

Modelado y Simulación de Robots




Motores de Físicas

Grado en Ingeniería de Robótica Software

Teoría de la Señal y las Comunicaciones y
Sistemas Telemáticos y Computación

Roberto Calvo Palomino
roberto.calvo@urjc.es

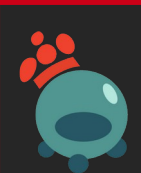
Motor de Físicas

- Un motor de física es un software que simula las leyes físicas en un entorno virtual. Proporciona algoritmos para imitar aspectos del mundo real como la gravedad, la colisión de objetos, la dinámica de fluidos, y otras fuerzas y reacciones físicas.
 - Dinámica del cuerpo rígido (colisiones) 
 - Dinámica del cuerpo blando 
 - Movimiento de un fluido 
 - Elasticidad

Soft body

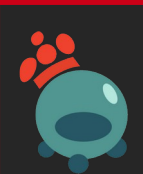


Rigid body



Dinámica

- La *dinámica* es la parte de la física que estudia las relaciones por los movimientos de los cuerpos y las causas que los provocan, en concreto las fuerzas que actúan sobre ellos.
- Es necesaria la observación de un escenario para poder entender los movimientos que se producen.
- Un objeto sólo cambia de posición si se aplica una fuerza sobre él.

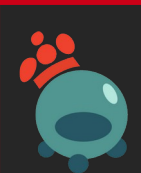


Leyes de movimiento de Newton

- Para entender las dinámicas de los motores físicos es imprescindible tener en cuenta las 3 leyes de movimiento de Newton
- Primera ley de Newton o ley de inercia

Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y en la misma dirección y velocidad a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas aplicadas sobre él.

$$\sum \mathbf{F} = 0 \Leftrightarrow \frac{d\mathbf{v}}{dt} = 0.$$



Leyes de movimiento de Newton

- Segunda ley de Newton o ley fundamental de la dinámica

El cambio de movimiento es directamente proporcional a la fuerza motriz aplicada y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime

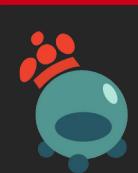
momento

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v},$$

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$$

Principio de superposición
de fuerzas

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^K \mathbf{F}_i$$



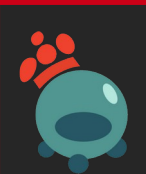
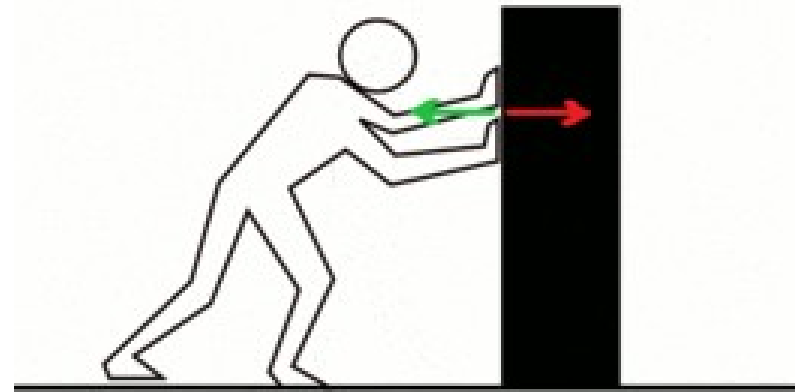
Leyes de movimiento de Newton

- Tercera ley de Newton o principio de acción y reacción

Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto.

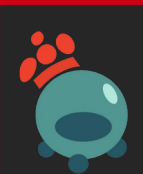
Fuerza acción (roja)

Fuerza de reacción (verde)



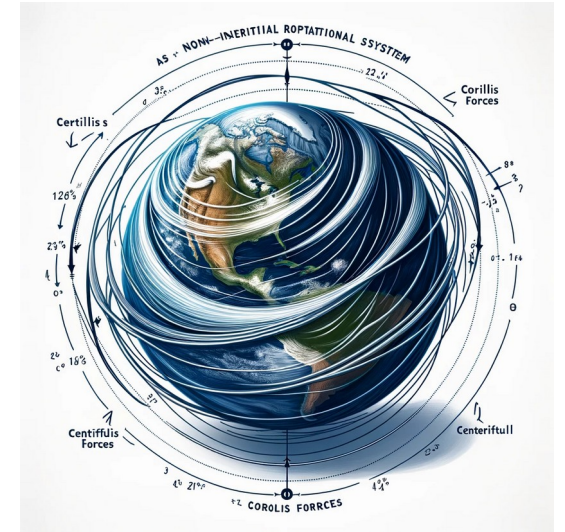
Sistema de referencia inercial

- Un sistema de referencia inercial es un sistema de referencia es aquel en el que un cuerpo permanece en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme si no actúan fuerzas externas sobre él (cumplen las leyes de Newton en su forma original)
 - Tren a velocidad constante, satélites en órbita estable
- Un sistema de referencia no inercial, hay que incluir fuerzas ficticias para poder aplicar las leyes de Newton porque está sometido a una aceleración o giro.
 - Un automóvil acelerando, montaña rusa, avión.
 - Fuerza centrífuga, Coriolis, inercia, ...



La Tierra

- Sistema no perfectamente inercial, tiene fuerzas ficticias o aparentes:
 - Órbita alrededor del sol:
 - Provoca una aceleración cambio en velocidad y movimiento
 - Rotación de la tierra:
 - Fuerza Centrífuga:
 - Hacía afuera desde el eje de rotación.
 - Fuerza de Coriolis:
 - Afecta a la dirección del movimiento
 - Medible en escalas de tiempo y espacio grandes
 - Afecta a corrientes marinas y meteorología

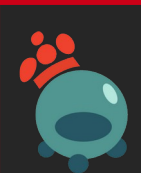


Fuerza de Coriolis

- La Fuerza de Coriolis es la responsable de los giros de los huracanes.
 - A izquierdas en el hemisferio norte.
 - A derechas en el hemisferio sur.



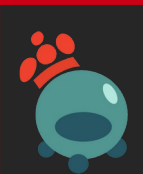
<https://www.youtube.com/watch?v=Q-gSx4KUMKI>



Motor de Físicas

Se pueden dividir en 2 grandes grupos:

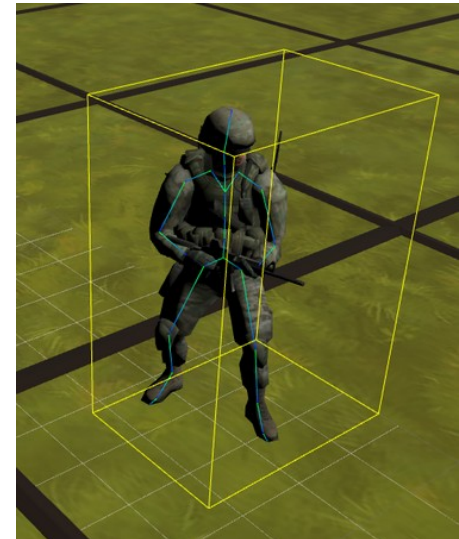
- *Real time*
 - Utiliza modelos simplificados para poder simular en tiempo real las físicas del escenario (reduciendo exactitud y precisión).
 - Utilizados en video juegos y otro tipo de simuladores interactivos
- *High Precision*
 - Requieren un mayor procesamiento ya que para calcular de una manera muy precisa las físicas.
 - Comúnmente utilizado en el ámbito científico y para películas de animación por computación.



Motor de Físicas

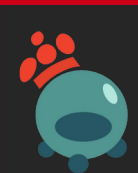
Su uso es muy variado:

- *Científico*
 - Modelado de patrones meteorológicos
 - Diseño de aviones
 - Simulación de nuevos materiales en ruedas de coches
- *Video Juegos*
 - Detección de colisiones
 - Cuerpos rígidos y blandos
 - Velocidad prevalece sobre la exactitud y precisión



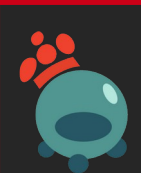
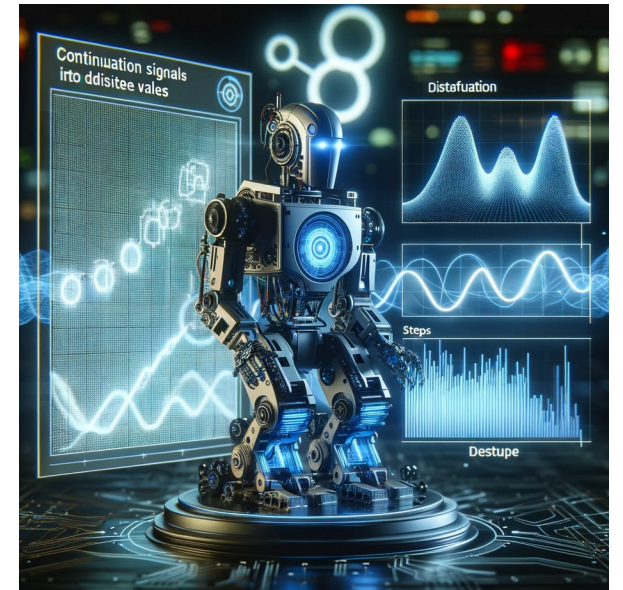
Motor de Físicas

- Por supuesto, tiene sus limitaciones:
 - Los objetos no puede ser presentados por infinitos puntos o texturas ni por infinitas fuerzas actuando sobre el objeto.
 - Cuando la *precisión* es baja, errores de redondeo afectan a los resultados:
$$0.943 \times 3.230 = 3.04589 \quad \neq \quad 3.0$$
 - *Pequeñas fluctuaciones* no modeladas pueden suponer un cambio drástico y dramático en el resultado
 - Teoría del caos, efecto mariposa



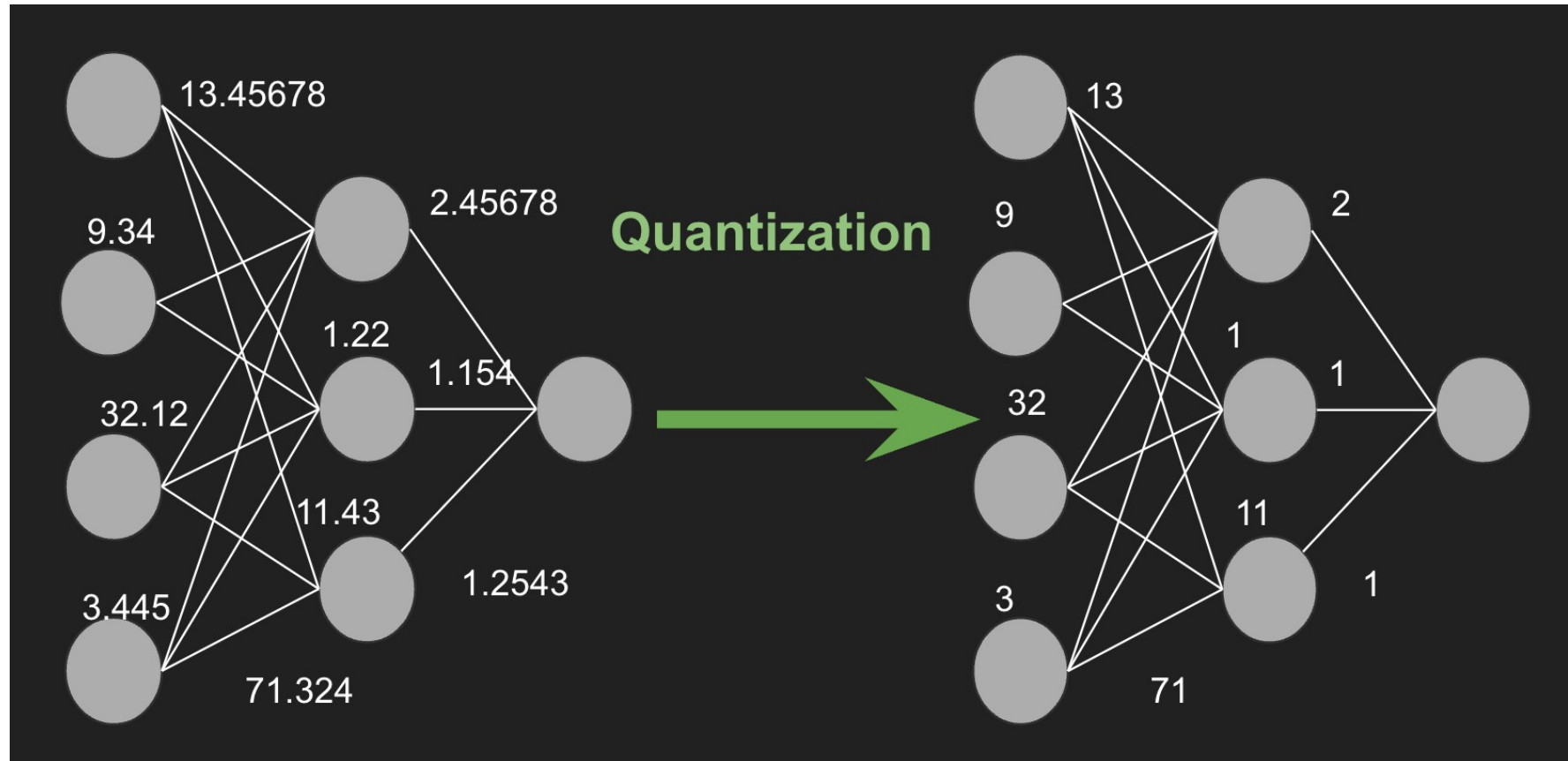
Motor de Físicas

- Cuantización
 - proceso que se utiliza para reducir la precisión de las representaciones numéricas y los cálculos para mejorar el rendimiento computacional
 - Limita el rango de valores posibles que una variable puede representar (discreto y finito)
 - Un alto grado de cuantización lleva a errores en la simulación y comportamientos físicos incorrectos.
 - Permite justar el equilibrio entre exactitud de la simulación y carga computacional del sistema.



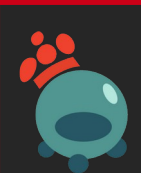
Motor de Físicas

- Cuantización en modelos DL
 - Float64, Float32, Int32



Motor de Físicas

- Unidad de procesamiento de físicas ó physics processing unit (PPU), es un microprocesador dedicado y especializado en cálculos de físicas. Es un acelerador hardware.
- Del mismo modo que las GPUs están especializadas en operaciones gráficas, las PPU's están especializadas en cómputo de físicas.
- Más usadas en proyectos especializados
- GPUs dan buen rendimiento, pero no óptimo para las físicas



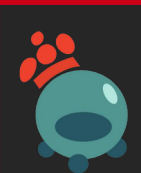
Motor de Físicas

- Movimientos de robots son mucho más complejos y requieren más precisión que la de por ejemplo, un servo controlador puede proveer.
- Modelos complejos de físicas son necesarios para modelar los robots como paso previo a su fabricación.
- Simular contactos dinámicos en cada paso de la simulación es complejo y se considera problemas NP-hard
 - aplicación de heurísticos
 - optimización convexa



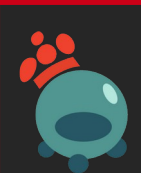
Diferentes Motores de Físicas

- Existen diferentes motores de físicas, que normalmente van integrados además dentro de simuladores más complejos.
- Por ejemplo Gazebo 11 soporta:
 - *ODE*: Open Dynamics Engine (por defecto)
 - *Bullet*
 - *DART*: Dynamic Animation and Robotics Toolkit (Georgia Tech)
 - *Simbody*, (Stanford University)
- Gazebo (garden) utiliza DART por defecto
- Gazebo multi-physics engine support



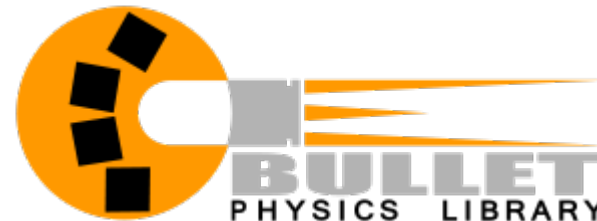
ODE: Open Dynamics Engine

- Motor de físicas escrito en C/C++ con licencia BSD
- Primera versión en 2001, y última versión estable Jul-2020
- Soporta modelo de colisiones y de cuerpos rígidos
- Incluido en Gazebo, Player Project, Webots, Opensimulator ...
- Muy utilizado en robótica pero con algunas limitaciones:
 - Modelo de fricción
 - Pobre soporte para joint-damping (amortiguación)



Bullet

- Motor de físicas programado en C++ y open source
- Provee bindings para Python
- Simula detección de colisiones y dinámica de cuerpos rígidos y blandos
- Incorpora diferentes primitivas para la colisión
- Plugins para Maya, Softimage, Cinema 4D, LightWave 3D, Blender , Godot, Poser



- Librería desarrollada en C++ que ofrece estructuras y algoritmos cinemáticos y dinámicos (cuerpos rígidos y blandos)
- Creado por “Humanoid Robotics Lab” en Georgia Institute of Technology
- Estabilidad y exactitud para representar articulaciones en cuerpos rígidos
- Enfocado en la optimización de operaciones
- Soporta ODE y Bullet para detectores de colisión

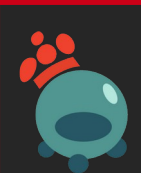


Symbody

- Motor de alta calidad para simulación de mecanismo articulados tales como estructuras, esqueletos (robots, vehículos, máquinas)
- Desarrollado por la Universidad de Stanford en C++, utilizando en Gazebo y proyectos de investigación biomoleculares.
- Menos generalista que los anteriores pero aún en uso para propósitos de investigación.

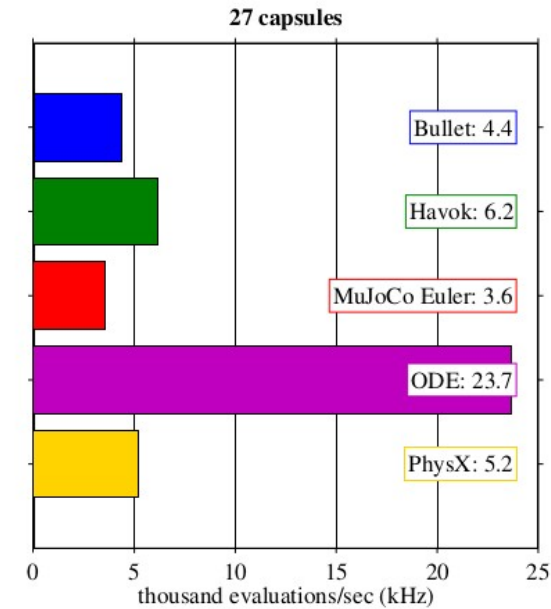
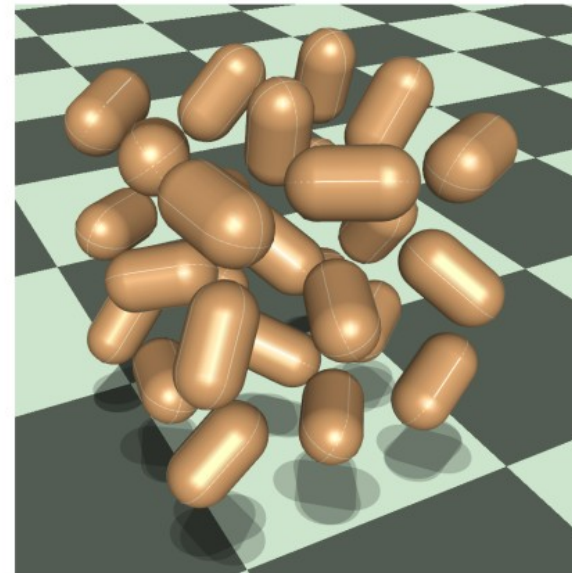
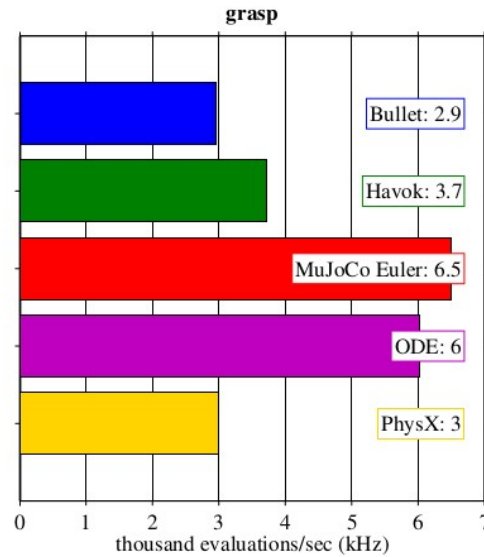
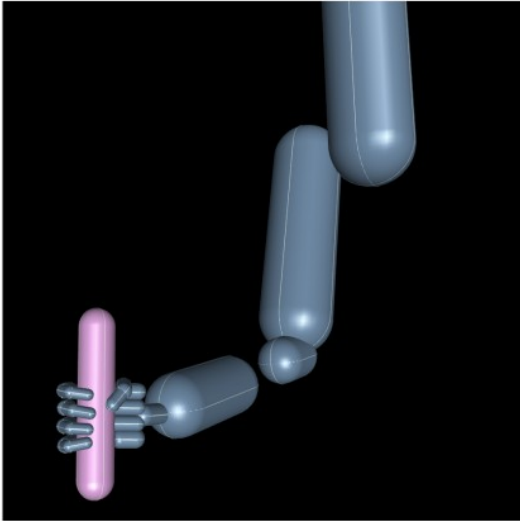


Simbody: Multibody Physics API



¿Qué motor es mejor?

- Depende siempre de la aplicación

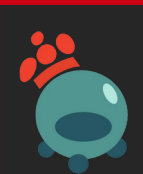


BONUS: Unity



- Un motor de videojuego multiplataforma creado por Unity Technologies.
- No es open source, aunque es friendly-community y permite obtener porciones de código como referencia.
- Usa PhysX de NVIDIA, como motor de físicas

<https://youtu.be/HTMDNZOIUq4?si=fdhi7W4vjjWToo-Y&t=16>



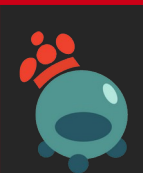
BONUS: Unreal



UNREAL
ENGINE

- Es un motor de videojuegos creado por la compañía Epic Games
- Aunque alegan que es open-source no permite la comercialización de productos usando su software al menos que obtengas una licencia.
- Motor de renderizado, de físicas, sistema de animación, sistema de IA, editor de mundos, red y multijugador.
- Usa PhysX de NVIDIA, como motor de físicas, y poco a poco migrando a Chaos

<https://www.youtube.com/watch?v=q4V9GYjA1pE>



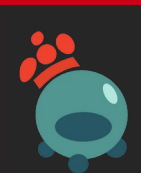
PhysX de NVIDIA



- Motor privativo de físicas creado por NVIDIA
- Diseñado para permitir interacciones realistas y simulaciones físicas en tiempo real dentro de videojuegos y aplicaciones con gráficos 3D.
- Simulación cuerpo rígido, fluidos, telas, dinámicas de vehículos, detección de colisiones, dinámica de partículas, multiplataforma y optimización para hardware NVIDIA.

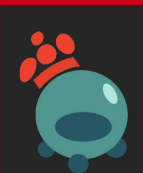
<https://www.youtube.com/watch?v=1o0Nuq71gl4>

<https://www.youtube.com/watch?v=K1rotbzekf0>



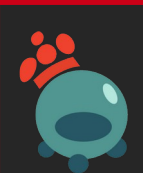
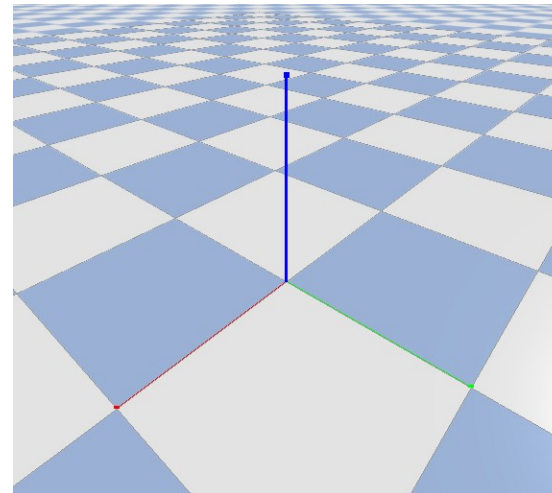
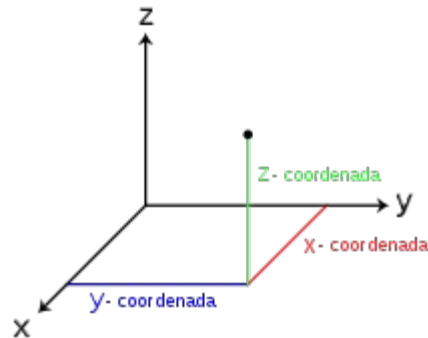
Motor de Físicas: Grados de libertad

- Tradicionalmente basados en el modelo cartesiano, que ofrece 6 grados de libertad, 6-DOF.
 - Traslación x,y,z
 - Rotación x,y,z
- Representación: Euler o Cuaterniones
- La mano humana tiene 27-DOF
 - 4 en cada dedo (3 para extensión 1 para separación)
 - El pulgar tiene 1 grado más según algunos estudios
 - 6 para la muñeca (rotación y traslación)



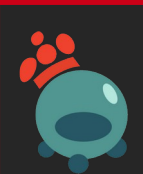
Traslación

- Sistema de referencia normalmente en un motor de físicas está definido por el modelo cartesiano en 3D.
- 3 ejes ortogonales que se cortan en el origen
- La posición (traslación) viene definida por las proyecciones del vector de posición del punto sobre cada uno de los ejes, notación (x,y,z)



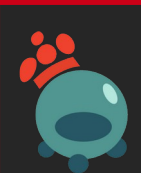
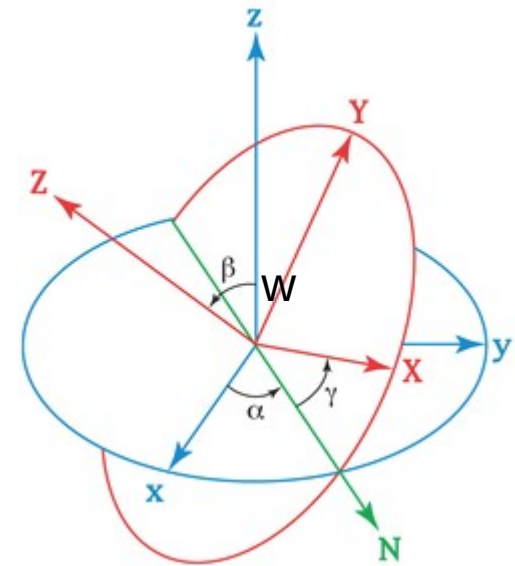
Orientación / Rotación

- Los objetos en 3D tiene una orientación y rotación:
 - Orientación: Una orientación de un objeto en el espacio es cada una de las posibles elecciones para colocarlo sin cambiar un punto fijo de referencia.
 - Rotación: es el movimiento de cambio de orientación de un cuerpo o un sistema de referencia de forma que una línea (eje de rotación) permanece fijo.
- Orientación/Rotación se pueden definir de 3 maneras:
 - Ángulos de Euler
 - Cuaterniones
 - Matrices

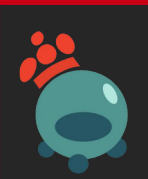
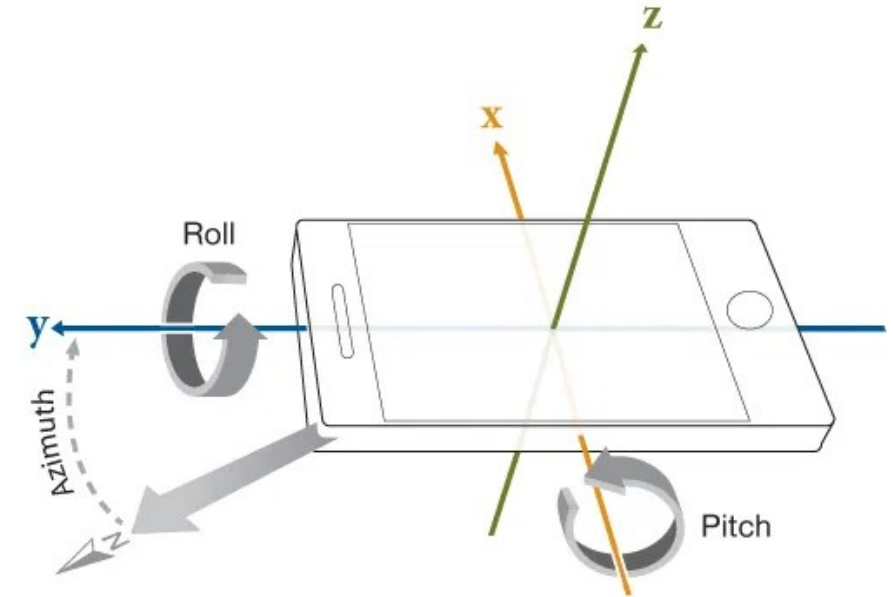
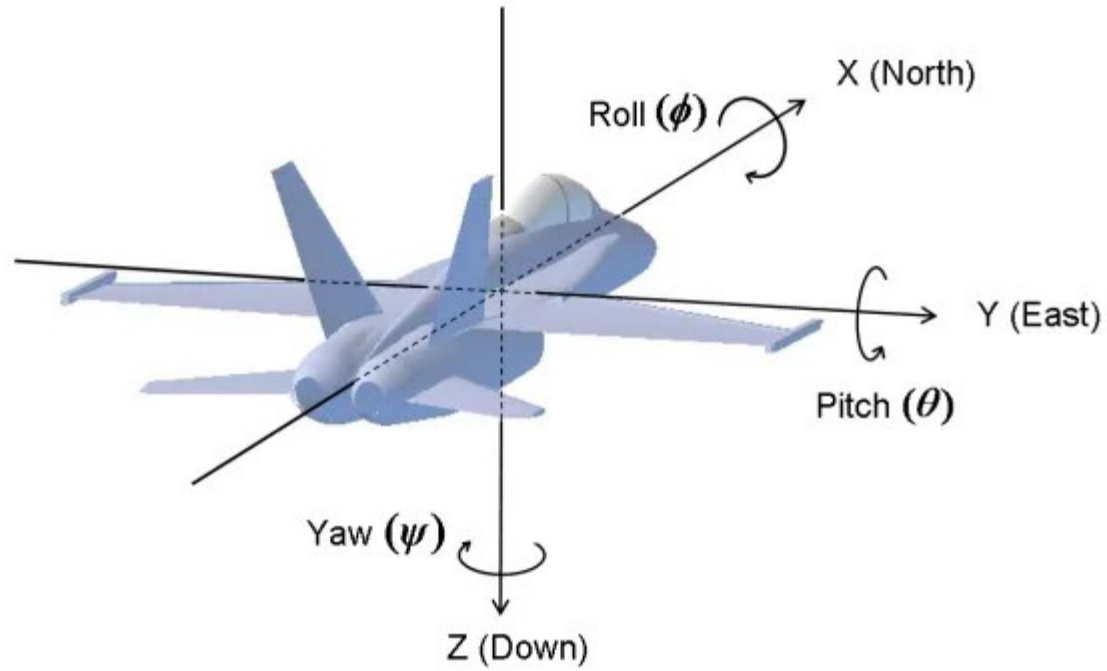


Ángulos de Euler

- Constituyen un conjunto de tres coordenadas angulares (α, β, γ) que sirven para especificar la orientación de un sistema de referencia de ejes ortogonales (móvil) respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales (fijos).
- Fueron introducidos por Leonhard Euler
 - en mecánica del sólido rígido para describir la orientación de un sistema de referencia solidario con un sólido rígido en movimiento.
- Los mediremos siempre en radianes.

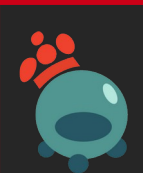


Ángulos de Euler



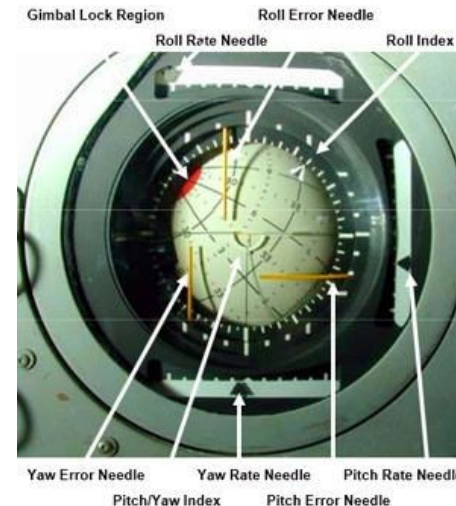
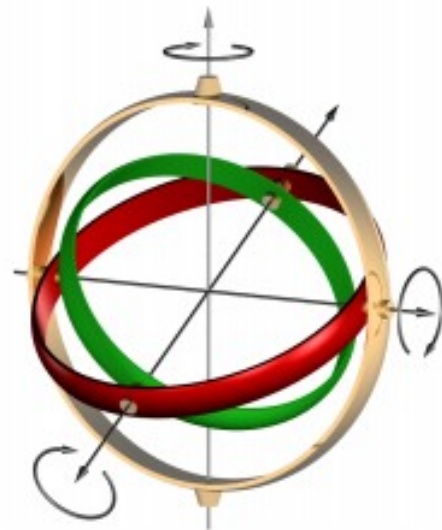
Ángulos Euler

- Problema del Bloqueo de Cardán (Gimbal lock)
- Es la pérdida de un grado de libertad en un espacio 3D, que ocurre cuando 2 de los 3 gimbals están alineados en paralelo, generando un espacio de movimiento en 2D.
 - <https://www.youtube.com/watch?v=zc8b2Jo7mno>
- En Robótica, gimbal lock ocurre normalmente en brazos robóticos dotados de "triple-roll wrist"



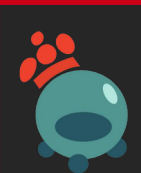
Ángulos Euler

- En Aeronáutica, un conjunto de “gimbals” son usados como unidad de medida de inercial ó “*inertial measurement unit*” (IMU).
- IMU es básicamente un giroscopio dentro del Gimbal
- El Apolo 11 tuvo un problema de Gimbal Lock, y tuvo que pasar a control manual en su viaje a la Luna.



Cuaterniones

- Los **cuaterniones** proporcionan una notación matemática (extensión de los números complejos) para representar las orientaciones y las rotaciones de objetos en tres dimensiones.
- Comparados con los ángulos de Euler, son más simples de componer y evitan el problema del bloqueo del cardán. Pero no son tan intuitivos
- Los **cuaterniones** son útiles en aplicaciones de gráficos por ordenador, robótica, navegación y mecánica orbital de satélites.



Cuaterniones

- Un cuaternión viene definido por:

$$q = w + xi + yj + zk$$

- Dados unos ángulos euler que definen la rotación

$$\text{roll}(\alpha), \text{pitch}(\beta) \text{ y } \text{yaw}(\gamma)$$

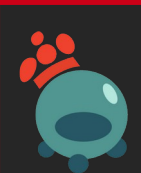
- El cuaternión se calcula:

$$w = \cos(\alpha/2) \cos(\beta/2) \cos(\gamma/2) + \sin(\alpha/2) \sin(\beta/2) \sin(\gamma/2)$$

$$x = \sin(\alpha/2) \cos(\beta/2) \cos(\gamma/2) - \cos(\alpha/2) \sin(\beta/2) \sin(\gamma/2)$$

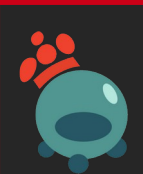
$$y = \cos(\alpha/2) \sin(\beta/2) \cos(\gamma/2) + \sin(\alpha/2) \cos(\beta/2) \sin(\gamma/2)$$

$$z = \cos(\alpha/2) \cos(\beta/2) \sin(\gamma/2) - \sin(\alpha/2) \sin(\beta/2) \cos(\gamma/2)$$



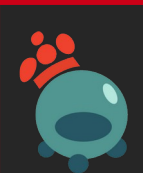
Fuerzas sobre Objetos

- Gravedad
- Aceleración
- Momento de Fuerza o Torque
- Fricción



Gravedad

- La fuerza más común y necesaria de simular.
- La gravedad causa una aceleración en los objetos hacia el centro de la tierra.
- Gravedad en la tierra es 9.8 m/s^2
 - Suele utilizarse 10 como simplificación para optimizar operaciones.
- La aceleración de la gravedad varía con la altitud, aunque es despreciable para las simulaciones.



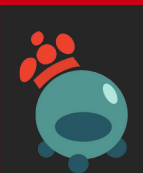
Gravedad

- La aceleración debida a la gravedad no depende de la forma o peso del objeto.
- Efecto de la gravedad no depende de la altura desde donde se lanza un objeto.

Entonces ...

¿Qué caerá antes al suelo,
una pluma o una bola de acero de 100 kg?

Video



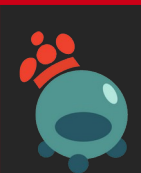
Aceleración

- La aceleración es una magnitud física vectorial que nos indica la variación de velocidad por unidad de tiempo.
- La aceleración de un cuerpo es proporcional a la fuerza que actúa sobre él:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad \rightarrow \quad \mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}$$

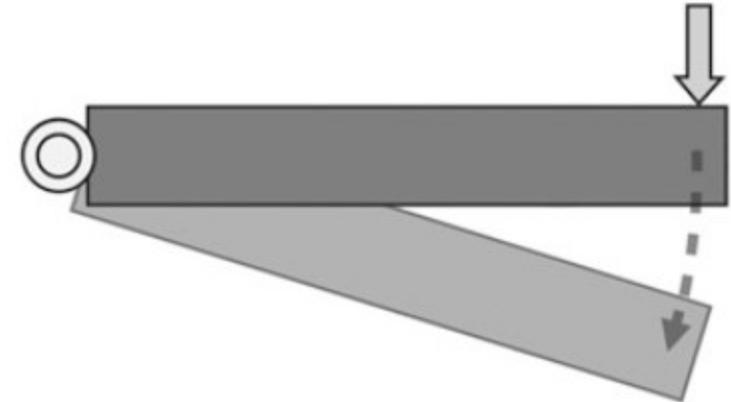
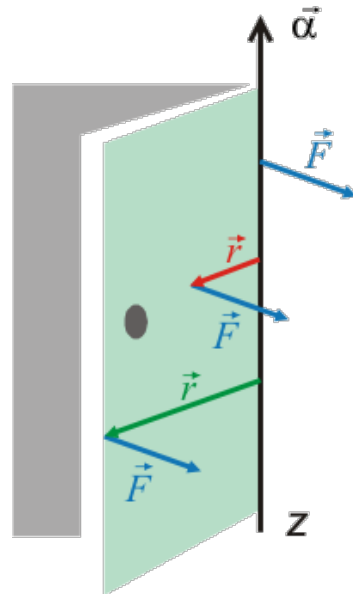
- La aceleración media

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$$



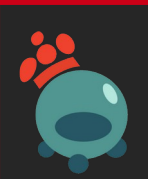
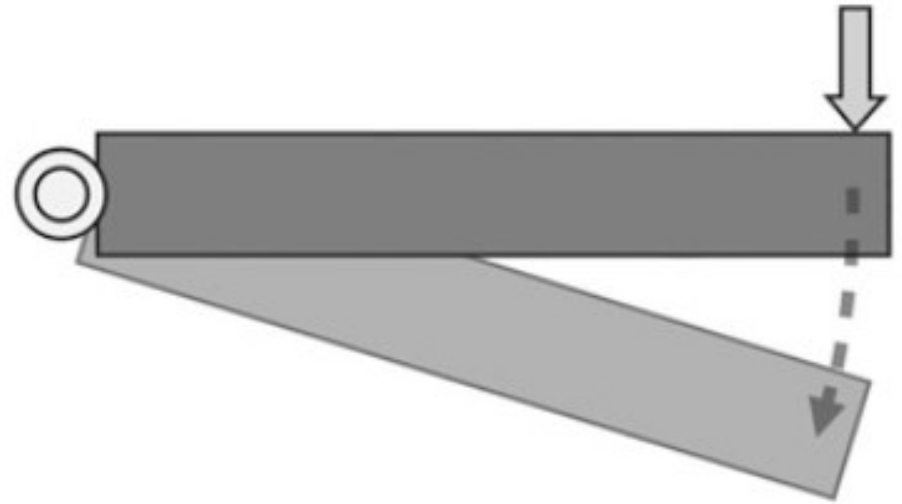
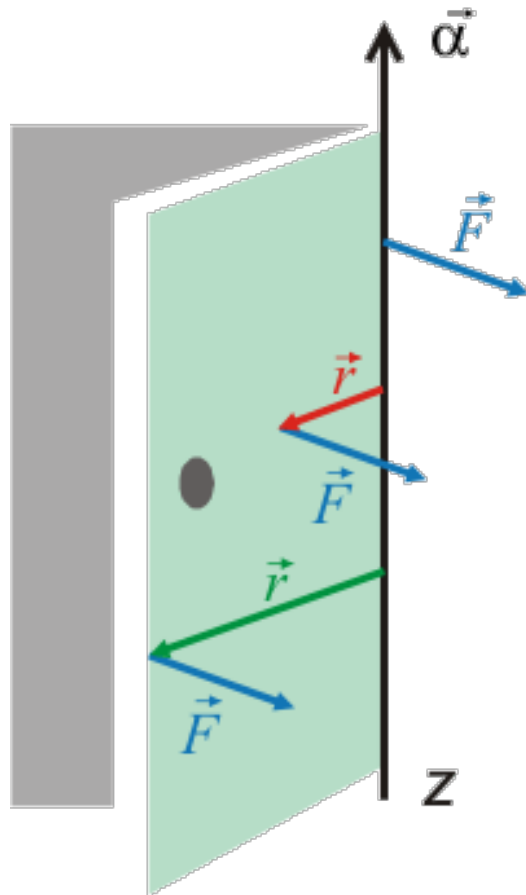
Momento de Fuerza o Torque

- El momento de fuerza, '*momentum*' o '*torque*' es una pseudo magnitud vectorial que se genera cuando al aplicar una fuerza sobre un objeto, éste realiza una rotación sobre alguno de sus ejes.
- Torque es el resultado de fuerzas, pero no es considerada una fuerza como tal.



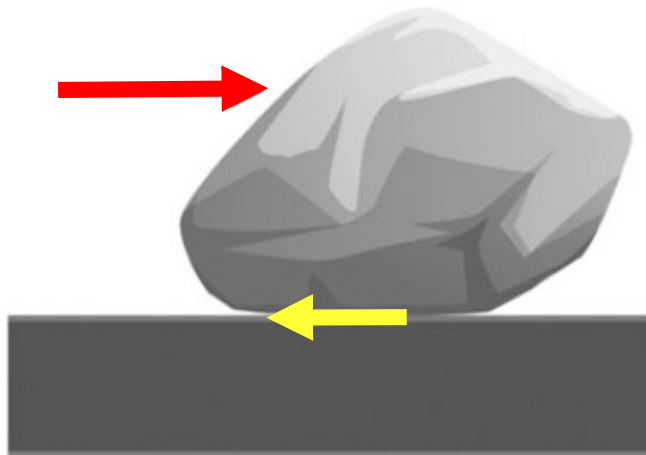
Momento de Fuerza o Torque

- $T = \vec{r} \times \vec{F}$



Fricción

- La fuerza de fricción es la fuerza que existe entre dos superficies en contacto, que se opone al deslizamiento
- La fuerza de rozamiento tiene dirección paralela a la superficie de apoyo.
- El coeficiente de rozamiento depende exclusivamente de la naturaleza de los cuerpos en contacto

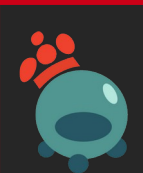


Fricción

- Existen dos tipos de rozamiento o fricción, la fricción estática (F_e) y la fricción dinámica (F_d).
 - El primero es la resistencia que se debe superar para poner en movimiento un cuerpo con respecto a otro que se encuentra en contacto.
 - El segundo, es la resistencia, de magnitud considerada constante, que se opone al movimiento pero una vez que este ya comenzó
- Se utiliza el modelo de Coulomb para calcular las fuerzas.

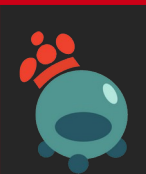


Fricción Estática
Fricción Dinámica



Bibliografía

- Paper: Simulation Tools for Model-Based Robotics: Comparison of Bullet, Havok, MuJoCo, ODE and PhysX
 - Tom Erez, Yuval Tassa and Emanuel Todorov.
- Las Leyes de movimiento de Newton
 - https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Newton
- Quaternions and spatial rotation
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Quaternions_and_spatial_rotation





Escuela de Ingeniería
de Fuenlabrada



RoboticsLabURJC
Programming Robot Intelligence

