

Jornadas de Automática

Control Cartesiano de robots manipuladores en tareas de servicio en órbita

Redondo-Verdú, C.^a, Ramón, J. L.^a, Fernández, M.^a, Belmonte-Baeza, A.^a, García, G. J.^a, Pomares, J.^{a,*}

^a Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, Ctra San Vicente s/n, 03690 Alicante, España.

To cite this article: Redondo-Verdú, C., Ramón, J. L., Fernández, M., Belmonte-Baeza, A., García, G. J., Pomares, J. 2024. Cartesian control of robot manipulators in on-orbit servicing tasks. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10759>

Resumen

En este artículo se presenta un estudio de distintas aproximaciones para el control Cartesiano de manipuladores robóticos en órbita. Estas aproximaciones se definen para el seguimiento de trayectorias generadas a partir de la planificación obtenida de un optimizador de trayectorias. Este optimizador plantea un problema de control óptimo en el que se establecen las restricciones necesarias para este tipo de manipuladores en órbita. Sin embargo, la planificación de movimientos obtenida a partir del problema de optimización no puede ejecutarse en el robot en bucle abierto. En este artículo se propone control basado en velocidad, aceleración y fuerza para el seguimiento de las trayectorias obtenidas del problema de optimización. Estos controladores tienen en cuenta tanto la dinámica específica de los manipuladores en órbita como las perturbaciones correspondientes. Tras la definición de los controladores, en el apartado de resultados se evalúan las distintas aproximaciones propuestas concluyendo las principales características de implementación y precisión de cada una de ellas.

Palabras clave: Sistemas de control de movimiento, Guiado navegación y control, Naves espaciales de servicio.

Cartesian control of robot manipulators in on-orbit servicing tasks

Abstract

This paper presents a study of different approaches for the Cartesian control of in-orbit robotic manipulators. These approaches are proposed for tracking trajectories generated from the path planning obtained from a trajectory optimization method. This optimizer is based on an optimal control problem in which the necessary constraints for this type of manipulators in orbit are defined. However, the motion planning obtained from the optimization problem cannot be executed on the robot in open loop. In this paper, control based on velocity, acceleration and force is proposed to track the trajectories obtained from the optimization problem. These controllers take into account both the specific dynamics of the manipulators in orbit and the corresponding perturbations. After the definition of the controllers, in the results section the different proposed approaches are evaluated, concluding the main implementation properties and precision of each of them.

Keywords: Motion Control Systems, Guidance navigation and control, Spacecraft servicing.

1. Introducción

Las misiones espaciales futuras y en desarrollo requieren el ensamblaje y la fabricación en órbita para construir, por ejemplo, nuevas instalaciones de exploración humana, como Lunar Gateway (Haws *et al.*, 2019) y grandes infraestructuras comerciales, como Vast Satcom Antennas (Stuttard *et al.*, 2018). El montaje en órbita de dichas infraestructuras

implicará tareas complejas con estrictos requisitos de fiabilidad, eficiencia y seguridad. La utilización de astronautas para llevar a cabo actividades extravehiculares todavía se considera una opción viable, pero se ve comprometida por numerosas limitaciones técnicas y tecnológicas (Richey *et al.*, 2018). Así, la utilización de robots autónomos es una opción preferible, especialmente para tareas donde las operaciones son repetitivas, estructuradas y estandarizadas. Por otro lado,

también es evidente que los robots operarán con herramientas y en entornos fuertemente caracterizados por la presencia humana. De esta forma, las actividades de mantenimiento y construcción en órbita serán realizadas por robots de servicio en órbita y, por esta razón, es necesario contribuir en investigación sobre posibles estrategias de control y planificación de trayectorias para el guiado de este tipo de robots.

Una aproximación utilizada recientemente para el guiado y planificación de robots es la optimización de trayectorias. Estos algoritmos permiten generar automáticamente la planificación de movimiento de robots planteando un problema de optimización. En dicho problema se define una función objetivo y un conjunto de restricciones que incluyen las características cinemáticas y dinámicas del robot a guiar. Además, se incluyen restricciones para generar movimientos realistas y tener en cuenta las características propias del espacio de trabajo donde se desarrollan las tareas. La optimización de trayectorias se ha aplicado con éxito a robots cuadrúpedos y con múltiples patas (Aceituno-Cabezas *et al.*, 2017) (Zhou *et al.*, 2023). Además, este tipo de aproximaciones ha demostrado tener resultados prometedores para su aplicación a la planificación de trayectorias de robots manipuladores en órbita (Basmadji *et al.*, 2020) (Ramón *et al.*, 2022). En este artículo se hará uso de optimización de trayectorias para la planificación de movimiento de un robot manipulador espacial con siete grados de libertad. Sin embargo, esta planificación no se puede ejecutar en bucle abierto en el robot. Es necesario proponer controladores capaces de garantizar el correcto seguimiento de las trayectorias generadas teniendo en cuenta el estado real del robot y evitando las posibles perturbaciones que se produzcan durante el seguimiento.

En este artículo se presenta un estudio de distintas aproximaciones para el control Cartesiano de manipuladores robóticos en órbita, diseñados específicamente para robots de múltiples grados de libertad y que pueden ser utilizados para garantizar el correcto seguimiento de las trayectorias generadas por el optimizador de trayectorias. En (Nanos *et al.*, 2017) se propone un controlador basado en modelo para el seguimiento de trayectorias en el espacio Cartesiano. En el presente artículo, las aproximaciones propuestas incluyen controladores basados en la velocidad, en aceleración y fuerza diseñados para guiar robots espaciales complejos, considerando también la posible redundancia de los robots. Estos controladores tienen en cuenta las condiciones específicas de los robots en órbita, incluidas su dinámica y perturbaciones. En trabajos previos (Papadopoulos *et al.*, 2021) se pueden consultar algunas aproximaciones empleadas para el control Cartesiano de robots en órbita. A partir de estos trabajos se generan en este artículo tres aproximaciones y se analizan durante el seguimiento de trayectorias obtenidas del optimizador. Se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo para determinar el controlador más adecuado durante el seguimiento de trayectorias. Se logran implementaciones eficientes en tiempo real utilizando el *framework* OnOrbitROS (Ramón *et al.*, 2024). Este *framework open source* permite, entre otras características, la integración de la dinámica del robot en la caracterización de los controladores propuestos.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: en el Apartado 2 se describe la notación empleada, así como las principales características cinemáticas y dinámicas del robot. Tras presentar esta arquitectura se describe el optimizador de trayectorias en el Apartado 3. En el Apartado 4 se detallan los controladores basados en velocidad, aceleración y fuerza propuestos para el seguimiento de trayectorias. El artículo finaliza describiendo los resultados obtenidos utilizando los controladores propuestos y las principales conclusiones que se pueden extraer del desarrollo e implementación de los controladores.

2. Cinemática y dinámica del robot a controlar

En este apartado se describe la notación y principales características cinemáticas y dinámicas del robot manipulador a controlar. Se considera un brazo robótico antropomórfico con ne grados de libertad localizado en un satélite base. Este satélite base puede ser definido por la posición y orientación de su centro de masas, \mathbf{t}_b y $\boldsymbol{\phi}_b$ respectivamente, respecto al sistema de coordenadas inercial, y por la configuración articular del brazo, $\mathbf{q}^T \in \mathfrak{R}^{ne}$. Por lo tanto, el vector que representa la configuración conjunta del satélite base y del robot manipulador será $\boldsymbol{\varepsilon} = [\mathbf{t}_b^T, \boldsymbol{\phi}_b^T, \mathbf{q}^T]^T$.

En cuanto a su dinámica, se puede representar mediante una expresión que proporcione la información entre las aceleraciones y las fuerzas y pares entre el satélite base y el robot manipulador. Más concretamente, la dinámica del sistema relaciona la aceleración lineal y angular del satélite base $\dot{\mathbf{v}}_b = [\dot{\mathbf{t}}_b^T, \dot{\boldsymbol{\omega}}_b^T]^T \in \mathfrak{R}^6$ respecto al sistema de coordenadas inercial, las aceleraciones articulares del manipulador, $\ddot{\mathbf{q}}$, con las fuerzas y pares ejercidos en el satélite base, $\mathbf{h}_b \in \mathfrak{R}^6$, y los pares aplicados en las articulaciones del robot manipulador, $\boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^{ne}$. Esta relación puede ser definida de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}_b \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{bb} & \mathbf{M}_{bm} \\ \mathbf{M}_{bm}^T & \mathbf{M}_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_b \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b \\ \mathbf{c}_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $\mathbf{M}_{bb} \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ es la matriz de inercia del satélite base, $\mathbf{M}_{bm} \in \mathfrak{R}^{6 \times ne}$ es la matriz de inercia acoplada entre el satélite base y el robot manipulador, $\mathbf{M}_{mm} \in \mathfrak{R}^{ne \times ne}$ es la matriz de inercia del manipulador, \mathbf{c}_b , y $\mathbf{c}_m \in \mathfrak{R}^6$ son términos de velocidad no lineales del satélite base y del manipulador respectivamente. Para el posicionamiento del robot únicamente se utilizará su movimiento articular, no considerando el guiado del satélite base. Por lo tanto, la Ecuación (1) se puede extender incluyendo perturbaciones como el gradiente gravitacional (Pomares *et al.*, 2018) y reescribirla de la siguiente manera:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{grav} \quad (2)$$

donde $\boldsymbol{\tau}_{grav} \in \mathfrak{R}^{ne}$ son las perturbaciones consideradas, $\mathbf{M}^* \in \mathfrak{R}^{ne \times ne}$ es la matriz de inercia generalizada, $\mathbf{C}^* \in \mathfrak{R}^{ne}$ es el vector de fuerzas de Coriolis, que pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\mathbf{M}^* = \mathbf{M}_{mm} - \mathbf{M}_{bm}^T \mathbf{M}_{bb}^{-1} \mathbf{M}_{bm} \quad (3)$$

$$\mathbf{C}^* = \mathbf{c}_m - \mathbf{M}_{bm}^T \mathbf{M}_{bb}^{-1} \mathbf{c}_b \quad (4)$$

La relación entre la velocidad articular y la velocidad correspondiente del efector final puede expresarse mediante la cinemática diferencial que, en el caso del robot orbital, tiene la siguiente expresión:

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}_m \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}_b \mathbf{v}_b \quad (5)$$

donde $\dot{\mathbf{p}} \in \mathfrak{R}^6$ es la velocidad lineal y angular del efector final del manipulador en el sistema de coordenadas inercial, $\mathbf{J}_m \in \mathfrak{R}^{6 \times ne}$ es la matriz Jacobiana del robot manipulador, y $\mathbf{J}_b \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ es la matriz Jacobiana del satélite base al que está unido el manipulador. Por último, la Ecuación (5) puede representarse de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}_g \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}_b \mathbf{M}_{bb}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\ell} \\ \boldsymbol{\Psi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_g = \mathbf{J}_m - \mathbf{J}_b \mathbf{M}_{bb}^{-1} \mathbf{M}_{bm} \quad (7)$$

donde \mathbf{J}_g es la matriz Jacobiana generalizada del robot orbital y $[\boldsymbol{\ell}^T, \boldsymbol{\Psi}^T]^T \in \mathfrak{R}^6$ es el momento lineal y angular del sistema. Más detalles acerca del cálculo de la matriz Jacobiana puede consultarse en (Pérez *et al.*, 2016).

3. Planificación de trayectorias

En este apartado se describe el método empleado para la planificación de trayectorias de un robot cuyo modelo cinemático y dinámico ha sido descrito en el Apartado 2. La planificación de trayectorias del robot y el satélite base se genera utilizando optimización de trayectorias mediante la formulación de un problema de control óptimo (OCP). La información necesaria para la formulación del OCP es la localización inicial del satélite base $\mathbf{t}_b(t=0) = \mathbf{t}_{b0}$ y $\boldsymbol{\phi}_b(t=0) = \boldsymbol{\phi}_{b0}$, la posición final deseada a alcanzar $\mathbf{t}_b(t=T) = \mathbf{t}_{bd}$ y $\boldsymbol{\phi}_b(t=T) = \boldsymbol{\phi}_{bd}$, la duración de la trayectoria T , así como la posición inicial y final del manipulador.

A partir de esta información, el OCP es capaz de generar tanto la trayectoria del satélite base como del manipulador para alcanzar el objetivo en el tiempo en el que se ha de describir la trayectoria, T . Para ello, el OCP incluye como restricciones las características cinemáticas y dinámicas del robot y las restricciones impuestas por el espacio de trabajo en el que se desarrolle la tarea. Además, se plantea como función objetivo a minimizar la de obtener un movimiento suave del satélite base (minimización de las aceleraciones del satélite), así como la minimización de las acciones de control con el propósito de reducir el consumo necesario para describir la trayectoria. Más detalles del algoritmo de planificación, OCP planteado y restricciones del problema pueden consultarse en trabajos previos (Ramón *et al.*, 2022), (Pomares *et al.*, 2023).

Una vez que se resuelve el OCP se obtiene la trayectoria deseada a seguir para el extremo del robot (así como para el satélite base), es decir, $[\mathbf{t}_b^T, \boldsymbol{\phi}_b^T, \mathbf{p}(t)^T]^T$. Sin embargo, es necesario un controlador capaz de asegurar el correcto

seguimiento de la trayectoria ante perturbaciones y teniendo en cuenta las condiciones orbitales en el que se desarrolle la tarea. Para ello, en el Apartado 4 se proponen distintos controladores que serán evaluados durante el seguimiento de trayectorias.

4. Controladores Cartesianos para robots en órbita

En este apartado se propondrán distintos controladores que se han clasificado en controladores basados en velocidad, aceleración y fuerza. En estos controladores se considera $\mathbf{p}_d(t)$ la trayectoria del efector final del robot manipulador generada mediante el OCP. Por lo tanto, $\mathbf{p}(t)$ será la trayectoria Cartesiana real descrita por el robot. Los controladores tratarán reducir el error $\mathbf{e} = \mathbf{p}_d(t) - \mathbf{p}(t)$ teniendo en cuenta las características dinámicas del robot considerado.

4.1. Controlador basado en velocidad

Los controladores basados en velocidad presentan un comando de velocidad en el espacio Cartesiano. Por lo tanto, la referencia Cartesiana puede representarse de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{p}}_r = \dot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{K}_p(\mathbf{p}_d - \mathbf{p}) \quad (8)$$

donde \mathbf{p}_d , $\dot{\mathbf{p}}_d$ representa la posición deseada y la velocidad correspondiente a la trayectoria Cartesiana a seguir, y \mathbf{K}_p es una matriz de ganancias proporcional definida positiva. La referencia de velocidad articular se puede obtener a partir de las referencias Cartesianas obtenidas en (8) de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{J}_g^+(\dot{\mathbf{p}}_r - \mathbf{v}_{gm}) - \alpha(\mathbf{I} - \mathbf{J}_g^+ \mathbf{J}_g) \mathbf{v}_v \quad (9)$$

donde α es una constante positiva, y \mathbf{v}_v se considera como una función de coste a aplicar en el espacio nulo. Además, en (9), $\mathbf{v}_{gm} = \mathbf{J}_b \mathbf{M}_{bb}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\ell} \\ \boldsymbol{\Psi} \end{bmatrix}$, donde $[\boldsymbol{\ell}^T, \boldsymbol{\Psi}^T]^T \in \mathfrak{R}^6$ es el momento angular y lineal del sistema $[\boldsymbol{\ell}^T, \boldsymbol{\Psi}^T]^T \in \mathfrak{R}^6$.

Considerando las velocidades de referencia Cartesianas, $\dot{\mathbf{p}}_r$, y las referencias de velocidad articular, $\dot{\mathbf{q}}_r$, obtenidas en las Ecuaciones (8) y (9), la acción de control basada en velocidad teniendo en cuenta el modelo dinámico del robot definido en (2) sería el siguiente:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}^* + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}}_r - \dot{\mathbf{q}}) - \boldsymbol{\tau}_{grav} \quad (10)$$

donde \mathbf{K}_d es una matriz definida positiva que contiene las ganancias para definir la realimentación derivativa de las variables articulares y $\boldsymbol{\tau}_{grav}$ es una estimación del par gravitacional que puede obtenerse tal y como se describe en (Pomares *et al.*, 2018). Cuando se emplea un controlador basado en velocidad, las aceleraciones articulares de referencia se pueden obtener diferenciando las velocidades articulares definidas en la Ecuación (9):

$$\ddot{\mathbf{q}}_r = \frac{d}{dt} \dot{\mathbf{q}}_r \cong \frac{\dot{\mathbf{q}}_r(t) - \dot{\mathbf{q}}_r(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (11)$$

Esta aproximación es fácil de implementar y muestra una gran aplicación práctica debido a los términos de estabilización de errores tanto en el espacio de tareas debido a la Ecuación (8) como en el espacio articular debido a los términos de PD en la Ecuación (10).

4.2. Controlador basado en aceleración

A continuación, se propone un controlador basado en aceleración que emplea directamente información de la aceleración articular en la acción de control. Para ello, en primer lugar, se considera la referencia Cartesiana expresada de la siguiente manera:

$$\ddot{\mathbf{p}}_r = \ddot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{p}}_d - \dot{\mathbf{p}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{p}_d - \mathbf{p}) \quad (12)$$

donde \mathbf{p}_d , $\dot{\mathbf{p}}_d$, $\ddot{\mathbf{p}}_d$ son la posición, velocidad y aceleración Cartesiana deseada de la trayectoria a seguir, y \mathbf{K}_p y \mathbf{K}_d son matrices proporcional y derivativa a ajustar. El controlador basado en aceleración puede obtenerse a partir de la expresión de la dinámica obtenida en la Ecuación (2) de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}^* - \boldsymbol{\tau}_{grav} \quad (13)$$

donde $\ddot{\mathbf{q}}_r$ puede ser obtenida derivando la expresión (6), obteniendo el siguiente valor para la aceleración articular de referencia:

$$\ddot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{J}_g^+(\ddot{\mathbf{p}}_r - \dot{\mathbf{J}}_g \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{v}}_{gm}) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_g^+ \mathbf{J}_g) \mathbf{v}_a \quad (14)$$

donde \mathbf{v}_a es una función de coste a aplicar en el espacio nulo. Este controlador alcanza un seguimiento asintótico en el espacio Cartesiano ya que su comportamiento en bucle cerrado es:

$$\ddot{\mathbf{p}}_d - \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{p}}_d - \dot{\mathbf{p}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{p}_d - \mathbf{p}) \quad (15)$$

4.3. Controlador basado en fuerza

Este apartado propone un controlador basado en fuerza empleando el framework propuesto por Khatib en (Khatib, 1987). En este caso, la expresión general de la dinámica para la tarea viene dada por el siguiente valor:

$$\tilde{\mathbf{M}}(\mathbf{p}) \ddot{\mathbf{p}} + \tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) = \mathbf{F} \quad (16)$$

donde:

$$\tilde{\mathbf{M}} = (\mathbf{J}_g(\mathbf{M}^*)^{-1} \mathbf{J}_g^T)^{-1} \quad (17)$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = (\mathbf{J}_g(\mathbf{M}^*)^{-1} \mathbf{J}_g^T)^{-1} (\mathbf{J}_g(\mathbf{M}^*)^{-1} \mathbf{C}^* - \dot{\mathbf{J}}_g \dot{\mathbf{q}}) \quad (18)$$

Teniendo en cuenta el modelo dinámico obtenido para el manipulador robótico orbital, (2), la acción de control puede ser definida por:

$$\mathbf{F} = \tilde{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{p}}_r + \tilde{\mathbf{C}} \quad (19)$$

donde $\ddot{\mathbf{p}}_r$ es la referencia Cartesiana que puede ser obtenida empleando la Ecuación (12). Por lo tanto, la ley de control final que genera los pares articulares a aplicar al robot es la siguiente:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_g^T \mathbf{F} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_g^T \tilde{\mathbf{J}}_g^T) \mathbf{v}_f - \boldsymbol{\tau}_{grav} \quad (20)$$

donde \mathbf{v}_f es un vector o función de coste a aplicar en el espacio nulo, y $\tilde{\mathbf{J}}_g$ es la pseudoinversa ponderada de la matriz Jacobiana generalizada:

$$\tilde{\mathbf{J}}_g = (\mathbf{M}^*)^{-1} \mathbf{J}_g^T (\mathbf{J}_g (\mathbf{M}^*)^{-1} \mathbf{J}_g^T)^{-1} \quad (21)$$

Como se puede observar en la Ecuación (20), se desacopla el control en el espacio Cartesiano respecto a la dinámica del espacio nulo.

Este controlador alcanza un seguimiento asintótico en el espacio Cartesiano ya que se obtiene el siguiente comportamiento en bucle cerrado:

$$\ddot{\mathbf{p}}_d - \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{p}}_d - \dot{\mathbf{p}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{p}_d - \mathbf{p}) \quad (22)$$

5. Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al utilizar los distintos controladores propuestos. Para ello, se considera un robot manipulador anclado a un satélite base representado en la Figura 1 y cuyos principales parámetros dinámicos se indican en la Tabla 1. Esta tabla muestra el momento de inercia, las masas y dimensiones del satélite base, así como de los eslabones del manipulador.

Para la simulación se ha empleado OnOrbitROS (Ramón *et al.*, 2024) y una órbita de referencia circular con un radio de $r_{orb} = 6878 \text{ km}$. En la simulación se ha considerado únicamente como perturbación el gradiente orbital, debido a que otras perturbaciones como el *drag* atmosférico puede considerarse despreciable en la órbita considerada respecto al gradiente gravitacional.

Para evaluar el comportamiento de los controladores se considera una trayectoria deseada a seguir lineal que ha de desarrollarse durante 10 segundos. En los tres controladores se han empleado matrices diagonales para \mathbf{K}_p y \mathbf{K}_d . En el caso del controlador basado en velocidad se ha considerado $\mathbf{K}_p = \text{diag}(0.1)$, $\mathbf{K}_d = \text{diag}(0.5)$, para el controlador basado en aceleración $\mathbf{K}_p = \text{diag}(0.5)$, $\mathbf{K}_d = \text{diag}(10)$ y para el controlador basado en fuerza $\mathbf{K}_p = \text{diag}(\sqrt{0.5})$, $\mathbf{K}_d = \text{diag}(\sqrt{10})$.

La Figura 1.b, Figura 1.c y Figura 1.d representan los resultados de seguimiento obtenidos para los controladores basados en velocidad, aceleración y fuerza respectivamente. Para cada uno de ellos, se representa el error de posición, $\mathbf{p}_d(t) - \mathbf{p}(t)$, par articular aplicado o acción de control generada por el controlador durante el seguimiento, trayectoria Cartesiana y error de orientación. En cuanto a la trayectoria Cartesiana, se indica en negro la trayectoria deseada y en rojo la obtenida durante el seguimiento. En todos

Tabla 1: Parámetros del robot simulado

Base	Masa (kg)	Altura (m)	Inercia (kg·m ²)					
			I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}	I _{xy}	I _{xz}	I _{yz}
	93	0.843	18.6	15.4	4.1	-0.008	-0.027	0.058
Manipulador	Mass (kg)	Longitud (m)	Inercia (kg·m ²)					
			I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}	I _{xy}	I _{xz}	I _{yz}
Eslabón 1	2.741	0.28	0.0124	0.0042	0.0136	3.6e-05	7.1e-05	-0.0002
Eslabón 2	2.425	0.144	0.013	0.0138	0.0049	1.2e-05	-0.0032	-0.0001
Eslabón 3	2.209	0	0.007	0.0069	0.0039	-0.0001	0.0007	0.0004
Eslabón 4	0.877	0.274	0.0025	0.0027	0.0012	0.0001	-0.0003	0.0004
Eslabón 5	1.878	0.265	0.0035	0.0044	0.0023	1.3e-05	1.03e-05	-9.7e-05
Eslabón 6	0.409	0	0.0001	0.00014	0.00015	-8.9e-08	-4.4e-08	4.2e-07
Eslabón 7	0.308	0	0.0003	0.0002	0.00017	-1.6e-06	1.7e-06	-1.2e-05

los casos se obtiene un correcto seguimiento empleando pares que se mantienen bajos durante el seguimiento. Sin embargo, es posible observar más claramente las diferencias en el comportamiento de los controladores al analizar el error de posición y de orientación. Entre todos los controladores, se obtiene un mejor comportamiento empleando el controlador basado en aceleración.

En los resultados experimentales se observó que el controlador basado en la velocidad propuesto fue sencillo de implementar y logró un buen rendimiento general. Sin embargo, ignora la información sobre las aceleraciones de la trayectoria objetivo. Además, existe una limitación práctica en la elección de la ganancia proporcional porque la ganancia de posición también se incluye como ganancia de amortiguación del espacio de tareas. Este efecto implica que

un aumento en la ganancia de posición también provoca un aumento en la ganancia de amortiguación. Por lo tanto, la ganancia proporcional no se puede aumentar sin afectar la estabilidad del sistema. De hecho, el comportamiento de amortiguación se ve afectado por la ganancia proporcional y este comportamiento resulta difícil de ajustar.

Como se puede observar en la Figura 1.b, aparecen pequeñas oscilaciones durante el seguimiento cuando se aplica el controlador basado en velocidad, mientras que los controladores basados en aceleración y fuerza presentan comportamientos más suaves.

El controlador basado en fuerza utiliza la pseudoinversa ponderada por inercia y permite el desacoplamiento entre la dinámica del espacio nulo y el control en el espacio Cartesiano. Sin embargo, se obtiene un mejor comportamiento

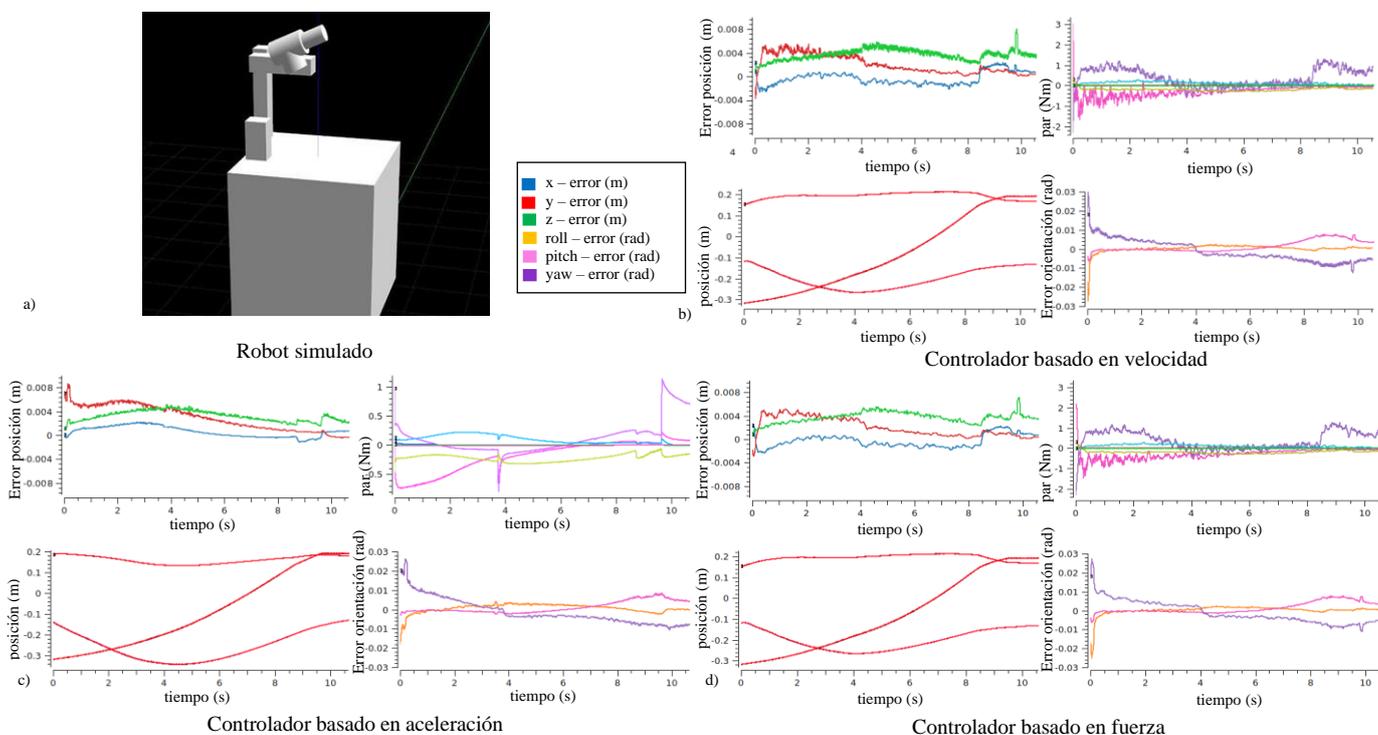


Figura 1: a) Simulación del robot en OnOrbitROS. b) Error de posición, par aplicado, trayectoria Cartesiana y error de orientación empleando el controlador basado en velocidad. c) Error de posición, par aplicado, trayectoria Cartesiana y error de orientación empleando el controlador basado en aceleración, d) Error de posición, par aplicado, trayectoria Cartesiana y error de orientación empleando el controlador basado en fuerza.

en la aproximación basada en aceleración. Este efecto podría deberse a posibles imprecisiones en los cálculos de la matriz de inercia y su inversa que se utiliza en muchos términos diferentes de la ley de control propuesta basada en fuerza.

3. Conclusiones

En este artículo se propone una arquitectura para el guiado de robots en órbita compuesta por un planificador de trayectorias basado en optimización y un controlador Cartesiano para el seguimiento de las trayectorias generadas. Para el seguimiento de las trayectorias se proponen controladores basados en velocidad, aceleración y fuerza y se evalúan en el seguimiento de las trayectorias generadas por el optimizador. En los controladores diseñados se tienen en cuenta las características dinámicas del robot, así como las perturbaciones típicas de la órbita considerada. Aunque todos los controladores presentan un correcto comportamiento, cada uno de ellos presenta unas propiedades en cuanto a implementación y precisión en la práctica, pudiendo afirmar que la aproximación basada en aceleración es en la que mejor desempeño general se ha obtenido.

Se ha empleado OnOrbitROS para la simulación del robot y la implementación de los controladores. Como trabajos futuros se plantea la definición de nuevas perturbaciones en el entorno de simulación con el objetivo de evaluar la planificación y control de los robots empleando entornos lo más realistas posible.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado gracias al proyecto CIAICO/2022/077 “Plataforma de control y simulación de código abierto para escenarios de robótica de servicio en órbita” (Programa AICO 2023, Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana), y por la beca FPU21/02586 del Ministerio de universidades.

Referencias

- Aceituno-Cabezas, B. et al., 2017, Simultaneous contact, gait, and motion planning for robust multilegged locomotion via mixed-integer convex optimization. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, 2531–2538.
- Basmadji, F. L., Seweryn, K. & Sasiadek, J. Z., 2020, Space robot motion planning in the presence of nonconserved linear and angular momenta. *Multibody System Dynamics* 50, 71–96.
- Haws, T. D., Zimmerman, J. S. Fuller, M. E., 2019, SLS, the Gateway, and a Lunar Outpost in the Early 2030s, 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019, 1-15.
- Khatib, O. 1987. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation, *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 3, 43–53.
- Nanos, K., Papadopoulos, E. 2017. On the Dynamics and Control of Free-floating Space Manipulator Systems in the Presence of Angular Momentum. *Frontiers Robotics AI*, 4, 26.
- Papadopoulos, E., Aghili, F., Ma, O., Lampariello, R. 2021, Robotic Manipulation and Capture in Space: A Survey. *Frontiers in Robotics and AI*, 8.
- Pomares, J., Ramon, J. L., Felicetti, L., Olivares-Mendez, M. A. 2023. Trajectory optimization and control of multipod robots in on-orbit servicing operations, in *Proceedings 17th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (European Space Agency (ESA))*.
- Pomares, J., Felicetti, L., Pérez, J., Emami, M. R. 2018. Concurrent image-based visual servoing with adaptive zooming for non-cooperative rendezvous maneuvers, *Advances in Space Research*, 61(3), 862–878.
- Pérez, J., Emami, M. R., Pomares, J. 2016. Direct image-based visual servoing of free-floating space manipulators. *Aerospace Science and Technology*, 55, 1–9.
- Ramón, J. L., Calvo, R., Trujillo, A., Pomares, J., Felicetti, L., 2022, Trajectory optimization and control of a free-floating two-arm humanoid robot. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 45, 1661–1675.
- Ramon, J. L., Pomares, J., Felicetti, L. 2024. OnOrbitROS Github, <https://github.com/OnOrbitROS/>, (accessed 29.05.24).
- Richey, D., Cichan, T., Sabolish, D., 2018, Gateway Mission Operations and Crew Activities, 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. AIAA 2018-5246.
- Stuttard, M., Amos, S., Aspden, P., Bowyer, M., Bridges, C., McLaren, S., 2018, Vast Satcom Antennas (VASANTs) as an enabling technology for commercial satellite communications. *Proceedings of the 16th Reinventing Space Conference (RISpace 2018)*, 1-3.
- Zhou, S. et al., 2023, Cascade Trajectory Optimization with Phase Duration Adaption and Control for Wheel-Legged Robots Overcoming High Obstacles in 2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 832–839.