

AGROSHEPER: Diseño y Desarrollo de un Brazo Robótico Esférico de 3 Grados de Libertad para la Cosecha de Cultivos Blandos

Arturo Alejandro Diaz Ortiz¹; Diego Alexandro Padilla Llanca²; Medaly Eulogio Saenz³;

Universidad Nacional de Ingenieria, Peru

arturo.diaz.o@uni.pe, diego.padilla.l@uni.pe, medaly.eulogio.s@uni.pe

Abstract- This project presents the development of a prototype of a spherical workspace articulated robotic arm, designed for the automated harvesting of delicate fruits, commonly known as soft harvesting. The system is operated by means of a user interface developed in Matlab, and an ESP32-CAM camera is added for fruit recognition. Further development of this technology is planned in later stages to increase the accuracy of fruit detection and achieve complete autonomy of the process. The system's main objective is to optimize harvesting operations, ensuring high standards of quality and efficiency, while minimizing damage to the fruit, thus improving profitability for growers. In the long term, it seeks to reduce labor dependence on repetitive tasks, allowing workers to focus on strategic activities, such as marketing, which will improve overall working conditions.

Keywords-- Soft harvest, spherical robotic arm, Matlab, automation, sensing.

AGROSHEPER: Diseño y Desarrollo de un Brazo Robótico Esférico de 3 Grados de Libertad para la Cosecha de Cultivos Blandos

Arturo Alejandro Diaz Ortiz¹; Diego Alexandro Padilla Llanca²; Medaly Eulogio Saenz³;
Universidad Nacional de Ingenieria, Peru
arturo.diaz.o@uni.pe, diego.padilla.l@uni.pe, medaly.eulogio.s@uni.pe

Resumen— Este proyecto presenta el desarrollo de un prototipo de brazo robótico articulado de espacio de trabajo esférico, diseñado para la recolección automatizada de frutos delicados, comúnmente conocida como cosecha blanda. El sistema es operado mediante una interfaz de usuario desarrollada en Matlab, además se agrega una cámara ESP32-CAM para reconocimiento de los frutos. Se planea desarrollar a fondo esta tecnología en etapas posteriores para aumentar la precisión en la detección de los frutos y lograr una autonomía completa del proceso. El sistema tiene como objetivo principal optimizar las labores de recolección, asegurando altos estándares de calidad y eficiencia, al tiempo que se minimizan los daños a los frutos, lo que mejora la rentabilidad para los productores. A largo plazo, se busca reducir la dependencia de mano de obra en tareas repetitivas, permitiendo que los trabajadores se enfoquen en actividades estratégicas, como la comercialización, lo cual mejorará las condiciones generales de trabajo.

Palabras clave—Cosecha blanda, brazo robótico esférico, Matlab, automatización, detección.

I. INTRODUCCIÓN

La recolección de frutas es un proceso clave en la agricultura, que depende del trabajo manual. Sin embargo, los elevados costos laborales y los errores humanos generan un creciente interés por la automatización en la cosecha blanda. La tecnología de robots cosechadores ha evolucionado con el objetivo de mejorar la eficiencia, reducir el daño a los frutos y disminuir la dependencia de mano de obra, permitiendo reorientar estos recursos hacia sectores donde su aporte es más estratégico. Actualmente, existen diversos enfoques para automatizar la cosecha, destacándose el uso de brazos robóticos como una de las soluciones más prometedoras.

Estos sistemas, controlados mediante interfaces de usuario, como aplicaciones de control de remoto, permiten realizar movimientos precisos y repetitivos para ejecutar tareas de cosecha de manera eficiente. En el futuro, el desarrollo de visión artificial facilitará la automatización en la localización y manipulación de los frutos, mejorando la precisión y adaptabilidad del brazo robótico a diferentes tipos de cultivos y condiciones de cosecha.

Este estudio se centra en el desarrollo de un prototipo de brazo robótico controlado mediante un programa de escritorio

para realizar el proceso de cosecha blanda, cabe mencionar que dicho proceso existe en un entorno no estructurado.

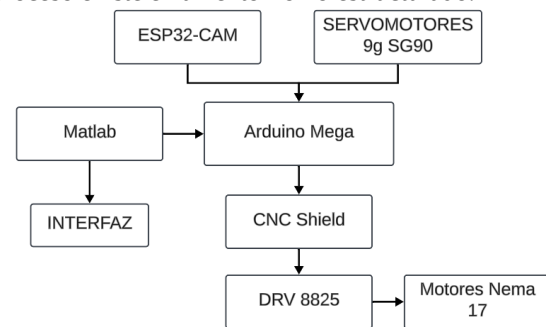


Fig. 1 Diagrama de conexión del brazo robótico

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A. Contextualización

La cosecha manual ha sido la práctica tradicional de recolección de frutos para su posterior traslado a los mercados, sin embargo, este método presenta limitaciones inherentes, como los altos costos laborales y la velocidad y precisión humana, lo que finalmente impacta en el costo para el consumidor. El problema se agrava cuando el fruto es más susceptible a ser dañado en la manipulación durante la cosecha, tales frutos son llamados frutos blandos.



Fig. 2 Recreación de la cosecha manual

B. Descripción del problema

Los frutos blandos son dañados durante la manipulación humana imprecisa debido a una cosecha brusca en términos de fuerza, velocidad y precisión, lo que acelera el tiempo de fermentación de estos.

C. Formulación del problema

¿Cómo diseñar un brazo robótico que realice una cosecha eficiente de frutos blandos?

D. Justificación

Resolver este problema permitirá no solo automatizar el proceso de cosecha blanda sino también implementar un método eficiente frente a la cosecha tradicional o manual.

E. Delimitación

El desarrollo de este brazo robótico busca resolver la necesidad inmediata de automatización de los movimientos de cosecha de cultivos blandos, la implementación de visión artificial y agarre suave son aspectos que se continúan desarrollando.

III. METODOLOGÍA

A. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y experimental que busco desarrollar y probar un sistema mecatrónica que busca resolver un problema real del proceso de cosecha.

B. Diseño de investigación

Se utilizará un diseño experimental con prototipado iterativo. Se construirán y evaluarán versiones sucesivas del sistema hasta alcanzar un desempeño óptimo.

C. Instrumentos

TABLA I
LISTA DE COMPONENTES

Cant.	Componente	Material / Modelo
Mecánica		
1	Base rotacional	Impresión PLA
2	Eslabones	Impresión PLA
1	Efector Final	Impresión PLA
2	Resortes lineales	
2	Tornillo M5 X 50 mm	
2	Tuerca M5	
4	Tornillo M3 X 50 mm	
4	Tuerca M3	
1	Husillo + Acople	
3	Rodamientos	
Electrónica		
1	Arduino Mega	
1	CNC Shield	
3	Controladores de motor	DVR 8825
1	Cable USB de A a B	
1	Fuente de poder	12V 10A
Sensores y actuadores		
1	Cámara	ESP32-CAM
3	Motores paso a paso	Modelo Nema 17

2	Micro servomotores	Modelo SG600
---	--------------------	--------------

D. Procedimiento

1) *Diseño y construcción:* Se modelaron en SolidWorks los soportes y estructuras necesarias para alojar los componentes electrónicos, garantizando un ensamblaje preciso. Las piezas se fabricaron mediante impresión 3D, logrando una integración óptima entre la parte eléctrica y mecánica.

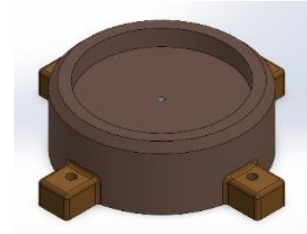


Fig. 3 Base

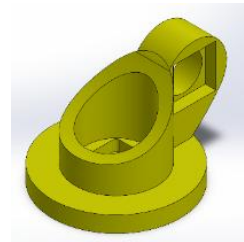


Fig. 4 Base 2 Giratoria

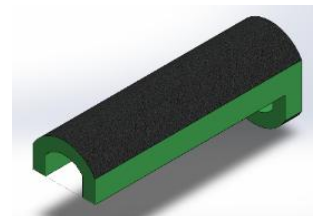


Fig. 5 Cubierta lineal

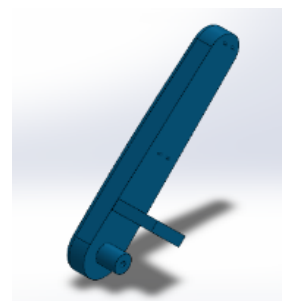


Fig. 6 Brazo móvil



Fig. 7 Efectador final



Fig. 8 Ensamblaje final

2) Proceso de desarrollo:

- Definición de la posición "home": Se estableció una posición inicial segura para el brazo robótico desde la cual iniciar los movimientos.
- Programación en MATLAB: Se desarrolló el código en MATLAB para controlar los grados de libertad del brazo, definiendo trayectorias, ángulos y secuencias de movimientos.
- Simulaciones virtuales: Se realizaron simulaciones en el entorno de MATLAB para validar el comportamiento del brazo antes de ejecutarlo en el entorno físico.
- Pruebas en ambiente controlado: Una vez validadas las simulaciones, se llevaron a cabo pruebas en un entorno experimental para observar la precisión de los movimientos y la respuesta del sistema.
- Ajustes y corrección de errores: Se realizaron ajustes en el código y en los parámetros de control según los resultados obtenidos en las pruebas, con el objetivo de optimizar la eficiencia del sistema y minimizar posibles errores o desviaciones.

ALGORITMO 1, LISTADO 1

```
1: function [T01, T02, T03] =
cinematica_directa_agrosheper(q1, q2, q3)
2: theta1 = q1; d1 = 0.13; a1 = 0.065; alpha1 =
pi/2;
```

```
3: A1 = matriz_homogenea_DH(theta1, d1, a1,
alpha1);
4: T01 = A1;

5: theta2 = q2; d2 = 0; a2 = 0; alpha2 = 0;
6: A2 = matriz_homogenea_DH(theta2, d2, a2,
alpha2);
7: T02 = A1 * A2;
8: theta3 = 0; d3 = 0; a3 = q3; alpha3 = 0;
9: A3 = matriz_homogenea_DH(theta3, d3, a3,
alpha3);
10: T03 = T02 * A3;
11: end
```

ALGORITMO 2, LISTADO 2

```
1: function [q1, q2, q3, T01, T02, T03] =
cinematica_inversa_agrosheper(x, y, z)
2: d1 = 0.13; a1 = 0.065; alpha1 = pi/2;
3: d2 = 0; a2 = 0; alpha2 = 0;
4: theta3 = 0; d3 = 0; alpha3 = 0;
5: q1 = atan2(y, x);
6: A1 = matriz_homogenea_DH(q1, d1, a1, alpha1);
7: T01 = A1;
8: orgx1 = T01(1,4); orgy1 = T01(2,4); orgz1 =
T01(3,4);
9: orgr1 = sqrt(orgx1^2 + orgy1^2);
10: r = sqrt(x^2 + y^2); dxy = r - orgr1;
11: aux1 = z - orgz1;
12: q2 = atan2(aux1, dxy);
13: A2 = matriz_homogenea_DH(q2, d2, a2, alpha2);
14: T02 = T01 * A2;
15: orgx2 = T02(1,4); orgy2 = T02(2,4); orgz2 =
T02(3,4);
16: q3 = sqrt((x-orgx2)^2 + (y-orgy2)^2 + (z-
orgz2)^2);
17: A3 = matriz_homogenea_DH(theta3, d3, q3,
alpha3);
18: T03 = T02 * A3;
19: if q3 < 0
20: error('La posición está fuera del rango del
actuador. ');
21: end
22: end
```

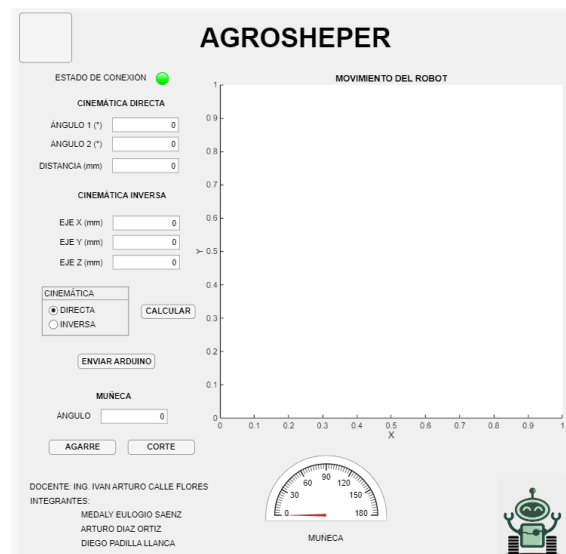


Fig. 9 Interfaz gráfica en MATLAB

3) *Pruebas y validación:* Se ejecutaron comandos insertando valores angulares para la cinemática directa y valores (x, y, z) para la cinemática inversa y realizar los movimientos del brazo robótico. Se observa su funcionamiento en tiempo real.



Fig. 10 Imagen del Brazo robótico

4) *Criterios de evaluación:* El criterio será comparar un robot industrial en el mercado y así obtener una referencia de dónde se sitúa el presente trabajo.

- a) Robot de Referencia: "Agrobot SW6010" (Robot comercial para cosecha de fresas)
- Empresa/Referencia: Agrobot (España).
 - Grados de Libertad: 4 DoF (brazo articulado + sistema de agarre).
 - Tipo de Espacio de Trabajo: Articulado (no esférico).
 - Precisión: Alta (usa visión artificial para identificar frutos maduros).
 - Implementación: Comercializado, con agarre neumático suave para evitar daños.

TABLA II
COMPARACIÓN BRAZO ROBÓTICO CON AGROBOT SW6010

Criterio	Brazo robótico (3 DoF Esférico)	Agrobot SW6010
Grados de Libertad	2 rotacionales + 1 prismático	4 articulados
Espacio de Trabajo	Esférico (ideal para frutos en árboles)	Cartesian/Articulado (mejor para fresas)
Agarre	No implementado (solo movimiento)	Neumático suave (evita daños)
Precisión	Depende de cinemática inversa	Alta (con visión por cámara)
Costo	Bajo (prototipo académico)	Alto (sistema comercial)
Escalabilidad	Limitado a frutos accesibles	Adaptable a múltiples cultivos

El brazo robótico ofrece un diseño simplificado (3 DoF) con espacio de trabajo esférico, útil para frutos en árboles, pero carece de un sistema de agarre suave y visión artificial, a diferencia del Agrobot. Sin embargo, su estructura mecánica es más económica y podría optimizarse para entornos controlados y no estructurados.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La automatización de la recolección en entornos no estructurados es viable y altamente beneficiosa. Los brazos robóticos con mecanismos de agarre y corte precisos pueden recolectar frutos delicados como fresas, uvas o tomates cherry con más del 90% de éxito sin dañarlos, lo que reduce pérdidas postcosecha y mejora la rentabilidad. Estos sistemas operan de forma continua, eliminando la fatiga humana y garantizando uniformidad. Su diseño modular permite adaptarse a distintos cultivos y entornos, y su integración con visión artificial optimiza aún más la eficiencia. Nuestro trabajo, aunque requiere una inversión más significativa, su implementación muestra que es posible replicar -por ahora- parcialmente sistemas que cada vez impulsan más una agricultura de precisión más sostenible y competitiva.

CONCLUSIONES

Una vez obtenidos los resultados, el prototipo de cosechador robótico, que imita la recolección manual, promete sumarse a ser una solución eficiente y confiable, capaz de minimizar el daño a los frutos y aumentar la productividad. Inicialmente controlado desde un programa de escritorio, se proyecta a mejorar los márgenes de ganancia de los agricultores. Su diseño articulado permite adaptarse a distintos cultivos y entornos agrícolas. Este proyecto ofrece una alternativa innovadora, económica y funcional, orientada a resolver problemas como la escasez de mano de obra, el alto costo laboral y el daño en la cosecha manual, promoviendo una agricultura más sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Máximo agradecimiento a nuestros padres que fueron el motivo principal para que esta investigación tenga luz. También agradecemos a nuestra casa de estudios, la Universidad Nacional de Ingeniería por brindarnos la guía de los conocimientos adquiridos.

REFERENCIAS

- [1] Selig, J. M. (1992). Introductory robotics. New York: Prentice Hall. Selig, J. M. (1992). Introductory robotics. New York: Prentice Hall.
- [2] Selig, J. M. (1992). Introductory robotics. New York: Prentice Hall.
- [3] Bolton, W. (2002). Mecatrónica, sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica. México: Alfaomega.
- [4] Certificación ISO en agricultura y ganadería | NQA

- [5] Khurshid, A. A., & Afzaal, M. (2011). Robotic Grasping and Fine Manipulation Using Soft Fingertip. *Advances in Mechatronics*, 155-174.
- [6] Alejandro Manchado Rubio: Desarrollo de un robot para la caracterización y el tratamiento de las plantas en agricultura de precisión.
- [7] M. B. I. Reaz, M. S. Hussain, F. Mohd-Yasin, "Techniques of EMG Signal Analysis: Detection, Processing, Classification and Applications", *Biological Procedures Online*, vol. 8, issue 1, pp. 11 35, March 2006.
- [8] E. J. Van Henten, J. Hemming, B. A. J. Van Tuijl, J. G. Komet, J. Meuleman, J. Bontsema, and E. A. Van Os, "An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses," *Auton. Robots*, vol. 27, no. 4, pp. 309-320, Nov. 2009, doi: 10.1007/s10514-009-9146-7.
- [9] A. M. Dollar and R. D. Howe, "The highly adaptive SDM hand: Design and performance evaluation," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 29, no. 5, pp. 585-597, Apr. 2010, doi: 10.1177/0278364909360852.
- [10] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [11] C. W. Bac, E. J. Van Henten, J. Hemming, and Y. Edan, "Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead," *J. Field Robot.*, vol. 31, no. 6, pp. 888-911, Nov. 2014, doi: 10.1002/rob.21525.
- [12] L. Mu, S. Cui, Y. Liu, and Y. Cui, "Design and analysis of a spherical workspace robot for fruit harvesting," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 168, p. 105107, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2019.105107.