ROBOT 2011

ROBÓTICA EXPERIMENTAL

28-29 Noviembre 2011. Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla (España)

Libro de Actas

Editores:

A. Ollero F. Caballero J.R. Martinez de Dios L. Merino

J.A. Cobano A. Rodriguez-Castaño

J.Ferruz

Con la colaboración de los organizadores de sesiones: J. Agirre , J. Amat, M. Armada , R. Aracil, C. Balaguer, L. Basañez, A. Casals, J.A.Castellanos, A. García-Cerezo, A. González, V. Matellán, L. Montano, J. M. M. Montiel, V. Muñoz, J.L. Pons , O. Reinoso, P. Ridao, A. Sanfeliú, P. Sanz y F. Torres.

PREFACIO

La comunidad española de investigación y desarrollo en robótica ha alcanzado un importante nivel contando con numerosos grupos de investigación, proyectos financiados con fondos del Programa Marco de la Comisión Europea, de los programas españoles, de las Comunidades Autónomas y de las empresas. El número y la calidad de las publicaciones han experimentado también un notable incremento. Además, existen numerosos grupos que realizan actividades de transferencia de tecnología a las empresas y organismos. ROBOT 2011 es una muestra de la vitalidad de la esta comunidad.

ROBOT 2011 es la tercera edición de un evento bienal iniciado en Zaragoza en 2007 y reeditado en 2009 en Barcelona. En ROBOT 2011 se ha prestado una atención especial a la Robótica Experimental con contribuciones en las que se describen no sólo los métodos, sino también su validación experimental en laboratorio o en entornos de aplicación. El Programa del evento incluye la presentación de 96 artículos en tres sesiones en paralelo a los que hay que añadir dos sesiones plenarias organizadas por los Grupos Temáticos de Robótica y Visión de CEA, la presentación de la iniciativa Flagship Robot Companion de la Comisión Europea, y una Mesa Redonda sobre la investigación en robótica en España.

ROBOT 2011 se celebra en el marco de la Semana Europea de Robótica en la cual más de 125 organizaciones llevan a cabo 340 actividades en 18 países.

ROBOT 2011, en su formato actual, no hubiera sido posible sin la decidida participación de los miembros del Comité de Programa que han organizado numerosas sesiones y la revisión de los trabajos presentados en estas sesiones. En nombre del Comité Organizador deseo expresar mi agradecimiento a dicho Comité de Programa, a los revisores de los artículos y a los investigadores que han respondido a la llamada presentando tantos trabajos de calidad. Hay que agradecer también a los mencionados Grupos de Robótica (GTROB) y Visión que hayan celebrado sus jornadas anuales en el marco de ROBOT 2011.

De igual forma deseo expresar mi agradecimiento por el trabajo de los miembros del Comité Organizador, y en general de los investigadores del Grupo de Robótica, Visión y Control (GRVC) de las Universidades de Sevilla y Pablo de Olavide, que han dedicado gran cantidad de horas a la organización del evento, así como a FADA-CATEC y a las organizaciones que han apoyado ROBOT 2011.

Por último quiero expresar mis mejores deseos para la comunidad española de investigación y desarrollo en robótica, así como para las futuras ediciones de estos eventos.

Anibal Ollero Baturone Presidente del Comité de Programa

Comité de Programa

Anibal Ollero (Presidente), *Univ. de Sevilla, FADA-CATEC*

Jon Agirre, Tecnalia

Josep Amat, *Univ. Politècnica de Catalunya* Rafael Aracil, *CAR - Univ. Politécnica de Madrid*

Manuel A. Armada, CAR - CSIC

Carlos Balaguer, *Univ. Carlos III de Madrid* Luís Basañez, *Univ. Politècnica de Catalunya*

Fernando Caballero, Univ. de Sevilla

Alicia Casals, IBEC - Univ. Politècnica de Catalun-

Jose Ángel Castellanos, Univ. de Zaragoza

Josep Lluís de la Rosa, *Univ. de Girona* Vicente Feliú, *Univ. Castilla la Mancha* Alfonso García-Cerezo, *Univ. de Málaga* Fernando Gómez, *Univ. de Huelva* Antonio González, *Univ. de Granada*

José Ramiro Martínez, Univ. de Sevilla

Vicente Matellán, *Univ. de León*Luis Merino, *Univ. Pablo Olavide*Luis Montano, *Univ. de Zaragoza*Victor Muñoz, *Univ. de Málaga*José Luís Pons, *CAR - CSIC*

Óscar Reinoso, Univ. Miguel Hernández

Pere Ridao, Univ. de Girona

Miguel Ángel Salichs, Univ. Carlos III de

Madrid

Alberto Sanfeliú, Univ. Politècnica de Cata-

lunya

Pedro Sanz, *Univ. Jaume I* Rafael Sanz, *Univ. de Vigo*

Fernando Torres, *Univ. de Alicante* Eduardo Zalama, *Univ. de Valladolid*

Comité Organizador

Publicaciones: José Antonio Cobano, *Univ. de Sevilla*Finanzas: Joaquín Ferruz, *Univ. de Sevilla*Web/Difusión: Begoña C. Arrúe, *Univ. de Sevilla*Gestión local: Guillermo Heredia, *Univ. de Sevilla*Registro: Ángel Rodríguez, *Univ. de Sevilla*

Patrocinadores

pañol de Automática

Vicerrectorado de Investigación, Universidad de Sevilla.



Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla

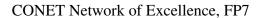
Grupo Temático de Robótica, Comité Es-







Plataforma Tecnológica Española de Robótica





Red Temática en Visión por Computador, Comité Español de Automática



Organizadores

Grupo de Robótica, Visión y Control



Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales



Índice general

Prefacio
Comité de Programa
Comité Organizador
Patrocinadores
Sesión 1.a: Navegación y Control Visual
Navegación Reactiva de un Robot Móvil usando Kinect
Control Visual Dinámico del Sistema RoboTenis para el Seguimiento y Golpeo de una Pelota de Ping-Pong
Visual Navigation by Means of Three View Geometry
Visual Odometry with an Appearance-based Method

Control visual combinado de dos robots acoplados para su aplicación a tareas de manipulación	33
Sesión 1.b: Robótica Asistencial	38
Key Aspects of Biological Postural Control in Robotics	38
Improving target acquisition for users with cerebral palsy using an inertial person-computer interface	43
Control de un brazo robot mediante una interfaz cerebro-máquina no invasiva espontánea	49
Robotic platform as assistant to training of children with motor impairments	54
Diseño de una Arquitectura de ortesis Adaptativa y Estudio de la Personalización de su Grado de Asistencia	60
Sesión 1.c: Robótica para aplicaciones de campo	66
Planificación de trayectorias bi-objetivo en robótica aérea para agricultura de precisión	66
Outdoor Motion Robots Planning using the Fast Marching Method	72
Maniobras 3D en el Robot ALACRANE: Paso de un Desnivel con apoyo del manipulador en el Suelo	80
Mobile Robot Navigation for Remote Handling operations in ITER	85
Experiencias en robótica aplicada a invernaderos	91

Sesión 2.a: Robots Humanoides
Using Humanoids for Teaching Robotics and Artificial Intelligence Issues. The UJI Case Study
Modelling and simulation of the humanoid robot HOAP-3 in the OpenHRP3 platform 10:
Diseño y evaluación experimental de bípedos pasivos
Aprendizaje genético de modos de caminar para el humanoide Nao
Arquitecturas de control sobre robots Nao en la SPL de Robocup
Sesión 2.b: Docencia en Robótica
Creación de laboratorios virtuales de robótica mediante EjsRL
Herramientas virtuales para el estudio cinemático de robots paralelos
Prácticas de Laboratorio mediante Robots Lego NXT y LabVIEW en la Docencia de Tolerancia a Fallos
Diez años dando clases de Robótica con HEMERO
A Toolkit for Robot Grasping Simulation
Sesión 2.c: Robots de Cinemática Paralela
Anlicación de un robot delta a la manipulación de cebollas y vegetales

	New Geometric Approaches to the Singularity Analysis of Parallel Platforms 173
	Dimensional Synthesis of a 3PSU-1S Parallel Manipulator
	Control strategies using redundant sensors applied to parallel robots 189
Sesi	ón 3.a: Sistemas Multi-Robot
	Multirobot Outdoors Event Monitoring in Strong Lightning Transitions 197
	Robot teams for exploration in underground environments
	Experiments on multi-robot routing with communication constraints
	Supporting Approaches for Task Coordination in Large-Scale Rescue
	Distribución óptima de múltiples robots en vigilancia de perímetros
	Robot Formations Motion Planning using Fast Marching
Sesi	ón 3.b: Robots Caminantes
	Evaluación experimental de estrategias de control de fuerza para robots cuadrúpedos 241
	Aplicación de técnicas de control reseteado al Robot SILO4
	Robot híbrido basado en un diseño eficiente de pata
	Mejora en la actuación del sistema de remonte en un dispositivo robótico capaz de superar escaleras

Reducing power consumption in bipedal walking
Análisis cinemático de robot cuadrúpedo utilizando screws
Sesión 3.c: Robótica Submarina
Una nueva Herramienta para la Simulación y Supervisión 3D de Misiones de Intervención Submarinas
Girona 500, un vehículo autónomo submarino para la investigación
El robot submarino teleoperado Garbí: Avances y resultados
Desarrollo de un vehículo de observación oceanográfica autónomo
Optimal Image Keypoint Distribution for Visual Odometry - An Empirical Study . 302
Jornada de visión: Visión y construcción de mapas 3D
Mejora del campo visual de un robot móvil de inspección mediante el empleo de materiales ligeros
Sistema de calibración cámara-láser 3D portable. Aplicación al mapeado 3D 31
Reconstrucción Tridimensional de Entornos Exteriores mediante Robots Móviles . 32
Vehículo robotizado para el levantamiento automático de carreteras en 3D 33
Sesión 4 h: Anlicaciones en Fabricación Aeronáutica 33

La tecnología robótica cambia: Hacia nuevas soluciones para el sector aeronáutico. 33	37
Automated Sealant Application	42
ROPTALMU - Sistema Robótico portable de taladrado para grandes largueros aeronáuticos	50
Mobile Robotic Platform for drilling and riveting aerostructures	55
Sesión 4.c: Robótica Quirúrgica	62
Interfaz de teleoperación para un pequeño robot de cirugía mínimamente invasiva . 36	62
Sistema Integrado de Posicionado, Visualización y Acotamiento de Áreas de Trabajo en Cirugía Ortopédica	67
Cinemática de un robot endoscópico hiper-redundante accionado electromagnéticamente	73
Robot quirúrgico auto-guiado para cirugía mínimamente invasiva en solitario 38	81
Sesión 5.a: Sistemas Inteligentes y Robótica I	89
Uso de técnicas de preprocesamiento de imágenes y aprendizaje para la detección de cambios de atención de una persona en procesos de interacción personarobot	89
Aprendizaje Inteligente de Controladores Difusos para Seguimiento de Trayectorias en Robots Serpiente	97
Vehículo satélite de recogida de contenedores con brazos hidráulicos automatizados 40	<u> 1</u>

Sesión 5.b: Robótica Urbana I
Person Tracking in Urban Scenarios by Robots Cooperating with Ubiquitous Sensors41
Robot Companions for Guiding People in Urban Areas
Robot Teams: Adapting to the environment and to human behaviors
Sesión 5.c: Manipulación Robótica I
Active perception of deformable objects using 3D cameras
Primitivas de manipulación: un paradigma para la planificación y ejecución de la prensión robótica
Control Architecture for a Multifinger Haptic Interface: MasterFinger 3 44
Sesión 6.a: Sistemas Inteligentes y Robótica II
Object-based visual attention for mobile robotics
Terrain Detection for Control of an Outdoor Mobile Robot
A vision-based external localization and automatic evaluation system for mobile robots localization
Algoritmo Minimax aplicado a vigilancia con robots móviles
Sación 6 h. Pohática Urbana II

Planificación y seguimiento de maniobras en entornos dinámicos utilizando redes de sensores inalámbricos: resultados experimentales	1 75
Distributed Semantic Middleware for Social Robotic Services	183
Navegación autónoma basada en la representación del entorno mediante polilíneas etiquetadas semánticamente	188
ACC of a Commercial Vehicle Using Fractional Order Controllers for Throttle and Brake	196
Sesión 6.c: Manipulación Robótica II	504
Control de posición de un robot flexible de tres grados de libertad robusto ante cambios en la carga	504
Planificación de movimientos para conjuntos mano-brazo con numerosos grados de libertad	512
Sistema de agarre basado en una pinza con dedos flexibles	520
Modelado dinámico y control en lazo abierto de una antena sensora flexible de dos grados de libertad	528
Sesión 7.a: SLAM	536
Partición de mapas densos para SLAM monocular en gran escala	536
Experimental Comparison of Optimum Criteria for Active SLAM	543
Active Sensing approach for Range-Only SLAM using Gaussian Mixture Models . 5	551

Known-depth Single-beacon bearings-only SLAM
Dense Outdoor 3D Mapping and Navigation with Pose SLAM
Sesión 7.b: Telerobótica
A Framework for Robotized Teleoperated Tasks
Robust Stability of teleoperation systems under time-varying delays
Teleoperación de manos antropomorfas
Telerobotics for Nuclear Fusion Environment
Exploración teleoperada de entornos desconocidos mediante un conjunto de robots móviles
Sesión 7.c: Robótica Social
Robots for Social Service: ACROSS Project
Propuesta metodológica para la evaluación de la interacción persona-robot en diversos escenarios de aplicación
Robots sociales en la escuela Explorando la conducta interactiva con niños en edad escolar
Playzones: A robust detector of game boards for playing visual games with robots 626
Definición de reglas de comportamiento para un robot cognitivo social 63 ²

Herramientas virtuales para el estudio cinemático de robots paralelos

O. Reinoso, A. Gil, L. Payá, D. Úbeda, M. Ballesta

Abstract—En este artículo se presentan un conjunto de herramientas desarrolladas mediante Easy Java Simulations que posibilitan el estudio cinemático de diferentes robots paralelos. Los robots paralelos que se han implementado se corresponden con estructuras clásicas ampliamente conocidas. A través de estas herramientas desarrolladas, el alumno puede analizar tanto la cinemática directa como la cinemática inversa de estas estructuras. Además se dota a la interfaz de un planificador de trayectorias a través del cual es posible generar una trayectoria entre un punto final y otro inicial para cada una de estas plataformas. Estas herramientas constituyen en su conjunto un laboratorio virtual de robótica paralela.

I. INTRODUCCIÓN

El nuevo sistema de educación superior se centra en el aumento de la autonomía del alumno, fomentando el aprendizaje autónomo y concede menor importancia a la exposición de los conocimientos por parte del profesor durante las clases magistrales. Así pues, los nuevos planes de estudio y los nuevos títulos de grado, exigen que los estudiantes puedan reforzar sus conocimientos mediante el uso de herramientas y laboratorios que permitan una adquisición de conocimientos diferente a la que viene siendo tradicional. Este aspecto adquiere una gran importancia en la docencia de la Robótica, donde la realización de ejercicios prácticos y la visualización clara del problema a resolver resultan de vital importancia, pero disponer de las plataformas robóticas reales exige una gran cantidad de recursos. En este sentido, el uso de Internet permite al estudiante la realización de pruebas experimentales, bien utilizando equipamiento real o bien simulando el funcionamiento de los dispositivos. Además, permite al alumno el acceso a los recursos docentes en un horario más

En este artículo se presentan un conjunto de herramientas virtuales desarrolladas que posibilitan la realización de experimentos por parte de los alumnos sobre un conjunto de robots paralelos. La herramienta puede ser utilizada en asignaturas de Master en las que se quiera profundizar sobre los aspectos cinemáticos de los robots paralelos de tipo 3RRR, 5R y Delta. La aplicación desarrollada permite la visualización de los resultados de la cinemática directa e inversa de cada uno de los robots mencionados. El alumno puede variar fácilmente los parámetros geométricos de cada robot y calcular las soluciones de la cinemática directa e inversa. Asimismo, la interfaz permite comprobar fácilmente las soluciones de la cinemática inversa, ya que se puede mover el mecanismo mediante el ratón, mientras el alumno

This work was not supported by any organization

O. Reinoso, A. Gil, L. Payá, D. Úbeda, M. Ballesta se encuentran en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Miguel Hernández de Elche, Alicante, Spain o.reinoso@umh.es observa el resultado. Finalmente, las herramientas desarrolladas permiten al estudiante observar los resultados de realizar una planificación de trayectorias entre dos puntos dentro del espacio de trabajo de cada robot.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: seguidamente se tratará sobre la utilización de los laboratorios remotos y virtuales en el ámbito de la docencia universitaria. A continuación, en el apartado II se relacionan trabajos en el ámbito de los laboratorios virtuales, mientras que en el apartado II-A se expondrán las características principales de las librerías *EJS (Easy Java Simulations)*. El apartado III describe en general la cinemática de los robots paralelos que se implementan en el laboratorio virtual. El manejo de la herramientas elaboradas se detalla en el apartado IV. Finalmente, las conclusiones principales se exponen en el apartado V.

II. LABORATORIOS VIRTUALES Y REMOTOS

Es ampliamente conocido que la adquisición de ciertas habilidades en determinadas materias únicamente se puede realizar de forma eficaz mediante la experimentación y resolución de casos prácticos. Tradicionalmente el elemento donde se ha realizado este tipo de experimentación ha sido el laboratorio donde los estudiantes acceden para realizar estos experimentos. El auge de las nuevas tecnologías ha cambiado la forma en la que los alumnos pueden realizar dichas sesiones prácticas [1], con lo que se permite la creación de laboratorios virtuales que emulan el comportamiento de un sistema o dispositivo de interés, o bien laboratorios remotos que permiten el uso de los equipos reales disponibles en el laboratorio de forma remota. Por ejemplo, en [2] se presenta una herramienta destinada a la enseñanza de Control. Permite al estudiante variar los parámetros del regulador y mediante Matlab/Simulink controlar un sistema físico real existente en el laboratorio. El alumno obtiene en respuesta un conjunto de gráficas con el resultado del control realizado.

Si nos centramos en el área de la robótica de manipuladores, debemos mencionar el trabajo publicado en [3], donde se presenta una plataforma capaz de simular el funcionamiento de un brazo robótico. Además, la herramienta permite la teleoperación del brazo robótico real y está integrada dentro de la red española AutomatL@bs. En el área de la robótica paralela, en [4] se presenta un robot paralelo inspirado en el robot industrial Hermes y construido mediante piezas de Lego, acompañado de una herramienta de simulación basada en Matlab. También en [5] se presenta un laboratorio virtual y remoto para la enseñanza de la robótica paralela. El laboratorio está formado por un simulador de la cinemática directa e inversa de una estructura de tipo 3-PUU y un

sistema de control remoto del dispositivo real fabricado con piezas de Lego NXT.

II-A. EASY JAVA SIMULATIONS

Durante los últimos años se han propuesto multitud de herramientas y laboratorios tanto virtuales como remotos que posibilitan la realización y experimentación con equipos docentes de forma remota. La mayor parte de estas herramientas utilizan plataformas propias y específicas de desarrollo dando lugar a una gran variedad de implementaciones distintas. No obstante existen plataformas y herramientas pensadas para el desarrollo de herramientas virtuales y remotas. Tal es el caso de la herramienta de simulación denominada *EJS* (*Easy Java Simulations*) [6]. Esta herramienta posibilita la implementación de forma sencilla y rápida tanto de laboratorios virtuales como remotos.

EJS es una plataforma software que permite implementar simulaciones gráficas avanzadas. Resulta una herramienta sencilla que ayuda a programadores no expertos a crear simulaciones interactivas en Java, habitualmente con fines de enseñanza o aprendizaje. Sobre esta plataforma es relativamente sencillo implementar simulaciones elaboradas y complejas que resultan muy interactivas para los usuarios y estudiantes. Una de las ventajas importantes de esta herramienta radica en que es un software libre que puede ser descargado gratuitamente del sitio web ¹.

Estas simulaciones en EJS se basan en el paradigma ampliamente conocida como modelo-vista-control. En EJS la vista y el control se encuentran integrados tal y como se representa en la figura 1. Por lo tanto podemos identificar dos partes bastante diferenciadas: el modelo y la vistacontrol. El modelo se encuentra constituido por las variables de la simulación, su valor y contenido inicial, así como por las ecuaciones matemáticas que rigen la evolución del sistema. Para su implementación EJS proporciona diferentes alternativas: un editor de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs), y un panel de evolución donde definir las relaciones entre las variables. Por su parte, la vista-control aglutina la interfaz de usuario donde se muestra la representación gráfica de los diferentes estados del sistema. Ambas partes se encuentran totalmente interconectadas, de forma tal que cualquier cambio en el estado del modelo es visualizado en la vista, y si el usuario interacciona con ésta mediante los controles de la interfaz, es capaz de modificar el valor de una variable del modelo y en consecuencia modificar su comportamiento.

Recientemente se han desarrollado un conjunto de laboratorios virtuales y remotos integrados todos ellos dentro de esta herramienta común. En este sentido, recientemente se han integrado dentro de esta herramienta un conjunto de laboratorios virtuales y remotos para la enseñanza de la Automática dentro del proyecto *AutomatL@bs* [7]. En el mismo se integran tanto sistemas de dispositivos de control bajo diferentes plataformas [8], como otro conjunto de dispositivos [9] [10]. Estas experiencias muestran la elevada

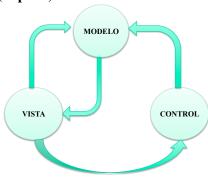


Fig. 1. Sistema modelo-vista-control en EJS

capacidad de desarrollo de laboratorios virtuales y remotas que se pueden implementar a través de esta herramienta.

III. ROBOTS PARALELOS

Los robots paralelos se denominan habitualmente de cadena cerrada y consisten básicamente de una plataforma móvil unida a una fija a través de una o varias cadenas cinemáticas [4]. Cada una de las cadenas se encuentra gobernada por un actuador. Las plataformas paralelas presentan unas ventajas sustanciales con respecto a las plataformas series [11]:

- Los accionamientos de potencia conectan directamente la base del robot al efector final y sirven de elementos estructurales.
- Son mecanismos que presentan una alta rigidez y un reducido peso.
- Presentan elevadas velocidades de operación en comparación con otras estructuras.

No obstante también presentan algunas desventajas:

- La cinemática de los robots paralelos es más complicada
- El espacio de trabajo suele ser pequeño.
- Las configuraciones singulares son más difíciles de analizar.
- No existe, como en los robots tipo serie, de un modelo dinámico general para las plataformas paralelas. Esto dificulta el desarrollo de algoritmos de control.

Por estos motivos se ha observado la necesidad de dotar a los estudiantes de un conjunto de herramientas sobre las cuales puedan desarrollar algunas pruebas para el cálculo de la cinemática tanto directa como inversa de un conjunto de robots paralelos ampliamente conocidos. En concreto se han escogido los robots 3RRR, 5R y delta, por su versatilidad y sencillez. A continuación se ofrecen algunos detalles de cada uno de estos robots.

III-A. Robot Paralelo 3RRR

El robot paralelo 3RRR consiste de una plataforma móvil y una fija, conectadas por tres cadenas cinemáticas. Cada una de estas cadenas cinemáticas contiene tres juntas de revolución. Cada una de las juntas unidas a la plataforma

Ihttp://fem.um.es/Ejs

fija permite un grado de libertad. El efector final se conecta a los eslabones mediante una junta pasiva y los eslabones se conectan a la base mediante una junta activa. Esta configuración conforma la plataforma plana de tres grados de libertad como la representada en la figura 2. En los robots paralelos

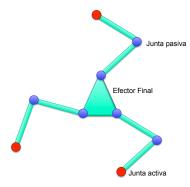


Fig. 2. Plataforma paralela plana 3RRR

se presenta la circunstancia de que el modelo cinemático inverso es fácilmente deducible, mientras que la obtención del modelo cinemático directo es más complejo y en muchos casos no tiene una única solución analítica. En cualquier caso tanto uno como otro se determinan a partir de ciertas consideraciones trigonométricas que se pueden derivar a partir de la geometría del mecanismo (ver figura 3).

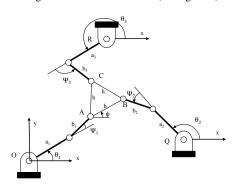


Fig. 3. Configuración geométrica del robot paralelo 3RRR

La cinemática inversa se puede calcular a partir de las relaciones geométricas que se derivan de la figura 3, obteniendo los valores de las variables articulares (juntas activas θ_1 , θ_2 y θ_3), a partir de la posición de uno de los puntos del efector final. Para ello, siendo (x_A, y_A) las coordenadas del punto A, se pueden plantear las siguientes ecuaciones:

$$e_1 = -2y_A a_1 \tag{1}$$

$$e_2 = -2x_A a_1$$
 (2)
 $e_3 = x_A^2 + y_A^2 + a_1^2 - b_1^2$ (3)

$$e_3 = x_A^2 + y_A^2 + a_1^2 - b_1^2 (3)$$

obteniendo:

$$\theta_1 = 2 \tan^{-1} \frac{-e1 \pm \sqrt{e_1^2 + e_2^2 - e_3^2}}{e_3 - e_2} \tag{4}$$

Para el cálculo de los otros valores (θ_1, θ_2) es preciso hacer uso de unas sencillas relaciones intermedias.

De esta manera la cinemática inversa resulta en un cálculo relativamente sencillo. Como se decía con anterioridad no resulta tan sencillo el cálculo de la cinemática directa del robot paralelo. La cinemática directa consiste en dada una configuración de ángulos determinadas en los actuadores que componen el robot $(\theta_1, \ \theta_2, \ y \ \theta_3)$, determinar la posición del punto A y el ángulo de inclinación ϕ que describen la posición de la placa móvil. Para su cálculo se pueden emplear múltiples técnicas desde el empleo de un modelo multicuerpo de restricciones aplicando el método de Newton-Raphson para aproximar la respuesta [12], o bien el método clásico basado en soluciones polinomiales que es el que se ha empleado para la herramienta desarrollada [13].

III-B. Robot Paralelo 5R

El robot paralelo 5R es una plataforma relativamente simple que dispone de 2 grados de libertad y que presenta un movimiento plano. Se encuentra constituido por 4 eslabones móviles y de 5 articulaciones. De estas 5 articulaciones, dos son activas (A_1 y A_2 y las tres restantes son pasivas(B_1 , B_2 y el punto principal P) como se observa en la figura 4. Los actuadores que permiten accionar las juntas activas se disponen en la base con lo que no se incorpora peso sobre la estructura y de esta forma se consiguen algunas de las ventajas propias de los robots paralelos.

La cinemática de este robot paralelo ha sido bastante estudiada por otros autores, principalmente por Liu et al. [14].

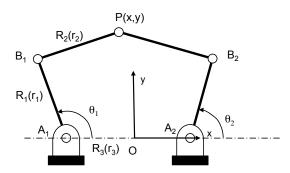


Fig. 4. Configuración geométrica del robot paralelo 5R

Como ocurre habitualmente el estudio cinemático inverso apenas presenta dificultades al emplear las restricciones geométricas impuestas en su configuración (figura 4). Conocida una posición determinada para el punto final P(x, y), se pueden obtener cuatro soluciones diferentes para las variables articulares que conforman las juntas actuadas (θ_1 , θ_2). La solución viene dada por (i=1,2):

$$\theta_i = 2 \tan^{-1} z_i \tag{5}$$

siendo

$$z_i = \frac{b_i + \sigma_i \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{2a_i} \tag{6}$$

$$\sigma_i = \pm 1$$
 (7)

$$a_1 = r_1^2 + y^2 + (x + r_3)^2 - r_2^2 + 2(x + r_3)r_1$$
 (8)

$$b_1 = b_2 = -4yr_1 (9)$$

$$c_1 = r_1^2 + y^2 + (x + r_3)^2 - r_2^2 - 2(x + r_3)r_1$$
 (10)

$$c_1 = r_1^2 + y^2 + (x+r_3)^2 - r_2^2 - 2(x+r_3)r_1$$
(10)

$$a_2 = r_1^2 + y^2 + (x-r_3)^2 - r_2^2 + 2(x-r_3)r_1$$
(11)

$$c_2 = r_1^2 + y^2 + (x - r_3)^2 - r_2^2 - 2(x - r_3)r_1$$
 (12)

El análisis cinemático directo permite calcular la posición del punto principal P(x, y), conocidos los valores articulares θ_1 y θ_2 . En este caso se presentan dos soluciones diferentes para el punto principal a partir de sus valores articulares. En [14] se pueden observar de una forma sencilla estas diferentes soluciones.

III-C. Robot Paralelo Delta

El robot paralelo Delta se encuentra constituido por dos plataformas: una plataforma superior donde se encuentran acoplados los tres accionadores, y una plataforma inferior de dimensiones reducidas conde se encuentra el efector final. Estas plataformas se encuentran conectadas a través de tres cadenas cinemáticas que restringen el movimiento de la plataforma inferior de forma que presente un movimiento plano con respecto a la superficie superior. El movimiento del robot es tridimensional, pero sólo traslacional, sin giros. En las distintas posiciones finales la plataforma móvil ocuparía posiciones paralelas entre sí. En la figura 5 se puede observar la configuración geométrica de un robot Delta.

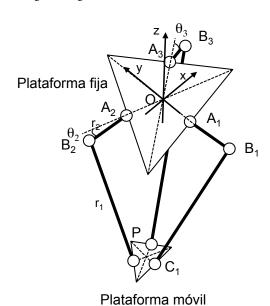


Fig. 5. Configuración geométrica del robot Delta

Los tres motores se emplean en el movimiento de las juntas activas (puntos A_1 , A_2 , A_3). De esta forma se tienen como variables artículares los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 , que permiten posicionar el punto final P en un lugar determinado del espacio de trabajo.

La cinemática inversa del robot Delta se puede resolver empleando las restricciones geométricas derivadas del movimiento de sus eslabones y articulaciones. De esta forma es posible determinar los ángulos precisos en las variables articulares para poder alcanzar una determinada posición del efector final. Para el cálculo de estos valores se pueden emplear típicamente diferentes métodos [15] [16].

Igualmente existen diferentes posibilidades para el cálculo de la cinemática directa del robot paralelo Delta. En la herramienta desarrollada se ha hecho uso de la solución aportada en [17].

IV. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA DESARROLLADA

La herramienta desarrollada constituye un laboratorio virtual donde experimentar con los tres tipos de robots paralelos anteriormente comentados. Sobre ellos es posible evaluar tanto la cinemática directa, la cinemática inversa, así como generar trayectorias de movimiento desde un punto inicial a un punto final. A continuación se va a comentar algunos detalles de cada una de las tres implementaciones.

IV-A. CINEMÁTICA INVERSA Y DIRECTA

El laboratorio virtual desarrollado permite evaluar la cinemática inversa de los tres tipos de robots considerados con anterioridad. En todos ellos se ha procurado diseñar una interfaz lo más versátil y cómoda posible para el usuario. En la figura 6 se observa la interfaz de usuario para la ejecución de la cinemática del robot.

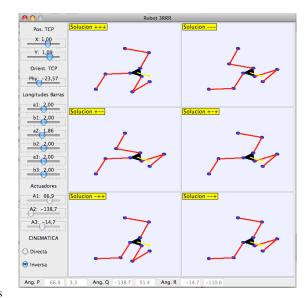


Fig. 6. Interfaz de ejecución de la cinemática del robot 3RRR

Como se observa en la figura 6, para el cálculo de la cinemática inversa, el usuario puede seleccionar la posición y orientación del punto principal mediante el robot, y obtendrá las seis posibles soluciones dependiendo de las configuraciones deseadas que se aportan como solución de la cinemática inversa del robot. Es preciso destacar que con objeto de hacer la interfaz lo más versátil, es posible modificar todos los parámetros del robot, como son entre otros, la posición de los puntos fijos el robot, las longitudes de cada una de las barras (todas ellas son independientes y pueden modificarse a voluntad). Además la posición y orientación del punto principal puede modificarse tanto a través de los correspondientes botones dentro de la interfaz como directamente al posicionar el ratón sobre el punto principal. Asimismo, y sobre el mismo applet el usuario puede interactuar con la cinemática directa del robot, seleccionando los valores de las variables articulares para determinar la posición del punto principal.

De igual forma se ha desarrollado la herramienta virtual, que posibilita el estudio cinemático del robot plano 5R. La imagen de este applet se puede observar en la figura 7.

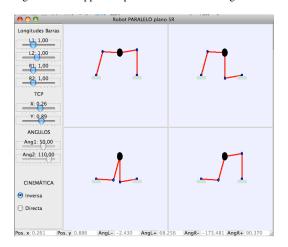


Fig. 7. Interfaz de ejecución de la cinemática del robot 5R

En el caso del robot plano 5R la cinemática inversa ofrece 4 alternativas distintas en función de los valores que se consideren para las articulaciones pasivas. En este caso se tienen dos grados de libertad y en consecuencia será posible seleccionar las coordenadas del punto principal para calcular a partir de la cinemática directa los valores de las correspondientes variables articulares. En la interfaz, y al igual que en el caso anterior, es posible seleccionar la posición del punto principal tanto a través de los correspondientes botones como directamente mediante el ratón. Además, y al igual que en el caso previo, es posible modificar la longitud de cada uno de los eslabones considerado con lo que se puede observar la incidencia de estos valores en el espacio de trabajo alcanzado por el robot.

Por último se observa en la figura 8 la ejecución cinemática de la herramienta virtual desarrollada para su

estudio. En la misma, se puede observar que en este caso la representación geométrica del robot Delta se realiza en tres dimensiones dado que el espacio de trabajo es tridimensional. El usuario puede seleccionar el punto de vista así como los valores de longitud de cada uno de los eslabones. En el cálculo inverso el usuario puede seleccionar la posición del punto principal, para calcular los valores de las variables articulares $(\theta_1, \theta_2, y \theta_3)$. Mientras en el cálculo de la cinemática directa el usuario selecciona estos tres valores para estimar la posición del punto principal.

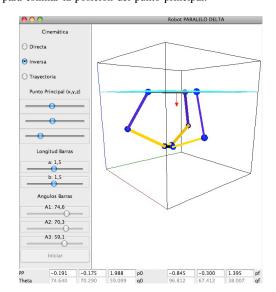


Fig. 8. Interfaz de ejecución de la cinemática del robot Delta

IV-B. GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS

Otra de las posibilidades incluidas en los applets desarrollados consiste en el análisis de las trayectorias entre dos puntos del espacio de trabajo. En este caso se puede seleccionar tanto el punto inicial como el punto final alcanzable dentro del espacio de trabajo, para a continuación determinar la trayectoria a realizar por parte del robot (ver figura 9).

Además de comprobar la trayectoria desarrollada por el robot Delta, se presenta el perfil de posición, velocidad y aceleración para cada uno de los actuadores del robot. Para el cálculo de esta trayectoria se satisfacen restricciones de trayectoria suave y prestaciones de los actuadores. Además se hace uso de una interpolación de tipo 4-3-4 en los tres segmentos de la trayectoria. En la figura 9 se puede observar un ejemplo de la misma.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una herramienta desarrollada que constituye un laboratorio virtual de robótica paralela. En esta herramienta los alumnos pueden experimentar con tres tipos de robots diferentes como son el robot paralelo 3RRR, el robot paralelo 5R y el robot paralelo Delta. La simulación cinemática de estos tres robots tanto directa

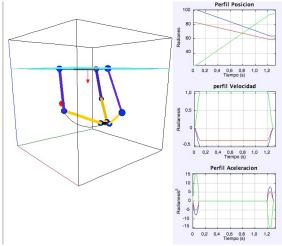


Fig. 9. Trayectoria desarrollada por el robot Delta

como inversa posibilita al alumno analizar las capacidades de cada uno de estos robots así como posibles configuraciones. Además esta herramienta posibilita la generación de trayectorias para poder pasar desde un punto inicial a un punto final por parte de estos robots. Este laboratorio virtual se está utilizando en la actualidad como parte de los ejercicios y prácticas a desarrollar dentro del Master de Investigación en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación en la Universidad Miguel Hernández de Elche.

REFERENCES

- [1] Dormido, S., Çontrol learning: present and future". *Annual Reviews in Control*, no. 28, pp. 115–136, 2004.
- [2] Jiménez, L.M., R. Puerto, O. Reinoso, C. Fernández, R. Ñeco. "Recolab: laboratorio remoto de control utilizando matlab y simulink". RIAI, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, no. 2(2), pp. 67-72, 2005.
- [3] Candelas, F.A., S.R. Puente, F. Torres, F. Ortiz, P. Gil, J. Pomares. "A virtual laboratory for teaching robotics". *International Journal of Engineering Education*, no. 19(3), pp. 363-370, 2003.
- [4] García-Sanz, M. Motilva, M. "Herramientas para el estudio de robots de cinemática paralela: simulador y prototipo experimental". RIAI, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, no. 2(2), pp. 73-81, 2005.
- [5] Martínez, F. J., González, R. Rodríguez, F. Guzmán J. L. "Laboratorio Virtual y Remoto para la Enseñanza de Robótica paralela". VI Jornadas CEA de enseñanza a través de Internet-Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática, 2010.
- [6] F. Esquembre, Easy Java Simulations: A software tool to create scientific simulations in Java", Comput. Phys. Commun., vol. 155, No. 2, 2004, pp 21-26.
- [7] AutomatL@bs, Proyecto AutomatL@bs, http://lab.dia. uned.es/automatlab/.
- [8] R. Costa-Castelló and M. Vallés and L. M. Jiménez and L. Diaz-Guerra and A. Valera and R. Puerto, Întegración de Dispositivos Físicos en un Laboratorio Remoto de Control Mediante Diferentes Plataformas: Labview, Matlab y C/C++", RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 7(1), 2010, pp 22-34.
- [9] H. Vargas and J. Sanchez and C.A. Jara and F. Candelas and O. Reinoso and J.L. Diez, "Docencia en Automática: Aplicación de las TIC a la realización de actividades prácticas a través de internet", RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 7(1), 2010, pp 35-45.

- [10] J. L. Guzman and M. Domínguez and M. Berenguel and J. J. Fuentes and F. Rodríguez and P. Reguera, Entornos de experimentación para la Enseñanza de Conceptos Básicos de Modelado y Control¹⁷, RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 7(1), 2010, pp 10-22.
- [11] R. Aracil and R. Saltarén and J.Mª Sabater and O. Reinoso, Robots paralelos: máquinas con un pasado para una robótica del futuro", RIAI: Rebista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 3(1), 2006, pp 16-28.
- [12] M.N. Cardona, "Modelado Matemático y Análisis Cinemático de Robots Paralelos Planares 3RRR", Tesis Master en Automática y Robótica, E.T.S.I.I. Madrid, Spain
- [13] C. M. Gosselin and J. Sefrioui, "Polynomial solution for the direct kinematic problem of planar three-degree-of-freedom parallel manipulators", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1991, pp 1124-1129.
- [14] X.-J. Liu and J. Wang and G. Pritschow, "Performance atlases and optimum design of planar 5R symmetrical parallel mechanisms?, Mechanism and Machine Theory, vol. 41, 2006, pp. 119-144.
- Mechanism and Machine Theory, vol. 41, 2006, pp. 119-144.

 [15] L.W. Tsai and R.E. Stamper, A parallel manipulator with only translational degrees of freedom", System Research, vol. 72, 1997, http://www.lib.umd.ed/drum/handle/1903/5790.
- [16] R. Clavel, Conception d'un robot parallele rapide a4 degres e liberte", These de Doctorat, 1991, http://biblion.epfl.ch/EPFL/ theses/1991/925/925_abs.pdf.
- [17] http://forums.trossenrobotics.com/tutorials/ introduction-129/delta-robot-kinematics-3276/.