

Plataforma SDV de huella reducida con LIDAR para microfábrica

1st Alejandro Ojeda Olarte

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia
 Bogotá, Colombia
 aojedao@unal.edu.co

2nd Nicolás Pulido Gerena

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia
 Bogotá, Colombia
 npulido@unal.edu.co

3rd Ernesto Córdoba Nieto

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Universidad Nacional de Colombia
 Bogotá, Colombia
 ecordoban@unal.edu.co

Abstract—Este trabajo presenta el proceso de diseño de un robot diferencial autónomo con capacidad de conducción autónoma (SDV) con percepción 2D con un LIDAR para uso en una micro fábrica de producción de placas de circuitos impresos (PCB). El robot diseñado tiene capacidad para una carga útil de 5.02kg y generación mapas y navegación por medio de Hector SLAM, utiliza ROS como framework de comunicación y se comunica por el protocolo WLAN.

Index Terms—Robot, Tracción Diferencial, Hector SLAM, Micro fábrica, PCB, SDV, ROS

I. INTRODUCCIÓN

Las micro fábricas son una planta de producción a pequeña escala que aumentan la flexibilidad para manufacturar pequeños grupos de productos. Este concepto busca reducir el espacio que ocupa y la energía que consumen las máquinas. Debido a esta reducción de escala se minimiza el desperdicio de cada máquina para manufacturar productos pequeños. [1]. Dado la escala y la reducción de los recursos de consumo que buscan las micro fábricas, las pequeñas y medianas empresas pueden verse beneficiadas al implementar sistemas autónomos de producción en micro fábricas. Dado que esto se realiza en un área menor a la tradicional, el sistema de transporte de los productos a nivel interno debe requerir el menor espacio posible, minimizando la superficie que se requiere para estas tareas. De tal manera, que los sistemas de transporte usados frecuentemente en instalaciones de manufactura no son compatibles. Consecuentemente, un robot de transporte en una micro fábrica debe ser diseñado con la menor área superficial posible. [3].

Con el objetivo de aumentar la flexibilidad y conectividad de los procesos en una micro fábrica de circuitos impresos, se presenta el diseño de un vehículo de pilotaje autónomo

Con apoyo de LabFabEx UNAL y la Rama Estudiantil IEEE UNAL.

(SDV por sus siglas en inglés), que en contraste con un vehículo de navegación autónoma (AGV), no requiere de instalación de infraestructura para garantizar su navegación. Messina [2] presenta comparaciones respecto al uso de SDV en contraste al AGV. Se planteó que el SDV fuese producto replicable en el entorno del Laboratorio Fábrica Experimental (LabFabEx) de la Universidad Nacional de Colombia; de fácil ensamblabilidad y con bajo tiempo de producción.

II. DISEÑO

A. Configuración Cinemática

El SDV se diseñó como un robot móvil de configuración diferencial que se puede ver en la siguiente figura y permite facilidad y flexibilidad tanto en ensamblaje y manipulación como en movimiento en el espacio de trabajo asignado.

Un robot diferencial se caracteriza por las siguientes ecuaciones de movimiento [4].

$$\begin{aligned}
 1) \quad & \dot{x} = v \cos \theta \\
 2) \quad & \dot{y} = v \sin \theta \\
 3) \quad & \dot{\theta} = \omega
 \end{aligned}$$

Que se analiza en la siguiente configuración del robot para el tiempo t_k .

$$1) \quad \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \theta_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s \\ \Delta \theta \end{bmatrix}$$

Y su maniobrabilidad es $\delta_M = 2$, y grado de movilidad $\delta_m = 2$.

La estructura general para este tipo de robots se modela en la figura 1. Esta referencia se usó para la modelación de la estructura en herramientas CAD.

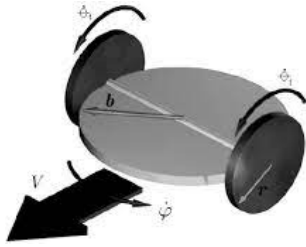


Fig. 1. Robot con configuración diferencial [5]

En la figura 2 se observa el diagrama cinemático de esta configuración, la cuál se usa para el cálculo de odometría del robot.

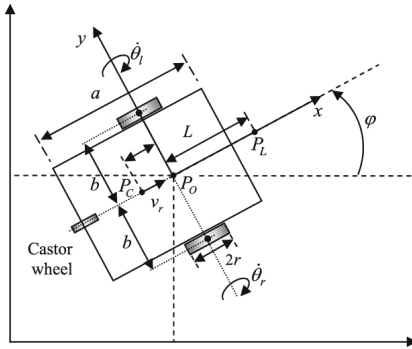


Fig. 2. Diagrama cinemático de robot con configuración diferencial [5]

B. Diseño Axiomático

Haciendo uso de las herramientas de diseño que ofrece el Diseño Axiomático propuesto por el profesor Suh [6], se modelan las variables fundamentales del robot en la Matriz de Diseño A (matriz 1), que se visualiza a continuación, con la que se satisface las funcionalidades requeridas por el diseño.

	ROS	Diferencial	LIDAR
Autonomo	x	0	0
Movimiento 360°	0	x	0
Percepcion 360°	0	0	x

Matriz de Diseño A

De esta manera se procede a la Matriz de Diseño del Proceso B (matriz 2), con la que se trasladan las características encontradas en la matriz A a componentes reales para su producción. [7]

	RPi3B	Motorreductor	RPLIDAR
ROS	x	0	0
Diferencial	0	x	0
LIDAR	0	0	x

Matriz de Diseño del Proceso B

C. Componentes electrónicos

Se cuenta con dos tarjetas de control como tal, una que llevará a cabo las tareas de alta complejidad, y otra que lleva las de baja complejidad, basados en la separación de tareas por Wang en el proyecto OpenRoACH [8].

- BeagleBone Blue: Esta tarjeta aloja un microprocesador Octavo OSD3358, de 1GHz con memoria DDR3 de 512MB. Se encuentra corriendo una versión modificada de Ubuntu MATE 18 (Bionic Beaver) por Robert C. Nelson, para incluir los paquetes de la librería *librobotcontrol* que ofrece interfaz en C a los periféricos de la tarjeta, tales como entrada con conector *quwic* para 4 encoders, dos drivers TB6612FNG para motores DC, IMU de 9 ejes y un barómetro, múltiples puertos SPI, UART y 8 salidas para servomotores. La tarjeta cuenta con un conector de balance para baterías LIPO de 2 celdas (7.4V).

Esta tarjeta, dado que tiene todos los periféricos integrados, se seleccionó para las tareas de baja complejidad, de manera que será el esclavo.

- Raspberry Pi 3B: Esta tarjeta es modelo de 1GB de RAM, de manera que corre los procesos de alta complejidad considerando que tiene mayor capacidad de memoria RAM y un procesador Cortex-A53 de cuatro núcleos. Dentro de los procesos, incluyen el *ROSMASER*, el que se conecta a la BeagleBone Blue por medio del adaptador de internet por USB, y se encarga del procesamiento del RPLidar A1, por medio del paquete ofrecido por SLAMTEC para registro del topico */scan*. Posteriormente, los nodos de Hector SLAM se corren en esta tarjeta. El sistema operativo corriendo corresponde a una versión adaptada de Debian Buster con ROS Melodic. Paralelamente, para visualizar el mapa generado en RViz, se utiliza un visualizador VNC conectado a la Raspberry.

El control de estas tarjetas se realiza a través de un computador que se conecta a la Raspberry por medio del protocolo SSH (Secure Shell Protocol) y por el visualizador VNC, ambos por WLAN en la dirección IP de la tarjeta. Luego, para acceder a la BeagleBone, se accedió por SSH en la red local USB, que de manera predeterminada corresponde a la dirección 192.168.7.2, mientras que la de la Raspberry aparecerá como 192.168.7.1. Esta última dirección se configuró como aquella que aloja el ROS_HOSTNAME. El computador fue el intermediario para utilizar las interfaces de interacción como la navegación remota.

D. Diseño Mecánico

El robot se compone de dos elementos mecánicos principalmente, estructura y motores.

- Estructura: La estructura se diseñó en dos niveles, la base y la base superior. Ambas están soportadas sobre una placa plana en la parte inferior, que se puede fabricar en diferentes métodos y materiales, ofreciendo una flexibilidad de operación.
 - Placas Base:
 - * Manufactura por CNC: MDF, Acrílico, Aluminio
 - * Manufactura por AM: PLA
 - * Manufactura por Corte Láser: MDF, Acrílico
 - Base de los motores:
 - * Manufactura por CNC: MDF, Aluminio
 - * Manufactura por AM: PLA, SLA
 - Espaciadores:
 - * Manufactura por AM: PLA, SLA
 - Clip Para PCB:
 - * Manufactura por CNC: MDF, Aluminio
 - * Manufactura por AM: PLA, SLA
 - Adaptador para RPLidar:
 - * Manufactura por CNC: MDF, Aluminio
 - * Manufactura por AM: PLA, SLA
- Motores: Se seleccionaron dos motorreductores Pololu de 6V, 2.1W a 180rpm. Estos motores tienen reducción de 78 : 1 y tienen una corriente sin carga de 0.14A.



Fig. 4. Clips impresos

E. Manufactura aditiva

En relación al desarrollo de procesos de manufactura aditiva se realizó la impresión 3D de los clips de agarre para PCB. Se propuso el diseño de dos clips diferentes con el fin de comprobar cual era el mas apto para el agarre de las placas a utilizar.

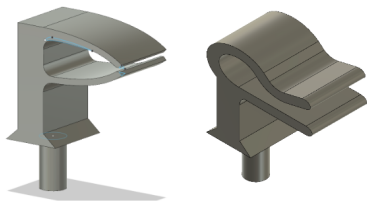


Fig. 3. Diseño de Clips propuestos

Se utilizó la impresora 3D del laboratorio de Fabrica Experimental LabFab-Ex, mostrando los siguientes resultados en impresión con PLA.

Se escogió el segundo clip propuesto debido a que la superficie de contacto es mayor, lo que permite mejor agarre con la placa, por lo que se procedió a realizar otra impresión y hacer la implementación en el SDV

F. Diseño de Control

Todos los dispositivos corren ROS Melodic, y corren 2 nodos en la BeagleBone Blue y 3 en la Raspberry, en esta última también corre el master. La arquitectura del sistema se encuentra a continuación en la figura 5. Aquí se encuentra como se tiene la planeación de la trayectoria posterior al mapeo SLAM como lo realiza Yin [9].

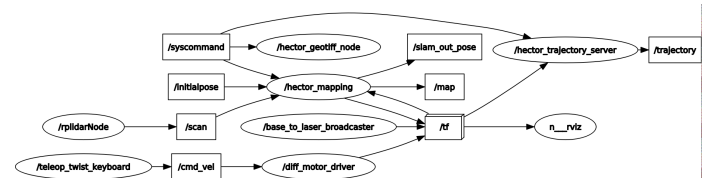


Fig. 5. Gráfico de RQT

G. Diseño de Comunicación

La arquitectura que se diseñó se observa en el siguiente diagrama de la figura 6.

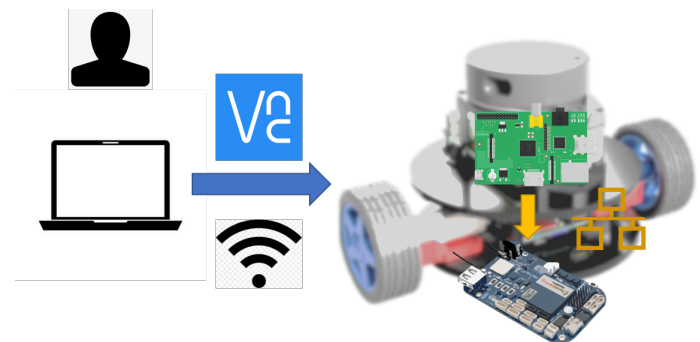


Fig. 6. Arquitectura del sistema

El protocolo Ethernet que corre entre la Raspberry es por medio del puerto USB de la BeagleBone Blue, mientras que la conexión entre la Raspberry Pi se realiza por WLAN. Esto permite la conexión sobre otros marcos de trabajo como un software MES para la integración de maquinaria.

H. Diagrama POA

Con el fin de tener un diseño óptimo para la producción industrial en la micro fábrica planteada se realiza el siguiente diagrama de Análisis Orientado al Proceso (POA) donde se puede apreciar tanto los pasos que realiza el robot móvil para funcionar internamente como los pasos que debe realizar en su entorno para completar el proceso de fabricación de PCBs, con el fin de tener un diseño orientado y específico del proceso a realizar y optar por cambios o correcciones necesarias en el diseño del robot móvil.

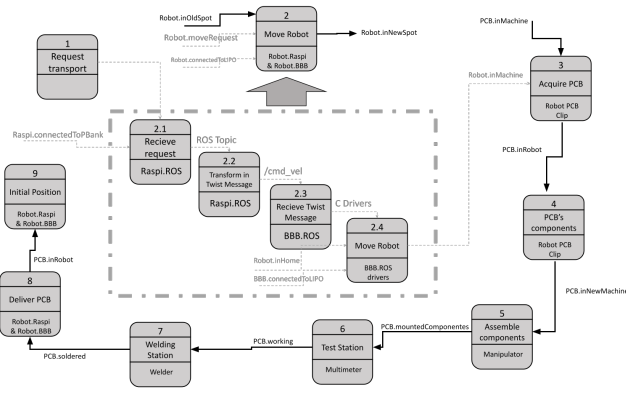


Fig. 7. Diagrama POA

I. Redes de Petri

La red de Petri sirve para analizar de los procesos que se están realizando de forma dinámica, mediante la presencia de tokens, los que permiten contabilizar o llevar seguimiento de los estados de los procesos o las tareas correspondientes a estos. Se opta por una ruta lineal debido a que el proceso de realización de PCBs sigue una estructura secuencial. Así que en la 8 se tiene una estación inicial $P1$ que hará entrega del token que corresponde a la placa en su estado inicial (recubierta de cobre completamente) mediante el proceso de entrega $T1$, posteriormente un SDV $P2$ realizará el proceso de transporte a la planta $T2$ donde se realiza el primer proceso de tratamiento de la placa. Cada uno de los procesos P_x corresponden a un SDV haciendo transporte de la pieza, para tener una secuencia cíclica en la producción. Es importante denotar que dependiendo la disponibilidad de SDVs, todos los P_x mencionados pueden ser el mismo o diferentes cada uno.

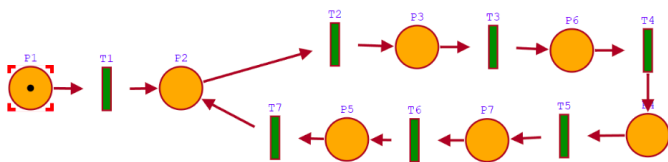


Fig. 8. Red de Petri

J. Navegación

Para la navegación el robot hace uso del Stack de Navegación de ROS. [10]

El robot realiza localización y mapeo simultáneo (SLAM) por medio del algoritmo Hector SLAM [11] como planeador local [12] en vez de el algoritmo Dynamic Window Approach [13] dado el fabricante del RPLidar A1 disponen de paquetes de integración para el primer algoritmo mencionado. La retroalimentación de posición se realiza por análisis de la IMU de 9 ejes de la BeagleBone Blue. Se emite una transformación al punto original por medio externo y se visualiza el algoritmo en el computador.

En la figura 9 se observa un resultado de SLAM en el LabFabEx, y con operación remota por teclado.

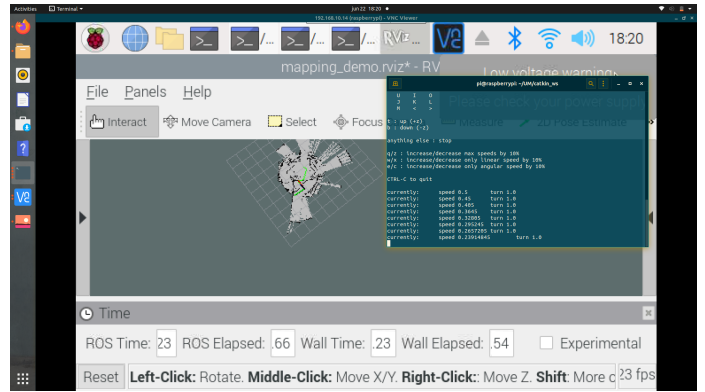


Fig. 9. Hector SLAM en el Robot

III. RESULTADOS

A. Key Performance Indicators

Dado que el objetivo es ocupar el menor espacio posible, se busca igualmente hacer uso de fuentes de alimentación compactas y la menor cantidad de componentes posibles para facilitar la ensamblabilidad.

- Tamaño: Se diseñó una plataforma de $0.49 m^2$, cuyo diámetro de estructura es de $14cm$.
- Capacidad de carga útil: El robot se diseñó para transportar una carga útil de $5.02kg$.
- Alimentación: Se alimenta de dos baterías diferentes, una batería LIPO de 2S ($7.4V$) y un Powerbank de $5V$.
- Cantidad de Componentes: Requiere 10 tipos de componentes, dos tarjetas de control, motores, espaciadores, dos estructuras de ensamble, clips diseñados para PCB, dos baterías y ruedas.

Un diagrama de la distribución de estos valores se encuentra en la figura 10.

B. Capacidades del Robot

El robot tiene la capacidad de carga hasta de $5.2kg$, y las velocidades promedio efectivas registrada se tienen en función de la velocidad de velocidad estimada.

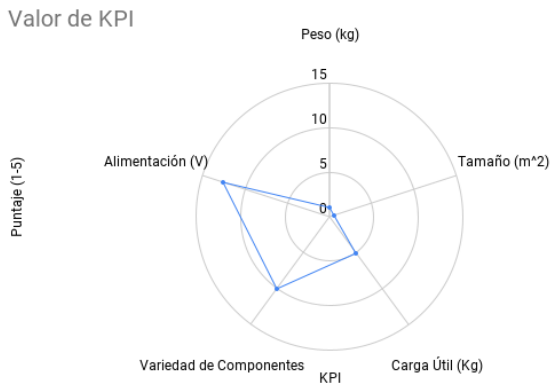


Fig. 10. Diagrama de puntaje de KPIs.

Para una velocidad nominal de $0.5 \frac{m}{s}$ la velocidad efectiva es de $0.34 \frac{m}{s}$. Para la velocidad nominal de $0.257 \frac{m}{s}$ la velocidad efectiva promedio registrada es de $0.18 \frac{m}{s}$.

Se encontró que las velocidades registradas para cada llanta no correspondían a las mismas, de manera que por error estadístico se determinó y comprobó que la rueda izquierda del robot debe tener 1.071 veces la velocidad de la rueda derecha.

IV. CONCLUSIONES

- Dadas las características de diseño del robot, y el diseño de proceso planteado, este robot se puede usar como unidad base para construir una flota de transporte de productos.
- Dentro del trabajo futuro se recomienda hacer fusión sensorica para la retroalimentación de la posición y complementar los datos captados con el algoritmo SLAM.
- El proceso de diseño del robot autónomo, y en especial la selección de componentes permitirían ampliar del uso del robot en otro sector de la industria de manufactura, a pesar de requerir cambios en el diseño de proceso, el SDV ofrece capacidades para un amplio rango de productos.
- Se podría reducir la cantidad de componentes al diseñar una tarjeta que integre componentes tanto para la ejecución de tareas de baja complejidad, como capacidad de procesamiento suficiente para las tareas de alta complejidad, sin embargo se perdería flexibilidad en la integración de tarjetas electrónicas puesto que ambas son de uso frecuente en robots de pequeña escala.

REFERENCES

[1] Mishima, N., Tanikawa, T., Ashida, K. & Maekawa, H. Design of a Microfactory. *International Design Engineering Technical Conferences And Computers And Information In Engineering Conference*. **36231** pp. 103-110 (2002)

[2] Messina, E. Performance evaluation of autonomous mobile robots. *Industrial Robot Journal*. (2002)

[3] Shneier, M. & Bostelman, R. Literature Review of Mobile Robots for Manufacturing. *National Institute of Standards Technology Technical Series Publications*. (2015)

[4] Malu, S. & Majumdar, J. Kinematics, localization and control of differential drive mobile robot. *Global Journal Of Research In Engineering*. (2014)

[5] Iván, C., Efrén, G., Ortega, J., Carrillo, U., Torrez, R. & Aguirre, M. Modelación de un Robot Móvil de Dos Ruedas con Tracción Diferencial. (8º Congreso Nacional de Mecatrónica, Noviembre)

[6] Suh, N. Axiomatic design theory for systems. *Research In Engineering Design*. **10**, 189-209 (1998)

[7] Clauer, D., Fottner, J., Rauch, E. & Prüglmeier, M. Usage of Autonomous Mobile Robots Outdoors – an Axiomatic Design Approach *CIRPe 2020 – 8th CIRP Global Web Conference – Flexible Mass Customisation*. (2021)

[8] Wang, L., Yang, Y., Correa, G., Karydis, K. & Fearing, R. OpenRoACH: a durable open-source hexapedal platform with onboard robot operating system (ROS). *2019 International Conference On Robotics And Automation (ICRA)*. pp. 9466-9472 (2019)

[9] Yin, J., Yang, G., Zhao, F. & Qiu, H. Motion Planning Implemented in ROS for Omni-directional Wheeled Mobile Robot *IEEE International Conference on Information and Automation*. (2015)

[10] Albers, F., Rösmann, C., Hoffmann, F. & Bertram, T. Online Trajectory Optimization and Navigation in Dynamic Environments in ROS *Studies in Computational Intelligence*. (2019)

[11] Szajowicz, D., Colorado, J. & Mondragon, I. Indoor mapping using SLAM for applications in Flexible Manufacturing Systems *Universidad Javeriana*. (2018)

[12] Seder, M. & Petrovic, I. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. (2007)

[13] Teso-Fz-Betoño, D., Zulueta, E., Fernandez-Gamiz, U., Aramendia, I. & Uriarte, I. A Free Navigation of an AGV to a Non-Static Target with Obstacle Avoidance *Electronics Journal*. (2019)