PROYECTO FINAL

INGENIERÍA INFORMÁTICA - ITBA

SIMULACIÓN Y ANIMACIÓN BIOMECÁNICA DE UN HUMANOIDE

Alumnos:

Enzo Altamiranda Graterol
ealtamir@itba.edu.ar

Teresa Fontanella De Santis
tfontane@itba.edu.ar

Tomás Mehdi
tmehdi@itba.edu.ar

Tutor:

Dr. Daniel Ricardo Parisi

Instituto Tecnológico de Buenos Aires - ITBA
Departamento de Ingeniería Informática

Marzo 2016

Índice

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo crear una simulación y animación de un humano virtual, con las siguientes propiedades:

- Biomecánica: que tanto su estructura (peso, altura y posición de cada una de sus partes) como su interacción con el entorno, respondan a comportamientos físicos reales y exactos.
- Inteligencia Artificial: que aprenda a caminar por sí mismo, utilizando para ello métodos de *soft computing* como Algoritmos Genéticos.

1. Introducción

No está terminada aún

Siempre ha sido de interés la simulación biomecánica de seres vivos, especialmente en las ciencias naturales (zoología, medicina, etc.). Pero últimamente se ha incrementado el interés en otras áreas de aplicación, como los videojuegos. Una característica muy importante de este trabajo es que, el humanoide no es fruto de una animación, sino un objeto compuesto de segmentos físicos, que interaccionan.

2. Herramientas

2.1. Motor Físico

Se le llama motor físico o *physics engine* a un "*software* capaz de realizar simulaciones de ciertos sistemas físicos, como la dinámica del cuerpo rígido, el movimiento de un fluido y la elasticidad"[1].

Actualmente, existen muchos motores físicos: ya sea de código propietario (PhysX, Havok), como *open-source* (*Bullet Physics*, *Box2D*, Newton, OGRE). Considerando análisis relacionados [2][3], y la necesidad de que el espacio simulado fuese en 3D, se decidió que *Bullet Physics*[4] es el más idóneo. Está implementado en C++ y ha sido utilizado en varios juegos (*Grand Theft Auto IV* y V, etc); en los efectos especiales de películas (Hancock, Bolt, etc.); y proyectos científicos, como la herramienta *open-source Tensegrity Robotics Toolkit* de la NASA[1]; entre otros.

Si bien (como se verá más adelante) *Bullet* tiene problemas asociados con el coeficiente de restitución, posee una muy buena *performance* en la detección de colisiones, la dinámica y la resolución de *constraints*. Esto se debe, en parte, a diferentes algoritmos iterativos de orden lineal (donde el más importante es *Sequential Impulse*), de *caching* y también a la utilización de un modelo de fricción de Coulomb aproximado [5]. Además, el motor físico brinda la posibilidad de regular la precisión requerida en estos cálculos (sin olvidar que, con iguales recursos, a mayor precisión, mayor capacidad de cómputo requerida y, ergo, mayor tiempo). Dado que la construcción del humanoide implica definir características y restricciones de movimiento de cada una de sus partes, lo antes mencionado fue crucial para la elección de *Bullet Physics* en este proyecto.

[1] http://bulletphysics.org/Bullet/phpBB3/viewtopic.php?f=17&t=9978

2.1.1. Modelo de fricción utilizado y su verificación

Hay reglas físicas relacionadas con el entorno y que son muy importantes para la caminata: el modelo de fricción, con sus respectivos coeficientes de fricción y restitución.
En base a los modelos físico-matemáticos utilizados en los dos fenómenos en cuestión (y que se explicarán a continuación), y pensando en posibles futuras simulaciones de varios humanoides chocando e interactuando entre sí; se llevaron a cabo dos experimentos para verificar que estuvieran en concordancia con los datos arrojados por *Bullet*.

- El primero simula un cubo, de $m_{cube} = 1kg$ y $l_{box} = 1m$, que tiene una velocidad inicial constante (v_i) en el eje horizontal, que gradualmente se detiene por acción de la fricción, hasta llegar al reposo -Fig. 1-. Se buscó determinar el modelo utilizado por *Bullet* para simular las fuerzas resultantes sobre un cuerpo por acción de la fricción.

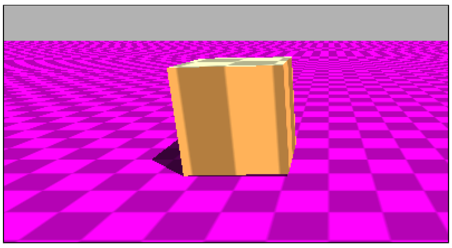


Figura 1: Esquema del primer experimento

Para este experimento se utilizó el modelo matemático que representa la posición del cuerpo en el eje horizontal en función del tiempo, representado por la siguiente ecuación:

$$x(t) = x_i + v_i t + \frac{1}{2} a t^2 \tag{1}$$

En este caso, el cuerpo empieza su movimiento en el origen, por lo tanto la posición inicial (x_i) es cero. Debido a la fricción entre el cuerpo y el suelo, se genera una fuerza de rozamiento F_{μ_d} -ec. (2)- en la misma dirección que la velocidad del sólido y en sentido contrario.

$$-F_{\mu_d} = \mu_d F_N \tag{2}$$

donde $F_N = mg$ es la fuerza normal que actúa sobre la caja por acción de la gravedad g, y μ_d es el coeficiente de fricción dinámico.

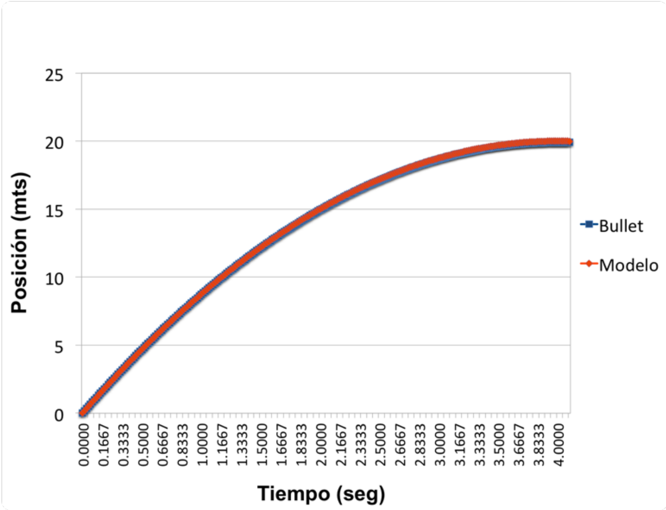
Finalmente, se obtiene la aceleración:

$$a = \frac{F_{\mu_d}}{m} = \frac{-\mu_d F_N}{m} = \frac{-\mu_d m g}{m} = -\mu_d m g \tag{3}$$

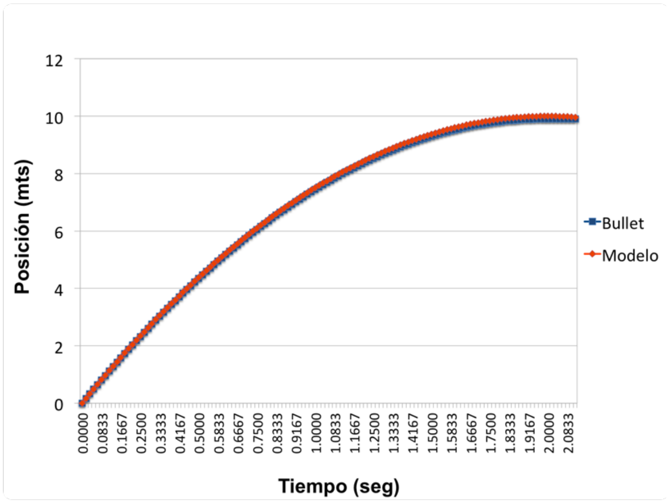
Considerando las ec. (1) y (3), se puede obtener el modelo matemático que predice el movimiento de la caja:

$$x(t) = x_i + v_i t - \frac{1}{2} \mu_d g t^2 \tag{4}$$

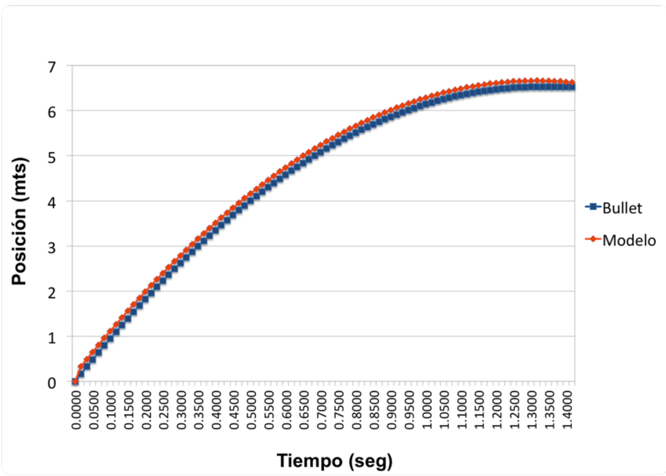
Los resultados obtenidos -ver Fig. 2, 3 y 4- exponen que posiblemente *Bullet* utilice el modelo antes expuesto a la hora de simular. No obstante, vale aclarar que, cuanto mayor sea el paso de simulación -o *stepping*- empleado, mayor es la discrepancia entre la simulación y el modelo, posiblemente porque la precisión es menor y eso lleva a cometer un error mayor.



(a)

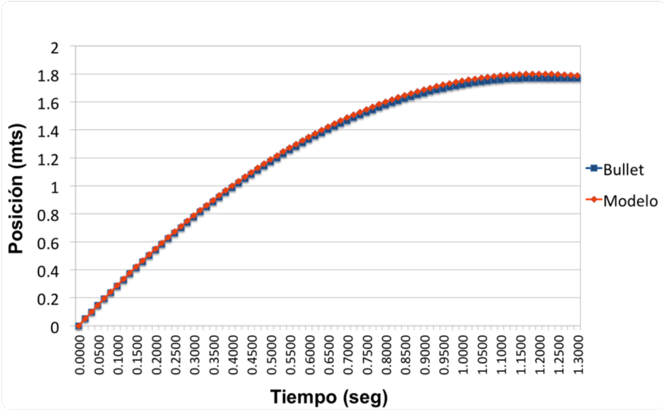


(b)

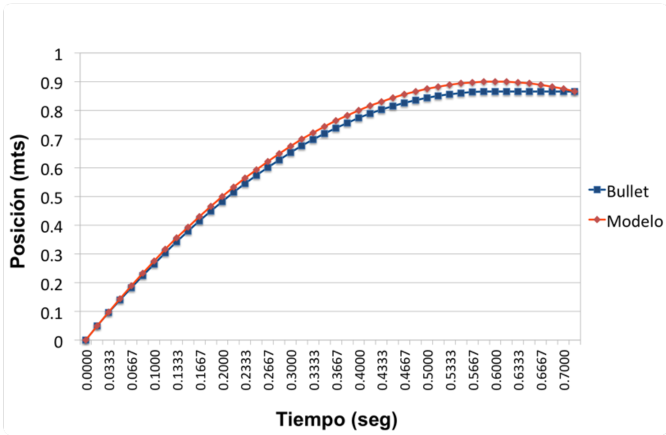


(c)

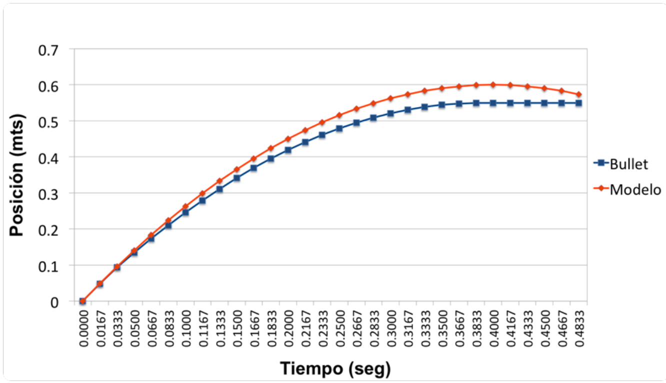
Figura 2: $v_i = 10\frac{m}{s}$: (a) μ_d =0.25, (b) μ_d =0.50, y (c) μ_d =0.75



(a)

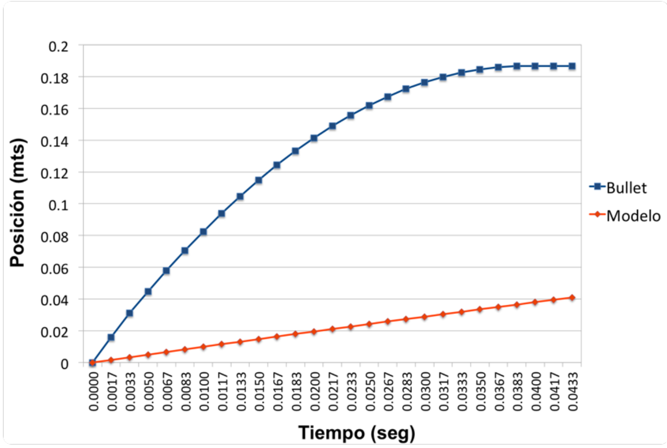


(b)

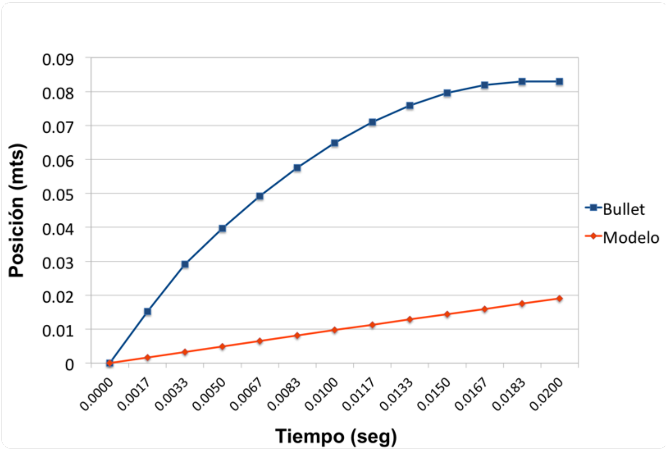


(c)

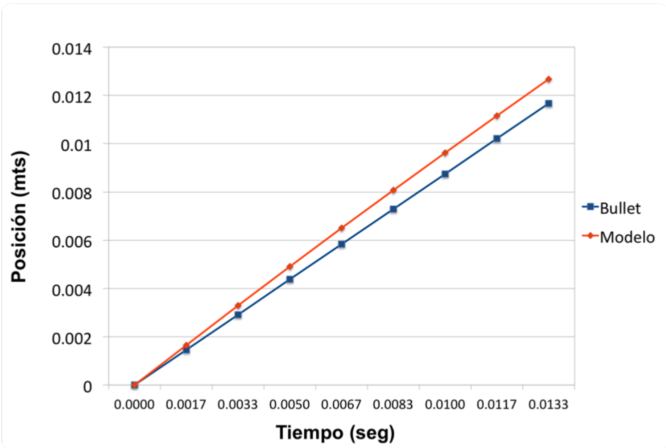
Figura 3: $v_i = 3\frac{m}{s}$: (a) μ_d =0.25, (b) μ_d =0.50, y (c) μ_d =0.75



(a)



(b)



(c)

Figura 4: $v_i = 1\frac{m}{s}$: (a) μ_d =0.25, (b) μ_d =0.50, y (c) μ_d =0.75

– El segundo simula una esfera a una altura determinada sobre el suelo, que tiene una velocidad en el eje perpendicular al piso y que eventualmente colisiona contra el mismo.
Se desea comprobar que la colisión entre el cuerpo y el suelo respete que la velocidad final

de la esfera después del choque sea proporcional a su coeficiente de restitución e dado por la ecuación:

$$e = \frac{v_f}{v_i} \quad (5)$$

Para efectuar la colisión con el suelo, se empleó una esfera sólida ubicada a 4 metros del suelo, cuya masa y radio son $m_{sphere} = 1\ kg$ y $r_{sphere} = 1\ m$, respectivamente -ver Fig. 5-. En el ambiente utilizado no hay gravedad ($g = 0\frac{m}{s}$), lo que posibilita utilizar la ec. (5). El intervalo de tiempo físico (o *timestep*) utilizado es Δt =0.001 s. El *timestep* de animación (es decir, cada cuánto tiempo se guardan en un archivo los datos logrados) es $\Delta t'$ =0.1 y el tiempo de simulación es de $s = 100\Delta t$. El coeficiente de fricción es μ =0.75.

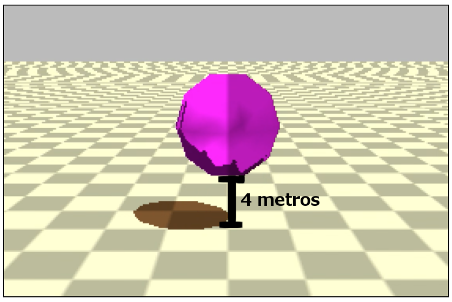


Figura 5: Esquema del segundo experimento

El experimento tiene como parámetros de entrada: v_i (velocidad inicial) y e_{sim} (coeficiente de restitución esperado). Por otro lado, se obtiene v_f (velocidad de la esfera al finalizar la simulación); y se calculan e_{medida} (coeficiente de restitución obtenido a partir de la ec. (5)) y ϵ_{rel} (error relativo entre los coeficientes e_{sim} y e_{medida}).
Acto seguido, se muestran los experimentos realizados. En ellos, v_i = { -0.5, -3.5, -4, -5 y -10}$\frac{m}{s}$ y e_{sim} = {0.2, 0.5 y 0.8}.

e_{sim}	0.2	0.5	0.8
v_f	0.000249 $\frac{m}{s}$	0.000219 $\frac{m}{s}$	0.001037 $\frac{m}{s}$
e_{medida}	0.000498	0.000438	0.002074
ϵ_{rel}	0.997	0.999	0.997

(a)

e_{sim}	0.2	0.5	0.8
v_f	0.000057 $\frac{m}{s}$	0.000018 $\frac{m}{s}$	0.3 $\frac{m}{s}$
e_{medida}	0	0	0.0857
ϵ_{rel}	1	1	0.893

(b)

e_{sim}	0.2	0.5	0.8
v_f	0.000473 $\frac{m}{s}$	0.000424 $\frac{m}{s}$	1.23 $\frac{m}{s}$
e_{medida}	0.00012	0.00011	0.3
ϵ_{rel}	1	1	0.625

(c)

e_{sim}	0.2	0.5	0.8
v_f	1 $\frac{m}{s}$	2.5 $\frac{m}{s}$	4 $\frac{m}{s}$
e_{medida}	0.2	0.5	0.8
ϵ_{rel}	0	0	0

(d)

e_{sim}	0.2	0.5	0.8
v_f	2 $\frac{m}{s}$	5 $\frac{m}{s}$	8 $\frac{m}{s}$
e_{medida}	0.2	0.5	0.8
ϵ_{rel}	0	0	0

(e)

Tabla 1: Coeficientes de restitución obtenidos de simular el sistema descripto en Fig. 5: (a) v_i =-0.5 $\frac{m}{s}$, (b) v_i = -3.5 $\frac{m}{s}$, (c) $v_i = -4\frac{m}{s}$, (d) $v_i = -5\frac{m}{s}$, y (e) $v_i = -10\frac{m}{s}$

Los resultados exponen una limitación del motor físico: no representa correctamente las colisiones elásticas entre esferas y cuerpos rígidos, que ocurren a velocidades bajas. Esto queda en evidencia en la Tabla 1. En cada una de ellas el error fue de casi el 100 %.
La razón por la que ocurre este hecho se debe a que *Bullet* utiliza un algoritmo de colisión que frena la velocidad de un objeto que está a punto de colisionar. Haciendo esto puede evitar que los sólidos se traspasen y de esta forma se pueden realizar cálculos de fuerza más precisos. En el caso de los experimentos, las esferas poseen una velocidad muy baja, cuando están a punto de colisionar *Bullet* reduce aún más esta velocidad y eventualmente quedan con una velocidad tan baja que al chocar contra el suelo se aplica el efecto restitutivo a esta velocidad casi nula y se resuelve que la esfera debe quedar en reposo, cuando en realidad debería poseer una velocidad baja, pero no despreciable.

2.1.2. Ventajas

- Código abierto: mayor conocimiento sobre las fórmulas y métodos implementados en el motor, a diferencia de lo acaecido en trabajos previos [6], en donde al usar *frameworks* físicos de código cerrado, no se tenía ni control ni conocimiento pleno de su funcionamiento.

- Soporte de la comunidad científica.

– Licencia libre.

2.1.3. Desventajas

– Documentación poco clara y desordenada.

– Debido a que la física se aproxima usando métodos numéricos que contienen error, las simulaciones son no determinísticas.

– Utilizar una librería gráfica (como *OpenGL*) acoplada a una simulación de *Bullet* puede producir resultados distintos que si se utiliza un programa de visualización externo (como OVITO).

2.2. Librería de Algoritmos Genéticos

Se utilizó la conocida librería de Algoritmos Genéticos para C++ GaLib, desarrollada por Matthew Wall del MIT [7].
Ofrece funcionalidades como: programación paralela, diversos métodos de selección (*elite*, *roulette*), estrategias de reemplazo (de padres, aleatorio, del peor), entre otras.

2.3. Código Fuente

Al estar *Bullet* implementado en C++, el código fuente también está desarrollado en ese lenguaje. En *Bullet*, se define un *World* -o mundo físico- en donde se puede insertar, entre otras cosas, cuerpos rígidos. En este caso en particular, el mundo consta de un plano -el suelo- y el humanoide encima -compuesto por cuerpos rígidos y otros elementos físicos-.
El *software* creado incluye: creación del humanoide, siendo éste capaz de desplazarse por medio de actuadores (que se verán en la Sección 4); el desarrollo del algoritmo genético (la definición de los individuos, la función de *fitness*, métodos de selección, etc.); visualización gráfica del mejor humanoide logrado por el algoritmo genético; y la posibilidad de realizar gráficos referidos a la evolución del algoritmo genético (*fitness* por cada generación, etc.).
Se acompañan a esta presentación: el código fuente y el manual de instalación y uso.

3. Modelo Utilizado

Hay diversos modelos. Algunos son más genéricos [8] [9] y complejos. Sin embargo, se procuró utilizar uno que fuera sencillo pero representativo a la vez.
Se modela al cuerpo humano, con el motor *Bullet Physics*, como un conjunto de segmentos unidos por articulaciones. A cada uno de ellos se les aplica una fuerza en el centro de masa de cada segmento (denominada Actuador). Que la caminata se produzca o no, depende del tipo de actuador utilizado (la función utilizada para la fuerza), y de sus parámetros. El objetivo, entonces, se reduce a encontrar dichos parámetros. Para eso se usan los algoritmos genéticos, un método de Inteligencia Artificial. De este modo, se obtiene, de forma análoga a la selección natural, los individuos que mejor se adapten a la caminata. Tanto los actuadores como el algoritmo genético se explicarán más adelante.

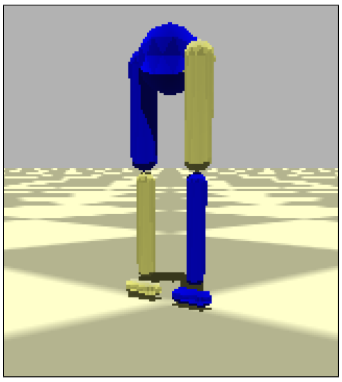


Figura 6: Humanoide diseñado

3.1. Composición Física del Humanoide

No está terminada aún

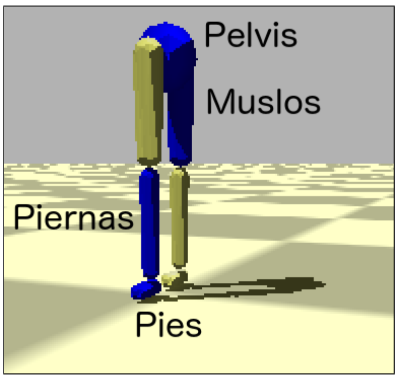
Como ya se dijo, el humanoide fue modelado en *Bullet* como un conjunto de segmentos, unidos por articulaciones -ver Fig. 7-. Los segmentos son cuerpos rigídos.

Se dividió al cuerpo humano en: cabeza, tronco, miembro superior, pelvis y miembro inferior (muslo, pierna y pie). Considerar la mitad superior del cuerpo implicaba mayor complejidad (manejo de equilibrio, humanoide más pesado y con mayor volumen, etc.). Ergo, solo se tomó la pelvis y el miembro inferior.

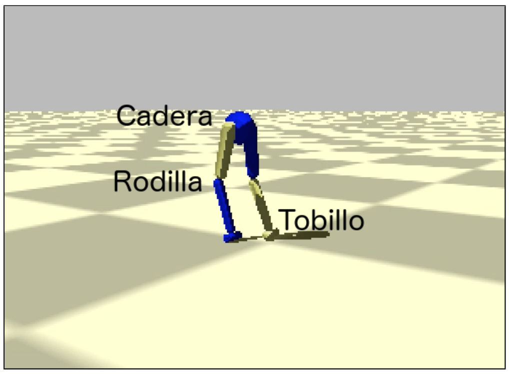
A continuación se presenta la composición de cada segmento (de acuerdo a la biomecánica [10]):

Parte	Cantidad	Forma	Largo (en m)	Peso (en kg)	Uniones
Pelvis	1	esférico	0.08655	9.9718	Cadera
Muslo	2	esfero-cilindro	0.4015	10.3368	Cadera y Rodilla
Pierna	2	esfero-cilindro	0.4015	3.1609	Rodilla y Tobillo
Pie	2	esfero-cilindro	-	1.0001	Tobillo

Tabla 2: Segmentos del humanoide



(a)



(b)

Figura 7: Humanoide diseñado: (a) segmentos, y (b) articulaciones

3.2. Articulaciones

No está terminada aún

Para unir los distintos segmentos entre sí, se utilizaron articulaciones bisagra con 1 grado de libertad: en el eje Z -en donde ocurre la caminata- y en el eje Y -el perpendicular al piso-. Además, para cada caso en particular, se definieron cotas para los ángulos que pueden existir entre los segmentos. Esto es muy importante, no sólo porque se adecúa a datos biológicos, sino porque, de otro modo la caminata no podría lograrse: si los ángulos son demasiado altos, la caminata se produce girando las piernas por encima de la pelvis; si por el contrario, son demasiado bajos, las piernas van a estar muy rígidas, originando pocos pasos y muy cortos.

Por otra parte, a la pelvis se le restringe todo tipo de rotación.

4. Actuadores

A cada uno de los segmentos correspondientes al muslo y la pierna del bípedo, se le aplica un torque -o actuador- en el eje X -perpendicular a la trayectoria-, como se ve en Fig 8. Así, pueden moverse para arriba o para abajo -con respecto a la articulación a la que pertenecen-.
A fin de simplificar el modelo, el humanoide tiene el mismo tipo de actuador utilizado en todos los segmentos.
Que el torque se aplique en una sola dimensión, contribuye a que la caminata producida sea plana -en 2D, y no en 3D, como debería ser en una caminata real-.
Para indicar el módulo de dicho torque, se diseñaron diferentes funciones (todas ellas periódicas), mencionadas en las subsecciones que siguen.

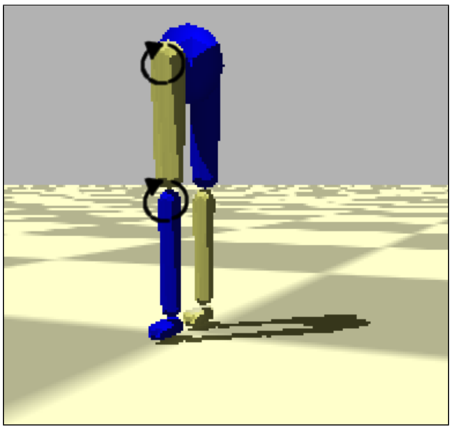


Figura 8: Aplicación de los actuadores en los segmentos del bípedo

4.1. Genérico

Es el actuador más sencillo (tanto matemática como computacionalmente). No se consideraron las funciones trigonométricas básicas (es decir, solo sin o cos), por los resultados obtenidos en [6]. La fase es la misma tanto en el seno como en el coseno, para evitar que se formen otro tipo de funciones no cíclicas.

$$f(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \phi) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi) + C \tag{6}$$

4.2. Fourier

Este actuador utiliza una serie de Fourier de dos términos.

$$f(t) = A_1 \sin(\omega t + \phi) + B_1 \cos(\omega t + \phi) + A_2 \sin(2\omega t + \phi) + B_2 \cos(2\omega t + \phi) + C \tag{7}$$

4.3. Extra Fourier

Es una extensión del actuador anterior, pero con 9 términos. Por ser de mayor grado, brinda una mayor precisión. Sin embargo, es más dificil de manejar computacionalmente; y, además, que sea más preciso no garantiza que con él se pueda lograr una buena caminata.

$$\begin{aligned} f(t) = & A_1 \sin(\omega t + \phi) + B_1 \cos(\omega t + \phi) + A_2 \sin(2\omega t + \phi) + B_2 \cos(2\omega t + \phi) \\ & + A_3 \sin(3\omega t + \phi) + B_3 \cos(3\omega t + \phi) + A_4 \sin(4\omega t + \phi) + B_4 \cos(4\omega t + \phi) \\ & + A_5 \sin(5\omega t + \phi) + B_5 \cos(5\omega t + \phi) + A_6 \sin(6\omega t + \phi) + B_6 \cos(6\omega t + \phi) \\ & + A_7 \sin(7\omega t + \phi) + B_7 \cos(7\omega t + \phi) + A_8 \sin(8\omega t + \phi) + B_8 \cos(8\omega t + \phi) \\ & + A_9 \sin(9\omega t + \phi) + B_9 \cos(9\omega t + \phi) + C \end{aligned} \tag{8}$$

4.4. Doble coseno

Esta función periódica utiliza medio ciclo de una función sinusoidal, y medio ciclo de otra (ambas pueden tener frecuencias distintas). De esta manera, se consigue una caminata más natural, y que no ocurre con los actuadores de Fourier, que producen una doble flexión de las rodillas en cada ciclo.
La idea es lograr una función periódica a partir de una que no lo es (ya que t es lineal). Para eso, se utiliza $\psi(t)$ -ec. (9)- que aplica una transformación a los números reales, para que se encuentren dentro del rango del ciclo completo (con las dos frecuencias). ω es la frecuencia de $f(t)$ -ec. (11)-, que utiliza medio ciclo con frecuencia ω_1 y medio ciclo con frecuencia ω_2.

$$\psi(t) = t + \phi - \left\lfloor \frac{t + \phi}{\pi/\omega_1 + \pi/\omega_2} \right\rfloor (\pi/\omega_1 + \pi/\omega_2) \qquad \psi : \mathbb{R} \to \left[0, \frac{2\pi}{\omega}\right] \tag{9}$$

$$\omega = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \tag{10}$$

$$f(t) = \begin{cases} A\cos(\omega_1 \psi(t)) + C & \text{si } \omega_1 \psi(t) < \pi \\ A\cos(\omega_2(\psi(t) - (\pi/\omega_1) + (\pi/\omega_2))) + C & \text{en otro caso} \end{cases} \tag{11}$$

5. Condiciones iniciales y de contorno

Las funciones periódicas mencionadas en los actuadores no son suficientes para lograr la caminata. A los actuadores señalados previamente, se le adosaron las siguientes funciones:

5.1. Función Partida

El andar del humanoide es cíclico. Sin embargo, por la posición inicial del individuo, se requiere para el tiempo del primer paso, una función distinta a la del resto de la caminata. El tipo de

función puede ser cualquiera de los actuadores vistos anteriormente (pero no necesariamente con los mismos valores de amplitud, frecuencia y fase asignados a las piernas). Empero, se utilizó la función vista en el actuador genérico.
Por otra parte, para simplificar el modelo, se decidió que el tiempo considerado para el primer paso sea fijo, y de 0.7 segundos. Dicho valor fue extraído de forma experimental.

5.2. Fase sincronizada

En una caminata, las piernas deben guardar simetría: mientras una va hacia adelante, la otra va hacia atrás (y viceversa). Esto, de acuerdo con los actuadores definidos en la sección anterior, implica que las funciones de movimiento de cada pierna estén desfasadas en medio ciclo ($\frac{\pi}{2}$):

$$f_i(t) = f(t) \tag{12}$$

$$f_d(t) = f(t + \frac{\pi}{2}) \tag{13}$$

siendo $f(t)$ la función de movimiento (o actuador) en el momento t, y f_i y f_d las funciones de la pierna izquierda y derecha, respectivamente.

5.3. Riel

Los seres humanos aplican fuerzas constantemente en el eje perpendicular a la tierra para mantenerse erguidos. Análogamente, este comportamiento puede favorecer a que el bípedo se mantenga de pie. Para eso, se consideró un sistema de control en el que la pelvis esté sujeta a un resorte imaginario, que se traslada con ella pero ubicado a una altura determinada. Cuanto mayor sea la diferencia de la altura, mayor será la fuerza aplicada por el resorte.
De esta manera, se le puede aplicar a la pelvis, en cada paso de la simulación, un resorte en el eje Y de la forma:

$$f_r(h) = -k(h - Qh_0) \tag{14}$$

donde k es la constante elástica del resorte, h es la altura actual del humanoide, h_0 su altura inicial, y Q =1.15. El término Qh_0 indica la altura del resorte.
Como contrapartida, esto imposibilita que el humanoide caiga de forma natural, ya que nunca puede caer. Éste es uno de los factores por el cual la caminata se realiza en 2D.

6. Algoritmo Genético

6.1. Individuo

La información genética de cada individuo, está compuesta por tres partes: función partida (optativa), parámetros asociados a los actuadores (obligatorios), y el riel (optativo).

6.1.1. Parámetros

Tanto la función partida, como los actuadores, tienen como parámetros: amplitud (A o B); fase(ϕ), que indica dónde comienza el paso y se mide en radianes; frecuencia (ω) ; y término independiente (C).

Con respecto al riel, el único parámetro es la constante elástica (k), medida en $\frac{N}{m}$.

6.1.2. Valores

Cada uno de los segmentos tiene propiedades físicas distintas -masa, largo, etc.-, razón por la cual no necesariamente sus genes deban tener los mismos rangos de valores.

Actuador	Segmento	Tipo de gen	Mínimo	Máximo
Genérico	Muslo	Amplitud	-30	30
	Pierna	Amplitud	-60	60
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	10
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
	Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10
Fourier	Muslo	Amplitud	-60	60
	Pierna	Amplitud	-30	30
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	10
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
	Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10
Extra Fourier	Muslo y Pierna	Amplitud	-60	60
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.1	2
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
	Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10
Doble Coseno	Muslo y Pierna	Amplitud	-100	100
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	10
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
	Muslo	Término independiente	-50	50
	Pierna	Término independiente	-100	100

Tabla 3: Rango de valores que puede tomar cada gen, según el tipo de actuador

Segmento	Tipo de gen	Mínimo	Máximo
Muslo	Amplitud	-30	30
Pierna	Amplitud	-60	60
Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	10
Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10

Tabla 4: Rango de valores que puede tomar cada gen, para la función partida

Por otra parte, el parámetro k del riel puede tomar valores que oscilan entre 700 y 1600.

6.1.3. Implementaciones de individuos

Para favorecer el análisis de las distintas características antes implementadas, se implementaron los siguientes individuos:

Tipo de Individuo	Actuador	Función Partida	Fase sincronizada	Riel
1	Genérico	Sí	No	No
2	Genérico	Sí	Sí	No
3	Genérico	Sí	Sí	Sí
4	Fourier	Sí	Sí	Sí
5	Extra Fourier	Sí	Sí	Sí
6	Doble coseno	Sí	Sí	Sí

Tabla 5: Tipos de humanoide

6.1.4. Constitución del cromosoma

En la Tabla 6 se presenta la composición del cromosoma de cada individuo.
Vale aclarar que la función partida se especifica para cada segmento (las dos piernas y los dos muslos). En cambio, para los actuadores, sólo se definen dos (uno para las piernas y otro para los muslos).

Individuo	Amplitud	Frecuencia	Fase	Término independiente	Riel
1	12	6	6	6	0
2	12	6	6	6	0
3	12	6	6	6	1
4	16	6	6	6	1
5	44	6	6	6	1
6	8	8	6	6	1

Tabla 6: Distribución de parámetros según tipo de individuo

6.2. Fitness

El papel de la función de *fitness* F en un algoritmo genético es evaluar qué tan bueno es un individuo. En este caso, está definida como un producto de cinco módulos o propiedades: altura (H), velocidad (V), dirección (D), simetría (S) y pies abajo (PA):

$$F = H * V * D * S * PA \tag{15}$$

Los cuatro tienen la misma importancia y, por eso, como se verá a continuación, están definidos de forma similar (con una función exponencial y pueden valer entre 0 y 1). Con todo esto, dado que el *fitness* está pensado como un producto, basta con que uno de los módulos sea muy chico para "anular" al individuo -es decir, otorgarle un valor que tiende a cero-. Sin embargo, los diferentes módulos no son completamente independientes entre sí: por ejemplo, si la altura es demasiado baja, posiblemente la velocidad y la dirección no sean adecuadas.

6.2.1. Altura

Es un factor relacionado con la altura del individuo en toda la simulación, y se expresa:

$$H = \frac{\sum_{n=0}^{T} e^{-C(h_{t_n} - h_{t_0})^2}}{N} \tag{16}$$

donde t_0 es el tiempo inicial, t_T el tiempo final, N la cantidad pasos de simulación y C una constante $C = 5$.
Se calcula a partir de la diferencia entre la altura en cada instante de la simulación, con su altura inicial -la altura está definida como la posición de la pelvis en el eje Z-. Cuanto mayor sea esa diferencia, más rápido el individuo cae, y por eso este módulo tiende a cero. Por el contrario, valdrá uno si la diferencia es ínfima -lo que significa que el humanoide mantiene su misma altura durante la caminata-.

6.2.2. Velocidad

Indica qué tan cercana es la velocidad del individuo con respecto a una velocidad objetivo -en este caso, es de 1.2 m/h-, y se expresa de la siguiente forma:

$$V = \frac{\sum_{n=0}^{T} e^{-C(\|v_{t_n}\| - V_O)^2}}{N} \tag{17}$$

donde t_0 es el tiempo inicial, t_T el tiempo final y V_O la velocidad objetivo en el eje Z -el eje de la caminata-.
Sigue una lógica y cálculo similares al factor de altura: a mayor discrepancia de la velocidad real del humanoide con V_O, menor -y más cercano a cero- es el valor arrojado por el módulo de velocidad.

6.2.3. Dirección

Señala qué tan similares son la dirección objetivo -un vector unitario, que en este caso se encuentra en el eje Z- y la dirección con la que camine el humanoide. Se calcula como sigue:

$$D = \frac{\sum_{n=0}^{T} e^{-C(\vec{v_{t_n}} \cdot \vec{V_O} - 1)^2}}{N} \tag{18}$$

donde t_0 es el tiempo inicial, t_T el tiempo final, $\vec{v_{t_n}}$ el versor de la dirección del humanoide en el momento t_n y $\vec{V_O}$ el versor de la dirección objetivo.
El producto escalar entre los versores responde a la Similitud Coseno: $\cos\theta = \frac{A \cdot B}{\|A\|\|B\|}$, donde A y B son vectores que no se encuentran normalizados, y θ es el ángulo formado entre ellos. Así, si $\cos\theta = 1$, significa que los vectores están paralelos entre sí -que es el efecto buscado en el caso de la dirección-.
Al producto escalar se le resta 1, para que el módulo sea consistente con la función exponencial utilizada y que valga 1 cuando $\theta = 0$, y 0 cuando $\theta = \pi$. Cabe aclarar que se trata al ángulo en forma simétrica, ya que, por ejemplo $\cos(-\pi/6) = \cos(\pi/6)$.

6.2.4. Simetría

Señala qué tan equidistantes se encuentran los pies de la cadera, a lo largo de la caminata. Aplicando solamente los módulos antes mencionados, provocaba resultados en donde una pierna quedaba más distante de la pelvis que la otra, lo que provocaba que el humanoide se terminara arrastrando (y posiblemente afectando a la velocidad).

Para mayor simplicidad, la simetría S se calculó a partir de los pies (y no de las piernas). Se tomaron en cuenta sólo los ejes X y Z, porque son los relacionados a la velocidad y a la dirección, respectivamente.

$$S = \frac{\sum_{n=0}^{T} \frac{1}{2}[e^{-C(lf_Z + rf_Z|^2)} + e^{-C(lf_X + rf_X|^2)}]}{N} \tag{19}$$

donde lf_X y lf_Z es la distancia desde el pie izquierdo hasta la pelvis en los ejes X y Z, respectivamente; y en donde rf_X y rf_Z es lo mismo, pero para el pie derecho.

6.2.5. Pies abajo

Con los módulos sealados anteriormente, se resalta que el humanoide camine con una velocidad y dirección determinadas, que no se caiga y que mantenga simetría mientras ejecuta sus movimientos. Pero, todo esto daría, en el mejor de los casos, una caminata estilo "estrella".
Sin embargo, una característica fundamental en una caminata normal es que las piernas (ergo, los pies también) no sobrepasen la cadera. Si bien ésta es una propiedad negativa (expresa lo que no debe tener una caminata), y se puede correr el riesgo de restringir demasiado, su ausencia da resultados peores.

$$PA = \frac{\sum_{n=0}^{T} \frac{1}{2}(\alpha[e^{-C(ldf^2)} + e^{-C(rdf^2)}]}{N} \tag{20}$$

donde $\alpha = max(min(lf, rf) - hip, 0), 1)$ (es decir, vale 0 si la altura del pie izquierdo o derecho supera a la de la cadera, y 1 en otro caso); y ldf y rdf es la diferencia entre la posición inicial de los pies y la altura en el momento t_n de los pies izquierdo y derecho, respectivamente.

6.3. Parámetros del Algoritmo

6.3.1. Métodos de selección

De la vasta cantidad de métodos de selección que existen, se utilizaron: ***Elite*** -en donde se selecciona el individuo con mayor aptitud de la población-; y ***Roulette*** -método probabilístico, que selecciona un individuo de la población total al azar, con una probabilidad proporcional a su *fitness*-.

6.3.2. Métodos de cruza

El método de cruza -o *crossover*- utilizado es el siguiente: De dos individuos -los padres-, se originan dos nuevos individuos -los hijos-. Se toma cada uno de los genes de los padres y se elige, con una probabilidad uniforme, uno de ellos para un hijo y el otro para el otro hijo.
La probabilidad de que este proceso ocurra es de 0.9.

6.3.3. Mutación

En el caso de la mutación, se selecciona cada gen del individuo, y se elige aleatoriamente -como una moneda- los bits que se modifican y los que no.
La probabilidad de que ocurra una mutación es de 0.3.

7. Resultados Obtenidos

cccccccvvvvvv

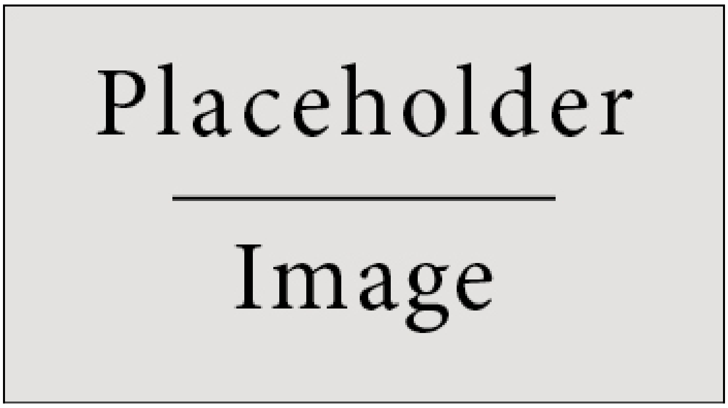


Figura 9: Figure caption.

8. Conclusiones

xxxxxxxxx

Referencias

[1] Wikipedia: *https : //es.wikipedia.org/wiki/Physics_engine*

[2] Andreas Gerndt y otros, *An Evaluation of Open Source Physics Engines for Use in Virtual Reality Assembly Simulations. Fecha de publicación: 2012*

[3] Tom Erez y otros, *Simulation Tools for Model-Based Robotics: Comparison of Bullet, Havok, MuJoCo, ODE and PhysX*

[4] Sitio web de Bullet Physics: *http : //www.bulletphysics.org/*

[5] Erin Catto, *Iterative Dynamic with Temporal Coherence. Fecha de publicación: 2005*

[6] Kevin Kenny, Máximo Videla y Axel Wassington, *Proyecto Final para la obtención del título: Ingeniero en Informática - ITBA, 2014*

[7] Sitio web de GaLib: *http : //lancet.mit.edu/ga/*

[8] Thomas Geijtenbeek, Michiel van de Panne y A. Frank van der Stappen, *Flexible Muscle-Based Locomotion for Bipedal Creatures, 2013*

[9] Marek Wojtyra, *Multibody Simulation Model of Human Walking - Warsaw University of Technology, 2003*

[10] *http : //www.exrx.net/Kinesiology/Segments.html*