



# ANIMACIÓN POR ORDENADOR

## Tema 5

---

Jerarquías. Técnicas de esqueleto.  
Cinemática directa e inversa. Rigging.  
Skinning. Deformaciones. Morphing.

---



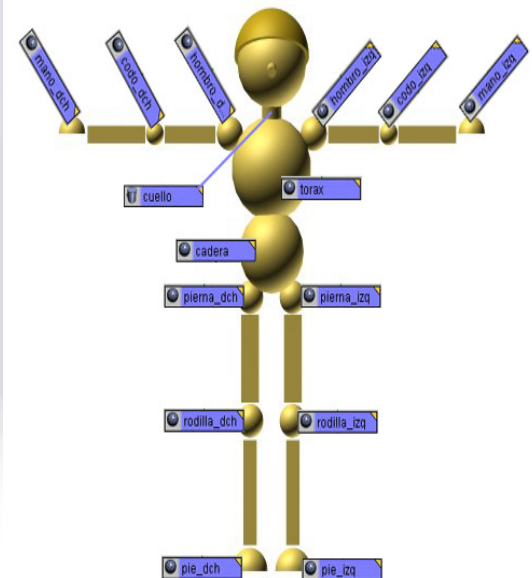
## CONTENIDO

1. Jerarquías.
2. Técnicas de esqueleto.
3. Cinemática directa e inversa.
4. Rigging.
5. Skinning.
6. Deformaciones.
7. Morphing.



## JERARQUÍAS

- La forma normal de construir un personaje es crear las partes por separado y, después, unir las estableciendo las dependencias necesarias entre ellas.
- El modelado individual de las partes facilita el proceso de construcción y el personaje resultará más fácil de animar.
- El principal problema es que un personaje construido a partir de segmentos muestra claramente las uniones entre ellos.
- Importante definir correctamente los puntos de unión de las partes, así como los puntos de rotación (normalmente el principal movimiento que realizan) de las mismas.





## JERARQUÍAS

- Una vez construidas las partes, debemos encontrar la manera de unir las para producir un ente con movilidad propia.
- Podemos realizar esa unión mediante una jerarquía, que muestre la forma en que están conectadas las partes entre si y que define las dependencias entre ellas.
- En un personaje con forma humana, la raíz de esa jerarquía es la cadera. Si se mueve, todo se mueve a la vez con ella.
- Para facilitar la animación del personaje, es muy normal utilizar la técnica del esqueleto o huesos.

Una vez definida correctamente la jerarquía, existen dos formas básicas de realizar la animación del personaje: ***Cinemática Directa y Cinemática Inversa.***



## MODELO JERÁRQUICO VS. MOVIMIENTO JERÁRQUICO

### Movimiento relativo

El movimiento de un objeto es relativo a otro objeto

Objeto jerárquico + movimiento relativo = movimiento jerárquico

- Enlaces

Componentes de la jerarquía representan objetos físicamente conectados

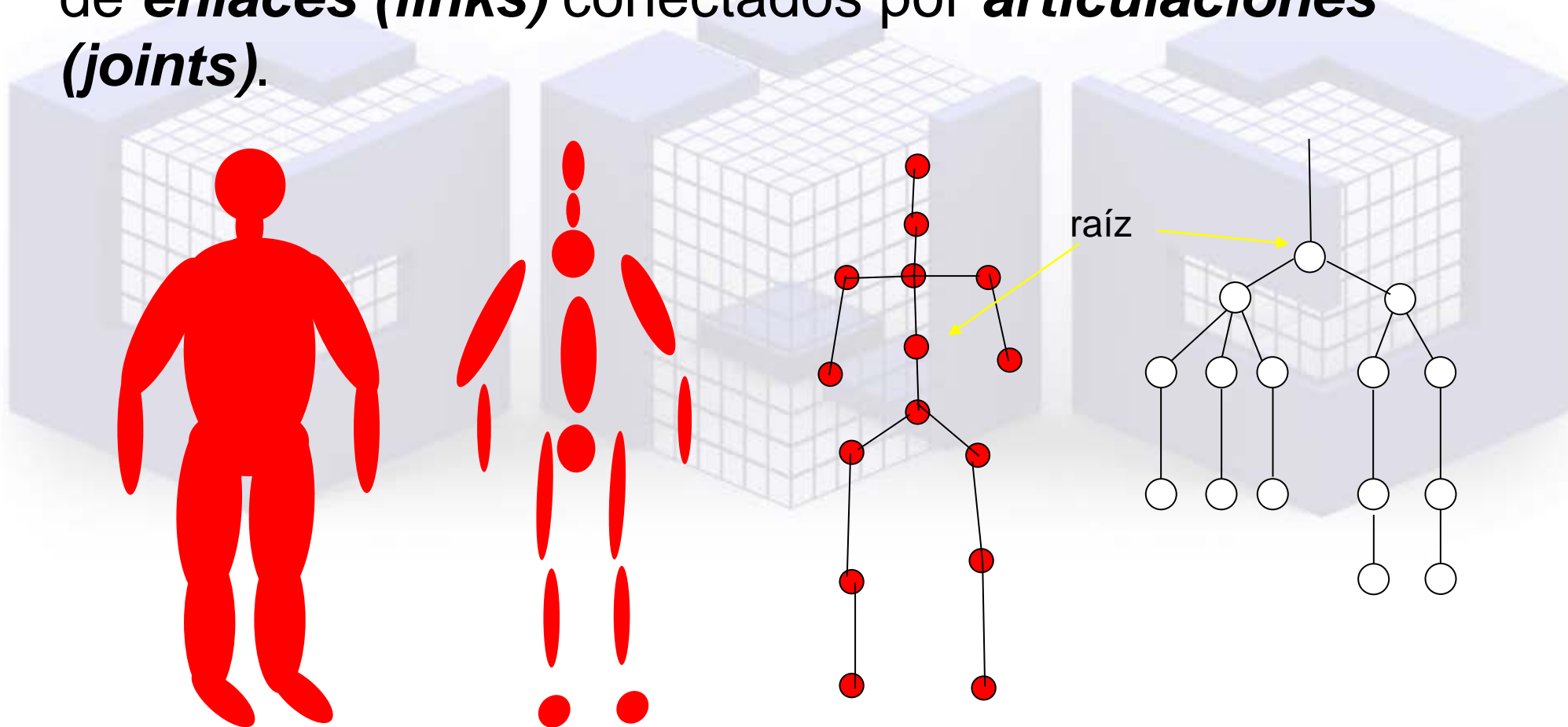
- La animación normalmente está limitada





## MODELOS JERÁRQUICOS: MODELOS ARTICULADOS

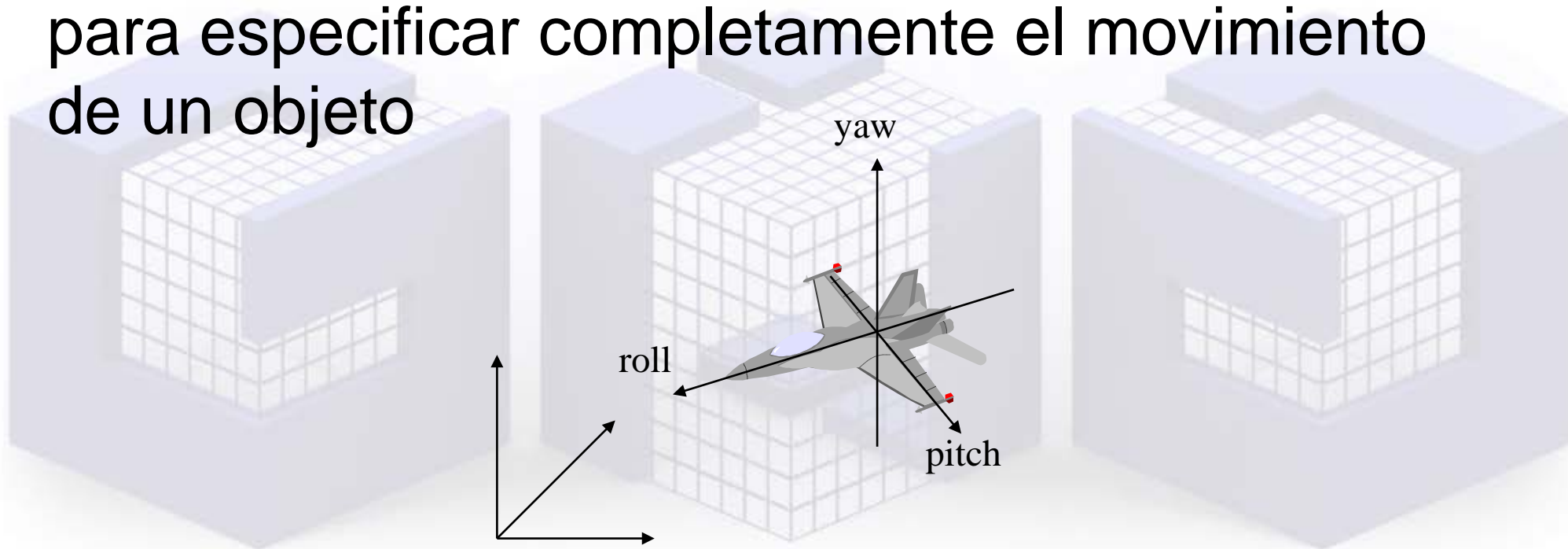
Representamos un modelo articulado como una serie de **enlaces** (*links*) conectados por **articulaciones** (*joints*).





## GRADOS DE LIBERTAD (DOF)

El mínimo número de coordenadas requeridas para especificar completamente el movimiento de un objeto



6 DOF: x, y, z, roll, pitch, yaw

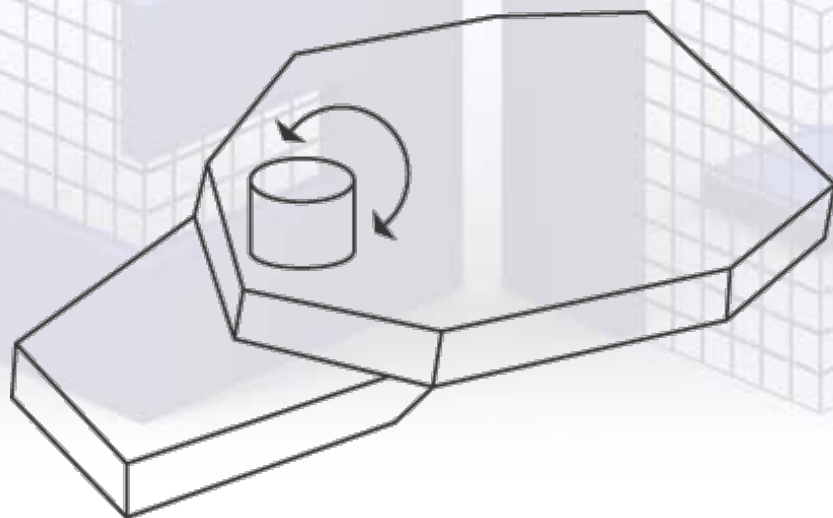


## GRADOS DE LIBERTAD: ARTICULACIÓN DE 1 GRADO

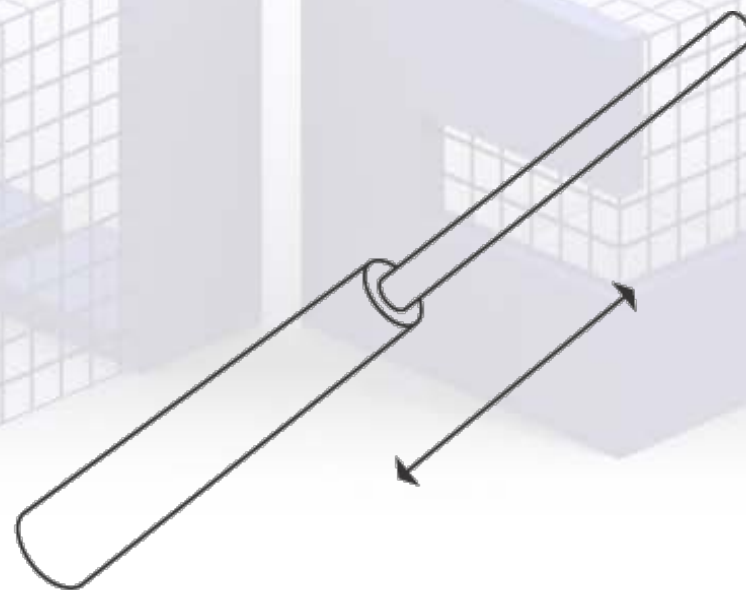
Articulación de un grado:

Permite movimientos en una dirección

Ejemplos: articulación giratoria (revolute joint), articulación deslizante (prismatic joint)



Revolute joint



Prismatic joint

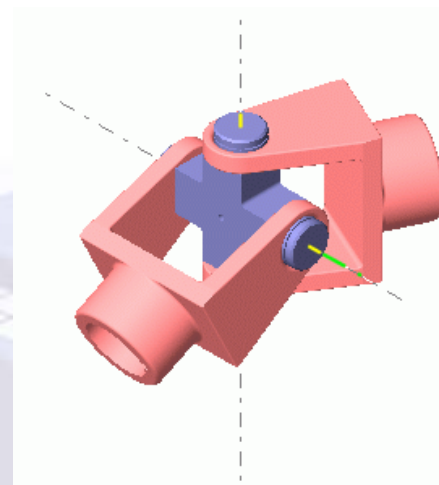


## GRADOS DE LIBERTAD: ARTICULACIÓN COMPLEJA

### Articulaciones complejas

- Articulaciones con 2 grados de libertad

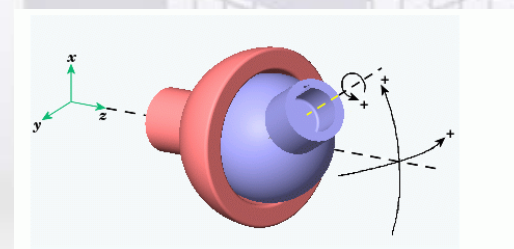
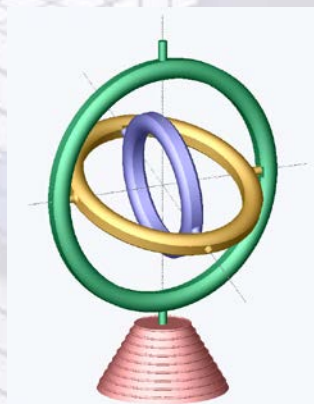
Articulaciones planas, articulaciones universales



- 3 grados de libertad

Gimbal

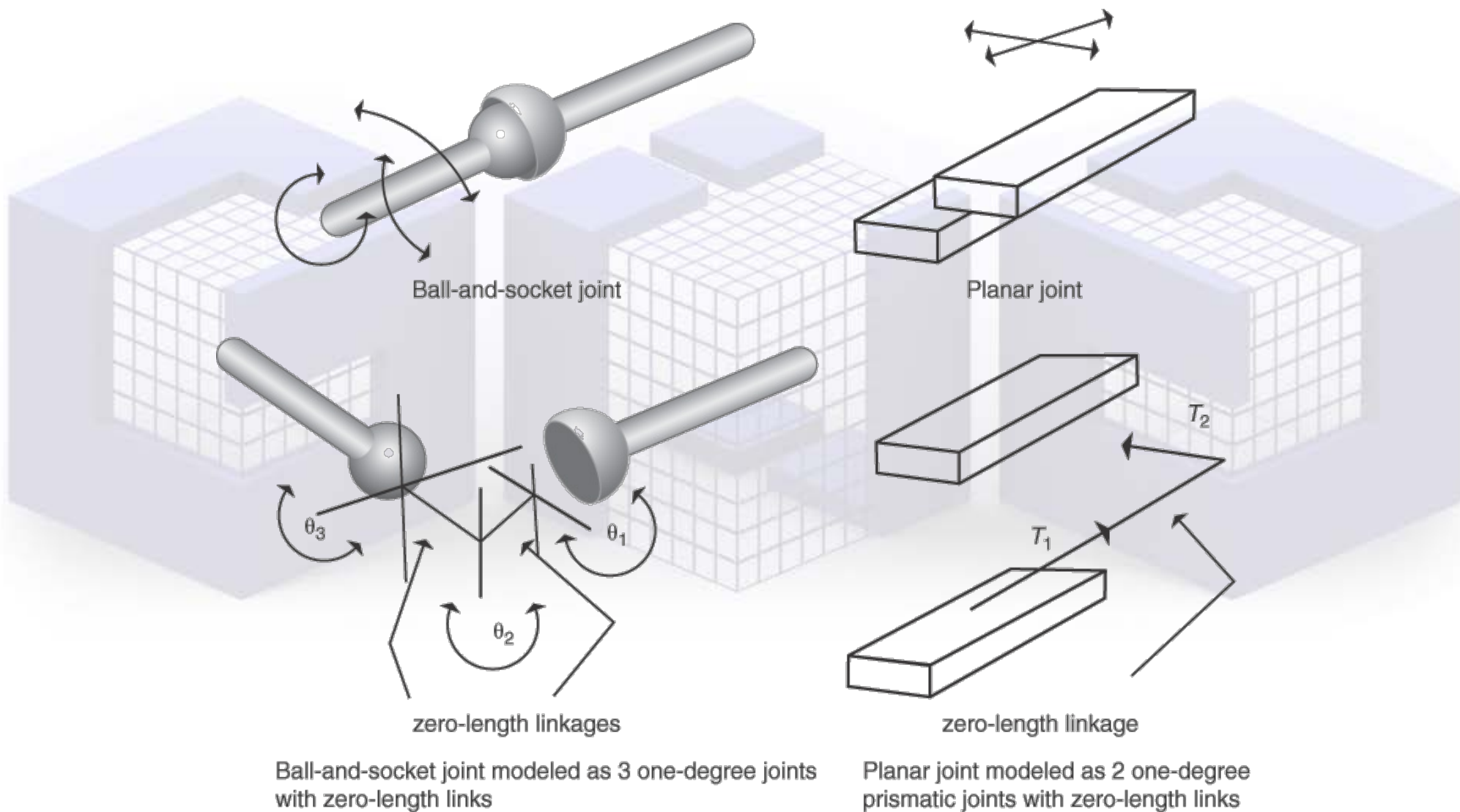
Cojinetes



Articulaciones complejas con  $n$  grados pueden modelarse como  $n$  articulaciones de un grado conectadas por  $n-1$  enlaces de longitud 0.



## GRADOS DE LIBERTAD: ARTICULACIÓN COMPLEJA





## GRADOS DE LIBERTAD EN EL MODELO HUMANO

Raíz: 3 DOF de traslación + 3 DOF de rotación

Se utilizan normalmente articulaciones de rotación

Cada articulación tiene como máximo 3 DOF

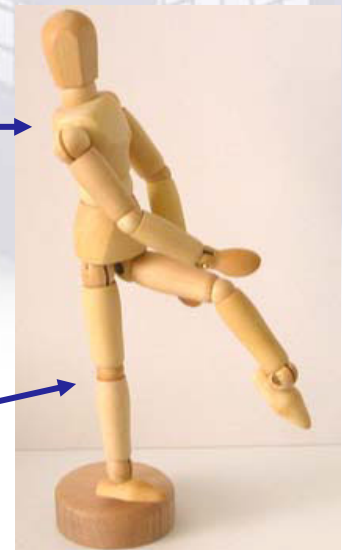
Hombro: 3 DOF

Muñeca: 2 DOF

Rodilla: 1 DOF

3 DOF →

1 DOF →





## MODELADO JERÁRQUICO: ESTRUCTURA DE DATOS

Los vínculos jerárquicos pueden ser representados por una estructura en forma de árbol

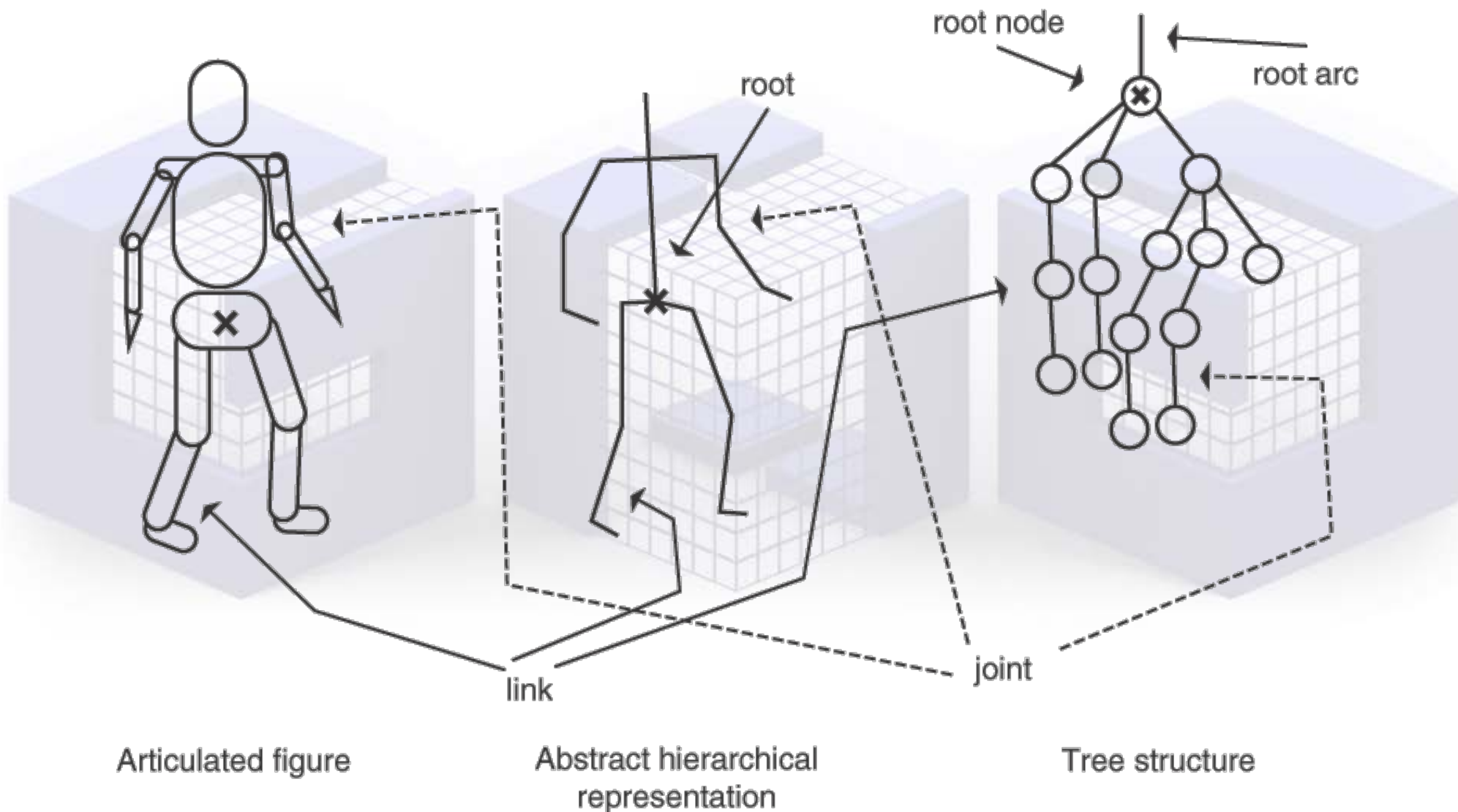
- Nodo raíz: corresponde al objeto raíz cuya posición se conoce en el sistema de coordenadas mundial
- Otros nodos: situados en relación con el nodo raíz
- Los nodos de hoja contienen los elementos básicos

Correspondencia entre la jerarquía y el árbol

- Nodo: parte del objeto
- Arco: articulación o transformación para aplicar a todos los nodos que dependen de ella en la jerarquía

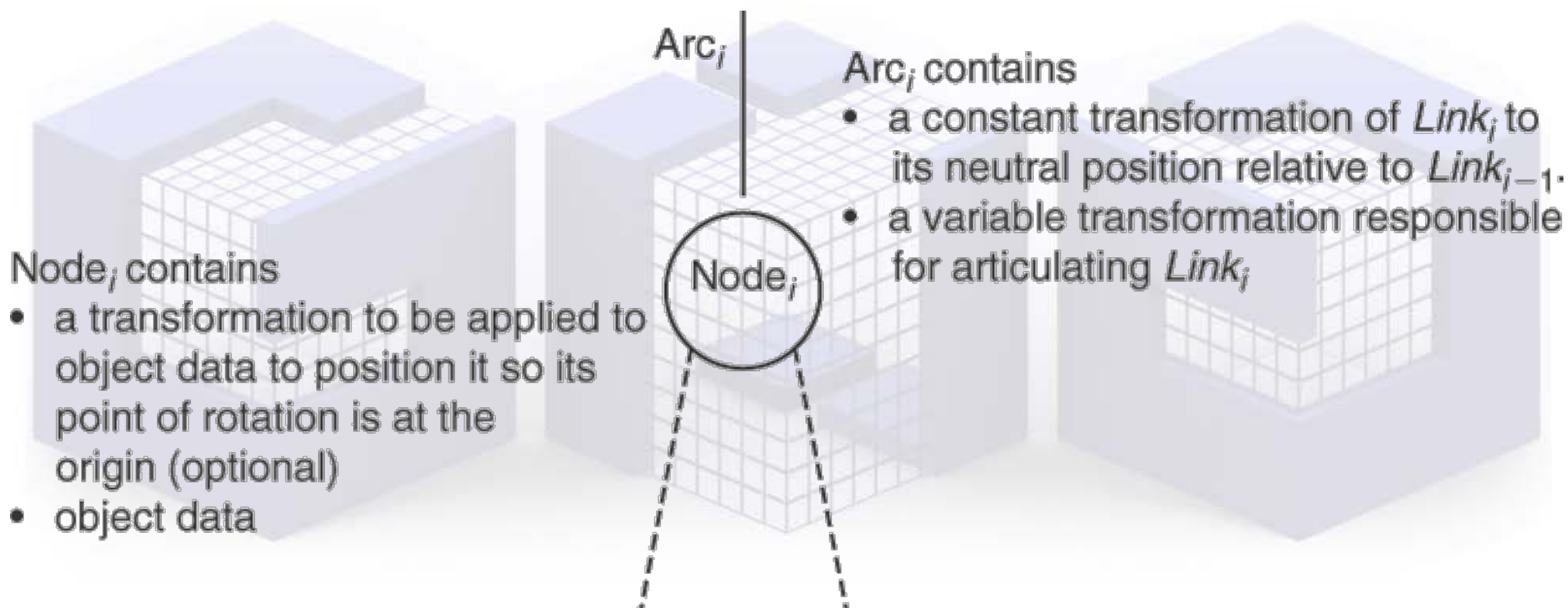


## MODELADO JERÁRQUICO: ESTRUCTURA DE DATOS



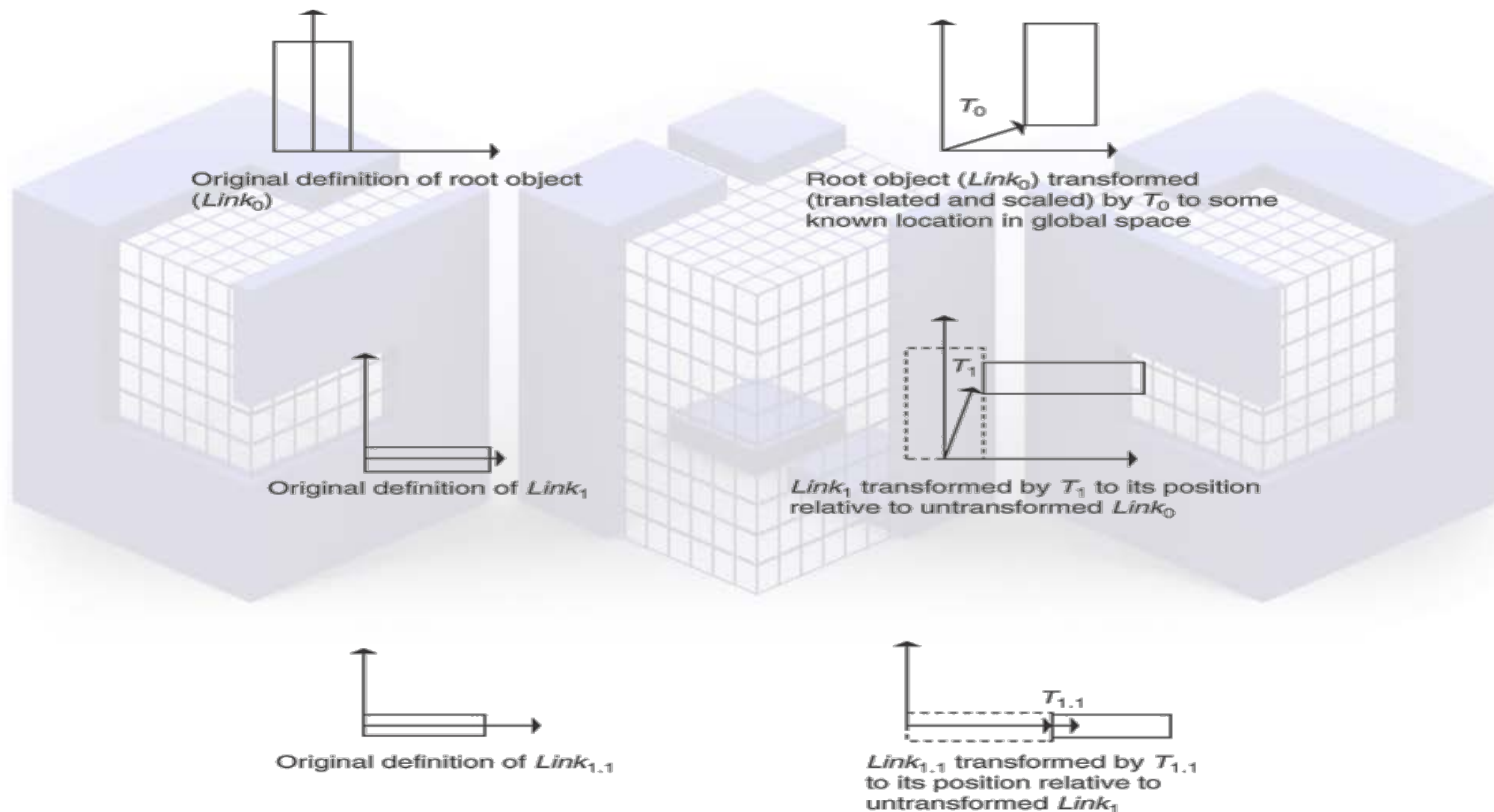


## MODELADO JERÁRQUICO: ESTRUCTURA DE DATOS



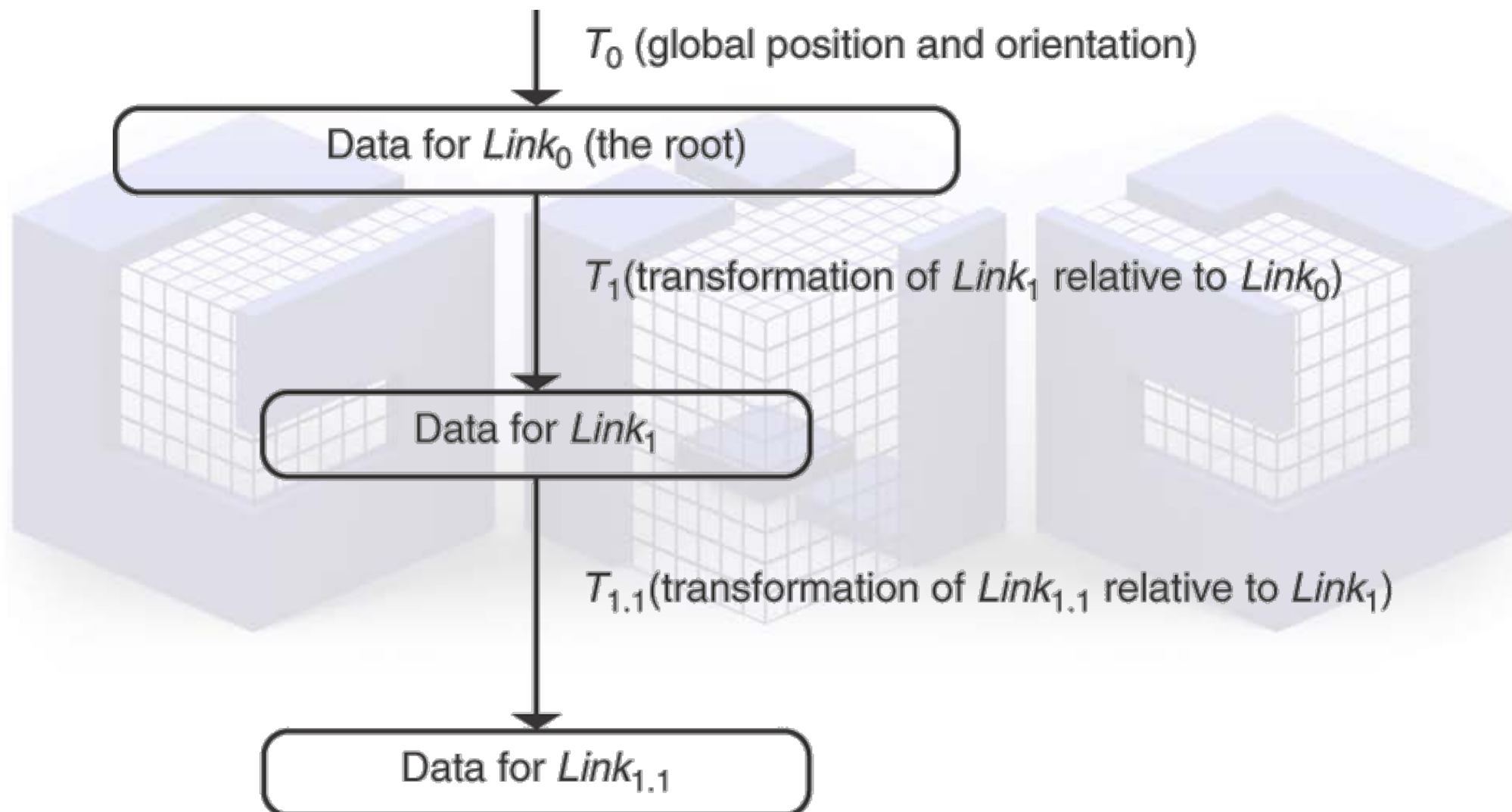


## MODELADO JERÁRQUICO: ESTRUCTURA DE DATOS



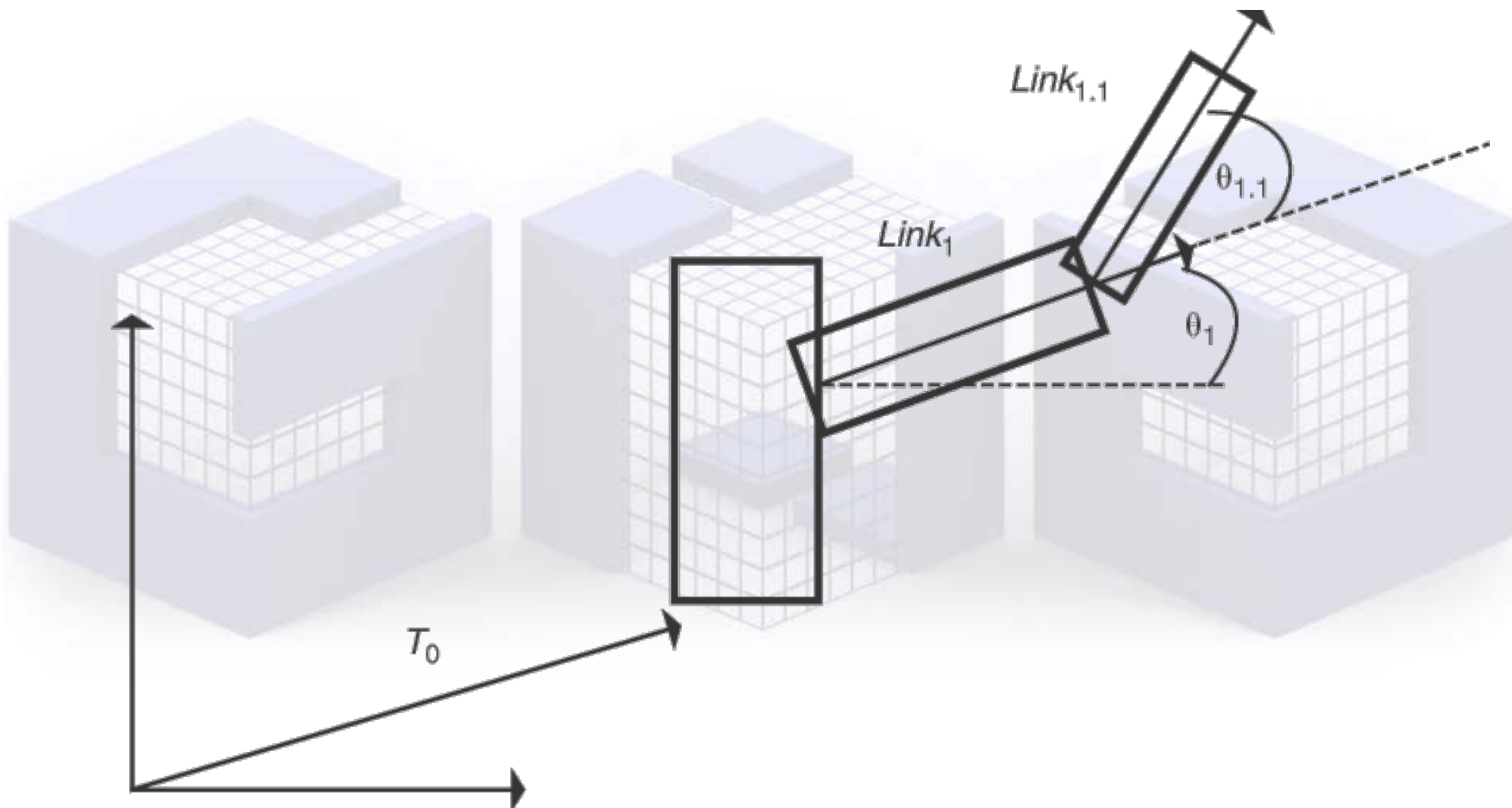


## MODELADO JERÁRQUICO: ESTRUCTURA DE ÁRBOL



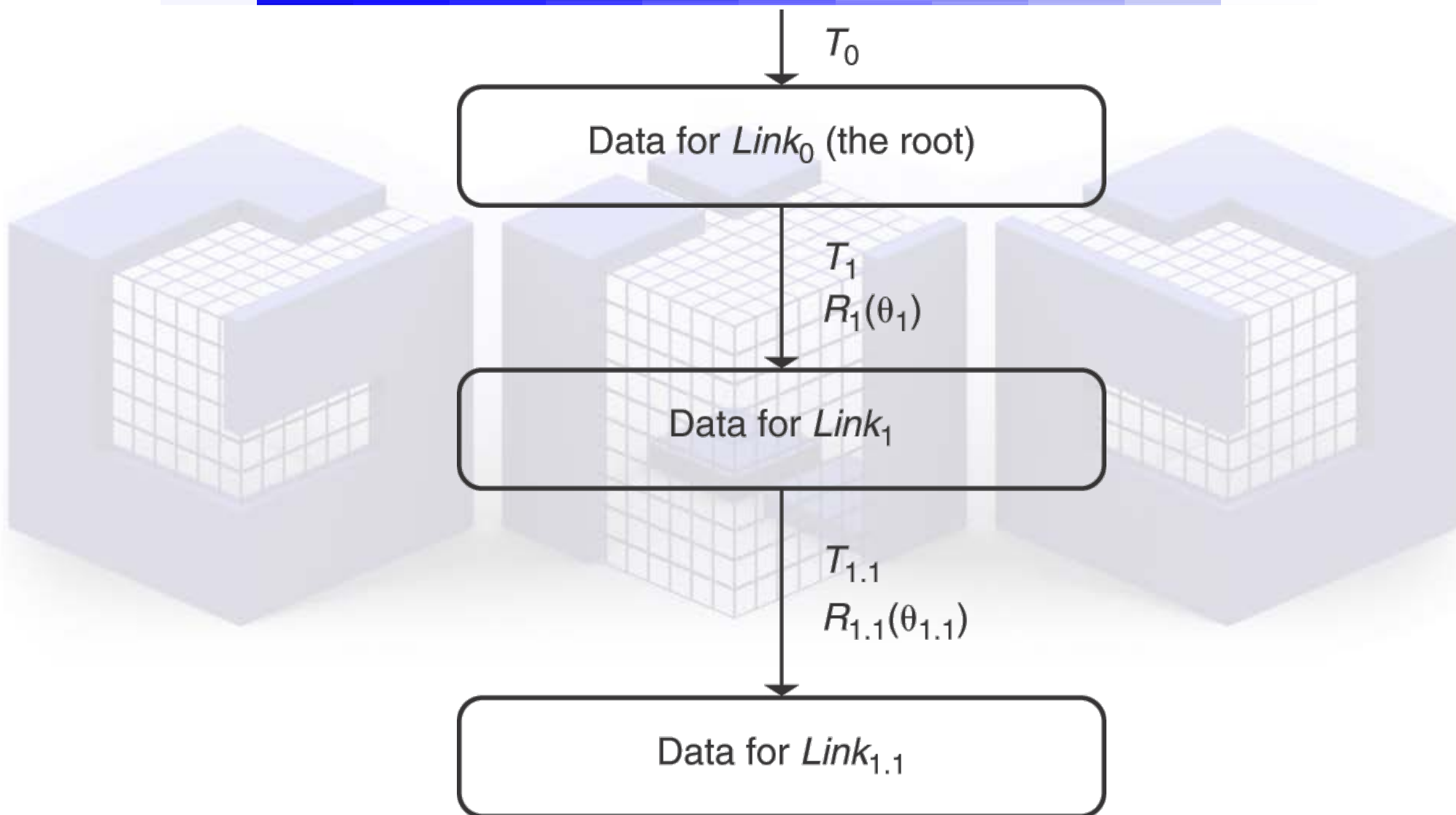


## MODELADO JERÁRQUICO: ROTACIONES EN ARTICULACIONES





## MODELADO JERÁRQUICO: ESTRUCTURA DE ÁRBOL





## MODELADO JERÁRQUICO: TRANSFORMACIONES

$V_0$  : un vértice de  $\text{Link}_0$

En coordenadas del mundo :  $V_0' = T_0 V_0$

$V_1$  : un vértice de  $\text{Link}_1$

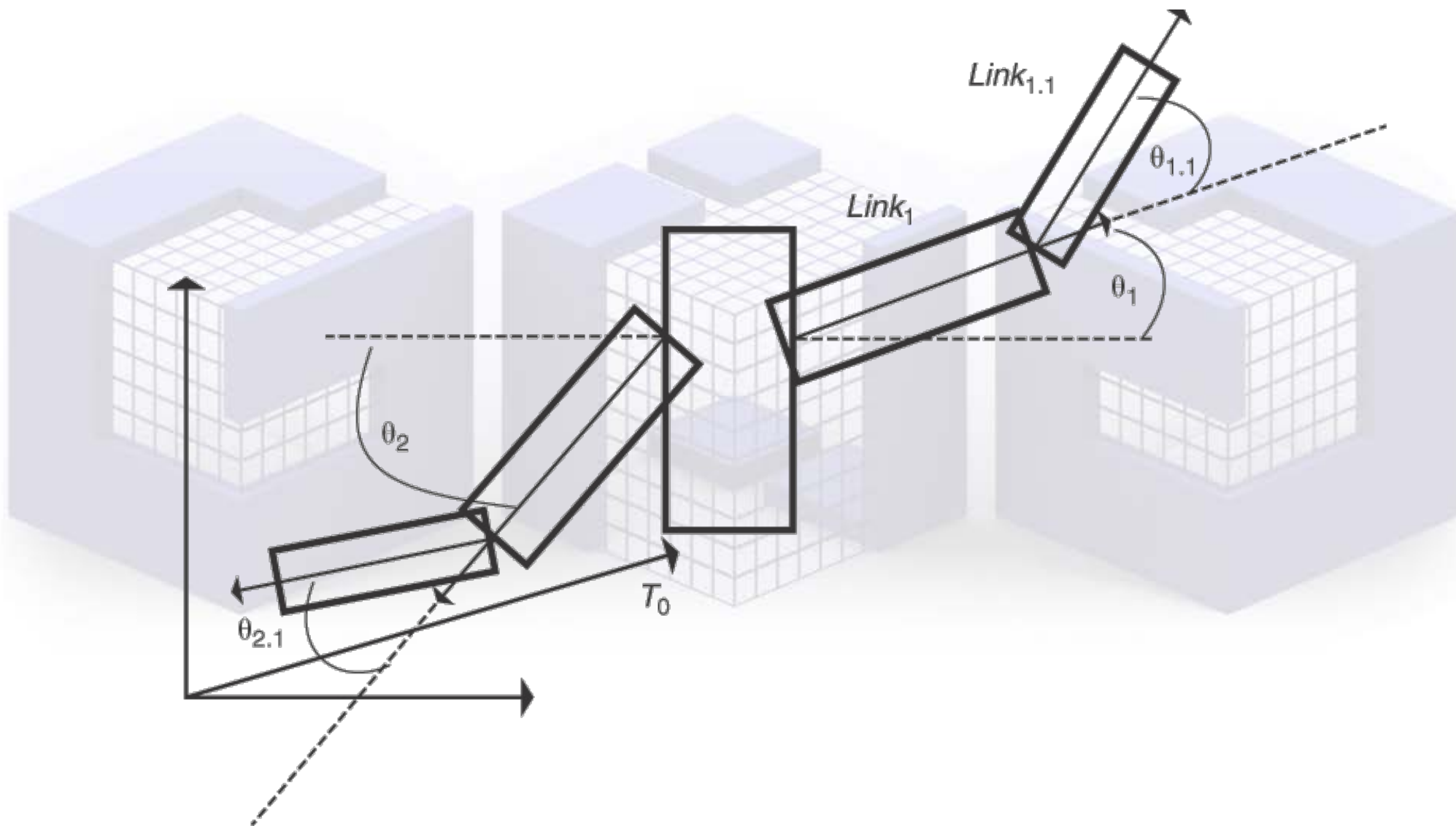
En coordenadas del mundo :  $V_1' = T_0 T_1 R_1(\theta_1) V_1$

$V_{1,1}$  : un vértice de  $\text{Link}_{1,1}$

En coordenadas del mundo :  $V_{1,1}' = T_0 T_1 R_1(\theta_1) T_{1,1} R_{1,1}(\theta_{1,1}) V_{1,1}$

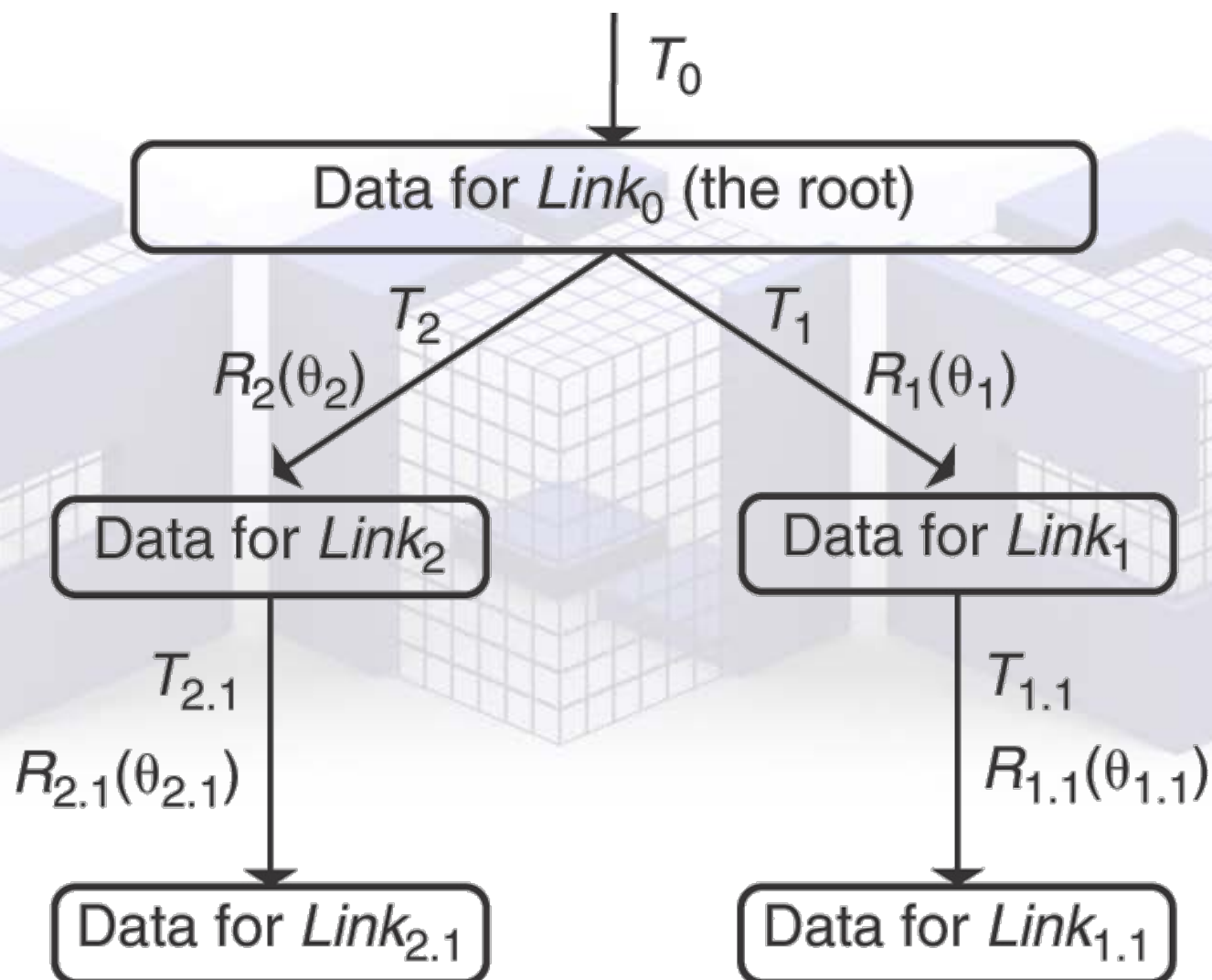


## MODELADO JERÁRQUICO: CON DOS BRAZOS





## MODELADO JERÁRQUICO: CON DOS BRAZOS





## ESPACIO DE UNIONES VS. ESPACIO CARTESIANO

### Espacio de uniones

- espacio formado por los ángulos de las articulaciones
- para posicionar todo el control fino de las articulaciones

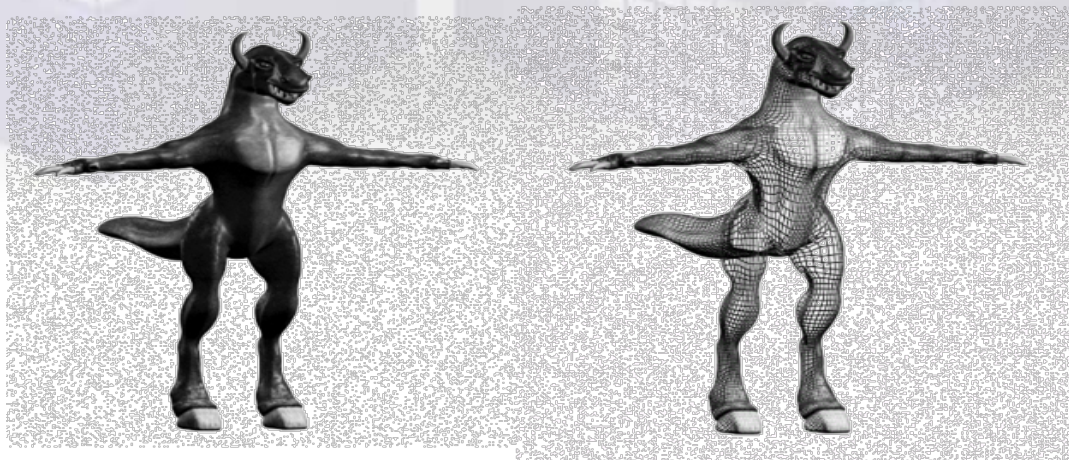
### Espacio cartesiano

- Espacio 3D
- Para especificar interacciones con el entorno



## TÉCNICAS DE ESQUELETO

- El principal problema que presenta el intercalado es la no correspondencia entre las imágenes clave de inicio y fin.
- Una solución es el uso de la técnica basada en *esqueletos* o *huesos*, donde, en vez de utilizar la figura completa para realizar el intercalado, se hace una representación esquemática: **el esqueleto**.
- Este esqueleto suele ser una figura muy sencilla, y no plantea tantos problemas al hacer corresponder posiciones iniciales y finales del mismo.





## CINEMÁTICA DIRECTA VS. CINEMÁTICA INVERSA

### Cinemática directa

Afecta a la manipulación del personaje desde la parte superior de la jerarquía hacia abajo: si movemos la cadera, todo el cuerpo se mueve; si rotamos el codo, se mueve la muñeca;

...

Con este método, si queremos acercar la mano de nuestro personaje a un objeto, primero rotaremos el hombro, después el codo y por último la muñeca y los dedos.

La cinemática directa resulta poco intuitiva y necesita muchos movimientos simples para conseguir movimiento complejos.

### Cinemática inversa

Se trata de otra técnica más intuitiva, ya que al mover las ramificaciones de la jerarquía, se mueven los ancestros de las mismas (igual que ocurre en la realidad).



## CINEMÁTICA DIRECTA VS. CINEMÁTICA INVERSA

Con este método, si queremos acercar la mano de nuestro personaje a un objeto, lo único que tenemos que hacer es colocar los dedos sobre el objeto, y el resto del brazo los seguirá automáticamente.

Sin embargo existe un problema: al tener que determinar el ordenador la forma en que deberán girar las distintas partes para que el conjunto resulte natural, debemos indicar el modo exacto en que las articulaciones se coordinan, y las limitaciones de sus movimientos.

| Segmento  | Articulación   | Tipo     | X    | Y    | Z    |
|-----------|----------------|----------|------|------|------|
| Pie       | Tobillo        | Rotación | 65°  | 30°  | 0°   |
| Espinilla | Rodilla        | Bisagra  | 135° | 0°   | 0°   |
| Muslo     | Cadera         | Rótula   | 120° | 20°  | 10°  |
| Columna   | Cadera/Columna | Rotación | 15°  | 10°  | 0°   |
| Hombro    | Columna        | Rotación | 20°  | 20°  | 0°   |
| Bíceps    | Hombro         | Rótula   | 180° | 105° | 10°  |
| Antebrazo | Codo           | Bisagra  | 150° | 0°   | 0°   |
| Mano      | Muñeca         | Rótula   | 180° | 30°  | 120° |

**Límites de rotación de las articulaciones en el cuerpo humano.**

**Nota:** El eje Z corresponde a un eje longitudinal a lo largo del hueso de la articulación



## CINEMÁTICA

Como animar elementos enlazados especificando o calculando parámetros de posición a lo largo del tiempo

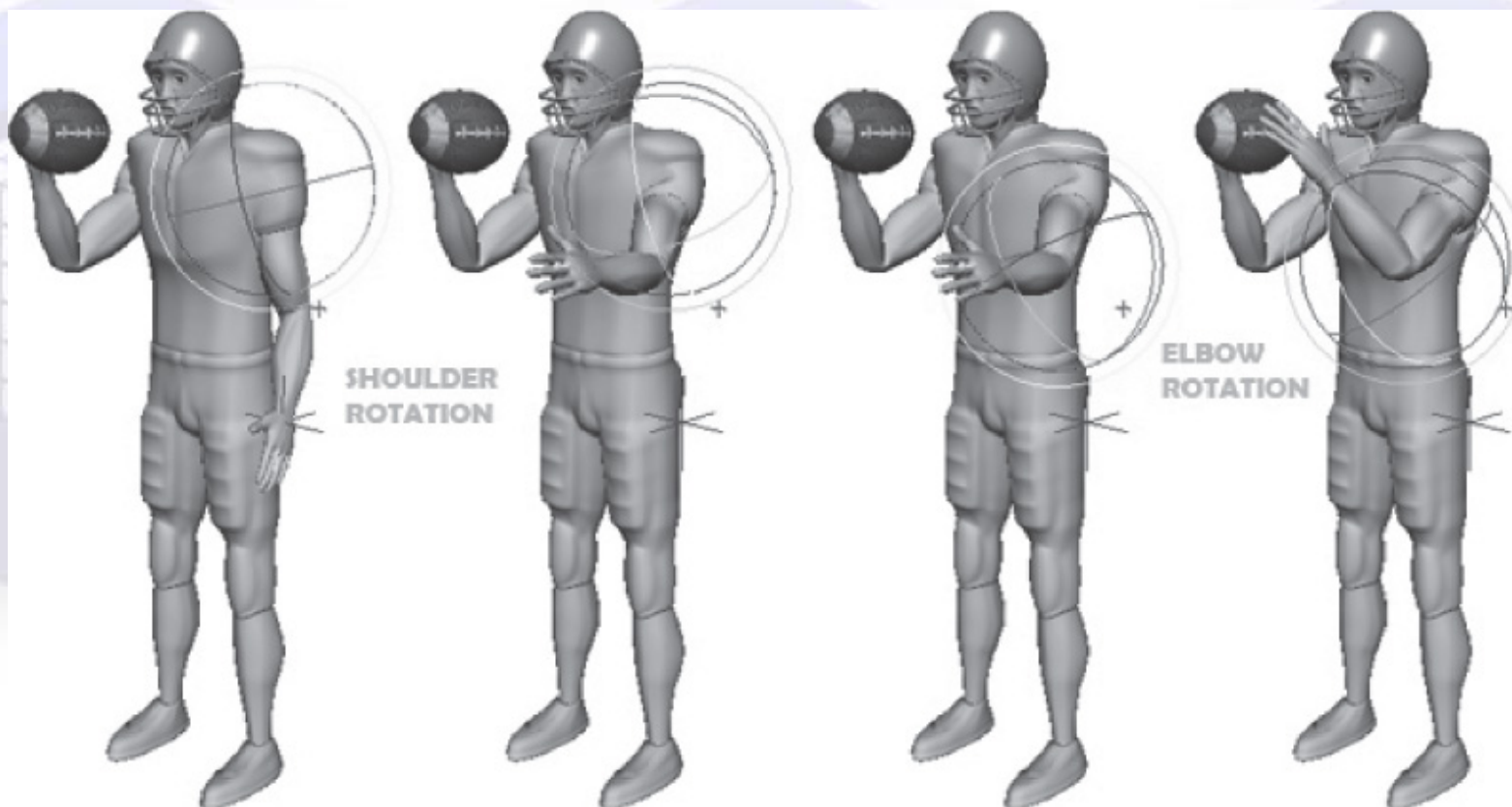
Rama de la mecánica que se ocupa de los movimientos de los objetos sin tener en cuenta las fuerzas que causan el movimiento





## CINEMÁTICA: DIRECTA (FORWARD KINEMATICS)

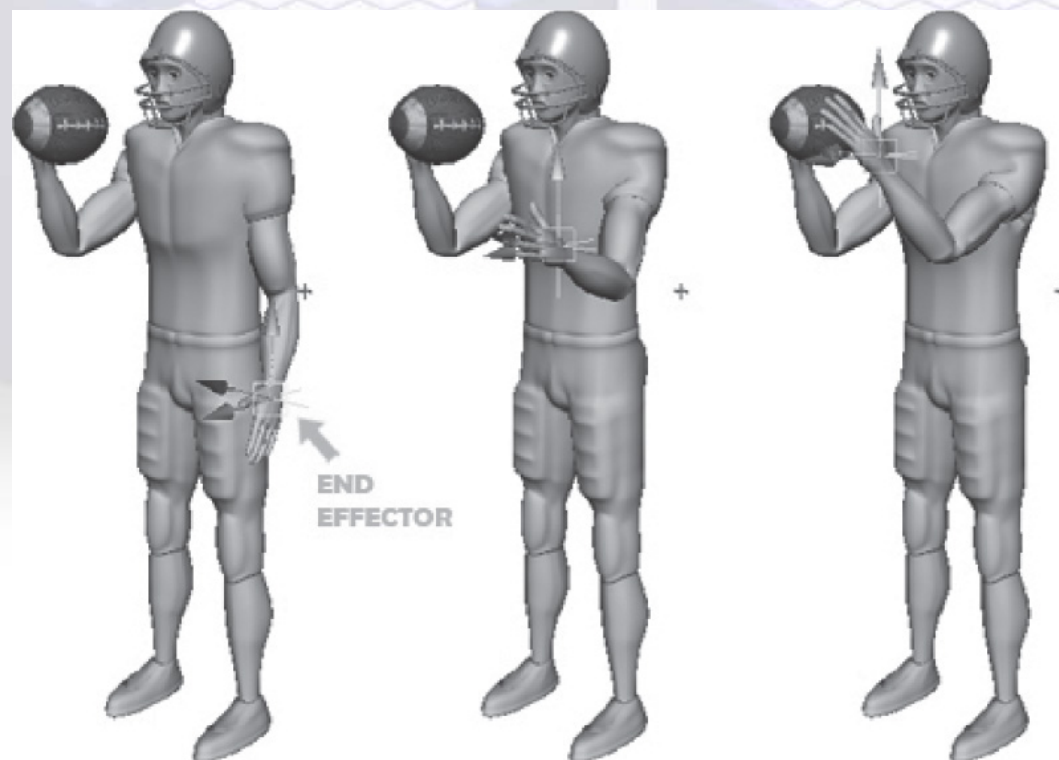
El animador especifica directamente la rotación de las articulaciones





## CINEMÁTICA: INVERSA (INVERSE KINEMATICS)

El animador especifica la posición deseada de la mano, y el sistema resuelve los ángulos de rotación que satisfacen ese movimiento





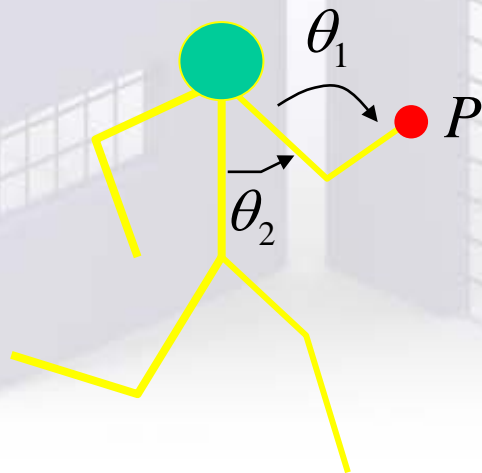
## CINEMÁTICAS DIRECTA E INVERSA

### Cinemática Directa

mapeo de espacio de la articulación al espacio cartesiano

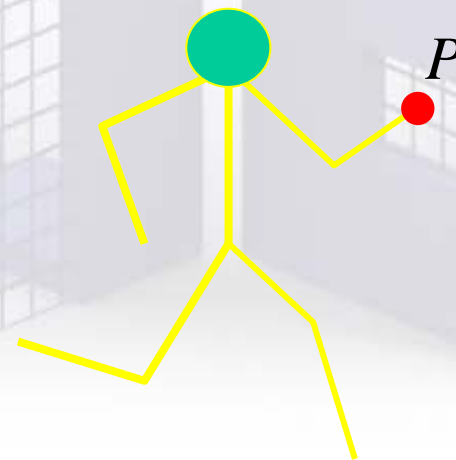
### Cinemática Inversa

mapeo de espacio cartesiano al espacio de la articulación



Cinemática Directa

$$P = f(\theta_1, \theta_2)$$



Cinemática Inversa

$$\theta_1, \theta_2 = f^{-1}(P)$$



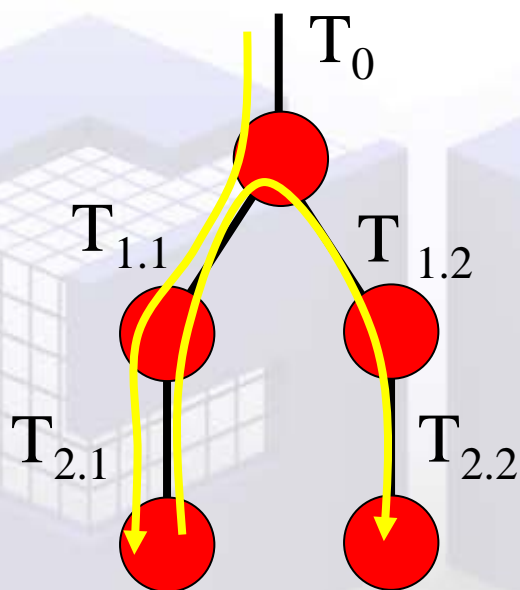
## CINEMÁTICA DIRECTA

Evaluar el árbol:

- Recorrido primero en profundidad de la raíz a las hojas
- Repetir hasta que se hayan visitado todos los nodos y arcos:
  - ✓ El recorrido da marcha atrás en el árbol hasta que se encuentra un arco descendente inexplorado
  - ✓ Se recorre el arco descendente
- Implementación
  - ✓ Requiere una pila de transformaciones



## CINEMÁTICA DIRECTA: RECORRIDO DEL ÁRBOL



$$M = I$$

$$M = T_0$$

$$M = T_0 * T_{1.1}$$

$$M = T_0 * T_{1.1} * T_{2.1}$$

$$M = T_0 * T_{1.1}$$

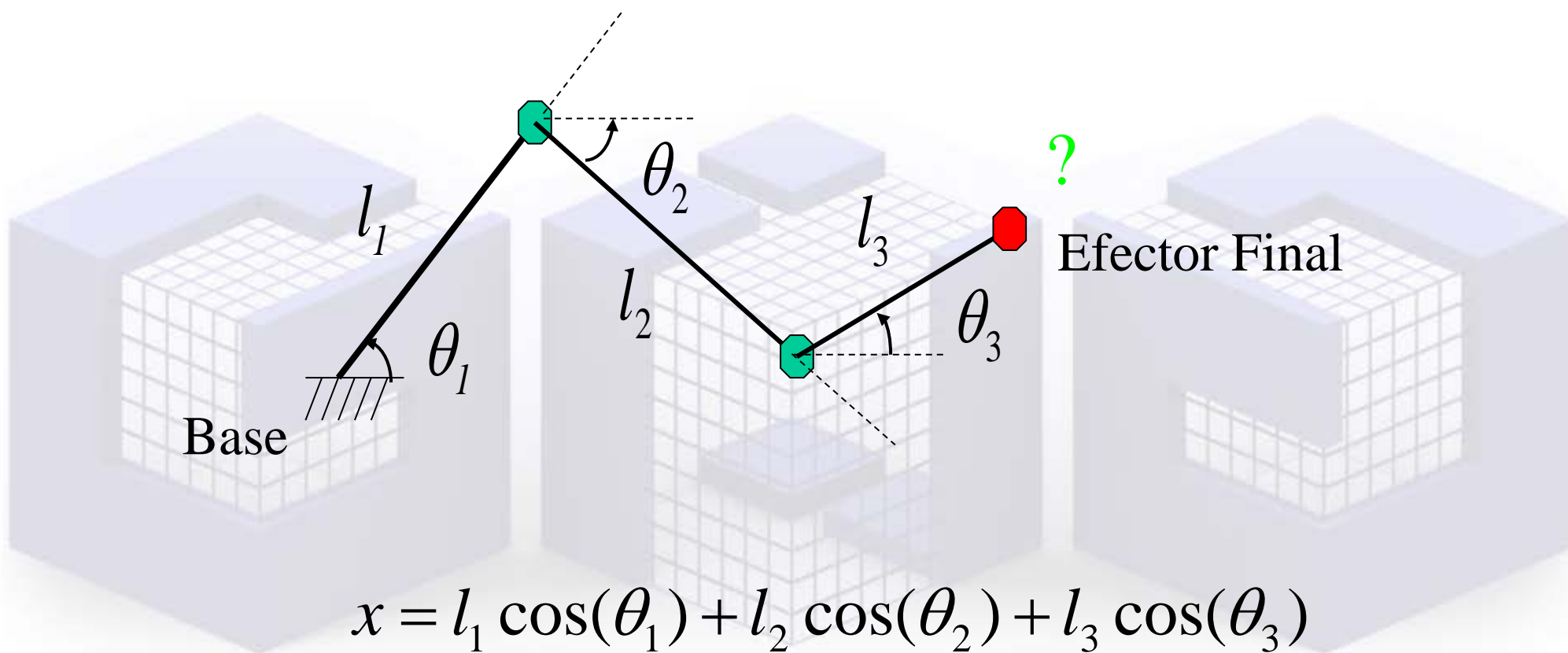
$$M = T_0$$

$$M = T_0 * T_{1.2}$$

$$M = T_0 * T_{1.2} * T_{2.2}$$



## CINEMÁTICA DIRECTA: EJEMPLO



$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + l_3 \cos(\theta_3)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_2) + l_3 \sin(\theta_3)$$



## CINEMÁTICA INVERSA

Dados el vector inicial de poses y el vector de poses objetivo, se deben obtener los valores necesarios de las articulaciones para alcanzar la pose deseada

- Puede existir 0, una o más soluciones:
  - Sistemas Sobre-restringidos
  - Sistema Infra-restringidos
- Aparecen problemas de singularidades



## CINEMÁTICA INVERSA

Ejemplo:

2 ecuaciones (restricciones)

3 incógnitas

$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + l_3 \cos(\theta_3)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_2) + l_3 \sin(\theta_3)$$

Existen infinitas soluciones!

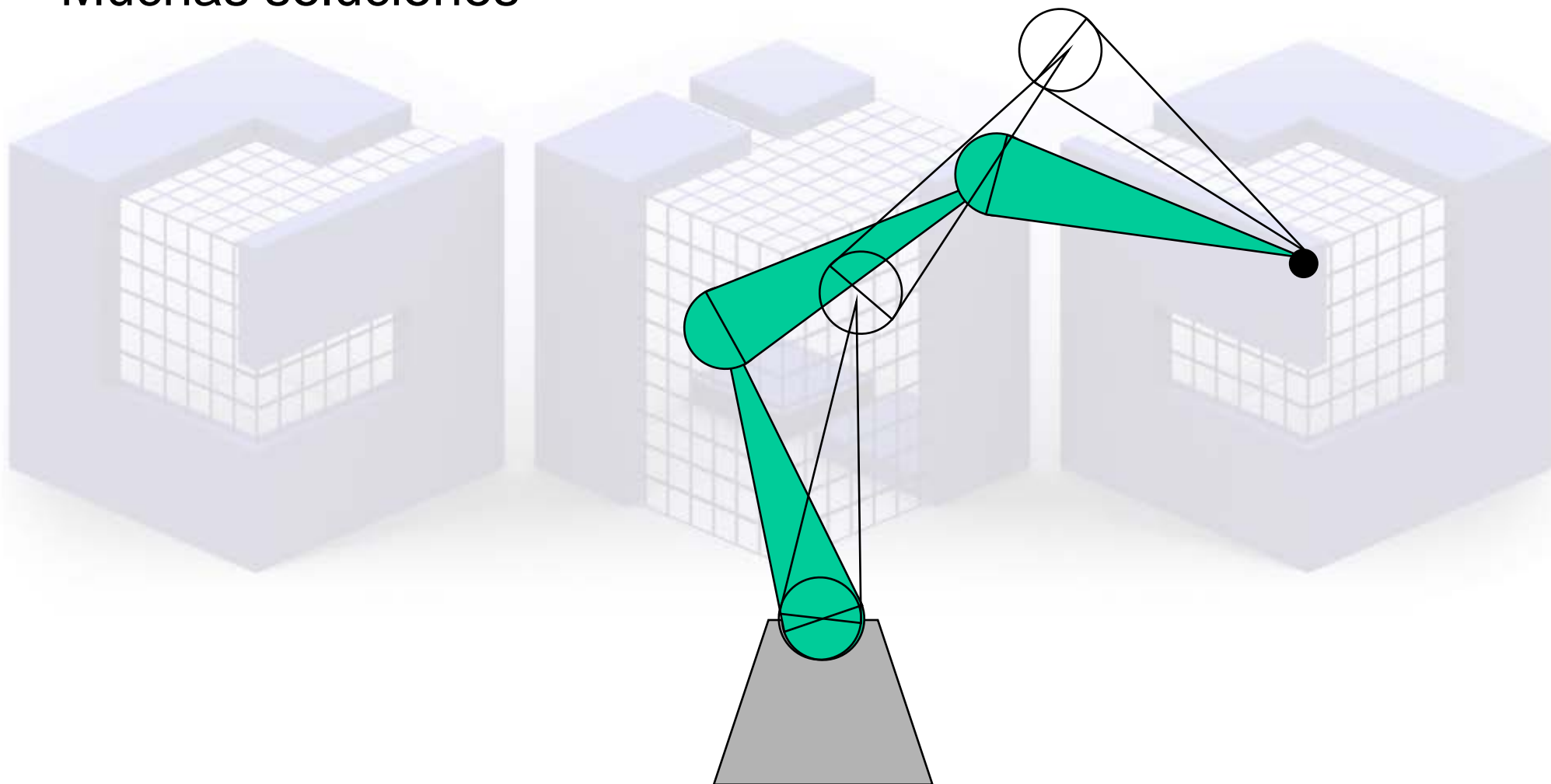
Esto no es raro!

- Basta con ver de cuántas formas podemos colocar nuestro codo mientras nuestro dedo toca la nariz



## OTROS PROBLEMAS EN IK

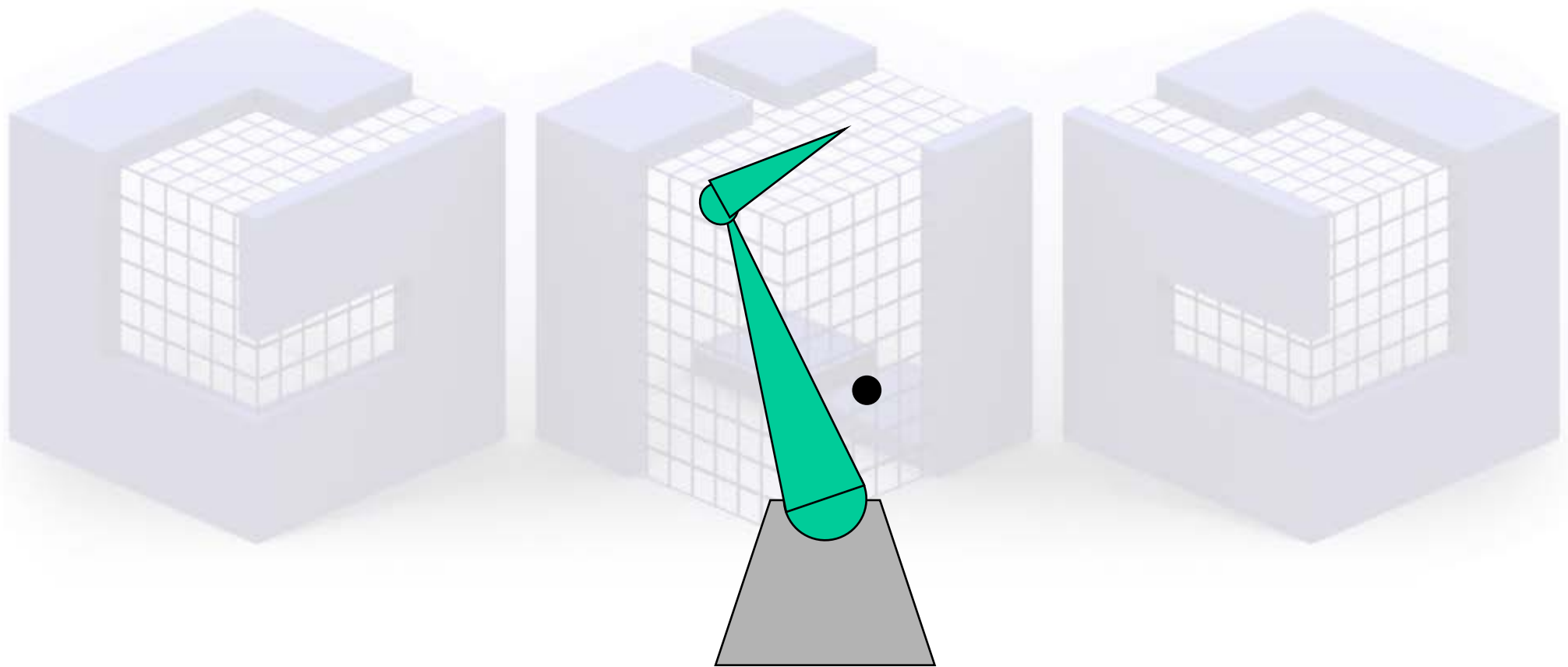
Muchas soluciones





## OTROS PROBLEMAS EN IK

No hay solución:





## CINEMÁTICA INVERSA

Una vez calculados los valores de las articulaciones, la figura puede estar animada por interpolación de los valores del vector inicial de poses a los valores del vector de poses final.

- IK no proporciona un control preciso ni apropiado cuando hay grandes diferencias entre los valores inicial y final de pose. Lo que hacemos es,
  - *Interpolamos los vectores de poses*
  - *Calculamos la cadena IK para cada interpolación del vector de poses*



## CINEMÁTICA INVERSA: MÉTODO ANALÍTICO VS. NUMÉRICO

Existen soluciones analíticas sólo para vínculos relativamente simples

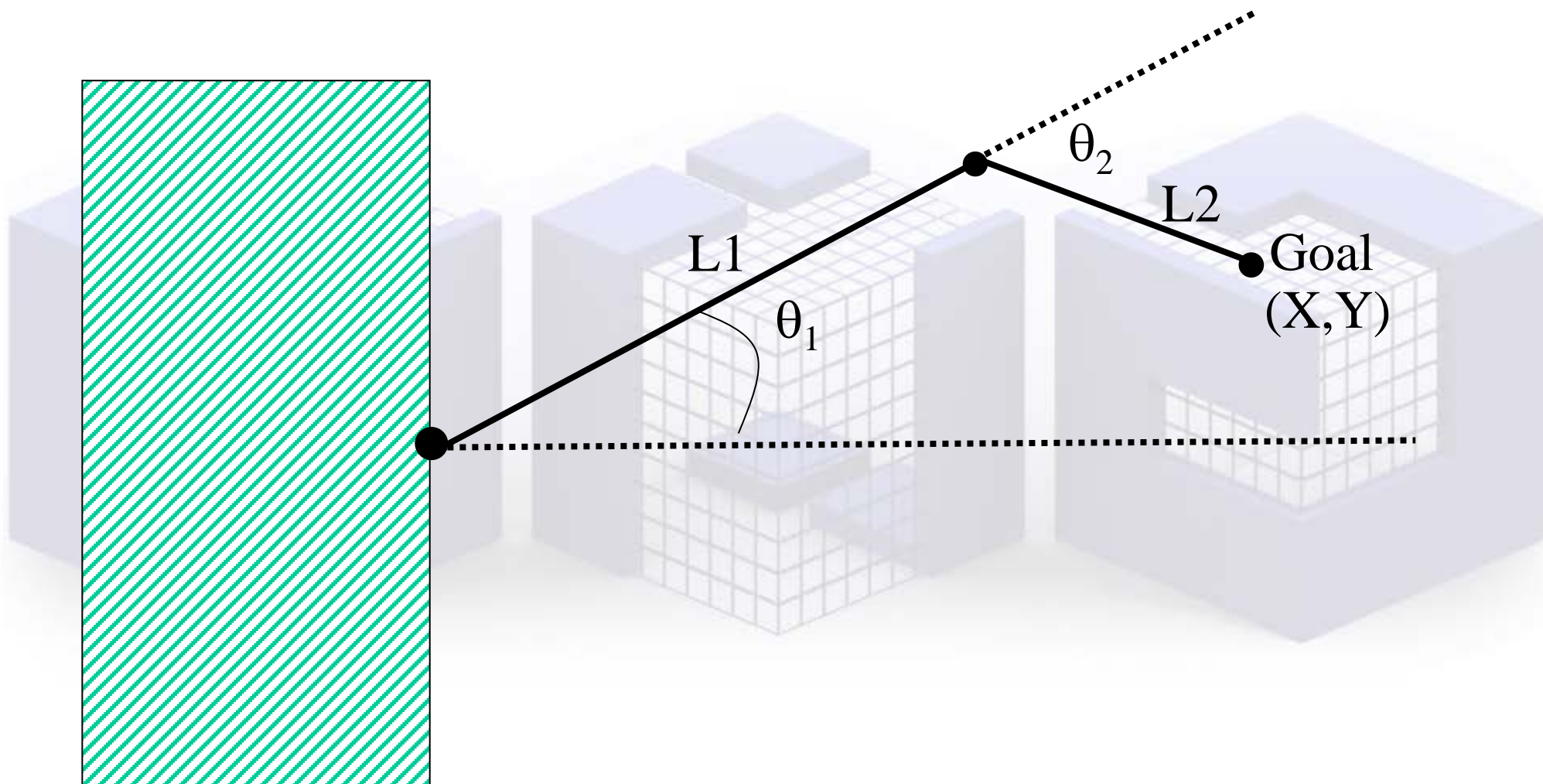
- Inspeccionando la geometría de las articulaciones
- Resolvemos las ecuaciones que describen la relación del efector final con la base

Enfoque incremental numérico:

- Método jacobiano inverso
- Otros métodos

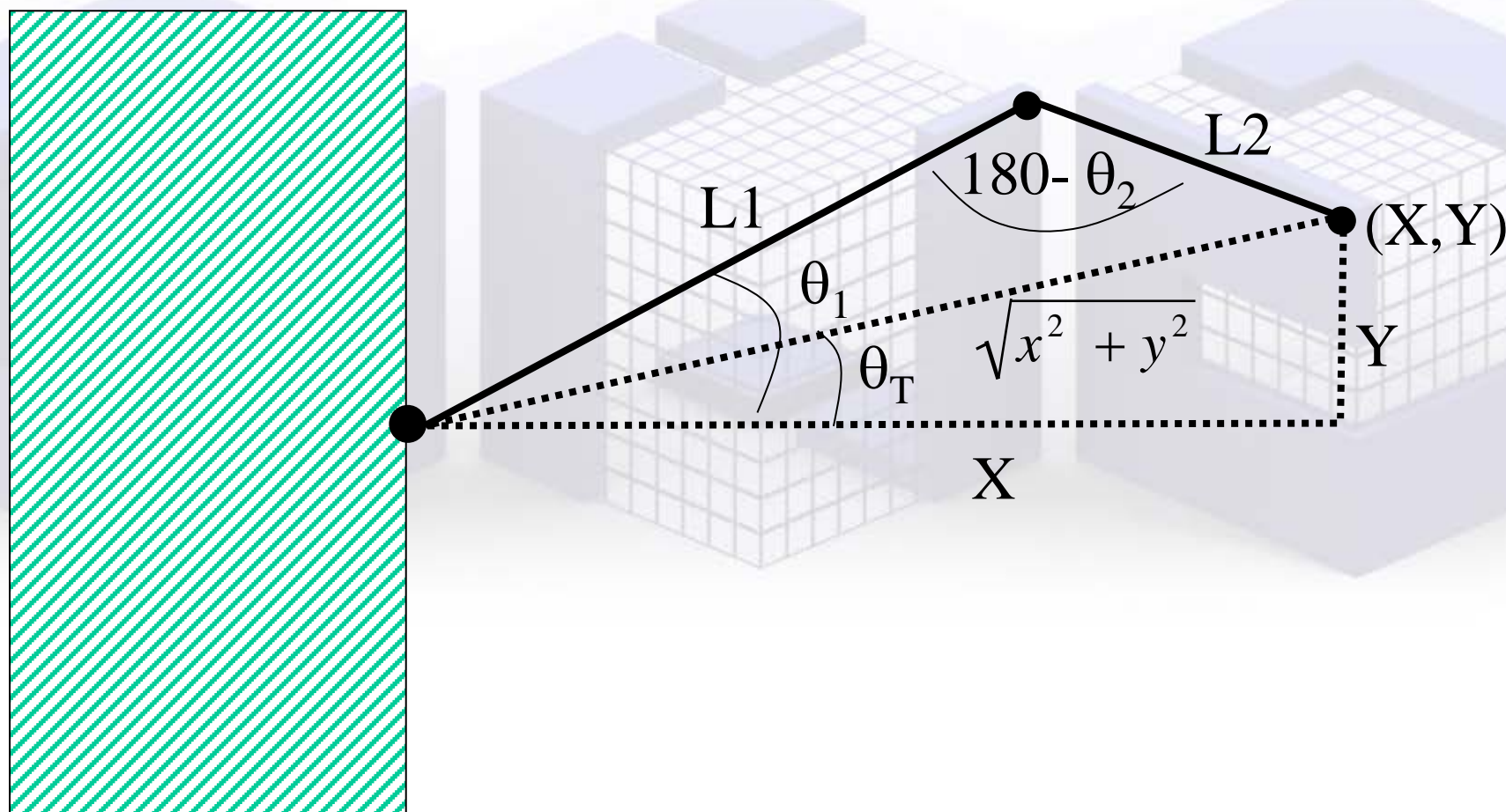


## CINEMÁTICA INVERSA: MÉTODO ANALÍTICO



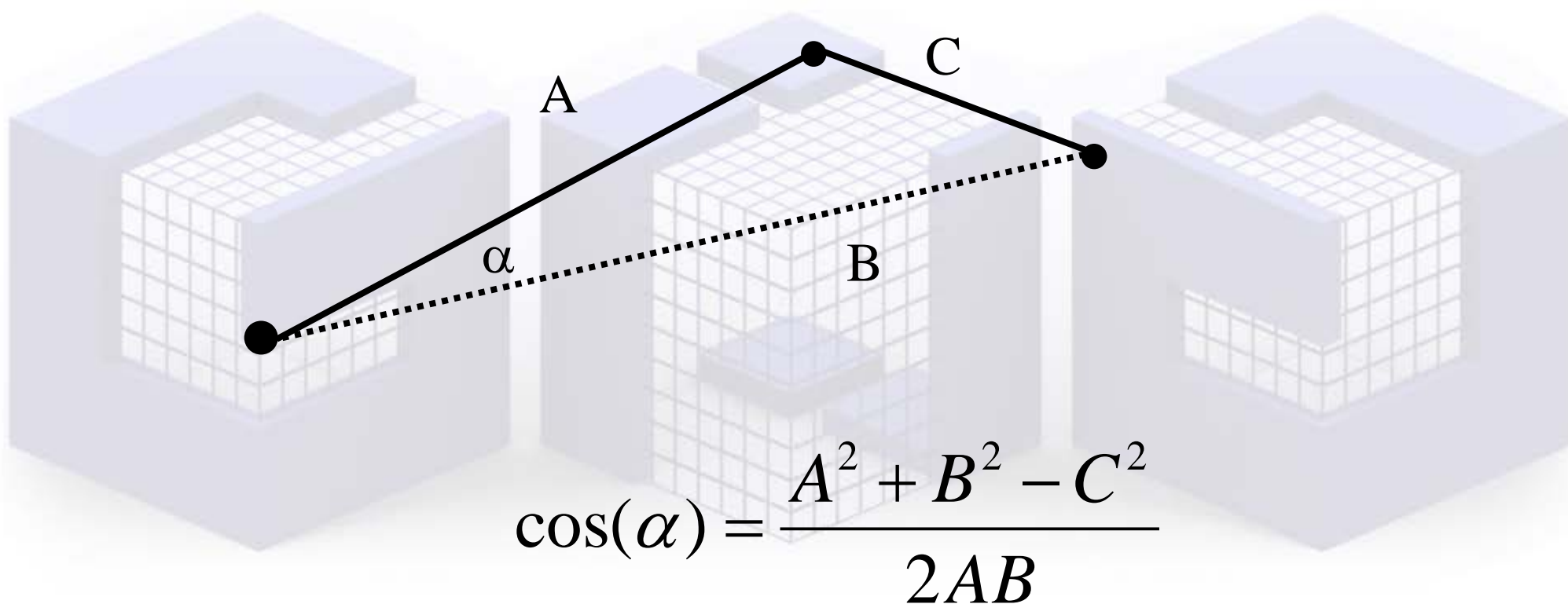


## CINEMÁTICA INVERSA: MÉTODO ANALÍTICO



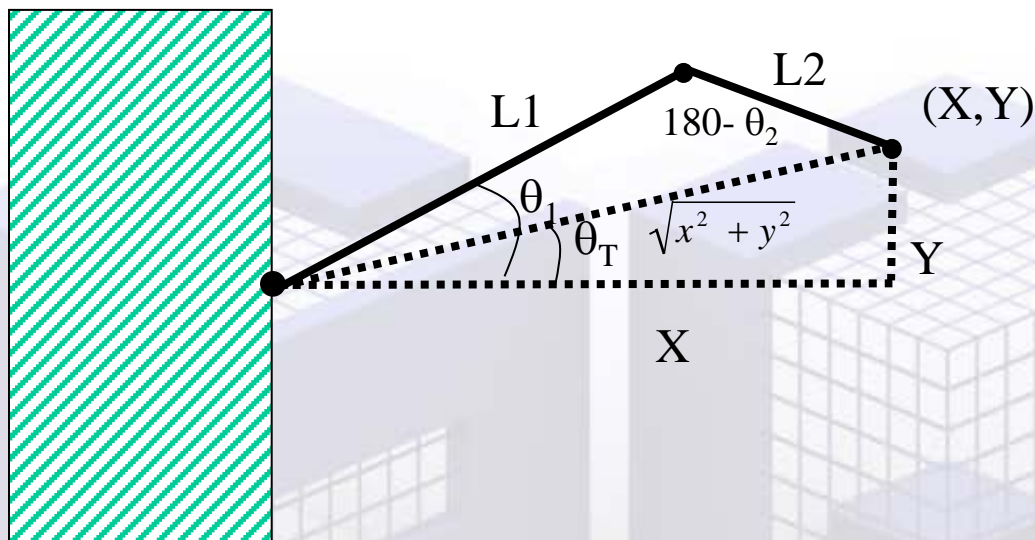


## CINEMÁTICA INVERSA: LEY DEL COSENO





## CINEMÁTICA INVERSA: MÉTODO ANALÍTICO



$$\cos(\theta_T) = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$\theta_T = \cos^{-1}\left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)$$

$$\cos(180 - \theta_2) = \frac{L_1^2 + L_2^2 - (X^2 + Y^2)}{2L_1L_2}$$

$$\cos(\theta_1 - \theta_T) = \frac{L_1^2 + X^2 + Y^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

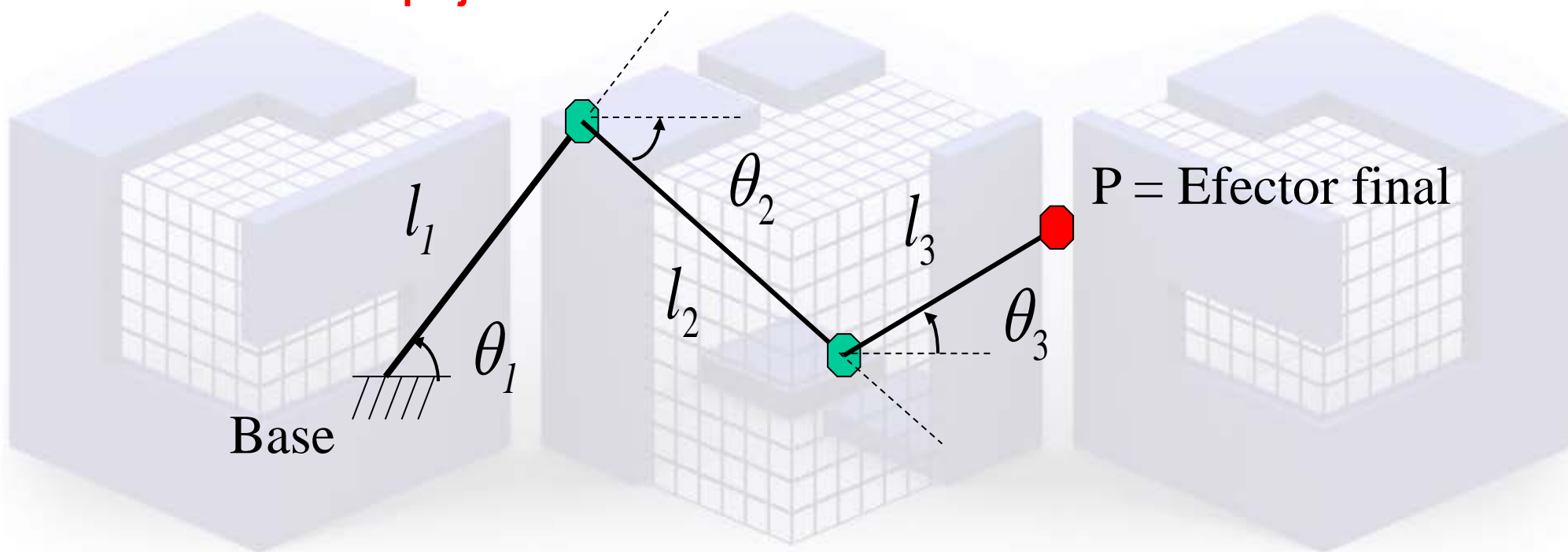
$$\theta_2 = 180 - \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - (X^2 + Y^2)}{2L_1L_2}\right)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + X^2 + Y^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) + \theta_T$$



## CINEMÁTICA INVERSA

Uniones más complejas



$$\theta_1, \theta_2, \theta_3 = f^{-1}(P)$$



## POR QUÉ ES LA IK TAN DIFÍCIL?

- Redundancia
- Control natural del movimiento
  - Límites en las articulaciones
  - 'tirones' mínimos
  - estilo?
- Singularidades
  - Enlaces en 'malas condiciones'
  - Situaciones especiales





## SOLUCIÓN: RESOLVER LA IK NUMÉRICAMENTE

- Método de la inversa del Jacobiano
- Método basado en optimización
- Métodos basados en ejemplos

