



Universidad Politécnica de Madrid
Escuela de Ingenieros Industriales



RoboTenis

Diseño, Simulación, Análisis Cinemático y Dinámico de un robot paralelo para Control Visual de altas prestaciones



Luis Angel Silva
Nicolas Raguenes
Roque Saltaren
Jose Maria Sebastian
Rafael Aracil

Jornadas de Control Visual
22 y 23 de mayo
Alicante - Elche, 2003

Contenido General

- ▲ Introducción
- ▲ Diseño del robot
 - ▲ Arquitecturas del Robot
 - ▲ RoboTennis : Análisis Cinemático
 - ▲ RoboTennis : Análisis Dinámico
- ▲ Selección del sistema de visión
- ▲ Trabajos Futuros

Contenido General

- ▲ Introducción
 - ▲ Objetivos del Proyecto
 - ▲ Especificaciones
 - ▲ Plan de trabajo
- ▲ Diseño del robot
 - ▲ Arquitecturas del Robot
 - ▲ RoboTennis : Análisis Cinemático
 - ▲ RoboTennis : Análisis Dinámico
- ▲ Selección del sistema de visión
- ▲ Futuros trabajos

Introducción

- ▲ **Objetivos del Proyecto**
 - ▲ Robot para jugar tenis
 - ▲ Estructura del robot paralela
 - ▲ Control del robot a través de un sistema de visión
- ▲ **Especificaciones del sistema**
 - ▲ Elevada velocidad
 - ▲ Elevada aceleración
 - ▲ Espacio de trabajo suficiente, $> \phi 1500 \times 300$ mm.
- ▲ **Plan de trabajo**
 - ▲ Desarrollo del robot: Modelado, análisis, diseño y fabricación
 - ▲ Construcción de una plataforma experimental
 - ▲ Integración del sistema de visión
 - ▲ Desarrollo de algoritmos de control servo-visual

Contenido General

- ▲ Introducción
- ▲ Arquitecturas del Robot
- ▲ Diseño del robot
 - ▲ Arquitecturas del Robot
 - ▲ Robots Paralelos: Estado del arte y de la técnica
 - ▲ Primer Intento: Plataforma de Stewart
 - ▲ Robot Delta: Descripción, aplicaciones
 - ▲ RoboTennis : Análisis cinemático
 - ▲ RoboTennis : Análisis Dinámico
- ▲ Selección del sistema de visión
- ▲ Futuros trabajos

Arquitecturas del Robot (1)

▲ Robots Paralelos

- ▲ **Definición:** Robot en el cual el efector final esta unido a la base directamente por los accionamientos o por barras.
- ▲ Al haber mas de una cadena cinemática “cerrada”, la cinemática de un robot paralelo es muy diferente a la de un robot serie.
- ▲ La cinemática inversa de un robot paralelo se resuelve fácilmente por métodos geométricos, mientras que la cinemática directa es compleja y se resuelve por métodos numéricos.

Arquitecturas del Robot (2)

▲ Robots Paralelos

▲ **Ventajas:**

- ▲ Gran capacidad de aceleración y velocidad de operación.
- ▲ Elevada rigidez y bajo peso
- ▲ Accionamiento directo (sin reductores), “simplicidad mecánica”

▲ **Desventajas**

- ▲ Dificultad en resolver la cinemática directa.
- ▲ El espacio de trabajo es reducido, dependiendo del tipo de robot

Arquitecturas del Robot (3)

▲ Primer intento: Plataforma de Stewart

La base y la plataforma móvil son conectados a través de seis actuadores extensibles, mediante articulaciones esféricas y universales.

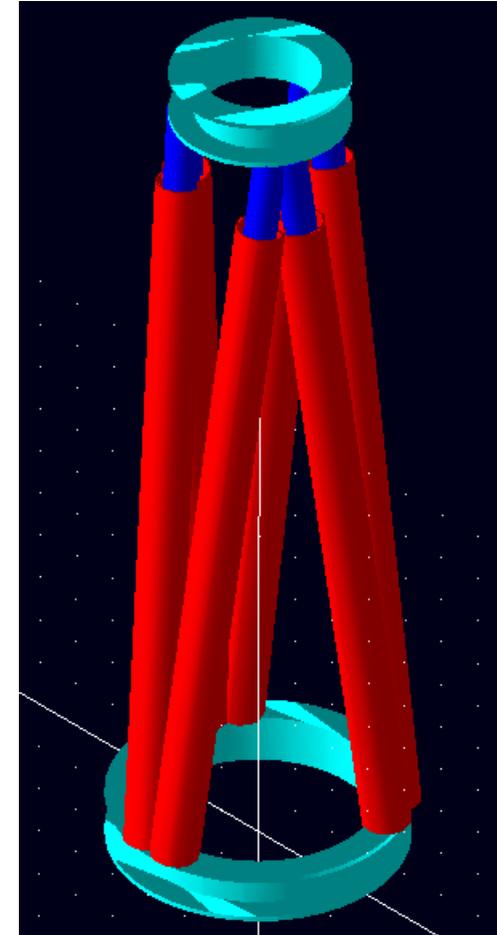
La plataforma móvil tiene 6 grados de libertad: 3 translaciones y 3 rotaciones.

Objetivos:

Velocidad lineal mínima: 10 m/seg., carga útil: 20 N.

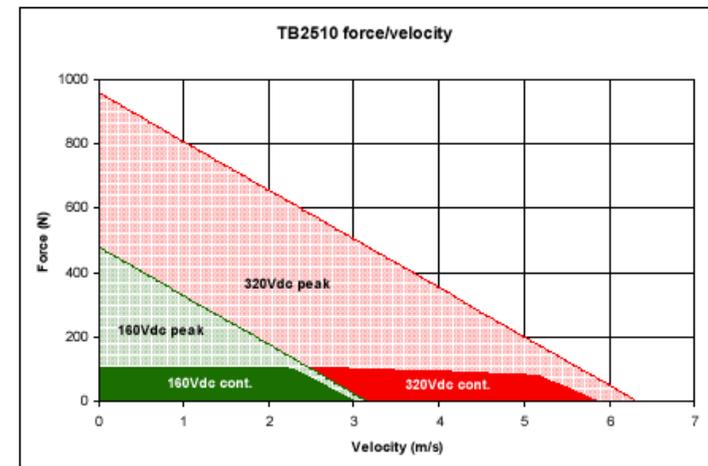
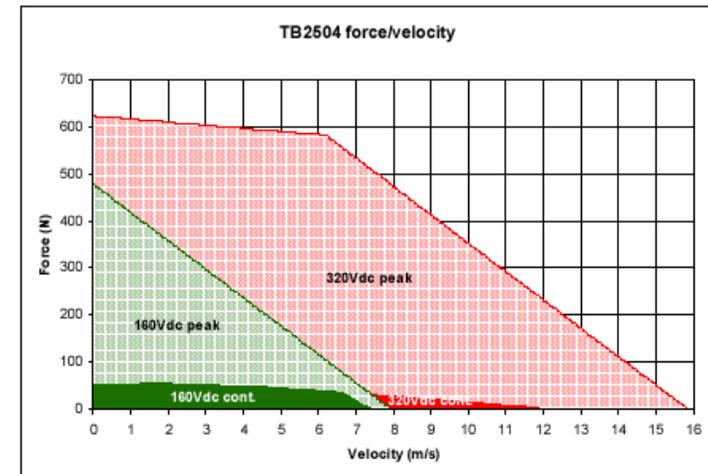
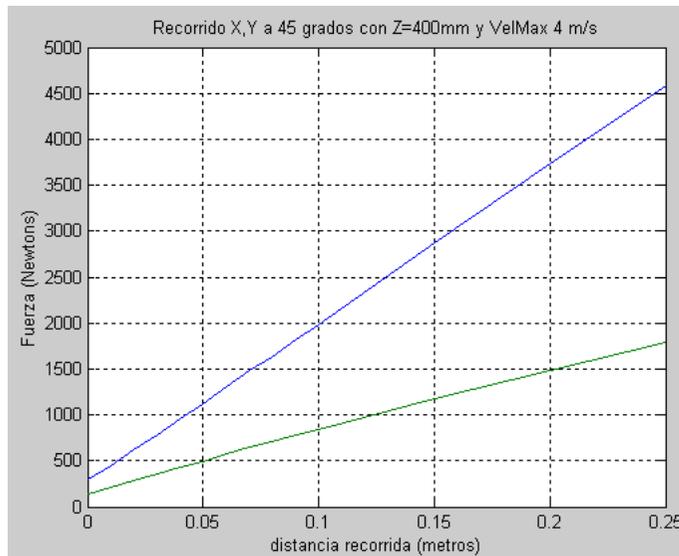
Problema encontrado:

En base a los resultados de las simulaciones dinámicas preliminares (ADAMS 11.0), no es posible encontrar motores eléctricos comerciales para generar las fuerzas y pares calculados.



Arquitecturas del Robot (4)

Primer intento: Plataforma de Stewart



Arquitecturas del Robot (5)

▲ Robot Delta

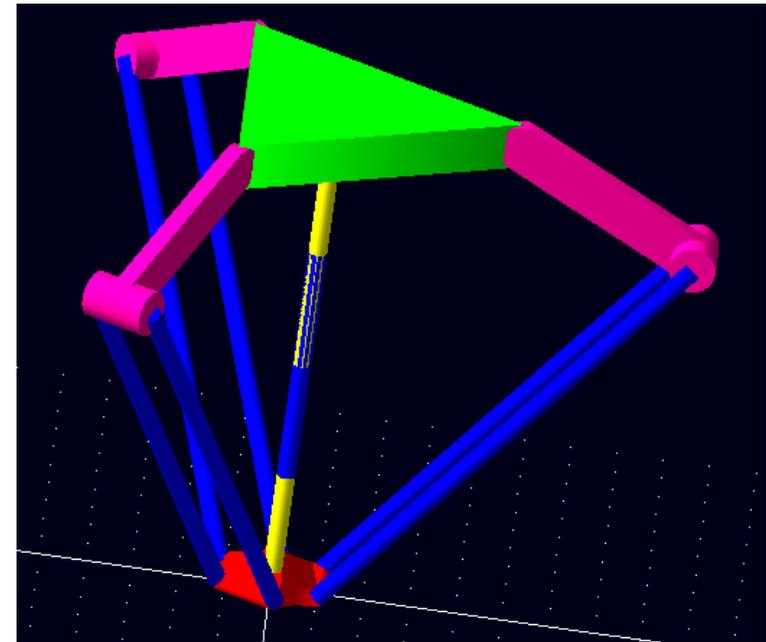
▲ Descripción

La base y el efector final se conectan por tres cadenas cinemáticas cerradas e idénticas.

Cada cadena esta separada 120° una de otra, y tiene un brazo superior y un sistema de barras paralelas.

Esta configuración restringe los movimientos del efector a 3 translaciones de acuerdo con los ejes X, Y, Z.

En cada cadena cinemática, la base y el elemento final son conectados con una articulación rotacional y 4 articulaciones esféricas.



Arquitecturas del Robot (6)

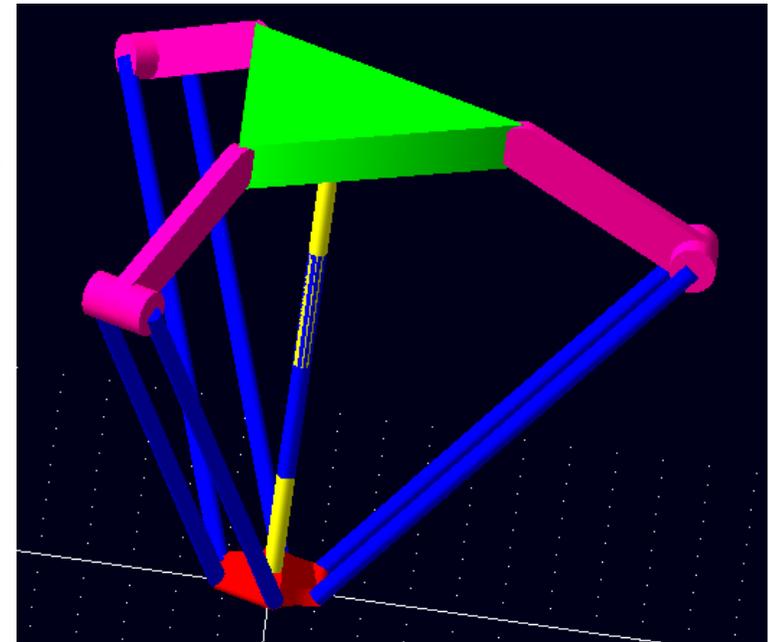
▲ Robot Delta

▲ Descripción

Los motores están montados sobre la base, y transfieren el movimiento a cada articulación rotacional.

Este montaje permite que la carga inercial manejada sea reducida.

Un cuarto grado de libertad puede ser adicionado mediante de un brazo central formado por 2 articulaciones universales, una prismática y una rotacional. Este grado permitirá girar la paleta para la aplicación deseada.



Arquitecturas del Robot (7)

▲ Robot Delta

▲ Aplicaciones

▲ Industriales: IRB 340 *FlexPicker*

Propuesto por Clavel y fabricado por las Compañías Demarex y ABB.

Utilizado para sistemas de alta velocidad que son necesarios en industrias alimenticias, farmacéuticas, electrónicas...

Características:

4 grados de libertad: 3 translaciones y una rotación.

Velocidades:

- lineal: 10m/s

- angular: 3600°/s



Arquitecturas del Robot (8)

▲ Robot Delta

▲ Aplicaciones

▲ Industriales: IRB 340 *FlexPicker*

Características:

Aceleraciones:

- lineal: 100m/s^2

- angular: 1200rad/s^2

Precisión: 0.5 – 3mm

Repetibilidad: 0.5 – 1mm

Carga: 1kg



Contenido General

- ▲ Introducción
 - ▲ Diseño del robot
 - ▲ Arquitecturas del Robot
 - ▲ RoboTennis : Análisis cinemático
 - ▲ Definición
 - ▲ Modelo
 - ▲ Cinemática inversa
 - ▲ Cinemática directa
 - ▲ Resultados
 - ▲ RoboTennis : Análisis Dinámico
 - ▲ Selección del sistema de visión
 - ▲ Trabajos Futuros
-

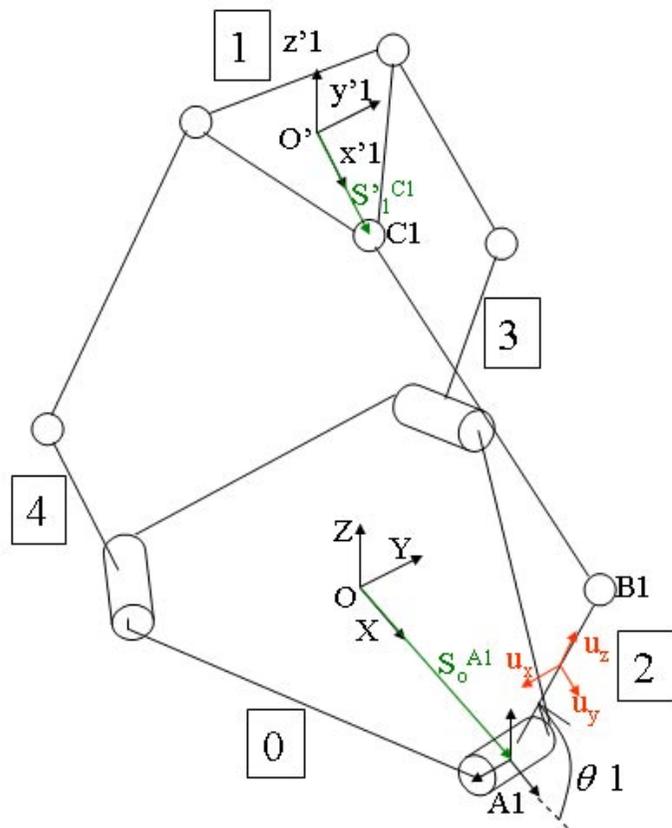
RoboTennis: Análisis cinemático (1)

▲ Definición

- ▲ La cinemática estudia los movimientos del robot sin considerar los pesos y las inercias.
- ▲ Es dividida en dos partes: la cinemática inversa y la cinemática directa.
- ▲ La cinemática inversa permite determinar los valores de las coordenadas articulares a partir de la posición y de la orientación del elemento final. Se resuelve fácilmente por los robots paralelos.
- ▲ La cinemática directa permite determinar la posición y de la orientación del elemento final a partir de los valores de las coordenadas articulares. Es mucho mas compleja a resolver por los robots paralelos.
- ▲ Necesidad de definir un modelo de estudio.

RoboTennis: Análisis cinemático (2)

Modelo



(O, X, Y, Z) : sistema de referencia ligado a la plataforma fija (0)

(O', X', Y', Z') : sistema de referencia ligado a la plataforma móvil (1)

Brazos superiores: (2), (3), (4) .

(u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}) : sistema de referencia ligado al brazo superior (i).

A_i : articulaciones rotacionales

B_i, C_i : articulaciones esféricas

S_x^P : vector de posición del punto P con respecto a un sistema de referencia x.

Modelo con coordenadas reducidas

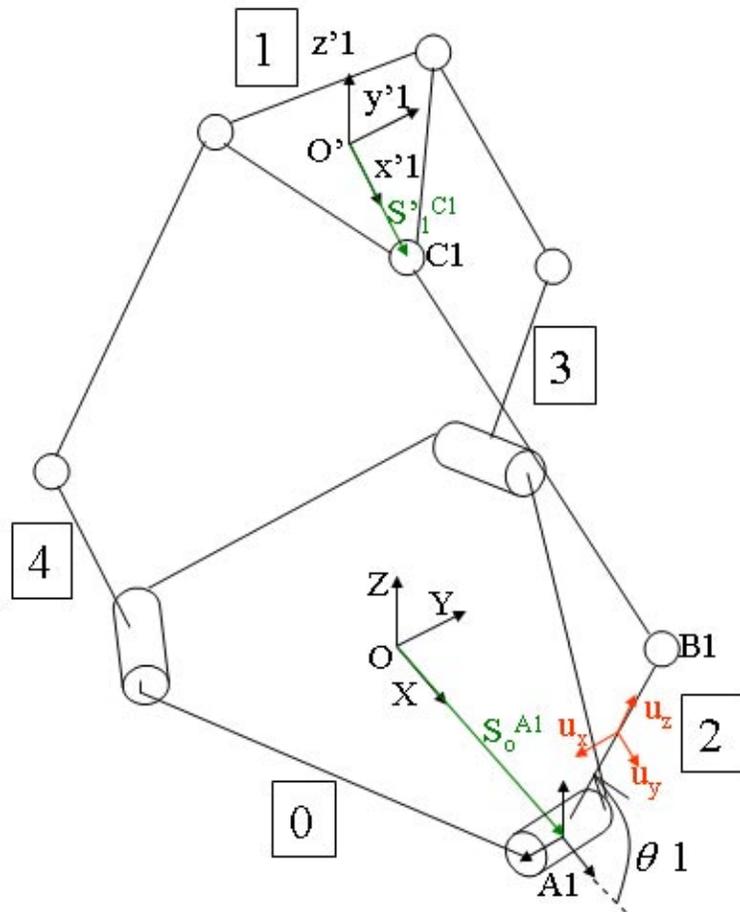
RoboTennis: Análisis cinemático (3)

▲ Cinemática Inversa

- ▲ **Definición:** Dada la posición del efector final $q_1=[r_1]^T$, donde $r_1=[x_1, y_1, z_1]$ representa la posición del elemento final, el problema cinemática inverso calcula las correspondientes coordenadas articulares, es decir, el ángulo para cada uno de los actuadores rotacionales, en un vector $C_{ij}=[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$
- ▲ Problema resuelto por un método geométrico.

RoboTennis: Análisis cinemático (4)

◀ Cinemática Inversa



Resolución:

De la figura, se puede obtener fácilmente la solución para cada una de las cadenas cinemáticas a través de la siguiente ecuación:

$$\|\vec{CA}_n + \vec{AB}_n\|^2 = \|\vec{BC}_n\|^2$$

sabiendo que $\|\vec{BC}_n\|^2 = b^2$

y:

$$\vec{CA}_n + \vec{AB}_n = \begin{bmatrix} xa - xc + a \cos \theta \cos \alpha \\ ya - yc + a \cos \theta \sin \alpha \\ za - zc + a \sin \theta \end{bmatrix}$$

RoboTennis: Análisis cinemático (5)

◀ Cinemática Inversa

Desarrollando esta ecuación llevamos a una expresión de este tipo:

$$u \sin \theta + v \cos \theta = w$$

Donde:

$$\begin{cases} u = 2a(z_a - z_c) \\ v = 2a((x_a - x_c)\cos\alpha + (y_a - y_c)\sin\alpha) \\ w = b^2 - ((x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2 + (z_a - z_c)^2 + a^2) \end{cases}$$

Este tipo de ecuación admite dos soluciones en θ :

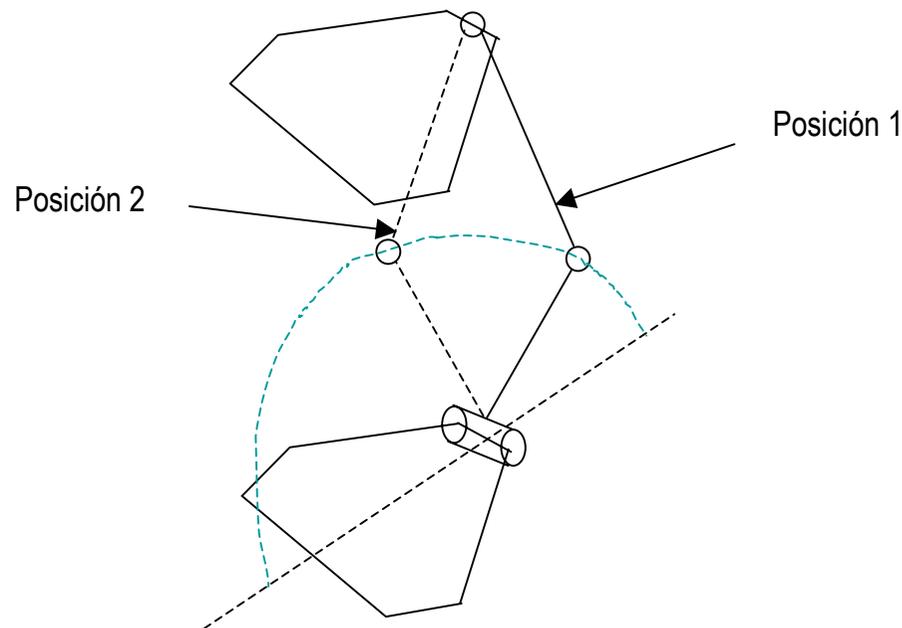
$$\theta = \arctan2(\sin \theta, \cos \theta)$$

Sabiendo que:

$$\begin{cases} \sin \theta = \frac{uw + cv\sqrt{u^2 + v^2 - w^2}}{u^2 + v^2} \\ \cos \theta = \frac{vw - cu\sqrt{u^2 + v^2 - w^2}}{u^2 + v^2} \end{cases} \quad \text{para } c = \pm 1$$

RoboTennis: Análisis cinemático (6)

◀ Cinemática Inversa



Elegimos siempre la posición 1 de la figura para evitar singularidades y problemas tecnológicos, es decir matemáticamente que se conserva el ángulo mas pequeño de los dos en valor absoluto.

Conclusión:

Si conocemos la posición del elemento final dado por el sistema de visión, se puede determinar los valores de los tres ángulos que corresponden a los tres actuadores.

RoboTennis: Análisis cinemático (7)

▲ Cinemática Directa

- ▲ **Definición:** Dada las coordenadas articulares: $C_{ij}=[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$, que son los ángulos de cada uno de los actuadores rotacionales, el problema cinemática directo calcula la posición del efector final $q_1=[r_1]^T$.
- ▲ Problema debe ser resuelto por un método numérico: “el modelo multicuerpo de restricciones, se resuelve en base al algoritmo numérico de Newton-Raphson”

RoboTennis: Análisis cinemático (8)

◀ Cinemática Directa

Modelo multicuerpo:

Vector de coordenadas generalizadas:

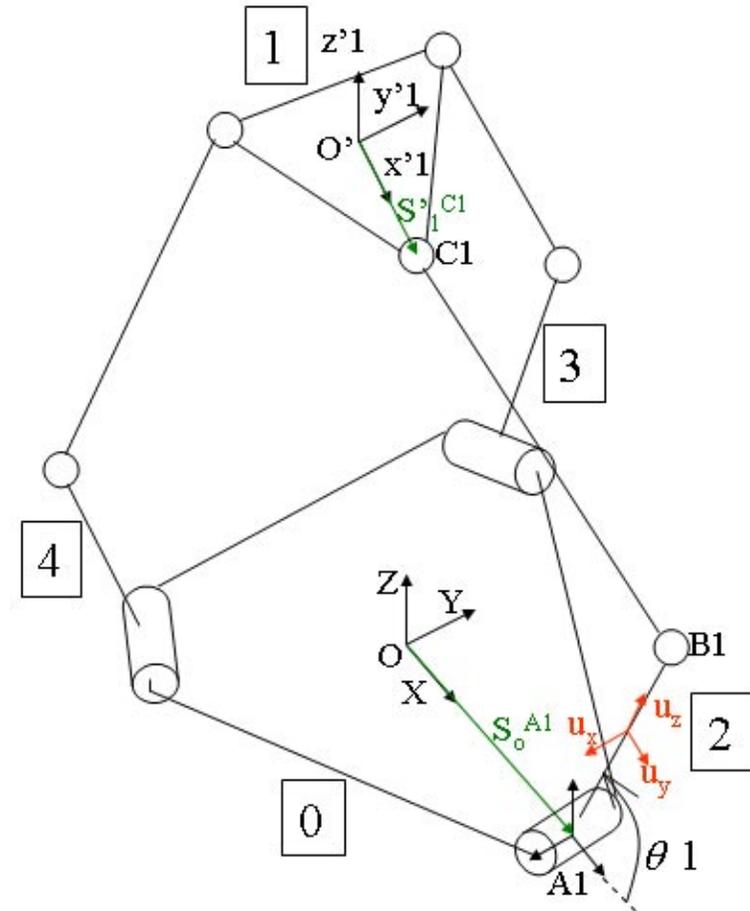
$q_e = [q_1, \dots, q_i, \dots, q_n]^T$ donde n representa el número de cuerpos considerados, en nuestro caso 4 .

Para cada cuerpo: $q_i = [r_i, p_i]^T$

Donde $r_i = [x_i, y_i, z_i]$ representa la posición del elemento i y $p_i = [e_{0i}, e_{1i}, e_{2i}, e_{3i}]$ su orientación de acuerdo con el sistema de referencia $(0, X, Y, Z)$.

$[e_{0i}, e_{1i}, e_{2i}, e_{3i}]$ corresponden a los parámetros de Euler del cuerpo i .

q_e es un vector 28×1



RoboTennis: Análisis cinemático (9)

▲ Cinemática Directa

Modelo multicuerpo:

I. Vector de restricciones, $\phi(q,t)$:

Formado con las restricciones holonómicas, las restricciones de los accionamientos y las restricciones de normalización de los parámetros de Euler

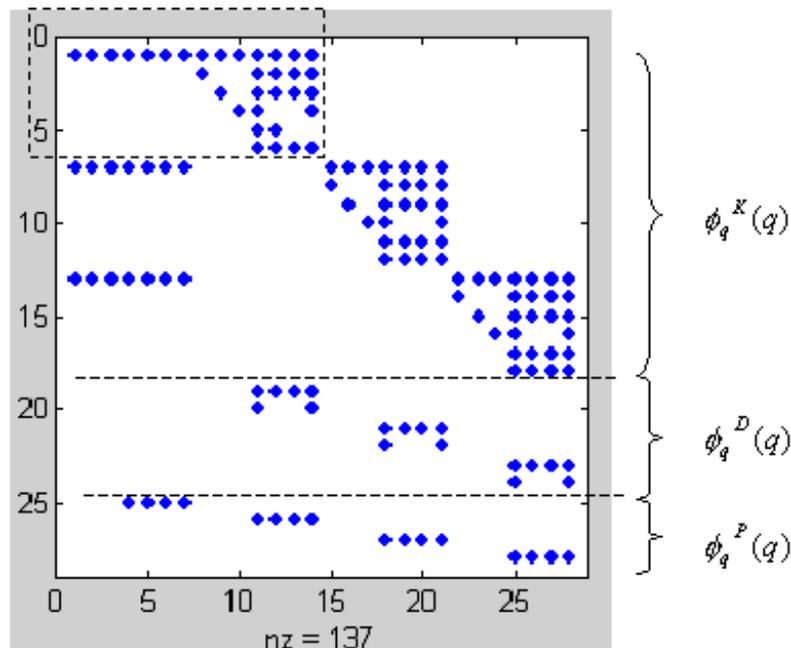
$$\phi(q,t) = \begin{bmatrix} \phi^K(q) \\ \phi^D(q,t) \\ \phi^P(q) \end{bmatrix}_{28 \times 1} = \begin{bmatrix} \phi^{K1}(q) \\ \phi^{K2}(q) \\ \vdots \\ \phi^{Knc}(q) \\ \phi^{D1}(q) \\ \phi^{D2}(q) \\ \vdots \\ \phi^{Dnc}(q) \\ \phi^{P1}(q) \\ \phi^{P2}(q) \\ \vdots \\ \phi^{Pnb}(q) \end{bmatrix}_{28 \times 1} = 0$$

RoboTennis: Análisis cinemático (10)

▲ Cinemática Directa

▲ Modelo multicuerpo:

II. Matriz jacobiana multicuerpo: $\phi_q(qe) = \frac{\partial \phi(q,t)}{\partial q}$



La matriz es de 28x28, como se puede ver con la función `spy` de Matlab.

El recuadro superior izquierdo corresponde a los términos numéricos de las primitivas restricciones holonómicas de la primera cadena cinemática del robot.

RoboTennis: Análisis cinemático (11)

▲ Cinemática Directa

▲ Algoritmo de Newton-Raphson:

Método numérico basado en la estimación inicial del vector de coordenadas generalizadas, q_e .

Método iterativo de Newton-Raphson:

$$\phi_q(q_i)\Delta q_i = -\phi(q_i, t_i)$$

$$q^{i+1} = q^i + \Delta q^i$$

RoboTennis: Análisis cinemático (12)

▲ Modelado en Matlab:

▲ **Cinemática Inversa**

Se plantea calcular los desplazamientos rotacionales en los actuadores para situar el efector final en la posición $[0,0,150]^T$: Realizando un *help* de la función *cin_inversa_simple* aparecen los argumentos de entrada-salida de la función. El argumento de salida de la función corresponde al vector F con los desplazamientos rotacionales (en grados) de los tres actuadores del robot.

RoboTennis: Análisis cinemático (13)

Resultados Matlab

Cinemática Inversa

```
>> help cin_inversa_simple

CIN_INVERSA_SIMPLE          Solucion de la Cinematica Inversa "simple"

Sintaxis

      [Vector]=cin_inversa_simple(poef)

poef:      vector 3x1 que representa la posicion del efector final del robot

Vector:    vector 3x1 de valores de los tres angulos entre los brazos inferiores y
           la base.

>> F=cin_inversa_simple([0,0,150])

F =

    34.9014
    34.9014
    34.9014
```

RoboTennis: Análisis cinemático (14)

▲ Resultados

▲ Cinemática Directa

Se plantea calcular las posiciones que alcanzará el efector final cuando el vector de desplazamiento sea $F1=[10,10,10]^T$ y $F2=[80,80,80]^T$ respectivamente (en grados).

Para la primera iteración, mediante la cinemática inversa, se calcula el vector de coordenadas generalizadas inicial, qe_0 factible. Luego con la función $qe=cin_directa(F, qe0)$ se calculan las nuevas configuraciones que adopta el robot.

RoboTennis: Análisis cinemático (15)

Resultados

Cinemática Directa

$qe_1(1:7)$ corresponde a la posición y orientación (en términos de los parámetros de Euler) del efector final en el primer caso, y $qe_2(1:7)$ en el segundo caso.

```
>> qe0=cin_inversa_complete([0,0,sqrt(134.6^2-(12.5-10+32.5*sqrt(2)/2)^2)+32.5*sqrt(2)/2]);
>> qe1=cin_directa([10,10,10],qe0);
>> qe1(1:7)

ans =

    0.0000
    0.0201
   134.3359
    1.0000
    0.0003
    0.0024
    0.0001

>> qe2=cin_directa([80,80,80],qe0);
>> qe2(1:7)

ans =

   -0.0000
    0.0090
   166.7518
    1.0000
    0.0000
    0.0027
    0.0001
```

Contenido General

- ▲ Introducción
- ▲ Diseño del robot
 - ▲ Arquitecturas del Robot
 - ▲ RoboTennis : Análisis cinemático
 - ▲ RoboTennis : Análisis Dinámico
 - ▲ Definición
 - ▲ Modelo del RoboTennis en ADAMS: herramienta
 - ▲ Simulación
- ▲ Selección del sistema de visión
- ▲ Trabajos Futuros

RoboTennis: Análisis dinámico

▲ Objetivo

Calcular los pares de los motores para muy altas velocidades y aceleraciones en el espacio de trabajo

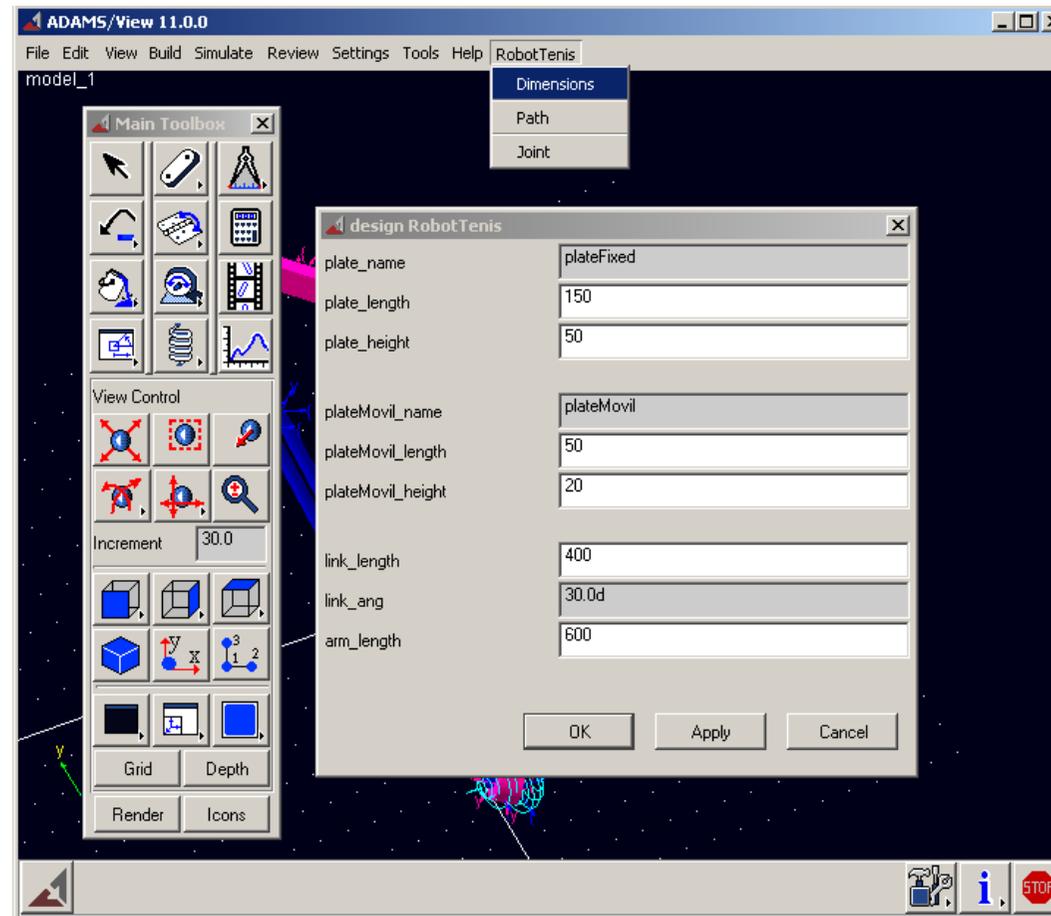
Para lograr este objetivo se requiere:

- definir la velocidad de trabajo del robot
- la relación entre los radios de la plataforma móvil y de la plataforma fija
- las longitudes del brazo superior e inferior

Para facilitar el análisis desarrolló una herramienta para el modelado y simulación del RoboTennis en ADAMS 11.0.

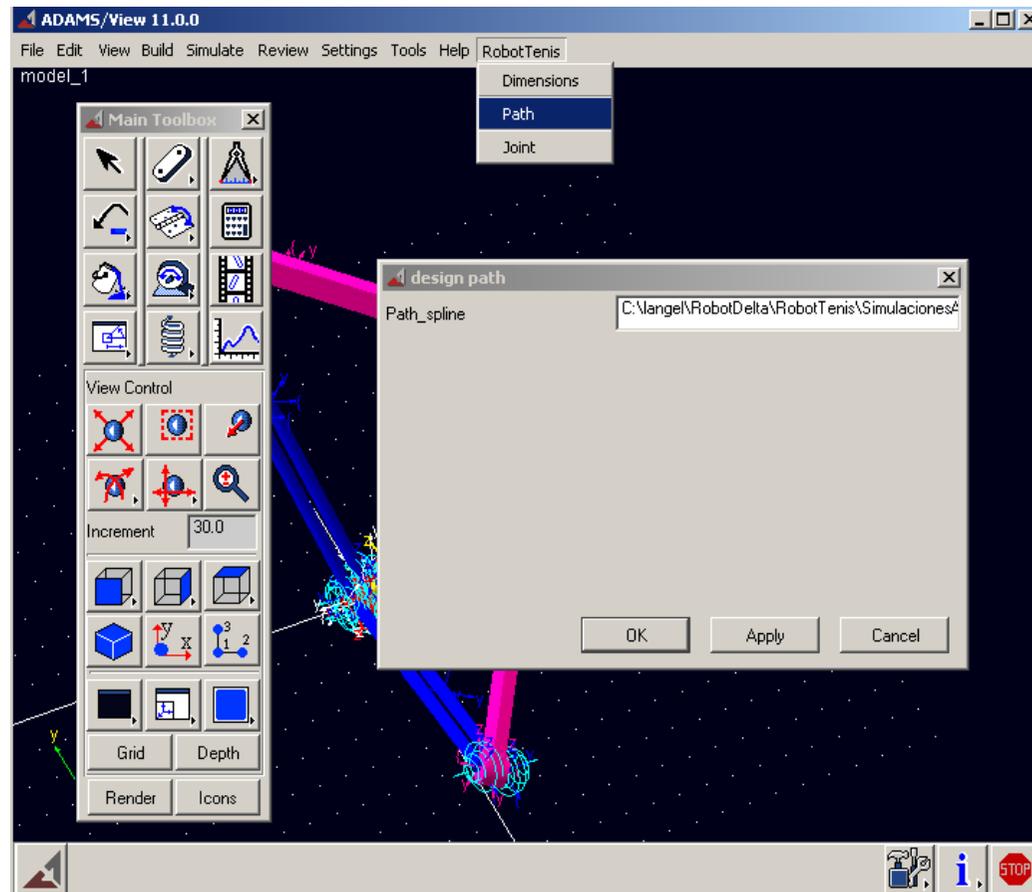
RoboTennis: Análisis dinámico

Modelo del robot en ADAMS: herramienta



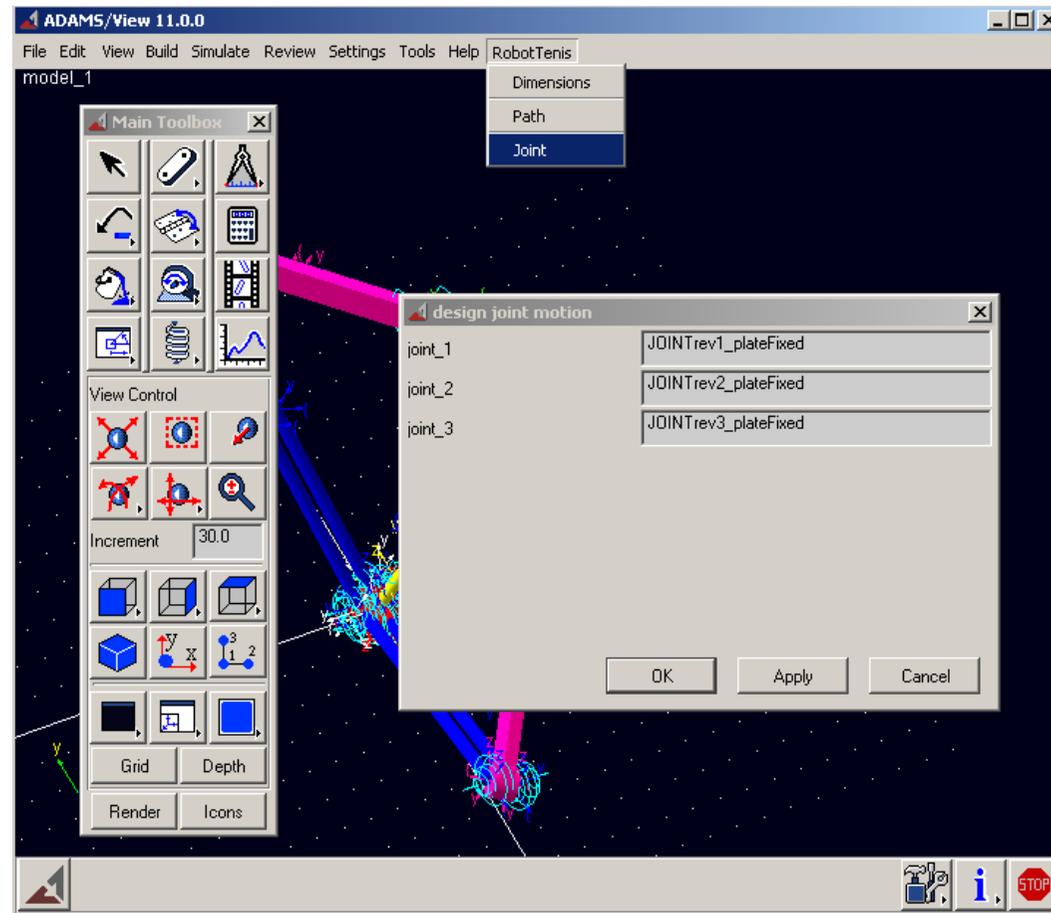
RoboTennis: Análisis dinámico

Modelo del robot en ADAMS: herramienta



RoboTennis: Análisis dinámico

Modelo del robot en ADAMS: herramienta



RoboTennis: Análisis dinámico

▲ Simulación

Partiendo de las dimensiones del robot, de la velocidad de los motores, de la posición inicial del efector final, y de la posición final deseada, el proceso de la simulación esta compuesto por las siguientes etapas:

- generación con Matlab las posiciones angulares de cada motor para cada iteración utilizando un planificador 4-3-4;
- generación el modelo del robot en ADAMS;
- con el archivo generado en Matlab, creación de los splines para cada uno de los motores;
- simulación y análisis de curvas.

RoboTennis: Análisis dinámico (8)

◀ Simulación

Contenido General

- ▲ Introducción
- ▲ Diseño del robot
 - ▲ Arquitecturas del Robot
 - ▲ RoboTennis : Análisis cinemático
 - ▲ RoboTennis : Análisis Dinámico
- ▲ Selección del sistema de visión
- ▲ Trabajos Futuros

Selección de un sistema de visión (1)

- ▲ Ubicado en el extremo del robot
- ▲ Una sola cámara
 - ▲ Modelo del entorno
 - ▲ Modelo 3D del objeto (tamaño de la pelota)
- ▲ Cámara: Modelo XC-HR50 de SONY
 - ▲ Barrido progresivo
 - ▲ Doble velocidad con campo completo
 - ▲ 60 fps/120 fps
 - ▲ captura de imágenes hasta 240 fps
 - ▲ CCD: 1/3"
 - ▲ peso: 50g sin óptica

Selección de un sistema de visión (2)

- ▲ Digitalizador: METEOR 2-MC/4 de MATROX
 - ▲ Color/monocromo para bus PCI
 - ▲ 4MB de memoria
 - ▲ Captura video estándar o no estándar hasta 30 MHz
 - ▲ Doble buffering: permite capturar una imagen mientras se procesa la imagen previamente grabada.
- ▲ tarjeta controladora : dSPACE

Contenido general

- ▲ Introducción
- ▲ Diseño del robot
 - ▲ Arquitecturas del Robot
 - ▲ RoboTennis : Análisis cinemático
 - ▲ RoboTennis : Análisis Dinámico
- ▲ Selección del sistema de visión
- ▲ Trabajos Futuros

Trabajos futuros

- ▲ Mejorar el algoritmo de planificación de trayectorias, que tenga en cuenta el espacio de trabajo.
- ▲ Validar los algoritmos de control mediante ADAMS Control, que permitan determinar la carga útil, las fuerzas externas de contacto, ...
- ▲ Numerosas simulaciones que permitan encontrar los pares de los motores, para elegirlos comercialmente.
- ▲ Construcción del robot
- ▲ Implementar los algoritmos de control visual
- ▲ Desarrollo de pruebas
- ▲ Validación del sistema