

# METODOLOGÍA PARA LA INTEGRACIÓN DE UN MANIPULADOR MÓVIL BAJO SOFTWARE LIBRE

***Oswaldo Alquisiris Quecha***

Universidad del Istmo  
*oswualdoaq@gmail.com*

***Francisco Aguilar Acevedo***

Universidad del Istmo  
*aguilar.afco@sangunga.unistmo.edu.mx*

***Ignacio Algreto Badillo***

Universidad Politécnica de Tlaxcala  
*ignacio.algreto@uptlax.edu.mx*

***J. Jesús Arellano Pimentel***

Universidad del Istmo  
*jjap@sandunga.unistmo.edu.mx*

## **Resumen**

Los manipuladores móviles combinan manipuladores y plataformas móviles para obtener sistemas con capacidades extendidas. Una de las ventajas que presentan los manipuladores móviles es su amplio espacio de trabajo. Con un propósito didáctico, en este artículo se presenta la integración de un manipulador móvil con ruedas a partir del robot móvil ERA-MOBI y el brazo robótico *Smart Robotics Arm*. El manipulador móvil que opera bajo Linux en su distribución Fedora 23, fue puesto a prueba bajo un modo de teleoperación. Los experimentos llevados a cabo muestran que nuestro manipulador móvil necesita alrededor de tres minutos para tomar y colocar una sola pieza a 2.5 metros de distancia.

**Palabras Claves:** Brazo robótico, manipulador móvil, robot móvil.

## **Abstract**

*Mobile manipulators combine manipulators and mobile platforms to obtain systems with extended capabilities. Their expanded working space is one of the mobile manipulators' advantages. The purpose of this article is educational. It presents the integration of a mobile manipulator on wheels, which uses an ERA-MOBI mobile robot and a Smart Robotics Arm. The mobile manipulator, which operates on Linux - Fedora distribution 23, was tested using a remote operative modality. The tests show that our mobile manipulator needs approximately three minutes to take and place a single piece at a distance of 2.5 meters*

**Keywords:** *Mobile manipulator, mobile robot, robotic arm.*

## **1. Introducción**

Un manipulador móvil consiste de uno o más manipuladores montados en la parte superior de una plataforma móvil [Li, 2013]. Un manipulador móvil combina las destrezas de manipulación ofrecida por los manipuladores de base-fija y la movilidad de las plataformas móviles. Estos sistemas tienen muchas aplicaciones potenciales en la manufactura, mantenimiento de reactores nucleares, construcción y exploración planetaria. Si bien, resulta obvio el potencial de los manipuladores móviles para realizar diversas tareas, también es cierto que su aumento en complejidad estructural trae consigo desafíos en su modelado, planeación de movimiento y control.

Alrededor de la conformación y estudio de sistemas manipuladores móviles diversas investigaciones se han encausado. En [Szrek, 2016] se presenta el modelado y análisis de un manipulador móvil *wheel-legged*, el cual es una combinación de una plataforma móvil con un sistema de suspensión especial y un manipulador. La estructura cinemática del manipulador, un modelo computacional del manipulador con la plataforma, el diseño del sistema de control, y el prototipo desarrollado son presentados. En [Deepak, 2016] se aborda la coordinación y control de un manipulador móvil con ruedas usando un sistema inmune artificial (AIS, *Artificial Immune System*). La metodología tiene como objeto la navegación autónoma en entornos industriales. Un robot manipulador de cuatro ejes y una

plataforma móvil con ruedas de tipo diferencial son integrados para conformar el manipulador móvil.

La aplicación de manipuladores móviles también ha sido motivo de investigación. El estudio de [Ding, 2017] se enfoca en el uso de un manipulador móvil para la apertura de puertas en cuatro fases: llegar a la puerta, tomar la manija de la puerta, girar la manija de la puerta y tirar de la puerta. Se emplean un control retroalimentado de fuerza/torque para el contacto con la manija, y un control adaptativo para el seguimiento de la trayectoria planeada para abrir la puerta. La implementación de la propuesta en un manipulador móvil que abre una puerta real cerrada, demuestra la validez del enfoque. Por su parte, en [Lu, 2017] se propone la conformación de un manipulador móvil denominado BOW (Baxter-on-Wheels) operable por personas con discapacidad motora pero cognitivamente sanas. BOW combina el amigable robot industrial Baxter de Rethink Robotics con una silla de ruedas comercial. Se emplea una estrategia de control compartido que combina el comando humano con mecanismos que proporcionan movimientos intuitivos y seguros. En [Li, 2017] se describe el desarrollo de un prototipo de sistema denominado TRINA (*Tele-Robotic Intelligent Nursing Assistant*) el cual consiste de un manipulador móvil, una consola para un operador humano, y algoritmos de asistencia al operador que automatizan parcial o totalmente las tareas tediosas y propensas a errores. Las capacidades del sistema para realizar tareas estándar de enfermería son evaluadas en un laboratorio de simulación.

No obstante la diversidad de trabajos relacionados, no es posible identificar una metodología explícita para la integración de manipuladores móviles de carácter didáctico. Para el caso de la plataforma móvil ERA-MOBI y el brazo robótico AX-18A *Smart Robotics Arm*, su uso individual ha sido motivo de estudio. En [Saez, 2010] se describe un sistema multirobot usando dispositivos ERA-MOBI para la asistencia a bomberos en casos de búsquedas y rescate en incendios donde el humo producido reduce drásticamente la visibilidad. Con ayuda de sus sensores el conjunto de robots móviles guían al bombero indicándole posibles obstáculos. El enfoque del prototipo es la generación de conductas básicas para permanecer en grupo, es decir, generar una formación y navegar mientras se mantiene ésta. En

[Gutiérrez, 2014] se presenta el desarrollo de una interfaz de comunicación capaz de reconocer una serie de comandos de voz, con el propósito de interactuar con el robot ERA-MOBI. La comunicación interfaz-robot se implementó mediante sockets orientados a conexión y el software *Player/Stage* que permite controlar los dispositivos de un robot y obtener información de sus sensores. Por su parte, en [Wang, 2016] un robot AX-18A *Smart Robotics Arm* es usado en un sistema de microondas de bajo costo con fines de diagnóstico y tratamiento médico. El robot que es posicionado en función del área de interés identificada mediante una cámara web, porta un par de antenas en su extremo final que permiten obtener información en 3 dimensiones. Finalmente en [Griggs, 2016] un robot AX-12 *Smart Robotics Arm* es empleado como plataforma de prueba de una propuesta de control cartesiano. El sistema se presenta como un enfoque de control alternativo de prótesis de brazos robóticos. Los componentes de software fueron desarrollados bajo el software comercial Matlab®.

Así, en este artículo se presenta la conformación de un manipulador móvil con ruedas a partir del uso de la plataforma móvil ERA-MOBI y el brazo robótico AX-18A *Smart Robotics Arm*. La contribución del trabajo se centra en integración de los diversos componentes, lo que antepone un carácter didáctico a la metodología que se describe. Se muestran los pormenores de la integración del hardware, y del software bajo Linux, así como pruebas funcionales del sistema.

## 2. Métodos

AX-18A *Smart Robotics Arm* es un brazo robótico de 5 grados de libertad (gdl) distribuidos en cuatro articulaciones, tres de rotación y una cilíndrica (rotación/traslación), que tiene como actuadores a los servomotores Dynamixel de la serie AX-18A. El robot puede ser controlado mediante una computadora vía USB bajo Windows o Linux, empleando su interfaz hardware denominada USB2Dynamixel y su correspondiente SDK (*Software Development Kit*). El SDK contiene APIs (*Application Programming Interface*) que permiten emplear VB.NET, C#, LabVIEW, MATLAB, JAVA, C/C++ y Python, entre otros entornos y lenguajes para la programación del robot.

ERA-MOBI es un robot móvil de tipo diferencial compacto equipado con un arreglo de sensores ultrasónicos e infrarrojos (IR), y una computadora integrada a la plataforma. A nivel de software, los movimientos del robot ERA-MOBI son programados con la herramienta *Player*, un servidor genérico de código abierto (*open source*) utilizado en el control de robots móviles, cuya versión 3.0.2 cuenta con soporte para 133 diversos controladores. La función de *Player* es permitir el control de los componentes de distintos dispositivos robóticos mediante un sencillo sistema de interfaces genéricas, independientes del hardware del robot [Whitbrook, 2010].

En la figura 1 se ilustra la metodología empleada para la integración del manipulador móvil denominado ERA-SRA en alusión al robot móvil ERA-MOBI y el manipulador *Smart Robotics Arm*, empleados para su conformación.

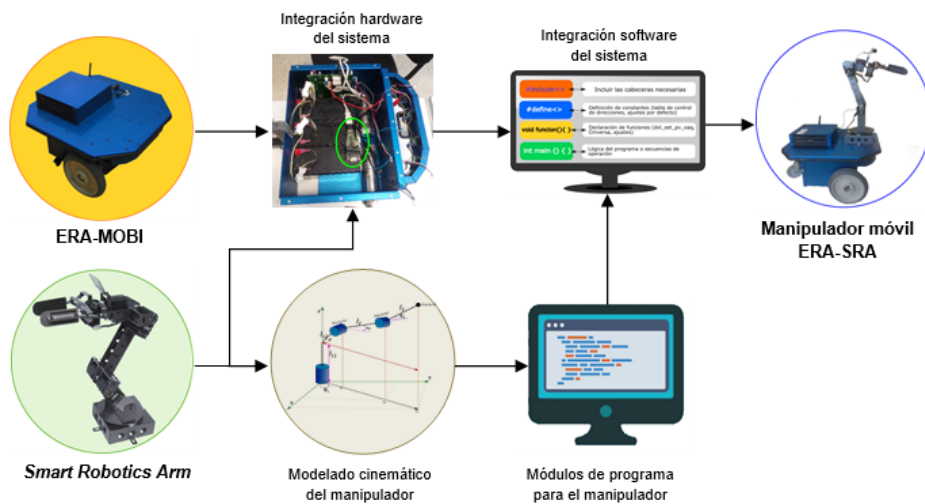


Figura 1 Metodología de integración del manipulador móvil ERA-SRA.

Por su parte, la **integración de hardware** consistió en incorporar al robot ERA-MOBI el brazo robótico, para lo cual fue necesario adecuar al interior del robot móvil conexiones para la energización de los servomotores del manipulador, e incluir perforaciones a la cubierta del móvil para sujetar la base del brazo robótico. La **integración de software** se realizó sobre la computadora a bordo del ERA-MOBI bajo Linux en su distribución Fedora 23. Dado que los componentes de software de *Player* son definidos en C++, los módulos de programa adicionales

son desarrollados en este lenguaje. Así, al diseñar un programa será necesario incluir las librerías <playerc++.h> y <dynamixel.h> que brindan el software base para el control del robot móvil y los servomotores del manipulador respectivamente. La librería dynamixel define métodos para controlar la comunicación con los servomotores, y definir/transmitir/recibir paquetes de datos, más no así para el control específico del *Smart Robotics Arm* bajo una configuración, para lo cual es necesario describir el movimiento del robot mediante un modelo.

El **modelo cinemático** se limitó a los primeros tres grados de libertad del manipulador, que son suficientes para definir la posición en el espacio del efector final. La obtención de la cinemática directa e inversa se realizó mediante un enfoque geométrico. En la figura 2 se muestra una representación del manipulador empleada para la obtención de la cinemática directa descrita por las ecuaciones 1, 2 y 3, y la cinemática inversa expresada en las ecuaciones 4, 5 y 6.

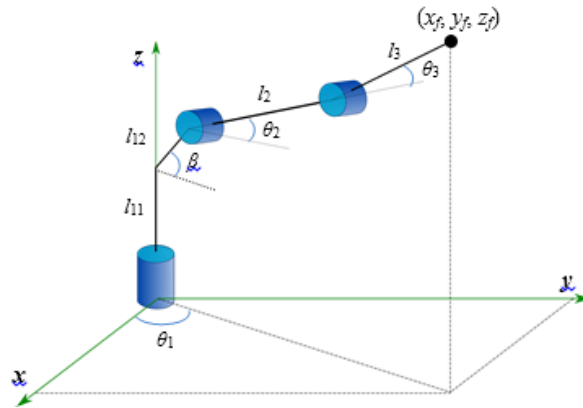


Figura 2 Diagrama de alambre para manipulador de 3 gdl.

$$x_f = \cos \theta_1 (l_{12} \cos \beta + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \quad (1)$$

$$y_f = \sin \theta_1 (l_{12} \cos \beta + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \quad (2)$$

$$z_f = l_{11} + l_{12} \sin \beta + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y_f}{x_f}\right) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{z'}{w}\right) - \arctan\left(\frac{l_3 \sin \theta_3}{l_2 + l_3 \cos \theta_3}\right) \quad (5)$$

Donde:

$$D = \frac{z'^2 + w^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad w = \sqrt{x_f^2 + y_f^2 - l_{12} \cos \beta} \quad z' = z_f - (l_{12} \sin \beta + l_{11})$$

Siendo el signo del argumento en la ecuación 5, el que definirá la configuración que describa la posición del brazo, el signo + denota la configuración codo abajo y con el signo - la configuración codo arriba [Siciliano, 2010].

Bajo un enfoque de programación modular se diseñaron cinco **módulos de programa para el manipulador** en lenguaje C, dos para el cálculo de las cinemáticas, dos para la operación y comunicación con el brazo robótico, y uno para relacionar los valores del modelo cinemático con los valores angulares que asumirán los servomotores del manipulador. Dichas posiciones resultan ser distintas debido a la forma en que los motores son anclados a cada una de las articulaciones del robot. En base a los esquemas mostrados en la figura 3, se pueden establecer las siguientes relaciones:

$$\theta_{1motor} = \theta_{1modelo} + 150^\circ, \theta_{2motor} = -\theta_{2modelo} + 240^\circ, \theta_{3motor} = -\theta_{3modelo} + 150^\circ$$

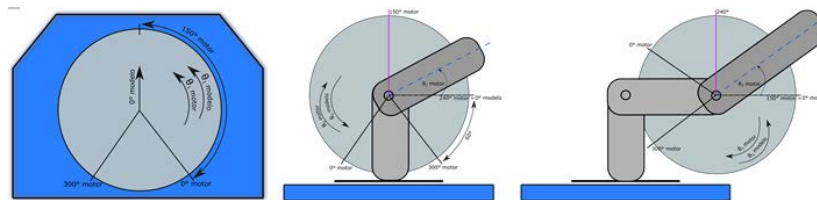


Figura 3 Diferencias entre valores angulares del modelo y los reales.

### 3. Resultados

Las pruebas sobre el manipulador se realizaron en dos sentidos. Verificar el modelo cinemático obtenido y los módulos de programa para el manipulador, y evaluar el desempeño del manipulador móvil.

Para el caso del brazo robótico se definió una tarea la cual consistió en programar el posicionamiento del extremo final del robot (con la pinza cerrada) para ir de una posición inicial a una objetivo (sin carga), modificando las velocidades de operación de los servomotores (de una resolución de 10 bits y 0.111 rpm por

unidad), con el propósito de ilustrar el error de posicionamiento del manipulador. En la figura 4 se esquematiza la prueba planteada y tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

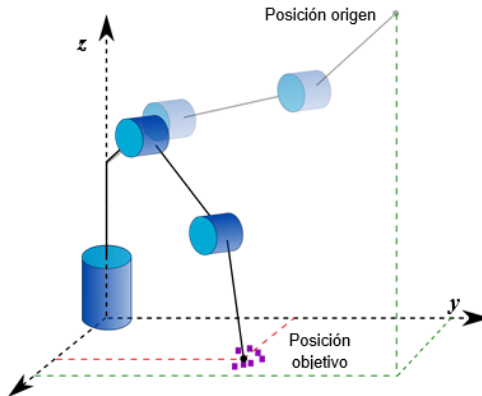


Figura 4 Esquema del error de posicionamiento.

Tabla 1 Error de posicionamiento.

Velocidad (rpm)	Error absoluto (mm)
2.77 (4%)	x = 1 mm, y = 2.5 mm
5.55 (4.8%)	x = 1 mm, y = 1 mm
8.32 (7.3%)	x = 1 mm, y = 4 mm
11.1 (9.7%)	x = 1 mm, y = 2.5 mm
13.87 (12.2%)	x = 3 mm, y = 5 mm
16.65 (14.6%)	x = 2 mm, y = 4.5 mm
19.42 (17.1%)	x = 2 mm, y = 3 mm
22.2 (19.5%)	x = 2 mm, y = 7.5 mm
24.97 (21.9%)	x = 1 mm, y = 9 mm
27.75 (24.4%)	x = 1 mm, y = 1 mm

% respecto a la máxima velocidad

El error absoluto máximo en el posicionamiento fue de 3 mm y 9 mm para  $x$  y  $y$ , respectivamente. Se observó que al usar los servomotores a una velocidad de 27.75 rpm (250/1023 unidades) el manipulador presento errores de posicionamiento similares a los obtenidos operando los servomotores a 5.55 rpm (50/1023), sin embargo, una velocidad alta trae consigo un mayor impacto de los efectos de inercia que pueden comprometer la integridad del robot.



Con el propósito de estimar el error del manipulador en la reubicación de un objeto (movimiento con carga), se realizó el montaje mostrado en la figura 5a. Para ello se programó la tarea de tomar un objeto (con forma de prisma hexagonal de 35mm de altura y un peso de 18.34 gramos) ubicado en una posición inicial, trasladarlo a velocidad constante y finalmente colocarlo en la casilla de una cuadrícula, En la figura 5b se observan los contornos de las piezas reubicadas, tras la realización de cuatro pruebas. El error máximo medido fue de 7 mm respecto a los centros de ambas figuras (posición objetivo y final). Durante las pruebas se observó que la rotación de la pieza durante su traslado se debía al movimiento no controlado en velocidad y sus consecuentes efectos de inercia, así como a la superficie lisa (aluminio) del objeto que impacta en la fuerza de agarre de la pinza.

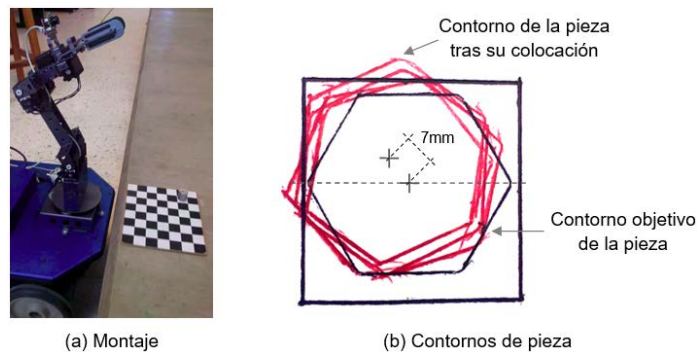


Figura 5 Error del manipular al colocar una pieza.

Respecto a la funcionalidad del manipulador móvil se trató al ERA-SRA como un sistema robótico teleoperado [Cerón, 2005]. Su operación se desarrolla mediante dos arquitecturas Cliente/Servidor de conexión inalámbrica Wifi, una por cada dispositivo. Para el móvil ERA-MOBI se ejecuta el servidor *player* en la computadora a bordo, mientras el cliente opera el robot a través de una herramienta de Player denominado *playerjoy*. Para el caso del manipulador *Smart Robotics Arm* se desarrolló un cliente/servidor en lenguaje C. Para validar la teleoperación del manipulador móvil se realizó una prueba que consistió en medir el tiempo empleado por el usuario para tomar un objeto y trasladarlo a otra posición recorriendo una distancia total de 2.5 m, ver figura 6.

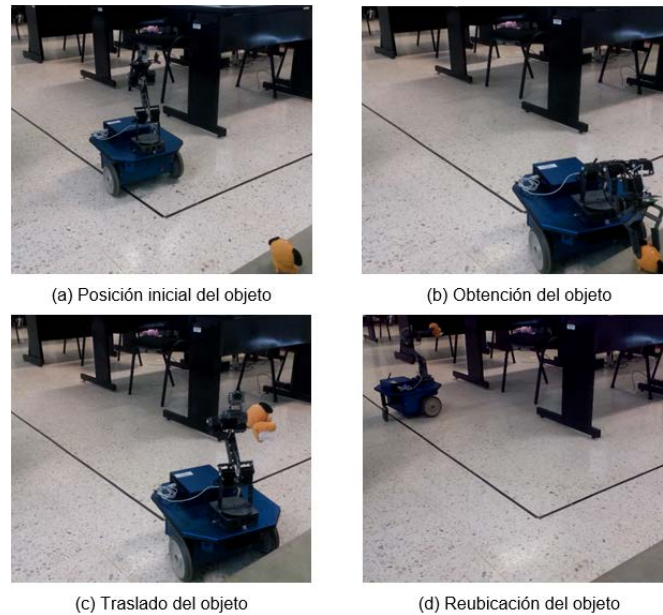


Figura 6 Prueba mediante teleoperación.

La interacción con el sistema se realizó a través de una interfaz de usuario ver figura 7, mediante la cual el extremo final del manipulador puede ser desplazado en el espacio cartesiano ( $\pm 1$  cm de resolución) y abrir/cerrar la pinza, mientras el móvil puede avanzar/retroceder de manera constante al 30% de su velocidad máxima y realizar giros de  $45^\circ$  (a velocidad 0). El tiempo promedio empleado por diez usuarios para realizar la tarea fue de 3 minutos.



Figura 7 Interfaz gráfica para el control del manipulador móvil.

## **4. Discusión**

La teleoperación de un manipulador móvil para la realización de tareas que puedan ser consideradas peligrosas para los humanos, es solo una aplicación dentro de la llamada robótica de servicio. En la salud, en particular estos sistemas pueden ser empleados para mejorar la calidad de vida de las personas al bríndales apoyo en sus actividades, como pueden ser tomar, trasladar y colocar objetos.

El manipulador móvil planteado cuenta con prestaciones que lo hacen candidato a ser considerado como una plataforma experimental para la conformación de un robot de servicio, no obstante, es necesario considerar dos supuesto bajo los cuales se realizaron las pruebas antes descritas: las texturas de los objetos empleados son blandas lo que facilita su sujeción con la pinza del manipulador, y los objetos utilizados son de un peso inferior al máximo estimado por el fabricante (1.58 kg). Por otra parte, el empleo de velocidades altas en la operación de los servomotores del manipulador trae consigo efectos de inercia, lo cual impacta en el desempeño de los motores y en la trayectoria descrita por el robot, al respecto una mejora inmediata al sistema es la definición de una curva de movimiento suave (por ejemplo una trayectoria polinómica cubica) que permita desplazar el objeto sujeto por el robot de una posición a otra mientras se satisface condiciones de velocidad y/o aceleración.

Es de mencionar que dado el propósito didáctico de este trabajo, no es posible establecer una comparativa con desarrollos existentes, no obstante cabe señalar, que el manipulador móvil ERA-SRA presenta características distinguibles con respecto a los desarrollos que hacen uso de cada dispositivo de manera individual, lo cual extiende su campo de aplicación.

## **5. Conclusiones**

En el presente artículo se abordó la integración de un manipulador móvil con ruedas bajo plataforma Linux, empleando el robot móvil ERA-MOBI y el brazo robótico *Smart Robotics Arm*. La metodología descrita desde un enfoque didáctico, buscar definir un procedimiento reproducible para la integración de un manipulador

móvil bajo sistemas iguales o similares a los empleados. A nivel de software cabe señalar que todas las herramientas y librerías empleadas son de licencia libre.

El manipulador móvil es capaz de tomar objetos y trasladarlos a un destino establecido. La interfaz de usuario desarrollada permitió la teleoperación del dispositivo, validando su utilidad.

Como trabajo a futuro se sugiere: implementar trayectorias de movimiento suave para cada servomotor con el fin de mejorar la operación del robot; para el control simultáneo de los dispositivos se sugiere realizar una programación con un enfoque paralelo a través de la implementación de hilos dentro de las aplicaciones; integración de un sistema de visión por computadora que permita calcular la posición/orientación del objeto en el espacio cartesiano para su correcta sujeción.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Cerón, A., *Sistemas Robóticos Teleoperados*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 15, 62-69, 2005.
- [2] Deepak, B. B. V. L., & Parhi, D. R., Control of an automated mobile manipulator using artificial immune system. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 28(1-2), pp. 417-439, 2016.
- [3] Ding, L., Xia, K., Gao, H., Liu, G., & Deng, Z., Robust adaptive control of door opening by a mobile rescue manipulator based on unknown-force-related constraints estimation. *Robotica*, pp. 1-22, 2017.
- [4] Griggs, L., & Fahimi, F., Introduction and testing of an alternative control approach for a robotic prosthetic arm. *The open biomedical engineering journal*, 8, pp. 93-105. 2014.
- [5] Gutiérrez, H., Arellano, J. J., & Pacheco, D., Interacción humano-máquina por voz para la operación de plataformas robóticas móviles. *Pistas Educativas*, 108, pp. 1309-1328, 2014.
- [6] Li, Z., & Ge, S. S., *Fundamentals in Modeling and Control of Mobile Manipulators* (Vol. 49). CRC Press. Boca Raton, FL. 2013.

- [7] Li, Z., Moran, P., Dong, Q., Shaw, R. J., & Hauser, K., Development of a Tele-Nursing Mobile Manipulator for Remote Care-giving in Quarantine Areas. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation Proceedings*, Singapore, May, 2017.
- [8] Lu, L., & Wen, J. T. Baxter-On-Wheels (BOW), An Assistive Mobile Manipulator for Mobility Impaired Individuals. In *Trends in Control and Decision-Making for Human–Robot Collaboration Systems*, pp. 41-63, Springer International Publishing, 2017.
- [9] Saez-Pons, J., Alboul, L., Penders, J., & Nomdedeu, L., Multi-robot team formation control in the GUARDIANS project. *Industrial Robot: An International Journal*, 37(4), pp. 372-383, 2010.
- [10] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G., *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media. Girona, Spain, 2010.
- [11] Szrek, J., Muraszkowski, A., & Sperzyński, P., Type synthesis, modelling and analysis of the manipulator for wheel-legged robot. *acta mechanica et automatica*, 10(2), pp. 87-91, 2016.
- [12] Wang, F., Wu, X., & Arslan, T., Mobile-controlled portable robotic measurement setup for microwave imaging diagnosis. In *Antennas & Propagation Conference*, Loughborough, UK. November, 2016.
- [13] Whitbrook, A., *Programming mobile robots with Aria and Player*. Springer Science & Business Media, London, 2010.