistema propioceptivo basado en evidencias fisiológicas y neurocientíficas.



# Abstract

Nowadays, the interest and the need to have virtual entities that exhibit behaviors similar to those of humans, has increased significantly since the applications that these entities may have are vast and interesting. A clear example in which virtual entities can be very useful, is to answer questions like: How would life be if ...?, How a group of people would react to certain situation?. Through simulations and with the help of intelligent virtual entities we could get some answers to these questions.

In order to make virtual entities that can behave similarly to humans, it is necessary provide them with certain cognitive abilities such as: perception, attention, planning, memory, decision making, emotions. These skills allow us to perceive the world and learn from it, but that capacity would be limited unless we had a way to interact with our environment. To solve that problem, living beings have the motor system, which is responsible for controlling, planning and executing movements. But, one of the major requirements of the motor system to perform their tasks, are mechanisms that allow to know him the position of the body and if a movement is executing or not. Specifically speaking, one of these mechanism is the proprioceptive system, which is responsible for providing all afferent information that comes from the internal peripheral areas of the body, that is involved in the control of posture, joint stability and other conscious sensations.

In this work, we propose a computational model of proprioceptive system, which is based in the physiological and neuroscientific evidence.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Definición del Problema

Esta investigación forma parte de *Kuayolotl*<sup>1</sup>, arquitectura cognitiva que tiene como objetivo el lograr que una entidad virtual exhiba comportamientos similares a los de los humanos. En otras palabras se busca crear entidades autónomas que ante un estímulo estas reaccionen de manera similar a como reaccionaría un humano bajo el mismo estímulo.

La idea de crear seres con capacidades similares a los humanos ha estado presente en la mayoría de las personas y hoy en día hay mucho interés en lograrlo por medio de entidades virtuales [40]. En la actualidad la mayoría de estos seres tienen rutinas automáticas o comportamientos predefinidos para actuar dependiendo a determinada situación[48].

Para que una entidad virtual pueda tener comportamientos “*más humanos*”, esta necesita contar con mecanismos y habilidades que le permitan percibir e interactuar con su ambiente. Estos mecanismos y habilidades junto con las motivaciones propias crean los comportamientos que la entidad virtual realizara para cumplir con su cometido. Algunos de los mecanismos que son necesarios para lograr una autonomía en el comportamiento de las criaturas virtuales son:

---

<sup>1</sup>Arquitectura cognitiva para criaturas virtuales, [http://www.gdl.cinvestav.mx/proyectos/arquitectura\\_cognitiva\\_para\\_criaturas\\_virtuales](http://www.gdl.cinvestav.mx/proyectos/arquitectura_cognitiva_para_criaturas_virtuales).

- Percepción de su ambiente.
  
- Memoria.
  
- Propiocepción.

Planificación.

- Toma de decisiones.

Sistema motor.

Para poder interaccionar con su ambiente, la criatura virtual debe de ser capaz de ejecutar movimientos corporales, esto con el fin de realizar tareas o acciones que le permitan modificar su ambiente o desplazarse por el. En la naturaleza la mayoría de los seres vivos son capaces de realizar diferentes actividades motoras, pero para poder lograr dicha ejecución es necesario tener retroalimentación de forma precisa y oportuna de los sistemas sensoriales que participan en el sistema motor [29]. Particularmente hablando, uno de los sistemas sensoriales que mayor participación tienen para la corrección de movimientos y aprendizajes de los mismos, es el sistema propioceptivo. Dicho sistema es el encargado de proporcionar la información aferente que surge de las áreas periféricas internas del cuerpo y que contribuye en el control de la postura, la estabilidad articular y en otras sensaciones conscientes, como el saber que nuestras extremidades están en movimiento.

El sistema propioceptivo ha sido modelado e implementado por diferentes disciplinas tales como: la robótica y biomecánica. Estos modelos no consideran toda la información necesaria para el ajuste del sistema propioceptivo y por otro lado ninguno a sido implementado en una entidad virtual antropomorfa.

Entonces considerando lo anterior, si queremos crear entidades que puedan interaccionar con ambientes virtuales complejos, como lo pueden ser los mundos tridimensionales, es necesario recrear los sistemas sensoriales que participan en la ejecución motora, específicamente hablando la propiocepción.

## 1.2. Motivación

Crear entidades que puedan tener habilidades cognitivas similares a las de los humanos es la motivación principal del desarrollo de esta tesis. Ya que la aplicación y uso que estas entidades virtuales pudieran tener son bastantes y de gran interés, por decir algunas:

**Videojuegos:** Personajes que puedan sentir, expresar y actuar de acuerdo a la situación actual le daría a los videojuegos un mayor grado de realismo. Esto ayudaría a mejorar la experiencia y el grado de inmersión de los videojugadores.

**Simuladores de siniestros:** ¿Cuál sería el comportamiento de las personas ante un siniestro en una edificio de 30 pisos?, la respuesta no es obvia ya que cada persona tiene su propia forma de ser y actuar. Si se tuviera información al respecto de la forma de actuar de las personas se podrían realizar estrategias de contingencia tales como: contar con medidas de seguridad específicas del edificio, entre otras. Utilizar humanos para la experimentación podría ser no muy bien visto además de riesgoso, por lo tanto las entidades virtuales podrían ser utilizadas para sustituir a los humanos en escenarios donde la experimentación con seres vivos no sea una opción.

**Interfaz Hombre-Maquina:** Se podrían crear nuevas maneras de comunicarnos con las maquinas por ejemplo, criaturas virtuales con habilidades similares a la de los humanos podrían permitirnos interactuar con la maquina de tal manera que pareciera que estuviéramos interactuando con otro ser humano. Algunos ejemplos de aplicaciones son: guias de turismo virtuales, asesores ejecutivos, profesores virtuales, entre otros.

Aunque el modelo propioceptivo forma una pequeña parte de todas las funciones necesarias para poder lograr los ejemplos antes mencionados, es necesaria e igual de importante que otras funciones cognitivas, ya que la propiocepción es de vital importancia en tareas tales como: el reconocimiento de objetos, en el mantenimiento de la postura y en la realización de movimientos.

## 1.3. Objetivos de la Tesis

Los objetivos generales y específicos de la tesis son descritos en esta sección del documento.

### 1.3.1. Objetivo General

Conceptualizar, modelar, implementar e integrar un modelo computacional del sistema propioceptivo inspirado en las evidencias y resultados aportados por la biología, fisiología y neurociencia.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Conocer los componentes que integran al sistema propioceptivo biológico, su funcionamiento y la relación que tienen con otros componentes.
- Identificar las funciones específicas de cada uno de los componentes del sistema.
- Realizar una representación gráfica del sistema propioceptivo(arquitectura), esto para explicar el como la propiocepción surge por medio del comportamiento de cada uno de los componentes que integran al sistema.

Utilizar o proponer algoritmos que realicen las funcionalidad de los componentes del sistema.

Codificar en un lenguaje de programación los algoritmos.

- Validación del modelo utilizando dos casos de estudio.
- Incorporar el modelo del sistema propioceptivo a la arquitectura cognitiva *Kuayalotl*.

## 1.4. Propuesta

Se desarrolló un modelo computacional, en donde cada modulo que integra al sistema representa un componente o estructura del sistema nervioso central, el cual participa en la propiocepción de los seres vivos, esto según las evidencias fisiológicas, biológicas y neurocientíficas.

Esta propuesta cuenta con dos características que valen la pena destacar. La primera es el hecho de que la comunicación entre los componentes es realizada por medio del envío de frecuencia de potenciales de acción. Esto con el fin de que los componentes del sistema se comportaran de manera similares a las de su contraparte biológica. Como segunda característica es la modularidad del sistema, lo que permite la implementación de diferentes modelos para una misma estructura, siempre y cuando tengan el mismo comportamiento. Por lo tanto los modelos propuestos por otras disciplinas pueden sustituir a los propuestos y viceversa.

Este modelo contempla las siguientes características:

**Receptores sensoriales:** Se propusieron modelos que transducen un estímulo mecánico en potenciales de acción. Se crearon modelos para los siguientes receptores:

- Mecanoreceptores cutáneos.
- Mecanoreceptores articulares.
- Propioceptores.

**Vías de comunicación:** Se deja especificado a que estructuras del sistema nervioso central llega la información propioceptiva.

**Neuronas motoras inferiores:** La propiocepción recibe un ajuste de las neuronas motoras inferiores, las cuales están localizadas en la médula espina. Las neuronas motoras consideradas son:

- α Neuronas motoras.
- γ Neuronas motoras.

La implementación de este modelo se realizó en un sistema distribuido, esto por la necesidad de ejecutar cada modulo por separado y aprovechar otros equipos de computo para el procesamiento del sistema. Además este tipo de enfoque nos permite el trabajo en paralelo de cada uno de los módulos, tal y como sucede en los seres vivos.

## 1.5. Organización del Documento

La organización del presente documento es la siguiente:

**Capítulo 2:** En este apartado se describe el sistema propioceptivo, sus componentes y funciones.

**Capítulo 3:** En este capítulo se encuentra una descripción de algunas de las arquitecturas cognitivas y se muestran trabajos en los cuales se hace uso de un sistema de propiocepción.

- **Capítulo 4:** Capítulo dedicado a la descripción del modelo propuesto.
- **Capítulo 5:** En esta sección del documento se describen las herramientas que fueron utilizadas para la implementación, los casos de estudios utilizados para la validación y los resultados obtenidos del modelo.
- **Capítulo 6:** Sección que finaliza el documento con las conclusiones generadas durante el desarrollo de la investigación. Por último se mencionan trabajos que no fueron objetivo de esta investigación y los cuales serían de mucho interés para mejorar y extender el modelo del sistema propioceptivo.

# Capítulo 2

## Sistema Propioceptivo Biológico

### 2.1. Introducción

La propiocepción es el proceso de aporte de información al sistema nervioso central respecto a la posición y el movimiento [8]. El sistema propioceptivo tiene como fuente de información principal a los mecanorreceptores localizados en el músculo, los tendones, ligamentos y en las cápsulas articulares; y como fuente suplementaria cuenta con los mecanorreceptores localizados en la piel [49].

Esta sección del documento sintetiza la información acerca del sistema propioceptivo encontrada en la literatura, la cual fue utilizada para proponer el modelo computacional. Este capítulo se encuentra organizado de la siguiente manera:

**2.2 Mecanorreceptores:** En esta parte se describe el funcionamiento de los receptores sensoriales que son utilizados por el sistema propioceptivo.

**2.3 Vías de Comunicación:** En esta sección se describe los componentes y las vías de comunicación por las que fluye la información propioceptiva.

**2.4 Neuronas Motoras Inferiores:** Estas neuronas son las encargadas de realizar la contracción en los músculos esqueléticos y tienen un papel importante en el ajuste de los husos musculares.

## 2.2. Mecanorreceptores

Los mecanorreceptores son células especializadas en la detección de estímulos mecánicos [14, 60]. Estos receptores sensoriales desempeñan un papel primordial en la propiocepción, ya que su activación proporciona información acerca de la postura y movimiento al sistema nervioso central. Por este motivo en esta sección se explican las características más relevantes de estos receptores sensoriales.

### 2.2.1. Mecanorreceptores Cutáneos

Son los receptores sensoriales encargados de proporcionar el sentido del tacto [15], además varios experimentos [11] han demostrado que estos receptores sensoriales participan en la propiocepción y en el ajuste de la sensibilidad de los husos musculares. En la piel glabra de los seres humanos se han encontrado cuatro diferentes tipos de receptores [14, 27]:

#### 2.2.1.1. Disco de Merkel

Los discos de Merkel [14, 27] son mecanorreceptores de adaptación lenta. Su estímulo es la presión sobre la piel y son los encargados de distinguir las texturas. Estos mecanorreceptores son muy sensibles a los bordes, filos y puntos. Producen la aferencia:

**Aferencia de Tipo SA1** Informa la cantidad de presión aplicada sobre la piel.

#### 2.2.1.2. Corpúsculo de Meissner

Los corpúsculos de Meissners [14, 27] son receptores de adaptación rápida. Su estímulo es la presión sobre la piel, pero por ser de adaptación rápida solo pueden informar el contacto inicial que tienen los diferentes objetos sobre la piel [47]. La aferencia que producen es:

**Aferencia de Tipo RA1** Informa el contacto de los objetos sobre la piel glabra.

Una de sus funciones principales es la detección de las fuerzas y resbalones que ocurren cuando se está manipulando un objeto con la mano [27] y probablemente informan acerca de la dirección y velocidad de los objetos que se mueven en la piel [6].

### 2.2.1.3. Corpúsculo de Pacini

Los corpúsculos de Pacini [14, 27] son receptores cutáneos de adaptación rápida. El estímulo que ocasiona la respuesta de este receptor son las vibraciones a altas frecuencias y responden al movimiento en el rango de nanómetros. La aferencia que producen es:

**Aferencia de Tipo RA2** Informa las vibraciones que ocurren en la piel glabra.

Por la capacidad que tienen estos receptores para sentir las altas frecuencias, son útiles para informar de los eventos que ocurren en los objetos que se tienen sostenidos en la mano [27].

### 2.2.1.4. Terminales de Ruffini

Las terminales de Ruffini [14, 27] son receptores cutáneos de adaptación lenta. Son sensibles al estiramiento. La aferencia que producen es:

**Aferencia de Tipo SA2** Informa el estiramiento de la piel.

Son útiles para el reconocimiento de objetos grandes que son sostenidos en la mano y para saber si los dedos y otras articulaciones que estiren la piel están en movimiento [14].

## 2.2.2. Propioceptores

Los propioceptores son los receptores sensoriales mecánicos encargados de responder a los estímulos que son producidos dentro del organismo [13]. La información generada por estos receptores son utilizados principalmente para regular la integridad del cuerpo, mantener una postura y realización de movimientos precisos. Podemos clasificar los propioceptores en dos grupos: uno con los receptores sensoriales localizados en los músculos y su unión con los tendones y el otro grupo formado por los receptores que están localizados en las articulaciones y ligamentos circundantes a estas.

### 2.2.2.1. Propioceptores Musculares

Como su nombre lo indican son los receptores sensoriales mecánicos que se encuentran en los músculos y en la unión que estos tienen con el tendón, existen dos receptores de este tipo: Los husos musculares y los órganos tendinosos de Golgi.

#### 2.2.2.1.1 Huso Muscular

Son los receptores localizados dentro de la bolsa intrafusal del músculo [46]. Tienen forma de cápsula con tamaño aproximado de 0.2 mm de ancho por 5 mm de largo [6]. Los husos musculares están formados por 3 tipos de fibras musculares, las cuales son[45]:

- Fibras en forma de cadena.
- Fibras estáticas en forma de bolsa.
- Fibras dinámicas en forma de bolsa.

Estas fibras forman dos grupos, el primer grupo es el encargado de medir el dinamismo que ocurre en el músculo (cuando el músculo esta en contracción), este grupo esta formado por las fibras dinámicas en forma de bolsa. Un segundo grupo esta formado por las fibras estáticas de bolsa y las fibras de tipo cadena las cuales tienen la función de medir la longitud del músculo cuando este se mantiene constante (cuando el músculo esta en reposo o estático) [45]. Esta dualidad estructural le permite al huso muscular informar a partes superiores del sistema nervioso central si el músculo esta en reposo o en contracción [45, 21, 2]. Dos aferencias son proporcionadas por los husos musculares [29, 6, 45]:

**Aferencia primaria Ia** Provee información acerca de la longitud del músculo y velocidad en la que cambia de tamaño. Esta aferencia es producida por el grupo dinámico.

**Aferencia secundaria II** Informa la longitud del músculo. El grupo estático es el encargado de producir dicha aferencia.

El estiramiento de las fibras musculares intrafusales es el tipo de estímulo al que responden los husos musculares. Debido a que durante la contracción del músculo las fibras intrafusales no son estiradas, el estímulo que llega al huso muscular puede llegar a ser tan pequeño tal que no ocasione la activación del receptor. Para poder medir la longitud muscular durante la contracción, las  $\gamma$  neuronas motoras contraen las fibras intrafusales con el fin de ajustar la sensibilidad del huso muscular [29, 46, 45, 21, 2].

### 2.2.2.1.2 Órgano Tendinoso de Golgi

El órgano tendinoso de Golgi es un mecanorreceptor de adaptación lenta, el cual está localizado en la unión que existe entre las fibras musculares esqueléticas y los tendones [46]. Este receptor tiene forma de cápsula la cual tiene un tamaño aproximado de 0.1 mm de ancho por 1 mm de largo [6]. Esta cápsula contiene en su interior varias fibras de colágeno, las cuales son inervadas por un único axón que se ramifica y se entrelaza con las fibras de colágeno [29, 6]. Este receptor sensorial produce un solo tipo de aferencia [29, 6, 45]:

**Aferencia de Tipo Ib** Fuerza aplicada en el músculo durante la contracción.

Las aferencias producidas por los órganos tendinosos de Golgi participan tanto en la inhibición como excitación de las neuronas motoras por medio de las interneuronas de la médula espinal [6].

### 2.2.2.2. Mecanorreceptores Articulares

Los receptores articulares son mecanorreceptores que se localizan en la parte fibrosa articular y en los ligamentos circundantes. Estos mecanorreceptores han sido clasificados en cuatro grupos:

#### 2.2.2.2.1 Receptor Articular de Tipo 1

Receptor articular de adaptación lenta, está localizado dentro de la parte fibrosa de la capsula articular. Este mecanorreceptor tiene forma de cápsula que envuelve una

ramificación de fibras de colágeno, el cual asemeja al mecanorreceptor cutáneo de Ruffini. Debido a esta semejanza también se le es llamado como mecanorreceptor articular de tipo Ruffini [6]. El estímulo al que este mecanorreceptor responde es la tensión que se genera en la cápsula articular en la cual se encuentra. Debido al estímulo al cual responde pareciera que son los responsables de determinar la posición estática de la articulación, determinar si la articulación esta en movimiento, el sentido del movimiento y la velocidad a la que se realiza el movimiento [6].

#### **2.2.2.2.2 Receptor Articular de Tipo 2**

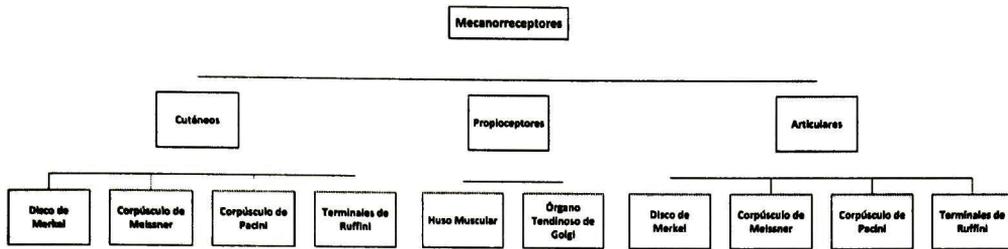
Receptor articular de adaptación rápida, esta localizado en la parte fibrosa de la cápsula articular. Se asemeja al corpúsculo de Pacini y por este motivo se le conoce como mecanorreceptor articular de tipo Pacini [6]. El estímulo al cual responde es el estiramiento que se genera en la cápsula articular en la cual se encuentra. Por la adaptabilidad del mecanorreceptor y el tipo de estímulo al cual responde, este mecanorreceptor solo puede informar cuando ocurre un movimiento y por esta razón se cree que es el receptor encargado de informar la velocidad del movimiento [6].

#### **2.2.2.2.3 Receptor Articular de Tipo 3**

El funcionamiento de este mecanorreceptor es desconocido, pero, se ha propuesto que tiene un rol de protección al prevenir el sobre estiramiento articular. Se sabe que es un mecanorreceptor de adaptación lenta, se asemeja al órgano tendinoso de Golgi y se localiza en los ligamentos que recubren la articulación[6].

#### **2.2.2.2.4 Receptor Articular de Tipo 4**

Este grupo esta formado por receptores libres, participan en la nocicepción y por lo tanto no forman parte de la propiocepción [6].



**Figura 2.1: Taxonomía de los mecanorreceptores:** Clasificación de los mecanorreceptores que participan en la propiocepción, esto en base a la información recopilada en este capítulo.

### 2.2.3. Conclusiones

En esta sección se revisaron los receptores sensoriales encargados de informar al sistema nervioso central, las fuerzas mecánicas que hacen contacto con el cuerpo y las que son generadas por el movimiento dentro del cuerpo. Los mecanorreceptores cutáneos revisados en esta sección son primordiales para el sentido del tacto, sin embargo como se explicara en las secciones siguientes, la información proporcionada por estos receptores es utilizada para ajustar la sensibilidad de los husos musculares. La Tabla 2.1 muestra un resumen de los receptores sensoriales estudiados en esta sección. La Figura 2.1 muestra la taxonomía de los mecanorreceptores.

## 2.3. Vías de Comunicación

La información sensorial propioceptiva es distribuida a partes superiores del sistema nervioso central por dos vías anatómicas [44]:

**Vía de comunicación columna dorsal-lemnisco medial:** Esta vía de comunicación es encargada de llevar la información correspondiente al sentido del tacto discriminativo (sentido de la presión y vibraciones en la piel) y algo de información propioceptiva (sentido de la postura). Esta vía también es conocida como la vía comunicación propioceptiva consciente [49]

**Vía de comunicación somatosensorial al cerebelo:** Esta vía de comunicación es

la encargada de distribuir la información propioceptiva al cerebelo. Esta vía también es denominada como la vía de comunicación propioceptiva inconsciente [44].

### 2.3.1. Vía de Comunicación Columna Dorsal-Lemnisco Medial (Consciente)

La información propioceptiva consciente y táctil discriminativa viaja por medio de la vía columna dorsal-lemnisco medial para llegar a la corteza somatosensorial [44]. Esta vía se compone por dos vías anatómicas [18]:

**Columna Dorsal:** Vía anatómica encargada de llevar la información propioceptiva consciente y táctil discriminativa, desde las células ganglionares de las raíces dorsales, hasta los núcleos de la columna dorsal. Las vías anatómicas que la conforman son el fascículo cuneatus y el fascículo gracilis [44, 3].

**Lemnisco Medial:** Vía anatómica de comunicación encargada de llevar información propioceptiva consciente y táctil discriminativa, desde los núcleos de la columna dorsal, hasta, el tálamo [44, 3].

La vía columna dorsal-lemnisco medial esta conformada por tres neuronas encargadas de realizar la comunicación, estas son:

**Neurona de Primer Orden:** Es la entrada de la información sensorial periférica a la médula espinal. Estas neuronas envían la información proveniente de la periferia hacia partes superiores del sistema nervioso central, por medio de los fascículos gracilis y cuneatus. El cuerpo de estas neuronas se encuentra en las células ganglionares de las raíces dorsales [20]. Una vez que los axones de estas neuronas entran al funículo posterior de la médula espinal, las fibras aferentes se bifurcan en fibras ascendentes largas y descendentes cortas. Esta bifurcación genera ramas colaterales, las cuales pueden hacer sinapsis con las interneuronas de las astas dorsales y con las motoneuronas de las asta ventrales.

**Neurona de Segundo Orden** Es el segundo paso de la información sensorial propioceptiva consciente y táctil discriminativa. Estas neuronas envían la información

por medio de lemnisco medial hacia el núcleo ventral posterior del tálamo. El cuerpo de estas células está localizado en los núcleos de las columnas [20].

**Neurona de Tercer Orden** El último paso para llegar a la corteza somatosensorial. Se encuentran localizadas en la parte posterior lateral del núcleo del tálamo. Los axones de estas neuronas ascienden en el brazo posterior de la capsula interna y la corona radiada y terminan en la corteza primaria somatosensorial [44, 20].

### 2.3.2. Vía de Comunicación Somatosensorial al Cerebelo (Inconsciente)

De toda la información propioceptiva que es generada por los receptores sensoriales, solo una pequeña parte llega a la parte consciente. Sin embargo la mayoría de la información propioceptiva es enviada directamente al cerebelo. Existen cuatro vías anatómicas[44, 5] por las cuales es enviada la información propioceptiva inconsciente:

#### 2.3.2.1. Tracto Espinocerebeloso Posterior (Dorsal)

La función principal de este tracto es la de relevar la información propioceptiva proveniente de los husos musculares y órganos tendinosos de Golgi localizados en las extremidades bajas y en el tronco ipsilateral al cerebelo. Además de jugar un papel principal para la coordinación y mantenimiento de posturas de las extremidades inferiores.

Este tracto utiliza dos neuronas para realizar el relevo de información propioceptiva:

**Neurona de Primer Orden:** Estas células se encuentran localizadas en los ganglios de las raíces dorsales, estas neuronas reciben información de la piel, tendones, músculos y articulaciones. Esta información es enviada a los núcleos dorsales de Clark por medio de los nervios raquídeos al ascender por el fascículo gracilis.

**Neurona de Segundo Orden:** Estas neuronas se encuentran localizadas en la columna de Clarke [58]. Los axones de estas neuronas forman el tracto espinocerebeloso posterior, dichos axones ascienden de manera ipsilateral a el funículo lateral la

médula espinal. Una vez que el tracto llega al tronco cerebral, este se uno con el cuerpo restiforme del cerebelo para después pasar hasta la vermis del cerebelo.

#### 2.3.2.2. Tracto Cuneocerebeloso

Este tracto es el encargado de llevar la información propioceptiva proveniente del cuello, extremidades superiores y parte superior del torso al cerebelo. Este tracto se conforma por dos neuronas.

**Neurona de Primer Orden:** Los axones de la neurona de primer orden ascienden en el fascículo cuneatus y terminan en el núcleo de cuneatus accesorio(lateral).

**Neurona de Segundo Orden:** Los axones de estas neuronas localizadas en el núcleo cuneatus accesorio forman el tracto conocido como cuneocerebeloso. Dichos axones se unen con el cuerpo restiforme del cerebelo, para posteriormente entrar de forma ipsilateral al lóbulo anterior del cerebelo.

La información proporcionada por este tracto es utilizada para mantener la postura y realizar movimientos precisos en el cuello, torso superior y extremidades superiores.

#### 2.3.2.3. Tracto Espinocerebeloso Anterior (Ventral)

La información encargada de llevar este tracto es la correspondiente a los husos musculares y órganos tendinosos de Golgi localizados en la parte inferior del torso y extremidades inferiores. De manera similar a los otros tractos, el envío de información es llevado a cabo por dos neuronas.

**Neurona de Primer Orden:** Estas neuronas son las responsables de transmitir la información sensorial de los receptores a las neuronas de segundo orden.

**Neurona de Segundo Orden:** El tracto espinocerebeloso anterior esta formado por los axones de estas neuronas, los cuales realizan una decusación en la comisura blanca anterior para posteriormente ascender en el funículo lateral de la médula espinal llegando así a la médula oblonga. Cuando las fibras llegan al nivel del pons, estas se unen al pedúnculo cerebeloso para pasar hasta la vermis.

Este tracto proporciona la información necesaria para realizar el movimiento de las extremidades inferior, la cual también es útil para el mantenimiento de la postura.

#### **2.3.2.4. Tracto Espinocerebeloso Rostral**

La información propioceptiva del rostro y miembros superiores es transmitida por este tracto. Para hacer el relevo de la información, este tracto utiliza dos neuronas.

**Neurona de Primer Orden:** Releva la información proveniente de los receptores sensoriales a las neuronas de segundo orden.

**Neurona de Segundo Orden:** Los axones de estas neuronas forman el tracto espinocerebeloso, los cuales se unen al cuerpo restiforme para entrar al cerebelo. Algunas fibras que conforman los axones de estas neuronas entran al cerebelo por medio del pedúnculo cerebeloso superior.

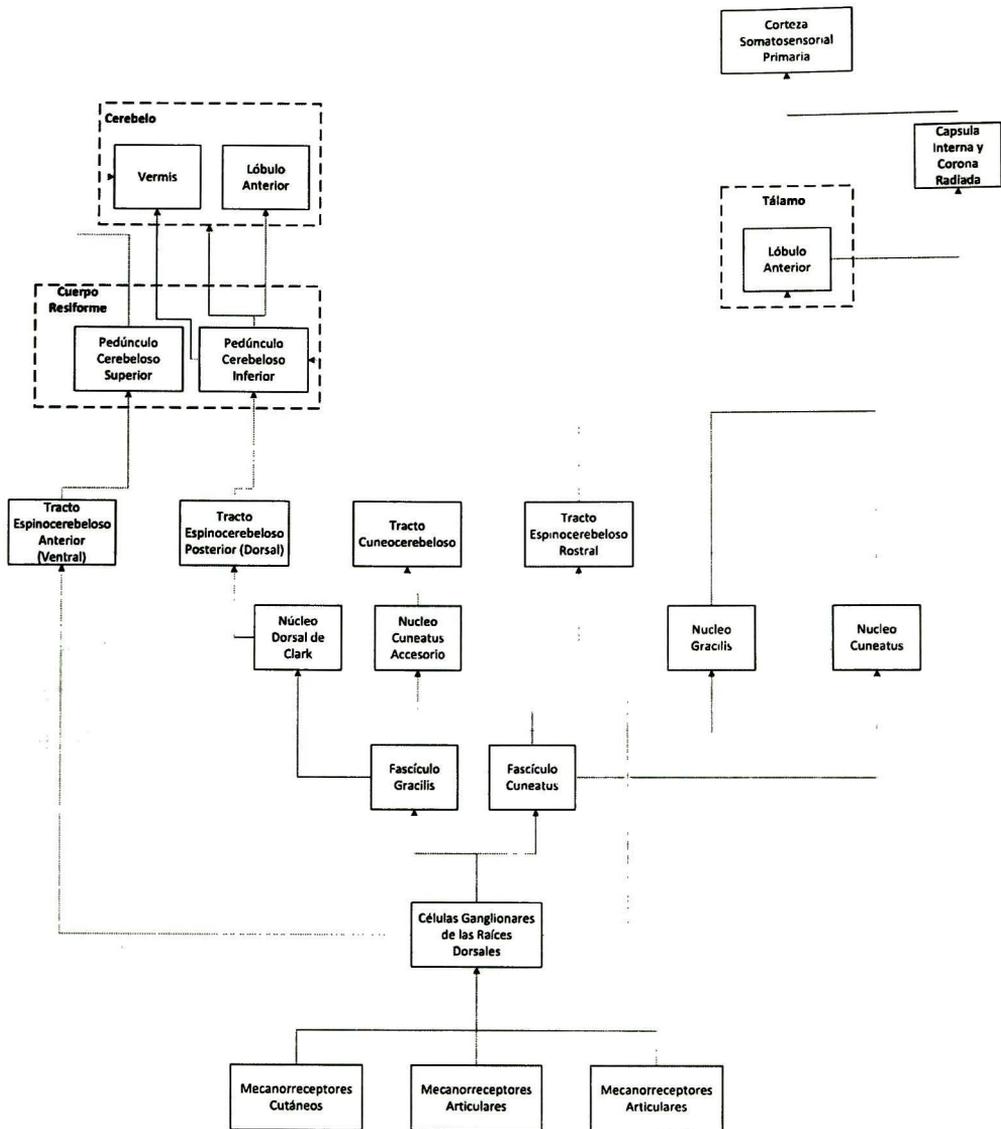
La información proporcionada por este tracto es de principal importancia para la realización de movimientos de la cara y miembros superiores.

#### **2.3.2.5. Conclusiones**

Como se ha mencionado reiteradas veces en este capítulo, la información propioceptiva es útil e indispensable para la realización correcta de los movimientos y para el mantenimiento de las posturas. En esta subsección se analizaron las vías de comunicación, las cuales se encargan de distribuir la información propioceptiva a las estructuras superiores del sistema nervioso central. La Figura 2.2, muestra un diagrama de los componentes que integran las diferentes vías de comunicación.

## **2.4. Neuronas Motoras Inferiores**

Las neuronas motoras inferiores son las encargadas de realizar las contracciones musculares. Sus cuerpos se localizan en el asta ventral de la sustancia gris de la médula espinal y en los núcleos motores de los nervios craneales en el tronco del encéfalo. El axón



**Figura 2.2: Vías de Comunicación Proprioceptiva:** Diagrama formado por las vías de comunicación utilizadas para el flujo de información propioceptiva en el sistema nervioso central.

de estas neuronas llega hasta el músculo esquelético por medio de las raíces ventrales y los nervios periféricos espinales[46]. Las neuronas motoras inferiores se pueden clasificar en dos grupos:

### 2.4.1. $\alpha$ Neurona Motora

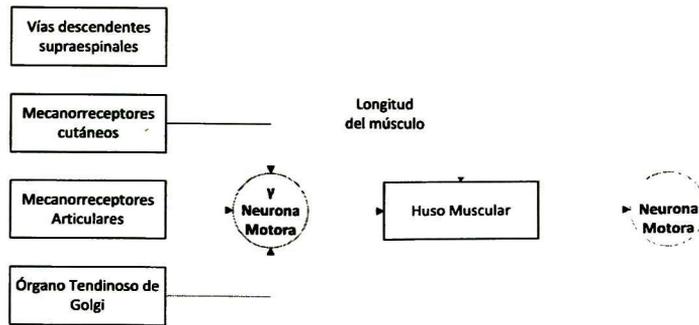
Este tipo de neurona motora se encarga de realizar las contracciones musculares, lo cual permite mantener una postura y realizar movimientos. Los axones de estas neuronas inervan las fibras extrafusales del músculo esquelético [46].

### 2.4.2. $\gamma$ Neurona Motora

Las  $\gamma$  neuronas motoras son las encargadas de ajustar la sensibilidad del huso muscular. Esta función también se le conoce con el nombre de sistema fusimotor[45]. Para realizar esta tarea las  $\gamma$  neuronas motoras contraen las regiones polares de las fibras intrafusales ocasionando un estiramiento en la parte central, lugar donde se localizan los receptores sensoriales[49, 45]. Este estiramiento produce un incremento en la cantidad de aferencias enviadas por el huso muscular. La contribución de la fuerza generada por la contracción de las fibras intrafusales no es significativa en la fuerza que aplica el músculo durante la contracción[45].

Este grupo de neuronas motoras puede dividirse en dos subgrupos: En el grupo de  $\gamma$  neuronas motoras dinámicas las cuales inervan a las fibras dinámicas del huso muscular y el grupo  $\gamma$  neuronas motoras estáticas que inervan al grupo de fibras estáticas del huso muscular. Esto permite al sistema nervioso central poder ajustar la sensibilidad de las fibras dinámicas sin incrementar la sensibilidad de las fibras estáticas y ajustar la sensibilidad de las fibras estáticas lo que ocasiona que se reduzca la sensibilidad de las fibras dinámicas [45].

Las  $\gamma$  neuronas motoras pueden ser consideradas como un sistema neural de integración premotora [49], esto surge de la hipótesis propuesta por Johansson et al [26] (Figura 2.3), la cual establece que la activación de las  $\gamma$  neuronas motoras esta fuertemente influenciada por los mecanorreceptores cutáneos, los husos musculares, los órga-



**Figura 2.3: Hipótesis final de entrada común**[26]: Las  $\gamma$  neuronas motoras como unidades integradoras de información para el ajuste del huso muscular, a este proceso se le conoce como sistema fusimotor [45].

nos tendinosos de golgi, los mecanorreceptores articulares y la información proveniente de las vías descendentes supraespinales.

## 2.5. Potenciales de Acción

La comunicación entre tejidos se realiza por medio de señales eléctricas, las cuales son conocidas como potenciales de acción, pulsos o spikes [12]. Los potenciales de acción son generados cuando ocurre una depolarización en la membrana de la neurona, es decir, que la diferencia entre el voltaje del cuerpo de la neurona y su interior sobre pase un determinado umbral. A esta diferencia se le conoce como nivel de activación o potencial de la neurona. Este proceso de generación de pulsos es realizado en tres etapas [25]:

**Periodo prepotencial:** La diferencia de potencial en la membrana no es lo suficientemente grande, por lo tanto ningún potencial es generado. Esto es debido a que los potenciales de acción son generados por la ley de todo o nada [28].

**Periodo de depolarización:** Es el intervalo de tiempo en el que ocurre el potencial de acción.

**Periodo refractario:** Después de que un potencial de acción es generado, la célula tiene un periodo de tiempo en el cual su excitabilidad es más baja de lo normal.

Este intervalo de tiempo es dividido en dos:

**Periodo refractario absoluto:** Intervalo de tiempo en el que la excitabilidad de la neurona es completamente nula.

**Periodo refractario relativo:** Durante este intervalo de tiempo la excitabilidad de la célula es reducida, pero es capaz de producir un nuevo potencial de acción.

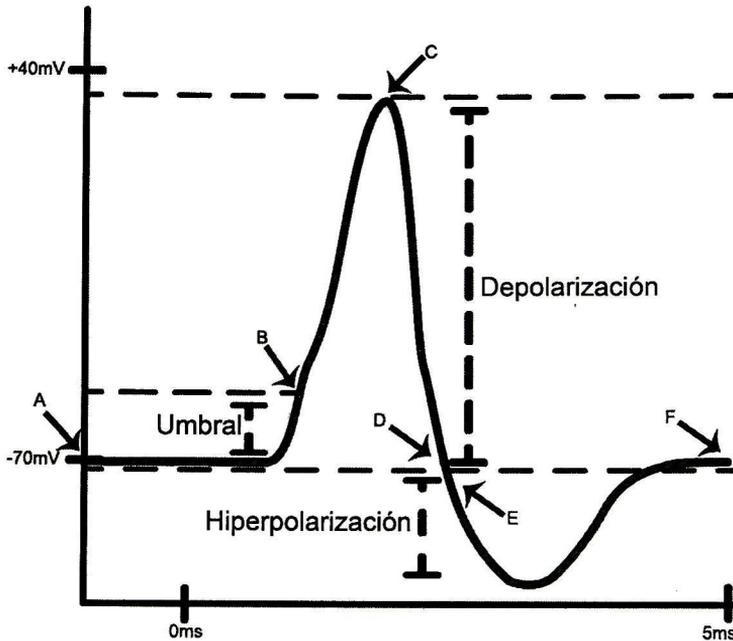
Algunas de las características más importantes de los potenciales de acción son [16]:

- El pulso eléctrico no cambia de tamaño, independientemente del potencial de la neurona.
- Durante la transmisión de los potenciales de acción estos no decrecientan su tamaño.
- Existe un numero limite de potenciales de acción que pueden ser generados en una cantidad de tiempo. Esto se debe al tiempo en que dura el periodo refractario absoluto.

A pesar del conocimiento que se tiene en las neurociencias sobre los potenciales de acción, aun queda abierta la pregunta; ¿En que forma las neuronas codifican la información?. Para contestar esta pregunta dos hipótesis son aceptadas. Una primera hipótesis establece que la información se encuentra codificada en la frecuencia de los pulsos, es decir el numero spikes que hay en un intervalo de tiempo. Estudios realizados en el funcionamiento de los mecanorreceptores [1] y en las células musculares[46] sustentan a esta hipótesis. La segunda hipótesis establece que la información esta codificada en base al intervalo de tiempo que existe entre los spikes, la codificación en los receptores auditivos sustenta esta hipótesis [7].

### 2.5.1. Conclusiones

Los potenciales de acción es la manera en que las neuronas se comunican, con otras o con los músculos. Para este trabajo los potenciales de acción forman una parte esencial,



**Figura 2.4: Etapas de un Potencial de Acción:** Este esquemático muestra de manera gráfica las etapas por las que pasa un potencial de acción. Del punto "A" al "B" se encuentra el periodo prepotencial, ya que el potencial de membrana aun no supera el umbral. Los puntos "B", "C" y "D" muestran un potencial de acción, lo cual corresponde a el periodo de depolarización. Como se puede ver en la figura del punto "B" al "C" el potencial de la neurona se hace más positivo para luego volverse negativo (del punto "C" al "D" ). Después de que se ha generado un spike, el potencial de la neurona queda cargado de manera negativa, esto ocurre del punto "E" al "F". durante este periodo la neurona no puede generar otro potencial de acción. Una vez concluidas estas etapas la neurona esta lista para generar un nuevo potencial de acción, es decir que este proceso vuelva a ocurrir.

ya que se busca recrear el comportamiento de los receptores sensoriales que participan en la propiocepción, los cuales son neuronas especializadas en sentir los estímulos mecánicos.

**Tabla 2.1: Resumen Mecanorreceptores:** Características principales de los mecanorreceptores.

<b>Nombre</b>	<b>Tipo de Aferencia</b>	<b>Localización</b>	<b>Función</b>
<b>Disco de Merkel</b>	SA1	Piel glabra	Distinguir texturas
<b>Corpúsculo de Meissner</b>	RA1	Piel glabra	Detectar fuerza y resbalones que ocurren cuando se sujeta un objeto
<b>Corpúsculo de Pacini</b>	RA2	Piel glabra	Detectar las vibraciones de alta frecuencia
<b>Terminales de Ruffini</b>	SA2	Piel glabra	Detectar el estiramiento de la piel
<b>Huso muscular</b>	Ia y II	Fibras musculares intrafasciales	El cambio de longitud y velocidad del músculo
<b>Órgano Tendinoso de Golgi</b>	Ib	Unión entre músculo y tendón	Fuerza generada por la contracción muscular
<b>Receptor Articular Tipo 1</b>		Dentro de la parte fibrosa de la cápsula articular	Posición estática de la articulación, detección del movimiento articular y su velocidad
<b>Receptor Articular Tipo 2</b>		Dentro de la parte fibrosa de la cápsula	Detección de movimiento articular
<b>Receptor Articular Tipo 3</b>		Ligamentos que cubren a la articulación	Prevenir el sobre estiramiento articular

# Capítulo 3

## Otras Aproximaciones al Sistema Propioceptivo para Entidades Virtuales

### 3.1. Introducción

Antes de realizar una propuesta es necesario conocer lo que ya existe, por esta razón se consultaron en diferentes disciplinas toda aquella información relacionada con el sistema propioceptivo y el como ha sido utilizado o implementado. Como foco principal se tienen las arquitecturas cognitivas, ya que uno de los objetivos particulares de este trabajo es la integración del sistema propioceptivo sintético con la arquitectura “*Kuayolotl*”

Este capítulo está organizado de la siguiente manera:

**3.2 Arquitecturas Cognitivas:** Se muestra un resumen de las arquitecturas cognitivas más mencionadas en la literatura.

**3.3 Propiocepción en Robótica:** En esta sección se resume dos modelos del sistema propioceptivo que han sido creados para robots bio-inspirados.

**3.4 Propiocepción en biomecánica:** La biomecánica da una explicación física del funcionamiento de componentes biológicos, por lo que diferentes modelos que

recrean el comportamiento de los propioceptores se han propuesto. En esta sección se muestran los modelos encontrados en esta disciplina.

## 3.2. Arquitecturas Cognitivas

Las arquitecturas cognitivas sirven para especificar las estructuras necesarias para crear sistemas inteligentes, por lo general las estructuras contemplan aspectos que permanecen constantes sin importar el dominio de la aplicación [36]. Algunos de los aspectos que las diferentes arquitecturas cognitivas tienen en común son:

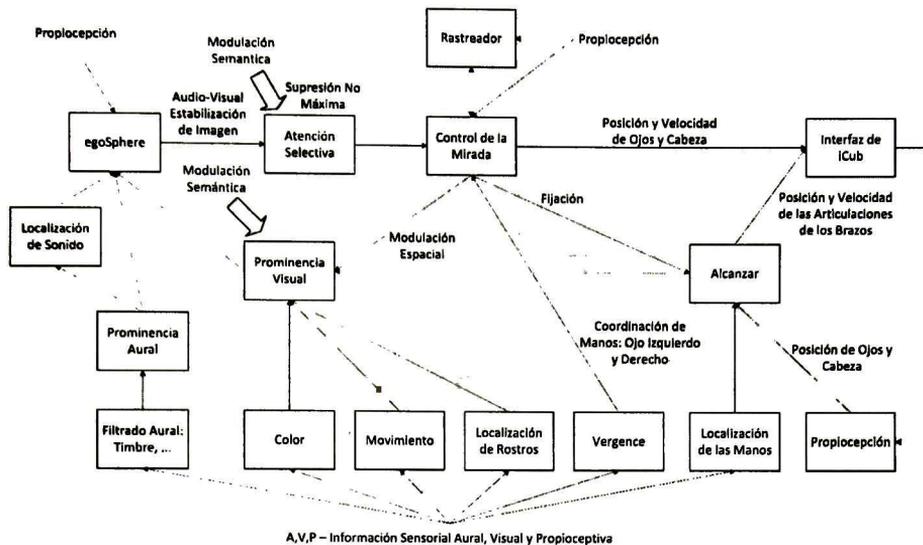
- Memoria,
- Percepción,
- Toma de decisiones,
- Planeación.

Como se menciono anteriormente existe una gran variedad de arquitecturas cognitivas, las cuales pueden diferir en los fundamentos en los que la arquitectura se sustenta, por ejemplo psicológicos o computacionales. En esta sección se describen las arquitecturas cognitivas más relevantes.

### 3.2.1. iCub

iCub es un proyecto derivado de RobotCub [50], que contempla el desarrollo de dos proyectos: el primer proyecto consiste en una arquitectura cognitiva, la cual esta basada en los resultados aportados por la psicología y neurociencia. El segundo proyecto es un robot antropomorfo, el cual tiene habilidades similares a las de un niño de 2.5 años de edad [56]. Su meta principal es el estudio de la cognición humana por medio del uso de estas herramientas. La arquitectura cognitiva se muestra en la Figura 3.1.

iCub utiliza una gran cantidad de sensores que van desde cámaras y acelerómetros, hasta una piel sintética [55]. Debido al uso de todos estos sensores iCub es capaz de



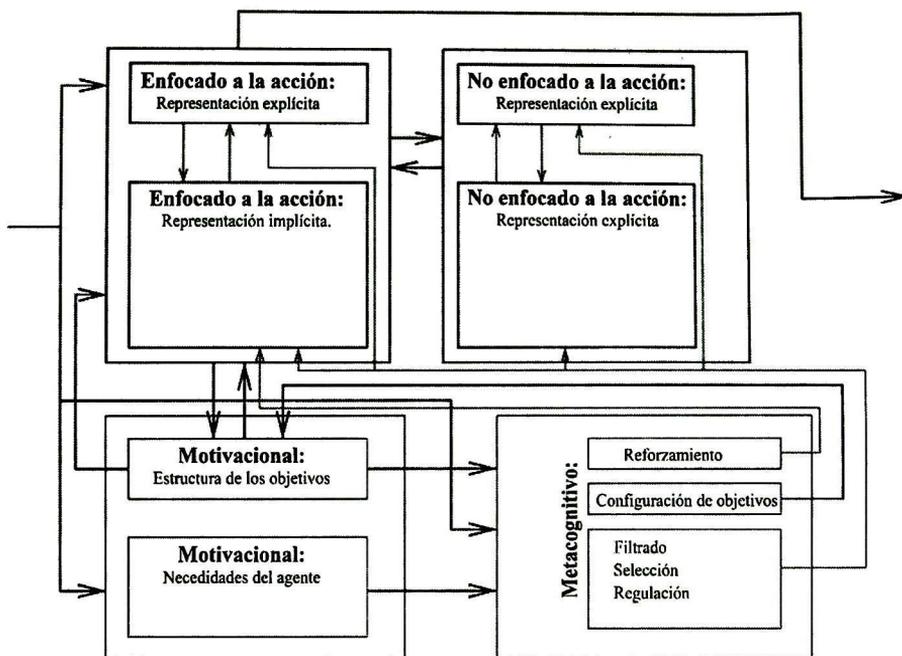
**Figura 3.1: Arquitectura iCub:** Versión 0.4 de la arquitectura cognitiva de iCub

realizar distintos tipos de comportamientos, por ejemplo la locomoción y manipulación de objetos. Específicamente hablando, la propiocepción en iCub es obtenida directamente de los sensores de posición [57], los cuales están localizados en cada una de sus articulaciones. Por lo general los sensores utilizados para saber la posición articular son *encoders* absolutos. La velocidad y aceleración del movimiento de la articulación es posteriormente calculada por medio del algoritmo de mínimos cuadrados con ventana adaptativa [23].

### 3.2.2. CLARION

La arquitectura cognitiva CLARION esta conformada por un grupo de subsistemas que al integrarse pueden realizar una amplia variedad de procesos cognitivos, los cuales pueden ser útiles para la realización de una diversa cantidad de tareas [53]. La Figura muestra el diagrama de esta arquitectura cognitiva. Los componentes que conforman CLARION son:

**Subsistema enfocado a la acción:** Este subsistema es el encargado de realizar la toma de decisión de acciones que un agente puede realizar para interactuar con



**Figura 3.2: Arquitectura CLARION:** Diagrama de la arquitectura cognitiva CLARION.

su mundo. Este sistema es considerado como la parte central de CLARION, ya que los creadores de esta arquitectura consideran a la toma de decisiones como un proceso esencial por las siguientes razones: Es el encargado de obtener el estado actual del mundo, decidir entre un conjunto de acciones utilizando su propio conocimiento y realizar las acción para interactuar y modificar su mundo.

**Subsistema metacognitivo:** La metacognición se refiere a el conocimiento y los procesos cognitivos que tienen que ver con uno mismo. En CLARION el subsistema metacognitivo es encargado del monitorear, dirigir y modificar operaciones de los otros subsistemas de la arquitectura.

**Subsistema motivacional:** El sistema motivacional es encargado de supervisar las necesidades internas y la interacción que estas tienen con las acciones realizadas por el agente.

**Subsistema no enfocado a la acción:** Este subsistema es utilizado para representar

el conocimiento general que el agente tiene sobre el mundo. Su función principal consiste en recuperar información y hacer inferencias.

Cada uno de estos subsistemas esta compuesto por dos niveles de representación, el nivel superior es el encargado de codificar el conocimiento explicito, mientras tanto el nivel inferior es el encargado del implicito.

### 3.2.3. Soar

Soar es una arquitectura cognitiva creada para investigar los requerimientos necesarios para obtener un sistema inteligente y demostrar los comportamientos que un sistema con estas capacidades sería capaz de lograr [34]. La teoría computacional que Soar toma como sustento esta basada en metas, problemas espaciales, estados y operadores [33]. Por lo tanto Soar puede ser visto como una arquitectura para agentes y como una teoría de la inteligencia general y la cognición humana [54].

Los módulos que integran Soar tienen la capacidad de realizar tareas tales como: la percepción visual, aprendizaje, memoria a corto y largo plazo y la interacción con su ambiente. La Figura 3.3 muestra el diagrama de cajas de la arquitectura Soar.

Existe una amplia variedad de aplicaciones en las que la arquitectura Soar ha sido utilizada, por ejemplo:

**Entendimiento del lenguaje natural:** Leman, Lewis y Newell[38] desarrollaron un sistema para el entendimiento del lenguaje natural utilizando Soar, el cual integra diferentes fuentes de conocimiento de manera automática.

**Agente autónomo Steve:** Johnson y Rickel [48] implementaron Soar en un agente que vive en un ambiente virtual. Steve ha sido utilizado para la capacitación de personal.

**Oponentes inteligentes en videojuegos:** Wray, Laird, Nuxoll y Jones [59] propone el como la arquitectura Soar puede ser utilizada para dar inteligencia a personajes dentro del videojuego *Unreal Tournament*<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Unreal Tournament, <http://www.unrealtournament.com>

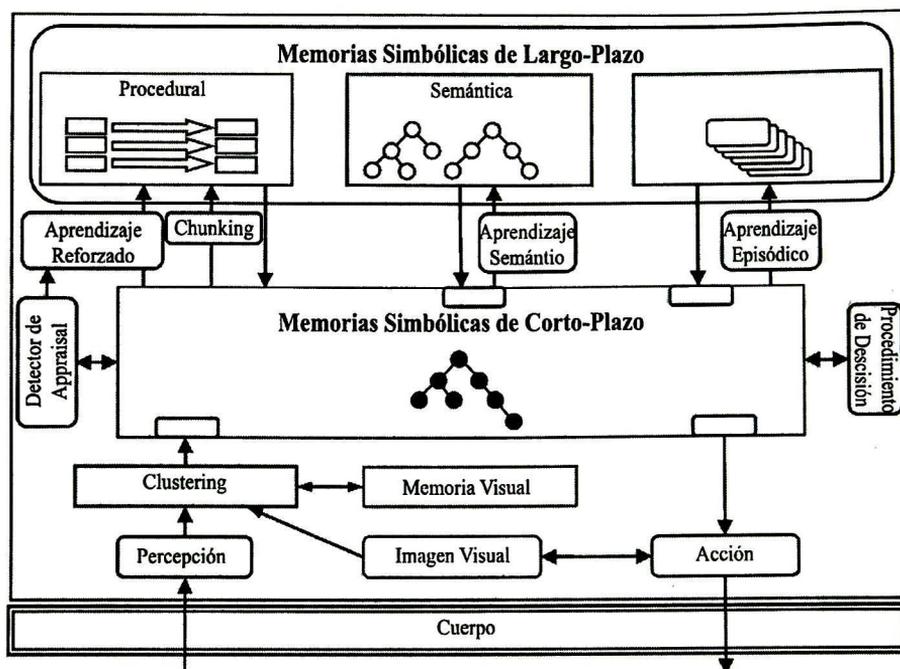


Figura 3.3: Arquitectura Soar: Diagrama de la arquitectura cognitiva Soar versión 9.

### 3.2.4. Conclusiones

Soar y CLARION son arquitecturas cognitivas que cuentan con una propuesta para el sistema propioceptivo, esto debido a que dichas arquitecturas no fueron contempladas en un principio para entidades complejas en ambientes virtuales complejos, como lo son entes antropomorfos y los mundos tridimensionales. Por otro lado ambas arquitecturas son modulares por lo cual añadir nuevas características es posible. A diferencia de Soar y CLARION, iCub considera a la propiocepción como un elemento más dentro de su arquitectura.

## 3.3. Propiocepción en Robótica

La robótica puede ser vista como la combinación de ciencias de la computación y las tecnologías de herramientas mecánicas [31]]. En la actualidad existe un gran interés por

recrear en medios mecánicos ciertas funcionalidades de los seres vivos, prueba de ello se encuentra en esta sección, en la cual se muestran modelos y aplicaciones del sistema propioceptivo utilizados en robots.

### 3.3.1. Sistema de Control por Retroalimentación Médular

El sistema control con retroalimentación medular es una propuesta desarrollada por Shadmehr y Wise [51]. Este modelo muestra la participación que tienen los propioceptores como sistema de retroalimentación motora.

Este sistema es iniciado por la activación de las  $\alpha$  neuronas motoras, las cuales producen la contracción muscular, lo que aplica una fuerza en los tendones, produciendo así el movimiento de una parte del cuerpo. Este sistema activa los propioceptores, los cuales envían información sobre la fuerza ejercida, longitud y velocidad del músculo a las interneuronas y  $\alpha$  neuronas motoras. Dicha información es utilizada para evitar las perturbaciones durante el movimiento de una extremidad y que la realización de la acción sea la deseada. El modelo considera el ajuste de sensibilidad que tienen los husos musculares realizado por las  $\gamma$  neuronas motoras y la inhibición que realizan las interneuronas a las  $\alpha$  neuronas motoras, debido a la activación de los órganos tendinosos de Golgi. El esquemático del modelo es mostrado en la Figura 3.4.

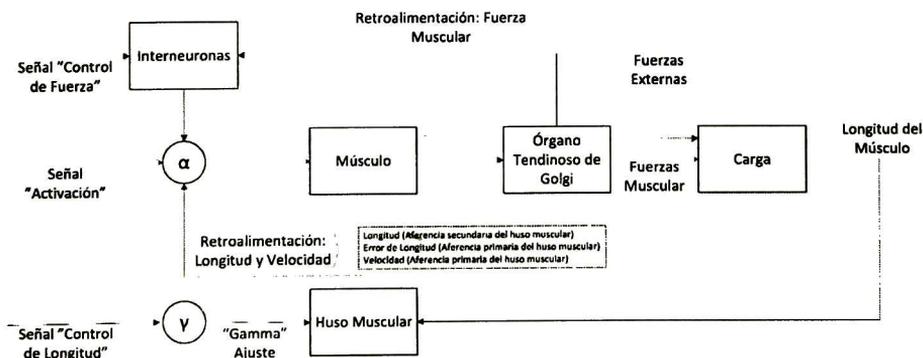
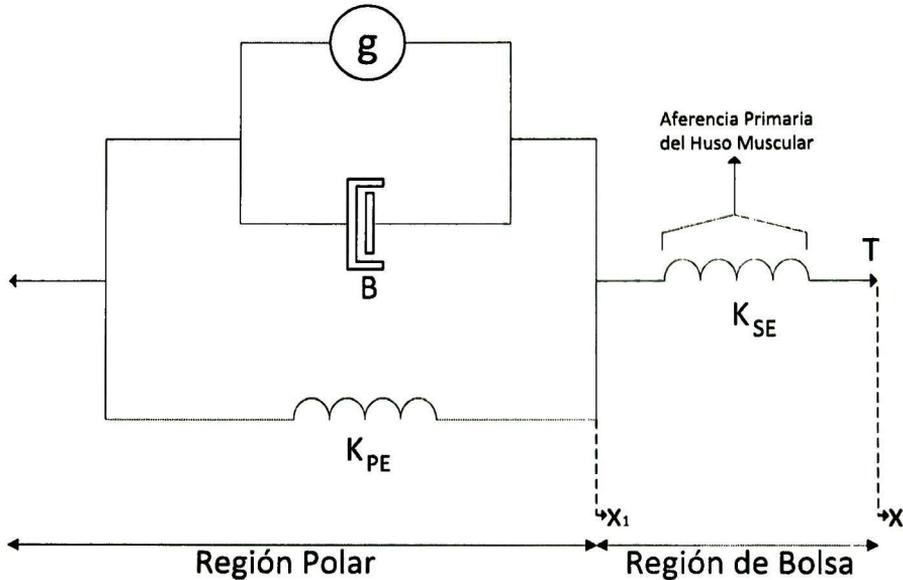


Figura 3.4: Arquitectura del sistema de control por retroalimentación medular

El modelo de McMahon [41] es utilizado para recrear el comportamiento del huso muscular, dicho modelo contempla dos elementos: El primero es la región polar, la

cual se encarga de recibir las entradas de las  $\gamma$  neuronas motoras y de proporcionar la segunda aferencia del huso muscular (Aferencia II). El segundo componente del modelo, es la región de la bolsa. Esta segunda región es la encargada de producir la primera aferencia del huso muscular. La descripción gráfica del modelo es ilustrado por la Figura 3.5.



**Figura 3.5: Huso Muscular McMahon:** Modelo de huso muscular propuesto por McMahon.

### 3.3.2. Agarre Robótico Táctil y Propioceptivo

En este trabajo desarrollado por Jonna Laaksonen [32] se propone una arquitectura para la manipulación y agarre de objetos por medio de una garra robótica. Dicha arquitectura es independiente del hardware, es decir puede ser utilizada en diferentes tipos de brazos robóticos, los cuales a su vez pueden tener distintos tipos y cantidades de sensores. Esta arquitectura se basa en el principio de uso de sensores en ambientes desconocidos. Ya que por medio de los sensores se pretende recrear la propiocepción y el sentido del tacto, los cuales juegan un papel principal para la manipulación y agarre

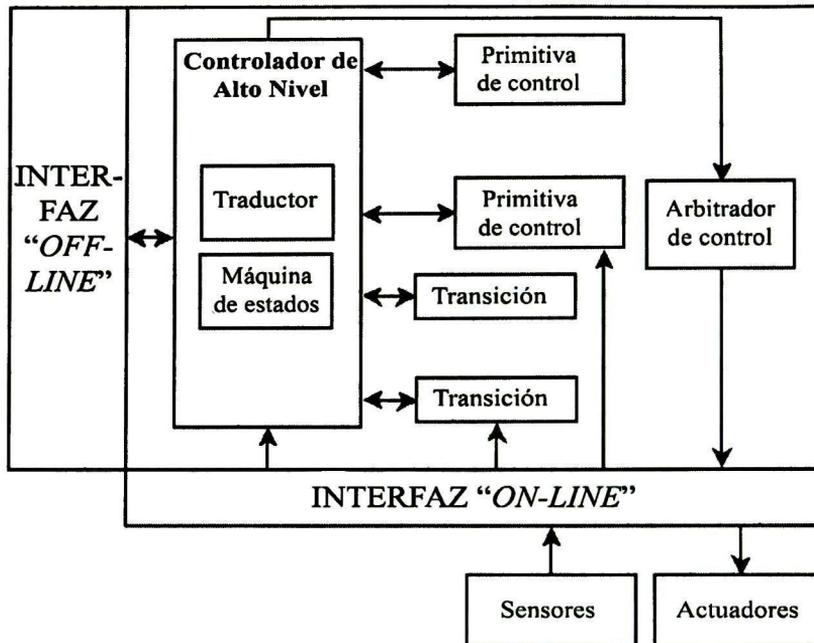
de los objetos. El esquemático de la arquitectura puede ser visto en la Figura 3.6.



**Figura 3.6:** Arquitectura para el agarre robótico táctil y propioceptivo.

Uno de los objetivos para el desarrollo de este trabajo fue el abstraer una acción para alcanzar una meta de la acción misma. Por esta razón la arquitectura está formada por dos elementos contrastantes. El primer elemento “Abstracción de acciones” se encarga de generalizar las actividades que el hardware puede realizar, como lo es el cerrar la mano o mover alguna parte de la extremidad. El segundo componente “Acciones concretas” está relacionado con la ejecución y control del hardware, lo cual ya es completamente dependiente de la plataforma en la que la arquitectura será implementada. Con estos dos componentes se logra separar las acciones del hardware, pero para que esto funcione es necesario una interfaz que comunique a ambos componentes. Dicha tarea es realizada por el componente “Abstracción a realización”, el cual traduce los requerimientos abstractos a acciones específicas del hardware.

La propiocepción se encuentra localizada en el componente de “Acciones concretas”, para el cual se propuso una arquitectura de control (Figura 3.7), que es responsable de la ejecución de las acciones. Una de las características principales dentro de la arquitectura de control es la inclusión de dos interfaces de comunicación. La interfaz “*off-line*”, es la encargada de mantener la comunicación con el componente de “Abstracción a realización”. Por otro lado, la interfaz “*on-line*” es usada para obtener la información proveniente de todos los sensores disponibles. Cabe destacar que la información de los sensores puede ser solicitada directamente por cualquier componente que lo requiera.



**Figura 3.7: Arquitectura de Control "Acciones concretas":** Sistema de control utilizado para la ejecución de acciones utilizada por la arquitectura "agarre robótico táctil y propioceptivo"

### 3.3.3. Conclusiones

El modelo titulado "Sistema de Control por Retroalimentación Médular", es un modelo teórico basado en neurociencias, el cual está enfocado para ser implementado en un robot bio-inspirado. Dicho modelo es una muy buena aproximación, pero no considera otras entradas las cuales son utilizadas para la activación de las  $\gamma$  y  $\alpha$  neuronas motoras. Por otro lado el sistema titulado "Agarre Robótico Táctil y Propioceptivo", es un claro ejemplo de las posibilidades que tiene el utilizar modelos bio-inspirados para el desarrollo de ciertas actividades, aun a pesar de esto dicho modelo no dejará de ser un aproximación meramente computacional.

## 3.4. Propiocepción en Biomecánica

La biomecánica es una disciplina interdisciplinaria que ha sido definida de diferentes maneras:

**Según Hay [22]:** *“Es la ciencia que estudia las fuerzas internas y externas, y como éstas inciden sobre el cuerpo humano.”*

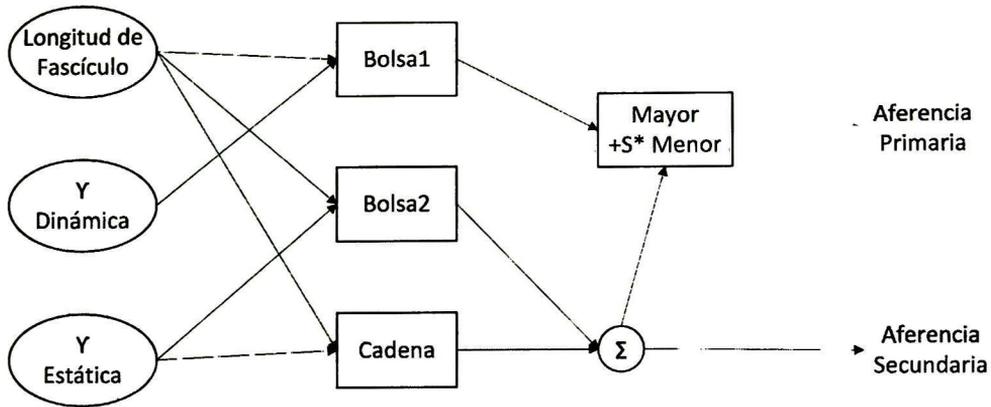
**Según el United States National Committee on Biomechanics [37]:** *“La aplicación de los principios y la metodología de la mecánica para resolver los problemas relacionados con el hombre y otros sistemas.”*

Modelos musculares y de receptores sensoriales se han modelado por medio de componentes mecánicos, es por eso que en esta sección se describen los modelos encontrados en la literatura relacionados con la propiocepción.

### 3.4.1. Modelo Matemático del Huso Muscular

El huso muscular es un receptor sensorial localizado en los músculos esqueléticos de la mayoría de los vertebrados. Es el responsable de informar al sistema nervioso central acerca de la longitud y velocidad de los músculos. Para recrear su funcionamiento Mileusnic, Brown, Lan y Loeb [43] proponen un modelo del huso muscular compuesto de elementos matemáticos que recrean de manera muy similar los componentes que conforman al huso muscular biológico. Una cualidad que vale la pena resaltar es el hecho de que esta aproximación es capaz de recrear el comportamiento del huso muscular en ausencia o presencia del estímulo proveniente de las  $\gamma$  neuronas motoras. El modelo matemático del huso muscular está compuesto por tres modelos de fibras musculares y dos de aferencias. La Figura 3.8 muestra gráficamente los modelos que conforman al modelo matemático del huso muscular.

Una versión modificada del modelo McMahon [41] es utilizada para recrear el comportamiento de las fibras musculares, dicho modelo es ilustrado en la Figura 3.9. Los parámetros utilizados por el modelo fueron optimizados por medio de resultados obtenidos durante la experimentación en un músculo de gato. Dichos experimentos consistían



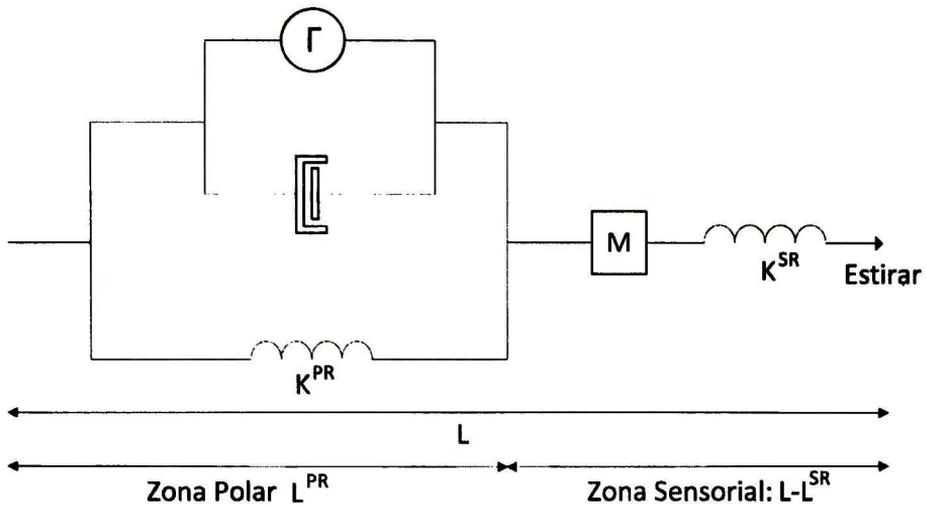
**Figura 3.8: Modelo Matemático del Órgano Tendinoso de Golgi:** Modelo del huso muscular propuesto por Mileusnic et al.[43]. El modelo está compuesto por tres modelos de fibras musculares, las de tipo "Bolsa<sub>1</sub>", "Bolsa<sub>2</sub>" y "Cadena". Este modelo produce dos aferencias y es capaz de funcionar sin la activación del sistema fusimotor.

en medir la respuesta muscular mientras se aplicaban estiramientos en forma de rampa, triangular y sinusoidal.

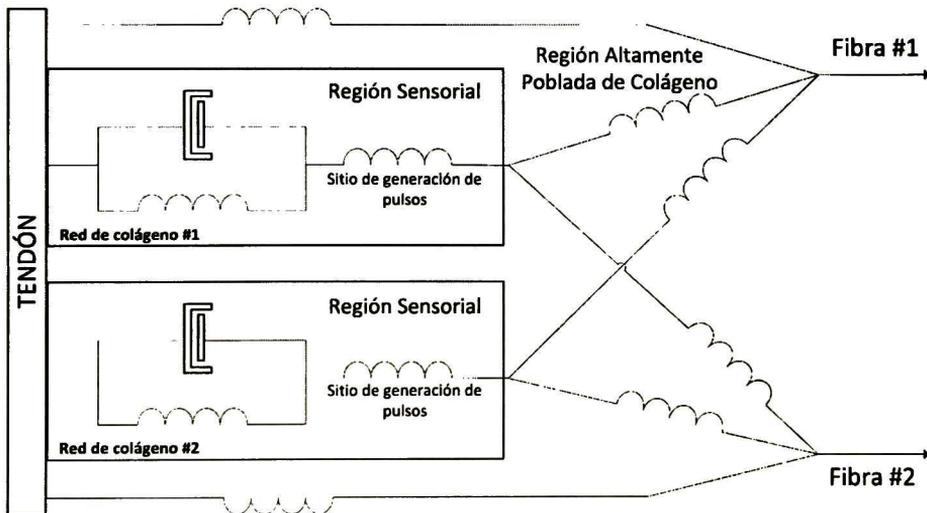
### 3.4.2. Modelo Matemático del Órgano Tendinoso de Golgi

El órgano tendinoso de Golgi es un receptor sensorial localizado entre la unión del músculo esquelético y los tendones. Tiene la función de informar al sistema nervioso central la tensión generada durante la contracción muscular. Mileusnic y Loeb [42] modelaron por medio de componentes matemáticos el comportamiento fisiológico del órgano tendinoso de Golgi. Dicho modelo está compuesto por dos componentes, el primero representa la parte altamente poblada de colágeno y el segundo componente representa la parte sensorial del receptor. El esquemático del modelo es mostrado en la Figura 3.10.

El modelo considera la existencia de dos elementos separados para la transducción del estímulo, esto se realizó para lograr la suma no lineal [10] de las aferencias producidas por el receptor ante la aplicación de diferentes estímulos simultáneos.



**Figura 3.9: Modelo Matemática Modificado de McMahon:** Modelo propuesto por Mileusnic et al.[43] de las fibras musculares utilizado para recrear el comportamiento del huso muscular. Este modelo es una versión modificada del propuesto por McMahon



**Figura 3.10: Modelo Matemática del Órgano Tendinoso de Golgi:** Modelo propuesto por Mileusnic y Loeb.[42] de las fibras musculares utilizado en para recrear el comportamiento del huso muscular. Este modelo es una versión modificada del propuesto por McMahon

### **3.4.3. Conclusiones**

Estos dos modelos de propioceptores, están enfocados para recrear el funcionamiento fisiológico. Por lo tanto los resultados obtenidos son mas apegados la funcionamiento real de estos, sin embargo, la cantidad de parámetros para ajustar el funcionamiento puede ser un problema si consideramos su aplicación en una entidad virtual antropomorfa, la cual tendría que tener una cantidad de músculos similar a la de un ser humano.

# Capítulo 4

## Sistema de Propiocepción Sintético para Entidades Virtuales Antropomorfas

### 4.1. Introducción

En esta sección del documento se presenta la propuesta que servirá para dotar a las entidades virtuales del sistema propioceptivo. Para el desarrollo de la propuesta se tomo en consideración las características principales de las otras aproximaciones que fueron analizadas en el capítulo 3. La propuesta tiene dos ventajas principales: Como primer ventaja se tiene el fundamento utilizado para crear la arquitectura, los resultados neurocientíficos nos describen el funcionamiento de las diversas estructuras que conforman al sistema nervioso central y el como el trabajo sinérgico de estas estructuras da lugar al comportamiento. El utilizar este enfoque nos permite que el modelado de los componentes y la implementación de los mismos sea de forma elegante y simple. La segunda ventaja es la comunicación de los componentes, ya que estos transmiten su información por medio de potenciales de acción o spikes, lo que permite utilizar los modelos matemáticos encontrados en la literatura (capitulo 3) e intercambiarlos por otros componentes, claro esta, siempre y cuando estos realicen las misma actividad y aporten el mismo tipo de información.

### **3.4.3. Conclusiones**

Estos dos modelos de propioceptores, están enfocados para recrear el funcionamiento fisiológico. Por lo tanto los resultados obtenidos son mas apegados la funcionamiento real de estos, sin embargo, la cantidad de parámetros para ajustar el funcionamiento puede ser un problema si consideramos su aplicación en una entidad virtual antropomorfa, la cual tendría que tener una cantidad de músculos similar a la de un ser humano.

# Capítulo 4

## Sistema de Propiocepción Sintético para Entidades Virtuales Antropomorfas

### 4.1. Introducción

En esta sección del documento se presenta la propuesta que servirá para dotar a las entidades virtuales del sistema propioceptivo. Para el desarrollo de la propuesta se tomo en consideración las características principales de las otras aproximaciones que fueron analizadas en el capítulo 3. La propuesta tiene dos ventajas principales: Como primer ventaja se tiene el fundamento utilizado para crear la arquitectura, los resultados neurocientíficos nos describen el funcionamiento de las diversas estructuras que conforman al sistema nervioso central y el como el trabajo sinérgico de estas estructuras da lugar al comportamiento. El utilizar este enfoque nos permite que el modelado de los componentes y la implementación de los mismos sea de forma elegante y simple. La segunda ventaja es la comunicación de los componentes, ya que estos transmiten su información por medio de potenciales de acción o spikes, lo que permite utilizar los modelos matemáticos encontrados en la literatura (capitulo 3) e intercambiarlos por otros componentes, claro esta, siempre y cuando estos realicen las misma actividad y aporten el mismo tipo de información.

El resto de este capítulo esta organizado de la siguiente manera:

**4.2 Aproximación Computacional:** En esta segunda sección se muestra la arquitectura propuesta del modelo del sistema propioceptivo. En las subsecciones se describen modelos propuestos para los receptores sensoriales que participan en este sistema.

**4.3 Conclusiones:** Sección encargada de finalizar el capítulo

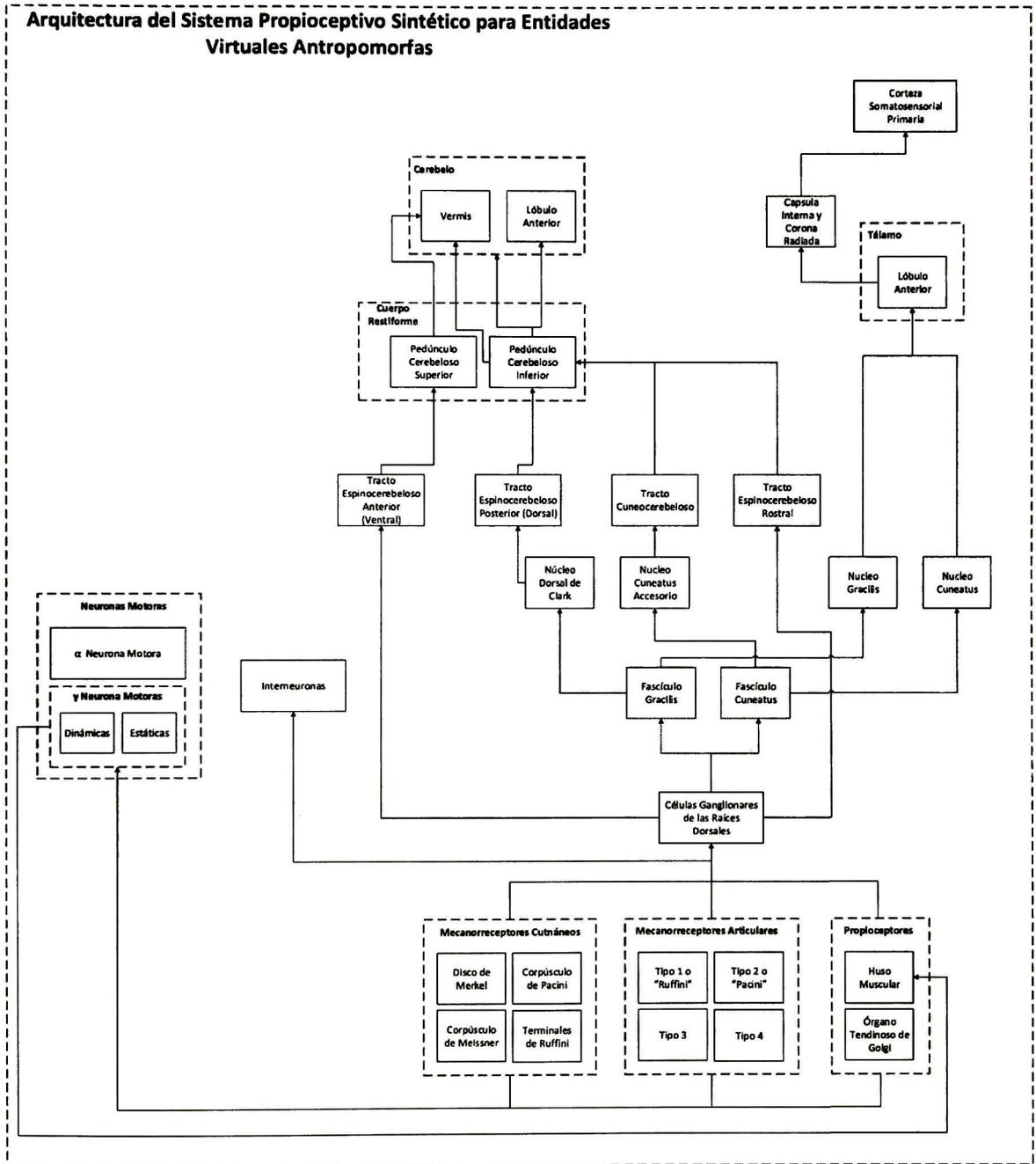
## 4.2. Aproximación Computacional

Como se menciono con anterioridad la propiocepción es el proceso de aporte de información al sistema nervioso central respecto a la posición y el movimiento [8]. Para poder lograr que una entidad virtual pueda realizar las funciones anteriormente mencionadas, se propone el modelo presentado en la Figura 4.1, el cual muestra los componentes que conforman el sistema propioceptivo y el paso de información que existe entre ellos.

La arquitectura mostrada en la Figura 4.1, contempla las estructuras que forman las vías de comunicación consciente e inconsciente de la propiocepción, las neuronas motoras que realizan el ajuste de sensibilidad a los husos musculares y los receptores sensoriales mecánicos. Para un mejor entendimiento de la arquitectura se abstraigo el comportamiento de los receptores sensoriales, los cuales son explicados y detallados en las siguientes subsecciones.

### 4.2.1. Mecanorreceptores

En esta sección del documento se explica el como fueron creados los modelos computacionales que recrean el comportamiento de estas neuronas especializadas en la detección de estímulos mecánicos. Como se explico en el Capítulo 2, este tipo de receptor sensorial se pueden clasificar de acuerdo a su localización en: cutáneos, articulares y propioceptivos.



**Figura 4.1: Arquitectura del Sistema Propioceptivo Sintético para Entidades Virtuales:** Este modelo fue creado en base a los fundamentos encontrados en la literatura del área de neurociencias, fisiología y biología.

Para la creación de los modelos matemáticos de los receptores se considera que todos estos mecanorreceptores comparten las siguientes características:

- $A$ , Área del campo receptivo<sup>1</sup>, medido en  $m^2$ ;
- $K$ , Constante de elasticidad del receptor, medido en  $ms/kg$ ; y
- $T$ , Umbral de intensidad, medido en  $N$ , i.e.,  $kgm/s^2$ .

Utilizando estas características un modelo para la generación potenciales acción [39] puede ser creado:

$$FPA(I) = \begin{cases} 0 & \text{si } I \leq T \\ \frac{K}{A}(I) & \text{si } I > T \end{cases} \quad (4.1)$$

Donde la frecuencia de los potenciales de acción  $FPA$  es medida en Hertz ( $Hz$ ),  $I$  es la intensidad del estímulo, es decir, la fuerza aplicada en el receptor, la cual es medida en Newtons  $N$ . Este modelo base puede ser utilizado para modelar el resto de receptores.

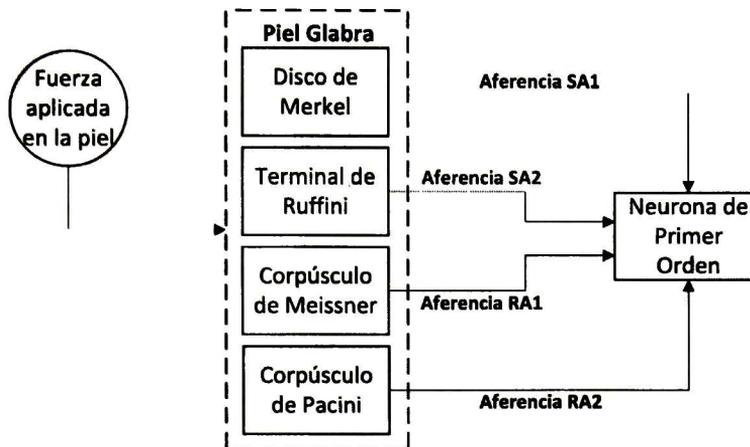
#### 4.2.1.1. Mecanorreceptores Cutáneos

Como ya es sabido los mecanorreceptores cutáneos permiten realizar la discriminación táctil, participan en la cinestesia y en el ajuste de la sensibilidad de los husos musculares. Los receptores cutáneos evocan su respuesta ante la aplicación de una fuerza en la piel, conceptualmente podemos esquematizar a estos receptores tal y como se muestra en la Figura 4.2.

Para dotar a las entidades virtuales con estos receptores el modelo base para mecanorreceptores es utilizado. Ya que existen dos tipos de mecanorreceptores cutáneos, a saber los de adaptación rápida y los de lenta, se debe hacer consideraciones adicionales. En el caso de los mecanorreceptores cutáneos de adaptación rápida es necesario

---

<sup>1</sup>Región en la que un receptor es sensible ante un estímulo



**Figura 4.2: Modelo de Mecanorreceptores Cutáneos:** Estos receptores sensoriales se encargan de informar la fuerza que se esta aplicando en la piel.

considerar una característica adicional [4], la cual denominamos factor de detección de intensidad  $D$ , medida en  $N$ , que denota la respuesta que tiene este tipo de mecanorreceptor ante los cambios de intensidad en el estímulo. Por lo tanto, es necesario determinar los cambios en el umbral de intensidad cuando una respuesta es producida. En el caso de los mecanorreceptores de adaptación lenta el modelo base se aplica directo.

Para poder utilizar el modelo base es necesario el cálculo de la intensidad del estímulo, para ello se proponen dos modelos para el caso de los mecanorreceptores cutaneos.

#### 4.2.1.1.1 Modelo Base Para el Cálculo de la Intensidad de los Mecanorreceptores Cutáneos

Con el análisis del comportamiento de los mecanorreceptores cutáneos, un modelo base para el cálculo de intensidad del estímulo puede ser hecho con las siguientes hipótesis:

1. El estímulo es aplicado sobre el centro del campo receptivo del receptor.
2. El peso del estímulo es distribuido uniformemente.
3. El estímulo es uni-dimensional.

4. La forma del campo receptivo de los mecanorreceptores es circular.

Con esto se define la siguiente ecuación:

$$I = (W + F), \quad (4.2)$$

Donde  $W$  es el peso del objeto que esta haciendo contacto en el centro del campo receptivo y  $F$  es la fuerza que se esta aplicando al objeto. Como la fuerza aplicada y el peso del objeto actúan en la misma dirección,  $W$  y  $F$  son sumados.

#### 4.2.1.1.2 Modelo General Para el Cálculo de la Intensidad de los Mecanorreceptores Cutáneos

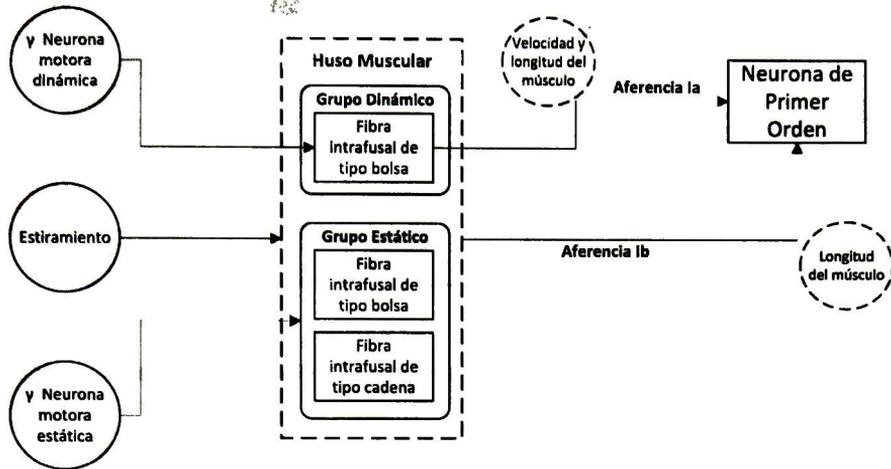
Las hipótesis consideradas en el modelo anterior limitan el uso que este pudieran tener, ya que en ambientes reales los estímulos tienen forma y estos no son aplicados directamente en el centro del campo receptivo. Para solventar este problema es necesario relajar las hipótesis 1 y 3. Por otro lado, las hipótesis 2 y 4 se pueden mantener ya que el considerar la distribución uniforme del peso que hace contacto con la piel y que el campo receptivo es circular simplifica el modelo.

Para este caso, la intensidad del estímulo que recibe el receptor sensorial  $I$  debe estar determinado por la forma y localización del estímulo que actuá sobre la piel. Para simplificar el modelo se considera que la piel es un plano y que la forma del estímulo que actuá sobre la piel puede ser determinado por medio de una función exponencial, por consiguiente se tiene:

$$I(x, y) = ae^{-c(x+y)^2} \quad (4.3)$$

Donde  $a$  y  $c$  son constantes y el par ordenado  $(x, y)$  denotan un punto en el plano. Por lo tanto, la Ecuación (4.1) puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$FPA(I(x, y)) = \begin{cases} 0 & \text{si } I(x, y) \leq T, \\ \frac{K}{A} (W + I(x, y)) & \text{si } I(x, y) > T, \end{cases} \quad (4.4)$$



**Figura 4.3: Modelo del Huso Muscular:** El estímulo que evoca una respuesta de este sensor son las eferencias provenientes de las gamma neuronas motoras que inervan a las fibras musculares intrafusales y el estiramiento de la fibra muscular en la cual se encuentra.

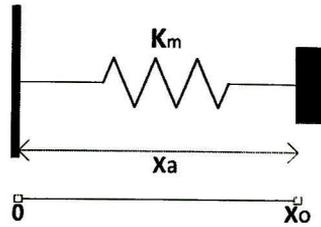
#### 4.2.1.2. Propioceptores

Los propioceptores son mecanorreceptores que se localizan en la fibras musculares intrafusales y en la unión que existe entre tendón y músculo esquelético. Son los responsables de informar a partes superiores del sistema nervioso central la longitud, fuerza y velocidad que experimentan los músculos. Este grupo de receptores sensoriales esta formado por los husos musculares y los órganos tendinosos de Golgi.

##### 4.2.1.2.1 Modelo Para Husos Musculares

El huso muscular es el receptor encargado de informar la longitud músculo y la velocidad en que esta cambia, la conceptualización de este mecanorreceptor es ilustrada en la Figura 4.3.

Con el fin de obtener un modelo matemático sencillo para el cálculo de la intensidad del estímulo del huso muscular, se propuso modelar al músculo en el cual el receptor se encuentra como un resorte (Figura 4.4), esto basado en el trabajo de Guiard [19]. Las características consideradas en el modelo son:



**Figura 4.4: Modelo de Músculo:** El huso muscular que se localiza dentro del músculo es estimulado por los cambios de longitud de las fibras musculares que conforman al músculo. Para calcular la fuerza que el músculo aplica en el receptor se considera el cambio de longitud que este tiene.  $K_m$  es la constante de elasticidad del músculo,  $x_o$  es la longitud en reposo del músculo y  $x_a$  es longitud actual del músculo, medido en  $m$ .

- $K_m$ , Constante de elasticidad del músculo, medido en  $ms/kg$ ;
- $\gamma_{adj}$ , Ajuste realizado por las  $\gamma$  neuronas motoras, medido en  $N$ , i.e.,  $kgm/s^2$ ;
- $x_o$ , Longitud en reposo del músculo, medido en  $m$ ; y
- $x_a$ , Longitud actual del músculo, medido en  $m$ ;

La esquematización del modelo muscular se encuentra en la Figura 4.4. Basados en el trabajo de [51] la fuerza aplicada en el receptor por modelo puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$I_M(x_a) = K_m x_a \quad (4.5)$$

La sensibilidad del huso muscular es regulada por la activación de las *gamma* neuronas motoras [49], este ajuste consiste en la contracción de los polos del receptor. La fuerza aplicada al receptor sensorial no es significativa en el monto total de fuerza aplicada por el músculo [45], pero si lo suficiente como para cambiar la frecuencia de potenciales de acción producidas por el receptor.

La fuerza que aplican las neuronas motoras en las fibras musculares esta en función de la frecuencia de disparo de las neuronas. El incremento de la fuerza aplicada puede ser descrito por una función exponencial [52]:

$$I_\gamma(f) = 1 - e^{-f} \quad (4.6)$$

Por lo tanto la intensidad del estímulo que recibe el huso muscular  $I$  esta determinado por dos factores:

- La fuerza que el músculo aplica sobre este;  $Y$
- Por el ajuste realizado por las  $\gamma$  neuronas motoras.

Entonces la intensidad del estímulo puede ser expresado de la siguiente manera:

$$I(x_a, f) = I_M(x_a) + I_\gamma(f) \quad (4.7)$$

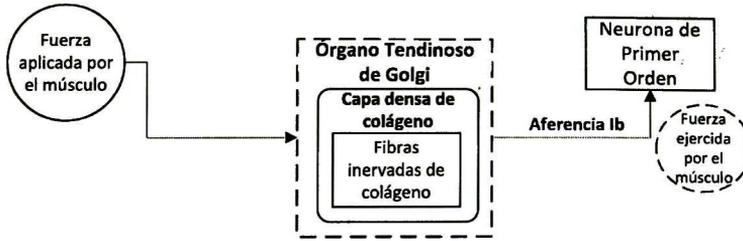
El huso muscular tiene otra característica importante, y esta es la doble funcionalidad que realiza, ya que es capaz de sentir el dinamismo y estatismo del músculo. Para poder recrear este comportamiento se considera al huso muscular como un receptor de adaptación rápida y lenta. Por lo tanto el factor de detección de intensidad  $D$ , es utilizado para controlar la aferencia encargada de reportar el dinamismo del músculo.

Con estos modelos, la Ecuación (4.1) puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$FPA(I(x_a, f)) = \begin{cases} 0 & \text{si } I(x_a, f) \leq T, \\ \frac{K}{A} (I(x_a, f)) & \text{si } I(x_a, f) > T \end{cases} \quad (4.8)$$

#### 4.2.1.2.2 Órgano Tendinoso de Golgi

El órgano tendinoso de Golgi es un receptor sensorial localizado en la unión del músculo-tendón. Su función es reportar la fuerza producida por la contracción muscular y por lo tanto participan en el mantenimiento de la postura y en proteger al músculo ante la aplicación de una fuerza excesiva debido a la contracción muscular. El comportamiento de este receptor es descrito en la Figura 4.5.



**Figura 4.5: Modelo del Órgano Tendinoso Golgi:** Estos receptores sensoriales se encargan de informar la fuerza que el músculo esta generando durante la contracción muscular.

Como se explico anteriormente (véase Modelo Para Husos Musculares) el músculo fue contemplado como un resorte simple y por lo tanto la fuerza ejercida por el músculo puede ser calculado como [52]:

$$I(x_a) = k_m(x_o - x_a), \quad (4.9)$$

El modelo general (Ecuación (4.1)) es utilizado para obtener el modelo para receptores del tipo órgano tendinoso de Golgi.

$$FPA(I(x_a)) = \begin{cases} 0 & \text{si } I(x_a) \leq T, \\ \frac{K}{A}(I(x_a)) & \text{si } I(x_a) > T \end{cases} \quad (4.10)$$

#### 4.2.1.3. Mecanorreceptores Articulares

Estos receptores sensoriales se localizan dentro de la articulación y en los ligamentos circundantes a ésta. Son los encargados de reportar el angulo, la velocidad y sentido de movimiento al que se encuentra la articulación.

Se conocen cuatro tipos de receptores articulares:

**Receptor Articular de Tipo 1:** También conocido como receptor articular del tipo Ruffini.

**Receptor Articular de Tipo 2:** Este receptor por su semejanza se le conoce con el nombre de receptor articular de tipo Pacinni.

**Receptor Articular de Tipo 3:** Se asemejan al órgano tendinoso de Golgi, pero su rol es aún desconocido.

**Receptor Articular de Tipo 4:** Este receptor sensorial pertenece al tipo de terminales libres, por lo cual su función es la de reportar estímulos nocivos.

Los receptores de tipo 1 y 2 son similares a los mecanorreceptores cutáneos y por lo tanto los modelos utilizados para los cutáneos pueden ser empleados para los articulares. De manera similar los receptores de tipo 3 pueden emplear los modelos de los propioceptores, aunque se desconozca su funcionamiento. Por último los receptores de tipo 4 no son contemplados ya que no participan en la propiocepción.

### 4.3. Conclusiones

En esta sección se presentó el modelo computacional del sistema propioceptivo para entidades virtuales antropomorfas. En este trabajo se detalla minuciosamente los modelos de la parte sensorial del sistema, esto debido a que los receptores sensoriales son el inicio de la percepción[17].

Al definir las entradas y las salidas de cada elemento del sistema, otros modelos pueden ser utilizados de manera transparente para la ejecución del sistema. Por ejemplo los modelos del huso muscular propuestos por McMahon(1984) [41] y por Mileusnic, Brown y Loeb [43], pueden ser utilizados.



# Capítulo 5

## Implementación y Resultados

### 5.1. Introducción

En este capítulo se presentan las herramientas utilizadas para la implementación de la arquitectura del sistema propioceptivo sintético y los receptores sensoriales. Para realizar la validación de la propuesta se presenta un caso de estudio en donde se compara el modelo genérico para mecanorreceptor contra datos de un experimento realizado en los mecanorreceptores cutáneos. Como segundo caso de estudio se presenta una extremidad de una entidad virtual antropomorfa, la cual es capaz de realizar un movimiento de extensión-flexión. Dicho movimiento es llevado a cabo por medio de la contracción muscular, esto tiene dos motivos: El primero es mostrar el como una entidad virtual puede ejecutar movimientos ante la aplicación de fuerza generada por la contracción de un músculo. Y como segundo motivo se busca ejemplificar de manera visual la activación de los propioceptores.

El capítulo está organizado de la siguiente manera:

**4.2 Herramientas Utilizadas para la Implementación:** En esta segunda sección se describen las herramientas que fueron utilizadas para implementar la propuesta computacional.

**5.3 Primer Caso de Estudio: Estudio de Mecanorreceptores:**

**5.4 Segundo Caso de Estudio:**

## 5.2. Herramientas Utilizadas para la Implementación

### 5.2.1. JMonkey Engine 3.0

JMonkey Engine<sup>1</sup> (jME) 3.0 es un motor gráfico de código libre para la programación de videojuegos en tres dimensiones [30]. A bajo nivel jME es un conjunto de librerías escritas en Java. Utilizando una capa de abstracción, jME permite el uso de diferentes API's de renderizado, las cuales se agregan en forma de plug-in. Para organizar los datos del juego jME utiliza una arquitectura tipo árbol, donde un nodo padre puede contener cualquier número de hijos y los hijos solo pueden tener un único padre. Esta forma de trabajar permite realizar el renderizado de todo aquello que es visible en la escena y dejando a un lado todo aquello que está fuera de escena. En otras palabras facilita la realización del *culling*.

### 5.2.2. Kuayolotl Middleware

Para poder llevar a cabo la comunicación de los diferentes elementos del modelo propuesto, se utilizó el middleware desarrollado por K. Jaime [24]. Esta herramienta facilita la programación del modelo, ya que provee mecanismos para la abstracción de los elementos que conforman el software y herramientas para el paso de mensaje. Como todo middleware esta herramienta nos provee una abstracción de programación, así como un enmascaramiento de la heterogeneidad subyacente de las redes, hardware, sistemas operativos y lenguajes de programación [9].

## 5.3. Primer Caso de Estudio: Estudio de Mecanorreceptores

Las pruebas fueron hechas en dos mecanorreceptores. El primero fue un disco Merkel, el cual es un receptor de adaptación lenta. El segundo mecanorreceptor fue el corpúsculo

---

<sup>1</sup>wikiBooks JMonkey Engine, <http://en.wikibooks.org/wiki/JMonkeyEngine:Beginner>

de Meissner, dicho receptor es de adaptación rápida. Ambos fueron probados utilizando datos obtenidos de los experimentos realizados por Lamotte [35]. El modelo base para mecanorreceptores cutáneos (Ecuación 4.4) fue utilizado debido a que el estímulo hecho en los experimentos puede ser considerado como uni-dimensional.

### 5.3.1. Mecanorreceptor de Adaptación Lenta: Disco de Merkel

La Figura 5.1 muestra los datos experimentales (Figura 5.1(a)) y los resultados obtenidos por el modelo base (Figura 5.1(b)). Debido a que el modelo es un función lineal los resultados de este no muestran los cambios abruptos que pueden ser observados en los resultados experimentales. Sin embargo, en ambos casos se muestra la misma cantidad de crestas y los valores máximos son muy aproximados. Los resultados también fueron validados por medio del cálculo de error aproximado, el cual es calculado por la diferencia de las desviaciones estándar de ambos resultados. Este análisis se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1: Tabla de Resultados Mecanorreceptor de Adaptación Lenta: Comparativa entre los resultados experimentales y los obtenidos del modelo**

	Experimental	Modelo Base
<b>Promedio</b>	11.50632911	19.5145557
<b>Desviación Estándar</b>	10.84609515	10.0762024
<b>Error</b>	0.7698928	

### 5.3.2. Mecanorreceptor de Adaptación Rápida: Corpúsculo de Meissner

Al igual que en el caso anterior, la Figura 5.2 muestra la comparativa gráfica entre los resultados obtenidos por el experimento y el modelo base, de igual manera, la Tabla 5.2 presenta el análisis numérico de los resultados. En este caso se vuelve a presentar la misma cantidad de crestas, a diferencia del caso anterior los datos si cambian de

manera abrupta, esto es debido a la consideración adicional para el caso de receptores de adaptación rápida.

**Tabla 5.2: Tabla de Resultados Mecanorreceptor de Adaptación Rápida:** Comparativa entre los resultados experimentales y los obtenidos del modelo

	<b>Experimental</b>	<b>Modelo Base</b>
<b>Promedio</b>	2.949367089	3.188676
<b>Desviación Estándar</b>	7.811724807	8.496103
<b>Error</b>	0.6843780	

### 5.3.3. Conclusiones

La razón por la cual las pruebas fueron realizadas en solo este tipo de mecanorreceptores es debido a la escasez de datos experimentales de los otros tipos de mecanorreceptores.

Con una diferencia aproximada de 0.7 en las desviaciones estándar entre los datos obtenidos por el modelo y los experimentales en ambas simulaciones, nos indica que el modelo base realiza una buena aproximación para la codificación de un estímulo mecánico.

## 5.4. Segundo Caso de Estudio: Movimiento de una Extremidad

En este segundo caso de estudio se realizó una extremidad tridimensional de una entidad virtual, esta extremidad es capaz de realizar un movimiento de flexión extensión por medio de la contracción muscular. Este brazo nos es útil para ejemplificar de manera visual la activación de los propioceptores.

Esta simulación es llevada a cabo por medio de tres aplicaciones, las cuales son comunicadas por el “**kuayolotl middleware**”.

#### 5.4. SEGUNDO CASO DE ESTUDIO: MOVIMIENTO DE UNA EXTREMIDAD 55

**Editor de Comandos Motor** Este software tiene el cometido de simular la activación de un pool de neuronas motoras. Con los programas motores establecidos en este software, la fuerza que va a ser aplicada por la contracción muscular puede ser manipulada.

**Simulación de un Brazo** La simulación del brazo fue realizada en un ambiente tridimensional. Este modelo está formado por tres componentes brazo, antebrazo y codo. El codo consta de un grado de libertad, el cual permite realizar un movimiento de flexión-extensión del antebrazo, el cual es realizado por la aplicación de fuerza mediante la contracción muscular del bíceps.

**Músculo Virtual** Esta aplicación implementa el modelo del huso muscular y el órgano tendinoso de Golgi. La intención de esta aplicación es mostrar de manera visual la activación de los receptores y realizar el ajuste de los parámetros.

La Figura 5.3, muestra una simulación de la aplicación. El brazo es contraído por la activación de las neuronas motoras, esto ocasiona que los receptores sensoriales sean estimulados y muestren una respuesta. Las aferencias producidas por los receptores son enviadas al resto de estructuras que conforman el sistema propioceptivo, los cuales se encargan de proveer información a el resto de funcionalidades cognitivas que utilicen un componente que se encuentre en este modelo.

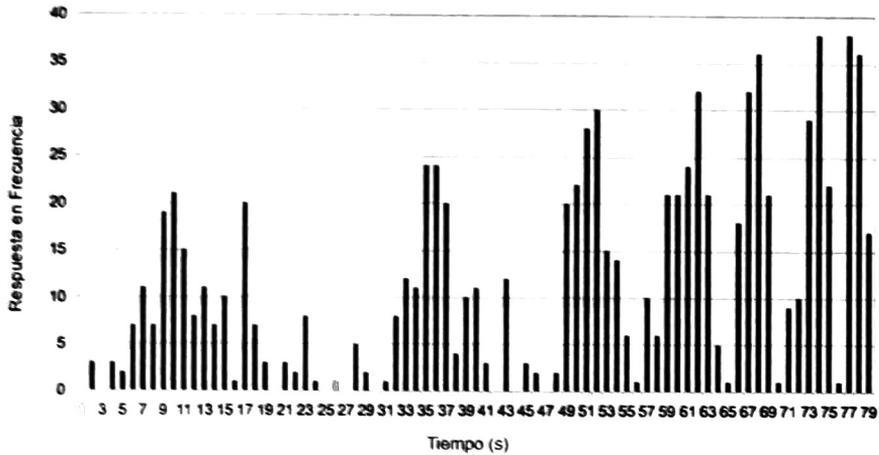
##### 5.4.1. Conclusiones

Las tres aplicaciones mostradas en esta sección nos permiten controlar la contracción del músculo y por lo tanto la fuerza que está siendo aplicada en los receptores sensoriales. La falta de datos experimentales impide la validación de los modelos propuestos para los propioceptores. Por otro lado, estas herramientas permitirán ajustar y configurar los parámetros de los receptores para su posterior uso en la creación de un sistema muscular para entidades virtuales.

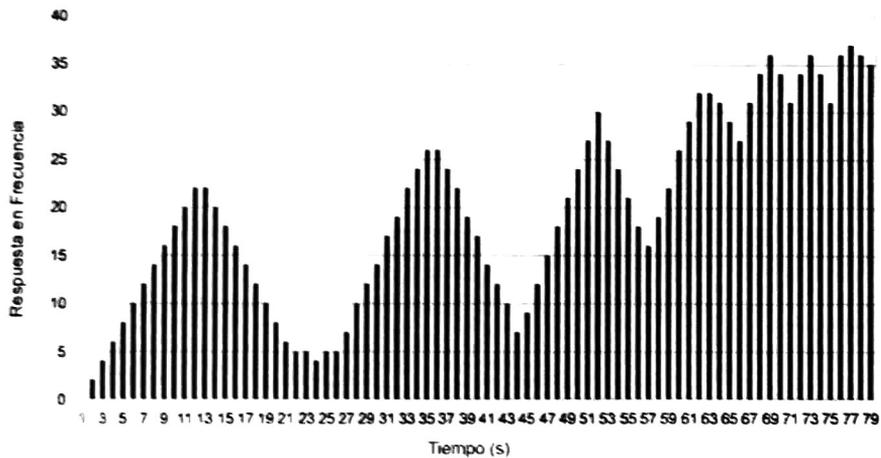
Una observación en la simulación es el resultado de la aferencia Ia del huso muscular, el cual siempre muestra 0, esto es debido a la rápida adaptabilidad supuesta en la

realización de los modelos y como se establecieron tiempos largos para el cambio de fuerza el receptor se adapta.

#### 5.4. SEGUNDO CASO DE ESTUDIO: MOVIMIENTO DE UNA EXTREMIDAD 57

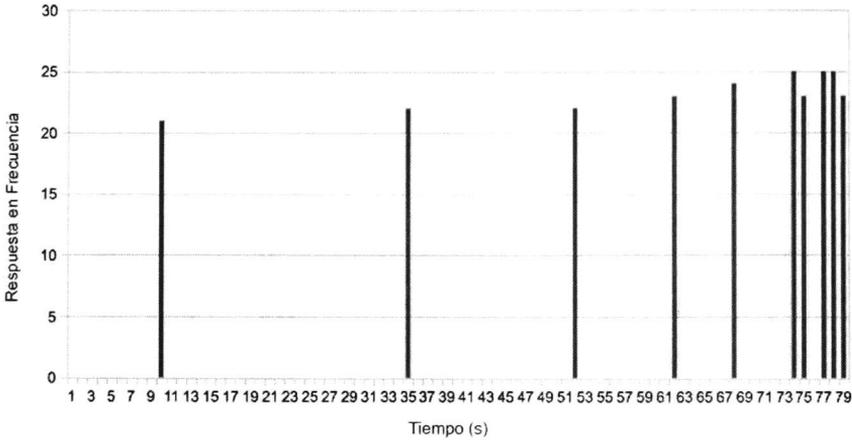


(a) Resultados obtenidos por Lamotte [35]

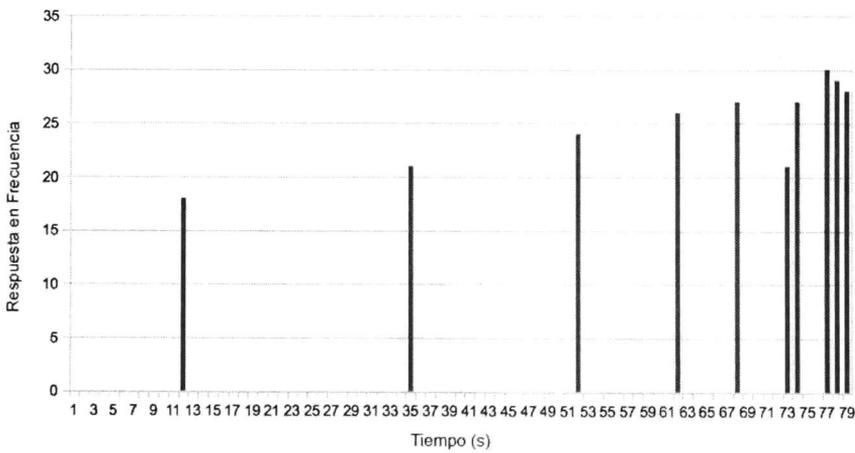


(b) Resultados obtenidos en el modelo

**Figura 5.1: Comparativa de Resultados Mecanorreceptor de Adaptación Lenta:** Gráficas que muestran los resultados experimentales y los obtenidos del modelo base para mecanorreceptores cutáneos. El receptor utilizado para la prueba es el disco de Merkel.



(a) Resultados obtenidos por Lamotte [35]

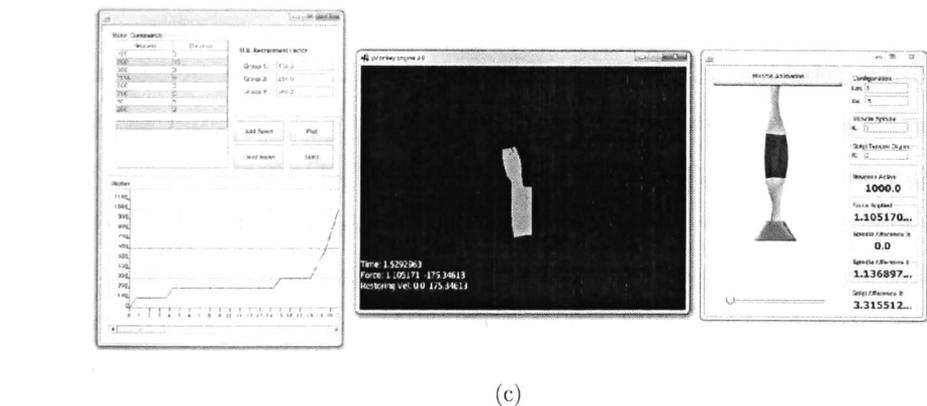
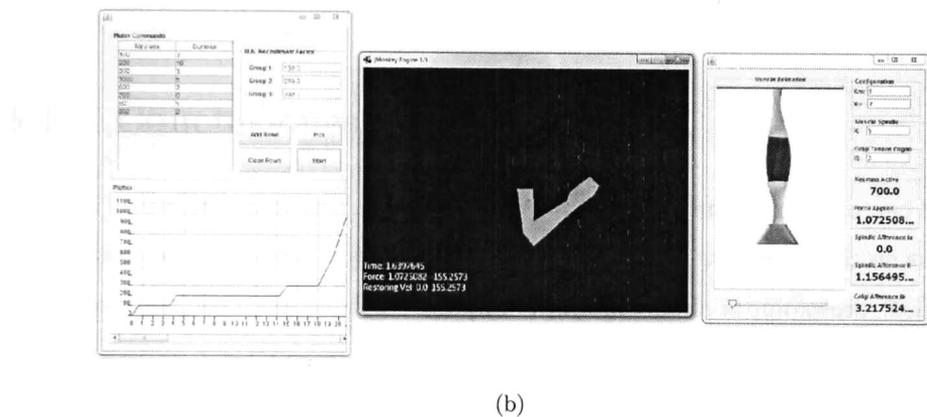
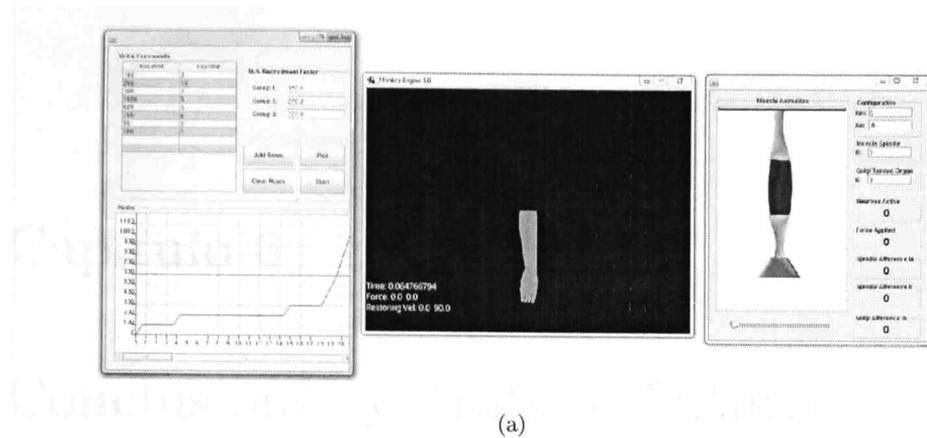


(b) Resultados obtenidos en el modelo

**Figura 5.2: Comparativa de Resultados Mecanorreceptor de Adaptación Rápida:**

Gráficas que muestran los resultados experimentales y los obtenidos del modelo base para mecanorreceptores cutáneos. El receptor utilizado para la prueba es el corpúsculo de Meissner.

#### 5.4. SEGUNDO CASO DE ESTUDIO: MOVIMIENTO DE UNA EXTREMIDAD 59



**Figura 5.3: Simulación de un Brazo Virtual:** Esta figura muestra el desarrollo de una simulación para la activación de los propioceptores. La imagen 5.3(a) nos muestra el estado inicial de la simulación. Las imágenes 5.3(b) y 5.3(c) muestran la evolución de la simulación.

# Capítulo 6

## Conclusiones y Trabajo Futuro

### 6.1. Conclusiones

Esta investigación se realizó con el propósito de crear un mecanismo que le permitiera a una entidad virtual antropomorfa saber la posición y movimiento de su cuerpo. Esto con el propósito de ayudar a cumplir el objetivo de la arquitectura *Kuayolotl*, el cual consiste en dotar a entidades virtuales con habilidades cognitivas similares a las de los humanos con el fin de que dichas entidades puedan realizar comportamientos creíbles de manera autónoma.

La arquitectura del sistema propioceptivo sintético para entidades antropomorfas propuesto en este trabajo considera a la propiocepción como una función que emerge de la sinergia de todos los componentes que integran el sistema. Esta arquitectura contempla los receptores sensoriales mecánicos que están localizados en la piel, articulaciones y músculos. Dichos sensores son los encargados de informar la posición, fuerza y velocidad en las que se encuentran las diferentes extremidades y partes del cuerpo. Para que esta información sea posteriormente utilizada por otras estructuras, se considero en el modelo la inclusión de las vías de comunicación por las cuales la información propioceptiva fluye. Esto se realizó con el propósito de identificar las estructuras que utilizan dicha información propioceptiva para realizar algún comportamiento como lo puede ser el mantenimiento de una postura. Las neuronas motoras fueron consideradas por el motivo del ajuste realizado por estas hacia la sensibilidad del huso muscular.

Las ventajas principales de esta propuesta surge de las bases en las cuales el modelo esta inspirado, entre algunas de ellas podemos destacar las siguientes:

- Cada elemento que forma la propuesta representa un componente del sistema nervioso central, por lo tanto integrar funciones cognitivas diferentes se hace de manera simple, ya que solo es cuestión buscar que componentes comparten en común y comunicarlos.
- Las neurociencias nos explican como una función cognitiva compleja esta formada por la interacción de componentes con comportamientos simples. Además de desmenuzar el comportamiento de una función cognitiva, las neurociencias nos explican el como un componente del sistema nervioso central funciona desde el punto de vista de entrada-proceso-salida.

Al especificar el tipo de aferencia que producen los componentes del sistema, modelos que cumplan el comportamiento, entradas y salidas pueden ser implementados sin afectar el comportamiento de las demás estructuras.

- La simpleza del comportamiento de los componentes hace que la implementación y ejecución del modelo sea rápida.
- La arquitectura puede ser implementada de manera distribuida, ya que así fue modelada.

Este trabajo puede ser visto como el comienzo de un sistema motor para entidades virtuales antropomorfas, el cual utilice la información provista por el sistema propuesto en este trabajo para la realización, planeación y coordinación de movimientos. Esto permitiría crear entidades virtuales que puedan interaccionar en ambientes virtuales complejos, tales como mundos tridimensionales.

## 6.2. Trabajo Futuro

El modelo propioceptivo para entidades virtuales propuesto en este trabajo contempla unicamente el proceso de aporte de información propioceptiva del torso y extremi-

dades. Sin embargo la propiocepción también esta presente en el rostro y en los ojos. Sin lugar a duda para lograr la meta de obtener comportamientos creíbles en entidades virtuales, hace necesario crear los modelos que representen el paso de información propioceptiva de dichas áreas.

El sistema propioceptivo es un elemento importante para el buen funcionamiento del sistema motor, esto debido a las acciones que el sistema motor realiza en base a la información propioceptiva, dichas acciones comprenden tareas, tales como: planeación motora, corrección de movimientos al vuelo y aprendizaje de movimientos. Por lo tanto un aporte importante sería la integración del modelo propuesto con el de un sistema motor que este basado en el funcionamiento neurológico.



# Apéndice A

## Publicaciones

En esta sección se anexan las publicaciones realizadas durante el desarrollo de la investigación, las cuales son:

***Cutaneous Mechanoreceptor Simulator***: En este artículo se describe el diseño e implementación de un simulador de mecanorreceptores cutáneos. Esta publicación fue sometida, aceptada y presentada en “3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom2012”, Kosice, Eslovaquia del 2 al 5 de Diciembre del 2012.

**Modelo Computacional del Sistema Propioceptivo**: En este artículo se describe un modelo computacional del sistema propioceptivo. El modelo se sustenta en los resultados y aportaciones realizados en las áreas de la neurociencia, biología y fisiología. Esta publicación fue sometida, aceptada y presentada en la “32 Jornadas Médicas. La Ciencia como: Arte, Ciencia, Humanismo e Investigación”, Toluca, Ciudad de México, Febrero 2013.

***Movement of a Single Limb with a Single Muscle***: En esta publicación se presenta la implementación de músculo virtual, el cual es activado por el envío de potenciales de acción. La fuerza generada por la contracción muscular realiza el movimiento de una extremidad. Esta publicación fue sometida y aceptada en “17th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems”, Kitakyushu, Japón del 9 al 11 de Septiembre del 2013.

***Reverse Engineering of the Human Hand:*** En este artículo se describe el diseño e implementación de un brazo robot, el cual trata de recrear el comportamiento de la mano humana. Dicho brazo es controlado por una arquitectura que recrea el funcionamiento de las partes inferiores del sistema motor. Esta publicación fue sometida y aceptada en “Cyberworlds 2013”, Yokohama, Japón del 21 al 23 de Octubre del 2013.

# Cutaneous Mechanoreceptor Simulator

Daniel Madrigal, Gustavo Torres and Félix Ramos  
Computer Sciences  
CINVESTAV Guadalajara  
Jalisco, México  
Email: {dmadrigal,gtorres,framos}@gdl.cinvestav.mx

Lea Vega  
Computer Systems Engineering  
Technological Institute of Tepic  
Nayarit, México  
Email: leavega@hotmail.com

**Abstract**—This paper describes the design and implementation of a software system, which is capable of simulating action potentials frequency produced by four different types of cutaneous mechanoreceptors. For the production of action potentials, the system uses a mathematical model based on studies on the fields of neurophysiology and neuroscience. This model was validated by a comparison between simulator results versus experimental data found in a research work on neurophysiology. The obtained approximation error let us suppose that the simulator results encode the applied stimulus satisfactorily. The development of the presented tool is a first phase of a project that aims to develop a somatosensory system, particularly tactile and proprioceptive. In the last phase, the whole system would be implemented on a cognitive architecture for virtual avatars.

## I. INTRODUCTION

Humans and other animals are able to perceive the world through sensory receptors. These receptors allow us to collect different kinds of information. For example, the humans perceive environmental sounds through auditory receptors, see the world through visual receptors, or distinguish the shape, and other qualities, of an object via the tactile receptors of the somatosensory system.

This paper describes a model of tactile receptors, based on neuroscience studies, which has been implemented as a computer software system. This system simulates the activity of the main receptors involved in tactile discrimination, and will let us be able to study the effect of receptors stimulation with either one-, two- or three-dimensional tactile stimuli. In the future, we plan to create a virtual avatar, which will use synthetic receptors to recreate the sense of touch in a similar way in which animals do.

Out of the virtual environments, there exist some work in robotics that are biologically inspired, e.g. Romano et al. [1] proposed a novel model for grasping which is used in techniques similar to those of humans for taking, manipulating and putting down an object. Another important example is the iCub project [2] which uses a piezoelectric sensors array to recreate the skin of the fingertips in the hand [3]. Within the iCub project, Cannata et al. [4] developed a skin sensitive to mechanical stimuli that is embedded on the robot skin.

An avatar that has the sense of touch would be able to make tactile discrimination, which is used by the abilities of grasp, reach and recognize objects. In terms of cognitive [5] infocommunication, we can implement an intra-cognitive communication of sensor-sharing type between the avatars

TABLE I  
DIFFERENT MODALITIES AND STIMULUS ENERGY TYPES (EXTRACTED FROM [6])

Modality	Stimulus energy
Vision	Light
Hearing	Sound
Balance	Gravity
Somatic senses	
Touch	Pressure
Proprioception	Displacement
Temperature sense	Thermal
Pain	Chemical, thermal or mechanical
Itch	Chemical
Taste	Chemical
Smell	Chemical

through somatic senses. On the other hand, as it will be explained in the future work section, it is possible to create an inter-cognitive communication of the same type between a human user and the virtual avatar using tactile displays technologies.

The document is organized as follows: section II describes the theoretical basis used to design the simulator; section III describes the model and implementation of the simulator; section IV presents the results and comparison of two tests against experimental results obtained from a neuroscience article; and finally in section V, we present the conclusion of the work and discuss future uses of the simulator.

## II. CUTANEOUS MECHANORECEPTOR STUDY

### A. Sensation and Perception

Sensation is the ability that living organisms have to capture environmental stimuli. Sensory receptors provide sensation, and they respond to different energy types [6]. Those responses are called modalities and are classified as shown in Table I.

Once the environmental information has been captured, it is sent through receptors fibers to the central nervous system. Afferent information is then processed through different brain structures, these are specialized to respond to the stimulus modality in order to produce environment representations, called perceptions. Finally, higher-order cortical structures use perceptions to generate all kinds of behaviors, such as walking, eating or thinking [7].

In this research work, we studied the modality of touch, so we must explain the function of somatosensory system.

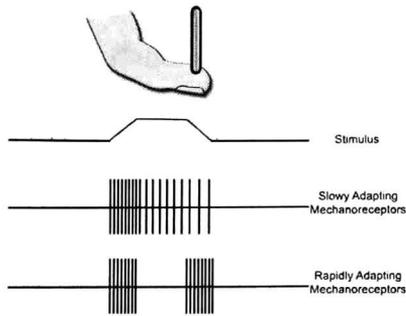


Fig. 1. Action potentials produced by a stimulus in a slowly adapting mechanoreceptor and a rapidly adapting mechanoreceptor.

## B. Somatosensory System

The somatosensory system provides the ability to detect all stimuli that make contact within the body skin. Strictly speaking, the somatosensory system is in charge of reporting the events that take place in the skin, joints and muscles. This complex task is performed by two subsystems: one is responsible for detecting mechanical stimuli, and the other in charge of detecting noxious and thermal stimuli [8] [9].

Each somatosensory subsystem has specialized cells for the detection of different stimuli, these cells are called sensory receptors and depending on the energy type (either mechanical, thermal or chemical) of the stimulus which they respond, are classified as follows [8] [9]:

- Mechanoreceptors: Mechanic stimuli sensitive.
- Nociceptors: Noxious stimuli sensitive.
- Thermoreceptors: Temperature sensitive.

## C. Mechanoreceptors

The mechanoreceptors are sensory receptors sensitive to mechanical stimuli (eg. pressure, stretching and vibration). In glabrous skin, four types of mechanoreceptors that provide tactile feedback have been found: Merkel discs, Meissner and Pacinian corpuscles, and Ruffini terminals. These mechanoreceptors are also known as cutaneous mechanoreceptors [10] [11].

Depending on their adaptation to stimuli, mechanoreceptors can be classified into two classes or groups. The first group are the rapidly adapting mechanoreceptors, i.e., the action potential is produced only at the beginning and the end of a stimulus; also, it is produced if a variation in the intensity of the stimulus occurs. The second group are the slowly adapting mechanoreceptors, i.e., they produce action potentials constantly during the stimulus presence [12] [9].

The characteristics of each cutaneous mechanoreceptors give them the capability of being sensitive to different stimuli deformations. These are described in Table II.

Cutaneous mechanoreceptors are useful for specific tasks: the Merkel discs, because of their spatial resolution, are capable to detect textures details, which allows blind people to read braille writing. On the other hand, Meissner corpuscles have

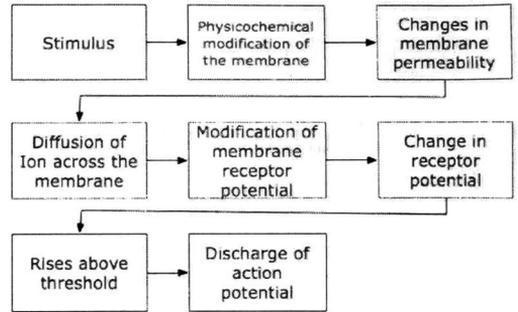


Fig. 2. Sensory transduction process, which takes a stimulated receptor.

the capability to detect rapid changes in the skin, which makes them useful for objects manipulation. Pacinian corpuscles can sense high frequency vibrations, which makes them useful for the perception of distant events that occur on when the hand is holding an object. Finally, Ruffini terminals, which have not been broadly studied due to they only have been found in humans, but neurophysiological and psychophysiological studies have identified that Ruffini terminals have a big role in the detection of the direction of the force caused by skin stretching [10].

## D. Sensory Transduction

The skin suffers deformations if a force is exerted on it, and cutaneous mechanoreceptors are altered too. This deformations cause an opening in the ion channel of its membrane, causing a depolarization. Then, if the stimulus is strongly enough, an action potential is generated and it is sent to the central nervous system. This process, where mechanoreceptors transform the mechanical energy into action potentials, is known as sensory transduction [13] and its phases are shown in Fig. 2.

## E. Coding of Sensory Transduction

All sensory systems convey four types of information when they are stimulated [6]:

- Modality: It refers to the class where a stimulus belongs, this is determined by the type of energy transmitted and the receptor specialized to react to that type of energy.
- Location: Refers to the position in space and the size of the stimulus, this information is given by sensory receptors active during stimulation.
- Intensity: The stimulus intensity is encoded in the frequency of discharge of each receptor, in other words, it indicates the total energy received by the receptor. The lowest stimulus intensity that a single receptor can detect, is called sensory threshold.
- Timing: It is the amount of time that passes after the receiver begins to respond to the stimulus until it stops.

In sense of touch, the modality, location, intensity and timing are given by the activation of cutaneous mechanoreceptors. Fig. 3 shows a graphic representation of this.

TABLE II  
PROPERTIES OF CUTANEOUS MECHANORECEPTORS (COMPILED FROM [10])

Mechanoreceptor	Quantity	Function	Receptive field diameter	Spatial resolution
Merkel Disk (SAI)	About 100 per $\text{cm}^2$ at the fingertip	Sensitive to edges, curvatures and points.	2 - 3 mm.	0.5mm
Meissner Corpuscle (RA)	About 150 per $\text{cm}^2$ at the fingertip	Detection of slips and forces that occur when an object is held in the hand.	3 - 5 mm.	Poor spatial resolution.
Pacinian Corpuscle (PC)	About 350 at the fingertip and 800 in the palm.	Perception of high frequency stimuli.	May include an entire hand.	Almost no spatial resolution.
Ruffini Endings (SAII)		Detection of skin stretching.	Five times larger than Merkel Disk receptive field.	-

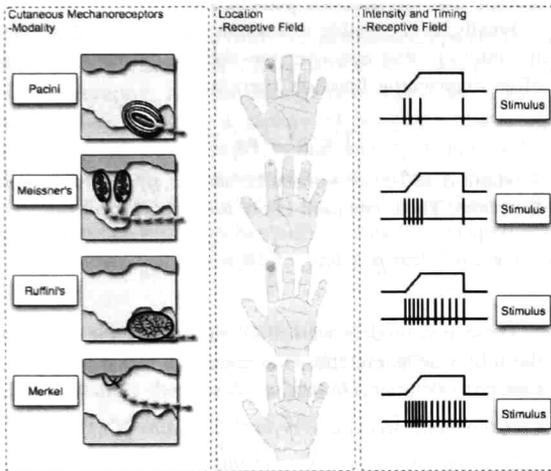


Fig. 3. Modality, location, intensity and timing of the cutaneous mechanoreceptors (extracted from [6]).

### F. Action Potentials

An action potential is an electrical signal resulting from transduction in sensory receptors (Fig. 4 exemplifies the production cycle of the action potentials). They propagate information between tissues. An action potential can be generated by different types of body cells, but the more active are the cells of the peripheral nervous system. The most important characteristics of the action potentials are [14]:

- An action potential can be generated: the intensity of the stimulus should be at least equal to the sensory threshold of the receptor that is being stimulated.
- An action potential is a propagated response: it does not decrease in size during the transmission.
- Action potentials doesn't change their size: independently of the intensity of the stimulus that is generating the response. The only thing that changes is the frequency at which they are generated.
- There exists an upper limit to the number of action potentials that can be generated, this is because of the

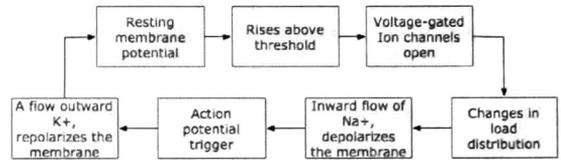


Fig. 4. Production cycle of an action potential.

refractory period.

Each action potential produced has three phases [15], which are (see Fig. 5):

- Prepotential period: Time interval in which the stimulus is not enough to overcome the threshold.
- Depolarization period: Time interval in which the action potential occurs.
- Refractory period: Time interval in which the cell has lower excitability than normal. This interval is divided in two:
  - Absolute refractory period: The cell excitability is completely lost.
  - Relative refractory period: The cell has a reduced excitability but may trigger an action potential.

In the following section the design and implementation of the simulator based on the above evidence are explained.

### III. SIMULATOR DESIGN AND IMPLEMENTATION

Two mathematical models of mechanoreceptors activation are the core of the simulator. In order to develop the models, it is necessary to determine which are the main characteristics of mechanoreceptors:

- $A$ , as the receptive field area, measured in  $\text{m}^2$ ;
- $K$ , as the elasticity coefficient, measured in  $\text{ms/kg}$ ; and
- $T$ , as the intensity threshold, measured in  $N$ , i.e.,  $\text{kgm/s}^2$ .

These characteristics are shared among the two groups of mechanoreceptors. Moreover, in the case of rapid adaptation mechanoreceptors, an additional characteristic is needed [16]. The detection intensity  $D$ , measured in  $N$ , denotes the response (unique in this kind of mechanoreceptors) to stimulus

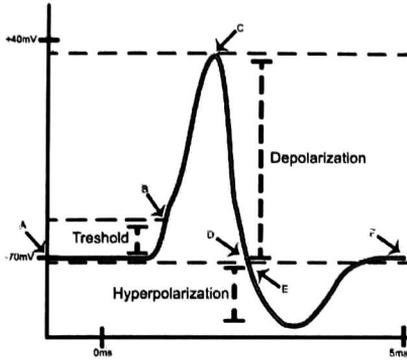


Fig. 5. Schematic of an action potential. From A to B the prepotential period occurs. From B, C and D the depolarization period occurs and from E to F the refractory period occurs.

intensity changes. Therefore, it is necessary to determine a intensity threshold change when a response is produced.

The action potentials are characterized to be produced under the all-or-nothing rule [7]. Hence, the only way to determine the intensity and duration of an stimulus is done through the study of the variation in action potentials frequency.

#### A. Base Model

From the analysis of the mechanoreceptors behavior, a base model for the generation of action potentials is made. First of all, four assumptions need to be considered:

- 1) The stimulus is applied over the center of the receptive field.
- 2) The stimulus weight is uniformly distributed.
- 3) The stimulus is uni-dimensional.
- 4) The shape of the receptive field of the mechanoreceptor its circular.

Then, the next equation is defined:

$$F = \frac{K}{A} (W + I), \quad (1)$$

where the action potentials frequency  $F$  is measured in seconds ( $s$ ),  $W$  is the weight of the object that is making contact in the center of the receptive field, and  $I$  is the pressure force that is being applied to the object. As either the object and the intensity act in the same direction,  $W$  and  $I$  are summed up.

#### B. A More General Model

If we consider the future applications of the simulator, it is necessary to overcome at least the assumptions 1 and 3. That is because in real environments, the stimulus are not applied directly to the center of the receptive field, and these have volume and shape. On the other hand, assumptions 2 and 4 are kept because it is possible to uniformly distribute an objects' weight, and a circular receptive field simplifies the model.

In this case, the stimulus intensity  $I$  is determined by the shape of the stimulus. Hence, the intensity should depend on

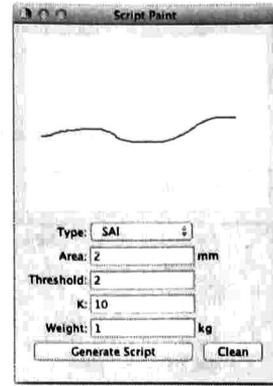


Fig. 6. Stimulus Editor allows the user to draw a stimuli.

the skin position where the stimulus acts. For simplicity we assume that the skin is a plane.

Finally, it is possible to assume that the stimulus shape, or the intensity that acts over the skin, is determined by means of an exponential function, therefore:

$$I(x, y) = ae^{-c(x+y)^2} \quad (2)$$

where  $a$  and  $c$  are constants, and  $(x, y)$  denotes a point in the plane. Then, equation (1) is rewritten as follows:

$$F(x, y) = \frac{K}{A} (W + I(x, y)). \quad (3)$$

These two models were implemented on the simulator. In the following paragraphs, the simulator input, user interface, data processing and output are described.

#### C. Cutaneous Mechanoreceptor Simulator (CMS)

1) *User Interface:* The user interface of the system consist of the following features that lets the user to:

- load an XML file;
- graphically design the stimuli in the stimulus editor;
- visualize the current stimuli;
- visualize main aspects of the current mechanoreceptor and the simulation;
- visualize the mechanoreceptor responses in a graph; and
- store data in a text file.

In the stimuli editor, the user must draw the stimuli (using mouse pointer) and determine main characteristics of the mechanoreceptor (see Fig. 6).

2) *Input:* Simulators' input is an XML file that describes the characteristics of a mechanoreceptor, the stimuli intensities variations (the shape), and the weights distribution along the stimuli.

3) *Action Potential Generator:* Intensities and weights are extracted from the stimuli and the computation of action potentials per second is made. The process is performed using the proposed models. Next section explains in which situations the base model is more suitable to use.

TABLE III  
COMPARATIVE CMS VS EXPERIMENT

	Experiment	CMS
Mean	11.50632911	19.5145557
Standard Deviation	10.84609515	10.0762024
Error	0.7698928	

4) *Output*: In every second of simulation, the action potentials frequency is plotted down over the user interface. Once the simulation ends, it is possible to store the output, which is a frequency array, into a text file.

Following section shows the results of two comparisons made over real experimental data.

#### IV. CMS SIMULATION RESULTS

CMS tests were made over two mechanoreceptors. The first one was a Merkel disk (SAI) which is a slowly-adapting mechanoreceptor, and the second one was a Meissner corpuscle (RA) which is a rapidly-adapting mechanoreceptor. Both were tested using experimental data inputs obtained from [17]. Base model was possible to use due to stimuli can be considered as uni-dimensional. The tests were done in these type of mechanoreceptors because we only found experimental data of those, and we suppose that the rest have a similar behavior.

##### A. Slowly-Adapting Mechanoreceptors

Fig. 7 shows the experimental data (Fig. 7a) and the results obtained from the simulator (Fig. 7b). Due to the base model was used, response frequency behaves continuously, i.e., abrupt changes seen on experimental graph were not imitated by the model. However, ridges in both results are the same in quantity, and maximum response value in each one is very approximated. For a numerical evaluation of model validity, an approximation error was calculated, which is denoted by the difference between standard deviation of both results. Such analysis is shown in Table III.

A next step in the validation of the proposed model would be the comparison of the results obtained from two- or three-dimensional tests, using the general model. This is achievable, but our conclusion is that an error of  $\approx 0.7$  indicates a very good approximation, considering that the base model is completely linear. In other words, results produced by the base model encode satisfactorily the stimuli and can be used in future phases of the whole project.

##### B. Rapidly-Adapting Mechanoreceptors

As in the previous stage, Fig. 8 shows the data of the experiment and the results obtained from the CMS, as well as, Table IV presents the analysis made. As in SA test, data ridges are the same in quantity, but data changes abruptly because the simulated mechanoreceptor is a rapidly-adapting one. Furthermore, the results prove that approximation error was smaller than in SA test. Similarly, the error is sufficiently small to let us suppose that simulator output encodes an stimulus in an approximate way as real mechanoreceptors do.

TABLE IV  
COMPARATIVE CMS VS EXPERIMENT

	Experiment	CMS
Mean	2.949367089	3.188676
Standard Deviation	7.811724807	8.496103
Error	0.6843780	

In the following section, some conclusions are shown and remaining phases to develop the whole synthetic somatosensory system are listed.

#### V. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The proposed software system simulates action potentials frequency produced by stimulation of cutaneous mechanoreceptors. This production uses a mathematical model based on studies about mechanoreceptors' behavior.

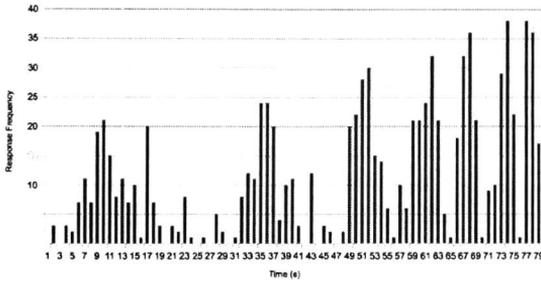
In the simulator we reproduced the stimulation made on a real experiment. The simulator achieved favorable results. As discussed above, the size of the approximation error let us suppose that the simulator encodes satisfactorily the applied stimulus. Thus, we have obtained a tool that encodes in frequency responses the shape, weight and intensity of an stimulus.

As mentioned before, our research group pretends to develop a cognitive architecture capable of simulate particular abilities of the human being, in order to show more believable behaviors. The tool presented in this paper is the very first phase on the development of a synthetic somatosensory system, particularly tactile and proprioceptive. The following phases will be the study and implementation of the communication between mechanic receptors and the central nervous system through the spinal cord; then, the model design of low-level processing in the brainstem to support some behaviors like movement; later on, the development of the processes on neocortex that support a great variety of behaviors like tactile discrimination, visual navigation and motor planning, among others. It is important to note that when the somatosensory system is complete, it will be integrated on a cognitive architecture.

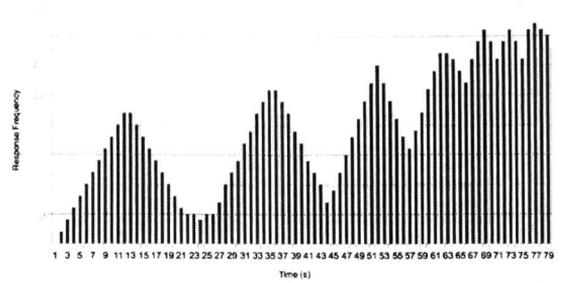
The models of mechanoreceptors proposed in this paper are currently being used in the development of a virtual skin using tactile displays. This will let us be able to make an inter-cognitive communication between the avatar and the user (human), with the purpose of providing a virtual test subject which can be stimulated by different kinds of stimuli and will provide us a data set of the action potentials produced by those. At first, this will be useful to make a more deep analysis of the proposed general model. Then, we can use the interaction to stimulate the avatar in order to see, e.g., an emotional behavior.

#### ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank CONAcYt for their financial support, and Vanesa Meraz for her work in the stimulus editor.

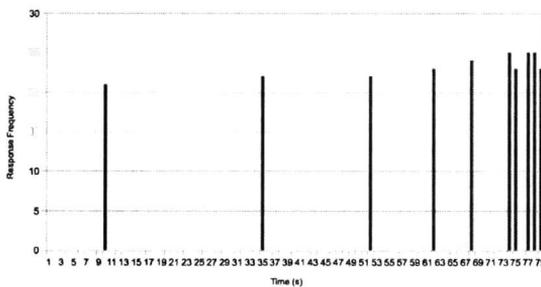


(a) Experiment

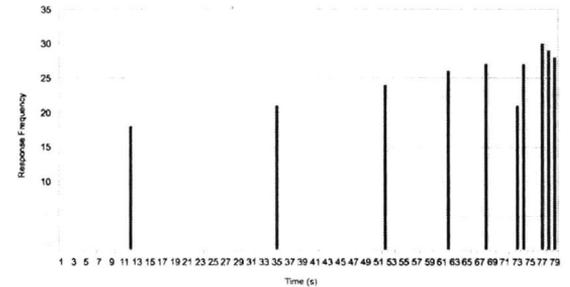


(b) CMS

Fig. 7. Slowly-adapting mechanoreceptor experiment and simulation results.



(a) Experiment



(b) CMS

Fig. 8. Rapidly-adapting mechanoreceptor experiment and simulation results.

## REFERENCES

- [1] J. M. Romano, K. Hsiao, G. Niemeyer, S. Chitta, and K. J. Kuchenbecker, "Human-inspired robotic grasp control with tactile sensing," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 6, December 2011, pp. 1067–1079.
- [2] G. Sandini, G. Metta, and D. Vernon, "Robotcub: an open framework for research in embodied cognition robotcub: An open framework for research in embodied cognition," in *2004 4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, vol. 1, November 2004, pp. 13–32.
- [3] R. S. Dahiya, G. Metta, and M. Valle, "Development of fingertip tactile sensing chips for humanoid robots," in *IEEE International Conference on Mechatronics*, April 2009, pp. 1–6.
- [4] G. Cannata, M. Maggiali, G. Metta, and G. Sandini, "An embedded artificial skin for humanoid robots," in *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, August 2008, pp. 434–438.
- [5] P. Baranyi and A. Csapo, "Definition and synergies of cognitive info-communications," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 9, no. 1, pp. 67–83, 2012.
- [6] E. P. Gardner and J. H. Martin, *Principles of Neural Science*, 4th ed. McGraw-Hill, 2000, no. 21, ch. Coding of Sensory Information, pp. 412–430.
- [7] E. R. Kandel, *Principles of Neural Science*, 4th ed. McGraw-Hill, 2000, no. 2, ch. Nerve Cells and Behavior, pp. 20–36.
- [8] D. Purves, *Neuroscience*, 3rd ed. Sinauer Associates Incorporated, 2004, no. 9, ch. The Somatic Sensory System, pp. 189–208.
- [9] E. P. Gardner, J. H. Martin, and T. M. Jessell, *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill, 2000, no. 22, ch. The Bodily Senses.
- [10] K. O. Johnson, "The roles and functions of cutaneous mechanorecep-tors," *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 11, no. 4, pp. 455–461, August 2001.
- [11] J. Zelena, *Nerves and Mechanoreceptors: The Role of Innervation in the Development and Maintenance of Mammalian Mechanoreceptors*, 1st ed. London, UK: Chapman & Hall, 1994.
- [12] Vega-Bermudez and K. O. Johnson, "Sa1 and ra receptive fields, response variability, and population responses mapped with a probe array," *Journal of Neurophysiology*, vol. 81, no. 6, pp. 2701–2010, June 1999.
- [13] P. Brodal, *The Central Nervous System: Structure and Function*, 3rd ed. Oxford University Press, 2004, no. 5, ch. Sensory Receptors in General, pp. 135–138.
- [14] E. B. Goldstein, *Sensation and Perception*, 8th ed. 10 Davis Drive, Belmont, CA 94002-3098, USA: Wadsworth Publishing, 2009, no. 2, ch. Introduction to the Physiology of Perception, pp. 23–41.
- [15] H. P. Jenerick, "The relations between prepotential, resting potential, and latent period in frog muscle fibers," *The Journal of General Physiology*, vol. 39, no. 5, pp. 773–787, May 1956.
- [16] J. Bell, S. Bolanowski, and M. H. Holmes, "The structure and function of pacinian corpuscles: A review," *Progress in Neurobiology*, vol. 42, no. 1, pp. 79–128, January 1994.
- [17] R. H. Lamotte and M. A. Srinivasan, "Neural encoding of shape: responses of cutaneous mechanoreceptors to a wavy surface stroked across the monkey fingerpad," *Journal of Neurophysiology*, vol. 76, no. 6, pp. 3787–3797, December 1996.

# Modelo Computacional Del Sistema Propioceptivo Basado En Neurociencias Para Entidades Virtuales

Daniel Madrigal

CINVESTAV  
Unidad Guadalajara  
dmadrigal@gdl.cinvestav.mx

**Abstract.** Este artículo describe un modelo computacional del sistema propioceptivo. Este modelo esta basado en la manera en que funciona el sistema propioceptivo de los seres vivos y por lo tanto se tomó como base las aportaciones en los campos de la biología, fisiología y neurociencias. El modelo tiene como propósito el ser implementado en una entidad virtual la cual lo utilizará para proporcionar las entradas a su sistema motor, lo que le permitirá realizar planeación y ejecución motora. Como propósito final el modelo será integrado con la arquitectura Kuayolotl.

**Keywords:** Propioceptivo, Modelo, Neurociencias, Computación, Arquitectura.

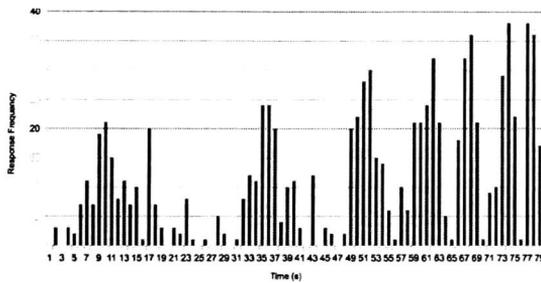
## 1 Introducción

En la actualidad, el interés por tener entidades virtuales que exhiban comportamientos similares a la de los humanos se ha incrementado de manera considerable, ya que las aplicaciones que estas pudieran tener son bastas e interesantes. Una clara utilidad de esto es el contestar preguntas del tipo: ¿Como sería la vida sí . . . ?, ¿Como reaccionarían un grupo de personas ante determinada situación?. Por medio de simulaciones con las entidades virtuales podríamos obtener algunas respuestas a estas interrogantes.

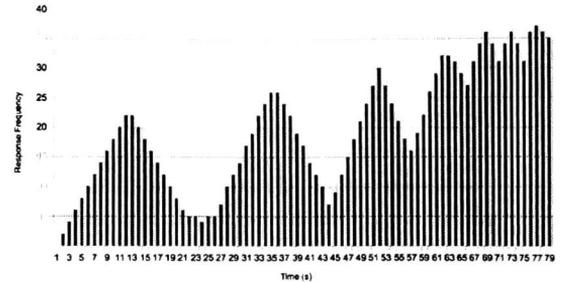
La idea de tener aplicaciones de software con características o capacidades similares a la de los humanos no es nueva y existen muchos trabajos relacionados, por ejemplo: ACT-R[1] EPIC[2] y Soar[3] las cuales son arquitecturas cognitivas basadas en fundamentos psicológicos y trabajan utilizando sistemas de producción.

Para poder lograr que las entidades virtuales puedan comportarse de manera similar a los humanos es necesario dotarlas con ciertas habilidades cognitivas como: La percepción, atención, planeación, memoria, toma de decisiones, emociones[4].

Estas habilidades nos permiten percibir el mundo y aprender de el, pero esa capacidad estaría limitada a menos que pudiéramos realizar acciones para interactuar con nuestro ambiente. Para resolver ese problema los seres vivos

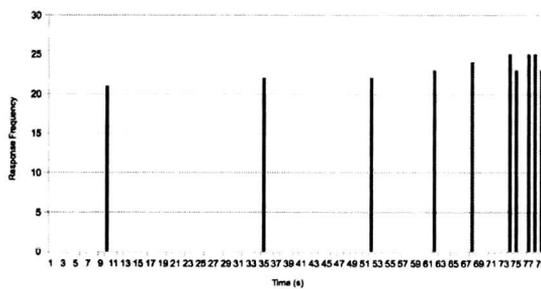


(a) Experiment

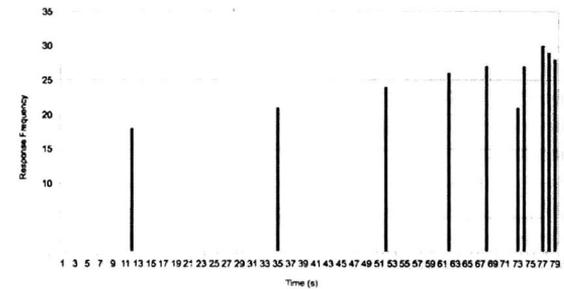


(b) CMS

Fig. 7. Slowly-adapting mechanoreceptor experiment and simulation results.



(a) Experiment



(b) CMS

Fig. 8. Rapidly-adapting mechanoreceptor experiment and simulation results.

## REFERENCES

- [1] J. M. Romano, K. Hsiao, G. Niemeyer, S. Chitta, and K. J. Kuchenbecker, "Human-inspired robotic grasp control with tactile sensing," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 6, December 2011, pp. 1067–1079.
- [2] G. Sandini, G. Metta, and D. Vernon, "Robotcub: an open framework for research in embodied cognition robotcub: An open framework for research in embodied cognition," in *2004 4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, vol. 1, November 2004, pp. 13–32.
- [3] R. S. Dahiya, G. Metta, and M. Valle, "Development of fingertip tactile sensing chips for humanoid robots," in *IEEE International Conference on Mechatronics*, April 2009, pp. 1–6.
- [4] G. Cannata, M. Maggiali, G. Metta, and G. Sandini, "An embedded artificial skin for humanoid robots," in *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, August 2008, pp. 434–438.
- [5] P. Baranyi and A. Csapo, "Definition and synergies of cognitive information communications," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 9, no. 1, pp. 67–83, 2012.
- [6] E. P. Gardner and J. H. Martin, *Principles of Neural Science*, 4th ed. McGraw-Hill, 2000, no. 21, ch. Coding of Sensory Information, pp. 412–430.
- [7] E. R. Kandel, *Principles of Neural Science*, 4th ed. McGraw-Hill, 2000, no. 2, ch. Nerve Cells and Behavior, pp. 20–36.
- [8] D. Purves, *Neuroscience*, 3rd ed. Sinauer Associates Incorporated, 2004, no. 9, ch. The Somatic Sensory System, pp. 189–208.
- [9] E. P. Gardner, J. H. Martin, and T. M. Jessell, *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill, 2000, no. 22, ch. The Bodily Senses.
- [10] K. O. Johnson, "The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors," *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 11, no. 4, pp. 455–461, August 2001.
- [11] J. Zelena, *Nerves and Mechanoreceptors: The Role of Innervation in the Development and Maintenance of Mammalian Mechanoreceptors*, 1st ed. London, UK: Chapman & Hall, 1994.
- [12] Vega-Bermudez and K. O. Johnson, "Sa1 and ra receptive fields, response variability, and population responses mapped with a probe array," *Journal of Neurophysiology*, vol. 81, no. 6, pp. 2701–2010, June 1999.
- [13] P. Brodal, *The Central Nervous System: Structure and Function*, 3rd ed. Oxford University Press, 2004, no. 5, ch. Sensory Receptors in General, pp. 135–138.
- [14] E. B. Goldstein, *Sensation and Perception*, 8th ed. 10 Davis Drive, Belmont, CA 94002-3098, USA: Wadsworth Publishing, 2009, no. 2, ch. Introduction to the Physiology of Perception, pp. 23–41.
- [15] H. P. Jenerick, "The relations between prepotential, resting potential, and latent period in frog muscle fibers," *The Journal of General Physiology*, vol. 39, no. 5, pp. 773–787, May 1956.
- [16] J. Bell, S. Bolanowski, and M. H. Holmes, "The structure and function of pacinian corpuscles: A review," *Progress in Neurobiology*, vol. 42, no. 1, pp. 79–128, January 1994.
- [17] R. H. Lamotte and M. A. Srinivasan, "Neural encoding of shape: responses of cutaneous mechanoreceptors to a wavy surface stroked across the monkey fingerpad," *Journal of Neurophysiology*, vol. 76, no. 6, pp. 3787–3797, December 1996.

# Modelo Computacional Del Sistema Propioceptivo Basado En Neurociencias Para Entidades Virtuales

Daniel Madrigal

CINVESTAV  
Unidad Guadalajara  
dmadrigal@gdl.cinvestav.mx

**Abstract.** Este artículo describe un modelo computacional del sistema propioceptivo. Este modelo esta basado en la manera en que funciona el sistema propioceptivo de los seres vivos y por lo tanto se tomó como base las aportaciones en los campos de la biología, fisiología y neurociencias. El modelo tiene como propósito el ser implementado en una entidad virtual la cual lo utilizará para proporcionar las entradas a su sistema motor, lo que le permitirá realizar planeación y ejecución motora. Como propósito final el modelo será integrado con la arquitectura Kuayolotl.

**Keywords:** Propioceptivo, Modelo, Neurociencias, Computación, Arquitectura.

## 1 Introducción

En la actualidad, el interés por tener entidades virtuales que exhiban comportamientos similares a la de los humanos se ha incrementado de manera considerable, ya que las aplicaciones que estas pudieran tener son bastas e interesantes. Una clara utilidad de esto es el contestar preguntas del tipo: ¿Como sería la vida sí . . . ?, ¿Como reaccionarían un grupo de personas ante determinada situación?. Por medio de simulaciones con las entidades virtuales podríamos obtener algunas respuestas a estas interrogantes.

La idea de tener aplicaciones de software con características o capacidades similares a la de los humanos no es nueva y existen muchos trabajos relacionados, por ejemplo: ACT-R[1] EPIC[2] y Soar[3] las cuales son arquitecturas cognitivas basadas en fundamentos psicológicos y trabajan utilizando sistemas de producción.

Para poder lograr que las entidades virtuales puedan comportarse de manera similar a los humanos es necesario dotarlas con ciertas habilidades cognitivas como: La percepción, atención, planeación, memoria, toma de decisiones, emociones[4].

Estas habilidades nos permiten percibir el mundo y aprender de el, pero esa capacidad estaría limitada a menos que pudiéramos realizar acciones para interactuar con nuestro ambiente. Para resolver ese problema los seres vivos

cuentan con el sistema motor, el cual, es el encargado de controlar, planear y ejecutar los movimientos[5].

Pero, uno de los mayores requerimientos del sistema motor para realizar sus tareas, es la retroalimentación sensorial que le permiten saber la posición del cuerpo y si se esta ejecutando un movimiento o no[5]. Particularmente hablando uno de esos mecanismos es el sistema propioceptivo, el cual, es el encargado de proporcionar toda la información aferente que proviene del la área interna periférica del cuerpo y que participa en el control de la postura, en la estabilidad articular y en otras sensaciones consientes[6].

El resto del documento se encuentra organizado de la siguiente manera: Descripción del modelo, sección dedicada a los fundamentos teóricos que fueron utilizados para la realización del modelo y se muestra la arquitectura en diagrama de cajas. Conclusiones, sección que cierra el documento y se discuten los usos diversos en los cuales la arquitectura podría ser utilizada. Y por último los trabajos futuros, donde se especifican aspectos que se están considerando para extender el presente trabajo.

## **2 Descripción del Modelo**

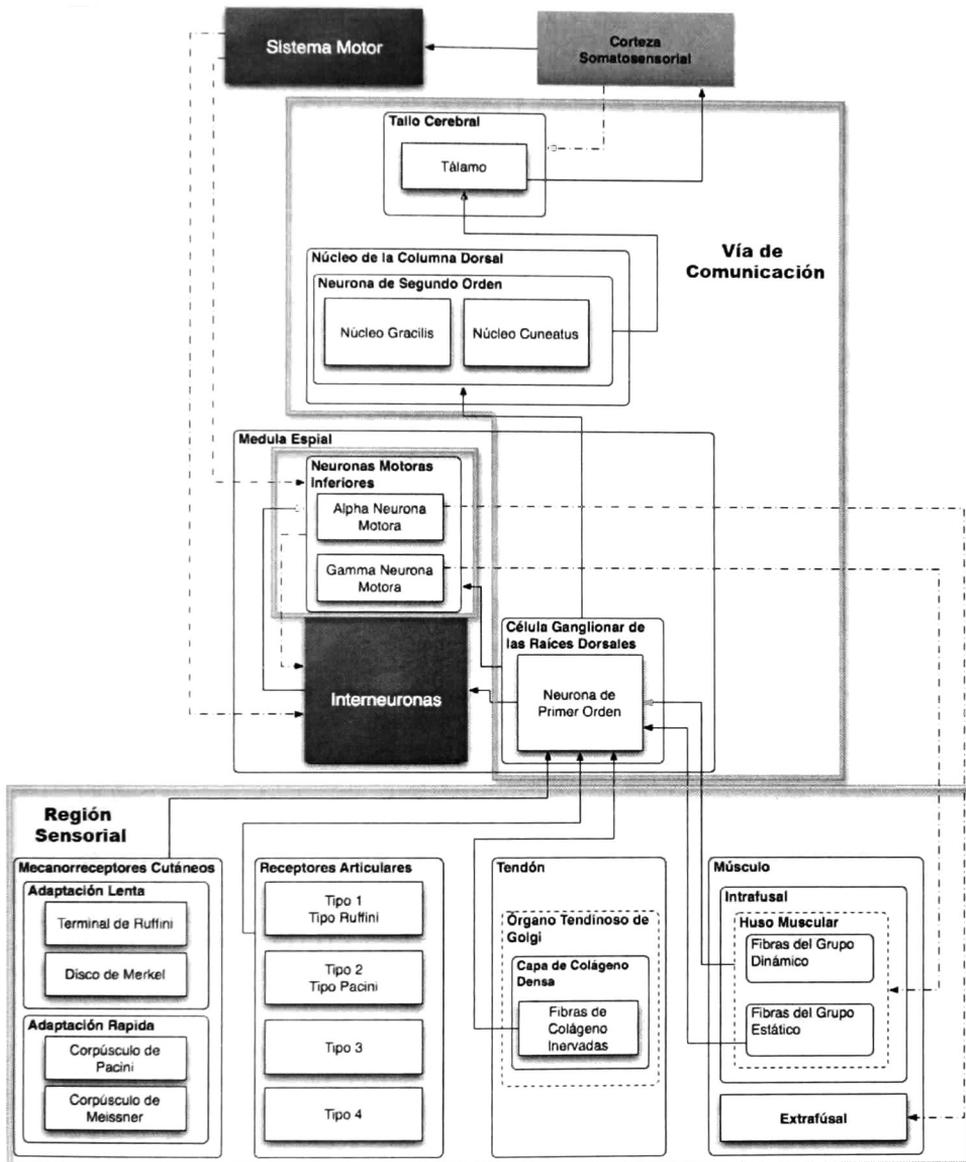
La propiocepción puede ser descrita como el proceso de aporte de información al sistema nervioso central respecto a la posición y el movimiento[7]. Para poder lograr que una entidad virtual pueda realizar las funciones mencionadas anteriormente se propone el modelo presentado en la figura 1, el cual muestra los componentes que conforman el sistema propioceptivo y la comunicación que existe entre ellos. El modelo esta separado en tres partes: La primera es la parte sensorial, en la cual se encuentran los receptores sensoriales que son utilizados por el sistema propioceptivo. En una segunda parte se encuentra las neuronas motoras inferiores, estas son las encargadas de realizar la contracción en los músculos esqueléticos y tienen un papel importante en el ajuste de los husos musculares. Y por último, tenemos la parte donde se encuentra la vía de comunicación utilizada para informar a partes superiores del sistema nervioso central, sobre la información obtenida de los receptores sensoriales

### **2.1 Parte Sensorial**

El sistema propioceptivo tiene como fuente de información principal los mecanorreceptores localizados en el musculo, los tendones, ligamentos y en las cápsulas articulares y como fuente suplementaria los mecanorreceptores localizados en la piel[6]. Estos mecanorreceptores son células especializadas en la detección de estímulos mecánicos[8][9].

#### **Husos Musculares**

Son los receptores localizados dentro de la bolsa intrafusar del músculo[10]. Tienen forma de cápsula con tamaño aproximado de 0.2 mm de ancho por 5 mm de largo[11]. Los husos musculares están formados por 3 tipos de fibras musculares, las cuales son[12]:



**Fig. 1.** Modelo computacional del sistema propioceptivo. Este modelo contempla los sensores utilizados por el sistema propioceptivo, las vías de comunicación, las neuronas motoras y la retroalimentación que proporciona el sistema motor para hacer el ajuste de los husos musculares.

- Fibras en forma de cadena.
- Fibras estáticas en forma de bolsa.
- Fibras dinámicas en forma de bolsa.

Estas fibras forman dos grupos, uno encargado de sensar el dinamismo en el músculo (cuando el músculo esta en contracción), este grupo esta formado por las fibras dinámicas en forma de bolsa. Un segundo grupo esta formado por las fibras estáticas de bolsa y las fibras de tipo cadena las cuales tienen la función de sensar mientras la longitud del músculo se mantiene constante (cuando el músculo esta en reposo o estático)[12]. Esta dualidad estructural le permite al músculo informar a partes superiores del SNC si el músculo esta en reposo o en contracción[12][13][14]. Dos aferencias son proporcionadas por los husos musculares[5][11][12]:

**Aferencia primaria Ia** Provee información acerca de la velocidad y longitud del músculo. Esta aferencia es producida por el grupo dinámico.

**Aferencia secundaria II** Informa la longitud del músculo. El grupo estático es el encargado de producir dicha aferencia.

El estiramiento de las fibras musculares intrafusales son el tipo de estímulos a los que responden los husos musculares. Para poder sensar durante la contracción las  $\gamma$  neuronas motoras contraen las fibras intrafusales con el fin de ajustar la sensibilidad del huso muscular[5][10][12][13][14]. La esquematización de este receptor se encuentra en la figura 2.

### **Órgano Tendinoso de Golgi (OTG)**

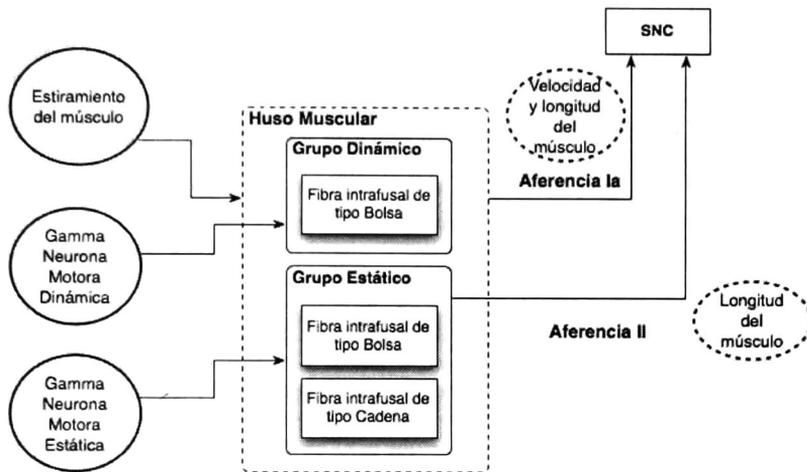
Mecanorreceptor de adaptación lenta localizado en la unión que existe entre las fibras musculares esqueléticas y los tendones[10]. Este receptor tienen forma de cápsula la cual tiene un tamaño aproximado de 0.1 mm de ancho por 1 mm de largo[11]. Esta cápsula contiene en su interior varias fibras de colágeno, las cuales son inervadas por un único axón que se ramifica y se entrelaza con las fibras de colágeno[5][11]. El OTG produce un solo tipo de aferencia[5][11][12]:

**Aferencia de Tipo Ib** Fuerza aplicada en el músculo durante la contracción.

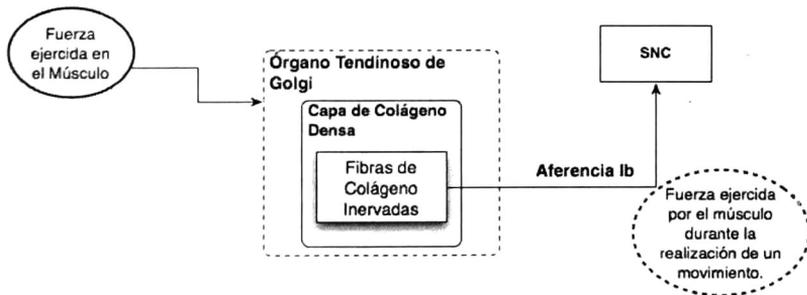
Las aferencias producidas por los OTG participan tanto en la inhibición como excitación de las neuronas motoras vía interneuronas[11]. El esquema del órgano tendinoso de Golgi se encuentra en la figura 3.

### **Receptores Articulares**

Los receptores articulares son mecanorreceptores que se localizan en la parte fibrosa articular y en los ligamentos circundantes. Estos mecanorreceptores han sido clasificados en cuatro grupos:



**Fig. 2.** Modelo del Huso Muscular. El huso muscular es la fuente principal de información propioceptiva[15]. Esta formado por dos grupos de fibras(Dinámicas y Estáticas), lo cual le permite sentir el movimiento y el reposo del músculo.



**Fig. 3.** Modelo del Órgano Tendinoso de Golgi. Este receptor es más sensible a la tensión producida por una contracción activa, lo cual significa que el receptor nos indica con que fuerza el músculo se esta contrayendo y no con que fuerza el músculo es estirado pasivamente[11].

### **Receptor Articular de Tipo 1**

Receptor articular de adaptación lenta, esta localizado dentro de la parte fibrosa de la capsula articular. Este mecanorreceptor tiene forma de cápsula que envuelve una ramificación de fibras de colágeno, el cual asemeja al mecanorreceptor cutáneo de Ruffini. Debido a esta semejanza también se le es llamado como mecanorreceptor articular de tipo Ruffini[11]. El estímulo al que este mecanorreceptor responde es la tensión que se genera en la cápsula articular en la cual se encuentra. Por la manera en la que funciona pareciera que son los responsables de determinar la posición estática de la articulación, determinar si la articulación esta en movimiento, el sentido del movimiento y la velocidad a la que se realiza el movimiento.[11]

### **Receptor Articular de Tipo 2**

Receptor articular de adaptación rápida, esta localizado en la parte fibrosa de la cápsula articular. Se asemeja al corpúsculo de Pacini y por este motivo se le conoce como mecanorreceptor articular de tipo Pacini[11]. El estímulo al cual responde es el estiramiento que se genera en la cápsula articular en la cual se encuentra. Por la adaptabilidad del mecanorreceptor y el tipo de estímulo al cual responde, este mecanorreceptor solo puede informar cuando ocurre un movimiento y por esta razón se cree que es el receptor encargado de informar la velocidad del movimiento[11].

### **Receptor Articular de Tipo 3**

El funcionamiento de este mecanorreceptor es desconocido, pero, se ha propuesto que tiene un rol protector al prevenir el sobre estiramiento articular. Se sabe que es un mecanorreceptor de adaptación lenta, que tiene semejanza con el OTG y que se localiza en los ligamentos que recubren la articulación[11].

### **Receptor Articular de Tipo 4**

Este grupo esta formado por receptores libres, participan en la nocicepción y por lo tanto no participan en la propiocepción[11].

### **Mecanorreceptores Cutáneos**

Son los receptores sensoriales encargados de proporcionar el sentido del tacto[16] y también participan en la propiocepción y en el ajuste de los husos musculares[17]. En la piel glabra de los seres humanos se han encontrado cuatro diferentes tipos de receptores[8][18]:

### **Disco de Merkel**

Los discos de Merkel son mecanorreceptores de adaptación lenta. Su estímulo es la presión sobre la piel y son los encargados de distinguir las texturas. Estos mecanorreceptores son muy sensibles a los bordes, filos y puntos. Producen la aferencia[8][18]:

**Aferencia de Tipo SA1** Informa la cantidad de presión aplicada sobre la piel.

Por el funcionamiento que tiene este tipo de mecanorreceptor lo hace muy útil para la lectura braille[18].

#### **Corpúsculo de Meissner**

Los corpúsculos de Meissners son receptores de adaptación rápida. Su estímulo es la presión sobre la piel, pero por ser de adaptación rápida solo pueden informar el contacto inicial que tiene la piel con los objetos[19]. La aferencia que producen es[8][18]:

**Aferencia de Tipo RA1** Informa el contacto de los objetos sobre la piel glabra.

Uno de sus funciones principales es la detección de las fuerzas y resbalones que ocurren cuando se está manipulando un objeto con la mano[18] y probablemente informan acerca de la dirección y velocidad de los objetos que se mueven en la piel[11].

#### **Corpúsculo de Pacini**

Los corpúsculos de Pacini son receptores cutáneos de adaptación rápida. El estímulo que ocasiona la respuesta de este receptor son las vibraciones a altas frecuencias[18] y responden al movimiento en el rango de nanómetros[8]. La aferencia que producen es[8][18]:

**Aferencia de Tipo RA2** Informa las vibraciones que ocurren en la piel glabra.

Por la capacidad que tienen estos receptores para sentir las altas frecuencias, son útiles para informar de los eventos que ocurren en los objetos que se tienen sostenidos en la mano[18].

#### **Terminales de Ruffini**

Las terminales de Ruffini son receptores cutáneos de adaptación lenta. Son sensibles al estiramiento[18]. La aferencia que producen es[8][18]:

**Aferencia de Tipo SA2** Informa el estiramiento de la piel.

Son útiles para el reconocimiento de objetos grandes que son sostenidos en la mano y para saber si los dedos y otras articulaciones que estiren la piel están en movimiento[8]

## **2.2 Neuronas Motoras Inferiores**

Las neuronas motoras inferiores son las encargadas de realizar las contracciones musculares. Sus cuerpos se localizan en el asta ventral de la sustancia gris de la médula espinal y en los núcleos motores de los nervios craneales en el tronco del encéfalo. El axón de estas neuronas llega hasta el músculo esquelético por

medio de las raíces ventrales y los nervios periféricos espinales[10]. Las neuronas motoras inferiores se pueden clasificar en dos grupos:

#### **$\alpha$ Neurona Motora**

Este tipo de neurona motora es la encargada de realizar las contracciones musculares lo cual permite mantener una postura y realizar movimientos. Los axones de estas neuronas inervan las fibras extrafusales del músculo esquelético.[10]

#### **$\gamma$ Neurona Motora**

Las  $\gamma$  neuronas motoras son las encargadas de ajustar la sensibilidad del huso muscular. Esta función también se le conoce con el nombre de sistema fusimotor[12]. Para realizar esta tarea las  $\gamma$  neuronas motoras contraen las regiones polares de las fibras intrafusales ocasionando un estiramiento en la parte central, lugar donde se localizan los receptores sensoriales[6][12]. Este estiramiento produce un incremento en la cantidad de aferencias enviadas por el huso muscular. La contribución de la fuerza generada por la contracción de las fibras intrafusales no es significativa en la fuerza que aplica el músculo durante la contracción.

Este grupo de neuronas motoras puede dividirse en dos subgrupos: En el grupo de  $\gamma$  neuronas motoras dinámicas las cuales inervan a las fibras dinámicas del huso muscular y el grupo  $\gamma$  neuronas motoras estáticas que inervan al grupo de fibras estáticas del huso muscular. Esto permite al SNC poder ajustar la sensibilidad de las fibras dinámicas sin incrementar la sensibilidad de las fibras estáticas y ajustar la sensibilidad de las fibras estáticas lo que ocasiona que se reduzca la sensibilidad de las fibras dinámicas[12].

Las  $\gamma$  neuronas motoras pueden ser consideradas como un sistema neural de integración premotora [6], esto surge de la hipótesis propuesta por Johansson et al [20] (Figura 4), la cual establece que la activación de las  $\gamma$  neuronas motoras esta fuertemente influenciada por los mecanorreceptores cutáneos, los husos musculares, los órganos tendinosos de golgi, los mecanorreceptores articulares y la información proveniente de las vías descendentes supraespinales.

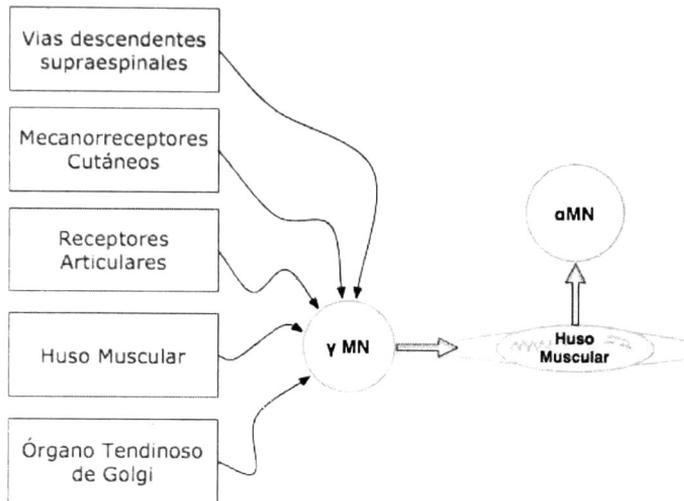
### **2.3 Vía de Comunicación**

La información propioceptiva consciente y táctil discriminativa viaja por medio de la vía columna dorsal-lemnisco medial para llegar a la corteza somatosensorial[21]. Esta vía esta compuesta por dos vías anatómicas [22]:

**Columna Dorsal** Vía anatómica encargada de llevar la información propioceptiva consciente y táctil discriminativa, desde las células ganglionares de las raíces dorsales, hasta, los núcleos de la columna dorsal. Las vías anatómicas que la conforman son el fascículo cuneatus y el fascículo gracilis[21][23].

**Lemnisco Medial** Vía anatómica de comunicación encargada de llevar información propioceptiva consciente y táctil discriminativa, desde los núcleos de la columna dorsal, hasta, el tálamo[21][23].

En la vía columna dorsal-lemnisco medial son tres las neuronas encargadas de realizar la comunicación, estas son[21]:



**Fig. 4.** Hipótesis final de entrada común [20], Las  $\gamma$  neuronas motoras como unidades integradoras de información para el ajuste del huso muscular, a este proceso se le conoce como sistema fusimotor[12].

**Neurona de Primer Orden** Es la entrada de la información sensorial periférica a la medula espinal. Estas neuronas envían la información proveniente de la periferia hacia partes superiores del sistema nervioso central medio de los fascículos gracilis y cuneatus. El cuerpo de estas neuronas se encuentra en las células ganglionares de las raíces dorsales[24].

**Neurona de Segundo Orden** Es el segundo paso de la información sensorial propioceptiva consciente y táctil discriminativa. Estas neuronas envían la información por medio de lemnisco medial hacia el tálamo. El cuerpo de estas células está localizado en los núcleos de las columnas dorsales[24].

**Neurona de Tercer Orden** El último paso para llegar a la corteza somatosensorial. Se encuentran localizadas en la parte posterior lateral del núcleo del tálamo. Las axones de estas neuronas ascienden en el brazo posterior de la capsula interna y la corona radiada y terminan en la corteza primaria somatosensorial[21][24].

### 3 Conclusiones

El modelo propioceptivo propuesto fue basado en la información que se tiene actualmente en las áreas de neurociencias y neurofisiología del sistema propioceptivo y por lo tanto el modelo podrá ser refinado mientras más información

surja al respecto. En esta primera aproximación se deja como caja negra el sistema motor y las interneuronas, las cuales van a ser trabajadas bajo el mismo enfoque en trabajos futuros. La razón por la que no se detallan los modelos de los mecanorreceptores cutáneos y articulares, es porque los receptores articulares y los cutáneos son similares, y dentro de la arquitectura kuayotl ya están implementados los receptores cutáneos. La caja correspondiente a la corteza somatosensorial, se dejó como caja gris, ya que dentro de la arquitectura kuayotl ya hay trabajo al respecto. Aunque la finalidad de este trabajo es la de dotar a las entidades virtuales del sistema propioceptivo, esta arquitectura puede ser utilizada con otros fines, por ejemplo:

- Una aplicación que capture las salidas de un electromiógrafo y pueda hacer el diagnóstico a enfermedades del sistema propioceptivo y motor.
- Realizar simuladores de músculos que permitan hacer experimentación sin la necesidad de tener un músculo real.
- Dado que las entradas y salidas de los componentes quedan especificadas, esta arquitectura puede servir para la investigación y desarrollo de sensores que puedan ser implantados en las personas con el fin de remplazar receptores dañados.
- Desarrollar nuevas interfaces hombre-máquina.

#### **4 Trabajo Futuro**

El modelo presentado en este artículo, es una primera aproximación que aún puede extenderse. Actualmente se está trabajando en las siguientes tareas:

- Agregar la vía de comunicación propioceptiva inconsciente a la arquitectura actual.
- Proponer los algoritmos que realicen las funciones de cada uno de los componentes del sistema.
- Implementar la arquitectura en un lenguaje de programación para hacer pruebas de validación de los componentes del sistema.
- Comparar los resultados de las pruebas contra resultados neurocientíficos.
- Agregar al simulador de mecanorreceptores cutáneos[25] el órgano tendinoso de golgi y el huso muscular.
- Integrar el sistema a una entidad virtual.
- Integrar la arquitectura del modelo propioceptivo a la arquitectura kuayotl.

#### **5 Agradecimientos**

Gracias a CONACyT por el apoyo financiero, a Lea Vega y Gustavo Torres por sus aportaciones a este trabajo. Y por último pero no menos importantes, a mi asesor y a mis compañeros de laboratorio los cuales han hecho mi trabajo en el CINVESTAV Unidad Guadalajara sea una experiencia inolvidable.

## References

1. J. R. Anderson, "Act: A simple theory of complex cognition," *American Psychologist*, vol. 51(4), 1996.
2. J. R. A. M. Matessa, "An overview of the epic architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction," *Human-Computer Interaction*, vol. 12, 2009.
3. J. E. Laird, A. Newell, and P. S. Rosenbloom, "Soar: An architecture for general intelligence," *Artificial Intelligence*, vol. 33, no. 1, pp. 1 – 64, 1987.
4. D. Vernon, G. Metta, and G. Sandini, "A survey of artificial cognitive systems: Implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents," *Trans. Evol. Comp.*, vol. 11, pp. 151–180, Apr. 2007.
5. J. Knierim, *Motor Units and Muscle Receptors*. The University of Texas Health Science Center at Houston (UTHealth), 1997.
6. B. L. Riemann and S. M. Lephart, "The sensorimotor system, part i: the physiologic basis of functional joint stability.," *J Athl Train*, vol. 37, no. 1, pp. 71–9, 2002.
7. L. Chaitow and J. DeLany, *Clinical Application of Neuromuscular Techniques: Practical Case Study Exercises*. Clinical Application of Neuromuscular Techniques, Elsevier Churchill Livingstone, 2005.
8. E. P. Gardener and K. O. Johnson, *Spinal Reflexes*, pp. 475 – 497. Mc Graw Hill, 2013. From:Kandel, Schwartz, Jessell, Siegelbaum and Hudspeth, Principles of Neural Science, 5th ed, Chap 22.
9. J. Zelená, *Nerves and Mechanoreceptors: The Role of Innervation in the Development and Maintenance of Mammalian Mechanoreceptors*. Springer, 1994.
10. D. Purves, *Lower Motor Neuron Circuits and Motor Control*, pp. 371 – 392. 2004. From:Purves, D, Neuroscience, 3rd ed, Chap 15.
11. P. Brodal, *The Somatosensory System*, pp. 139 – 182. 2004. From:Brodal, P., The Central Nervous System: Structure and Function, 3rd ed, Chap 6.
12. K. G. Pearson and J. E. Gordon, *Spinal Reflexes*, pp. 790 – 811. 2013. From:Kandel, Schwartz, Jessell, Siegelbaum and Hudspeth, Principles of Neural Science, 5th ed, Chap 35.
13. R. J. Harvey and P. B. C. Matthews, "Some effects of stimulation of the muscle nerve on afferent endings of muscle spindles, and the classification of their responses into types a1 and a2," *J. Physiol*, 1961.
14. B. Appelberg, "The effect of electrical stimulation in nucleus ruber on the response to stretch in primary and secondary muscle spindle afferents," *Acta physiol*, 1962.
15. N. L. Milana P. Mileusnic, Ian E. Brown and G. E. Loeb, "Mathematical models of proprioceptors. i. control and transduction in the muscle spindle," *J Neurophysiol*, 2006.
16. E. P. Gardener and K. O. Johnson, *Touch*, pp. 498 – 529. Mc Graw Hill, 2013. From:Kandel, Schwartz, Jessell, Siegelbaum and Hudspeth, Principles of Neural Science, 5th ed, Chap 23.
17. B. Edin and N. Johansson, "Skin strain patterns provide kinaesthetic information to the human central nervous system.," *J Physiol*, vol. 487 (Pt 1), pp. 243 – 251, 1995.
18. K. O. Johnson, "The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors," *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 11, pp. 455–461, Aug. 2001.
19. D. Purves, *The Somatic Sensory System*, pp. 189 – 208. 2004. From:Purves, D, Neuroscience, 3rd ed, Chap 8.

20. S. P. Johansson H, Sjolander P, "A sensory role for the cruciate ligaments," *Clin Orthop*, vol. 268, p. 161-178, 1991.
21. M. Patesta and L. Gartner, *A Textbook of Neuroanatomy*. John Wiley & Sons, 2009.
22. B. Greenstein and A. Greenstein, *Somatosensory Aspects*, pp. 132-177. 2000. From: Greenstein, Ben and Greenstein, Adam, *Color Atlas of Neuroscience: Neuroanatomy and Neurophysiology*, 1st ed.
23. M. Bear, B. Connors, and M. Paradiso, *The Somatic Sensory System*. Neuroscience: Exploring the Brain, Lippincott Williams & Wilkins, 2007. From: Bear, M.F. and Connors, B.W. and Paradiso, M.A., *Neuroscience*, 3rd, Chap 12.
24. K. Gupta, K. Wienandt, and S. Cummings, *Dorsal Column and Spinocerebellar Pathways*. Random House Information Group, 1997. From: Kapil, Gupta, *The human brain coloring workbook*, Chap 14-2.
25. D. Madrigal, G. Torres, F. Ramos, and L. Vega, "Cutaneous mechanoreceptor simulator," in *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2012 IEEE 3rd International Conference on*, pp. 781-786, dec. 2012.



17<sup>th</sup> International Conference in Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems - KES2013

## A Bio-Inspired Architecture of a Motor Neuron System for Virtual Creatures: Movement of a Single Limb with a Single Muscle

Daniel Madrigal\*, Gustavo Torres, Juan L. Del Valle, Félix Ramos

*Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute (CINVESTAV IPN) Guadalajara, Del Bosque Avenue 1145, Zapopan, Jalisco 45019, México*

---

### Abstract

This paper presents the simulation of a limb movement generated by a muscle contraction that is controlled by the activation of a pool of motor neurons. The muscle contraction is carried out by the transmission of action potentials that are produced in the lower motor neurons, which are located in the ventral horn of the spinal cord. The simulator has an editor in which the user designs a motor command that is composed of the number of motor neurons that will be activated during the simulation. This model gives us the ability to modify the force exerted by the muscle for the movement of the limb, depending on the number of the active neurons. The movement is performed online, that is, the motion is observed at the time at which the signals reach the muscle.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Selection and peer-review under responsibility of KES International.

**Keywords:** Motor System, Motion Synthesis, Action Potentials, Cognitive Architectures

---

### 1. Introduction

Currently, there is great interest in the development of virtual creatures that are able to display more “believable” behaviors. This is because there are a large number of applications in which these creatures can be used. For example, to use virtual creatures for the gathering of experimental data as reliable substitutes for human subjects. In particular, an experiment of this kind can be the placement of a set of creatures in a disaster situation and observe how they respond to it. On the other hand, more applications can be observed in the entertainment industry, like in videogames where there has been significant effort to give players deeper levels of immersion. In these kind of applications, virtual creatures have an important role since there is a constant interaction of the player with non-player characters (NPCs). Currently, NPCs’ actions and behaviors are pre-established, thus no matter what the player does, NPCs’ behaviors are the same.

To develop virtual creatures capable of behaving humans, it is necessary to endow them with cognitive mechanisms like it is known that humans have. To be more precise, it is required to design sensory systems for environment input, high-order cognitive processes for the generation of behaviors, and neuro motor systems which

---

\*Corresponding author. Tel.: +52 33 3777 3600 ext. 1084; fax: +52 33 3777 3609.  
E-mail address: [dmadrigal@hdl.cinvestav.mx](mailto:dmadrigal@hdl.cinvestav.mx).

will execute actions in the environment. Among these, the neuro motor system is important, given that most of the living organisms interact with their environment by means of self-movements that are planned, monitored and executed by this system.

At present, the actions that a virtual creature can perform are supplied, from a database of preset movements. These movements are reproduced according to whichever action the creature performs, like sprites used in animations for characters in 2D videogames [1]. As said before, the set of movements restricts the number of actions that a virtual creature can execute, thus, new approaches have been created. One of these is “motion synthesis”, which facilitates the actions that the creature can perform in real-time. Some techniques used on motion synthesis are: joint angle interpolation [2], inverse kinematics [3] and locomotion [4].

Cognitive architecture developers have implemented models for the motion synthesis. iCub, a RobotCub [5] project derivative, for which they have developed an engine for the generation of motion [6]. This system is based on two motor primitives: rhythmic (periodic) and discrete (finite aperiodic) movements. The architecture consists of three layers: the planner, the manager and the generator. Each layer is based on the regions of the nervous system that perform the processes of planning, management and motor trajectory generation, respectively. This motor system was tested on two applications: interactive drumming and switching between crawling and reaching, and reaching while crawling.

Another approach for the generation of movement that uses cognitive architectures is Steve [7]. Which is an autonomous agent, who lives in a virtual environment, and is used for the training of personnel. Steve consists of two components, the first is an implementation of Soar [8] that provides the high-level cognitive processing. This system makes planning and decision making based on the current state of the environment. The second component consists of the sensorimotor system, which is responsible for providing the necessary information for the operation of the cognitive component. Furthermore, the system receives sensorimotor actions to be performed by the agent, which are converted into low-level signals for the movement of the agent. The actions that Steve can perform include object manipulation, visual attention, gestures and speech.

In this paper, is presented a model for the motion generation of virtual creatures; inspired on the bio-architecture on how human beings performs motion. That is, our model tries to replicate the way that afferent and efferent information processed between diverse nervous regions produce the movement of a limb. Therefore, our assumptions are based on neuroscientific and neurophysiological results.

This paper is organized as follows. Section 2 describes the architecture of our model, which it is designed over concepts of the neuroscience. Section 3 explains the implementation of simulator. Section 4 describes a case study that intends to prove the continuous movement generation in the simulator. Finally, conclusions and the future work are presented.

## 2. Model Description

The motor neuron system is the name given to the set of components of the central nervous system, which are involved in the execution, planning and coordination of movements. The system is organized in hierarchical manner, where higher structures are responsible for complex activities; such as, planning and coordination of movements without taking into account the work done by the muscles, given that this is done by lower structures of the system. In the Figure 1, an abstract model of the system is shown. The diagram illustrates the hierarchical structure, the components that composed it and the communication between the structures of the system.

Due to the complex and elaborate tasks that are done by each one of the components of the system, in this work we only implement the motor neuron pools and the skeletal muscle. All the other structures implementation is future work. Thus, the finality of this work is to endow a virtual entity with a motor neuron system “similar” to the humans system.

The general explanation of the functionality of each component within the structures are detailed below, were we elaborate more the explanations of the structures used in the simulation.

### 2.1. Motor Cortex

The motor cortex is at the highest level of the hierarchy of the motor system, this structure is responsible for making all the necessary tasks in order to produce voluntary movements, such tasks include actions like movement

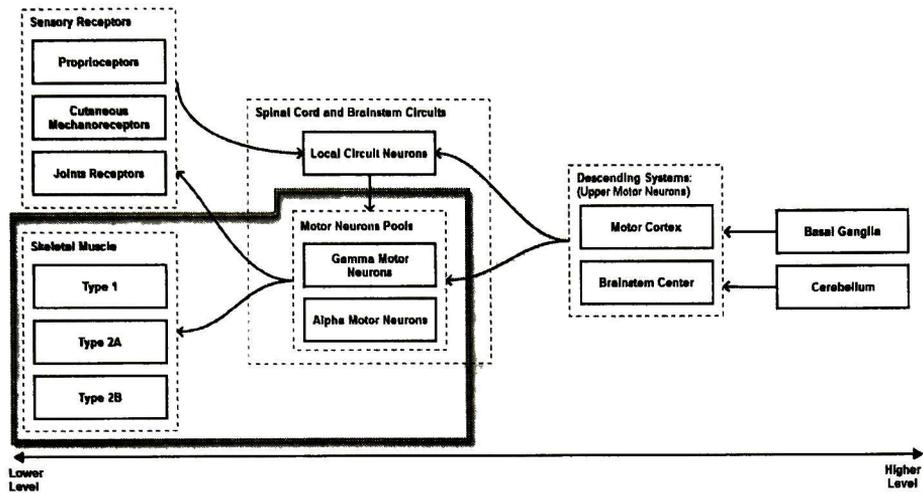


Fig. 1. An abstract diagram of the motor system. Each one of the structures performs specific functions that work together in order to generate motion. The implementation presented in this paper only takes into account the structures outlined by the red rectangle.

coordination, motor planning, decision making and motor commands transmission to the inferior parts of motor system<sup>1</sup>.

## 2.2. Basal Ganglia

The basal ganglia is a collection of brain structures that are involved in several cognitive, emotional and motor activities. The contributions of this structure to the motor system are not yet clear. But it is said that basal ganglia participates in gating of known movements and the initiation of voluntary movements [9].

## 2.3. Cerebellum

The cerebellum is part of a cycle, which receives and returns information from the motor cortex and the brainstem, the purpose of it is to report motor errors, this is, the difference between the “desired” motion and the executed motion. This movement correction has two purposes, the first is to perform the desired movement during motor execution, and the second is related with motor learning. Other functions of the cerebellum include: extend motor planning in order to incorporate the spatiality and temporality in the planning of movements sequences; it is also responsible of movement generation to maintain posture and balance, and regulate the movement of the eyes in response to inputs from the vestibular system [10].

## 2.4. Brainstem Centers

The motor centers located in the brainstem are critical for the production of tasks such as the maintenance of the upright position during displacement, the movement of synergist muscle groups and fine movement of the fingers. All the executed movements of the body are performed under the control of this structure [11].

<sup>1</sup>J. Knierim, Motor cortex,(1997). <http://neuroscience.uth.tmc.edu/s3/chapter03.html> (April 2013)

## 2.5. Local Circuit Neurons

Local circuit neurons are responsible for receiving information from the top regions of the motor system as well as from the sensory receptors of the skin, muscles and joints. Their function is to integrate the information that they receive in order to coordinate the activation and deactivation of motor neurons and thereby execute organized movements [12].

## 2.6. Motor Neuron Pools

The lower motor neurons are responsible for making muscle contractions. Their bodies are located in the ventral horn of the gray matter in the spinal cord, and the motor nuclei of cranial nerves in the brain stem. The axons of these neurons reaches the skeletal muscle through the ventral roots and peripheral spinal nerves [12]. The lower motor neurons can be classified into two groups:  $\alpha$  motor neuron and  $\gamma$  motor neuron.

The  $\gamma$  motor neurons are responsible for the adjustment of the sensitivity of the muscle spindle. The group formed by the *gamma* motor neuron and the intrafusal fibers that they innervates are also known fusimotor system [13]. To perform the adjustment of sensibility, the  $\gamma$  motor neurons contract the polar regions of the intrafusal fibers causing a stretch in the middle, where sensory receptors are located [14].

The  $\alpha$  motor neurons are responsible for the production of the contractions of extrafusal muscle fibers, allowing the muscles to pull the bones in order to realize movements and maintain the posture [12]. Anatomically the lower motor neurons are organized in columns, or pools. Each column contains gamma and alpha motor neurons of a single muscle or in some cases, muscles whose functionality is similar. Another peculiarity of the lower motor neurons is the size, the larger motor neurons can move large muscles, while the smaller motor neurons can only move small muscles. This property of the motor neurons allow researches to do a sub-classification of the alpha motor neurons in  $\alpha$  phasic and  $\alpha$  tonic motor neurons [15].

## 2.7. Sensory Receptors

For the proper functioning of the motor system, it is necessary the timely and accurate feedback from the sensory receptors that provide information about the position and movement of the body. Some systems that provide such information are the following.

### 2.7.1. Proprioceptors

The proprioceptors are sensory receptors that are found in the intrafusal fibers of the skeletal muscle and in the union of these with the ligament. Their function is to inform about the forces that are being generated in the muscle and the length and rate at which the contraction is being performed [14].

### 2.7.2. Cutaneous Mechanoreceptors

Receptors in glabrous skin of humans, allow us to do tactile discrimination, and are also involved in the kinesthesia [16]. In the hypothesis proposed by Johansson et al. [17], the afferents of this mechanoreceptors are considered as inputs for the  $\gamma$  motor neurons.

### 2.7.3. Joints Receptors

These receptors are located in the fibrous part of the joints and in the ligaments that surround them, its function is to inform the joint position, the motion of the joint and speed of movement [18].

## 2.8. Skeletal Muscles

The muscles are a group of muscle fibers that contract together in order to cause the movement of the bones to which they are attached through the tendons. There are two types of muscle fibers: the Fast Twitch Fibers, whose strength and speed of contraction are superior compared to the other fibers and the Slow Twitch Fibers which do not generate such force but are resistant to stress for extended periods. This applies to all animals, but on humans the classification is different, the slow twitch fibers are known as Type 1 and fast twitch fibers are known as Type 2. Wherein the latter group is formed by two types of fibers, Type 2A, which have higher strength than those of Type 1 and are resistant to fatigue, but not the same as the fibers of Type 1 and Type 2B that generate the most force, but are not resistant to fatigue [15].

### 2.8.1. Muscle Force

When an action potential reaches the muscle, it generates a small muscle contraction, which has a duration of approximately one tenth of a second. If another action potential arrives during another is in place, the twitch produced by former action potential disappears. Thus, the muscle strength can be maintained or increased (Figure 2). Furthermore, the muscular strength is controlled by the frequency of action potentials and the type of fiber that is being stimulated. For this reason, it is said that motor neurons are responsible for the regulation of the force that the muscle generates, because they are responsible for controlling the frequency at which action potentials are sent to the muscle. In the embodiment of a movement, not all motor neurons belonging to the group are activated, since its activation depends on the force and the speed required for the realization of the motion. Therefore, the superior parts are responsible to select and activate the motor neurons. Another way that muscle strength can be increased is by recruiting more alpha motor neurons, this is, to activate more motor neurons from the same group so that they twitch a greater amount of fibers [15]. An example of this principle is shown in Figure 3.

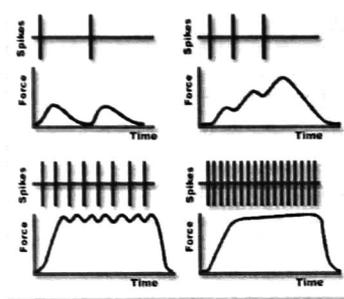


Fig. 2. When an action potential (spike) arrives to the muscle, a twitch is generated. When the frequency of the arrivals of action potentials increases, the twitch is greater and therefore the muscular force will be greater [12].

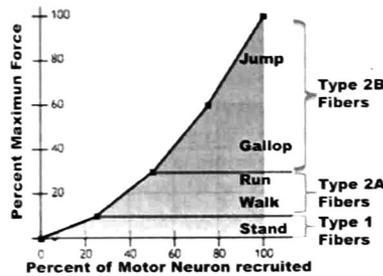


Fig. 3. The recruitment of lower motor neurons is related to the total force exerted by the muscle. The number of neurons recruited depends on the activity or movement that is desired to do. Adapted from Walmsley et al. [19].

### 2.8.2. Motor Unit

A motor unit is formed by a lower motor neuron and the group of muscle fibers that it innervates. Each muscle fiber is innervated by only one motor neuron. Because the size of neurons is related to muscle size with which they interact, the phasic alpha motor neurons are larger and they are activated when a movement requires great strength and speed, this type of motor neurons control Type 2 muscle fibers. On the other hand, the tonic alpha motor neuron are smaller, thus they are responsible for fine movements that require low strength. This type of motor neurons are responsible of the control of Type 1 muscle fibers. In other words, at greater size of the motor neuron, greater would be the force and speed that can be applied into the muscle [15].

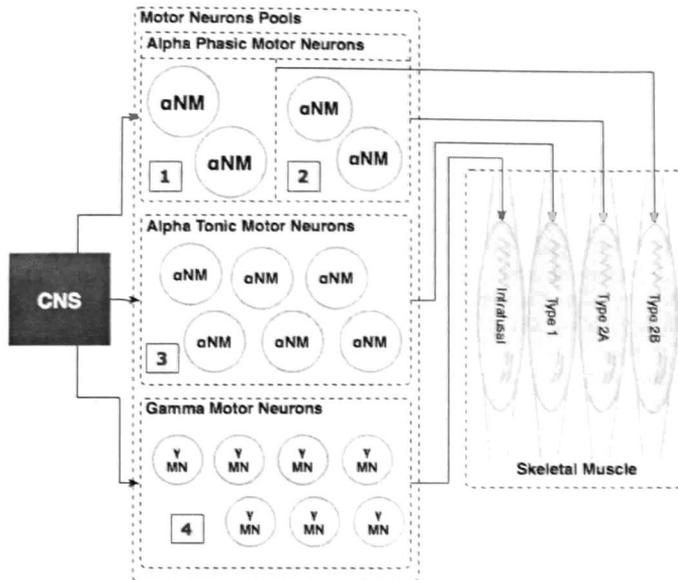


Fig. 4. Model used for the simulation. This model only considers a pool of alpha motor neurons divided into three groups (1-3) that are responsible for carrying out the movement of a muscle. The group of gamma motor neurons(4) are contemplated but not implemented, because they are left for subsequent experiments, the reason is that the gamma neuron are only used for the regulation of the sensibility of the muscle spindle receptors [12].

### 3. Simulator

The simulator is the implementation of the model presented in Figure 4, which is a sub-model of the complete architecture shown in Figure 1, the red rectangle show the parts that were implemented. This abstraction was done because the pool of motor neurons is sufficient to simulate the stimulation of a muscle that moves a limb.

#### 3.1. Motor Commands Editor

This software is the abstraction of the structure “motor neurons pool” of the motor system architecture presented in Figure 4. Its function is to simulate the activation of neurons following the size principle of motor neurons, which states that motor neurons are activated in an orderly fashion in size from lowest to highest. Another consideration for this software was the fact that the recruitment of more motor neurons is linear and that the firing rate of each motor neuron remains constant [20]. Therefore, the muscle strength for the simulation depends on the number of recruited motor neurons.

As seen in Figure 5, the motor command editor is made up of three sections: the motor commands, the recruitment factor and the plotter.

##### 3.1.1. Motor Commands

The motor commands were abstracted to simple instructions of type: how many motor neurons are needed and how long should they remain active. This type of instructions can control the amount of force that will be exerted on the muscle, causing the movement of the limb, of course if the applied force is large enough in order to pull the bone to which the muscle is attached.

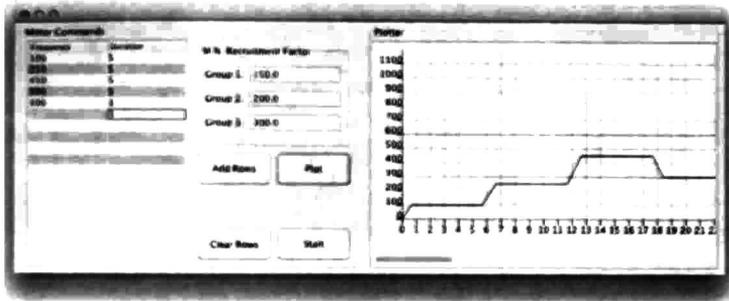


Fig. 5. Screenshot of the Motor Command Editor, this software is used to manipulate the activation of the motor neurons.

### 3.1.2. Recruitment Factor

For this implementation we consider that the recruitment of motor neurons are increased in a linear way, and that different types of motor neurons have different speed of activation. In order to express this behavior in a software, we proposed three “recruitment factors”, one for each of the groups of motor neurons that exist. The recruitment factor indicates the ratio between the number of motor neurons that are activated within the same group in a certain period of time:

$$RF = \frac{n}{t}. \tag{1}$$

Where  $RF$  is the recruitment factor,  $n$  is a number of motor neurons, and  $t$  is the time required for activate  $n$  motor neurons.

### 3.1.3. Plotter

Once the motor commands and the recruitment factors have been specified, the plotter graphically shows how the recruitment of motor neurons would be done, and how much they will remain active for a given time.

## 3.2. Arm Model Simulation

### 3.2.1. 3D Simulator

The simulation of the limb is made in a three dimensional environment. The model is a virtual arm, which consists of the arm, the elbow (joint), and the forearm. The elbow has a degree of freedom that allows the forearm to rotate up and down.

The arm has a single muscle, the biceps, which by contracting the forearm a flexion occurs. In the simulation the bending antagonist muscle is not considered, which produces the extension, since it is future work. This is because the simulator does not yet implements the muscle synergies.

### 3.2.2. Mathematical Model of the Muscle

For the simulation we propose the use of simple mathematical models, but it leaves the possibility of replacing them with more complex models such as Zajacs' [21] muscle model.

From [22] we propose the idea of modeling the muscle as an undamped spring, so we used the model of a simple harmonic oscillator:

$$F = -kx, \tag{2}$$

where  $F$  is the force applied,  $k$  is the spring constant and  $x$  is the displacement. It is well known that displacement over time results in the following model

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi), \quad (3)$$

where  $A$  is the amplitude,  $\omega$  is angular frequency and  $\phi$  initial phase. For the simulation,  $k$  is denoted as the muscles' constant,  $m$  as the mass of the forearm, and it is used to calculate  $\omega = \sqrt{k/m}$ . In the same way,  $A$  is denoted as the amplitude of the limb movement.

Furthermore, the application of the force is modeled as

$$x(f) = \frac{F(M(f))}{k}. \quad (4)$$

Assuming that the force, given the action potentials frequency, behaves exponentially [23].  $M$  is denoted by the following model,

$$M(f) = 1 - e^{-f}, \quad (5)$$

where  $f$  is the action potentials frequency that is generated by the motor neurons pool given a time window.

### 3.3. Systems' Communication

One of the strengths of the simulator, which is worth to mention, is the communication mechanism that is used to transmit the frequency of action potentials, which are generated in the editor, to the virtual muscle. This mechanism consists of a middleware, which provides the advantages of a distributed system. One of these advantages is the scalability. That is, it is possible to use multiple nodes for each motor neuron in the pool.

At this time, the simulator consists of a single node for the pool of neurons and another for the virtual muscle. But in the near future, when muscular synergies were developed, it will be possible to use a node for each motor neuron activated, which will provide a more accurate simulation for the limb movement. However, this possibility is still on the desk, because we need to analyze how to avoid common problems such as bottlenecks, or buffer overflow.

## 4. Case Study: Continuous Limb Motion

An interesting case study, which will be useful to test the model that simulates the pool of neurons, is the continuous movement of a limb that will prove the force generation according to the frequency of action potentials.

The goal is to display the continuous movement of a limb. As explained above, the limb movement is performed by activating and deactivating the motor neuron pool. This process, together with others, allows the synergistic movement of muscles. Therefore, to achieve the required continuous movement a simulation of this process is needed.

### 4.1. Simulation

The simulation was divided in two experiments. In the first experiment, incremental motor commands were used over three laps of 5 seconds each. The number of neurons for each lap were 150, 450 and 800, respectively. It was observed that neuronal activity produced increments in muscle force. Thus, the limb performed a flexion movement shown in Figure 6. In the third lap, it was observed that the limb maintained its position until force was released. This phenomena demonstrates that the motor neuron system can lead the limb to maintain an homeostasis.

In the second experiment, the motor commands were used over three laps of 5 seconds each. The number of neurons for each lap were 600, 300 and 150, respectively. As in previous experiment, first command generated an incremental flexion. Therefore, when the sufficient strength to maintain the flexion was not present, in second and third laps, the limb extended to a position at which flexion can be maintained. This is due to the decrease in activation of motor neurons which implies a decrease in the force exerted by the muscle (see Figure 7).



Fig. 6. A high level diagram of the motor system. Each one of the structures performs specific functions that working together in order to achieve the motion.



Fig. 7. A high level diagram of the motor system. Each one of the structures performs specific functions that working together in order to achieve the motion.

## 5. Conclusion and Future Work

The simulation of the movement of a limb by activating motor neuron pools was presented. It is believed that the tests showed in this paper will give us the tools to perform independent movement of individual muscles, made by the replication of motor neuron pools that innervate the muscles. By providing virtual creatures with these tools, they will be capable of perform movements by themselves. These movements will represent behaviors produced by high-level cognitive systems. For example, a virtual creature, with all of his limbs, will be able to do tasks such as reaching, grasping and walking, among others. Those high-level cognitive systems are part of a cognitive architecture that is being designed by our research group. Therefore, the simulator will be the output of the whole cognitive architecture.

In short-term, we plan the aggregation of the antagonist muscle, as well as the synergistic integration of forces applied to the generation of movement that will allow us test other case studies as homeostasis. In the medium term, we plan to design and implement the sensorimotor system architecture containing the central nervous system structures involved in vision, proprioception, the vestibular system and the motor neuron system. With which it will be possible to produce more complex behaviors in the virtual creature, e.g., reaching, crawling and walking. These behaviors will be made due to the synergy of all the muscles involved in the task, and the high level cognitive processing necessary for the generation of complex motor programs.

Finally, in the long term, we plan to design a mechanism that will integrate the memory system, which will be able to store learned motor behaviors based on experience. This in order to provide the ability to refine the movements that a virtual creature is capable of, for example, playing a musical instrument.

## 6. Acknowledgments

We would like to thank Karina Jaime for providing the communication mechanism, and CONACyT for their financial support.

## References

- [1] N. Badler, Virtual humans for animation, ergonomics, and simulation, *IEEE Nonrigid and Articulated Motion Workshop* (1997) 28–36.
- [2] D. J. Wiley, J. K. Hahn, Interpolation synthesis of articulated figure motion (1997).
- [3] M. Kallmann, Analytical inverse kinematics with body posture control, *Computer Animation and Virtual Worlds* 19 (2) (2008) 79–91.
- [4] J. M.-C. Wang, Locomotion synthesis methods for humanoid characters, Ph.D. thesis, Toronto, Ont., Canada, Canada (2010).
- [5] G. Sandini, G. Metta, D. Vernon, Robotcub: An open framework for research in embodied cognition, in: *Proceedings of the 4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, Vol. 1, 2004, pp. 13–32.
- [6] S. Degallier, L. Righetti, L. Natale, F. Nori, G. Metta, A. Ijspeert, A modular bio-inspired architecture for movement generation for the infant-like robot icub, in: *Proceedings of the 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, Scottsdale, AZ, 2008, pp. 795–800.
- [7] J. Rickel, W. L. Johnson, Integrating pedagogical capabilities in virtual environment agent, in: *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents*, ACM Press, 1997, pp. 30–38.
- [8] J. E. Laird, A. Newell, P. S. Rosenbloom, Soar: an architecture for general intelligence, *Artificial Intelligence* 33 (1) (1987) 1–64.
- [9] J. C. Rothwell, The motor functions of the basal ganglia., *Journal of integrative neuroscience* 10 (3) (2011) 303–315.
- [10] D. Purves, *Neuroscience*, 3rd Edition, no. 18, Sinauer Associates Incorporated, 2004, Ch. Modulation of Movement by the Cerebellum, pp. 435–452.
- [11] D. Benson, *The neurology of thinking*, Oxford University Press, Incorporated, 1994.
- [12] D. Purves, *Neuroscience*, 3rd Edition, no. 15, Sinauer Associates Incorporated, 2004, Ch. Lower Motor Neuron Circuits and Motor Control, pp. 371–392.
- [13] S. Reflexes, *Principles of Neural Science*, 5th Edition, no. 35, McGraw-Hill, 2013, Ch. Pearson, Gordon.
- [14] B. L. Riemann, S. M. Lephart, The sensorimotor system, part i: the physiologic basis of functional joint stability., *J Athl Train* 37 (1) (2002) 71–9.
- [15] P. Brodal, *The Central Nervous System: Structure and Function*, 3rd Edition, no. 11, Oxford University Press, 2004, Ch. The Peripheral Motor Neurons and Reflexes, pp. 243–264.
- [16] K. O. Johnson, The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors, *Current Opinion in Neurobiology* 11 (4) (2001) 455–461.
- [17] H. Johansson, P. Sjölander, P. Sojka, A sensory role for the cruciate ligaments., *Clin Orthop Relat Res* (268) (1991) 161–78.
- [18] P. Brodal, *The Central Nervous System: Structure and Function*, 3rd Edition, no. 6, Oxford University Press, 2004, Ch. The Somatosensory System, pp. 139–182.
- [19] H. Walmsley, Burke., Forces produced by medial gastrocnemius and soleus muscles during locomotion in freely moving cats., *Journal of Neurophysiology* 5 (1978) 1203–1216.
- [20] T. Conwit, Stashuk, The relationship of motor unit size, firing rate and force., *Clinical neurophysiology* 110 (1999) 1270–1275.
- [21] F. E. Zajac, Muscle and tendon: Properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control, *Critical Review in Biomedical Engineering* 17 (4) (1989) 359–411.
- [22] Y. Guiard, On fits's and hooke's laws: Simple harmonic movement in upper-limb cyclical aiming, *Acta Psychologica* 82 (1–3) (1993) 139–159.
- [23] L. M. Studer, D. G. Ruegg, J.-P. Gabriel, A model for steady isometric muscle activation, *Biological Cybernetics* 80 (5) (1999) 339–355.

# A Bio-Inspired Architecture of a Motor System for Virtual Creatures: Reverse Engineering of the Human Hand for the Creation of a LEGO Mindstorms™ Robotic Hand

Daniel Madrigal, Gustavo Torres, Adan Ruiz, and Félix Ramos  
Computer Sciences  
CINVESTAV Guadalajara  
Jalisco, México  
Email: { dmadrigal, gtorres, , aruiz, frames }@gdl.cinvestav.mx

**Abstract**—This paper presents a LEGO Mindstorms™ model of a inspired human hand, which is able to grasp things in a similar way that us humans do. The hand is controlled by a cognitive architecture that recreates the functionality of a bio-inspired motor system, that is, a set of software structures that mimic the behavior of parts of the central nervous system that are involved in the execution, planning and coordination of movements. The movement of the robotic hand is achieved through motor commands that are sent to the actuators, which in this case are recreations of the human muscles and tendons by means of servo motors and nylon thread. The main advantages of this approach are the realization of real-time motion, the architecture of the motor system is independent of the hardware or software, and the high scalability of the system due to the bio-inspired cognitive architecture.

## I. INTRODUCTION

Nowadays, there is great interest in design mechanisms automated that allow to the virtual creatures produce behaviors comparable to those of living beings. In particular, one of the efforts to create such autonomy are the cognitive architectures, which mostly rely on theories pertaining to cognitive science [1], [2]. Obviously, one of the most important behaviors to imitate is the movement of the body and limbs. This is due, to a large extent, the autonomy of the living beings are observed by the movement of them. There are many research works that try to obtain results in the motion of artificial creatures [3], [4]. These works have a wide variety of applications, which are virtual training environments, videogames and disaster simulation in virtual environments.

This paper propose the hypothesis that in order to develop virtual creatures able to perform movements similar to living things, is necessary to design the cognitive mechanisms that living things have. In other words, it is necessary to model the sensorimotor systems that processes sensory information, which is then transmitted to high-level cognitive levels, where it is finally processed to generate a motor behavior. As detailed in the section for the model, a motor system model based on biological foundations provided by the neuroscience was proposed. To test the proposed architecture of motor system,

a robotic hand modeled with Lego Mindstorms blocks™ has been developed as case study. The robotic hand was designed based on the human hand arthrology. The tests were made with grasping tasks of different objects with different shapes and sizes.

The rest of the paper is organized as follows. The next section describes the arthrology of the human hand. Then the model of the motor system that generates the signals to move the robotic hand is detailed. After describes the implementation of the motor system and the interface between it and the robotic hand. Subsequently case studies of grasping and results are explained. Finally, the conclusions and future work.

## II. HUMAN HAND STUDY

Grasping is the result of the anatomical and functional organization of the hand. Unlike what is commonly believed, there is no a single type of grip, because the grip can be classified into three groups [5]:

**Static Grips:** In this classification are found the grips that don't need the help of gravity to its realization. The grip types that make up this group are: digital, palmar and symmetrical.

**Grips Associated with gravity:** This group is comprised of the grips that use gravity to achieve them.

**Dynamic Grips:** This group is comprised of the grips that manipulate the objects that are holding.

Due to the complex anatomical structure of the hand, it is capable of do a great amount of tasks. Therefore, the design of robotic models that recreate these anatomy would provide them with similar capabilities as the human hands. Our approach for the creation of robotic hand is simple since we only focus on the study of the fingers, which allow them to do grip in a palmar and digital way.

The fingers of human beings are composed of bones, called phalanges. Each of these bones are named depending on how close they are to the body, their names are phalanx: proximal, medial and distal [6], which are covered with ligaments to

provide stability to the fingers. In order to perform movements of this structure a group of tendons are attached to the phalanges, which are pulled by the muscle contraction, this process is explained graphically in the Figure 1.

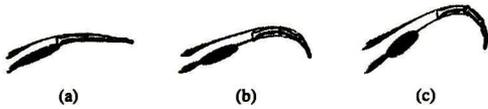


Fig. 1. The tendons are pulled by muscle contraction to which they are attached. Figure (a) shows the muscle at rest, when greater is the muscle contraction ((b) and (c)), greater is the force applied to the tendons.

### III. MODEL DESCRIPTION

#### A. Motor System Architecture

The motor system is a set of central nervous system structures that are involved in the execution, planning, and coordination of movement. This system is organized in a hierarchical way [7], the lower parts of this system are responsible for the contraction of the muscles for the purpose of performing the movement, while the upper parts perform high-level tasks such as the planning of movements. The diagram of the motor system architecture is shown in Figure 2.

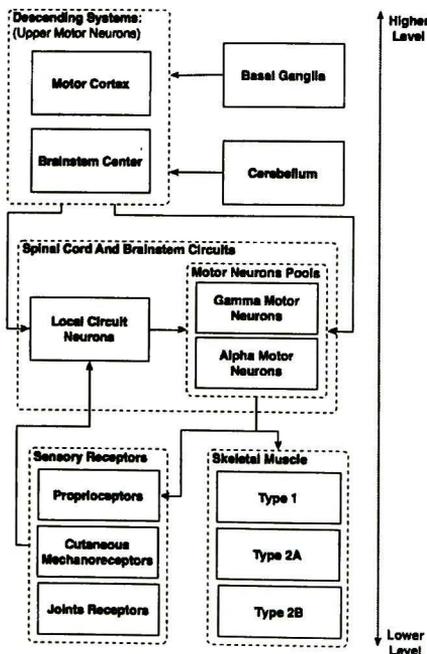


Fig. 2. Motor system architecture, each component is required in order to develop coordinated and voluntary movements.

Each one of the components play an essential role for the proper functioning of the system. In the following paragraphs the functionality of each component is explained:

1) *Superior Levels of the Motor System:* The upper parts of the motor system are formed by the motor cortex, basal ganglia, cerebellum and brainstem centers. These structures perform tasks such as: coordinated movement, motor planning, decision making, motor commands transmission to the inferior parts of motor system<sup>1</sup>, gating of known movements, initiation of voluntary movements [8], incorporate the spatiality and temporality in the planning of movements sequences[9] and maintenance of the upright position[10].

2) *Local Circuit Neurons:* These neurons are responsible for the integration of the information provided by the sensory region and the high level structures of the motor. This is done with the purpose of coordinate the activation of the lower motor neurons [7].

3) *Motor Neuron Pools-Inferior Motor Neurons:* The lower motor neurons are responsible for controlling the muscle contraction. Anatomically, lower motor neurons are organized in columns or pools within the gray matter of the spinal cord. Each of these columns is responsible for the contraction of a muscle or muscles whose functionality be similar. The size of neurons determines the type of muscle that neurons will be able to control, as the larger the muscle, bigger would be the motor neuron [11]. Within the lower motor neurons are two types of neurons: the  $\alpha$  motor neuron and  $\gamma$  motor neuron. The  $\gamma$  motor neurons are responsible for the adjustment of the sensitivity of the muscle spindle [12]. To perform the adjustment of sensibility, the  $\gamma$  Motor neurons contract the polar regions of the intrafusal fibers causing a stretch in the middle, part in where the sensory receptors are located [13]. The  $\alpha$  Motor neurons are responsible for the production of the contractions of extrafusal muscle fibers, allowing the muscles to pull the bones in order to realize movements and maintain the posture [7].

4) *Skeletal Muscles:* Skeletal muscles are a group of muscle fibers, which have the ability to contract as it receives a pulse or spike [7]. They are known as skeletal muscles, because these are responsible for moving the bone structure, in order to do this, the muscles are attached to bones by tendons. The force that the muscle is generating depends on two factors: The first is the frequency at which the muscle receives spikes from the lower motor neurons. The second factor is the number of motor neurons that are active [11]. The muscle fibers in humans can be classified in [11]:

Type 1 (Slow Twitch Fiber): This type of fibers are resistant to stress for extended periods,

Type 2A (Fast Twitch Fiber): Have higher strength than those of Type 1 and are resistant to fatigue, but not at the same grade as the fibers of Type 1.

Type 2B (Fast Twitch Fiber): This type of fibers generate the most force, but are not resistant to fatigue

#### B. Lego MindStorm™ Robotic Hand

In order to recreate the function of the hand, were used the construction parts of Lego Mindstorm™, this is because

<sup>1</sup>J. Knerim, Motor cortex,(1997). <http://neuroscience.uth.tmc.edu/s3/chapter03.html> (June 2013)

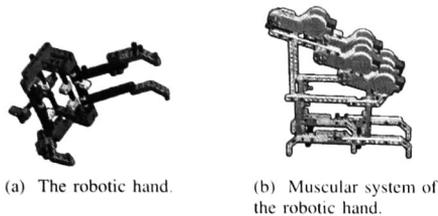


Fig. 3. Figure (a) illustrates the robotic hand. The muscular system, which is responsible for pulling the tendons, was recreated with the help of servomotors, which are shown in Figure (b).

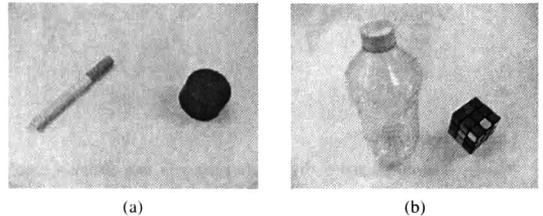


Fig. 4. Figure (a) illustrates the digital grasping objects, and Figure (b) shows the palmar grasping ones.

that these pieces allow us to create a diverse range of models, this is due to the different parts, servomotors and bricks that comprising the developer kit. In this model we only contemplate the movement of the medial and proximal phalanges for fingers and the proximal and distal phalanx for the thumb. To simulate the muscles were used seven servomotors, which are in charge of pull nylon threads. The nylon thread was used to simulate the function of the tendons. Figure 3, shown in detail the construction of the robotic hand.

#### IV. IMPLEMENTATION

##### A. Motor System Architecture

A software interface that recreates the operation of the local circuit neurons and motor neuron pools was developed. Its function is to activate a number of motor neurons following the size principle, which states that the activation of motor neurons goes from smallest to largest ones [11]. Another consideration that has been taken into account is the fact that the recruitment of motor neurons is linear and the firing rate of these remains constant [14]. Therefore, the muscle strength is a function of the number of motor neurons activated. The interface developed has a motor commands editor, it allows to establish the activation of neurons that send their pulses to the servomotors of the robot. This editor is composed of two main components:

1) *Motor Commands*: The motor commands are simple instructions that consist of the number of motor neurons to be enabled and how long should they remain active once activated. With these simple instructions the force that motors apply can be controlled.

2) *Recruitment Factor*: As discussed above, the recruitment of motor neurons is increased linearly, but depending on the size of the motor neuron, it can send pulses faster compared with small motor neurons [11]. In order to express this behavior a "recruitment factor" was proposed, which allows us to specify the relationship between the number of neurons that are going to be activated and the time to do it. Three "recruitment factors" were established. One for each one of the different muscle fiber types that exists. The following equation express this idea:

$$RF = \frac{n}{t}, \quad (1)$$

Where  $RF$  is the recruitment factor,  $n$  is the number of motor neurons, and  $t$  is the time required to activate the  $n$  motor neurons.

#### V. CASE STUDY

In this research two case studies are considered. It is believed that these studies consistently prove the proposed architecture, in terms of the transmission of information to produce flexion and extension of the muscles (the robots' motors). Furthermore, the studies also prove the robotic hand movements in order to observe the similarity to those from a human hand. It is noteworthy that there is no tactile or proprioceptive feedback. Thus, test situations only take into account the application of finger force to objects. Moreover, rigid objects are used, because if softer ones were used, the fingers would push these too much, which is not a desirable behavior. In the future, with the integration of proprioceptive and tactile systems, it will be possible to produce other types of grasping, such as the aforementioned.

##### A. Digital Grasping

The first study involves the digital grasping of two different objects, which can be seen in Figure 4a. In this case, the grasping is tested using only the fingers, which have to apply enough force to keep the object in hand. The objects of this case study have the following characteristics: they are small, have cylindrical geometry, and are rigid.

##### B. Palmar Grasping

The second study is to test the palmar grasping in two different objects, which are shown in Figure 4b. This case proves that the hand can grasp objects using fingers and palm support. The force applied is greater than that of digital objects since the fingers should get closer to the palm. The objects of this case study have the following characteristics: they are big, have cylindrical or rectangular geometry, and are rigid.

##### C. Experimental Considerations

In the experiments it is necessary to consider the two things. First, it is needed to test the operation of the system. Second, it is necessary to observe the behavior of the robotic hand when motor commands are transmitted, and how they allow the robot to do both types of grasping as described above. The following section details the results of experiments, taking into account the aforementioned considerations.

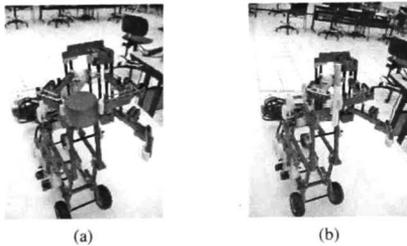


Fig. 5. The image shows digital grasping over two different objects.

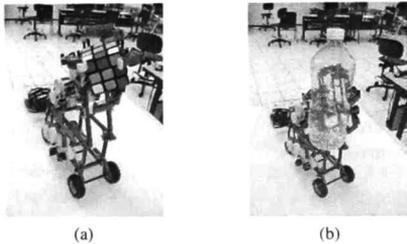


Fig. 6. The image shows palmar grasping over two different objects.

## VI. RESULTS

Four different experiments were performed, each one with two types of objects. In the first we tests the digital grasping, and the second the palmar grasping. Taking into account the considerations mentioned in the previous section, the objects used are rigid and therefore can not be deformed with the force applied by the fingers.

### A. Digital Grasping

First set of experiments made were for digital grasping. The force was applied indiscriminately, because the fingers do not have touch sensors. As shown in Figures 5a and 5b, force is applied to the index finger and thumb, which produces the desired behavior.

### B. Palmar Grasping

The second set of experiments involves the palmar grasping. As in previous experiments, force is applied indiscriminately until the object is in a tight grip. As shown in Figures 6a and 6b, the force is applied on every finger, which produces the desired behavior.

As observed in the experiments, the grasping of two different types of objects was successful. In these experiments the activation of the motors is done independently and indiscriminately, given that the architecture is still incomplete and does not have the structures responsible of the autonomic generation of motor commands. As discussed in the next section, the integration of such functionality, in addition to the tactile and proprioceptive sensory systems, is ongoing work.

## VII. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this paper an architecture for the movement of virtual entities was presented. It operates through the activation of motor neuron pools, and controls them through local circuit neurons. To test this architecture a robotic hand, which functions similar to a human hand, was designed.

With the development of the software interface, it is believed that the manipulation of the muscles in a independent way is possible. In order to animate a virtual creature, the architecture will allow developers to bring autonomous movement to virtual creatures. In order to achieve this goal it is necessary to integrate this architecture with other high-level cognitive systems. Some of these systems are ongoing work (e.g., perception, motor planning, decision-making), and it will provide spatiality and temporality for the computation of series of movements. Once these mechanisms are implemented, it is expected that the virtual creature could be capable of perform tasks such as reaching, grasping and walking, among others.

Those high-level cognitive systems are part of a cognitive architecture that is being designed by our research group. Therefore, the movements of the virtual creature will be the output of the whole cognitive architecture.

## ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank CONACYT for their financial support, and Ismael Quinto and Fernando Santos.

## REFERENCES

- [1] M. D. Byrne, *The human-computer interaction handbook*, Hillsdale, NJ, USA, 2003, ch. Cognitive Architecture, pp. 97–117.
- [2] P. Langley, J. E. Laird, and S. Rogers, "Cognitive architectures: Research issues and challenges," *Cognitive Systems Research*, vol. 10, no. 2, pp. 141–160, 2009.
- [3] J. Rickel and W. L. Johnson, "Integrating pedagogical capabilities in virtual environment agent," in *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents*. ACM Press, February 1997, pp. 30–38.
- [4] G. Sandini, G. Metta, and D. Vernon, "Robotcub: An open framework for research in embodied cognition," in *Proceedings of the 4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, vol. 1, November 2004, pp. 13–32.
- [5] I. Knapandji, *The physiology of the joints*, 6th ed., ser. The Physiology of the Joints. Churchill Livingstone, 2008, no. 5, ch. Hand, pp. 198–340.
- [6] H. Schmidt and U. Lanz, *Surgical Anatomy of the Hand*. Georg Thieme Verlag, 2004, ch. Tendons, pp. 193–200.
- [7] D. Purves, *Neuroscience*, 3rd ed. Sinauer Associates Incorporated, 2004, no. 15, ch. Lower Motor Neuron Cirtcuits and Motor Control, pp. 371–392.
- [8] J. C. Rothwell, "The motor functions of the basal ganglia," *Journal of integrative neuroscience*, vol. 10, no. 3, pp. 303–315, Sep. 2011.
- [9] D. Purves, *Neuroscience*, 3rd ed. Sinauer Associates Incorporated, 2004, no. 18, ch. Modulation of Movement by the Cerebellum, pp. 435–452.
- [10] D. Benson, *The neurology of thinking*. Oxford University Press, Incorporated, 1994.
- [11] P. Brodal, *The Central Nervous System: Structure and Function*, 3rd ed. Oxford University Press, 2004, no. 11, ch. The Peripheral Motor Neurons and Reflexes, pp. 243–264.
- [12] S. Reflexes, *Principles of Neural Science*, 5th ed. McGraw-Hill, 2013, no. 35, ch. Pearson, Gordon.
- [13] B. L. Riemann and S. M. Lephart, "The sensorimotor system, part i: the physiologic basis of functional joint stability," *J Athl Train*, vol. 37, no. 1, pp. 71–9, 2002.
- [14] T. Conwit, Stashuk, "The relationship of motor unit size, firing rate and force," *Clinical neurophysiology*, vol. 110, pp. 1270–1275, 1999.

# Referencias

- [1] E.D. Adrian. *The Basis of Sensation: The Action of the Sense Organs*. Norton, New York, 1928.
- [2] B. Appelberg. The effect of electrical stimulation in nucleus ruber on the response to stretch in primary and secondary muscle spindle afferents. *Acta physiol*, 1962.
- [3] M.F. Bear, B.W. Connors, and M.A. Paradiso. *The Somatic Sensory System*. Neuroscience: Exploring the Brain. Lippincott Williams & Wilkins, 2007. From: Bear, M.F. and Connors, B.W. and Paradiso, M.A., Neuroscience, 3rd ed, Chap 12.
- [4] Jonathan Bell, Stanley Bolanowski, and Mark H. Holmes. The structure and function of pacinian corpuscles: A review. *Progress in Neurobiology*, 42(1):79–128, January 1994.
- [5] P. Brodal. *The Cerebellum*, pages 303 – 332. 2004. From: Brodal, P., The Central Nervous System: Structure and Function, 1st ed, Chap 6.
- [6] P. Brodal. *The Somatosensory System*, pages 139 – 182. 2004. From: Brodal, P., The Central Nervous System: Structure and Function, 1st ed, Chap 6.
- [7] C E Carr and M Konishi. Axonal delay lines for time measurement in the owl's brainstem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 85(21):8311–8315, 1988.
- [8] L. Chaitow and J. DeLany. *Clinical Application of Neuromuscular Techniques: Practical Case Study Exercises*. Clinical Application of Neuromuscular Techniques. Elsevier Churchill Livingstone, 2005.

- [9] G.F. Coulouris. *Distributed Systems: Concepts and Design*, 4/e. Pearson Education, 2009.
- [10] P E Crago, J C Houk, and W Z Rymer. Sampling of total muscle force by tendon organs. *Journal of Neurophysiology*, 47(6):1069–1083, 1982.
- [11] B.B. Edin and N. Johansson. Skin strain patterns provide kinaesthetic information to the human central nervous system. *J Physiol*, 487 (Pt 1):243 – 251, 1995.
- [12] D. Floreano and C. Mattiussi. *Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies*, pages 163–265. Intelligent Robotics and Autonomous Agents Series. Mit Press, 2008. From: Floreano, D. and Mattiussi, C., L.M., Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies, 1st ed, Chap 3.
- [13] R. Frost. *Scientific Principles of Applied Kinesiology*, pages 15–62. North Atlantic Books, 2002. From: Frost, R., Applied Kinesiology: A Training Manual and Reference Book of Basic Principles and Practices, 1st ed, Chap 2.
- [14] Esther P. Gardener and Kenneth O. Johnson. *Spinal Reflexes*, pages 475 – 497. Mc Graw Hill, 2013. From:Kandel, Schwartz, Jessell, Siegelbaum and Hudspeth, Principles of Neural Science, 5th ed, Chap 22.
- [15] Esther P. Gardener and Kenneth O. Johnson. *Touch*, pages 498 – 529. Mc Graw Hill, 2013. From:Kandel, Schwartz, Jessell, Siegelbaum and Hudspeth, Principles of Neural Science, 5th ed, Chap 23.
- [16] E. Bruce Goldstein. *Introduction to the Physiology of Perception*, pages 23–41. Number 2. Wadsworth Publishing, 8 edition, 2009. From: Bear, M.F. and Connors, B.W. and Paradiso, M.A., Sensation and Perception, 3va ed, Chap 2.
- [17] E.B. Goldstein. *Sensation and Perception*. WADSWORTH Incorporated FULFILLMENT, 2013.

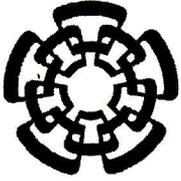
- [18] Ben Greenstein and Adam. Greenstein. *Somatosensory Aspects*, pages 132 – 177. 2000. From:Greenstein, Ben and Greenstein, Adam, *Color Atlas of Neuroscience: Neuroanatomy and Neurophysiology*, 1st ed.
- [19] Yves Guiard. On fits's and hooke's laws: Simple harmonic movement in upper-limb cyclical aiming. *Acta Psychologica*, 82(1-3):139-159, March 1993.
- [20] Kapil Gupta, K. Wienandt, and S. Cummings. *Dorsal Column and Spinocerebellar Pathways*. Random House Information Group, 1997. From:Kapil, Gupta, *The human brain coloring workbook*, Chap 14-2.
- [21] R. J. Harvey and P. B. C. Matthews. Some effects of stimulation of the muscle nerve on afferent endings of muscle spindles, and the classification of their responses into types a1 and a2. *J. Physiol*, 1961.
- [22] J.G. Hay. *The biomechanics of sports techniques*. Prentice-Hall, 1993.
- [23] Serena Ivaldi. From humans to humanoids: a study on optimal motor control for the icub.
- [24] Karina Jaime. Modelo de memoria semántica para criaturas virtuales basado en neurociencias.
- [25] Howard Peter Jenerick. The relations between prepotential, resting potential, and latent period in frog muscle fibers. *The Journal of General Physiology*, 39(5):773-787, May 1956.
- [26] Sojka P. Johansson H, Sjolander P. A sensory role for the cruciate ligaments. *Clin Orthop*, 268:161-178, 1991.
- [27] Kenneth O. Johnson. The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Current Opinion in Neurobiology*, 11(4):455-461, August 2001.
- [28] Eric R. Kandel. *Nerve Cells and Behavior*, pages 19 – 35. 2013. From:Kandel, Schwartz, Jessell, Siegelbaum and Hudspeth, *Principles of Neural Science*, 2th ed, Chap 2.

- [29] James Knierim. *Motor Units and Muscle Receptors*. The University of Texas Health Science Center at Houston (UTHealth), 1997.
- [30] Ruth Kusterer. *jMonkeyEngine 3.0 Beginner's Guide*. 1 edition.
- [31] A. Kuttan. *Fundamentals of Robotics*. I.K. International Publishing House Pvt. Limited, 2007. From: Kuttan, A., Robotics, 3rd ed, Chap 6.
- [32] Jonna Laaksonen. Tactile-proprioceptive robotic grasping.
- [33] J.E. Laird. *The Soar Cognitive Architecture*. Mit Press, 2012. From:Laird, J.E., The Soar Cognitive Architecture, 1st ed, Chap 1.
- [34] John E. Laird, Allen Newell, and Paul S. Rosenbloom. Soar: An architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, 33(1):1 – 64, 1987.
- [35] Robert H. Lamotte and Mandayam A. Srinivasan. Neural encoding of shape: responses of cutaneous mechanoreceptors to a wavy surface stroked across the monkey fingerpad. *Journal of Neurophysiology*, 76(6):3787–3797, December 1996.
- [36] Pat Langley, John E. Laird, and Seth Rogers. Cognitive architectures: Research issues and challenges. *Cognitive Systems Research*, 10(2):141 – 160, 2009.
- [37] GeorgeC. Lee. Future research needs in biomechanics summary and recommendations of the u.s. national committee on biomechanics. *Annals of Biomedical Engineering*, 15(6):619–626, 1987.
- [38] Jill Fain Lehman, Richard L. Lewis, and Allen Newell. Integrating knowledge sources in language comprehension. In *In Proceedings of the Thirteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pages 461–466, 1991.
- [39] Daniel Madrigal, Gustavo Torres, Felix Ramos, and Lea Vega. Cutaneous mechanoreceptor simulator. In *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2012 IEEE 3rd International Conference on*, pages 781 –786, dec. 2012.

- [40] Carlos Martinho and Ana Paiva. Anticipation and believability. In Giovanni Pezulo, MartinV. Butz, Cristiano Castelfranchi, and Rino Falcone, editors, *The Challenge of Anticipation*, volume 5225 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 115–133. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [41] T.A. McMahon. *Muscles, Reflexes, and Locomotion*. Princeton paperbacks. Princeton University Press, 1984.
- [42] M Mileusnic and G Loeb. Mathematical models of proprioceptors. ii. structure and function of the golgi tendon organ. *Journal of Neurophysiology*, 96(4):1789–1802, 2006.
- [43] Milana P. Mileusnic, Ian E. Brown, Ning Lan, and Gerald E. Loeb. Mathematical models of proprioceptors. i. control and transduction in the muscle spindle. *Journal of Neurophysiology*, 96(4):1772–1788, 2006.
- [44] M. Patestas and L.P. Gartner. *A Textbook of Neuroanatomy*. John Wiley & Sons, 2009.
- [45] Keir G. Pearson and James E. Gordon. *Spinal Reflexes*, pages 790 – 811. 2013. From:Kandel, Schwartz, Jessell, Siegelbaum and Hudspeth, Principles of Neural Science, 5th ed, Chap 35.
- [46] D Purves. *Lower Motor Neuron Circuits and Motor Control*, pages 371 – 392. 2004. From:Purves, D, Neuroscience, 3rd ed, Chap 15.
- [47] D Purves. *The Somatic Sensory System*, pages 189 – 208. 2004. From:Purves, D, Neuroscience, 3rd ed, Chap 8.
- [48] Jeff Rickel and W. Lewis Johnson. Integrating pedagogical capabilities in virtual environment agent. In *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents*, pages 30–38. ACM Press, February 1997.
- [49] Bryan L Riemann and Scott M Lephart. The sensorimotor system, part i: the physiologic basis of functional joint stability. *J Athl Train*, 37(1):71–9, 2002.

- [50] G. Sandini, G. Metta, and D. Vernon. Robotcub: an open framework for research in embodied cognition. In *Humanoid Robots, 2004 4th IEEE/RAS International Conference on*, volume 1, pages 13–32 Vol. 1, 2004.
- [51] R. Shadmehr and S.P. Wise. *What Generates Force and Feedback*. A Bradford book. Mit Press, 2005. From: Shadmehr, R. and Wise, S.P., *The Computational Neurobiology Of Reaching And Pointing: A Foundation for Motor Learning*, 1st ed, Chap 7.
- [52] L. M. Studer, D. G. Rugg, and J.-P. Gabriel. A model for steady isometric muscle activation. *Biological Cybernetics*, 80(5):339–355, 1999.
- [53] R. Sun. *The CLARION Cognitive Architecture: Extending Cognitive Modeling to Social Simulation*. Cambridge University Press, 2006. From: Sun, R., *Cognition and Multi-Agent Interaction: From Cognitive Modeling to Social Simulation*, 1st ed, Chap 4.
- [54] R. Sun. *Considering Soar as an Agent Architecture*. Cambridge University Press, 2006. From: Sun, R., *Cognition and Multi-Agent Interaction: From Cognitive Modeling to Social Simulation*, 1st ed, Chap 3.
- [55] N.G. Tsagarakis, B. Vanderborght, M. Laffranchi, and D.G. Caldwell. The mechanical design of the new lower body for the child humanoid robot icub. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4962–4968, 2009.
- [56] Nikolaos G. Tsagarakis, Giorgio Metta, Giulio Sandini, David Vernon, R. Beira, Francesco Becchi, Ludovic Righetti, José Santos-Victor, Auke Jan Ijspeert, Maria Chiara Carrozza, and Darwin G. Caldwell. icub: the design and realization of an open humanoid platform for cognitive and neuroscience research. *Advanced Robotics*, pages 1151–1175, 2007.
- [57] D. Vernon, C. von Hofsten, and L. Fadiga. *The iCub Cognitive Architecture*. Cognitive Systems Monographs. Springer Berlin Heidelberg, 2010. From: Vernon, D.

- and von Hofsten, C. and Fadiga, L., A Roadmap for Cognitive Development in Humanoid Robots, 1st ed, Chap 7.
- [58] B. Walmsley and M.J. Nicol. *Action Potential Propagation Along Primary Afferents and Presynaptic Inhibition in Clarke's Column of the Spinal Cord*, pages 138–149. Oxford University Press, 1998. From: Pablo Rudomin and Romo, R. and Mendell, L.M., *Presynaptic Inhibition and Neural Control*, 1st ed, Chap 7.
- [59] Robert E. Wray, John E. Laird, and et al. *Intelligent opponents for virtual reality trainers*, 2002.
- [60] J. Zelená. *Nerves and Mechanoreceptors: The Role of Innervation in the Development and Maintenance of Mammalian Mechanoreceptors*. Springer, 1994.



# CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N. UNIDAD GUADALAJARA

El Jurado designado por la Unidad Guadalajara del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional aprobó la tesis

Propiocepción Sintética para Entidades Virtuales Antropomórfas

del (la) C.

Daniel Eduardo MADRIGAL DÍAZ

el día 16 de Agosto de 2013.

Dr. Luis Ernesto López Mellado  
Investigador CINESTAV 3C  
CINESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Juan Luis Del Valle Padilla  
Investigador CINESTAV 3C  
CINESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Félix Francisco Ramos Corchado  
Investigador CINESTAV 3B  
CINESTAV Unidad Guadalajara

Dr. José Luis Leyva Montiel  
Investigador CINESTAV 3B  
CINESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Pablo Covarrubias Salcido  
Profesor Investigador  
Universidad de Guadalajara



CINVESTAV - IPN  
Biblioteca Central



SSIT0012011