



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# Modelado y Simulación de la Locomoción en Aves para el Estudio de su Eficiencia Energética

Nubia Nathaly Sánchez Galvis

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2013



# Modelado y Simulación de la Locomoción en Aves para el Estudio de su Eficiencia Energética

**Nubia Nathaly Sánchez Galvis**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería-Automatización Industrial**

Director:  
Doctor Ricardo Emíro Ramírez Heredia

Línea de Investigación:  
Robótica Móvil  
Grupo de Investigación:  
UNRobot

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería, Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2013



A mi madre que con esfuerzo ha hecho de mí una persona de bien, a la Universidad Nacional de Colombia y por sobre todo a Dios.



# Agradecimientos

Inicialmente expreso un gran agradecimiento a mi director, el profesor Ricardo Emíro Ramírez Heredia quien me apoyó y asesoró a lo largo del desarrollo de esta tesis, por su paciencia y dedicación. A mis familiares quienes me han acompañado a lo largo de mi carrera brindándome su apoyo incondicional y voto de confianza, mi mamá Nubia Galvis y mi papá Hugo Sánchez, a Alejandro Rodríguez por ser mi apoyo y refugio en los momentos más difíciles. Finalmente agradezco a la Universidad Nacional de Colombia que me brindó los medios necesarios para la culminación de este proyecto.



## Resumen

El documento describe el modelo y la simulación de la locomoción terrestre en una especie de ave seleccionada en modo de caminata lenta y moderada. Se desarrolla un algoritmo que genera el modelo cinemático basado en estudios previos y experimentales propios de esta investigación el cual es simulado, además, se propone un indicador de su eficiencia energética a partir de los datos obtenidos y se presenta una recopilación de estudios sobre el tema y la teoría referente a la descripción de localización de las extremidades posteriores del ave, cinemática y cinemática diferencial.

**Palabras clave:** Modelo cinemático, Locomoción Bípeda, Energía, Columba Livia, Propagación de Velocidades, Lagrange-Euler..

## Abstract

This document describes the model and simulation of bipedal locomotion in a selected specie bird, in slow and moderate gait. An algorithm in Matlab is developed to generate the kinematic model, it is based in former studies and experimental research related to this work. Also, an energy efficiency indicator is proposed from the data obtained. finally it is presented a compilation of studies concerning the description of localization of the bird hind limb, kinematics and differential kinematics.

**Keywords:** Kinematic Model, Pedestrian Locomotion, Energy, Columba Livia, Velocity Propagation, Lagrange-Euler Model

# Lista de Figuras

1-1. Representación de los componentes de marcha . . . . .	3
1-2. Metodología propuesta para el modelado y simulación de la locomoción en aves. . . . .	4
2-1. Representación de los componentes de marcha . . . . .	5
2-2. Longitud de paso . . . . .	6
2-3. Representación de la duración del ciclo de marcha . . . . .	6
2-4. Representación de la duración del ciclo de marcha . . . . .	7
2-5. Asignación de sistemas de referencia a articulaciones adyacentes [13] . . . . .	9
2-6. Velocidad vs longitud de paso en bípedos [2] . . . . .	12
2-7. Comportamiento locomotor antes y después de lesiones del sistema Lumbo-sacral. [43] . . . . .	16
2-8. Longitud de los segmentos del pie para varias especies de aves [29] . . . . .	17
2-9. Diagrama cinemático y Modelo 3D [25] . . . . .	21
2-10. Diagrama cinemático y Modelo 3D [25] . . . . .	22
3-1. Columba Livia. . . . .	23
3-2. Clasificación sistemática. . . . .	24
4-1. Diagrama de barras del patrón locomotor en caminata lenta [12] . . . . .	27
4-2. Diagrama de barras del patrón locomotor en caminata moderada [12]. . . . .	29
4-3. Diagrama de barras del patrón locomotor en caminata rápida.[12] . . . . .	31
4-4. Patrón de caída del pie. (RF y LF) pie derecho e izquierdo . . . . .	32
5-1. Espacio de trabajo en caminata lenta de la paloma ( <i>Columba Livia</i> ) . . . . .	38
5-2. Espacio de trabajo en caminata moderada de la paloma ( <i>Columba Livia</i> ) . . . . .	38
5-3. Esquema miembro posterior con marcos de referencia y ángulos de articulación . . . . .	40
5-4. miembro izquierdo y derecho caminata lenta . . . . .	41
5-5. Marcha miembro izquierdo y derecho caminata moderada . . . . .	41
5-6. Caminata en palomas a.lenta y b.moderada . . . . .	42
6-1. Diseño tridimensional del fémur, vista isométrica, lateral y frontal . . . . .	43
6-2. Diseño 3D del Tibiotarso, vista isométrica, lateral y frontal . . . . .	44
6-3. Diseño 3D del tarsometatarso, vista isométrica, lateral y frontal . . . . .	44
7-1. Energía Cinética de la caminata lenta ( <i>Columba Livia</i> ) . . . . .	47

---

<b>7-2.</b> Energía Cinética de la caminata moderada ( <i>Columba Livia</i> ) . . . . .	47
---	----

# Lista de Tablas

4-1. Mediciones de parámetros locomotores en caminata lenta[12]. . . . .	26
4-2. Medición de parámetros locomotores en caminata moderada[12] . . . . .	28
4-3. Diagrama de barras del patrón locomotor en caminata rápida[12] . . . . .	30
4-4. Parámetros de conducta en locomoción terrestre. . . . .	33
4-5. Longitud de huesos extremidad posterior. . . . .	34
4-6. Masa en cuatro palomas domésticas. . . . .	34
4-7. Densidad del ave. . . . .	34
4-8. Mediciones y comparación de la conducta en palomas domesticas (C. Livia). . . . .	35
4-9. Longitud de los huesos de la extremidad posterior en palomas domesticas (C. Livia). . . . .	36
5-1. Parámetros escogidos a partir de experimentos biológicos . . . . .	37
5-2. de parámetros Denavit-Hartenberg (D-H) . . . . .	39
7-1. Parámetros seleccionados para la evaluación de energía de la paloma doméstica (C. Livia) . . . . .	45

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>5</b>
2.1. Conceptos teóricos fundamentales de la marcha . . . . .	5
2.2. Conceptos de mecánica y energía . . . . .	7
2.2.1. Posición y orientación . . . . .	7
2.2.2. Cinemática . . . . .	8
2.2.3. Dinámica . . . . .	10
2.3. Antecedentes de investigación . . . . .	11
2.3.1. Correlaciones dimensionales . . . . .	11
2.3.2. Equilibrio durante la locomoción terrestre . . . . .	13
2.3.3. Morfología . . . . .	15
2.3.4. Modelos Cinemáticos . . . . .	18
2.3.5. Energía . . . . .	19
2.3.6. Robots bio-inspirados . . . . .	20
<b>3. SELECCIÓN DEL AVE</b>	<b>23</b>
<b>4. ANÁLISIS DE MOVIMIENTO</b>	<b>25</b>
4.1. Patrón locomotor . . . . .	25
4.2. Tamaño y forma del ave . . . . .	32
4.2.1. Materiales y Métodos . . . . .	32
4.2.2. Experimentos biológicos . . . . .	33
4.2.3. Parámetros de investigadores y comparación . . . . .	35
<b>5. Modelo Matemático</b>	<b>37</b>
5.1. Espacio de trabajo . . . . .	37
5.2. Análisis cinemático de la marcha del ave . . . . .	39
<b>6. Reconstrucción 3D</b>	<b>43</b>

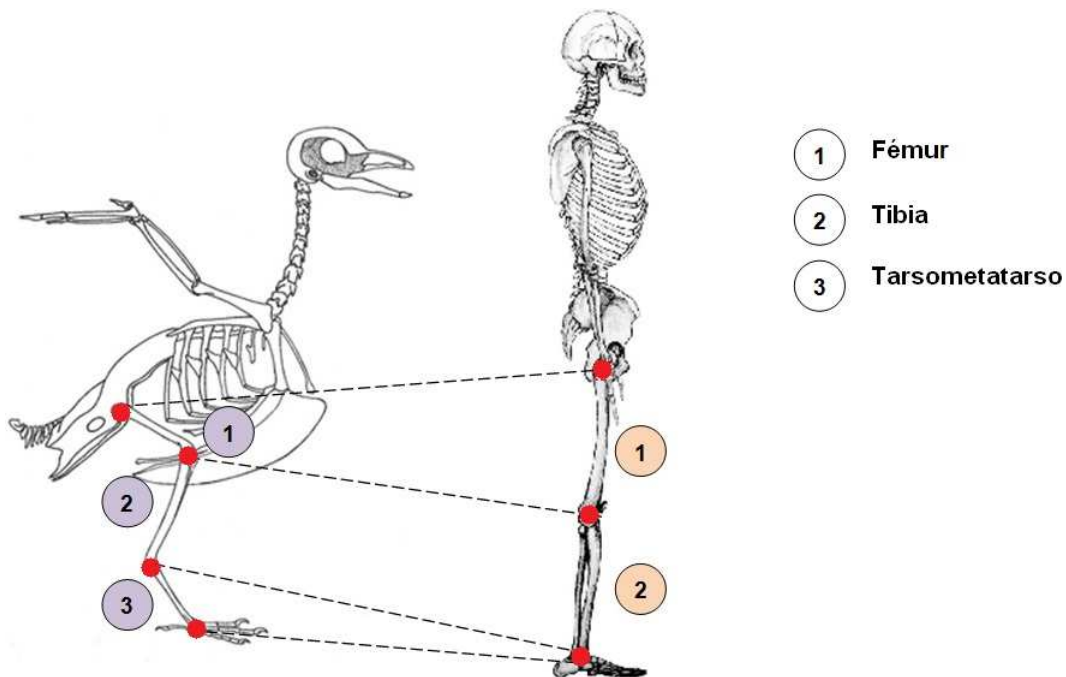
---

<b>7. Energía en la locomoción terrestre</b>	<b>45</b>
7.1. Análisis energético . . . . .	45
7.2. Indicador de eficiencia . . . . .	48
<b>8. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>52</b>

# 1 Introducción

Continuamente, el mundo está experimentando avances tecnológicos en todos los campos de la ciencia, entre los que se encuentra la robótica móvil. Encargada de cumplir misiones de navegación autónoma o tele-operada en lugares difícilmente accesibles, logrando abordar aplicaciones de navegación espacial, transporte de material de alto riesgo biológico, actividades acuáticas y tareas de seguridad, entre otras. La robótica móvil se clasifica según su forma de locomoción: acuática, aérea y terrestre, esta última se puede dar mediante ruedas, patas o arrastre. La locomoción mediante patas a su vez puede ser bípeda, cuadrúpeda o sextúpeda clasificándose según el número de puntos de apoyo sobre el suelo. A diferencia de los otros es versátil y flexible, permite aislar el cuerpo del terreno usando puntos discretos de soporte, logrando atravesar terrenos irregulares, evitando deslizamientos, causando menos daño a terrenos y consiguiendo omnidireccionalidad en su movimiento. Sin embargo presenta mayor complejidad en la estabilidad y mayor consumo de energía que en los robots con ruedas.

La locomoción bípeda se ha inspirado en la mayoría de los casos en la caminata humana, logrando ampliar el conocimiento con respecto a la biomecánica de la marcha y los patrones de movimiento de los músculos. Este trabajo investiga la locomoción bípeda desde otra perspectiva, se realiza la estructuración de un proyecto que aplica el concepto de biomimesis que estudia a la naturaleza como fuente de inspiración para crear y desarrollar nuevas tecnologías innovadoras y poder solucionar problemas humanos que la naturaleza ha podido resolver. Los terópodos, ancestros prehistóricos de las aves, tenían excelentes habilidades de caminata bípeda (probablemente los primeros caminadores bípedos en la historia) [34], son descendientes de una larga línea de caminadores y corredores, lo cual hace que sus extremidades hayan sido herramientas fundamentales para su supervivencia. A diferencia de las aves, las extremidades inferiores humanas se componen de dos segmentos (fémur y tibia) y tres articulaciones (cadera, rodilla y tobillo) mientras que en las aves se encuentran tres segmentos (fémur, tibiotarso y tarsometatarso) y cuatro articulaciones (cadera, rodilla, tobillo y pie) tal como lo muestra la figura 1-1. La necesidad de avanzar bípedamente se ha resuelto de dos formas: plantígrada como los humanos (colocamos toda la planta del pie en el suelo cuando caminamos o corremos), y digitígrada como las aves (que caminan sobre los dedos o dígitos) [6].



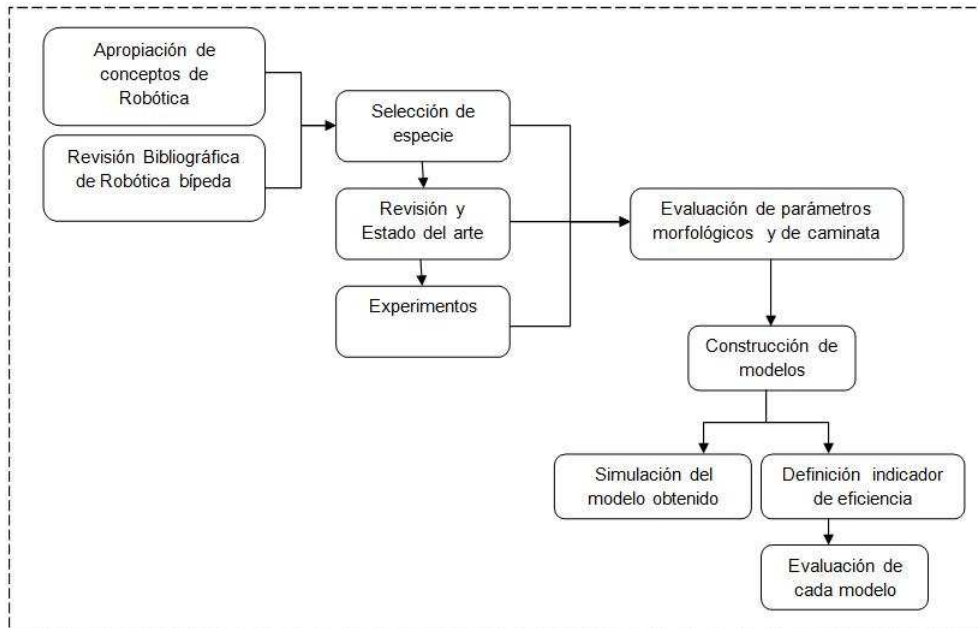
**Figura 1-1:** Representación de los componentes de marcha

Este proyecto es un aporte para el avance de la robótica móvil mediante patas, ya que amplía el conocimiento en este tipo de locomoción con el fin de desarrollar nuevas tecnologías de movimiento. Hoy en día existen investigaciones de este tipo y aun así el movimiento terrestre de estos dispositivos es aun bastante restringido comparado con el de un animal.

Con el fin de cumplir el anterior propósito se propuso como objetivo general: **Modelar y simular por lo menos un modo de caminata en aves con el fin de estudiar su eficiencia energética.** Este objetivo general se estructura según los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar al menos una especie de ave para el estudio de su locomoción terrestre.
- Obtener modelos matemáticos de los modos de caminata en las especies de aves seleccionadas.
- Simular los modelos obtenidos de caminata en aves.
- Definir un indicador de eficiencia y evaluar los modelos obtenidos.

Para el cumplimiento de dichos objetivos se planteó la metodología que se explica a continuación. Mostrada anticipadamente con el propósito de estructurar el contenido de este documento:



**Figura 1-2:** Metodología propuesta para el modelado y simulación de la locomoción en aves.

Este trabajo se estructura en siete capítulos que describen la metodología desarrollada:

En el segundo capítulo se explican conceptos teóricos fundamentales en locomoción terrestre tales como ciclo de marcha, longitud de paso y factor de trabajo entre otros. Se realiza un breve repaso de conceptos propios de robótica móvil enfocados en la orientación y localización de la extremidad posterior del ave con base en los lineamientos de Craig [13]. Se revisa el estado del arte de la locomoción bípeda resaltando algunos robots bípedos bio-inspirados que han sido implementados.

En el tercer capítulo se presentan las razones por las cuales se seleccionó la paloma doméstica (*Columba Livia*) como especie de ave a estudiar y se exponen los resultados de las practicas realizadas con palomas.

El cuarto capítulo presenta los experimentos biológicos realizados en varias palomas para obtener parámetros necesarios para el modelo matemático y presenta la comparación de estos experimentos con estudios previos.

En el quinto capítulo se obtiene el modelo matemático con la ayuda de Matlab aplicando métodos clásicos de cinemática y dinámica de robots y teniendo en cuenta el espacio de trabajo y las singularidades que puedan presentarse.

Posteriormente el sexto capítulo muestra la reconstrucción tridimensional del modelo con el fin de comprender su morfología y comportamiento. El séptimo capítulo evalúa la energía de la locomoción terrestre del ave y propone un indicador que evalúa el modelo obtenido en función de su eficiencia energética a partir de estudios previos. Finalmente el capítulo ocho presenta las conclusiones del trabajo realizado y futuros trabajos a realizar.

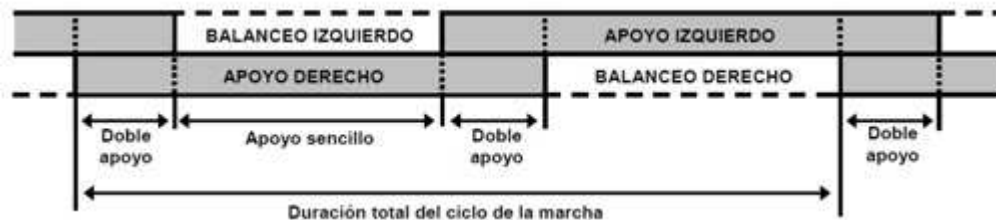
## 2 MARCO CONCEPTUAL

### 2.1. Conceptos teóricos fundamentales de la marcha

El estudio del ciclo de marcha se inicia cuando un pie toca el suelo y termina con el siguiente contacto del mismo pie con el suelo. Está compuesto por la fase de apoyo más la fase de balanceo. A continuación se definen los términos usados en el estudio de la locomoción terrestre mediante patas: La fase de apoyo o de soporte es el período en que la pierna está en el suelo. A su vez se subdivide en:

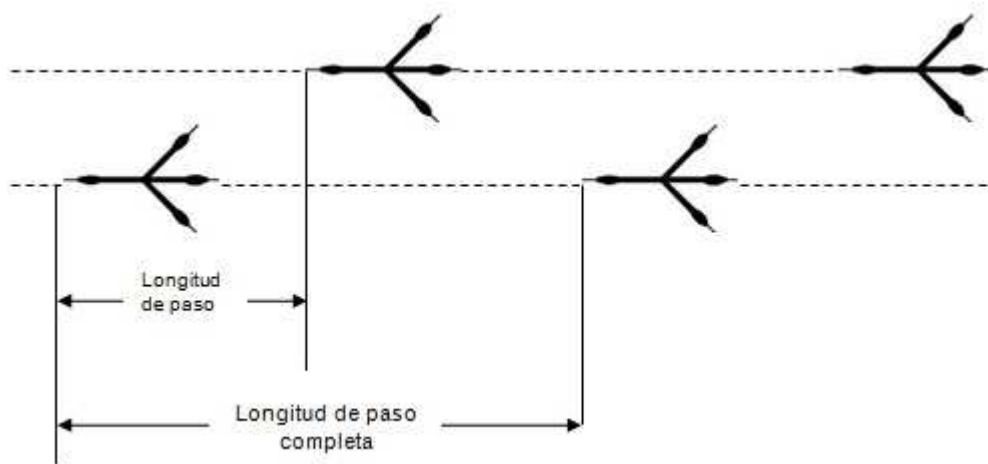
- Apoyo sencillo, es el periodo en el que solo un pie está en contacto con el suelo.
- Apoyo doble es el periodo en el que los dos pies están en contacto con el suelo simultáneamente (la ausencia de un periodo de apoyo doble diferencia el correr del andar).

La fase de balanceo es el período en que la pierna no está en el suelo (ver Figura 2-1.)



**Figura 2-1:** Representación de los componentes de marcha

Longitud de paso es la distancia lineal sobre el plano de progresión entre los puntos de contacto del talón de un pie y el otro pie con el suelo y longitud de paso completa es la distancia lineal sobre el plano de progresión entre los puntos de contacto del talón con el suelo del mismo pie.(ver Figura 2-2.)



**Figura 2-2:** Longitud de paso

Un pie se apoya en el suelo el 60 % del ciclo de marcha y está en fase de balanceo el 40 % restante. El 60 % de fase de apoyo se subdivide en 40 % del periodo mientras el otro pie se balancea y 20 % en el que hay apoyo doble (ver Figura 2-3.)



**Figura 2-3:** Representación de la duración del ciclo de marcha

El factor de trabajo hace referencia a la fracción de tiempo que dura un pie en el suelo. Protracción es el movimiento de una pierna hacia adelante con relación al cuerpo y a el suelo. Retracción es el movimiento de una pierna hacia atrás con relación al cuerpo. (ver Figura 2-4.)

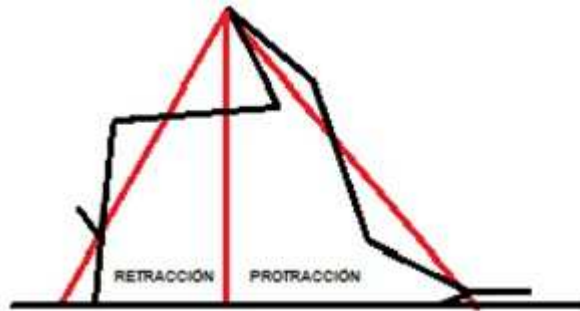


Figura 2-4: Representación de la duración del ciclo de marcha

## 2.2. Conceptos de mecánica y energía

El modelo matemático que se desarrolla en este proyecto describe un tipo de movimiento complejo que combina simultáneamente traslación y rotación de una cadena cinemática abierta o cerrada, dependiendo del momento de ciclo de marcha que se esté analizando. El conjunto de huesos o segmentos en el modelo usado se suponen están unidos por articulaciones de rotación o angulares que exhiben un grado de libertad. El modelo propuesto es planar, se diseña con seis articulaciones de rotación, tres por cada pie, con 3 grados de libertad (GDL) cuando esta conformado como cadena cinemática abierta. Datos obtenidos a partir de la fórmula de Grubler Ecuación2-1

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (2-1)$$

### 2.2.1. Posición y orientación

Se deben describir las posiciones y orientaciones de la extremidad posterior del ave en el espacio en cualquier instante de tiempo, asignando un sistema de coordenadas rígido a cada segmento del mecanismo y realizando una serie de transformaciones para describir su localización. La notación y metodología utilizada es explicada a continuación: En base a la notación de Craig [13], se describe la posición de un punto  $\{B\}$  mediante un vector  $3 \times 1$  y su orientación mediante la matriz de rotación  $3 \times 3$  con respecto a un sistema coordenado fijo  $\{A\}$ . En general se describe su localización mediante una matriz  $4 \times 4$  llamada matriz de transformación homogénea compuesta por la matriz de rotación, el vector posición y la última fila comprende 3 columnas cero correspondientes al factor de perspectiva y la cuarta columna corresponde al factor de escala que será de uno, así como se muestra en la Ecuación2-2

$$\{B\} =_B^A R_{B^{org}}^A P \longrightarrow \begin{bmatrix} {}_B^A R & {}_B^{A^{org}} P \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Si se desea conocer la localización de un punto  $P^A$  en el marco de referencia A y se sabe su localización en el marco de referencia B como  $P^B$ , se debe realizar el siguiente procedimiento (ver Ecuación2-3):

$$P^A =_B^A T * P^B \quad (2-3)$$

Se cambió  $P^B$  a una descripción relativa en un sistema coordenado {A} mediante el uso del operador de transformación T; en la mayoría de los casos se describen sistemas de referencia con respecto a otros haciendo uso de la aritmética de las transformaciones (transformaciones compuestas e inversas de las transformaciones).

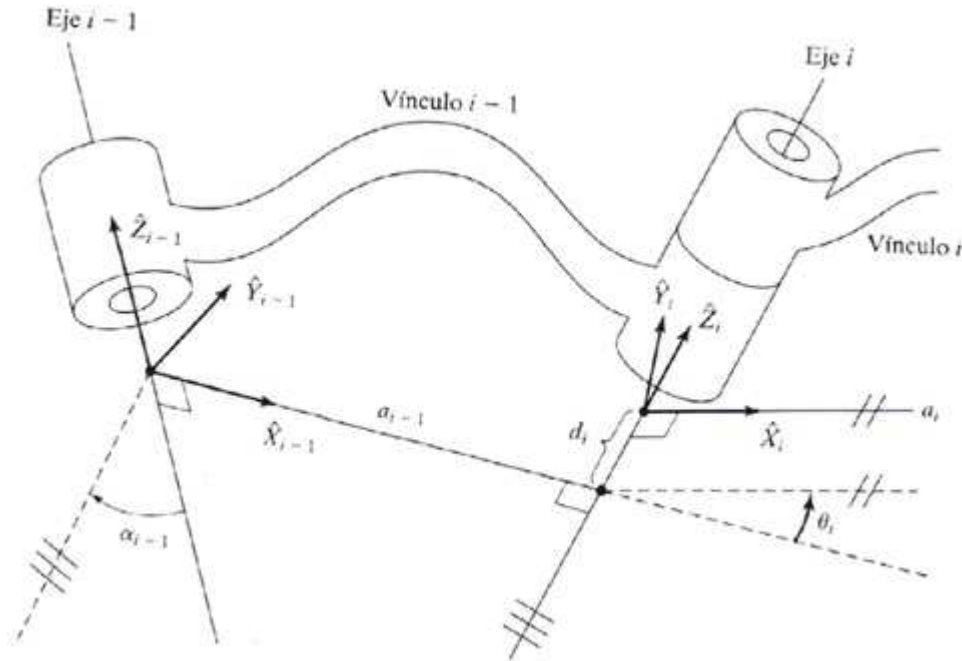
### 2.2.2. Cinemática

Los modelos cinemáticos se basan en el empleo de transformaciones entre sistemas de referencia; estos se relacionan los valores de las variables articulares y su localización (posición y orientación) en el espacio. La cinemática trata el movimiento sin considerar las fuerzas que lo generan, estudia la posición, velocidad y aceleración de un cuerpo en el espacio y puede ser directa o inversa. La cinemática directa calcula la posición y orientación de los eslabones del robot dadas las variables articulares, mientras que en la cinemática inversa se calculan las variables articulares dadas la posición y orientación de los eslabones. Cualquier mecanismo puede describirse en forma cinemática conociendo los valores de cuatro cantidades asociadas a cada articulación; una de estas es la variable de articulación y las restantes son parámetros fijos. Esta definición es una convención conocida como notación Denavit-Hartenberg [18]. Antes de definir estos parámetros se deben asignar los sistemas de referencia fijos a cada articulación mediante la siguiente metodología: Los segmentos se enumeran empezando desde cero en la base inmóvil y aumentando consecutivamente. Las articulaciones se enumeran comenzando desde uno. El eje  $Z_i$  coincide con el eje de articulación  $i$  y su origen se define en la intersección de la perpendicular común entre los ejes  $i$  e  $i+1$ . El eje  $X_i$  se elige en la dirección de esta perpendicular común y el eje  $Y_i$  se obtiene a partir de la regla de la mano derecha. El sistema de referencia 0 se elige de forma que  $Z_0$  coincide con  $Z_1$  y el sistema de referencia {n} se elige con la dirección  $X_n$  alineada con  $X_{n-1}$  cuando  $\theta_1 = 0$  Las cadenas cinemáticas se describen indicando los siguientes parámetros Denavit Hartenberg de las articulaciones:

- Longitud de eslabón  $a_{i-1}$  es la distancia entre  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$  medida a lo largo de  $X_{i-1}$ .
- Ángulo de torsión  $\alpha_{i-1}$  es el ángulo entre  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$  alrededor de  $X_{i-1}$ , su signo será positivo si al llevar  $Z_{i-1}$  sobre  $Z_i$  por el camino mas corto, el sentido que resulte de aplicar la regla de la mano derecha es el mismo que el del vector  $X_{i-1}$

- Distancia de articulación  $d_i$  es la distancia desde  $X_{i-1}$  hasta  $X_i$  medida a lo largo de  $Z_i$
- Ángulo de articulación  $\theta_i$  es el ángulo entre  $X_{i-1}$  y  $X_i$  alrededor de  $Z_i$ , su signo será positivo si al llevar  $X_{i-1}$  sobre  $X_i$  por el camino mas corto, el sentido que resulte de aplicar la regla de la mano derecha es el mismo que el del vector  $Z_i$

En articulaciones de rotación  $a_{i-1}, \alpha_{i-1}, d_i$  son constantes y  $\theta_i$  es variable mientras que en articulaciones prismáticas  $a_{i-1}, \alpha_{i-1}, \theta_i$  son constantes y  $d_i$  es variable. La Figura 2-5 muestra claramente lo anteriormente dicho



**Figura 2-5:** Asignación de sistemas de referencia a articulaciones adyacentes [13]

En los extremos de la cadena cinemática los valores de  $a_0, \alpha_0, d_0, a_n$  y  $\alpha_n$  son arbitrarios y se toman como cero para articulaciones de rotación y  $\theta_1$  y  $\theta_n$  pueden escogerse arbitrariamente. Cuando se interceptan dos ejes consecutivos de articulación  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$ ,  $a_{i-1} = 0$  y cuando son paralelos el origen del marco de referencia  $i-1$  se puede colocar en cualquier punto del eje  $Z_{i-1}$  aunque se aconseja colocarlo sobre el plano del segmento. El modelado hace necesario representar  $\{i\}$  con respecto a  $\{i-1\}$ ; cada transformación puede definirse según tres cantidades constantes y una variable de articulación mediante una transformación compuesta por cuatro transformaciones básicas logrando localizar a  $\{i-1\}$  en  $\{i\}$  en tres localizaciones intermedias así como lo muestra la Ecuación 2-4

$${}^{i-1}T = Rot(\tilde{X}_{i-1}, \alpha_{i-1})Tras(\tilde{X}_{i-1}, a_{i-1})Rot(Z_i, \theta_i)Tras(\tilde{Z}_i, d_i) \quad (2-4)$$

$${}^i{}_{i-1}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & -c\alpha_{i-1} & -c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

De lo anterior, a partir de las matrices de cada articulación se obtiene la transformación compuesta  ${}^0_nT$  que relaciona la localización  $\{n\}$  con la  $\{0\}$  por lo que conociendo los valores de las variables articulares se calcula la posición y orientación de la última articulación, desarrollando así la cinemática directa.

$${}^0_nT = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \dots {}^3_nT \quad (2-6)$$

La cinemática inversa resulta más compleja, conocida la posición y orientación del efector final se deben encontrar las variables articulares. Es fundamental conocer el espacio de trabajo del mecanismo, si el punto que se desea alcanzar no está dentro de este espacio la cinemática inversa no se puede solucionar, debido a las singularidades presentadas en el mecanismo.

El análisis de velocidad se realiza por medio del método de propagación de velocidades o con la matriz jacobiana que especifica la asignación de velocidades en espacio de las articulaciones a velocidades en espacio cartesiano, esta asignación cambia mientras varía la configuración del mecanismo pero en algunos puntos singulares no es invertible. La Ecuación 2-7 muestra la relación mencionada, siendo  ${}^0v$  un vector de  $3 \times 1$  de velocidades  $\dot{q}$  un vector de  $6 \times 1$  de velocidades de las articulaciones

$${}^0v = {}^0J(q)\dot{q}' \quad (2-7)$$

En la evaluación de la eficiencia energética se deben estudiar las fuerzas que requiere el ave para generar el movimiento, a continuación se realiza un breve repaso de la dinámica, calculando las funciones del momento de torsión. La trayectoria que sigue el ave en los ciclos de marcha se especifica por una base de datos en el tiempo obtenida a partir de estudios previos como se verá más adelante.

### 2.2.3. Dinámica

El torque que el ave debe realizar sobre sus articulaciones para generar movimiento en sus extremidades se obtiene del modelo dinámico inverso, a partir de la trayectoria de posición angular y velocidad angular mediante la ecuación de movimiento propia de la dinámica del ave. Los métodos de obtención del modelo son formulaciones tales como la de Newton-Euler que se basa en el diagrama de cuerpo libre mediante la ecuación de balance de fuerzas, y la de Lagrange-Euler que se basa en la conservación de energía. La presente investigación se

centra en la obtención de la energía que gasta el ave al realizar cada paso, esta se compone esencialmente de la energía asociada al movimiento traslacional y rotacional (energía cinética Ecuación 2-8) y la energía asociada a la altura (energía potencial (Ecuación 7.1) sin embargo existe un componente de energía asociado a la fricción de cada articulación.

$$K = \frac{1}{2}mv^T v + \frac{1}{2}w^T I w \quad (2-8)$$

$$P = mg^T h \quad (2-9)$$

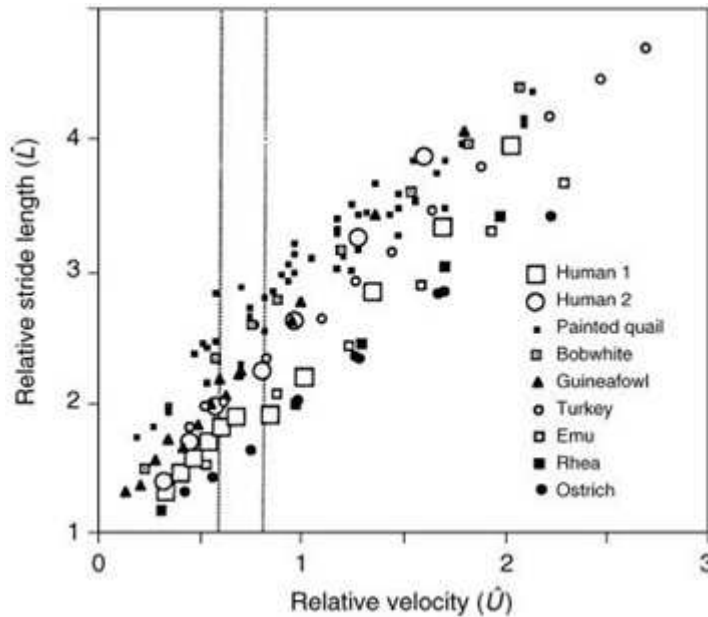
## 2.3. Antecedentes de investigación

Se han realizado investigaciones sobre la locomoción terrestre en aves y han brindado información sobre patrones de movimiento e inclusive, se han desarrollado robots caminadores inspirados en aves, como el robot caminador planar "Spring Turkey" (1996) [19] y el "Spring Flamingo" (2000) [45] desarrollados por el MIT. A continuación se presentan comparaciones entre la caminata en distintas especies de aves, análisis sobre la conducta en el caminar, algunas hipótesis sobre el equilibrio durante la locomoción, consumo de energía y finalmente se exponen varios robots caminadores bio-inspirados.

### 2.3.1. Correlaciones dimensionales

En la locomoción bípeda, los pies se mueven alternadamente medio ciclo desfasado uno de otro, tales pasos son generalmente clasificados como caminata si el factor de trabajo es mayor a 0,5 y carrera si este es menor a 0,5. La locomoción bípeda tiene tres modos: caminata, carrera y saltos. Se identifican un conjunto de diferencias entre la locomoción bípeda humana y la de aves [4]; ningún animal camina o corre como los humanos ya que podemos mantener el tronco erguido en la caminata, nuestras rodillas están casi en línea recta en la mitad del paso, nuestros pies ejercen dos picos de fuerza sobre el suelo cuando caminamos rápidamente y usualmente en la carrera colocamos solo el talón, aunque se destaca que existen ciertas similitudes dinámicas. Para el estudio no se tomaron en cuenta las aves que gastan la mayor parte de su tiempo en arbustos ya que éstas se movilizan mediante saltos, lo que representa una primera diferencia cinemática importante. En la teoría de parámetros adimensionales [11] se indica que dos sistemas son físicamente similares si se mueven con igual número de Froude  $\frac{velocidad^2}{longitud * gravedad}$  [42]. Entonces, dos animales moviéndose con similitud dinámica tendrán la misma longitud de paso y el mismo factor de trabajo. La Figura 2-6 muestra la longitud de paso relativa vs la velocidad en bípedos, tomando como longitud característica la cadera con respecto al suelo. Por ejemplo las codornices dan pasos más largos que los humanos mientras que las aves corredoras los dan más cortos sin importar la velocidad.

Las diferencias entre aves y humanos tienden a reducirse si la longitud característica es la longitud de pierna.



**Figura 2-6:** Velocidad vs longitud de paso en bípedos [2]

El factor de trabajo en aves es similar al de los humanos a velocidades de caminata pero mayores que los humanos en velocidades de carrera. Las fuerzas de interacción entre los pies de un animal y el suelo equilibran su peso y las cargas inerciales, estas fuerzas no son constantes en la locomoción. El componente vertical de la fuerza sobre el suelo siempre fluctúa alrededor de un valor medio igual al peso corporal. En la caminata humana, el movimiento del centro de masa es parecido a un péndulo invertido; en [21] se muestra el doble soporte como una transición de un péndulo invertido al siguiente se supone que la pierna principal realiza el trabajo negativo mientras que simultáneamente la pierna de arrastre realiza el trabajo positivo para sustituir la energía perdida. Con el fin de comprobar esa hipótesis, se desarrolla un método para cuantificar el trabajo externo mecánico; los resultados arrojaron que durante el doble apoyo las piernas realizan una cantidad sustancial de trabajo positivo y negativo simultáneamente. La dinámica de un péndulo invertido es intrínsecamente inestable, por lo que es necesario controlar la dinámica del cuerpo hábilmente para compensar la estabilidad al caminar. Esta forma de caminata como péndulo invertido es energéticamente económica porque permite el intercambio de energía potencial gravitacional y energía cinética del cuerpo.

### 2.3.2. Equilibrio durante la locomoción terrestre

Unos de los principales aspectos en estudio en la locomoción bípeda es lograr mantener el equilibrio del cuerpo durante el movimiento. Existen diferentes teorías que explican como la naturaleza controla el equilibrio en el ciclo de marcha para las aves: Una de estas teorías investiga la funcionalidad del movimiento de la cabeza durante la caminata de aves, algunos trabajos indican que no hay una relación específica con la caminata mientras que otros indican que tiene gran influencia en el equilibrio o en la ubicación espacial. A continuación se describen las ideas principales de algunos de los trabajos encontrados: Innisd [15] compara la gaviota plateada y otras especies de aves e indica que:

- En el movimiento de la articulación del tobillo (articulación tibiotarsus-tarsometatarsus) se ve un gran doblamiento de la pierna por cada paso. Esta característica también está presente en la caminata humana, aunque la rodilla no es homóloga a la articulación principal de las aves ya que mientras que los puntos de la articulación van hacia adelante en los humanos, en la aves van hacia atrás. Cuando un pie empuja al cuerpo desde el suelo le da mayor impulso, mientras que la flexión durante la fase media de apoyo le da resistencia, determinando la proporcionalidad inversa entre el tamaño del ave y la velocidad de paso.
- El movimiento de la cabeza en las aves (head-bobbing) durante su locomoción terrestre está correlacionado con su relativa postura horizontal para mantener el equilibrio, pero se sabe que éste movimiento no se presenta en todas las aves. Luego de analizar a diferentes especies se concluye que las aves que mueven su cabeza esporádicamente sin seguir un patrón o movimiento cíclico relacionado al movimiento de sus extremidades habitan cerca al agua, tienen una postura relativamente erguida y dedican poco tiempo a caminar. Innisd [15] presenta un estudio comparativo en aproximadamente 40 especies. En cambio otras aves mueven su cabeza mientras caminan siguiendo un patrón relacionado al movimiento de sus extremidades, el cual consiste en empujar su cabeza hacia adelante y luego mantenerse detenidas mientras se retrae el cuello y el cuerpo alcanza su posición, lo que se puede comparar con el movimiento de los brazos en los humanos. El balanceo de la cabeza tiene un significado ya que gastan energía en ello y se encuentra presente en una gran cantidad de aves.
- Se compara la caminata con el salto y se concluye que para algunas aves es más eficiente saltar que caminar ya que al saltar cubren más terreno, la observación de diferentes especies que saltan y corren indican que el movimiento terrestre de estas no está en función de su anatomía.

Según Frost[28], varias aves muestran un movimiento de avance y de retroceso rítmico y sincronizado de sus cabezas cuando caminan, este movimiento es caracterizado por un rápido movimiento hacia delante (fase de empuje) seguido por una fase en donde la cabeza mantiene

su posición con respecto al entorno pero se mueve hacia atrás con respecto al cuerpo (fase de espera o retención). Esto, también ha sido descrito por algunos autores como un ciclo de empuje/retracción [16][26].

Troje y Frost [52] Demuestran que la cabeza se mantiene realmente estable en el espacio en la fase de retención no sólo en la traslación horizontal sino también en la traslación vertical sin mostrar ningún tipo de rotación. Concluyen que la fase de retención sirve para la estabilización de la imagen retiniana, facilitando el procesamiento de la imagen y en particular la detección de objetos en movimiento. La estabilización de la cabeza está bajo control visual y su posterior balanceo es una respuesta opto-cinética para estabilizar la imagen retiniana durante la siguiente fase de retención. Dunlap y Mowrer [22] analizan este movimiento en palomas y gallinas observando un movimiento rítmico relacionado a la marcha; la fase de espera se basa en la ilusión: en esta fase la posición de la cabeza se mantiene estable con respecto al entorno, mientras que el cuerpo se mueve continuamente hacia adelante. Los movimientos de la cabeza durante la marcha se caracterizan por una fase de espera que es provocada por la visión y una fase de empuje. La paloma muestra una oscilación de cabeza cuando se mueve en ambientes inestables, pero cuando camina en una cinta (entorno estable) no mueve significativamente la cabeza. El balanceo de la cabeza ha sido comparado con la respuesta opto cinética en los mamíferos en la que hay un movimiento lento del ojo para la fijación de un objeto (fase de espera) y un rápido movimiento rápido para fijar un nuevo objeto (fase de empuje). Cronin, Kinloch y Olsen [14] indican que el balanceo de la cabeza en grullas (*Gruidae*) favorece la fijación visual, lo que estabiliza los campos visuales durante el movimiento del cuerpo, evitando el desenfoque de la retina; esto es necesario para la detección e identificación de objetos durante la búsqueda visual, pero el tiempo disponible para la estabilización varía con la velocidad de paso. El movimiento de la cabeza es proporcional a la velocidad de paso, en el caso de las grullas que se mueven a un ritmo lento, por lo que la fijación es posible casi todo el tiempo. Los resultados sugieren que en las grullas (*Gruidae*) la fijación visual es necesaria durante la búsqueda de alimento, el tiempo de fijación varía con la velocidad al caminar ya que la estabilización de la visión es necesaria para la detección de objetos, el reconocimiento y la localización. Sin embargo, existen otras hipótesis de la función no visual del movimiento de la cabeza atribuyéndolas al balanceo durante la locomoción terrestre, tal y como lo hacen los humanos al mover sus brazos y las jirafas al mover sus cabezas [16][17], aunque, estas hipótesis se contrarrestan con el hecho de que no todas las aves mueven sus cabezas durante la locomoción terrestre y no muestran impedimento en el equilibrio. La paloma balancea su cabeza no solo cuando se mueve en el espacio inercial sino también cuando hay movimiento relativo entre el ave y sus alrededores [28]. Otra posible función del movimiento de la cabeza tiene que ver con sus funciones biomecánicas, transfiriendo energía durante el ciclo de marcha. El trabajo positivo ejercido por la pierna de arrastre durante la fase de empuje, en las aves con pocos músculos en las piernas, es realizado por los músculos del cuello. El balanceo de la cabeza puede proporcionar un mecanismo para transferir trabajo negativo de la pierna de paso a la pierna

posterior [51].

Necker [44] menciona que existe un gran número de observaciones pero aún no hay una interpretación absoluta de la función del balanceo de la cabeza en algunas aves debido a que este parece ser un mecanismo innato. La longitud de paso juega un papel importante en el movimiento de la cabeza ya que las aves que dan pasos más cortos no balancean su cabeza.

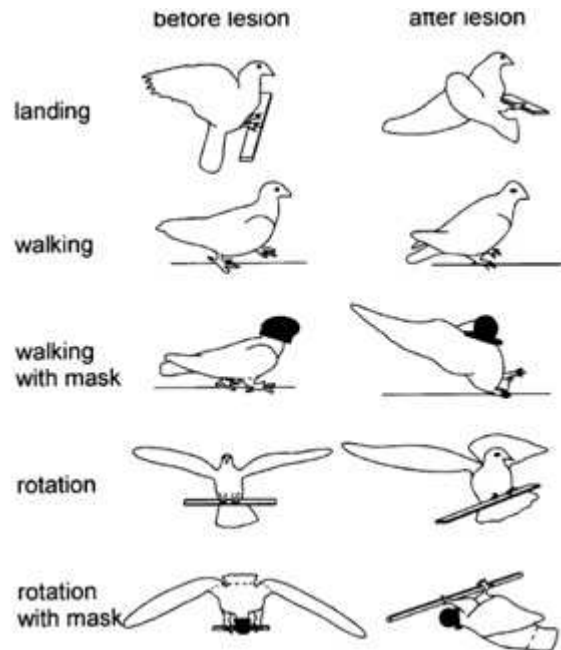
### 2.3.3. Morfología

La morfología refleja el cambio estructural de los animales a través de la evolución, por lo que los biólogos argumentan la importancia de investigar este tema para la identificación y distinción de especies en la clasificación moderna además de aportar conocimientos en el desarrollo de nuevas tecnologías bio-inspiradas. Los morfólogos y evolucionistas se han interesado en el estudio del sistema musculo-esqueletico y en los mecanismos de alimentación de las aves. Algunos investigadores centran su atención en la anatomía de la extremidad posterior porque las características de los músculos son importantes en caracteres taxonómicos y sirven como base para varios tipos de estudios de intereses evolutivos. Estos estudios funcionales permiten interpretar cambios estructurales de fósiles en términos adaptacionales para diferentes patrones de locomoción.

Cracraft [12] analiza la morfología funcional de las extremidades posteriores de la paloma doméstica (*Columbia Livia*), estudia la estructura y la función de las articulaciones y correlaciona estos resultados con los movimientos permitidos en cada articulación. Describe detalladamente los músculos de las extremidades posteriores, obteniendo información de la longitud relativa de las fibras e información sobre la composición histológica de las fibras en el músculo; Del mismo modo Charles Burk [7] estudia el sistema muscular de la paloma (*Columba Livia*) describiendo sus posibles movimientos y dando una idea de la posición del sistema muscular, que funciona como actuador en la locomoción aviar y bípeda. Cracraft realiza un análisis de movimiento a altas velocidades de las extremidades posteriores comparándolas entre sí y con respecto al desplazamiento y velocidades angulares; también examina los aspectos más importantes del ciclo de marcha asumiendo su locomoción como planar.

Las vertebras y la médula espinal lumbosacra están conectadas por el liquido cefalorraquídeo. Necker y Beissenhirtz [43] comprueban una relación de estos con el equilibrio durante la locomoción terrestre, realizando lesiones en una abertura del sistema de fluido sobre las palomas y analizan su comportamiento terrestre; los resultados apoyan la hipótesis de que las vertebras y la médula espinal lumbosacra están involucradas con el control y soporte de la locomoción terrestre. Los autores describen experimentos en los que se privó de visión a algunas palomas. Los resultados mostraron que evitaban caminar, pero cuando lo hacían parecía normal excepto porque ya no balanceaban la cabeza. Luego de lesionarlas, la mayoría tenían algunos problemas al mantener el equilibrio y había una inclinación transitoria hacia un lado, sin embargo, estas irregularidades desaparecieron a los pocos días. Se realizó un

último experimento con los ojos vendados y con la lesión hecha y se demostró que las palomas eran incapaces de mantenerse en pie; cada intento de caminar resultó en una rotación del cuerpo y posteriormente en caída, estirando las alas en la dirección en la que caen, por lo que la locomoción no es coordinada y arroja como resultado el tambaleo del ave tal como lo muestra la Figura 2-7.



**Figura 2-7:** Comportamiento locomotor antes y después de lesiones del sistema Lumbosacral. [43]

La locomoción en aves es controlada por un conjunto de sistemas sensoriales que incluyen el sistema somato sensorial, el órgano vestibular y el sistema visual. Las aves mostraron alteraciones significativas de la locomoción terrestre, sobre todo cuando se les privó de la visión, lo que sugiere que este sistema influye en los movimientos de las piernas. Las aves no utilizan la cola ni las alas para alcanzar el equilibrio sobre la tierra, esto significa principalmente que los músculos de las piernas están involucrados en el mantenimiento de una posición normal para mantener el equilibrio. Fujita [29] trata los parámetros cinemáticos de la caminata en seis especies de aves (garzas, aves acuáticas y comedores de suelo, dos de cada especie) mediante observaciones (filmaciones) en su hábitat, fotografías y mediciones anatómicas de cadáveres, obteniendo información de variables cinemáticas como longitud de paso, frecuencia de paso, ángulos de prolongación, retracción y excursión, longitud de ala, longitud de segmento de piernas y masa corporal, encontrando que la frecuencia de paso es mayor en aves acuáticas que en las otras especies pero su amplitud de movimientos es menor que en otras aves, a causa de su adaptación morfológica o física para nadar y por la magnitud del balanceo de la cabeza. Los comedores de suelo y las garzas que caminan balanceando

su cabeza muestran una mayor longitud de paso y mayor ángulo de excursión, sin embargo la magnitud de los movimientos de la cabeza durante la caminata fue especialmente mayor en garcetas que además muestran mayor longitud de paso y mayor ángulo de excursión. Se dice que estos parámetros están mecánicamente relacionados el uno con el otro. Además el ángulo de excursión incrementa al incrementar la velocidad pero en aves acuáticas y Gray Starling (*Sturnus cineraceus*) decrece al aumentar la velocidad. En palomas, el ángulo de protracción fue constante a una velocidad dada, mientras que el ángulo de retracción incrementa con la velocidad. La Figura 2-8 explica las longitudes de los segmentos del pie en diferentes especies incluyendo la paloma doméstica y las compara entre sí. Finalmente Richard F. Johnston realiza estudios morfométricos de palomas, se ha enfocado en conocer la variación en el tamaño y forma que tienen estas especies entre sí. El tamaño tiene variación interlocativa en las hembras y tiende a incrementar con la latitud en Norteamericana pero en los machos no tiene tal patrón geográfico [37].

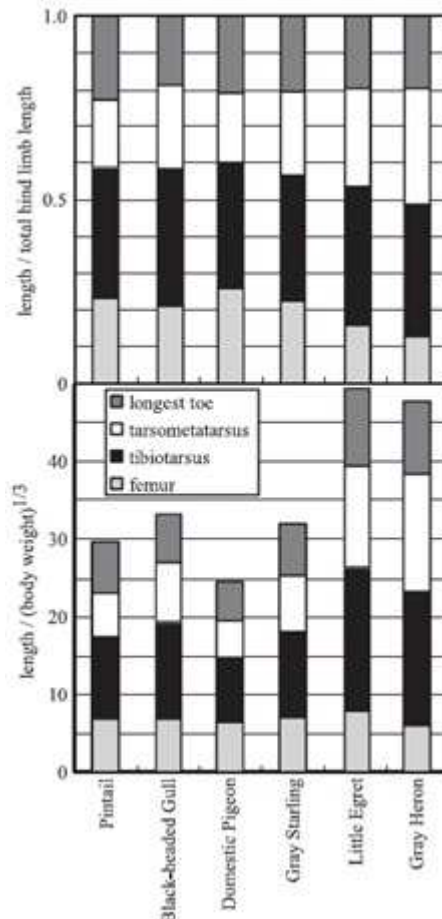


Figura 2-8: Longitud de los segmentos del pie para varias especies de aves [29]

### 2.3.4. Modelos Cinemáticos

Para comprender el comportamiento terrestre de las aves, se acostumbra utilizar modelos matemáticos a partir de datos experimentales obtenidos mediante diferentes técnicas de captura.

Matthew D. Zeiler [56] estudia el comportamiento de las palomas durante el cortejo, a través de un modelo de aprendizaje a partir de datos visuales y usa un algoritmo de aprendizaje con redes neuronales llamado *Conditional Restricted Boltzmann Machine*, que ha tenido buenos resultados en estudios de locomoción humana[50]. El modelo construido cuantifica el balanceo de la cabeza e introduce un método de predicción de los datos faltantes para ajustar las variables ocultas y minimizar la energía libre del modelo, confirmando que la posición y orientación de la cabeza son estacionarios durante la fase de retención y que existen rápidos cambios en la posición y orientación de la cabeza durante la fase de empuje. Además, encuentra distintos patrones presentes en las secuencias de caminata, para ciclo normal y para ciclo en cortejo, tal como lo había afirmado Troje y Frost [52].

Hugel, Hackert y Abourachid[33] desarrollaron modelos cinemáticos de la locomoción terrestre en codornices contando con la actuación de tan sólo cuatro juntas por cada pie con cierta inclinación especial, cabe resaltar que por lo general las aves poseen la misma estructura en su pie pero presentan diferencias en la longitud de sus huesos. A las aves se les colocan esferas metálicas en puntos estratégicos con el fin de observar su movimiento con rayos x y filmadoras, luego estos datos son extraídos a un sistema semiautomático basado en el rastreo de las esferas. Se determina la dirección X en dirección longitudinal de movimiento, la dirección Y denota el eje lateral horizontal y Z es la dirección vertical. La reconstrucción 3D considera las dos fases de movimiento terrestre por separado para reflejar variaciones independientes tal como se observa en situaciones reales.

Se determina que el centro de masa está localizado bajo la cadera, cerca de la rodilla lo que brinda mayor estabilidad, que la posición flexionada da redundancia en movilidad pero también brinda estabilidad que la relación entre longitud de paso y la altura de la cadera es de 2,2 (1 para los humanos) ya que la articulación extra del tobillo no toca el suelo y aumenta esa relación. El modelo propuesto tiene dos actuadores en la cadera, uno más en la rodilla y otro en el tobillo y se caracteriza por usar un mínimo de articulaciones y por tener una orientación específica de la articulación de cadera y tobillo.

Por medio de un análisis cinemático se definen los grados de libertad y la orientación de los ejes de rotación con el fin de construir un modelo cinemático bio-inspirado de primer orden. Hugel, Hackert y Abourachid [33] usan la convención modificada de los parámetros de Denavit Hartenberg [39], la cual tiene dos ventajas, la primera es que no solamente es muy adecuada para la descripción cinemática de estructuras de lazo abierto sino también para las de lazo cerrado y la segunda es que es muy conveniente para definir el eje z como eje de articulación i. Los resultados de la simulación muestran que el modelo propuesto es

adecuado para reproducir la locomoción bípeda y puede ser usado como alternativa a un modelo humano que normalmente se construye con seis articulaciones rotativas actuando por pie.

Los autores [1] también encuentran que el movimiento de la cabeza es producido por la flexión y extensión del cuello, en donde la máxima flexión del cuello se encuentra en la mitad de la fase de apoyo simple y la máxima extensión se encuentra en la mitad de la fase de doble apoyo. Durante la flexión del cuello la cabeza es estable, mientras que en la extensión el cuello proyecta la cabeza hacia delante (empuje) y los movimientos de la cabeza son cualitativamente coordinados con el pitch del tronco.

En la Universidad Nacional de Colombia se han construido tres robots bípedos llamados UNROCA I, II y III, de los cuales se han obtenido modelos y simulaciones. El prototipo UNROCA II [9] se basó en la descripción de caminata bípeda tipo "Winter" [54] que cuenta con la información requerida para obtener el modelo cinemático directo, usando la nomenclatura de Craig [13], que utiliza matrices de transformación homogénea obtenida de la matriz de parámetros según Denavit Hartenberg. El modelo dinámico se realiza utilizando el método Newton Euler que permite obtener un conjunto de ecuaciones recursivas, que hacia delante muestran la velocidad y aceleración angular y hacia atrás calculan fuerzas y pares.

El prototipo UNROCA III [38] mantiene el equilibrio por contrapeso, lo que le permite caminar sin elementos externos de apoyo; se simuló diferentes acciones del robot como caminata plana y ascenso de un escalón, obteniendo resultados visualmente representativos sobre el comportamiento dinámico.

### 2.3.5. Energía

La exigencia básica para obtener la estabilidad estática es que la proyección del centro de masa de los animales debería pasar por la región cubierta por los pies, en paso dinámicamente estable no hay tal restricción, ya que depende de factores como las proporciones del cuerpo, la velocidad, el consumo de energía entre otros. El estudio de la caminata ayuda a entender la fisiología básica de la selección de paso y ayuda a establecer límites de comportamiento. Correr bípedamente implica tener una fase aérea en el paso, pero ciertas variaciones en la caminata como correr en círculo, correr bajo gravedad aumentada, correr sobre superficies controladas y con incremento de flexión de rodillas puede reducir la fase aérea inclusive a cero.[38]. Aunque es poca la información sobre cómo se mueven los animales en terrenos ásperos e irregulares, se sabe que las piernas de los animales tienen la tendencia de buscar sitios de soporte cercanos a los sitios de soporte inmediatamente anteriores; además en terrenos ásperos se nota un aumento mensurable de gasto de energía en cada paso.

Los músculos son las máquinas biológicas que generan fuerza, con el fin de estudiar el comportamiento energético de un animal es necesario medir el consumo de energía. Uno de los métodos más antiguos es la medición calorífica. La energía que no es convertida en trabajo por el músculo es convertida en calorías y se mide usando termocupla. Esta estrategia

lleva dificultades técnicas al aplicarla en animales pequeños. Otro método es medir las calorías indirectamente mediante el intercambio de gases respiratorios y calculando la energía equivalente. La simetría en los animales bípedos con respecto al eje longitudinal del cuerpo simplifica el control en el movimiento, aunque las piernas no sean idénticas por la fuerza que soportan las estructuras Taylor et al. [3] diseñaron una serie de cuatro documentos que estudian la relación entre la energía y la mecánica en la locomoción terrestre en función de la velocidad y el tamaño del cuerpo en aves y mamíferos y la cantidad de oxígeno consumido durante la locomoción a una velocidad y peso constantes [5], considerando que la mayoría de energía consumida por los músculos de los animales es usada en la transformación de energía química en energía mecánica[3]. Los autores encuentran datos del costo de energía en la locomoción para mamíferos artiodáctilos y algunas especies de aves silvestres. El consumo de oxígeno en estado estable de 20 especies investigadas incrementa linealmente con la velocidad de paso sobre un rango de velocidades, lo que hace posible expresar la relación por medio de una ecuación lineal. Como resultado, se conoce que hay dos componentes en el costo energético en la locomoción: Un costo extrapolado cero de velocidad y un costo incremental. Ambos son constantes porque la relación entre el consumo de energía y la velocidad es lineal. Se demuestran dos relaciones generales acerca del costo energético de la locomoción en aves y mamíferos:

- la capacidad metabólica incrementa linealmente con la velocidad sobre un rango de velocidades
- El costo de movimiento de la masa del cuerpo decrece en función del incremento de la masa del cuerpo.

Adicionalmente, se cuantifican los cambios de energía cinética de las extremidades y el centro de masa relativo. Finalmente, se cuantifican los cambios de energía cinética y potencial de los animales durante el paso.

### 2.3.6. Robots bio-inspirados

Entre los Robots caminadores bio-inspirados en aves se encuentran los ya nombrados desarrollos del instituto tecnológico de Massachusetts MIT, llamados "Spring Turkey" [19] y "Spring Flamingo" [45]. Estos robots planares fueron construidos como plataformas experimentales para implementar técnicas de control, descripción de movimiento y algoritmos de caminata, ampliando el conocimiento en biomecánica de la marcha y patrones de movimiento.

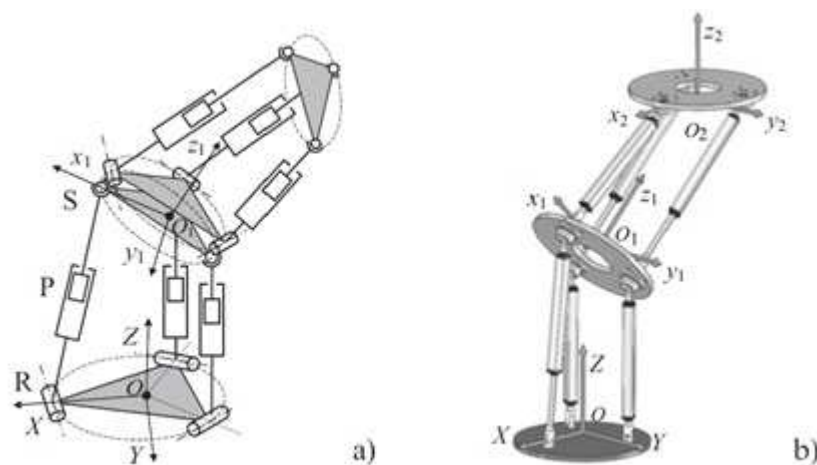
El control de locomoción bípeda ha sido uno de los problemas con mayor complejidad para la robótica, aunque existen varios trabajos y proyectos que buscan encontrar soluciones. Ejemplo de esto es el robot Bio-inspirado Jurassic Chicken [31], inspirado en aves no voladoras, que presenta diferencias a la caminata bípeda en humanos en cuanto al fémur, que es acortado drásticamente, el tobillo alargado, caminata en los dedos y pelvis más estrecha y alargada. El desarrollo buscó mantener la agilidad, mediante balanceo dinámico, es decir

el robot está en constante caída y captura su siguiente paso. El problema de control es más complejo que el de el equilibrio estático, resolviéndolo mediante redes neuronales.

El robot es modelado como un cuerpo rígido de masa fija, lo cual simplifica los cálculos de la fuerza y torque requeridos para predecir el movimiento en una dirección determinada. Tiene un mínimo peso en las piernas, ya que en lugar de concentrar la actuación de las articulaciones en el cuerpo, proporciona masa rígida centralizada, determinando fácilmente el centro de gravedad.

Un robot Multilocomotor inspirado en el gorila macho (orden: Primates, familia: Pongidae, genero: Gorilla) fue desarrollado para realizar movimientos de forma autónoma en locomoción bípeda, cuadrúpeda y por braquiación [30], los brazos y las piernas deben generar altos torques para que puedan soportar su propio peso. Además se muestra un método de control novedoso llamado Passive Dynamic Autonomous Control (PDAC)[20].

En la Universidad de Cassino en Italia se diseñó un robot bípedo caminador y escalador, con seis DGL [25]. Este robot emplea dos dispositivos de succión para subir sobre superficies rígidas y tiene una estructura cinemática híbrida compuesta por dos módulos 3 RPS (rotacional-prismática y esférica).



**Figura 2-9:** Diagrama cinemático y Modelo 3D [25]

Varios prototipos de robots humanoides han sido perfeccionados a lo largo de la historia, entre los que se encuentran: ASIMO "Advanced step in Innovative mobility" que ha sido desarrollado por mas de 15 años por la compañía Honda [32], el SDR-4X (2004) y el QRio (2006) que fueron presentados por la empresa Sony [36][10] y el robot antropomórfico Petman, diseñado para probar ropa de producción química para militares, que se mueve libremente y simula la fisiología humana para generar condiciones reales de prueba, fue desarrollado por la compañía Boston Dynamics [24].

A nivel Nacional, se han desarrollado un serie de robots llamados UNROCA en su versión I, II y III [9][46], proyectos construidos en Bogotá, Colombia. A cargo del grupo de investigación UNRobot de la Universidad Nacional de Colombia, al que también hace parte esta investigación **2-10**



**Figura 2-10:** Diagrama cinemático y Modelo 3D [25]

### 3 SELECCIÓN DEL AVE

Se ha seleccionado como especie de ave a estudiar la paloma (*Columba Livia*) (ver Figura 3-1). Principalmente por su relación con los humanos y la facilidad de encontrarla en gran cantidad en la sabana de Bogotá ya que fue necesario tener contacto con esta ave. Son fáciles de capturar y mantener en cautiverio. Su patrón locomotor es general y proporciona una buena base para realizar trabajos comparativos. Además, se ha encontrado información relevante en el estudio de la locomoción bípeda en la paloma [12], en el balanceo de su cabeza [28, 16, 26, 52, 27, 48, 55] el cortejo [56] y en variaciones de su tamaño y forma [37].

Para el desarrollo de este proyecto se tiene contacto con las palomas gracias a la ayuda de la Unidad de Rescate y Rehabilitación de Animales Silvestres (URRAS) de la Universidad Nacional de Colombia quienes facilitan el acceso a estas aves. Se obtiene información del movimiento y del comportamiento mediante métodos observacionales sistemáticos.

Las palomas han inspirado al mundo moderno en diferentes campos del conocimiento logrando aplicar el concepto de biomímesis en distintos casos como, pintura sin pigmento, filtros ópticos UV y de radiación [55], tela que se auto-limpia [35] y sensores magnéticos [53].



**Figura 3-1:** *Columba Livia*.

Con el propósito de contextualizar al lector sobre la especie de ave a estudiar se presenta la

Figura 3-2 la cual muestra la clasificación taxonómica de las aves. Los cuadros cuyo relleno de forma es azul expresan el ordenamiento taxonómico del bípido al que se está estudiando.

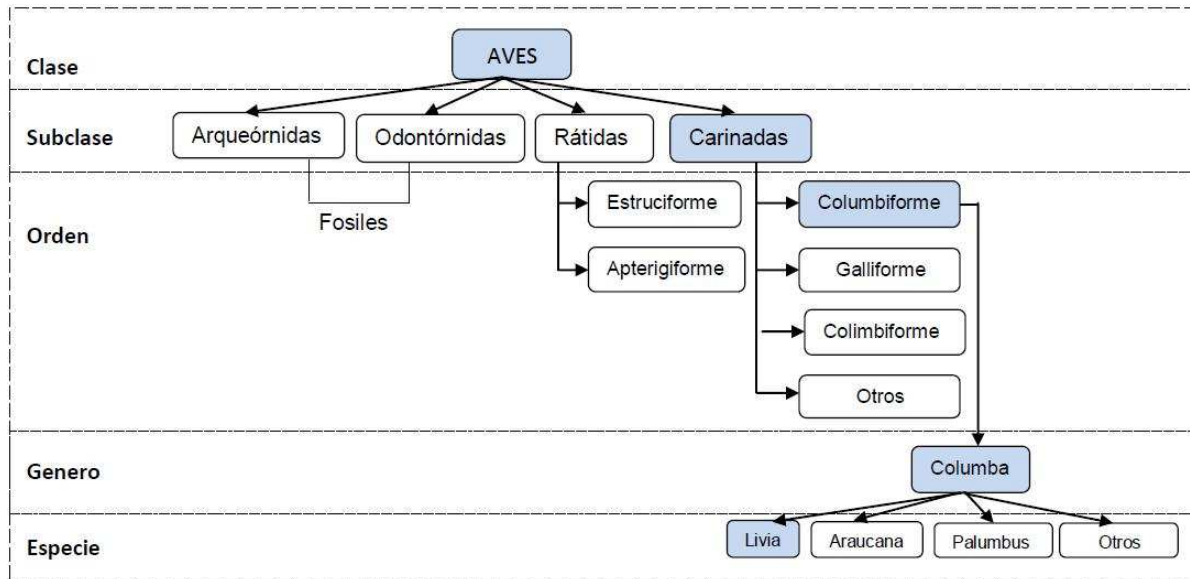


Figura 3-2: Clasificación sistemática.

# 4 ANÁLISIS DE MOVIMIENTO

El modelo se describe a partir de los valores de las cuatro cantidades asociadas a cada articulación (longitud de eslabón, ángulo de torsión, ángulo de articulación y distancia de articulación) según la convención Denavit Hartenberg explicada, estos valores se obtienen de investigaciones previas realizadas por otros autores y de experimentos realizados exclusivamente para este estudio como se verá en este capítulo.

## 4.1. Patrón locomotor

Se obtiene información de posición y orientación de las articulaciones a partir de patrones locomotores aportados por Cracraft [12] quien centró su estudio en la paloma doméstica (*Columba Livia*), investigó la estructura y la función de las articulaciones y músculos de la extremidad posterior, usados para examinar patrones de locomoción. Cracraft realizó el análisis en muestras frescas mediante microscopios. Además filmó los patrones de locomoción a 250 cuadros por segundo usando cámaras de ultra alta velocidad (Hycam 400 y DuPont 932A) y tomando datos cuadro a cuadro mediante un analizador foto-óptico de datos 224-A. Cracraft eliminó las plumas de las extremidades posteriores; cada articulación fue marcada con tinta negra y las alas fueron sujetadas a la espalda, con el fin de capturar los movimientos del fémur, tibia tarso, tarso metatarso y sus articulaciones en 14 pruebas de ciclo de marcha para diferentes velocidades de paso; compara tres representaciones de paso: lento, moderado y rápido.

El ciclo de marcha es definido comenzando cuando el pie derecho toca el suelo y termina cuando el mismo pie toca el suelo nuevamente. El análisis de patrón locomotor comienza para caminata lenta luego moderada y finalmente caminata rápida analizando así:

La caminata lenta dura 133 cuadros, con una frecuencia de paso de aproximadamente  $1,88s^{-1}$ . Se midieron los ángulos de articulación, el desplazamiento angular y las velocidades angulares para cada estado en el tiempo Tabla 4-1.

LEG JOINTS DURING SLOW WALK<sup>a</sup>

Frame	Hip Joint			Knee Joint			Intertarsal Joint		
	Angle <sup>b</sup>	Angular Displacement <sup>c</sup>	Angular Velocities <sup>d</sup>	Angle	Angular Displacement	Angular Velocities	Angle	Angular Displacement	Angular Velocities
0	66	—	—	144	—	—	153	—	—
10	66	0	0	126	-18	-450 (-7.9)	133	-20	-500 (-8.7)
20	67	+1	+25 (+0.44)	113	-13	-325 (-5.7)	126	-7	-175 (-3.1)
30	67	0	0	100	-13	-325 (-5.7)	118	-8	-200 (-3.5)
40	62	-5	-125 (-2.2)	87	-13	-325 (-5.7)	123	+5	+125 (+2.2)
50	65	+3	+75 (+1.3)	82	-5	-125 (-2.2)	128	+5	+125 (+2.2)
60	73	+8	+200 (+3.5)	85	+3	+75 (+1.3)	146	+18	+450 (+7.9)
70	78	+5	+125 (+2.2)	77	-8	-200 (-3.5)	156	+10	+250 (+4.4)
80	80	+2	+50 (+0.88)	75	-2	-50 (-0.88)	165	+9	+225 (+3.9)
90	74	-6	-150 (-2.6)	49	-26	-650 (-11.4)	131	-34	-850 (-14.8)
100	75	+1	+25 (+0.44)	47	-2	-50 (-0.88)	91	-40	-1000 (-17.5)
110	67	-8	-200 (-3.5)	65	+18	+450 (+7.9)	74	-17	-425 (-7.4)
120	62	-5	-125 (-2.2)	100	+35	+875 (+15.3)	86	+12	+300 (+5.2)
133	70	+8	+200 (+3.5)	134	+34	+850 (+14.8)	143	+57	+1425 (+25)

<sup>b</sup> Joint angle (to nearest degree).  
<sup>c</sup> Angular displacement (to nearest degree); minus (-), decrease in joint angle; plus (+), increase in joint angle.  
<sup>d</sup> Angular velocity; degrees/second (radians/second).

**Tabla 4-1:** Mediciones de parámetros locomotores en caminata lenta[12].

El ángulo de la articulación de cadera, luego de que el pie toca el suelo, tiene una ligera tendencia a incrementar. Entre los cuadros 30 y 86 el fémur protracta y el ángulo decrece. El fémur circumscribe un arco de movimiento de 18 grados que varía entre 15 y 46 grados con un promedio de 28 grados para diferentes velocidades de paso, no existe correlación entre el arco y la velocidad de paso ya que el fémur no muestra un desplazamiento angular significativo.

La articulación de la rodilla está en una posición extendida cuando el pie toca el suelo. Mientras la pierna comienza la fase de soporte el peso del ave hace que la articulación se flexione rápidamente, la fuerza para esta flexión se le atribuye al efecto de gravedad. La articulación de la rodilla exhibe un arco de movimiento que varía entre 85 y 107 grados con un promedio de 95 grados, sin haber correlación con la velocidad de paso.

En contraste a la rodilla, la articulación intertarsal sufre mayores cambios comenzando con la alta velocidad angular. Cuando el pie toca el suelo la articulación esta casi extendida;

las grandes fuerzas de impacto causan una rápida flexión de la articulación en poco tiempo del cuadro 0 al 30; durante los cuadros 30 a 80 la articulación es rápidamente extendida y nuevamente rápidamente flexionada entre los cuadros 70 a 90 y se mantiene constante entre los cuadros 90 y 115, finalmente la articulación es rápidamente extendida antes de que el pie toque el suelo nuevamente (cuadros 110 a 130). Este análisis se resume en la Figura 4-1 donde se ilustra las fases de flexión y extensión de las tres articulaciones durante la caminata lenta.

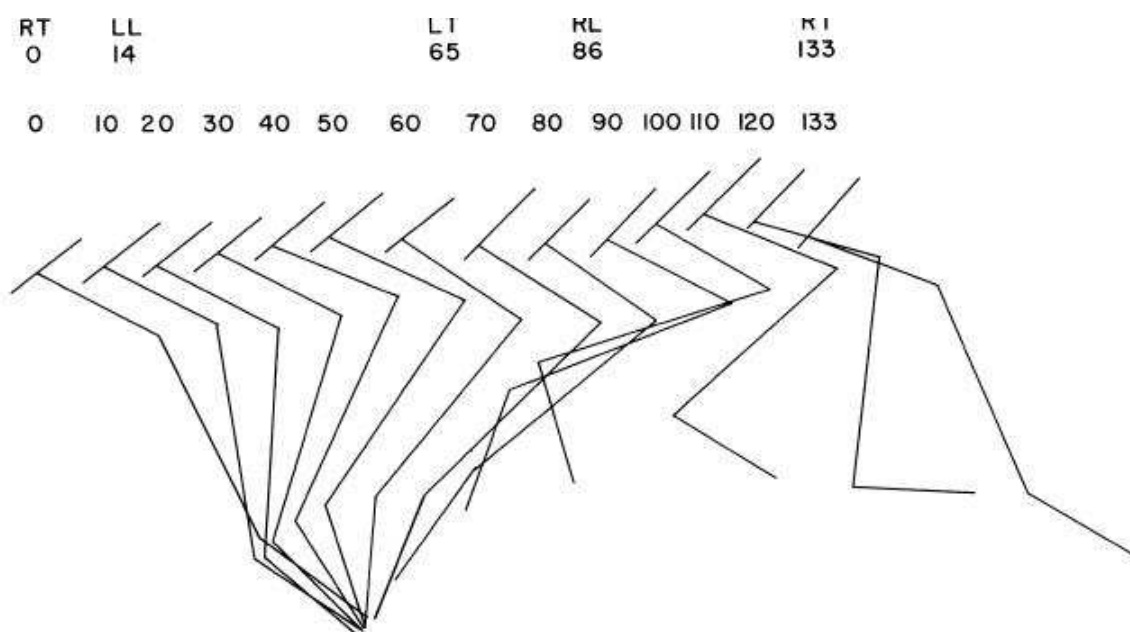


FIG. 22. Stick diagram showing a slow walk (133 frames long) in *Columba livia* taken at a speed of 250 frames per second. Only the pelvic axis, femur, tibia, and tarsometatarsus are shown.  
 Abbreviations: LL, left foot leaving ground; LT, left foot touching ground; RL, right foot leaving ground; RT, right foot touching ground.

Figura 4-1: Diagrama de barras del patrón locomotor en caminata lenta [12]

La Figura 4-1 muestra que entre la secuencia 40 al 80 el fémur tiene una fase de retracción y luego se protrae llevando el pie hacia delante; el movimiento de la rodilla también puede ser dividido en dos fases: una fase de flexión gradual y una fase de rápida extensión.

La caminata moderada dura 96 cuadros por segundo con una frecuencia de paso de aproximadamente  $2,604s^{-1}$ ; se midieron los ángulos de articulación, el desplazamiento angular y las velocidades angulares para cada estado en el tiempo, Tabla 4-2.

LEG JOINTS DURING WALK OF MODERATE GAIT<sup>a</sup>

Frame	Hip Joint			Knee Joint			Intertarsal Joint		
	Angle <sup>b</sup>	Angular Displacement <sup>c</sup>	Angular Velocity <sup>d</sup>	Angle	Angular Displacement	Angular Velocity	Angle	Angular Displacement	Angular Velocity
0	74	—	—	136	—	—	144	—	—
	—	-3	-75 (-1.3)	—	-19	-475 (-8.3)	—	-21	-525 (-9.2)
10	71	—	—	117	—	—	123	—	—
	—	+12	+300 (+5.2)	—	-9	-225 (-3.9)	—	-10	-250 (-4.4)
20	83	—	—	108	—	—	113	—	—
	—	-4	-100 (-1.75)	—	-15	-375 (-6.5)	—	+7	+175 (+3.1)
30	79	—	—	93	—	—	120	—	—
	—	+1	+25 (+0.44)	—	-5	-125 (-2.2)	—	+26	+650 (+11.4)
40	80	—	—	88	—	—	146	—	—
	—	-3	-75 (-1.3)	—	-13	-325 (-5.7)	—	+20	+500 (+8.7)
50	77	—	—	75	—	—	166	—	—
	—	-6	-150 (-2.6)	—	-25	-625 (-11)	—	-42	-1050 (-18.4)
60	71	—	—	50	—	—	124	—	—
	—	-1	-25 (-0.44)	—	+1	+25 (+0.44)	—	-51	-1275 (-2.2)
70	70	—	—	51	—	—	73	—	—
	—	-8	-200 (-3.5)	—	+30	+750 (+13)	—	-8	-200 (-3.5)
80	62	—	—	81	—	—	65	—	—
	—	+2	+50 (+0.88)	—	+41	+1025 (+18)	—	+45	+1125 (+19.6)
90	64	—	—	122	—	—	110	—	—
	—	-2	-50 (-0.88)	—	+9	+225 (+3.9)	—	+31	+775 (+13.5)
96	62	—	—	131	—	—	141	—	—

<sup>b</sup> Joint angle (to nearest degree).

<sup>c</sup> Angular displacement (to nearest degree); minus (-), decrease in joint angle; plus (+), increase in joint angle.

<sup>d</sup> Angular velocity; degrees/second (radians/second).

Tabla 4-2: Medición de parámetros locomotores en caminata moderada[12]

La articulación de la cadera en este tipo de caminata exhibe los dos mismos patrones de marcha que en la caminata lenta, que son retracción (cuadros 10-40) y luego protracción (cuadros 40-96). Figura 4-2. El tiempo relativo de las dos fases no es proporcional, la fase de retracción es ligeramente mayor en la izquierda, lo que significa que en este ciclo, la fase de retracción está empezando más pronto y la fase de protracción será más larga. Los patrones de la rodilla y de la articulación intertarsal son muy similares, la mayor diferencia se encuentra en la velocidad angular.

Los patrones de la rodilla en caminata moderada muestran que la pendiente de la fase de flexión es menos pronunciada en caminata lenta pero la pendiente en fase de extensión es parecida, y se debe a que mientras el ave aumenta su velocidad de paso la articulación de la rodilla incrementa la fase de flexión y no la de extensión; ésta es más rápida y por eso desarrolla más velocidad angular que en la caminata lenta, aproximadamente 10 por ciento más rápida; aunque estas diferencias no son significativamente grandes y deben ser estudiadas con mayor profundidad.

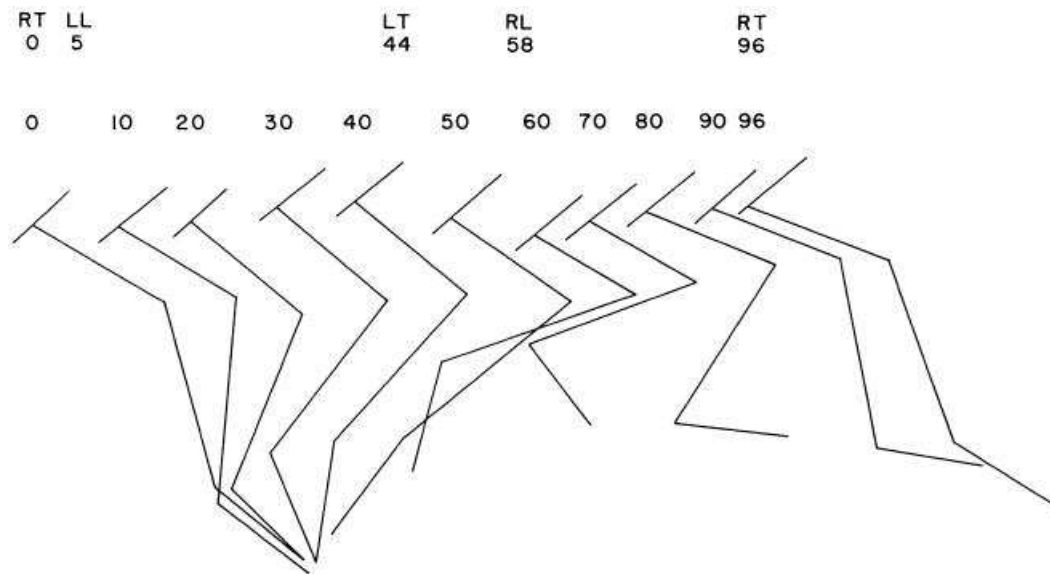


FIG. 24. Stick diagram of *Columba livia* showing a walk of moderate gait (96 frames long) taken at a speed of 250 frames/second. Only the pelvic axis, femur, tibia, and tarsometatarsus are shown.  
 Abbreviations: LL, left foot leaving ground; LT, left foot touching ground; RL, right foot leaving ground; RT, right foot touching ground.

**Figura 4-2:** Diagrama de barras del patrón locomotor en caminata moderada [12].

Con el desplazamiento angular de la articulación de la cadera puedo obtener información de la posición de la extremidad en el eje vertical para cada muestra a lo largo del paso.

La caminata rápida dura 70 cuadros por segundo con una frecuencia de paso de aproximadamente  $3,571s^{-1}$ ; se midieron los ángulos de articulación, el desplazamiento angular y las velocidades angulares para cada estado en el tiempo, Tabla 4-3.

Se muestra que en las tres articulaciones (cadera, rodilla e intertarsal) aumenta la velocidad angular. En la cadera la velocidad angular pico es de 3.5 rad/s más alta que en la caminata moderada y 5.2 rad/s que en caminata lenta. La velocidad pico de la rodilla es de 9.0 rad/s mas alta que en la caminata moderada y 11.7 rad/s que en caminata lenta. La articulación intertarsal muestra mayores diferencias con respecto a la velocidad angular siendo de 16 rad/s mayor que en caminata moderada y 13 rad/s que en caminata lenta.

LEG JOINTS DURING RUN<sup>a</sup>

Frame	Hip Joint			Knee Joint			Intertarsal Joint		
	Angle <sup>b</sup>	Angular Displacement <sup>c</sup>	Angular Velocity <sup>d</sup>	Angle	Angular Displacement	Angular Velocity	Angle	Angular Displacement	Angular Velocity
0	55	—	—	123	—	—	146	—	—
	—	+9	+225 (+3.9)	—	-19	-475 (-8.3)	—	-30	-750 (-13)
10	64	—	—	104	—	—	116	—	—
	—	+5	+125 (+2.2)	—	-13	-325 (-5.7)	—	-1	-25 (-0.44)
20	69	—	—	91	—	—	115	—	—
	—	+5	+125 (+2.2)	—	-3	-75 (-1.3)	—	+24	+600 (+10.5)
30	74	—	—	88	—	—	139	—	—
	—	+5	+125 (+2.2)	—	-19	-475 (-8.3)	—	+1	+25 (+0.44)
40	79	—	—	69	—	—	140	—	—
	—	-3	-75 (-1.3)	—	-31	-775 (-13.5)	—	-76	-1800 (-31)
50	66	—	—	38	—	—	64	—	—
	—	-20	-500 (-8.7)	—	+45	+1125 (+19.7)	—	+1	+25 (+0.44)
60	46	—	—	83	—	—	65	—	—
	—	+14	+350 (+6.1)	—	+61	+1525 (+27)	—	+87	+2175 (+38)
70	60	—	—	144	—	—	152	—	—

<sup>b</sup> Joint angle (to nearest degree).

<sup>c</sup> Angular displacement (to nearest degree); minus (-), decrease in joint angle; plus (+), increase in joint angle.

<sup>d</sup> Angular velocity; degrees/second (radians/second).

**Tabla 4-3:** Diagrama de barras del patrón locomotor en caminata rápida[12]

En general los patrones de cada articulación son los mismos en todas las caminatas, la diferencia se centra en la velocidad angular y la oscilación de los huesos, disminuyéndose más en caminata rápida. Esta amortiguación de oscilación en caminata rápida tiene dos posibles explicaciones:

- Como el ciclo es corto las oscilaciones no son evidentes.
- El movimiento de los huesos es más fuerte y rápido.

El movimiento de la rodilla es similar en los tres casos, no existen diferencias aparentes entre el comienzo de las fases en ningún tipo de caminata; la articulación intertarsal también es similar en los tres casos pero se notan diferencias en el comienzo de varias fases, en la caminata rápida y moderada la fase de propulsión alcanza un pico en el avance. La fase de extensión comienza más pronto en caminata rápida que en las otra dos, Figura 4-3.

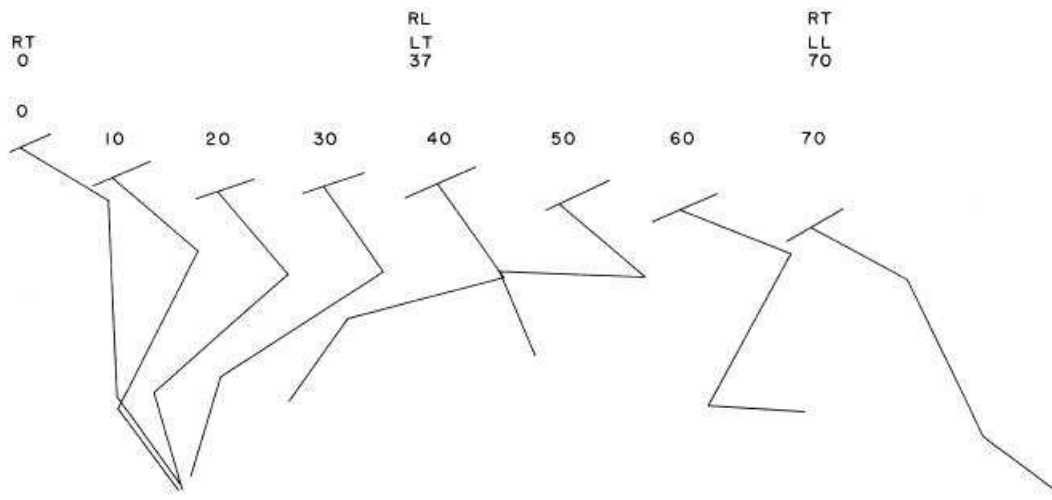


FIG. 26. Stick diagram showing a run (70 frames long) of *Columba livia* taken at 250 frames per second. Only the pelvic axis, femur, tibia, and tarsometatarsus are shown.  
 Abbreviations: LL, left foot leaving ground; LT, left foot touching ground; RL, right foot leaving ground; RT, right foot touching ground.

**Figura 4-3:** Diagrama de barras del patrón locomotor en caminata rápida.[12]

A lo largo del ciclo de marcha de la paloma los pies tocan el suelo ambos al mismo tiempo e individualmente dependiendo del tipo de caminata, Figura 4-4.

El patrón de pisada en la caminata moderada puede verse en la parte A de la Figura 4-4, los pies se solapan durante aproximadamente 20 por ciento del paso y cada pie está en contacto con el suelo alrededor de 60 por ciento del ciclo.

En el paso lento (parte B, Figura 4-4) se incrementa la superposición a 27 por ciento y cada pie toca el suelo un 64 por ciento del ciclo.

En el paso rápido (parte C, Figura 4-4) el solapamiento se reduce a 0 y el tiempo en el suelo es de aproximadamente 50% para cada pie.

Lo que demuestra que en el ciclo de marcha la cantidad de tiempo que los pies esta en contacto con el suelo es inversamente proporcional a la velocidad de marcha.

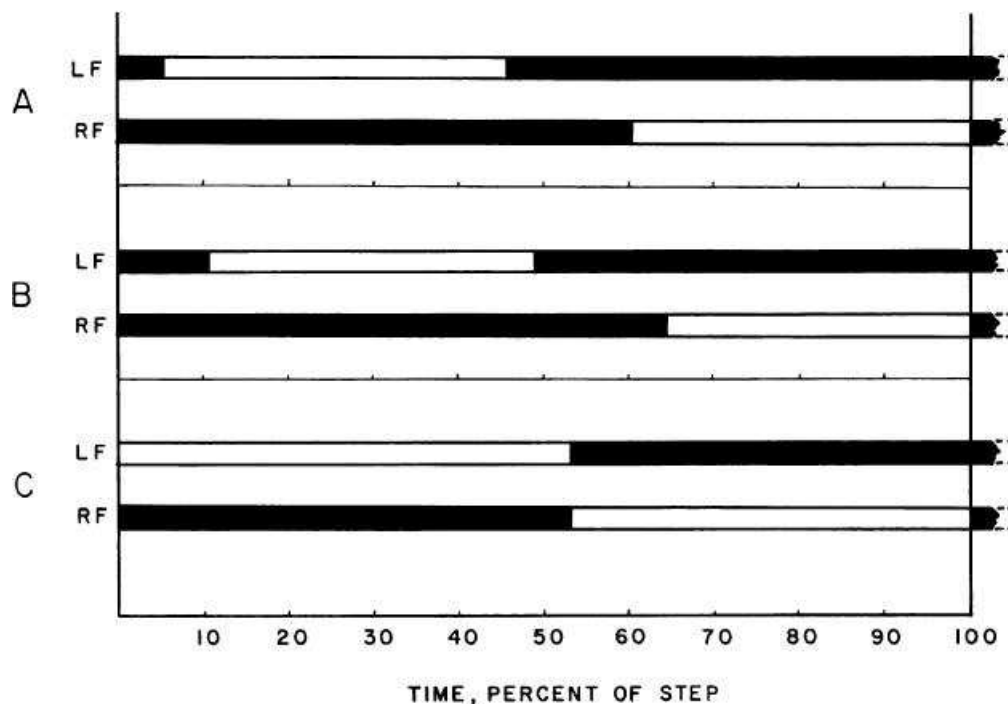


Figura 4-4: Patrón de caída del pie. (RF y LF) pie derecho e izquierdo .

El análisis realizado por Cracraft es el mayor aporte para la realización de este proyecto ya que presenta el análisis de los patrones locomotores terrestres en la paloma fundamentales en la obtención del modelo cinemático. Sin embargo se necesita información de la frecuencia y longitud de paso, masa del ave y longitud de los huesos. Estos datos faltantes se obtienen mediante experimentación.

## 4.2. Tamaño y forma del ave

La masa y las longitudes de los huesos de la extremidad posterior del ave se obtienen a partir de experimentos biológicos (sección 4.2.2) y de estudios realizados previamente por diferentes investigadores (sección 4.2.3). Inicialmente se exponen los resultados obtenidos por experimentación y posteriormente se compara con los resultados de los estudios investigados con el fin de seleccionar los mejores parámetros en el modelo cinemático a partir de la uniformidad de las muestras.

### 4.2.1. Materiales y Métodos

Con el fin de obtener datos de la conducta terrestre de la paloma *Columba Livia*, se usa la técnica observacional sistemática que consiste en la selección, registro y codificación de la información relevante y necesaria para analizar el comportamiento del género de ave escogido

y se compara con investigaciones previas.

Se logra llevar un registro de la información basado en planteamientos generales mediante el uso de cámaras video gráficas, fotos, balanza de precisión, calibrador, metro y mallas.

Los parámetros morfológicos fueron analizados con filmaciones en una cámara de video FUJIFILM con 14 mega pixeles y 5x de zoom óptico a 5 palomas domésticas, tres de ellas mientras permanecían es cautiverio y dos de ellas encontradas en espacios abiertos. Los resultados varían en cada paloma y en las diferentes pruebas realizadas, la selección de estos parámetros se basan en resultados comparativos con otros trabajos realizados y expuestos en este documento y algunos otros se seleccionaron según la mejor filmación obtenida a partir de la uniformidad del paso del ave.

Estos planteamientos buscan obtener datos de frecuencia, velocidad de paso, masa y longitud de los huesos a partir de varias filmaciones del ave, en movimiento terrestre. El ave debe andar sobre un camino establecido que está dividido en centímetros; esto permite medir la longitud de paso, y con las filmaciones tener control del tiempo de paso.

#### 4.2.2. Experimentos biológicos

Se realizaron 4 pruebas en la marcha de una paloma doméstica joven (*Columba Livia*) y se obtiene información de la longitud de paso completo, frecuencia de paso, velocidad de paso y masa del ave, la Tabla 4-4 muestra los resultados de estas pruebas. La tercera prueba en la conducta mostró ser el movimiento más uniforme del ave al caminar con respecto a las otras tres pruebas.

La Tabla 4-5 muestra la longitud de los huesos de las extremidades posteriores de esta misma ave obtenidos usando un calibrador de precisión en dos instantes de tiempo, fue seleccionada la segunda prueba por su gran similitud con las comparaciones mostradas en la sección 4.2.3. La Tabla 4-6 muestra la masa en cuatro palomas domésticas (C.Livia) de diferentes edades pesadas en balanzas de precisión todas mantenidas en cautiverio.

Ave	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Longitud de paso(mm)	215	182	274	235
Frecuencia de paso ( $s^{-1}$ )	2,77	2,27	2,5	2,4
Masa (g)	233	233	245	250

**Tabla 4-4:** Parámetros de conducta en locomoción terrestre.

Longitudes	Prueba 1	Prueba 2
Femur (mm)	39,8	43,8
Tibiotarso (mm)	60,8	61,7
Tarsometatarso (mm)	32,2	32,9

**Tabla 4-5:** Longitud de huesos extremidad posterior.

	Ave 1	Ave 2	Ave 3	Ave 4
Masa (g)	250	270	310	368

**Tabla 4-6:** Masa en cuatro palomas domésticas.

Se realiza una última prueba sobre el ave, enfocada a encontrar su densidad y con ella obtener la masa y el tensor de inercia de cada hueso, parámetro necesario en el cálculo de energía cinética. Esta prueba se basa en la definición de densidad como cantidad de masa contenida en un determinado volumen (ver Ecuación 4-1)

$$P = m/V \quad (4-1)$$

El ave fue sumergida en agua en un recipiente con un área determinada, esto para obtener su volumen y posteriormente su densidad conociendo su masa total.

Se realizaron cuatro pruebas en la obtención de la densidad del ave, y se usó el valor promedio en el análisis general. Obteniendo como densidad del ave  $754,22Kg/m^3$ . Los resultados individuales de cada prueba se muestran en la Tabla 4-7.

	Prueba 1	prueba 2	Prueba 3	prueba 4
Masa del ave (kg)	0,31	0,31	0,31	0,31
Área del recipiente (m2)	0,041616	0,041616	0,041616	0,041616
volumen del ave (m3)	0,000332928	0,00041616	0,0005202	0,00041616
Densidad (kg/m3)	931,1322568	744,9058055	595,924644	744,9058055

**Tabla 4-7:** Densidad del ave.

### 4.2.3. Parámetros de investigadores y comparación

Se comparó el resultado de la tercera prueba sobre la conducta en locomoción terrestre mostrados en la Tabla 4-4 con los analizados por Masaki Fujita[29] en cuarenta palomas para 113 pasos, Fijuta [29] obtiene información de variables cinemáticas de la locomoción terrestre usando análisis de video a 60 Hz con una cámara de video digital DCR-TRV30 Sony y mediciones anatómicas de cadáveres. Esta comparación es mostrada en la Tabla 4-8, La longitud y velocidad de paso son mayores en los experimentos de este trabajo lo que quiere decir que esta paloma camina más rápido y además tienen mayor área recorrida en sus pasos que las palomas analizadas por Fujita[29].

Autor	Longitud de paso	Frecuencia de paso	Velocidad de paso
Masaki Fujita	237.6 mm	2.593 s-1	628.5 mm/s
Prueba 3 Tabla 4-4	274 mm	2.5 s-1	685 mm/s

**Tabla 4-8:** Mediciones y comparación de la conducta en palomas domesticas (C. Livia).

Para la obtención del modelo matemático, a partir de los lineamientos de Craig, se requiere la construcción de las matrices de transformación Denavit Hartenberg de cada articulación; para esto se requiere la información de los parámetros de eslabón y de articulación, uno de estos parámetros es la longitud de eslabón, que para este caso es la longitud de los huesos: fémur, tibiotarso y tarsometatarso. La Tabla 4-9 presenta las mediciones realizadas de las longitudes de los huesos por Masaki Fujita [29], Richard Johnston [37] y las obtenidas en los experimentos biológicos de la sección 4.2.2.

La longitud del fémur en los tres experimentos tiene valores muy cercanos con una diferencia de 6 milímetros entre el de mayor y el de menor tamaño. Así mismo el Tibio-tarso se encuentra con una diferencia de 3,6 milímetros entre el de mayor y menor tamaño. El Tarso-metatarso presenta la menor diferencia entre los experimentos con 1,2 milímetros de diferencia entre el de mayor tamaño y el de menor tamaño. La mayor diferencia se encuentra en la masa del ave con 77,9 gramos.

---

Autor	Especie	Longitud Femur	longitud Tibiotarso	Longitud Tarso-metatarso	Masa
Masaki Fujita	Paloma Doméstica	45,1mm	59,1 mm	32,6 mm	347,9 g
Richard Johnston	Paloma Doméstica	39,1mm	58,1 mm	31,7 mm	
Resultados Tabla 3 5	Paloma Doméstica	39,8mm	60,8mm	32,2mm	270g
Resultados Tabla 3 5	Paloma Doméstica	43,8mm	61,7mm	32,9mm	270g

**Tabla 4-9:** Longitud de los huesos de la extremidad posterior en palomas domesticas (C. Livia).

## 5 Modelo Matemático

Con la información obtenida en el capítulo anterior se escogen los parámetros necesarios para obtener el modelo matemático de dos modos de caminata en la paloma, el modo de caminata lenta y el de moderada, investigados por Cracraft [12]. La selección de la longitud de los eslabones y la masa del ave se realiza según la mejor prueba realizada para una paloma joven, la longitud y velocidad de paso según la investigación realizada por Fujita [29] y los experimentos biológicos de la sección 4.2.2 La Tabla 5-1 resume la selección de parámetros.

Parámetros	Valores		Prueba
	Caminata lenta	Caminata moderada	
Longitud de paso	182mm	237,6mm	Prueba 2 Tabla 4-4 Fujita (25) Tabla 4-8
Frecuencia de paso	2,27s <sup>-1</sup>	2,59s <sup>-1</sup>	Prueba 2 Tabla 4-4 Fujita (25) Tabla 4-8
Velocidad de paso	414 $\frac{mm}{s}$	628,5 $\frac{mm}{s}$	Prueba 2 Tabla 4-4 Fujita (25) Tabla 4-8
Masa	310g	310g	ave 3 Tabla 4-6
Densidad	705,56 $\frac{Kg}{mm^2}$	705,56 $\frac{Kg}{mm^2}$	Tabla 4-7
Longitud de Fémur	43,8mm	237,6mm	Prueba 2 Tabla 4-5
Longitud de Tarsometatarso	61,7mm	61,7mm	Prueba 2 Tabla 4-5
Longitud de Tarsometatarso	32,9mm	32,9mm	Prueba 2 Tabla 4-5
Patrón de marcha	Caminata lenta	Caminata moderada	Cracraft (22)

Tabla 5-1: Parámetros escogidos a partir de experimentos biológicos

### 5.1. Espacio de trabajo

El espacio de trabajo durante un paso completo se determina a partir del ángulo máximo y mínimo que pueden describir las articulaciones vinculadas a la marcha. La figura 5-1 y

la figura 5-2 representan gráficamente el espacio de trabajo del modelo propuesto para los dos modos de caminata analizados. Para caminata lenta, el extremo de la pierna puede ubicarse entre  $-55,6\text{mm}$  y  $102\text{mm}$  en la línea de movimiento con respecto a la articulación de la cadera y puede levantar la pierna  $75\text{mm}$  del suelo mientras que en caminata moderada el extremo de la pierna puede ubicarse entre  $-57\text{mm}$  y  $90\text{mm}$  en la línea de movimiento respecto a la cadera y puede levantar el extremo del pie  $76,7\text{mm}$  del suelo

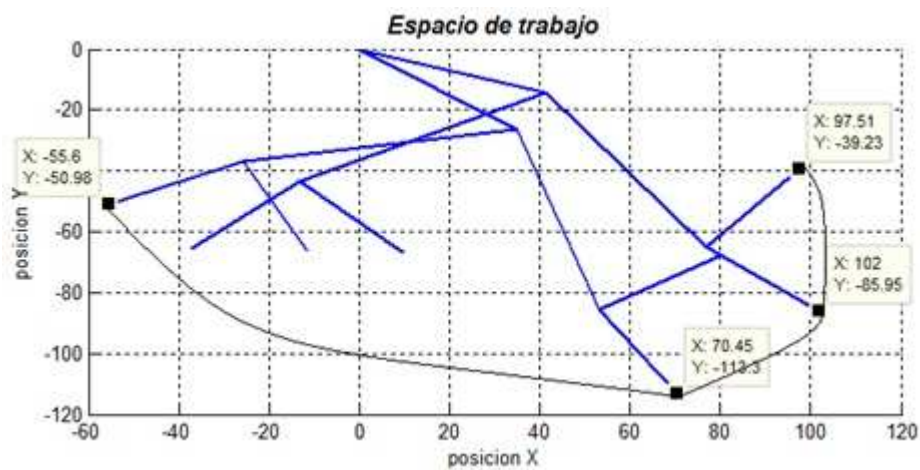


Figura 5-1: Espacio de trabajo en caminata lenta de la paloma (*Columba Livia*)

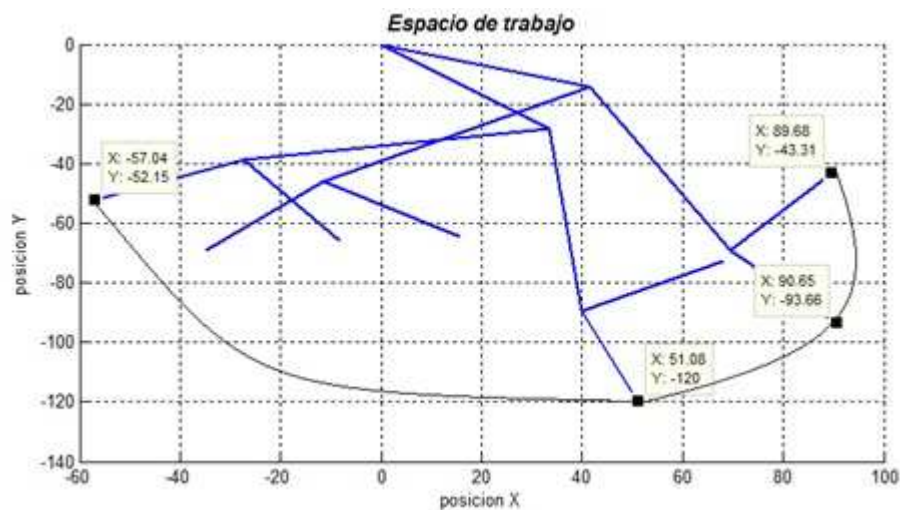


Figura 5-2: Espacio de trabajo en caminata moderada de la paloma (*Columba Livia*)

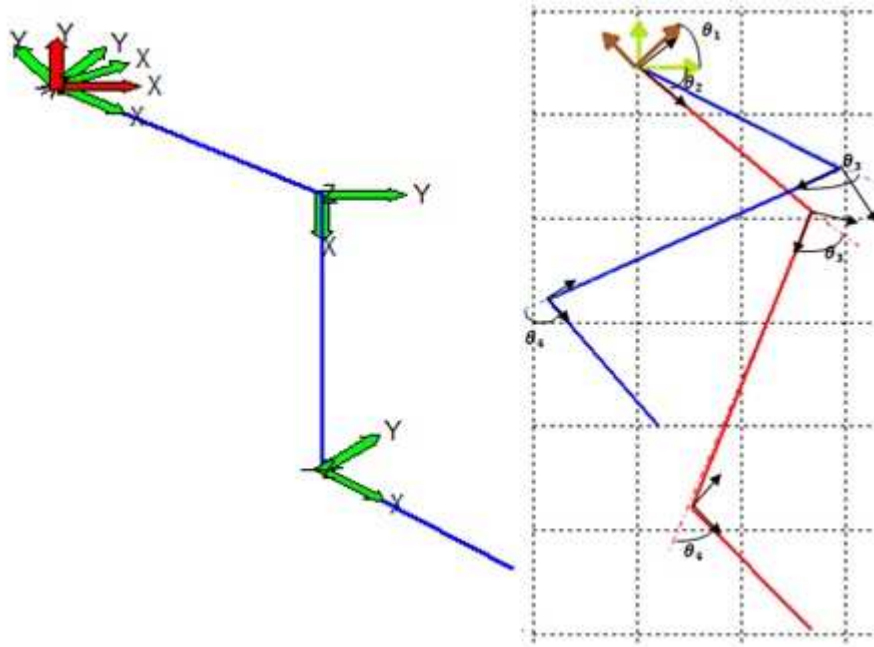
## 5.2. Análisis cinemático de la marcha del ave

Usando el software matemático MATLAB se crean diferentes algoritmos para representar la caminata del ave y evaluar el gasto de energía durante cada paso. Se analiza la trayectoria de cada pie por separado y se superpone cada comportamiento teniendo en cuenta que el ciclo de marcha para cada pie es el mismo en momentos diferentes como lo muestra el patrón de caída del pie en la Figura 3 4. Se definen los marcos de referencia que describen la posición y orientación de cada hueso del ave con el fin de construir la matriz de parámetros de cada eslabón según Denavit-Hartenberg (D-H) [18] mostrada en la Tabla 5-2

<b>Eslabón</b>	$a_{i-1}$	$a_{i-1}(mm)$	$\theta_i rad$	$d_i$
1	0	0	0,7505	0
2	0	0	$\theta_2$	0
3	0	43,8	$\theta_3$	0
4	0	61,7	$\theta_4$	0
5	0	32,9	0	0

**Tabla 5-2:** de parámetros Denavit-Hartenberg (D-H)

La figura 5-3 muestra los marcos de referencia de cada eslabón usando los lineamientos del libro de Craig [13]. El marco de referencia fijo se ubica sobre la articulación de la cadera y el primer marco de referencia se encuentra orientado a 43 grados del marco fijo y se traslada en el eje de movimiento del ave (eje x) dependiendo de la muestra del paso que se esté analizando. El modelo construido es bidimensional definido en el plano sagital del ave, por lo que los ángulos de torsión( $\alpha$ ) y las distancias de articulación (d) serán cero en todos los casos, los ángulos de articulación ( $\theta_i$ ) varían en cada muestra del paso según la Tabla 4.1 y la Tabla 4.2 y de la caminata lenta y moderada realizada por Cracraft [12]



**Figura 5-3:** Esquema miembro posterior con marcos de referencia y ángulos de articulación

Con la matriz Denavit Hartenberg establecida se obtienen las matrices de transformación fundamentales para modelar la traslación y rotación de las articulaciones del ave. Si se desea obtener la posición del extremo del pie del ave con respecto al marco de referencia fijo se debe obtener la siguiente matriz de transformación homogénea que de forma general se representa como:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

La matriz de transformación homogénea para el ave es la siguiente:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 & 32,9 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 43,8 \cos(\theta_1 + \theta_2) + 61,7 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 & 61,7 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 32,9 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 43,8 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

La posición y orientación del extremo del pie del ave es función de los ángulos de articulación y de las longitudes de eslabón los cuales se reemplazan de los datos tomados por Cracraft [12]

y por los experimentos realizados en "Experimentos biológicos" sección 4.2.2 Con la matriz de transformación homogénea se puede graficar el movimiento de cada pie del ave si se conoce el comportamiento de todos los ángulos de articulación para la caminata lenta y moderada en cada instante de tiempo al dar un paso, tal como lo muestran la Figura 5-4 para caminata lenta y la Figura 5-5 para caminata moderada.

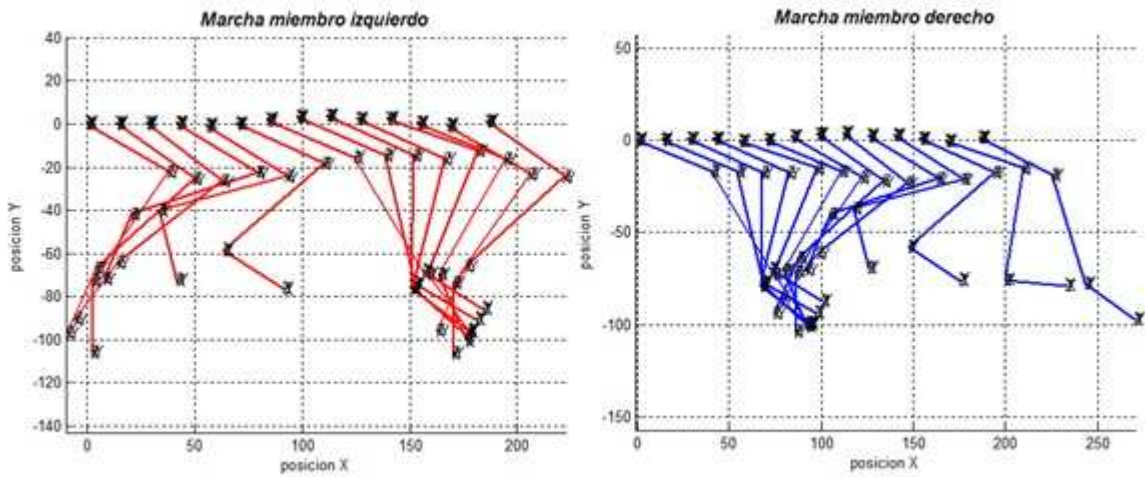


Figura 5-4: miembro izquierdo y derecho caminata lenta

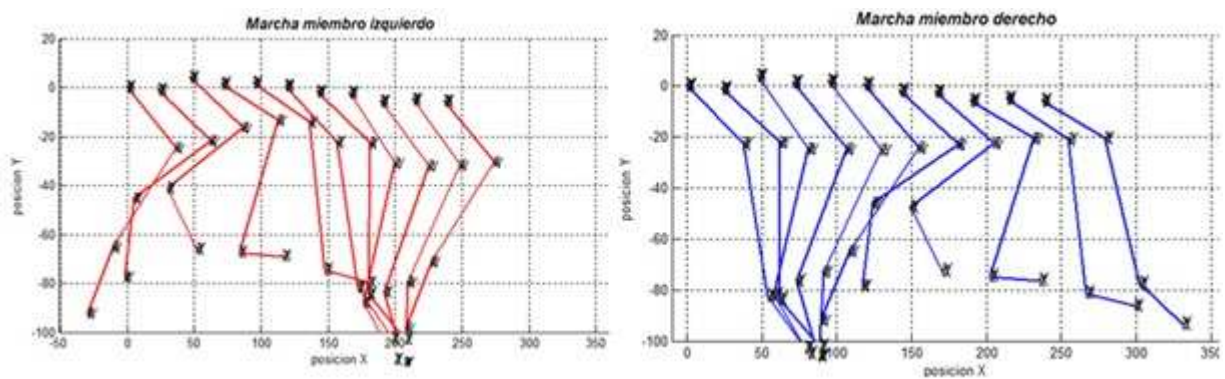
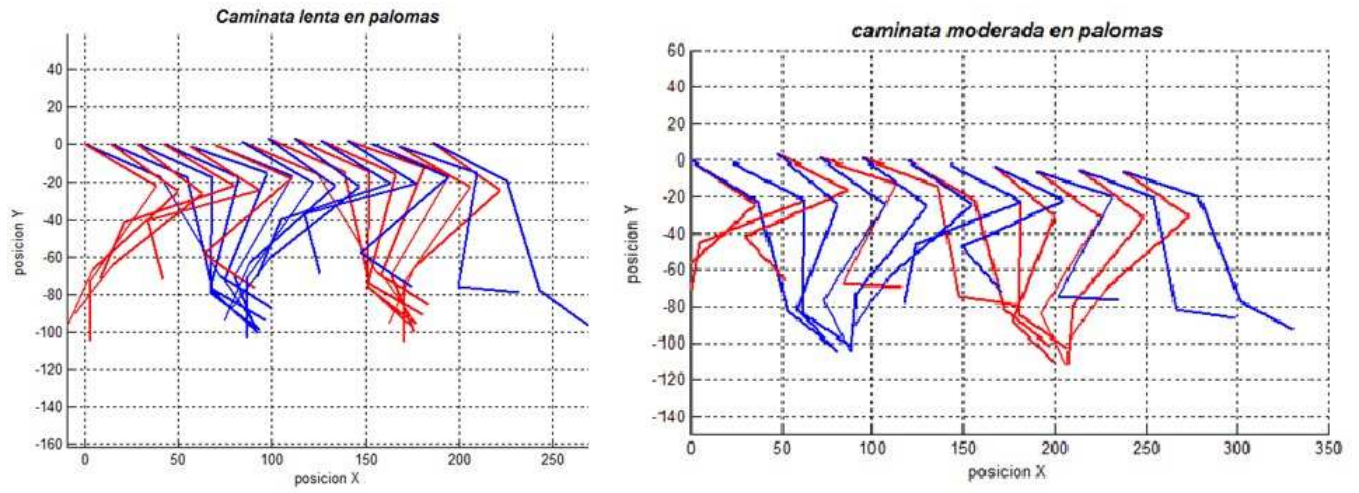


Figura 5-5: Marcha miembro izquierdo y derecho caminata moderada

El movimiento de ambos pies durante un paso completo para los modos de caminata lenta y moderada se muestra en la Figura 5-6.



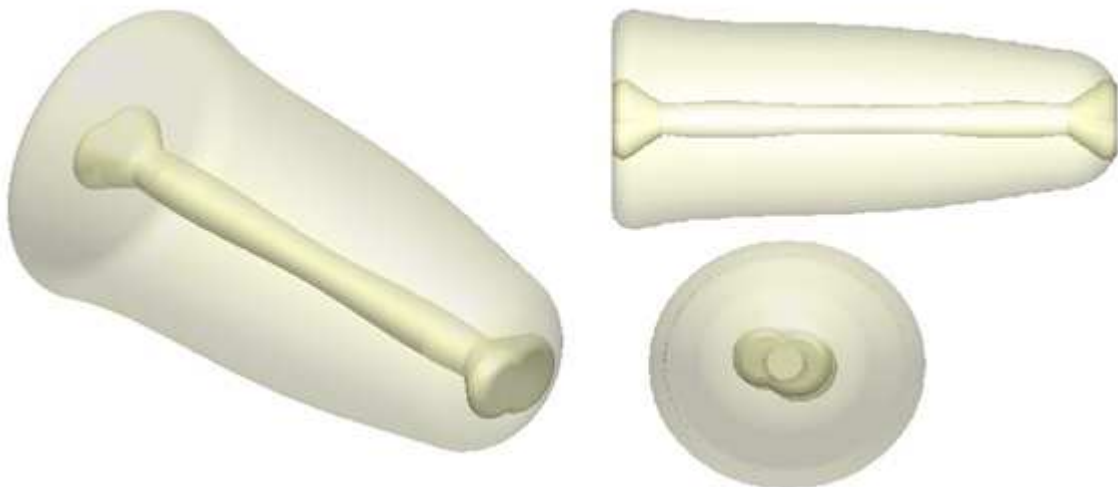
**Figura 5-6:** Caminata en palomas a.lenta y b.moderada

## 6 Reconstrucción 3D

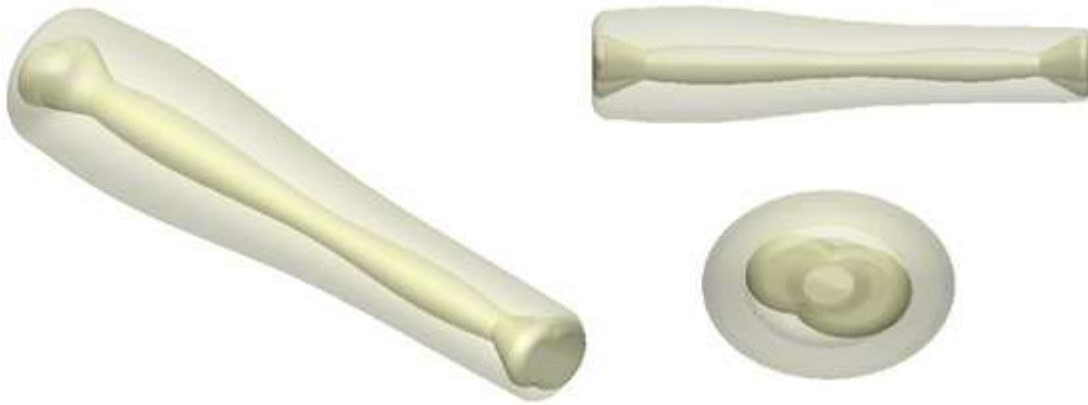
Con los datos especificados en los apartados precedentes se procede a realizar una reconstrucción en tercera dimensión de cada hueso de la extremidad posterior del ave con ayuda de la herramienta CAD Solidworks. Esta reconstrucción tiene como propósito lograr un acercamiento gráfico a la estructura obtenida a partir de los experimentos realizados y obtener los tensores de inercia útiles en el análisis de energía. El fémur es similar al de los mamíferos y se encuentra ubicado entre la región pélvica y el tibiotarso unidos por la articulación de la cadera y la rodilla respectivamente, este hueso es rico en médula ósea y su extremo distal se inclina lateralmente [23, 8, 40]. El modelo tridimensional del fémur se muestra en la figura

**6-1**

El tibiotarso es un hueso rico en médula ósea, se encuentra ubicado entre el fémur y el tarsometatarso, los une a ellos las articulaciones de la rodilla y la intertarsiana o tobillo resulta de la fusión de la parte proximal del tarso con la tibia [23, 8, 40]. El modelo tridimensional del tibiotarso se muestra en la figura **6-2** El tarsometatarso se encuentra ubicado entre el tibiotarso y los dedos y está unido a ellos por la articulación intertarsiana o tobillo y la metatarsofalángica respectivamente. Esta parte de la extremidad carece de musculatura y grasa intramuscular [23, 8, 40]. El modelo tridimensional del tarsometatarso se muestra en la figura **6-3**



**Figura 6-1:** Diseño tridimensional del fémur, vista isométrica, lateral y frontal



**Figura 6-2:** Diseño 3D del Tibiotarso, vista isométrica, lateral y frontal



**Figura 6-3:** Diseño 3D del tarsometatarso, vista isométrica, lateral y frontal

# 7 Energía en la locomoción terrestre

## 7.1. Análisis energético

A partir de los modelos 3D (capítulo 5) de cada hueso se pudo obtener el tensor de inercia, la masa de cada hueso y el centro de masas y así poder realizar el respectivo análisis de gasto de energía, la Tabla 7-1 muestra los parámetros seleccionados para realizar el análisis de energía.

Eslabón	Masa	Longitud (mm)	Centro de masa (mm)	Tensor de inercias ( $grxcm^2$ )
Tronco	295,5	98,3	43,8	$\begin{bmatrix} 2,73e3 & 0 & 0 \\ 0 & 2,64e3 & 0 \\ 0 & 0 & 2,64e3 \end{bmatrix}$
Fémur	8,94	43,8	18,42	$\begin{bmatrix} 4,76 & 0 & 0 \\ 0 & 16,86 & 0 \\ 0 & 0 & 16,86 \end{bmatrix}$
Tibiotarso	4,35	61,7	25,25	$\begin{bmatrix} 0,83 & 0 & 0 \\ 0 & 15,30 & 0 \\ 0 & 0 & 15,30 \end{bmatrix}$
Tarsometatarso	0,29	32,9	15,24	$\begin{bmatrix} 6,15e-3 & 0 & 0 \\ 0 & 31,2e-2 & 0 \\ 0 & 0 & 31,2e-2 \end{bmatrix}$

**Tabla 7-1:** Parámetros seleccionados para la evaluación de energía de la paloma doméstica (*C. Livia*)

El cálculo de energía requiere conocer las velocidades del cuerpo en cada muestra del paso,

obtenidas mediante la propagación de velocidades por las articulaciones, descrita mediante vectores de velocidad angular (Ecuación 7-1) y lineal (Ecuación 7-2).

$$W_{i+1}^{i+1} = {}^i_{i+1} R W_i^i + \theta'_{i+1} \bar{Z}_{i+1}^{i+1} \quad (7-1)$$

$$V_{i+1}^{i+1} = {}^i_{i+1} R (V_i^i + W_i^i x P_{i+1}^{i+1}) \quad (7-2)$$

El subíndice  $i$  varía desde 1 hasta 5 y representa las variables de la articulación  $i$ ,  $R$  representa la matriz de rotación la cual fue obtenida en el análisis cinemático de la marcha, sección 5.2 y  $P$  representa la posición del centro de masa de cada hueso. Se analiza la energía cinética y la energía potencial en las articulaciones en cada instante del paso, la energía cinética de un cuerpo rígido en realidad es la suma de dos términos, la energía cinética traslacional y la energía cinética rotacional, dadas por la Ecuación 2-8 donde  $m$  es la masa total  $v$  y  $w$  son los vectores de velocidad lineal y angular respectivamente,  $I$  es el tensor de inercia. En la energía potencial la gravedad es la única fuente de energía potencial de la dinámica del cuerpo, esta afirmación se muestra en la Ecuación en donde  $m$ ,  $g$  y  $r$  son la masa, la gravedad y altura. La ecuación de movimiento define la evolución temporal del sistema en el espacio, se puede obtener a partir de la formulación Lagrange-Euler quien por medio de ecuaciones diferenciales basadas en la energía describe la evolución del sistema sujeto a restricciones holonómicas. La ecuación Euler Lagrange es mostrada en la Ecuación 7-3

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_x} - \frac{\partial L}{\partial q_x} = f \quad (7-3)$$

Se crea un algoritmo en Matlab para determinar el gasto total de energía, los resultados del algoritmo que cuantifica la energía cinética y el gasto de energía cinética para caminata lenta y moderada se presentan en la Figura 7-1 y en la Figura 7-2 respectivamente. El eje horizontal representa el tiempo de paso completo (periodo) y el eje vertical la energía cinética en miliJulios (mJ), cada figura esta subdividida en cuatro gráficas las cuales representan la energía en la cadera, fémur, tibiotarso y tarsometatarso respectivamente.

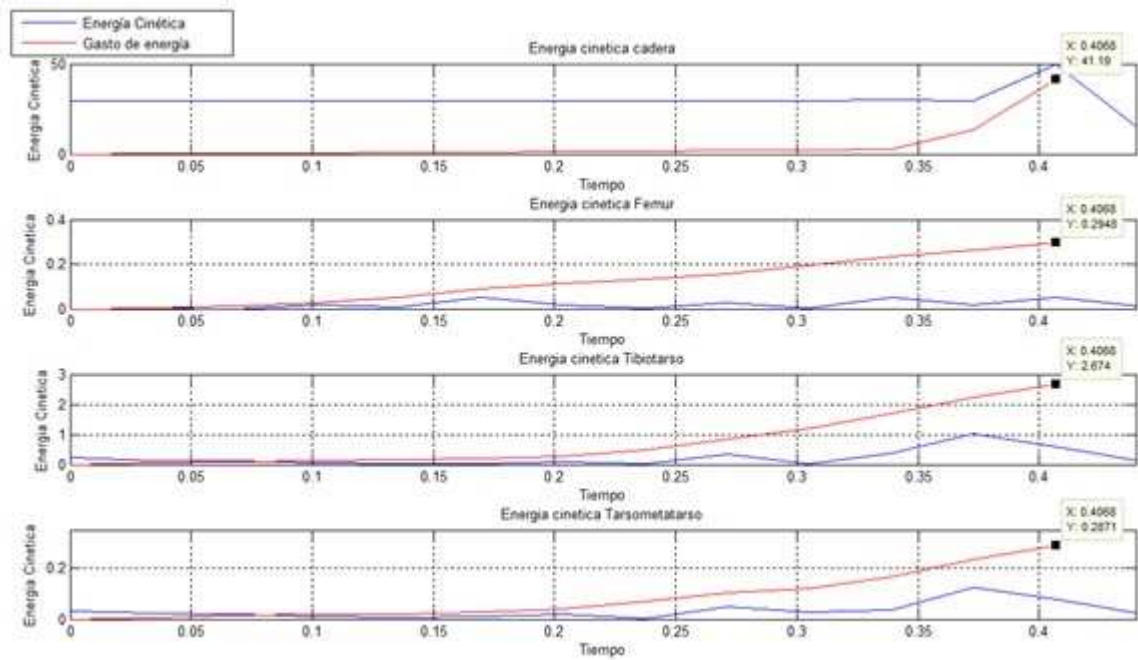


Figura 7-1: Energía Cinética de la caminata lenta (*Columba Livia*)

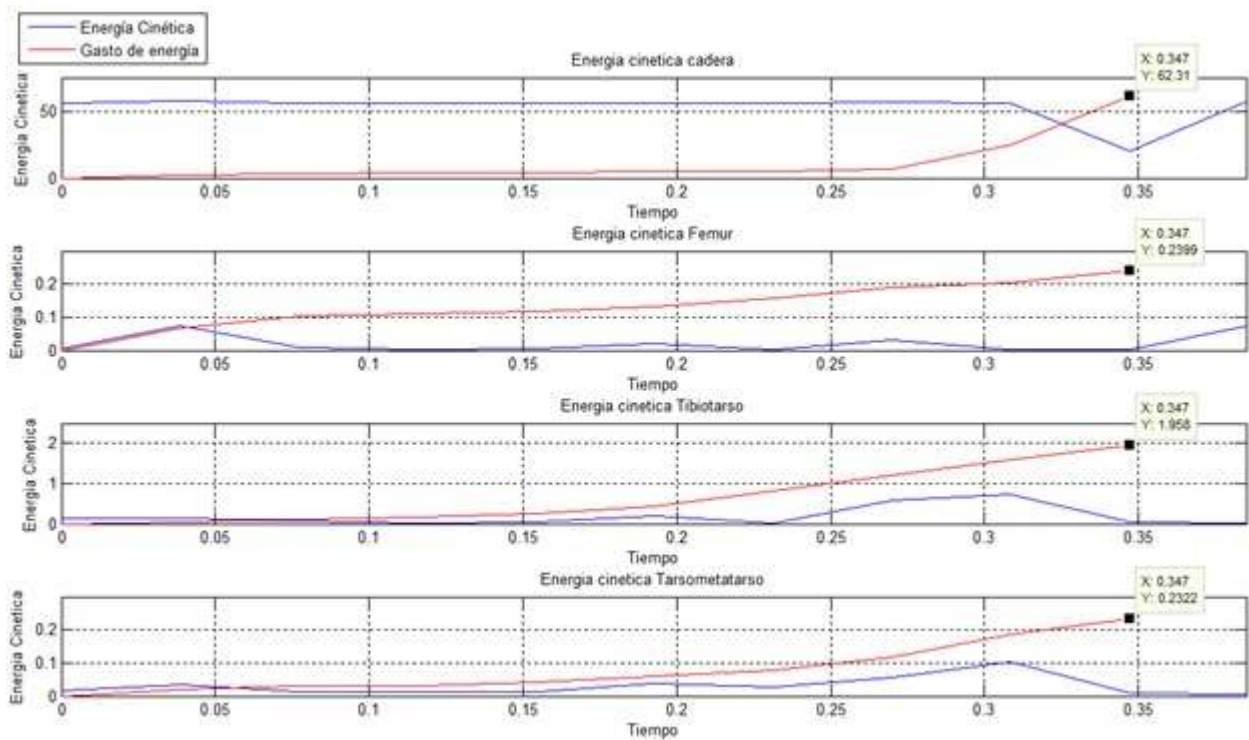


Figura 7-2: Energía Cinética de la caminata moderada (*Columba Livia*)

La energía cinética de los pies durante el paso completo se obtiene a partir de la energía

calculada para cada muestra en el tiempo que para caminata lenta corresponde a  $89mJ$  y para caminata moderada corresponde a  $129,5mJ$ . La cantidad de trabajo realizado en un tiempo específico (Potencia) se calcula derivando la energía en el intervalo de tiempo en que el ave da el paso completo, la duración de paso completo para caminata lenta es de  $0,384s$  y  $0,44s$  para caminata moderada, este cálculo de cómo resultado  $232mW$  y  $295mW$  de potencia para paso lento y moderado respectivamente.

## 7.2. Indicador de eficiencia

Los resultados obtenidos en la sección anterior son contrastados con los resultados obtenidos por T. J Roberts [47] quien analiza el costo metabólico en la generación de fuerzas de algunas aves y mamíferos. Según T. J Roberts[47] los bípedos y cuadrúpedos de la misma proporción gastan aproximadamente la misma energía metabólica a pesar de las diferencias morfológicas y de sus mecanismos de locomoción. El consumo de energía metabólica es estimado por el peso del cuerpo y el tiempo en el que se generan las fuerzas que permiten el movimiento, éstas son medidas por la duración del pie en contacto con el suelo. Estos estudios concuerdan con Zuntz[57] quien afirmó que el costo de energía en la locomoción es proporcional a la masa del cuerpo y no al número de extremidades, y concluye que los animales pequeños usan más energía en correr una distancia dada que los animales grandes y con Taylor [41] quien afirmó que la energía usada por cada gramo de músculo activo en un animal caminador es inversamente proporcional al tiempo en que el pie está en contacto con el suelo. T. J Roberts [49] concluye que la tasa de consumo de energía es proporcional al peso del cuerpo e inversa a la fase de apoyo, así como lo muestra la Ecuación 7-4

$$\overline{E}_{metab} = \frac{cW_b}{t_c} \quad (7-4)$$

Donde  $\overline{E}_{metab}$  representa la tasa de consumo de energía,  $W_b$  es el peso del cuerpo en Newtons,  $t_c$  tiempo de la fase de apoyo en segundos y  $c$  es el coeficiente de costo que expresa la proporcionalidad entre el peso del cuerpo, el costo de energía específica y la tasa de generación de fuerza. Las mediciones energéticas se realizaron mientras las aves caminaban sobre una banda transportadora, se determinó el consumo de energía usando un sistema de calorimetría indirecto de lazo abierto, se midió el aire de la habitación usando analizador de oxígeno. Si se usa la Ecuación 7-1 para determinar la tasa de energía metabólica del ave durante el paso y así contrastar estos resultados con los obtenidos a partir de esta investigación. T. J Roberts[47] realiza sus estudios en varios animales, entre los que se encuentran las codornices, animales con altas similitudes morfológicas a la paloma doméstica, similitud que resulta conveniente al contrastar la energía cinética. El valor del coeficiente de costo para las

codornices es de  $0,225JN^{-1}$ , valor que se usará en el cálculo de la potencia en la ecuación 6. – 4, ya que el coeficiente de costo sugiere un patrón en caminadores bípedos proporcional al peso específico en la tasa metabólica. Este costo específico es constante a pesar de la velocidad de paso y relativamente constante al cambio en la fuerza de gravedad. Sin embargo ésta constante cambia dramáticamente para diferentes mecanismos de locomoción terrestre. El valor de  $W_b$  es de 3 N para la paloma doméstica (*Columba Livia*) tomando como masa del ave 310 g. El valor  $t_c$  varía con el modo de caminata en estudio, para caminata lenta el valor de  $t_c$  es del 65 % del tiempo de paso completo o 0,287s y para caminata moderada el valor de  $t_c$  es de 60 % del tiempo de paso completo o 0,231s Se determinó que la potencia de las extremidades durante un paso es de  $2,34W$  y  $2,92W$  en caminata lenta y moderada respectivamente El indicador de eficiencia energética queda determinado a partir de los datos de potencia obtenidos en el presente trabajo y los realizados por T. J Roberts[47] dando así una eficiencia del 9,9 % para caminata lenta y 10,10 % para caminata moderada.

## 8 Conclusiones

En su primera fase, y objeto de estudio de esta tesis, se propone un modelo cinemático de la marcha en una especie de ave seleccionada y define un indicador de eficiencia energética. Ampliando el conocimiento con respecto a la biomecánica en aves y sus patrones de movimiento terrestre y dando bases para la implementación de robots bípedos bio-inspirados que podrían solucionar necesidades de inspección en terrenos irregulares sin causarle daños y evitando deslizamientos. Útiles en exploración planetaria. Se determina que las aves son los mejores animales con locomoción terrestre bípeda no solo por ser los primeros caminadores en la historia e ir evolucionando sino porque tienen alto control en su movimiento e intercambian locomoción terrestre con locomoción aérea. Se selecciona la paloma Doméstica (*Columba Livia*) como especie de ave a estudiar por la facilidad de encontrarla en la sabana de Bogotá y porque su patrón locomotor es general y fue fundamental en la realización de trabajos comparativos. La obtención del modelo matemático con el uso de las matrices Denavit Hartenberg usando la notación de Craig fue ideal para este estudio sin embargo como avance futuro se podría pensar en el análisis por screws sucesivos y realizar una comparación de resultados para determinar el modelo más aproximado al real. La reconstrucción 3D permite verificar la masa y tensor de inercias de cada hueso además de aproximar el modelo a la realidad y darle movimiento luego del análisis cinemático y dinámico obtenido gracias a herramientas computacionales como MATLAB que permiten el cálculo matemático y la integración con otros toolbox compatibles como realidad virtual.

El modelo está restringido a la caminata en el plano sagital y al movimiento en las extremidades posteriores del ave, al evaluar la energía, el movimiento rotacional del tronco aporta energía cinética rotacional al sistema, esta información no fue concebida en el modelo dinámico porque no se encontraron los ángulos rotación del tronco con respecto al marco de referencia. Sin embargo se dejó registro de los hallazgos del movimiento de las extremidades en la sección de experimentos biológicos como punto de partida para futuras investigaciones o diseños que involucren la caminata en el espacio. Se comparó el comportamiento del modelo obtenido frente a los estudios realizados por T. J Roberts [49], dando por resultado una eficiencia de 9,9 % y 10,10 % para caminata lenta y moderada respectivamente, donde se refleja la necesidad de profundizar en el análisis del movimiento del tronco y la cabeza del ave.

Para avances futuros se piensa en desarrollar el modelo obtenido y aportar nuevos datos a partir de experimentos biológicos que se centren en el movimiento de la cabeza y del tronco de tal manera que se progrese y optimice el modelo obtenido contemplando los efectos

que aportan la fricción. Se puede pensar finalmente en la integración de este modelo de locomoción terrestre con un modelo de locomoción aérea para que pueda ser implementado en un robot capaz de caminar y volar de forma óptima y cumplir misiones militares entre otras.

# Bibliografía

- [1] ABOURACHID, Anick ; HACKERT, Remi ; HERBIN, Marc ; LIBOUREL, Paul A. ; LAMBERT, François ; GIOANNI, Henri ; PROVINI, Pauline ; BLAZEVIC, Pierre ; HUGEL, Vincent: Bird terrestrial locomotion as revealed by 3D kinematics. En: *Zoology* 114 (2011), Nr. 6, p. 360–368
- [2] AERTS, Peter ; VAN DAMME, Raoul ; VAN ELSACKER, Linda ; DUCHENE, Vicky: Spatio-temporal gait characteristics of the hind-limb cycles during voluntary bipedal and quadrupedal walking in bonobos (*Pan paniscus*). En: *American journal of physical anthropology* 111 (2000), Nr. 4, p. 503
- [3] ALEXANDER, R ; JAYES, AS ; KER, RF: Estimates of energy cost for quadrupedal running gaits. En: *Journal of zoology* 190 (1980), Nr. 2, p. 155–192
- [4] ALEXANDER, RMCN: Bipedal animals, and their differences from humans. En: *Journal of anatomy* 204 (2004), Nr. 5, p. 321–330
- [5] BLICKHAN, REINHARD ; FULL, ROBERT J.: Locomotion energetics of the ghost crab: II. Mechanics of the centre of mass during walking and running. En: *Journal of experimental biology* 130 (1987), Nr. 1, p. 155–174
- [6] BOCK, Walter J.: The Inner Bird: Anatomy and Evolution. En: *The Auk* 126 (2009), Nr. 1, p. 229–30
- [7] BURK M.D, Charles M.: The Myology of the Pigeon. (1893)
- [8] CANO, Francisco G. *ANATOMÍA ESPECÍFICA DE AVES: ASPECTOS FUNCIONALES Y CLÍNICOS*. 2010
- [9] CARDENAS CORREA, Edwin F.: Modelado y Simulación de un Robot Caminador Bípedo. En: *Universidad Nacional de Colombia. Bogota* (2004)
- [10] COMPANY, Sony. *QRIO (SDR) SONY Dream Robot*. 2006
- [11] COSTA, J.M.: *Diccionario de química física*. Ediciones Diaz de Santos, 2005. – ISBN 9788479786915
- [12] CRACRAFT, Joel: The functional morphology of the hind limb of the domestic pigeon, *Columba livia*. Bulletin of the AMNH; v. 144, article 3. (1971)

- [13] CRAIG, John J.: Introduction to Robotics. (2005)
- [14] CRONIN, Thomas W. ; KINLOCH, Matthew R. ; OLSEN, Glenn H.: Head-bobbing behavior in foraging whooping cranes favors visual fixation. En: *Current Biology* 15 (2005), Nr. 7, p. R243–R244
- [15] DAGG, Anne I.: The walk of the Silver gull (*Larus novaehollandiae*) and of other birds. En: *Journal of Zoology* 182 (1977), Nr. 4, p. 529–540. – ISSN 1469–7998
- [16] DAGG, A.I.: *Running, walking and jumping: the science of locomotion*. Wykeham Publications, 1977 (Wykeham science series). – ISBN 9780844811697
- [17] DAGG, Anne I.: The role of the neck in the movements of the giraffe. En: *Journal of Mammalogy* (1962), p. 88–97
- [18] DENAVIT, J. ; HARTENBERG, R. S.: A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. En: *Trans. ASME E, Journal of Applied Mechanics* 22 (1955), June, p. 215–221
- [19] DILWORTH, Jerry. *Spring Turkey*. 1994-1996
- [20] DOI, Masahiro ; HASEGAWA, Yasuhisa ; FUKUDA, Toshio: Passive dynamic autonomous control of bipedal walking. En: *Humanoids*, 2004, p. 811–829
- [21] DONELAN, J M. ; KRAM, Rodger ; KUO, Arthur D.: Simultaneous positive and negative external mechanical work in human walking. En: *Journal of biomechanics* 35 (2002), Nr. 1, p. 117–124
- [22] DUNLAP, KNIGHT ; MOWRER, Orval H.: Head movements and eye functions of birds. En: *Journal of Comparative Psychology* 11 (1930), Nr. 1, p. 99
- [23] DYCE, Keith M. ; SACK, Wolfgang O. ; WENSING, Cornelis Johannes G. ; MARTÍNEZ, Juan Roberto P. ; GUARDIOLA, Santiago A. ; SAAVEDRA, José Luis M.: *Anatomía veterinaria*. Médica Panamericana, 1991
- [24] DYNAMICS., BOSTON. *PETMAN*. 2011
- [25] FIGLIOLINI, Giorgio ; REA, Pierluigi ; CONTE, Marco: Mechanical Design of a Novel Biped Climbing and Walking Robot. En: *ROMANSY 18 Robot Design, Dynamics and Control*. Springer, 2010, p. 199–206
- [26] FREMLIN, J: How stereoscopic vision evolved. En: *NewScient* 56 (1972), p. pp. 26–29.
- [27] FRIEDMAN, M. B. O.: How birds use their eyes. En: *Neural and endocrine aspects of behavior in birds* (1975), p. pp. 181–204.

- 
- [28] FROST, BJ: The optokinetic basis of head-bobbing in the pigeon. En: *J Exp Biol* 74 (1978), p. 187–195
- [29] FUJITA, Masaki: Kinematic parameters of the walking of herons, ground-feeders, and waterfowl. En: *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 139 (2004), Nr. 1, p. 117–124
- [30] FUKUDA, Toshio ; AOYAMA, Tadayoshi ; HASEGAWA, Yasuhisa ; SEKIYAMA, Kosuke: Multilocomotion robot: novel concept, mechanism, and control of bio-inspired robot. En: *Artificial Life Models in Hardware*. Springer, 2009, p. 65–86
- [31] GRIMM, Megan ; ARROYO, A A. ; SCHWARTZ, Eric M.: Jurassic Chicken: An Avian Bipedal Robot. En: *Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, 2001
- [32] HONDA. *Honda's Advanced Step in Innovative Mobility: ASIMO*.
- [33] HUGEL, Vincent ; HACKERT, Remi ; ABOURACHID, Anick: Kinematic modeling of bird locomotion from experimental data. En: *Robotics, IEEE Transactions on* 27 (2011), Nr. 2, p. 185–200
- [34] HUTCHINSON, Vivian: The evolutionary continuum of limb function from early theropods to birds. En: *Naturwissenschaften* 96 (2008), p. 423–448
- [35] INSTITUTE, BIOMIMICRY. *Ariel-University Research and Development Company, Ltd*
- [36] ISHIDA, Tatsuzo. *A Small Biped Entertainment Robot SDR-4X L1*.
- [37] JOHNSTON, Richard F.: Variation in size and shape in pigeons, *Columba livia*. En: *The Wilson Bulletin* (1990), p. 213–225
- [38] KAR, DC ; KURIEN ISSAC, K ; JAYARAJAN, K: Gaits and energetics in terrestrial legged locomotion. En: *Mechanism and machine theory* 38 (2003), Nr. 4, p. 355–366
- [39] KHALIL, W ; KLEINFINGER, J: A new geometric notation for open and closed-loop robots. En: *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on* Vol. 3 IEEE, 1986, p. 1174–1179
- [40] KING, G.M ; CUSTANCE, D.: Colour atlas of vertebrate anatomy: The Pigeon. En: *Blackwell Scientific Publications*
- [41] MANOONPONG, Poramate ; GENG, Tao ; WORGOTTER, F: Exploring the dynamic walking range of the biped robot. En: *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on IEEE*, 2006, p. 418–424

- [42] MCN, Alexander R.: Mechanics of bipedal locomotion. En: *In: Perspectives in Experimental Biology* 224 (1976), Nr. 1, p. pp. 493–504
- [43] NECKER, R ; JANSSEN, A ; BEISSENHIRTZ, T: Behavioral evidence of the role of lumbosacral anatomical specializations in pigeons in maintaining balance during terrestrial locomotion. En: *Journal of Comparative Physiology A* 186 (2000), Nr. 4, p. 409–412
- [44] NECKER, Reinhold: Head-bobbing of walking birds. En: *Journal of Comparative Physiology A* 193 (2007), Nr. 12, p. 1177–1183
- [45] PRATT, Jerry. *Spring Flamingo*. 1996-2000
- [46] RAMÍREZ HEREDIA, Naranjo Ocampo A. ; ROA GARZON, M. A.: Modelado y Simulación de un Caminador Bipedo Equilibrado por Contrapeso. En: *8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica Cusco* (2007)
- [47] ROBERTS, y o.: Energetics of Bipedal Running. En: *USA: The Journal of Experimental Biology* 201 (1998)
- [48] STURKIE, Paul D. [u. a.]: Avian physiology. En: *Avian physiology*. (1965), Nr. 2nd ed
- [49] TAYLOR, C R. ; HEGLUND, Norman C. ; MCMAHON, THOMAS A. ; LOONEY, Todd R.: Energetic cost of generating muscular force during running: a comparison of large and small animals. En: *The Journal of Experimental Biology* 86 (1980), Nr. 1, p. 9–18
- [50] TAYLOR, Graham W. ; HINTON, Geoffrey E. ; ROWEIS, Sam T.: Modeling human motion using binary latent variables. En: *Advances in neural information processing systems*, 2006, p. 1345–1352
- [51] TROJE, Bobyn Andres M. ; QINGGUO, Li. *Biomechanics of Head-bobbing in pigeons*.
- [52] TROJE, Nikolaus F. ; FROST, Barrie J.: Head-bobbing in pigeons: how stable is the hold phase? En: *Journal of Experimental Biology* 203 (2000), Nr. 5, p. 935–940
- [53] WILTSCHKO, Wolfgang ; FREIRE, Rafael ; MUNRO, Ursula ; RITZ, Thorsten ; ROGERS, Lesley ; THALAU, Peter ; WILTSCHKO, Roswitha: The magnetic compass of domestic chickens, *Gallus gallus*. En: *Journal of Experimental Biology* 210 (2007), Nr. 13, p. 2300–2310
- [54] WINTER, David A.: *Biomechanics and motor control of human movement*. Wiley. com, 2009
- [55] YIN, Haiwei ; SHI, Lei ; SHA, Jing ; LI, Yizhou ; QIN, Youhua ; DONG, Biqin ; MEYER, Serge ; LIU, Xiaohan ; ZHAO, Li ; ZI, Jian: Iridescence in the neck feathers of domestic pigeons. En: *Physical Review E* 74 (2006), Nr. 5, p. 051916

- [56] ZEILER, Matthew D.: Learning Pigeon Behaviour Using Binary Latent Variables. (2009)
- [57] ZUNTZ, N: Uber den Stoffverbrauch des Hundes bei Muskelarbeit. En: *Arch. ges. Physiol* (1897)