

Como camina un humanoide

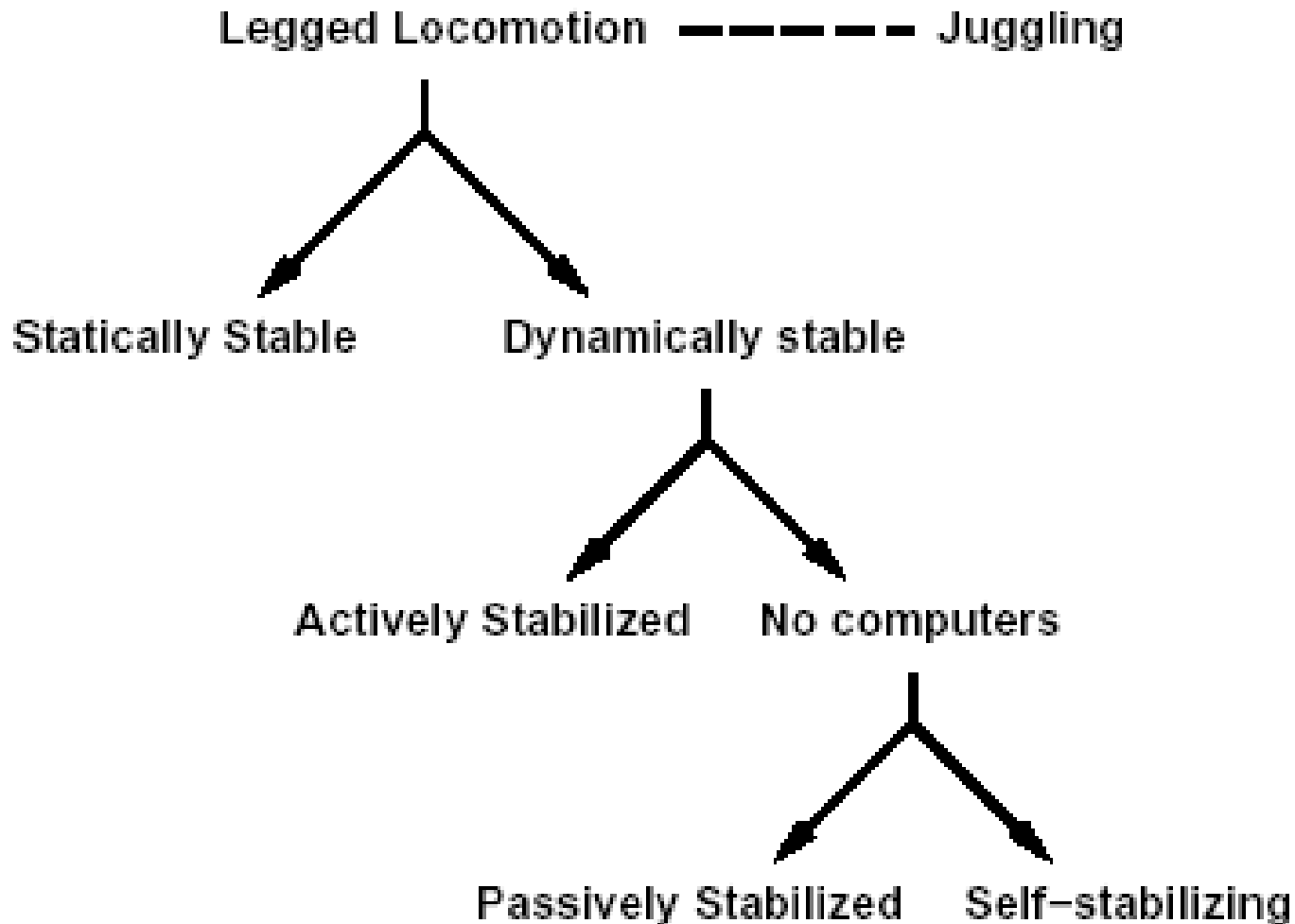
Dr. Alejandro Aceves

Seminario del Proyecto de
Investigación en robótica Humanoide

Objetivo

- Al finalizar, el participante conocerá los conceptos fundamentales para lograr que un robot humanoide pueda caminar manteniendo el equilibrio.
- Conocerá la diferencia entre equilibrio estáticamente estable y equilibrio dinámicamente estable para lograr que un robot humanoide camine.

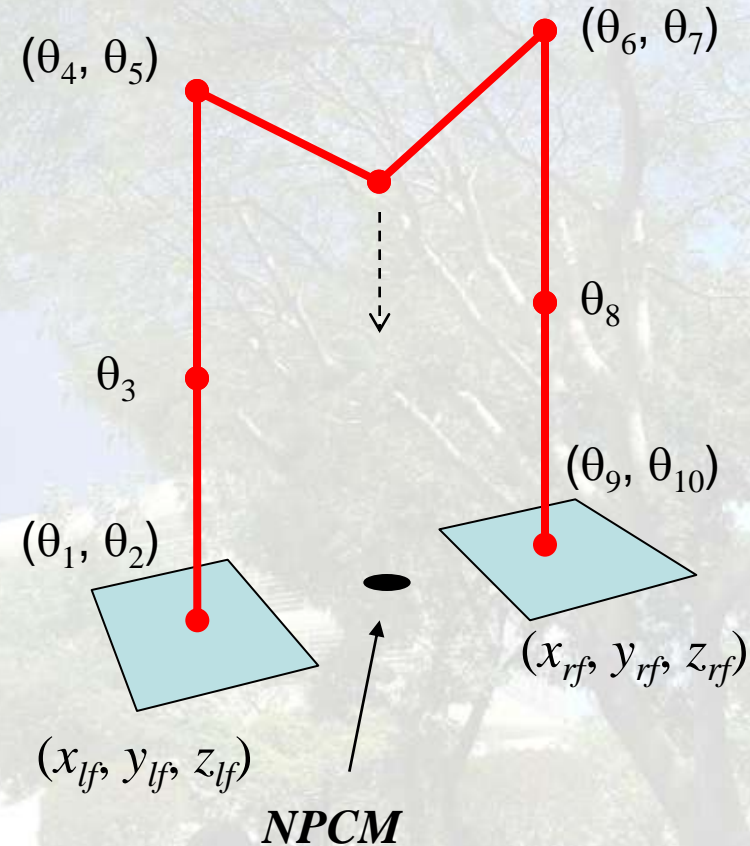
Tipos de caminatas



Estáticamente estable

El caminado **estáticamente estable** hacia adelante de un bípedo se puede lograr separando dos movimientos: balanceo y avance.

Si el robot camina rápido, su inercia podría ocasionar que la PNCM se mueva muy cerca del borde del polígono de soporte ocasionando que el robot se caiga.



Estáticamente estable

- Polígono de soporte:
 - Área (superficie poligonal) de contacto de los puntos de apoyo con el suelo.
 - Brinda una base de sustento.
 - Influye para mantener una posición equilibrada.



Estáticamente Estable

Caminado estáticamente estable:

- Movimientos suficientemente lentos para poder despreciar los efectos de la inercia.
- Cada postura del robot debe ser *estáticamente balanceada* (La PNM sobre el piso se encuentra dentro del polígono de soporte).
- Un *caminado estáticamente estable* se puede lograr interpolando algunas posturas estáticamente balanceadas y enviando las señales resultantes a los motores del robot.
- Si el robot camina rápido, su inercia podría ocasionar que la PNCM se mueva muy cerca del borde del polígono de soporte ocasionando que el robot se caiga.

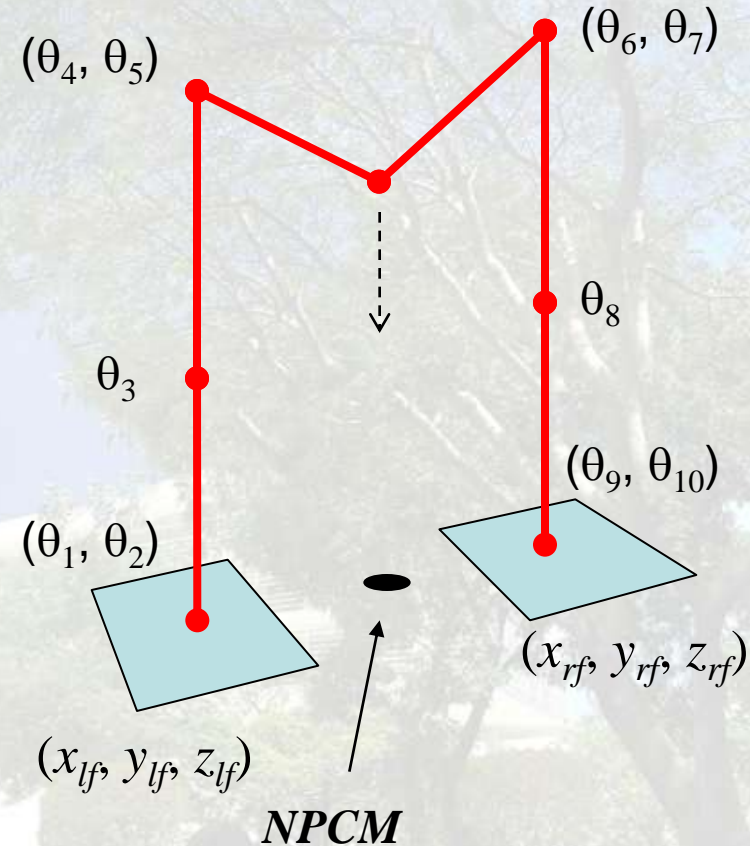
S. Kajita and K. Tani. "Adaptive Gait Control of a Biped Robot based on Real-time Sensing of the Ground Profile"; In Proc. of IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (1996), pp. 570-577.

Estáticamente estable

El caminado hacia adelante de un bípedo se puede lograr separando dos movimientos: balanceo y avance.

Balancear el CdG de un bípedo necesitará de las articulaciones (θ_2, θ_5) y (θ_7, θ_{10}) , mientras que el avance requiere de (θ_3, θ_4) y (θ_6, θ_8)

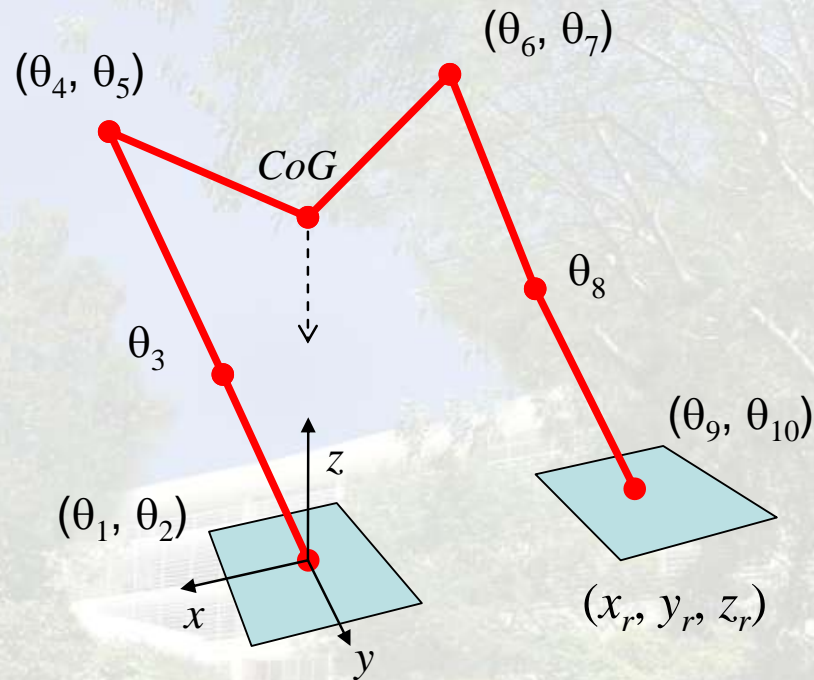
Nótese que las articulaciones θ_1 y θ_9 serán elegidas para que el pie viaje siempre paralelo al piso



Estáticamente estable

Balancear el peso

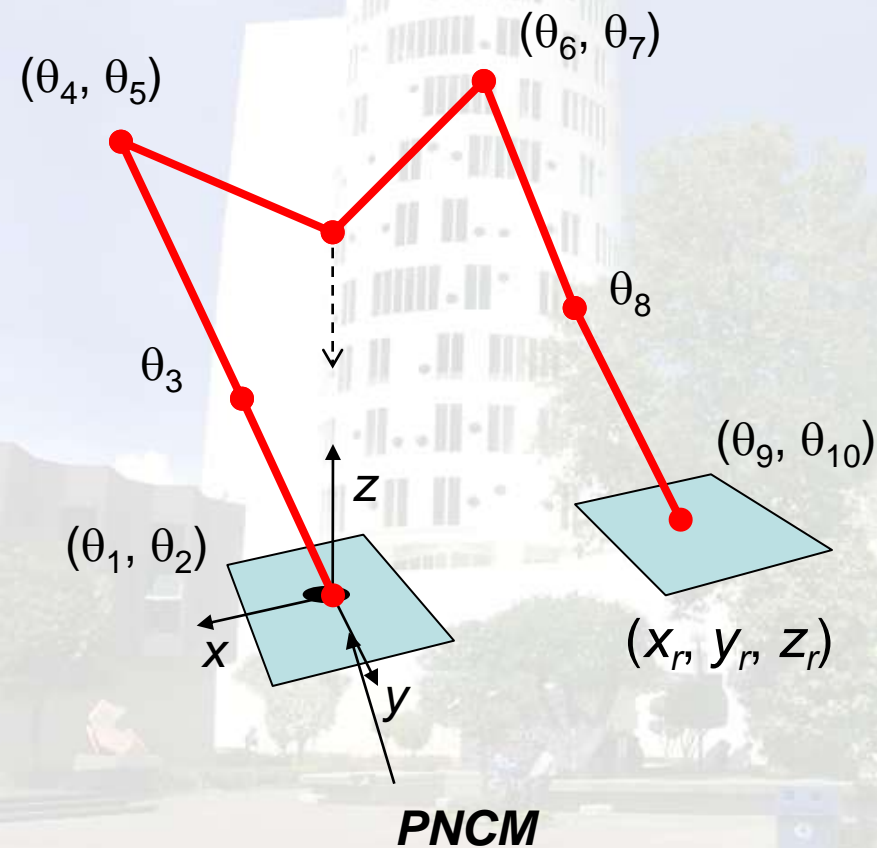
$$CoG_x = \frac{\sum_{i=1}^5 m_i x_i}{\sum_{i=1}^5 x_i} = 0$$



$$\theta_2 = -\theta_5 = -19.47^\circ$$

Situación equivalente con la pata izquierda.

Estáticamente estable



Resolver:

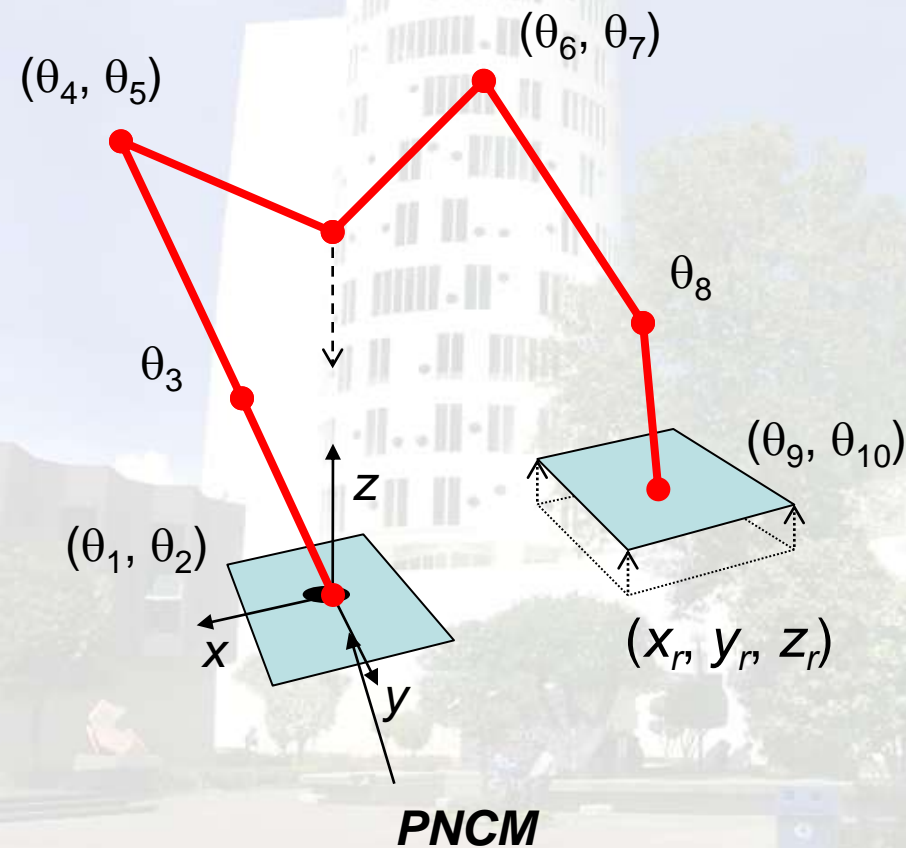
$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{10} \end{bmatrix} = f^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} \right)$$

imponiendo:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{cm} \end{bmatrix} = g \left(\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{10} \end{bmatrix} \right)$$

Cada postura es estáticamente estable !

Estáticamente estable



Resolver:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{10} \end{bmatrix} = f^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} \right)$$

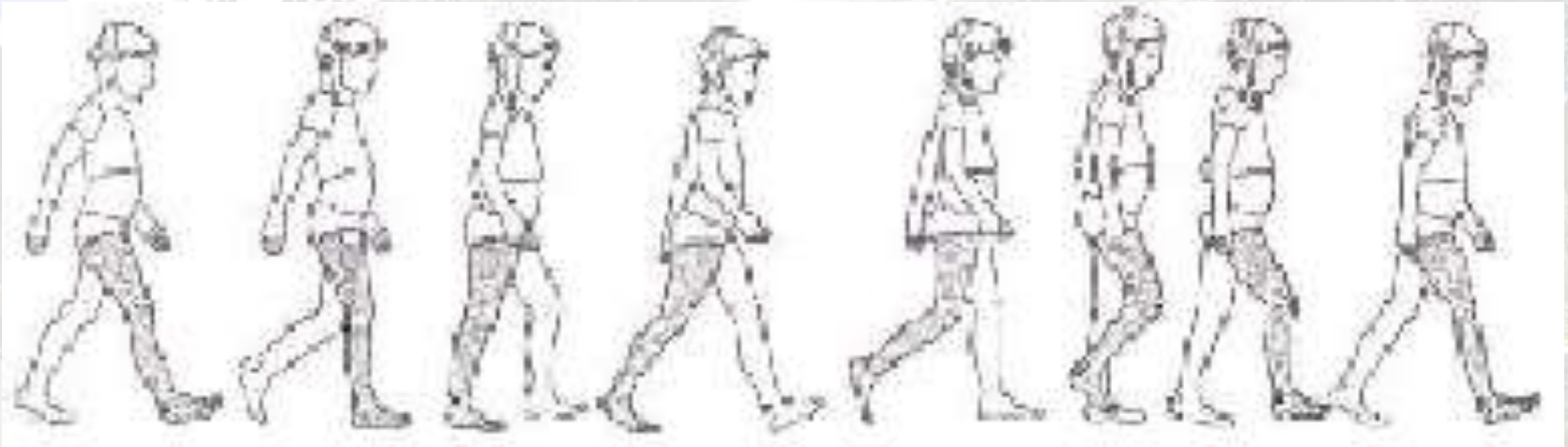
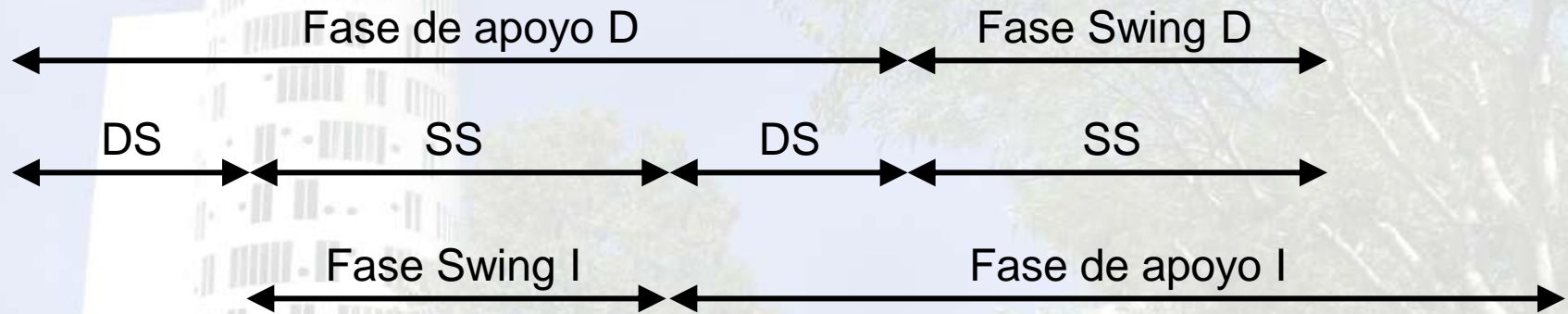
imponiendo:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{cm} \end{bmatrix} = g \left(\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{10} \end{bmatrix} \right)$$

Cada postura es estáticamente estable !

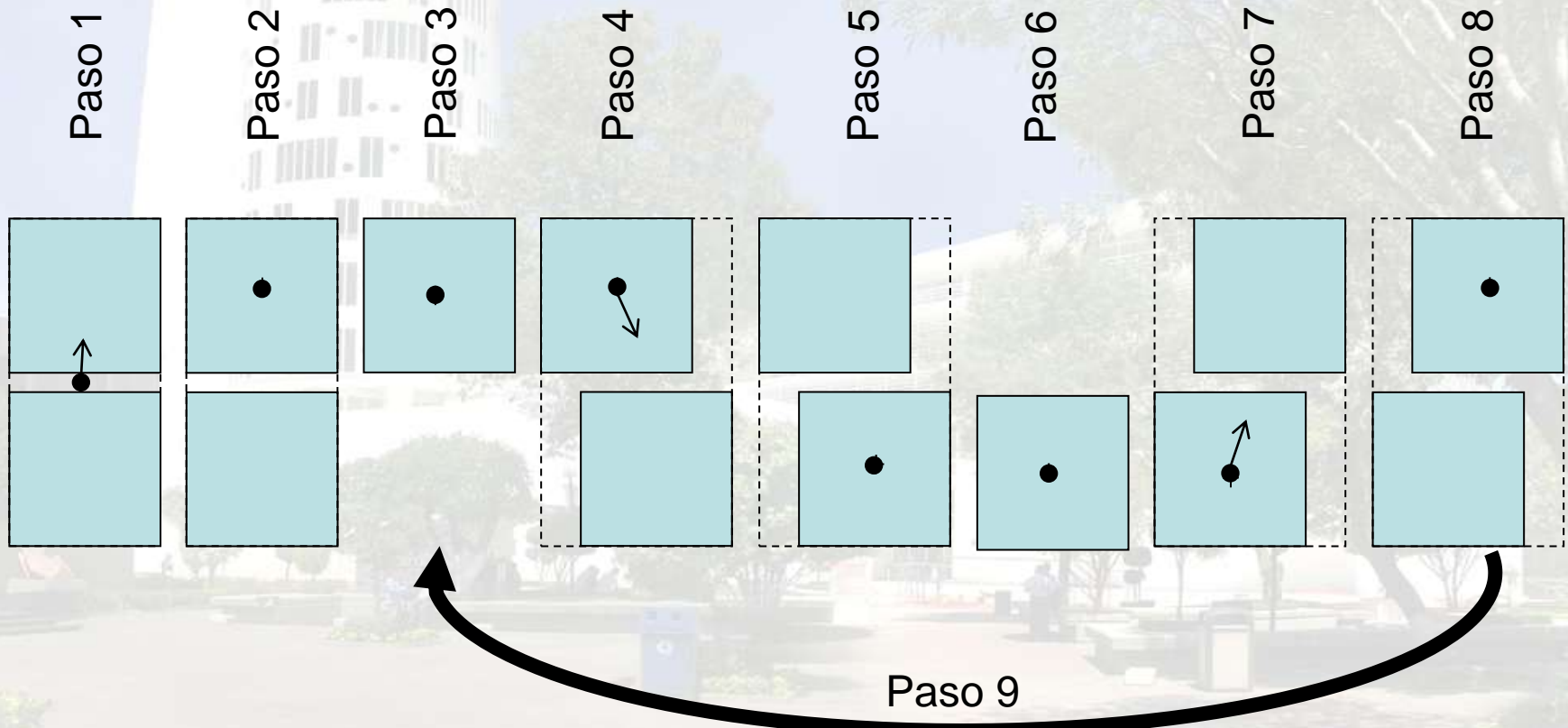
Estáticamente estable

Como caminamos: ciclo de la marcha



Estáticamente estable

La interpolación de posturas estáticamente estables resulta en un caminado estáticamente estable.

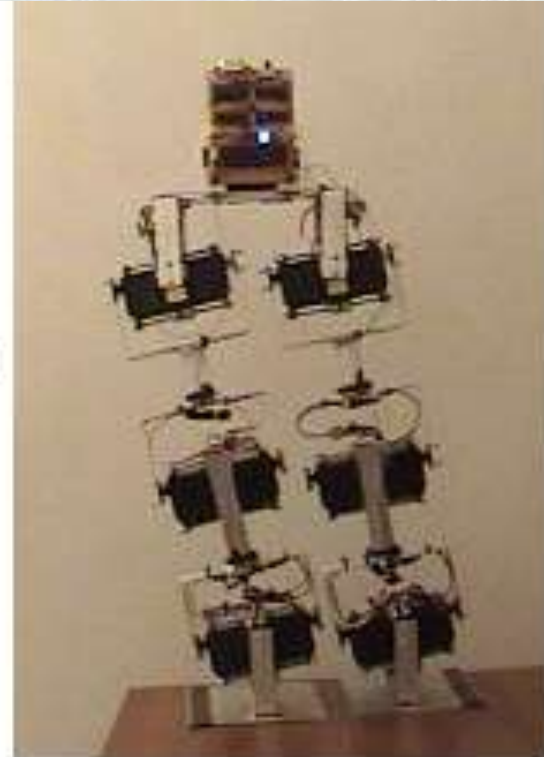


Estáticamente estable

Resolver todos los
IK-problemas

Mandas las
soluciones de
todas las posturas

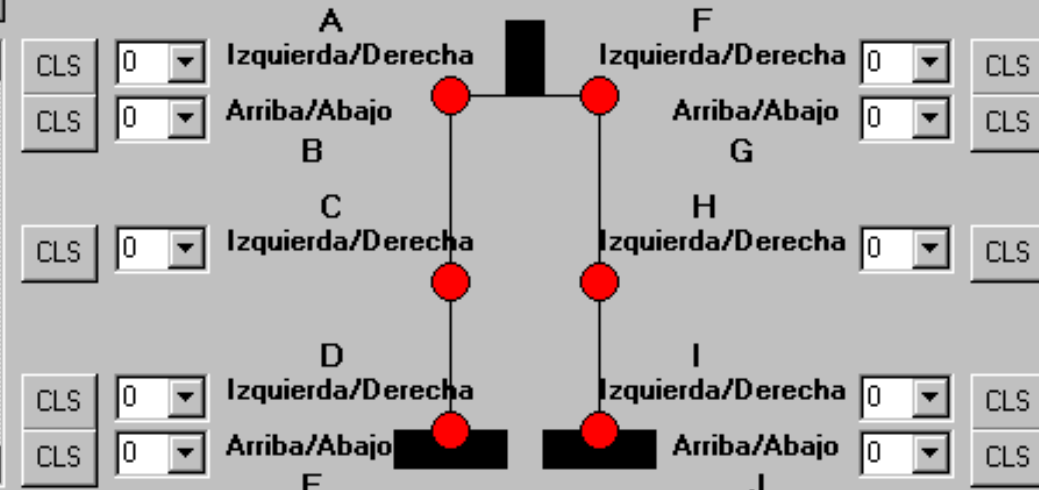
Interpolación en
tiempo real



Estáticamente estable

Reset Total (90°)

Posiciones Del Robot



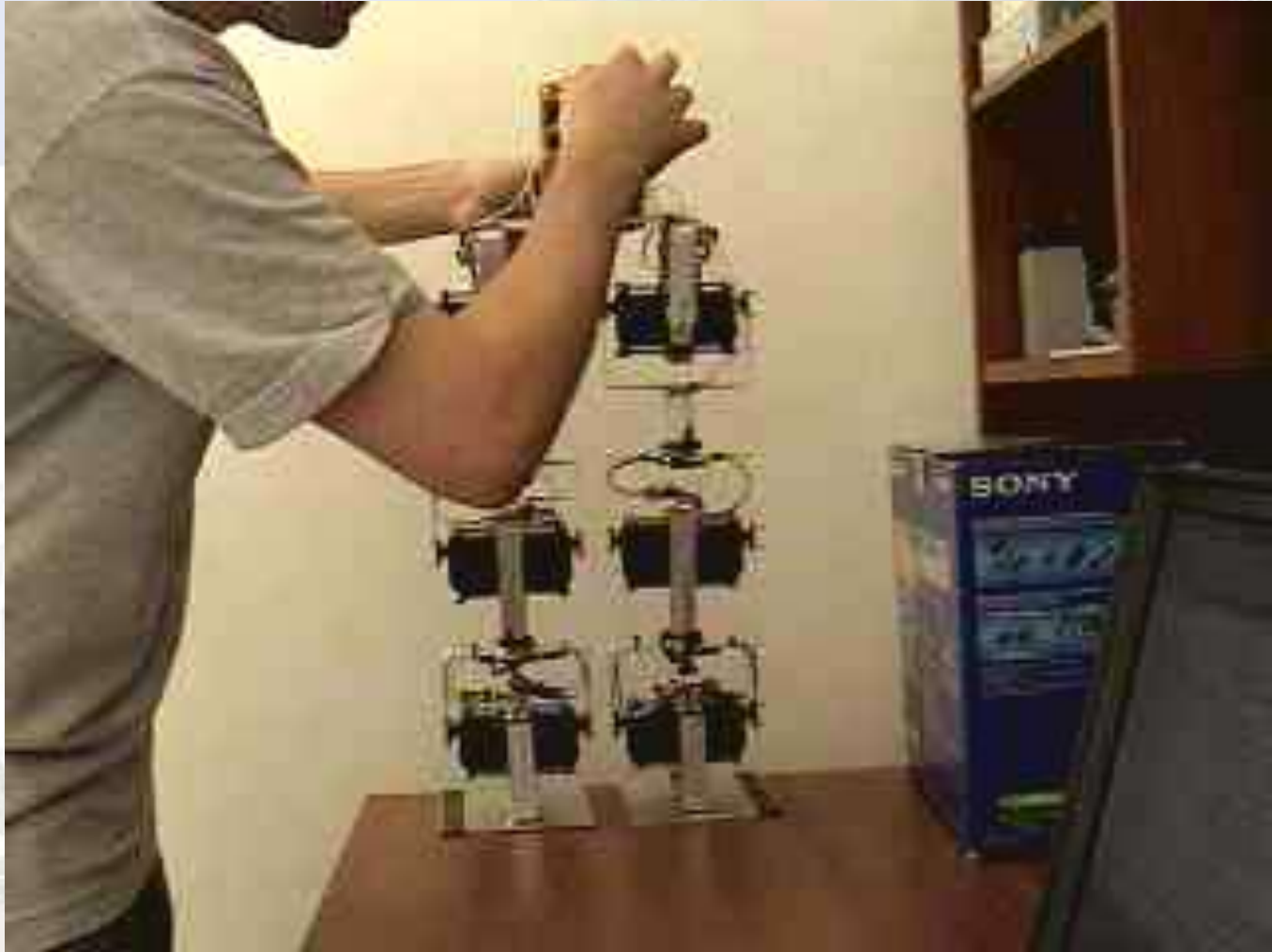
A Izquierda/Derecha 0 CLS F Izquierda/Derecha 0 CLS
 Arriba/Abajo 0 CLS Arriba/Abajo 0 CLS
 B G
 C Izquierda/Derecha 0 CLS H Izquierda/Derecha 0 CLS
 D Izquierda/Derecha 0 CLS I Izquierda/Derecha 0 CLS
 Arriba/Abajo 0 CLS Arriba/Abajo 0 CLS
 E J

Continuo.
 Por Tiempo 1 seg.

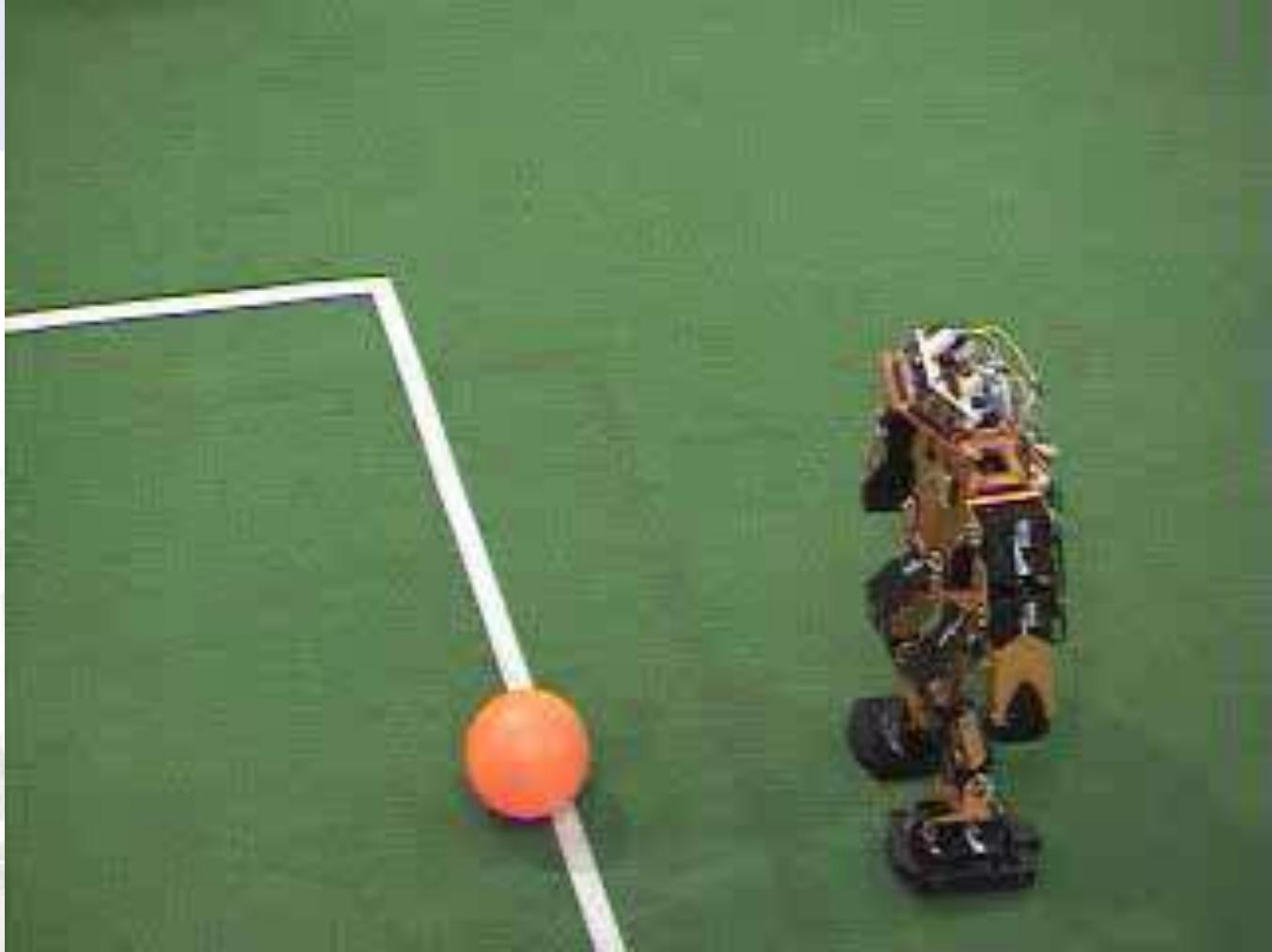
Puntos Almacenados

Consec.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J

Video

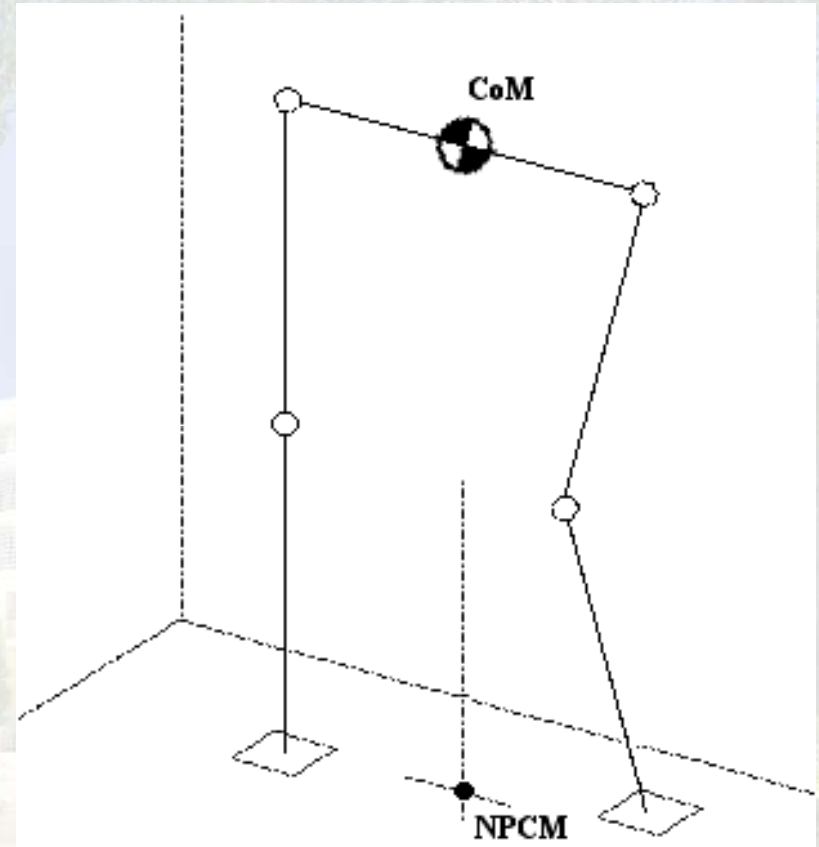


Video



CRITERIO DEL CAMINADO

- CoM y NPCM:
 - La forma en que interactúan las fuerzas con el CoM.
 - La ubicación del CoM se vuelve decisiva en el equilibrio.
 - La posición del CoM y las fuerzas presentes modifican a la NPCM.



CRITERIO DEL CAMINADO

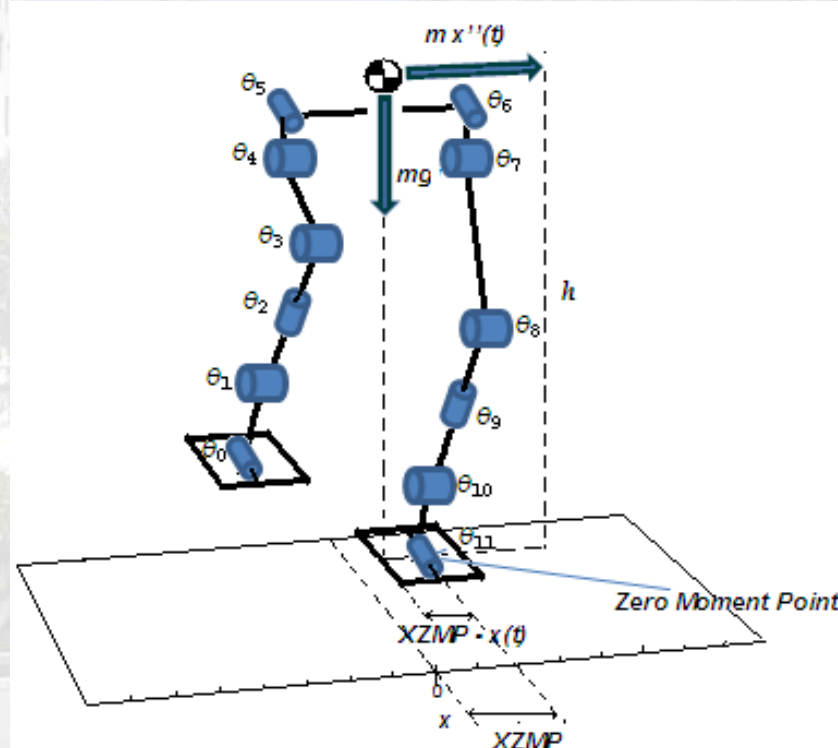
- Caminado Estáticamente estable:
 - Se asume que no existen fuerzas en CoM.
 - Estable si la NPCM se encuentra dentro del Polígono de Soporte (PS).
 - Los movimientos deben de ser lo lentos para no generar momentos inerciales:
 - Se alcanza una máxima velocidad baja.

CRITERIO DEL CAMINADO

- Caminado Dinámicamente estable:
 - Toma en cuenta las fuerzas que actúan sobre los puntos de soporte.
 - Son fuerzas derivadas de los momentos inerciales que afectan al CoM.
 - Hacer $NPCM \in PS$ no toma en cuenta estas fuerzas:
 - Un bípedo puede desequilibrarse y caer.
 - Aunque la NPCM esté dentro del patrón de soporte.
 - Posibilidad para una máxima velocidad alta.

Dinámicamente estable

La trayectoria en los ejes x y y del centro de masa proyectado en el suelo se calcula considerando que el Zero Moment Point* (**ZMP**) se encuentra en la planta del pie que permanece en el piso durante un paso.



Zero Moment Point

La ecuación que rige la condición del **ZMP** en el eje **x** es

$$m \cdot \ddot{x}(t) \cdot h + m \cdot g \cdot (x_{ZMP} - x(t)) = 0$$

cuya solución general es:

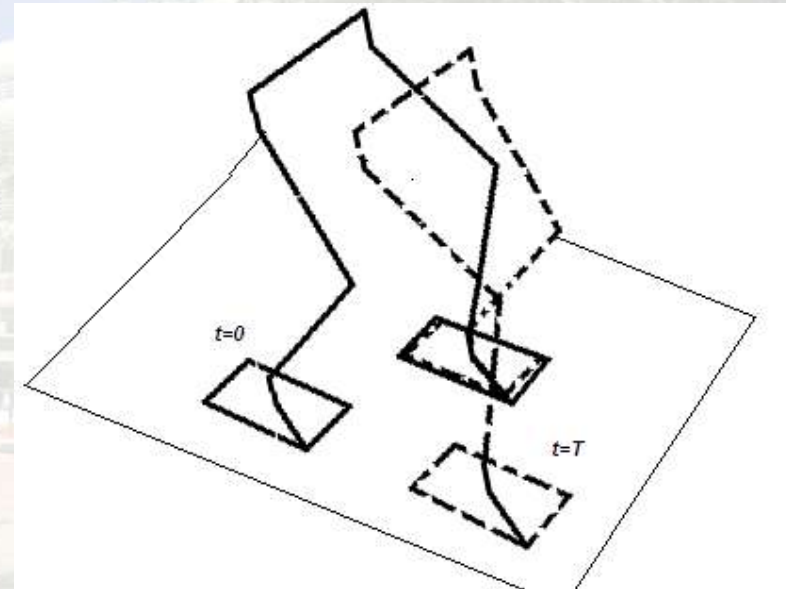
$$x(t) = K_1 e^{\sqrt{\frac{g}{2h}} t} + K_2 e^{-\sqrt{\frac{g}{2h}} t} + x_{ZMP}$$

Donde las condiciones de frontera son:

$$x(0) = 0$$

$$x(T) = 0$$

T es el período de caminado



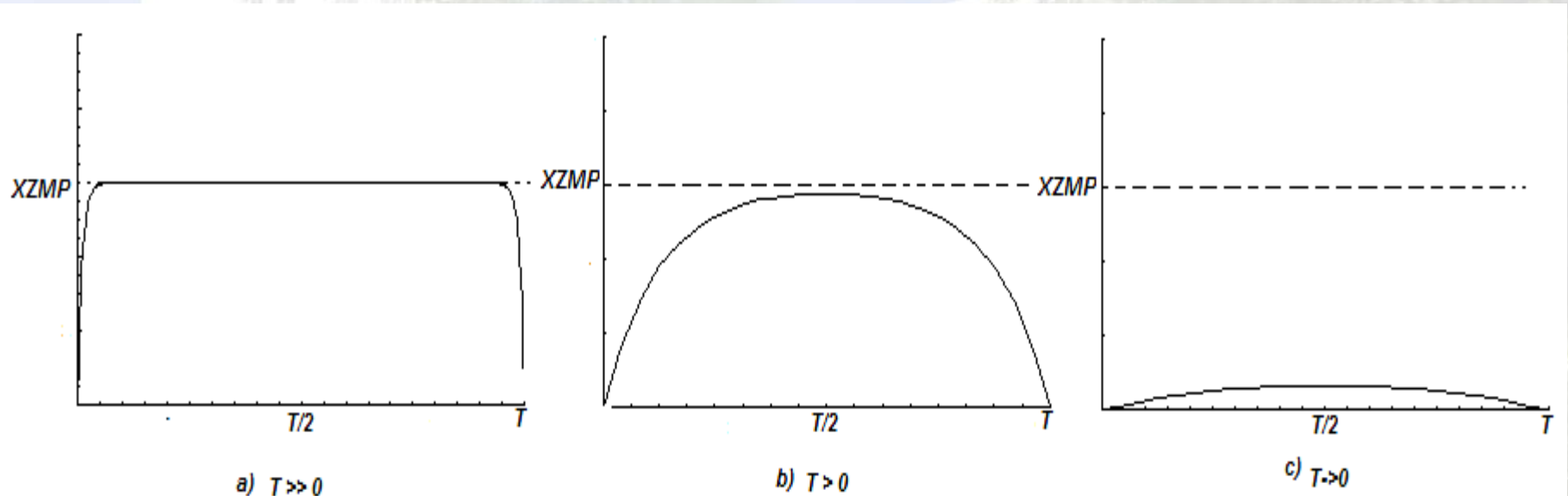
Zero Moment Point

De estas condiciones se obtiene el valor de las constantes:

$$K_1 = -\frac{X_{ZMP}}{1 + e^{\sqrt{\frac{g}{h}} T}}$$

$$K_2 = K_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{g}{h}} T}$$

La gráfica de la amplitud de balanceo (eje x) para diferentes valores de T (velocidad de caminado) es :



Zero Moment Point

El eje y está regido por la misma condición de ZMP. La ecuación diferencial de fuerzas es

$$m \cdot \ddot{y}(t) \cdot h + m \cdot g \cdot y(t) = 0$$

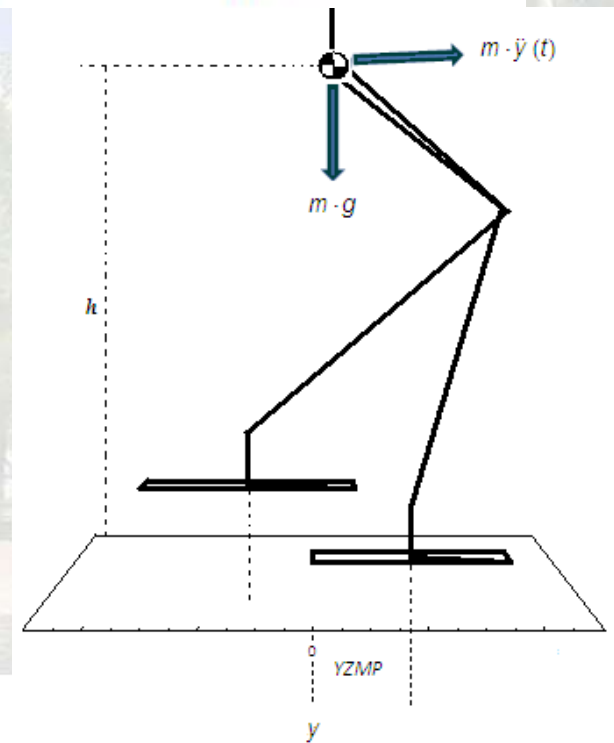
cuya solución general es:

$$y(t) = K_3 e^{\sqrt{\frac{g}{h}} t} + K_4 e^{-\sqrt{\frac{g}{h}} t}$$

Donde las condiciones de frontera son:

$$y(0) = -y_{ZMP}$$

$$y(T) = y_{ZMP}$$



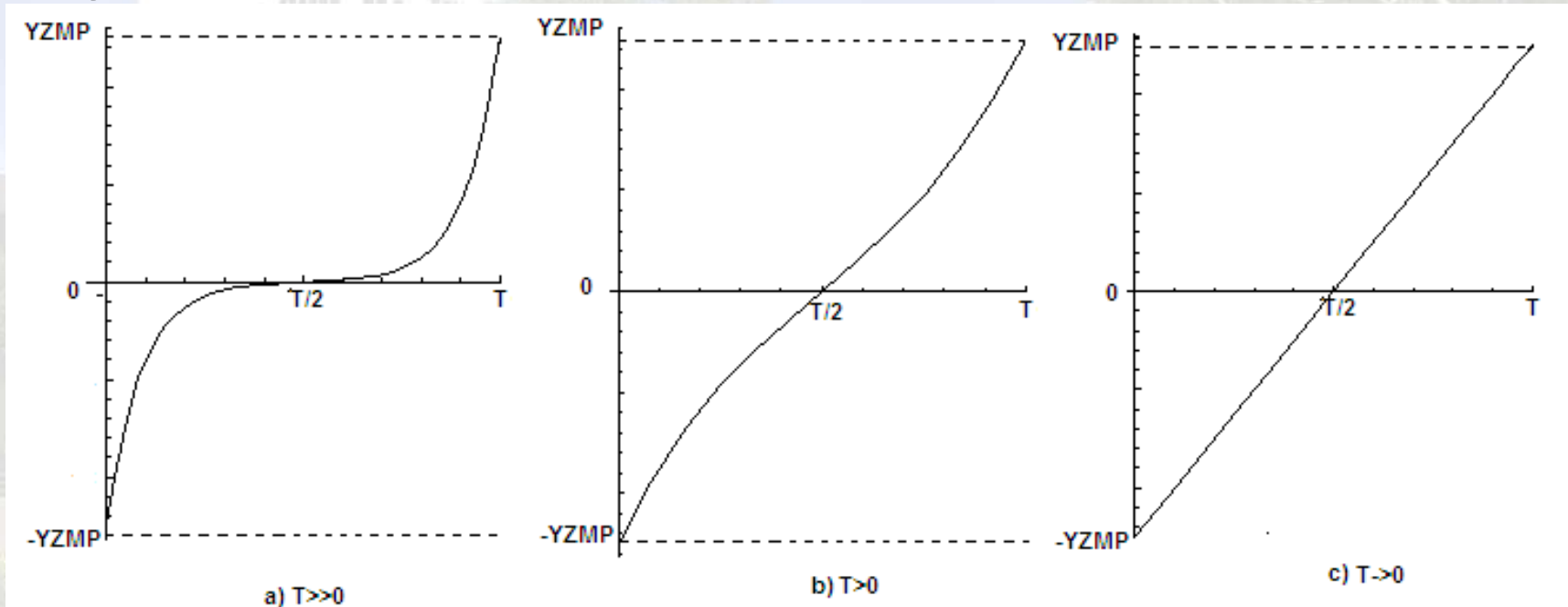
Zero Moment Point

De estas condiciones se obtiene el valor de las constantes:

$$K_3 = \frac{Y_{ZMP}}{-1 + e^{\sqrt{\frac{g}{h}} T}}$$

$$K_4 = -e^{\sqrt{\frac{g}{h}} T} K_3$$

La gráfica de la amplitud de desplazamiento en el eje y es:

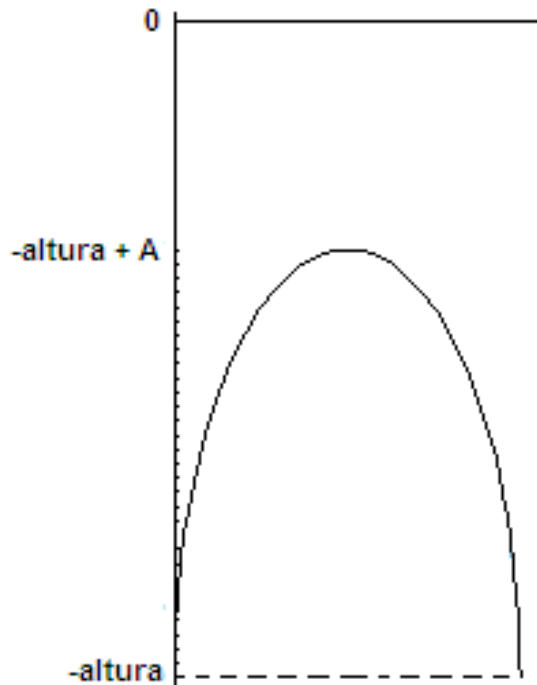


Zero Moment Point

El desplazamiento para el eje z fue elegido como:

$$z(t) = -\text{altura} + \sqrt{\left(1 - \frac{(t - T/2)^2}{(T/2)^2}\right)} A$$

La gráfica de la amplitud de desplazamiento en el eje z es:



Video

Caminado estáticamente estable (sin ZMP)



Caminado dinámicamente estable (con ZMP)



Referencias

- [1] S. Kajita and K. Tani. "Adaptive Gait Control of a Biped Robot based on Real-time Sensing of the Ground Profile"; In Proc. of IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (1996), pp. 570-577.
- [2] Serna&Aceves, " From mechatronic design to the construction of a statically stable biped robot ", 2do IEEE LARC and VII Simposio Brasileiro de Automatización Inteligente, Sao Luis-MA, Brazil, 18-23 September 2005,
- [3] Dirk Wollherr, "Design and Control Aspects of Humanoid Walking Robots", Doctoral thesis, Univ. Tokio Mars 2005.
- [4] M. Vukobratovic and B. Borovac, "Zero-moment point – thirty five years of its life," Int. J. of Humanoid Robotics.
- [5] Robert P Ringrose, Self-Stabilizing Running, Thesis doctoral, MIT, February 1996