

Evaluación experimental del funcionamiento de un prototipo del robot astronauta TORVEASTRO V2

Jorge E. Araque Isidro¹ Daniele Cafolla¹
Marco Ceccarelli¹

LARM2—Laboratory of Robot Mechatronics, University of Rome Tor Vergata, 00133 Rome, Italy
jorgeenrique.araqueisidro@students.uniroma2.eu, marco.ceccarelli@uniroma2.it, contact@danielecafolla.eu

Resumen

Este artículo presenta los problemas y necesidades que puede enfrentar un robot astronauta de servicio cuando se utiliza en una estación espacial. Los requisitos tienen en cuenta los límites de lanzamiento y operación en el espacio, así como todos sus problemas. Se ha construido un prototipo TORVEASTRO V2 de un brazo antropomórfico con cables que actúan de hombro y codo como desarrollo inicial. Se ha utilizado un prototipo de laboratorio para realizar una caracterización experimental del diseño propuesto. El objetivo del presente artículo es el de presentar el funcionamiento del brazo antropomórfico mostrando resultados de trayectorias, velocidades y energía consumida por este prototipo para así obtener información que ayude a mejorar su diseño en trabajos futuros.

Palabras clave: Robótica, Robots de Servicio, Robots Astronautas, Prototipos, Validación Experimental.

Abstract

This paper aims to highlight issues and needs that an astronaut service robot faces when used in a space station. The requirements consider the launch and operating limits in space, as well as all their issues. A prototype of TORVEASTRO V2 an anthropomorphic arm with links of shoulder and elbow actuated by cables has been constructed as early development. A lab prototype has been used to conduct an experimental characterization of the proposed design. The goal of this paper is to show the anthropomorphic arm performance with trajectories, velocities, and power consumption results, this is necessary to acquire data to improve its design in future works.

Keywords: Robotics, Service Robots, Astronaut Robots, Prototypes, Experimental Validation.

1. Introducción

Durante años los robots de servicio han mostrado una gran utilidad a la hora de ayudar a los seres humanos en sus tareas habituales. Estos se han convertido también en grandes aliados a la hora de realizar tareas que pueden considerarse peligrosas para la integridad del humano, en casos de tareas como el tratamiento de objetos radiactivos, tareas industriales, tareas pesadas. Entre estas las más peligrosas para la integridad del ser humano son aquellas que se desarrollan en el espacio exterior, esto debido a las condiciones adversas a la vida en este ambiente hostil para la vida (1). Debido a los avances tecnológicos que la humanidad ha tenido,

la actividad en el espacio exterior debe incluirse dentro de esos trabajos que ponen en riesgo la vida para un ser humano (2), en este caso el hecho de tener en órbita la Estación Espacial Internacional (EEI) (3).

Debido a las complejas tareas que se presentan en la EEI (4) se hace necesario la ayuda de robots para tener el mínimo riesgo y la mayor efectividad posible (5). Las actividades más comunes que se presentan son las de mantenimiento (6), de la propia estación o de objetos de apoyo en la misma, de reparación, de acoplamiento; entre otras tareas afuera de la misma que pueden ser ayudadas a realizar con robots de servicio (7).

Algunos ejemplos de este tipo de robots son Robonaut, Canadarm, y ESA EuroBot (8). Estos robots han sido desarrollados para tareas complejas y que son de una gran ayuda a la hora de mantener a la EEI en funcionamiento hasta la actualidad (9). El desarrollo de estos robots muestra la necesidad de desarrollar alternativas para apoyar las tareas de los astronautas en el espacio exterior.

En este artículo se mostrarán los primeros experimentos que se realizaron con el prototipo del robot astronauta TORVEASTRO V2, (8) que se construyó en LARM2 con el objetivo de observar el funcionamiento y evaluar mediante la medición de las trayectorias, velocidades y la energía consumida del brazo antropomórfico el desempeño del diseño conceptual que se plantea para este robot astronauta de servicio TORVEASTRO en futuros desarrollos.

2. Diseño del robot astronauta TORVEASTRO

El robot astronauta de servicio TORVEASTRO, se ha diseñado teniendo en cuenta que para ser usado en la Estación Espacial Internacional (EEI). La estación cuenta con un diseño el cual les permite a los astronautas desplazarse fuera de ella. Con el fin de realizar actividades de mantenimiento, reparación, construcción, entre otras. Estas actividades son realizadas principalmente por astronautas en colaboración con algunos robots que ayudan a agilizar el trabajo de una forma segura. Dentro del diseño de la EEI en su exterior se fijaron pasamanos que se distancian entre cada uno de ellos alrededor de 1 m. El objetivo principal de estos pasamanos es el que los astronautas se sujeten y poder cumplir con sus tareas en el espacio exterior. Para que el robot pueda

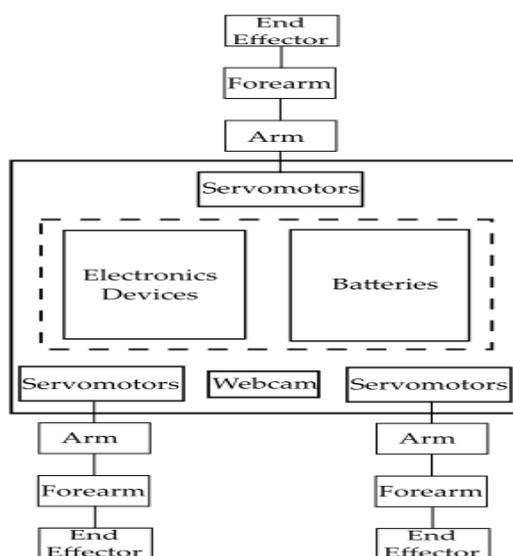


Figura. 1. Esquema general del robot astronauta TORVEASTRO V.2.

desplazarse se ha pensado en un concepto de robot como se observa en la figura 1.

Debido a estas consideraciones, el diseño de un robot astronauta cuyo objetivo principal es el de realizar tareas compatibles con las que realizaría un astronauta o ayudar a un astronauta en su tarea. Ahora bien, este debe ser de un cuerpo cilíndrico con tres brazos, los cuales le van a permitir al robot desplazarse en el exterior de la EEI y realizar diferentes tareas. En este caso para el desplazamiento del robot a través de los pasamanos se requerirán dos de los brazos, en el momento que este llegue al lugar donde realizará su trabajo. Este se anclará con un solo brazo al pasamano y usará sus otros dos brazos para cumplir con la tarea programada.

A la hora de realizar el desplazamiento, el robot contará con un sistema de navegación, sistema electrónico de control y cámara web. El sistema de navegación ayudará a la ubicación del robot y a hacer una retroalimentación para que el sistema de control dirija de manera eficiente los actuadores del robot y evitando que el robot se estrelle con la misma estación, con algún astronauta o con cualquier objeto que se encuentre en su área de trabajo.

En la figura 2 se puede observar el diseño conceptual del robot astronauta de servicio TORVEASTRO, (9) el cual muestra la distribución que tendría el robot al ser construido, al igual que muestran los 3 brazos, en el que se empieza a dar una idea del cómo se diseñará cada uno de los brazos que serán idénticos.

La idea principal es que los servomotores que le darán el movimiento a los brazos del robot irán dentro del cuerpo del robot. Para esto se usará la transmisión del

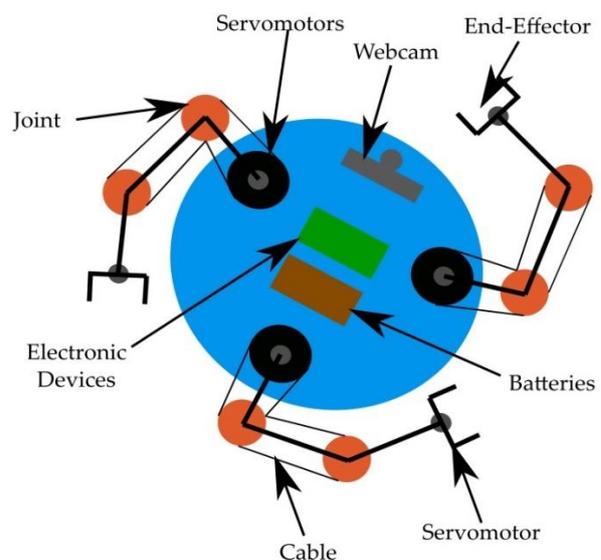


Figura. 2. Diseño conceptual del robot astronauta TORVEASTRO V.2, [3]

movimiento desde los actuadores a cada uno de los eslabones de los brazos por medio de cables, como se puede ver en la figura 2. El efector final cuenta con su actuator en el extremo del brazo para una mayor efectividad a la hora del agarre que se llevará a cabo en los pasamanos distribuidos alrededor de la EEI. Estos cables deberán estar protegidos para que no sean golpeados con algún objeto lo que podría ocasionar la ruptura de alguno de los cables perdiendo así el control del brazo, como se puede ver en la figura 3.

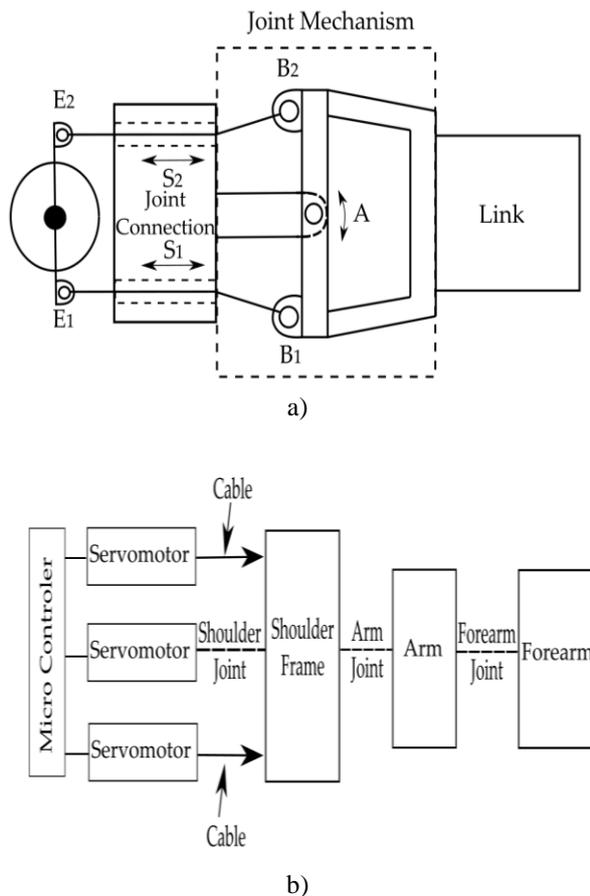


Figura 3. Diseño del brazo del robot astronauta de servicio TORVEASTRO V.2 [3]: a) Esquema cinemático del eslabón y actuador, b) Esquema del brazo.

El diseño del brazo del robot astronauta de servicio TORVEASTRO [3] se muestra en la figura 3. En la figura 3 a) se visualiza un segmento del brazo, en donde se puede observar el actuador conectado a los cables. Los cables pasan por unas tuberías las cuales se encuentran dentro de los eslabones, para conectar con el mecanismo que actúa como junta de revolución. El mecanismo se conecta con el siguiente eslabón.

En la figura 3 b) se muestra el concepto del diseño del brazo completo, en donde se pueden observar los tres actuadores. Los servomotores que se encuentran dentro del cuerpo del robot. El primer servomotor se conecta

a la articulación de revolución del hombro, que se encarga del movimiento del hombro del brazo mediante engranajes tipo planetario. Dentro de esta primera articulación pasan los cables para encontrar el primer mecanismo de junta de revolución, donde se conectan los cables para transmitir el movimiento del segundo servomotor. Dentro de este eslabón también se encuentran los cables del tercer servomotor que conducirá el movimiento del último eslabón.

La distancia del robot astronauta de servicio debe tener 1 m de distancia entre dos de sus efectores finales, el cuerpo del robot debe tener 350 mm de diámetro y los brazos deben ser de 175 mm de largo, sin contar con el peso de la estructura el brazo debe soportar 9 Kg (9). Para este experimento de laboratorio se construyó el brazo a escala.

3. Prototipo y modos de pruebas

Una vez determinado el diseño del brazo del robot, se ha construido el prototipo del brazo como se muestra en la figura 4. El control del brazo se realiza por medio de la electrónica asociada para generar los movimientos que se requieren para poder adquirir experiencia. Este experimento permitirá obtener resultados que lleven a plantear mejoras en el diseño. También se podrán establecer requerimientos necesarios del sistema electrónico que permita el funcionamiento del sistema, así como la fuente de energía necesaria para que el prototipo pueda funcionar de manera correcta.

Los componentes que se usaron en el prototipo para su puesta en funcionamiento fueron: una tarjeta Arduino Mega 2560, la cual controla los servomotores; Una tarjeta Arduino Nano para la medición de la corriente que se consume en el sistema completo, con la ayuda de un sensor de corriente; dos reguladores de voltaje Dc-Dc se usan con el fin de regular el voltaje de la fuente de alimentación, de esta forma se controla y divide la alimentación del sistema de control del sistema de potencia; tres servomotores se usan para transmitir los movimientos a los eslabones del brazo y una batería Lipo de 7.4V con una capacidad de 6.000 mAh. El prototipo del brazo del robot de servicio astronauta TORVEASTRO V2, se construyó con dimensiones a escala que para llevar a cabo el experimento, en este sentido, el tamaño del hombro es de 4.5 cm, la distancia del brazo es de 10 cm y la distancia del antebrazo es de 6 cm. Estos eslabones y mecanismos de rotación fueron construidos en material de PLA por medio de la impresión 3D.

En la figura 4 se puede observar cómo se construyó el prototipo de un brazo del robot astronauta de servicio TORVEASTRO V2. En esta figura 4 se destacan los principales componentes electrónicos que se deben usar, y la distribución de estos con el fin de ocupar el

menor espacio posible, ayudando a entender así cuál podría llegar a ser una configuración que permitiera usarse para un diseño posterior de todo el robot y que fuera más eficiente.

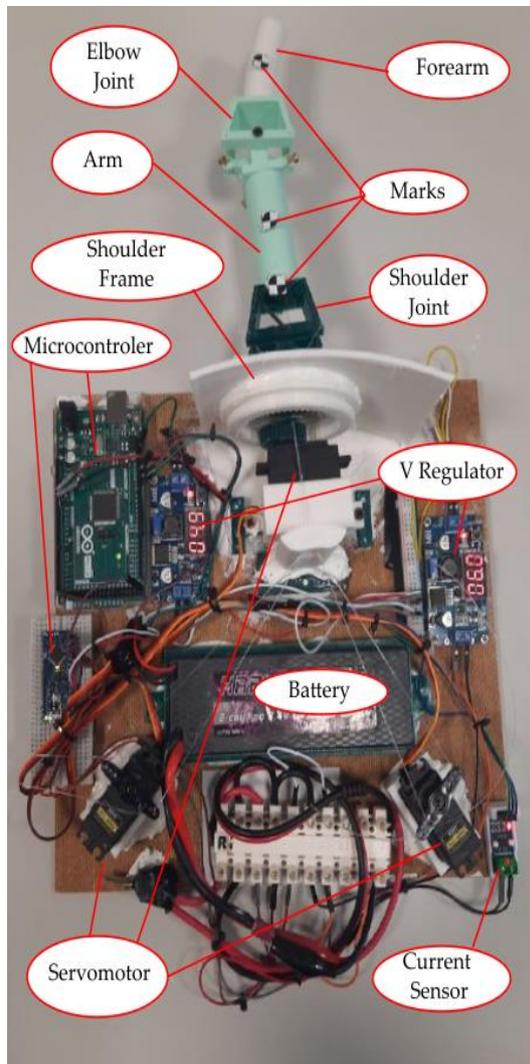


Figura. 4. Segundo prototipo del robot astronauta TORVEASTRO V.2.

La distribución de los servomotores se presenta de esta forma, para que, la distribución de los cables que transmitirán el movimiento entre los actuadores y las articulaciones estableciendo así una tensión que evite al máximo perder el rango de movimiento.

Se pueden observar tres marcas que se han puesto en el brazo, con el objetivo de tomar estos puntos para realizar medidas necesarias para conocer el funcionamiento del brazo durante el movimiento.

En la figura 5 se puede observar el brazo del robot con más detalle especificando la definición de cada uno de los eslabones por medio de las marcas.

Cada marca que se observa en la figura 5 tiene su nombre, esto debido a que se usó un software de visión para adquirir los datos que se deben conocer en el desarrollo del funcionamiento.

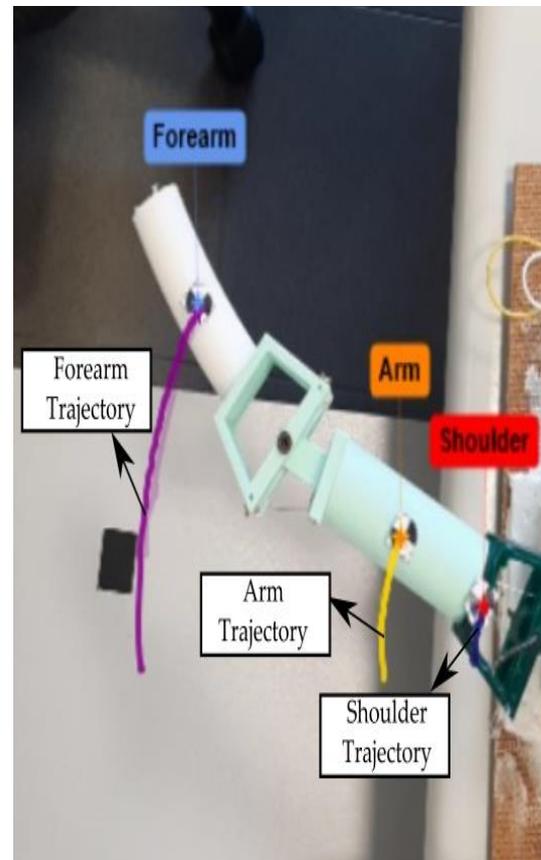


Figura. 5. Brazo del Prototipo del robot astronauta TORVEASTRO V.2.

En la figura 4 si puede ver el servomotor que dirige la rotación del hombro del brazo del robot astronauta de servicio. El movimiento se realiza por medio de un engranaje planetario, se tuvo en cuenta que se debía dejar el espacio dentro de la articulación para la tubería que conducirán los cables. Los cuáles serán utilizados para dirigir los mecanismos de junta de revolución de los eslabones del brazo en los eslabones siguientes.

En la figura 6 se puede observar la ubicación de cada uno de los servomotores S1, S2 y S3, que transmiten su movimiento por medio de cables a las articulaciones del brazo. El tipo de servomotores utilizados tiene un rango de movimiento de 180° por lo tanto para obtener un movimiento del brazo el cuál pueda ser conducido hacia ambos lados de forma simétrica. Los servomotores (servomotor 1, servomotor 2) fueron puestos como punto de inicio en 90° haciendo que como se ve en la figura los mecanismos de junta de revolución se encuentren a 180° . De igual forma el servomotor de la articulación rotatoria (servomotor 3) aunque este no use la transmisión de movimiento por

cables. El último eslabón del brazo tiene un leve diseño es curvo, con el fin de acomodarse.

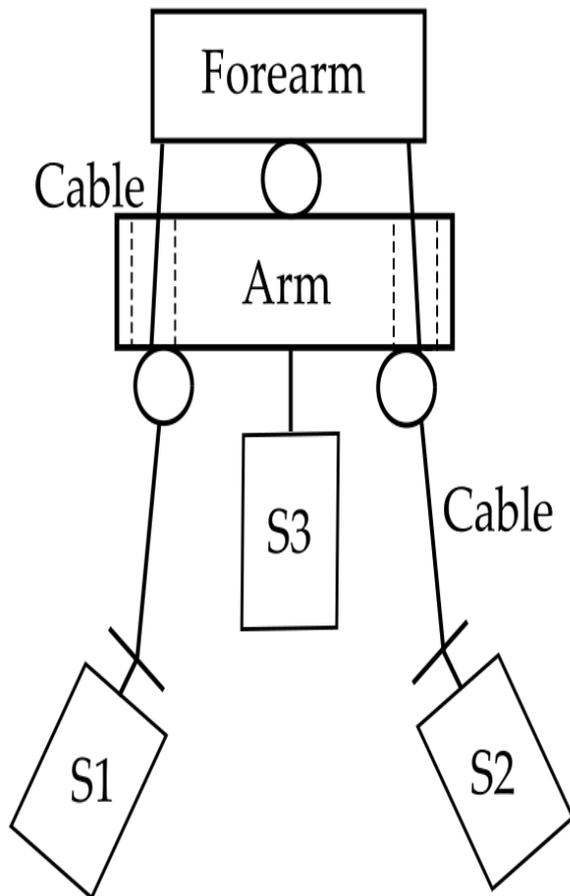


Figura 6. Esquema de las conexiones entre los servomotores y los eslabones del brazo en figura 4.

En la figura 7 se puede ver el esquema electrónico que se diseñó para el prototipo, en el cual se observan las conexiones de los servomotores, el sensor de corriente para poder medir la corriente total del sistema, los reguladores de voltaje que sirven para alimentar las tarjetas de control. En este caso las tarjetas Arduino y los servomotores, esto para proteger el sistema de control separándolo del sistema de potencia.

Para este experimento se realizaron modos de prueba los cuales condujeron a mover el brazo del prototipo del robot astronauta de servicio TORVEASTRO V2 de forma consecutiva, es decir, cada articulación se movió en diferentes tiempos, con el objetivo de observar los cambios que ocurrían durante la prueba, en cuanto a desplazamiento y consumo de energía en cada uno de los eslabones y por consiguiente en cada uno de los servomotores S1, S2 y S3. Estos resultados se dan

teniendo en cuenta que el brazo no tiene ninguna carga en su efector final.

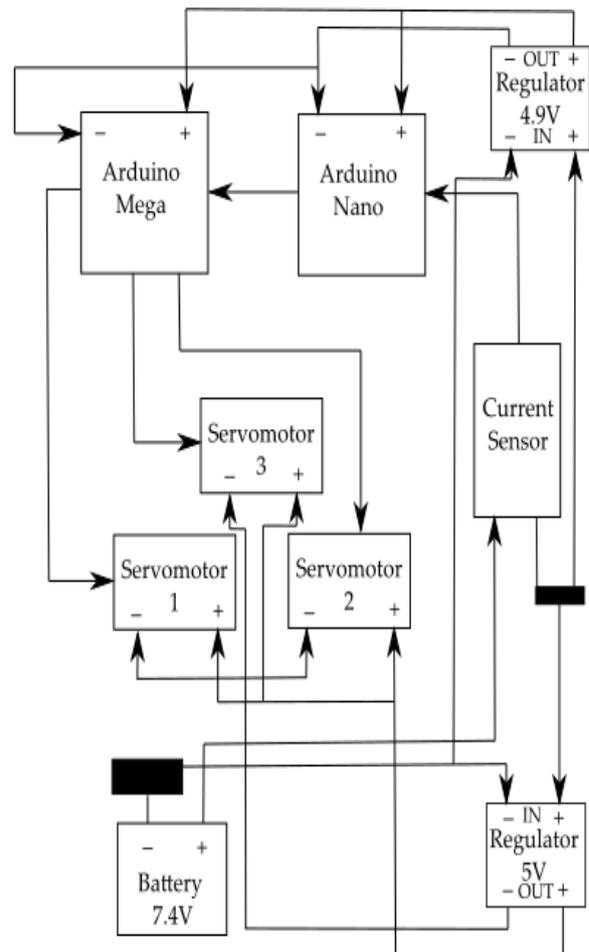


Figura 7. Esquema del sistema de actuación del prototipo en figura 4.

4. Resultados de validación

El brazo se acciona gracias a tres servomotores. Uno acciona el hombro permitiendo el balanceo mediante un mecanismo de corona dentada, mientras que dos servos permiten la flexión-extensión del antebrazo y el accionamiento del brazo hacia los cables.

Se usó una cámara para medir el movimiento del brazo siguiendo el marcador en la Figura 8 a través del software Kinovea. Al usar la dimensión real del marcador, es decir, 10×10 mm, el movimiento en píxeles se convierte en uno del mundo real con un proceso de seguimiento semiautomático, que tiene una precisión estimada del 5% (medida a través de una calibración de tablero de ajedrez). Además, gracias a la metodología mencionada es posible analizar el comportamiento del prototipo mientras es accionado.

Las figuras 9, 10 y 11 muestran la posición del antebrazo, brazo y hombro. Su desplazamiento durante todo el experimento es de 12.91 cm en P1, 5.03 cm en P2 y 1.98 cm en P3. Además, es posible notar que realizan el movimiento sin problemas y de acuerdo con la entrada dada.

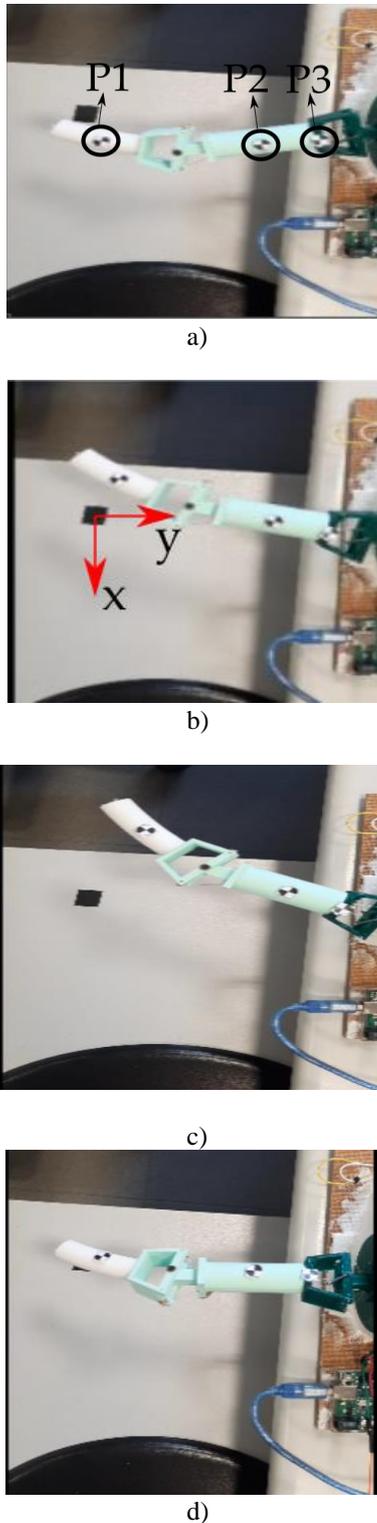
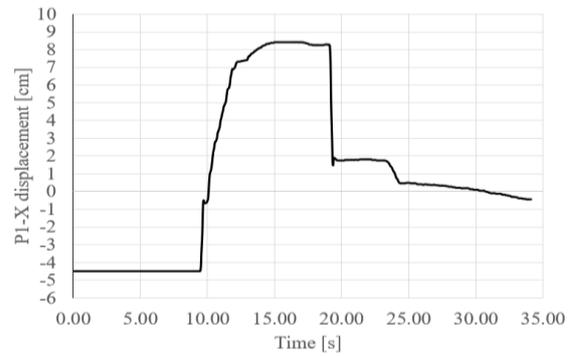
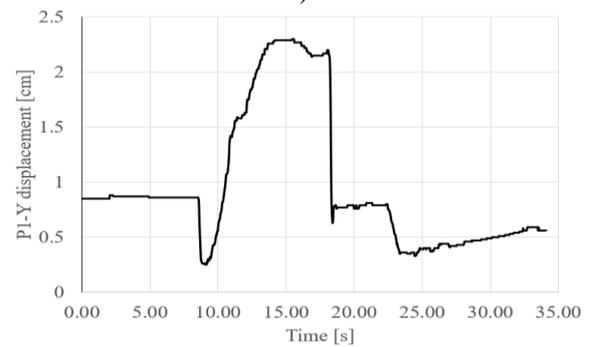


Figura. 8. Imágenes del movimiento en una prueba de laboratorio.

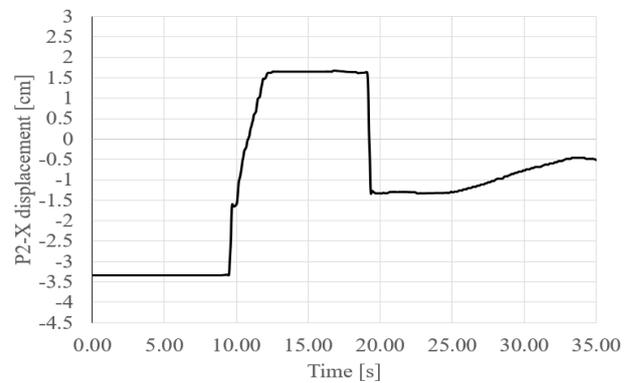


a)

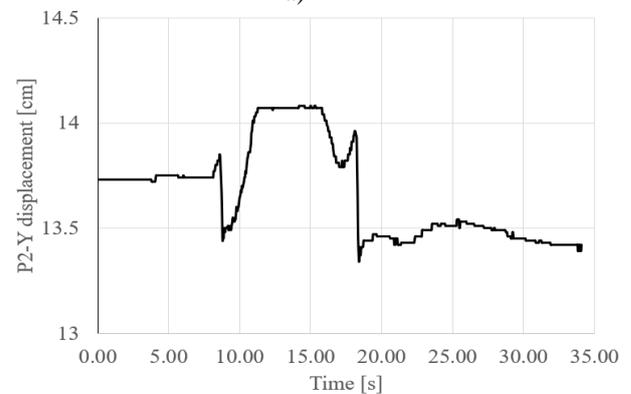


b)

Figura. 9. Trayectorias de la marca P1 a) Componente x-axis, b) Componente y-axis.



a)



b)

Figura. 10. Trayectorias de la marca P2 a) Componente x-axis, b) Componente y-axis.

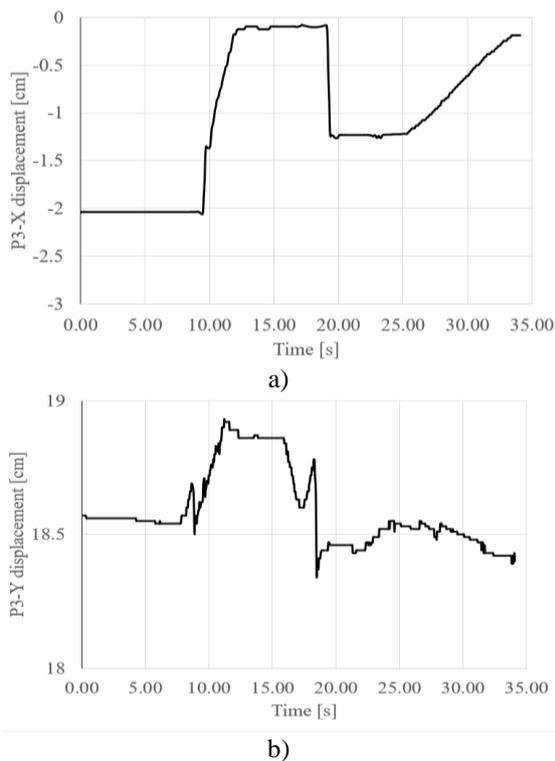
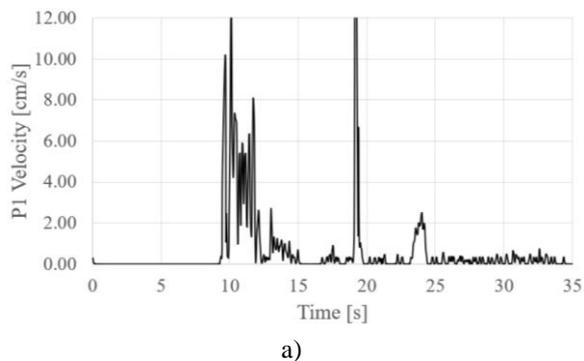


Figura. 11. Trayectorias de la marca P3 a) x-axis Componente, b) y-axis Componente.

Se puede obtener una mejor comprensión del comportamiento del movimiento realizado analizando el gráfico de la Figura 12. Dos eventos principales pueden ser reconocidos en la trama. El primero representa los motores moviéndose a las posiciones deseadas, mientras que el segundo gran pico es causado por una gran vibración debido a la pérdida de tensión de los cables y las estructuras no lo suficientemente rígidas. Como se puede observar en el gráfico, los momentos se han realizado a una velocidad muy baja de $5^\circ/s$ para el antebrazo y el brazo mientras que para el hombro a $1^\circ/s$ ya que el acoplamiento de engranajes no puede permitir un movimiento más rápido debido a la transmisión.



a)

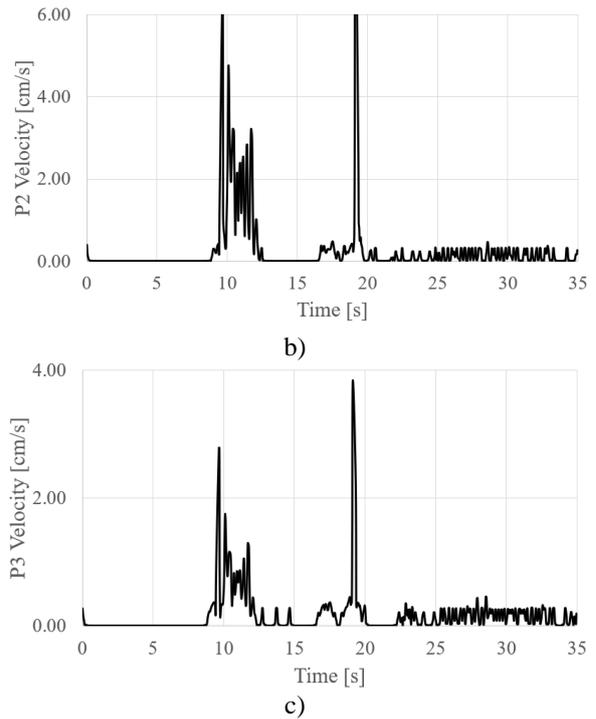


Figura. 12. Velocidades adquiridas de los puntos de marcas en el prototipo en Fig. 4 durante la prueba: a) P1, b) P2, c) P3.

Problema en la caja de cambios. Dadas estas velocidades angulares, el antebrazo, el brazo y el hombro alcanzaron velocidades promedio de 0.87 cm/s en P1, 0.30 cm/s en P2, 0.20 cm/s en P3. El sistema se ve afectado, como era de esperar, por un problema de tensión del cable y una gran vibración. Por lo tanto, el enfoque de los trabajos futuros estará en la optimización de la transición de fuerzas entre cables y motores para mantener siempre un tensado positivo. También se investigará un mejor diseño de la estructura del brazo para mejorar la transmisión de fuerza incluso en el codo y lograr un mejor comportamiento de movimiento.

Los resultados que provienen del experimento realizado muestran un consumo de energía con un pico de 3.50 W como se muestra en el gráfico de la Figura 13.

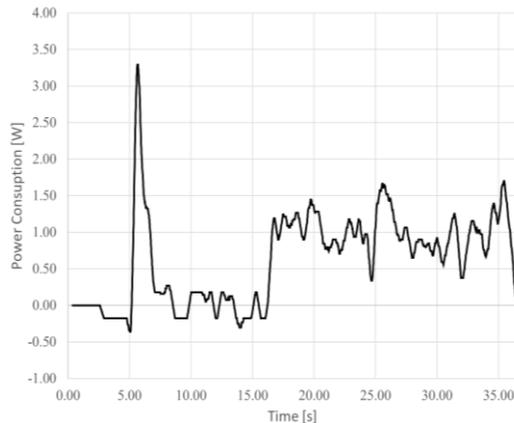


Figura. 13. Potencia consumida adquirida del sistema.

Además, vale la pena notar que el consumo de energía se mantiene constantemente bajo con picos que representan la activación del actuador. Es posible ver un primer pico cuando se enciende el sistema completo. Los tres picos en la segunda fase de la experiencia muestran cómo los tres actuadores se activan secuencialmente uno por uno, los resultados numéricos de este experimento se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1 Resumen de los datos obtenidos en las figuras 9-13.

Desplazamiento de P1	12.91 cm
Desplazamiento de P2	5.03 cm
Desplazamiento de P3	1.98 cm
Velocidad de P1	0.87 cm/s
Velocidad de P2	0.30 cm/s
Velocidad de P3	0.20 cm/s
Consumo de Energía Máximo	3.50 W

5. Conclusions

En este artículo se presentan los resultados de una evaluación experimental del prototipo del robot astronauta de servicio TORVEASTRO V2. De los resultados se puede determinar que los primeros ensayos con el prototipo del brazo a escala del robot demostraron que el funcionamiento esperado puede realizarse con el diseño propuesto. Los mecanismos de junta de revolución tienen un buen desempeño, pero necesitan ser optimizados para dar un mejor rendimiento y eficiencia. Los servomotores son actuadores muy útiles a la hora de realizar este trabajo, el rango de movimiento para ser el primer experimento es bueno. En cuanto al sistema electrónico, esta muestra una respuesta eficiente a las necesidades requeridas. Al momento de ser aplicado al robot usando sus tres brazos, se buscarán unas opciones más robustas que permitan realizar de formas efectivas el

control de cada uno de los tres brazos. La batería usada para este banco de pruebas muestra ser eficiente para tener una autonomía aceptable del prototipo. En definitiva, este tipo de baterías es muy útil para el propósito que se quiere cumplir con el robot.

6. Referencias

- [1] Liu, Jinguo, et al. Attitude control for astronaut assisted robot in the space station. *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 14, no 4, p. 1082-1095, 2016.
- [2] F. Samani and M. Ceccarelli, An Experimental Characterization of TORVEastro, *Cable Driven Astronaut Robot*, *Robotics 2021*, 10(1), 21.
- [3] J. Araque, D. Cafolla, M. Ceccarelli, Problems and Requirements for Outer Space Astronaut Service Robot, *IFIT2022 4th International Conference of IFToMM Italy, 2022*. Paper n°, 012 (in print)
- [4] Jiang, Zhihong, et al. Stable Parking Control of a Robot Astronaut in a Space Station Based on Human Dynamics. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no 2, p. 399-413, 2019.
- [5] T. Zhang, Z. Chen, X. Wang, and B. Liang, Overview and Prospect of Key Technologies of Teleoperation of Space Robot, *Aerosp. Control Appl*, vol. 40, pp. 1–9, 2014.
- [6] M. Ceccarelli, H. Li, G. Carbone, and Q. Huang, Conceptual kinematic design and performance evaluation of a chameleon-like service robot for space stations, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 12, (2015).
- [7] R. V. Europ, to 2020 and Beyond, the Strategic Research Agenda for European Robotics. Brussels, 2009.
- [8] Sweeting, Martin. Modern small satellites-changing the economics of space. *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no 3, p. 343-361, 2018.
- [9] Paoloni M., Report of W2-Torveastro, Enea, Roma, 2021.

7. Acknowledgments

Este trabajo ha sido apoyado por la subvención Lazioinnova-POR214-2020-A0375-2020-36517 para el proyecto TORVEASTRO.