

**Título del Proyecto de Investigación
al que corresponde el Reporte Técnico:**

Control basado en modelos aplicado en robots móviles

Tipo de financiamiento

Sin financiamiento

Fecha de Inicio: 01/11/2023
Fecha de Término: 31/10/2024

Tipo de Reporte

Parcial

Final

Autor (es) del reporte técnico:

Edgar Alonso Martínez García (Responsable)
Rafael Torres Córdoba
Elifalet López González
Josué Domínguez Guerrero

CONTROL BASADO EN MODELOS: ROBOTS MÓVILES

Resumen del reporte técnico en español

En este proyecto se desarrollan modelos cinemáticos, cinéticos y dinámicos de las estructuras mecanizadas de distintos tipos de robots, a partir de los cuales se deducen diversos controladores basados en los modelos físicos. Se exploran varias plataformas rodantes de autobalance dinámico y de locomoción subacuática, así como el diseño y modelado de mecanismos subactuados. Generalmente, este tipo de enfoques se valida, ya sea a través de la práctica experimental o similarmente mediante simulaciones numéricas sustentadas por los modelos deducidos. La segunda suele ser suficiente porque además permite una extensión más profunda de postulados analíticos. Aunque aquí se plantean análisis de sistemas lineales, la mayoría de las estructuras robóticas sujetas a este estudio están gobernadas de forma natural a modelos no lineales, por lo que este proyecto hace un estudio extensivo del uso de métodos matemáticos numéricos.

Resumen del reporte técnico en inglés:

In this research, we develop kinematic, kinetic, and dynamic models of mechanized structures in various types of robots, from which various controllers based on physical models are derived. We explore several dynamic self-balancing wheeled platforms and underwater locomotion, as well as the design and modeling of underactuated mechanisms. Typically, these approaches are validated either through experimental practice or similarly through numerical simulations supported by the deduced models. The latter is often sufficient as it also allows for a more in-depth exploration of analytical postulates. Although linear system analyses are presented here, most of the robotic structures studied in this project are inherently governed by nonlinear models. Therefore, this project extensively investigates the use of numerical mathematical methods.

Palabras clave: *bípodo-rodante, robot-biciclo, robot-esférico, mecanismos subactuados, robot-reconfigurable, robot-subacuático, biorobots.*

Usuarios potenciales (del proyecto de investigación)

Estudiantes de pregrado del programa de Ingeniería Mecatrónica, y de posgrados afines.

Reconocimientos

El éxito de este proyecto fue posible gracias a la colaboración de un equipo multidisciplinario. El autor responsable desea agradecer al Laboratorio de Robótica por proporcionar los recursos y el ambiente propicio para llevar a cabo esta investigación. Un reconocimiento especial merece la contribución de los estudiantes en el período 2023-2024, Manuel A. Montoya (Maestría en Cómputo Aplicado), Alejandra Morales Gallegos (Ingeniería Mecánica) y Juan D. Amparan Macías (Ingeniería Mecatrónica), Johan M. Ruíz Holguín, Kimberli Jennifer Medina, Carlos A. Tentle Mota y Allen I. Valdez Martínez cuyas tesis, estrechamente vinculadas a este proyecto, enriquecieron significativamente los resultados obtenidos.

1. Introducción

La locomoción de robots móviles, especialmente aquellos con diseños mecánicos complejos, presenta desafíos significativos debido a la no linealidad de sus modelos matemáticos. Las restricciones cinemáticas, típicas en estructuras con holonomía, limitan los grados de libertad y afectan directamente el desempeño y la eficiencia. Adicionalmente, factores como el número de actuadores, sus límites mecánicos y la fricción influyen en la movilidad y pueden llevar a trayectorias subóptimas. Este trabajo se centra en analizar y mejorar la comprensión de las características cinemáticas y dinámicas de estas estructuras, con el objetivo de desarrollar estrategias de control más eficientes en el desempeño energético en diversas aplicaciones.

Los robots móviles con estructuras mecánicas complejas, presentan desafíos únicos en términos de control y planificación de movimiento. Las restricciones cinemáticas, la no linealidad de los modelos dinámicos y la presencia de holonomías limitan la movilidad y eficiencia de estos sistemas. Este documento reporta los resultados en el desarrollo de técnicas de control para mejorar la locomoción de cierto tipo de robots móviles con

estructuras subactuadas y cinemáticamente redundantes. A través del análisis de las características cinemáticas y dinámicas de estas estructuras, se propusieron modelos de control que permiten mejorar la estabilidad durante la locomoción. Los resultados obtenidos en esta investigación tienen el potencial de ampliar las aplicaciones de los robots móviles en entornos complejos y dinámicos.

2. Planteamiento

Este trabajo explora y reporta los resultados de diversas técnicas de control empleadas para lograr y mantener el equilibrio y el posicionamiento de diversos sistemas de péndulo invertido [1,2,4,5] así como mecanismos modulares [6] y estructuras articuladas como exoesqueletos o peces artificiales [7] y subacuáticos [8,9].

2.1 Antecedentes

El comportamiento dinámico de los péndulos invertidos se modela comúnmente utilizando ecuaciones de movimiento derivadas de la mecánica Lagrangiana o Newtoniana. Estas ecuaciones establecen las relaciones entre las entradas, salidas y estados internos del sistema. Para aplicar técnicas modernas de teoría de control, el sistema de péndulo invertido se representa a menudo en forma de espacio de estados. Este enfoque matemático implica expresar las entradas, salidas y estados internos del sistema como vectores, lo que permite el uso de técnicas de espacio de estados para el análisis y diseño de control. Un método de control óptimo que minimiza una función de costo cuadrática, considerando tanto el estado del sistema como el esfuerzo de control. Los controladores LQR son utilizados debido a su robustez y capacidad para manejar incertidumbres del sistema.

Una técnica de control clásica que ajusta el movimiento del robot en función del error entre los estados deseado y real. Los controladores PID son simples de implementar y pueden proporcionar una estabilización efectiva.

Los filtros de Kalman son esenciales para estimar el estado del robot a partir de datos sensoriales ruidosos. Una estimación precisa del estado es crucial para un control por retroalimentación efectivo y el mantenimiento del equilibrio.

La lógica difusa y las redes neuronales se pueden explorar para estrategias de control adaptativo, especialmente en entornos con incertidumbre o cambios frecuentes. Estas técnicas permiten al controlador adaptar sus parámetros en tiempo real en función del comportamiento observado del sistema.

Una tendencia prometedora es la integración de técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial para mejorar el control de equilibrio automático [20]. Estos métodos permiten a los robots aprender estrategias de equilibrio óptimas a través de la experiencia, adaptarse a entornos cambiantes y mejorar su rendimiento con el tiempo.

2.2 Marco teórico

En el trabajo [10] introdujeron un enfoque de control adaptativo por modo deslizante para el seguimiento de trayectorias en vehículos no tripulados, utilizando un observador de modo deslizante para estimar los estados del sistema y ajustar adaptativamente la rigidez de giro. En un enfoque relacionado, [11] informó sobre el control difuso adaptativo recursivo por modo deslizante para tareas de seguimiento de trayectorias, aplicado a un robot omnidireccional. Este método utilizó un esquema de navegación basada en la fórmula de Runge-Kutta para la estimación de la postura.

Un amplio resumen de estrategias de seguimiento de trayectorias en el control de vehículos autónomos, presentado por [12], cubre la modelización, los algoritmos de seguimiento de trayectorias y la evaluación del rendimiento, abogando por el uso de controladores basados en modelos con modelos de vehículos. En [13] presentaron un enfoque de control predictivo de modelo lineal de tiempo

variable que integra el suavizado de trayectorias mediante caminos elementales generalizados, segmentos circulares y caminos bi-elementales. Su método se centra en la generación precisa de trayectorias de referencia en modo fuera de línea para habilitar el seguimiento en lazo cerrado en campos agrícolas para maquinaria agrícola autónoma.

Se presentaron conceptos fundamentales en cibernética en la intersección de la física, la teoría de control y los sistemas robóticos en [14], discutiendo un enfoque de gradiente de velocidad para modelar la dinámica de sistemas físicos. Ethorobotics, un campo de investigación novedoso, avanza en el desarrollo de réplicas robóticas bioinspiradas para el estudio del comportamiento animal.

Adicionalmente, en el transcurso de este proyecto se involucró el control y diseño de mecanismos para robótica modular y autoreconfigurable. Los principios de modularización y reconfiguración en robótica también se aplican a tareas donde se utilizan plataformas robóticas para múltiples propósitos. El trabajo de [15] presentó una plataforma robótica modular conceptual capaz de monitorear, cosechar y fumigar en la agricultura. Para abordar el desafío del recableado durante la adición y eliminación de módulos, el estudio de [16] introdujo una arquitectura humanoide modular reconfigurable. Esta arquitectura incorporó actuadores diseñados específicamente para la compatibilidad mecánica y eléctrica entre módulos. Las interfaces de comunicación en tiempo real entre módulos facilitan la integración colectiva autónoma. Las consideraciones de interacción ambiental son dominios de aplicación clave para la modularización y reconfiguración robótica.

3. Objetivos (general y específicos)

Obj. Gral. Desarrollar diversos controladores dinámicos basados en modelos físicos de distintos tipos de mecanismos robóticos, evaluando su idoneidad según el modelo dinámico de cada estructura robótica y su función específica. Se incluirán controladores en cascada anidada de orden superior, controladores no lineales tipo PD² [4,-6], modos deslizantes [3] y neuro-difusos, aplicados a funciones como navegación, autobalance, locomoción y control de trayectorias [24].

Obj. Part. 1. Diseñar modelos mecanizados de diversas plataformas robóticas para su análisis, incluyendo plataformas de tipo: rodantes hiperstáticos, bípedos rodantes de autobalance [23], bicíclulos de autobalance[21,22], sistemas de locomoción esférica con autobalance, mecanismos autorreconfigurables, vehículos subacuáticos redundantes y biorrobots subactuados.

Obj. Part. 2. Deducir los modelos dinámicos (cinemáticos y cinéticos) a partir de las estructuras geométricas de los sistemas físicos que describen cada tipo de robot, utilizando la mecánica Lagrangiana, Hamiltoniana y de Newton-Euler.

Obj. Part. 2. Desarrollar y aplicar modelos de controladores retroalimentados, adaptando distintos enfoques según el tipo de estructura robótica mecanizada, tales como: controladores PID, cascadas anidadas, tipo PD², fraccionales, de modos deslizantes y conmutadores neuronales.

4. Metodología

- i. Se revisó literatura científica relacionada con mecanismos de estructuras robóticas 4W, auto-balance y subacuáticas.
- ii. Se asignaron temas de proyectos de titulación a los estudiantes de varios programas.
- iii. Se diseñaron y simulaban modelos CAD de mecanismos de estructuras planificadas.
- iv. Se analizaron las estructuras robóticas de interés, para soluciones cinemáticas.
- v. Se dedujeron soluciones dinámicas con enfoques de Lagrange, Hamilton y Newton.
- vi. Se revisó literatura científica relacionada a controladores en robótica.
- vii. La mayoría de aplicaciones reportadas maneja control lineal con espacio de estados.
- viii. Se realizaron dos seminarios con exposición de reportes relacionados al proyecto.

- ix. Se enviaron artículos académicos a editoriales con resultados del proyecto, también otros resultados previos a la apertura del proyecto pero antecedentes del mismo proyecto.
- x. Se codificaron modelos y controladores de actuadores con diferentes enfoques según la aplicación y la estructura mecánica.
- xi y xii. Se desarrollaron controladores en cascadas anidadas, espacio de estados, PIDs, modo deslizante y neuro-difusos, y se seleccionaron según el tipo de estructura robótica.
- xiii. Los resultados validados ya se reportaron en publicaciones científicas ya publicadas, otras han sido aceptadas, y otras están en proceso de revisión editorial.
- xiv. Se han publicado videos de resultados de este proyecto como divulgación científica.
- xv. Adicionales a los artículos ya aceptados y publicados, también se tienen manuscritos en proceso de revisión en respectivos editores.

5. Instituciones, organismos o empresas de los sectores social, público o productivo participantes

No aplica.

6. Resultados

Se publicaron dos artículos en revistas científicas arbitradas ISI JCR Q2. Uno de ellos presenta el uso de un controlador en cascada para el movimiento de un exoesqueleto (robot portable), mientras que el otro describe la aplicación de un controlador neuro-difuso. Además, un artículo en una revista científica ISI JCR Q1 se encuentra en la segunda fase de revisión, abordando la aplicación de un controlador de trayectoria basado en modos deslizantes para un robot móvil.

Asimismo, se aceptaron dos capítulos de libro en una editorial internacional (Elsevier) para su próxima publicación. Uno de estos capítulos analiza diversos controladores tipo PD y en cascada aplicados a mecanismos robóticos reconfigurables; el segundo capítulo reporta el uso de controladores anidados para el control biomecánico de biorrobots.

En cuanto a los avances académicos, se ha finalizado una tesis de maestría, cumpliendo con todos los requisitos, y el alumno solo espera la asignación de una fecha para el examen de defensa. Dos tesis de licenciatura en Mecánica y Mecatrónica, asociadas al proyecto, han sido presentadas. Otra tesis de licenciatura está en proceso de finalización y

se espera que el examen de defensa se realice a finales de noviembre de 2024. Además, tres tesis adicionales de licenciatura en Mecatrónica están actualmente en desarrollo como parte del proyecto.

Se elaboró material didáctico y se actualizaron temas de clases para incorporar estos resultados en el ámbito académico. Finalmente, como parte del proyecto, se desarrollaron varios prototipos (ver Figura 1).

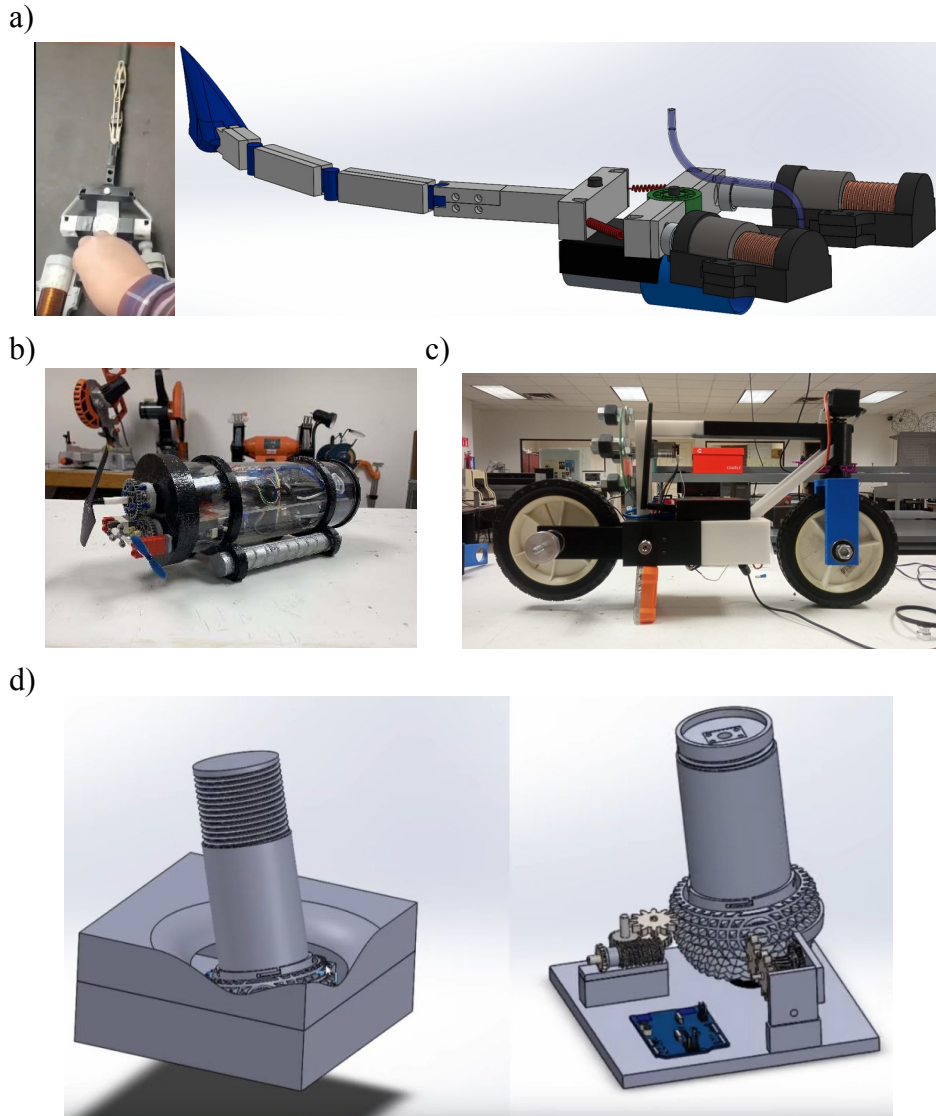


Figura 1. Prototipos robóticos del presente proyecto. a) Biorobot pez de mecanismo subactuado de control cibernético. b) Robot subacuático. c) Biciclo para autobalance. d) Mecanismo robótico modular reconfigurable.

7. Productos generados

Se resumen los productos generados

Productos esperados (2023)	Productos Obtenidos (2024)
1 publicación en revista arbitrada	2 publicaciones en revistas arbitrada JCR Q2
1 capítulo de libro internacional	2 capítulos de libro internacional aceptados
2 tesis de licenciatura	1 tesis de maestría 2 tesis de licenciatura
1 reporte técnico	5 reportes tecnicos
1 video de divulgación científica	2 videos de divulgación científica
	1 articulo en revisión en revista JCR Q1
	1 tesis de licenciatura

Revistas indexadas

1. U. Castro Jimenez, **E. A. Martinez-Garcia**, *EMG model calibration and trajectory tracking of rehabilitation exoskeleton by asynchronous tele-training*, **Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization**, 12(1), 2401376, 2024, Taylor & Francis (ISI JCR)

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21681163.2024.2401376#abstract>

2. M. Montoya, R. Torres-Cordoba, E. Magid, **E.A. Martinez-Garcia**, *Electromyography-Based Biomechanical Cybernetic Control of a Robotic Fish Avatar*, **Machines**, 2024, 12, 124, p. 1-41, MDPI (ISI JCR)

<https://www.mdpi.com/2075-1702/12/2/124>

Capítulos de libro internacionales

1. A. Morales Gallegos, R. Torres-Cordoba, E. Magid, **E. A. Martinez-Garcia**, *Dynamic Robot Modeling of a Joint Mechanism for Flexible Reconfiguration*, Modeling, A.T. Azar, A. Fekik (eds) **Dynamics and Control approaches for Modern Robotics**, 2024, Elsevier (**Aceptado**)

2. E. Soto-Tovar, E. Magid, **E. A. Martinez-Garcia**, *Biomechanically Compliant Caudal Model Inspired by Cetacean Musculoskeletal Dynamics*, A.T. Azar, A. Fekik (eds) **Dynamics and Control approaches for Modern Robotics**, 2024, Elsevier (**Aceptado**)

Producción y disseminación de divulgación científica y académica

-- Videos --

1. Robot acuatico bioinspirado de control cibernetico
<https://www.youtube.com/watch?v=09KxKiRE4E8>
2. Mecanismos para robots modulares reconfigurables
<https://www.youtube.com/watch?v=rP2fbQMjIB4>

Artículos Pre-impresos

1. A. Morales Gallegos, R. Torres-Cordoba, E. Magid, **E.A. Martinez-Garcia** (2024). *Design and Analysis of Modular Mechanisms for Flexible Reconfiguration in Robotics*. Posted: 18 March 2024. **engrxiv Engineering Archive**. <https://engrxiv.org/preprint/view/3558>
2. U. Castro Jimenez, **E.A. Martinez-Garcia**, *EMG model calibration and trajectory tracking by remote rehabilitation exoskeleton*. Posted: 19 January 2024. **Preprints 2024, 2024011415**.
<https://doi.org/10.20944/preprints202401.1415.v1>
3. M.A. Montoya, R. Torres-Cordoba, E. Magid, **E. A. Martinez-Garcia**, *EMG-Based Biomechanical Cybernetic Control of an Avatar Robotic Fish*, Posted: 10 January 2024. **Preprints 2024, 2024010847**.
<https://doi.org/10.20944/preprints202401.0847.v1>
4. J. Samaniego, E. Lopez-Gonzalez, E. Magid, **E. A. Martinez-Garcia**, *Path-Tracking in Double Spiraliform Sowing Fields with Agricultural Robotics*. Posted: 30 Sep 2023. Available at SSRN:
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4589037>

Data sets relacionados con las tesis de este proyecto

1. Castro Jimenez U., Martinez-Garcia, E. A. (2024). EMG model calibration and trajectory tracking by remote rehabilitation exoskeleton, [Data set] Zenodo. Uploaded Jan 18 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10525565>
2. Montoya, M. & **Martinez-Garcia, E. A.** (2024). *EMG-based biomechanical cybernetic control of an avatar robotic fish*, [Data set] Zenodo. Uploaded Jan 12 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10477143>

8. Conclusiones

Este proyecto ha identificado varias áreas de mejora para futuros desarrollos.

En general, se encontró que es recomendable reducir al máximo la cantidad de componentes intermedios entre los sensores, actuadores y la tarjeta de control principal. La experiencia con este proyecto ha demostrado que una arquitectura más sencilla, con una tarjeta de control que integre la mayor cantidad posible de funcionalidades, puede mejorar significativamente la estabilidad y el rendimiento de estos sistemas de tiempo real. Así mismo, es fundamental realizar una investigación exhaustiva y comparar diferentes opciones de tarjetas de desarrollo antes de iniciar un proyecto. La elección de una tarjeta que se adapte perfectamente a las necesidades del proyecto, en términos de puertos, protocolos de comunicación y capacidad de procesamiento, es crucial para evitar problemas de compatibilidad y eficiencia de los subsistemas.

Además, al manufacturar el chasis de cualquier plataforma, ya sea mediante impresión 3D o métodos de manufactura convencionales, es esencial respetar las tolerancias dimensionales y estructurales especificadas. Cualquier desviación de estas tolerancias puede comprometer el funcionamiento de las estructuras mecánicas y generar problemas de ajuste y alineación. En caso de que una pieza no cumpla con los requisitos, se recomienda fabricarla nuevamente desde cero para evitar pérdidas de tiempo y problemas de funcionamiento.

Por otro lado, antes de implementar los controladores en el sistema real, es altamente recomendable realizar simulaciones exhaustivas. Esto permitirá verificar el correcto funcionamiento de los modelos y detectar posibles errores o inestabilidades antes de que se produzcan en el sistema físico.

Inicialmente, el diseño de mecanismos y sus grados de libertad a nivel CAD facilita la generación de varios prototipos agilizando modificaciones y acelerando el proceso de modelado de sistemas físicos hasta alcanzar un módulo idóneo con las funciones deseadas. En general se encontró coherencia entre los coeficientes de ventaja mecánica de los mecanismos propuestos y los parámetros necesarios en el espacio de trabajo.

Llevar a cabo diseños inéditos de mecanismos de engranajes demuestra idoneidad para la aplicación deseada, proporcionando estabilidad motriz y amplificación del torque en las salidas. La amplificación de torques es generalmente esencial en ingeniería de control de estructuras robóticas.

La incorporación modelos de sensores para medir e inferir variables dinámicas de posición, velocidad y aceleración, es fundamental para integrarlos en las ecuaciones cinemáticas y dinámicas que modelan los mecanismos. A pesar de que el enfoque principal del proyecto se centró en el modelado dinámico de mecanismos, fue necesario desarrollar modelos físicos como punto de partida para deducir los modelos cinemáticos, cinéticos y dinámicos.

Los modelos se validaron en C++, dado que este lenguaje demostró ser idóneo debido a su capacidad de control rápido y alta precisión numérica. En general, todos los cálculos numéricos se ejecutaron en tiempos reducidos para solucionar cálculos exhaustivos de matrices de torques instantáneos de cada mecanismo, considerando todos los elementos involucrados simultáneamente, deducidos mediante ecuaciones de Euler-Lagrange.

A pesar de la amplia adopción de otros controladores en la teoría de control moderna, en este proyecto se optó por establecer modelos de control basados en la física de los mecanismos. La ventaja de este enfoque radica en que los parámetros físicos, como la inercia, la masa y la gravedad, se dedujeron de manera natural, en contraposición a otros enfoques que requieren ajustes basados en ensayo y error, como el controlador PID.

9. Mecanismos de transferencia. (Si aplica)

No aplica

10. Contribución e impacto del proyecto

Este proyecto promueve la colaboración entre las áreas de ingeniería mecatrónica y mecánica, con el objetivo de desarrollar soluciones robóticas innovadoras. Mediante la creación de arquitecturas de software flexibles y escalables, y la construcción de prototipos experimentales, se busca explorar nuevas tendencias en el campo de la robótica. Los resultados de esta investigación sirven como base para la generación de

infraestructura tecnológica y materiales académicos que enriquecerán los planes de estudio de ambas ingenierías, fomentando la formación de profesionales con una visión integral de la robótica.

11. Impacto económico, social y ambiental en la región

Los estudios realizados y los resultados obtenidos se han estado integrando de manera inmediata en las aulas de clase, con el objetivo de fortalecer y actualizar los contenidos de los planes de estudios en ingeniería. Esta incorporación está permitiendo que los estudiantes tengan acceso a los conocimientos más recientes y relevantes en el campo, promoviendo una formación actualizada que responda a los desafíos y avances de la industria.

Dado que este proyecto es de carácter académico y no involucra actividades productivas o intervenciones en el entorno físico, no se prevén impactos económicos ni ambientales directos. Su naturaleza se centra en la generación y transferencia de conocimiento teórico-práctico, que beneficiará exclusivamente el ámbito educativo sin alterar ecosistemas o mercados.

12. Referencias

1. Y. Wang, G. Zhu, Performance Improvement of an NMP Mini Segway Using Sample and Hold Inputs, *Appl. Sci.* 2023, 13(2), 1070, MDPI.
2. N. Kien Vu. H. Quang Nguyen, Balancing Control of Two-Wheel Bicycle Problems, *Applied Mathematics for Engineering Problems*, 2020, Hindawi.
3. V.I. Utkin, H. Chang, Sliding mode control on electro-mechanical systems, *Math. Problems in Eng*, 8(4-2) 451-473, 2002 Francis & Taylor.
4. I. Jmel, H. Dimassi, S. H. Said, F. M'Sahli, Adaptive Observer-Based Output Feedback Control for Two-Wheeled Self-Balancing Robot, *Mathematical problems in Engineering*, vol. 2021, ID 5162172, Hindawi.

5. A.N. Inal, O. Morgul, U. Saranlı, A 3D dynamic model of a spherical wheeled self-balancing robot. 2012 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura, Algarve, Portugal.
6. W. Saab, P. Racioppo, P. Ben-Tzvi, A review of coupling mechanism designs for modular reconfigurable robots. *Robotica*, 1-26. Cambridge Univ Press, 2018.
7. P. Duraisamy, R. Kumar Sidharthan, M. Nagarajan Santhanakrishnan, Design, Modeling, and Control of Biomimetic Fish Robot: A Review, *J Bionic Eng* 16 (2019) 967–993, 2019, Springer.
8. T. H. Koh, M. W.S. Lau, E. Low, G. Seet, S. Swee, P. L. Cheng, A Study of the control of An Underactuated Underwater Robotic Vehicle. 2002 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems EPFL, Switzerland.
9. D.A. Smallwood, L.L. Whitcomb, Model-Based Dynamic Positioning of Underwater Robotic Vehicles: Theory and Experiment. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 29(1), 169-186, 2004.
10. Z. Ge, Z. Man, Z. Wang, X. Bai, X. Wang, F. Xiong, D. Li, Robust adaptive sliding mode control for path tracking of unmanned agricultural vehicles, *Computers and Electrical Eng*, 108(2023), 108693.
11. Z. Sun, S. Hu, H. Xie, H. Li, J. Zheng, B. Chen, Fuzzy adaptive recursive terminal sliding mode control for an agricultural omnidirectional mobile robot, *Computers and Electrical Eng* 105(2023), 108529.
12. N.A.I. Ruslan, N. H. Amer, K. Hudha, Z. A. Kadir, S. A. F. M. Ishak, S. M. F. S. Dardin, Modelling and control strategies in path tracking control for

autonomous tracked vehicles: A review of state of the art and challenges, J. of Terramechanics, 105, p. 67-79, 2023.

13. M.M.G. Plessen, A. Bemporad, Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines, Biosys Eng, 153(2017), p. 28-41, 2017.

14. Fradkov, A.L. Application of cybernetic methods in physics. Physics-Uspekhi 2005, 48, 103.

15. Saeed, R. A. et al. Conceptualization and Implementation of a Reconfigurable Unmanned Ground Vehicle for Emulated Agricultural Tasks, Machines, 2022(10), p. 817. 2022,

16. Taira, T., Kamata, N. and Yamasaki, N. Design and implementation of reconfigurable modular humanoid robot architecture, 2005 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Alberta, IEEE.

17. Vu, N. K., Y Nguyen, H. Q. Balancing Control of Two-Wheel Bicycle Problems. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 74-86. 2020.

18. Li, F. (2021). Research on self-balancing unmanned bicycle based on cascade PID control. 2021 IEEE 2nd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA), 2, 442-446.

19. Liu, Y., Y Jin, Z., Y Huo, B., Y Guan, Q., Y Yu, H. Self-balance Control of Bicycle with Inertial Wheel Pendulum based on Linear ADRC. 2022 China Automation Congress. 6403-6408. 2022,

20. Zhu, X., Y Deng, Y., Y Zheng, X., Y Zheng, Q., Y Chen, Z., Y Liang, B., Y Liu, Y. Online Series-Parallel Reinforcement-Learning-Based Balancing

Control for Reaction Wheel Bicycle Robots on a Curved Pavement. IEEE Access, 1-1. 2023.

21. Annestad, D. Autonomus Bicycle. The First Self Balanced Ride, Tesis de maestria, Norwegian University of Sci and Tech, 260521. 2011.

22. Cole, C., Lorenzo, R., Boyal, N., Concept Design Review Report Self-Balancing Bicycle Device.

23. Bhatia, K., Singla, A. A Literature Review on Self Balancing in Line Two-Wheeler (Bi-Cycle), Intl J.l of Eng. App Sci and Tech, 6,228-234.

24. Yeh, T., Lu, H., Tseng, P., Balancing Control of a Self-driving Bicycle, Intl Conf on Info in Control, Automation and Robotics,16,34-41.

13. Anexos

13.1 Taxonomía de los Roles de Colaborador

Roles	Def. de roles	Investigador	Figura	Grado contrib	Actividades logradas	Tiempo prom. semanal (hr)
Responsabilidad ad proyecto	Dirigió, planificó y ejecutó actividades de investigación y coordinó colaboraciones.	Edgar Alonso Martínez García	Director	Principal	Planificar y supervisar actividades, coordinar, redactar, aplicar métodos, verificar resultados.	10
Elaboración análisis formal investigación	Verificó resultados preliminares en etapa de análisis.	Rafael Torres Córdoba	Analista de datos	Apoyo	Aplicar métodos matemáticos y teóricos para solución.	2
Elaboración análisis formal investigación	Verificó resultados preliminares en etapa de análisis.	Elifalet Lopez Gonzalez	Analista de datos	Apoyo	Aplicar métodos matemáticos y teóricos para solución.	1
Elaboración análisis formal investigación	Verificó algunos resultados preliminares de una etapa de análisis.	Josue Dominguez Guerrero	Analista de datos	Apoyo	Aplicar métodos computacionales, y técnicas para analizar datos.	1

13.1.1 Estudiantes participantes en el proyecto

Nombre de estudiante(s)	Matrícula	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto	Actividades logradas en la ejecución del proyecto
Juan D. Amparan Macias	182848	12 hrs	Tesis de licenciatura en Mecatronica, prototipo de laboratorio, material de publicacion cientifica en proceso.
Alejandra Morales Gallegos	173527	6 hrs	Tesis de licenciatura en Mecanica, Capitulo de libro internacional. Video divulgación científica.
Isaac Allen Valdez Martínez	189178	10 hrs	Tesis de licenciatura en Mecatronica, a 1 mes de defensa de tesis.
Manuel A. Montoya Martínez	228165	20 hrr	Articulo Revista Arbitrada Prototipo de laboratorio Tesis de Maestría
Johan M. Ruiz Holguín	203489	12 hrs	Tesis de Ing. Mecatrónica en Proceso Prototipo experimental de laboratorio
Kimberly Jeniffer Medina	189388	12 hrs	Tesis de Ing. Mecatronica en Proceso Prototipo experimental de laboratorio
Carlos A. Tentle Mota	189255	10 hrs	Tesis de Ing. Mecatronica en Proceso Prototipo experimental de laboratorio



Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Instituto de Ingeniería y Tecnología
Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura
Acta de Examen de Proyecto de Titulación

Ciudad Juárez Chihuahua a día 1 de diciembre de 2023, siendo las 18:00 horas, se reúnen en la Sala audiovisual de Manufactura los integrantes del jurado:

Director de tesis: Edgar Alonso Martínez García

Sinodal 1: Dr. Rafael Torres Córdoba,

Sinodal 2: Dra. Alma Guadalupe Rodríguez Ramírez

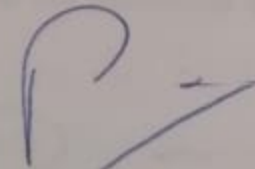
Lector: Dr. Uzziel Caldiño Herrera


Se procede a efectuar la evaluación del proyecto de titulación que presenta la alumna **ALEJANDRA MORALES GALLEGOS**, con matrícula **173527**, alumna del programa de **Ingeniería Mecánica**.

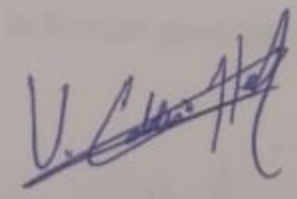
Tomando en cuenta los miembros del jurado el contenido del proyecto cuyo tema es: **"DISEÑO, MODELADO Y CONTROL DE UN MECANISMO MODULAR PARA PLATAFORMAS ROBOTICAS RECONFIGURABLES"**, dictamina que es: **Aprobada**

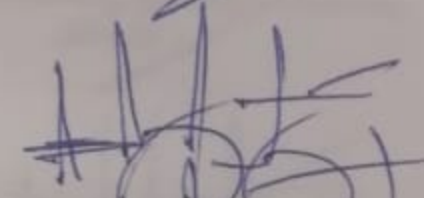
El presidente del jurado hace saber a la sustentante el resultado obtenido.

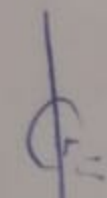
Se da por terminado el Acto a las 19:00 horas, y una vez escrita, leída y aprobada la firman para dar constancia las personas que en el acto intervienen.

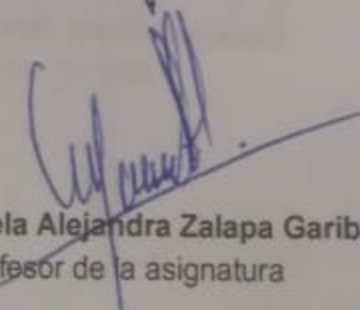

Dr. Rafael Torres Córdoba
Sinodal 1

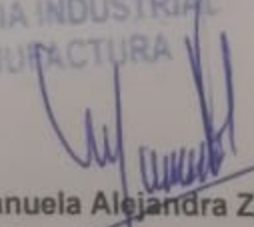

Dra. Alma Guadalupe Rodríguez Ramírez
Sinodal 2


Dr. Uzziel Caldiño Herrera
Lector


Dr. Edgar Alonso Martínez García
Director de tesis


Dr. Lázaro Rico Pérez
Coordinador de la Academia
de Ingeniería Mecánica


Dra. Manuela Alejandra Zalapa Garibay
Profesor de la asignatura


Dra. Manuela Alejandra Zalapa Garibay
Coordinador del Programa
de Ingeniería Mecánica



UACJ
DEPARTAMENTO DE
INGENIERIA INDUSTRIAL
Y MANUFACTURA



Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Instituto de Ingeniería y Tecnología
Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura
Acta de Examen de Proyecto de Titulación

Ciudad Juárez Chihuahua a los 30 días del mes de mayo de 2024, siendo las 9:00 horas, se reúnen los integrantes del jurado en el edificio Y2-109, del Instituto de Ingeniería y Tecnología, los integrantes del jurado:

Presidente del jurado: Dr. Edgar Alonso Martínez García

Sinodal (1): Dr. Juan Luis Hernández Arellano

Sinodal (2): Dr. Baldomero Villa Covarrubias

Lector : Dr. Rafael Torres Córdoba

Se procede a efectuar la evaluación del proyecto de titulación que presenta el C. **JUAN DANIEL AMPARÁN MACÍAS** con matrícula **182848**, alumno del programa de **Ingeniería Mecatrónica**

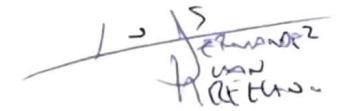
Tomando en cuenta los miembros del jurado el contenido del proyecto cuyo tema es: "**CONTROL BASADO EN MODELOS DE UN BICICLO DE AUTO-BALANCE DINÁMICO**", dirigido por el Dr. Edgar Alonso Martínez García enfocando a personal y la réplica del mismo dictamina que es: **APROBADO**.

El presidente del jurado hace saber al sustentante el resultado obtenido.


Se da por terminado el Acto a las 10:00 horas, y una vez escrita, leída y aprobada la firman para dar constancia, las personas que en el acto intervienen.



Dr. Edgar Alonso Martínez García
Asesor



Dr. Juan Luis Hernández Arellano
Sinodal (1)



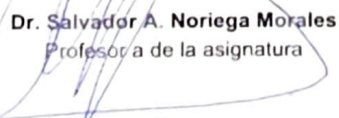
Dr. Baldomero Villa Cobarrubias
Sinodal (2)



Dr. Rafael Torres Córdoba
Lector



M.C. Miguel Ángel García Terán
Coordinador de la Academia
de Ingeniería Mecatrónica



Dr. Salvador A. Noriega Morales
Profesor a de la asignatura



Article

Electromyography-Based Biomechanical Cybernetic Control of a Robotic Fish Avatar

Manuel A. Montoya Martínez ^{1,†}, Rafael Torres-Córdoba ¹ , Evgeni Magid ^{2,3}  and Edgar A. Martínez-García ^{1,*,†} 

¹ Laboratorio de Robótica, Institute of Engineering and Technology, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez 32310, Mexico; al228165@alumnos.uacj.mx (M.A.M.M.); ratorres@uacj.mx (R.T.-C.)

² Institute of Information Technology and Intelligent Systems, Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia; magid@it.kfu.ru

³ HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, HSE University, Moscow 101000, Russia

* Correspondence: edmartin@uacj.mx

† These authors contributed equally to this work.

Abstract: This study introduces a cybernetic control and architectural framework for a robotic fish avatar operated by a human. The behavior of the robot fish is influenced by the electromyographic (EMG) signals of the human operator, triggered by stimuli from the surrounding objects and scenery. A deep artificial neural network (ANN) with perceptrons classifies the EMG signals, discerning the type of muscular stimuli generated. The research unveils a fuzzy-based oscillation pattern generator (OPG) designed to emulate functions akin to a neural central pattern generator, producing coordinated fish undulations. The OPG generates swimming behavior as an oscillation function, decoupled into coordinated step signals, right and left, for a dual electromagnetic oscillator in the fish propulsion system. Furthermore, the research presents an underactuated biorobotic mechanism of the subcarangiform type comprising a two-solenoid electromagnetic oscillator, an antagonistic musculoskeletal elastic system of tendons, and a multi-link caudal spine composed of helical springs. The biomechanics dynamic model and control for swimming, as well as the ballasting system for submersion and buoyancy, are deduced. This study highlights the utilization of EMG measurements encompassing sampling time and μ -volt signals for both hands and all fingers. The subsequent feature extraction resulted in three types of statistical patterns, namely, Ω , γ , λ , serving as inputs for a multilayer feedforward neural network of perceptrons. The experimental findings quantified controlled movements, specifically caudal fin undulations during forward, right, and left turns, with a particular emphasis on the dynamics of caudal fin undulations of a robot prototype.

Keywords: biorobotics; cybernetics; neural network; robot fish; EMG signals; robotic avatar; dynamic control



Citation: Montoya Martínez, M.A.; Torres-Córdoba, R.; Magid, E.; Martínez-García, E.A. Electromyography-Based Biomechanical Cybernetic Control of a Robotic Fish Avatar. *Machines* **2024**, *12*, 124. <https://doi.org/10.3390/machines12020124>

Academic Editor: Med Amine Laribi

Received: 3 January 2024

Revised: 5 February 2024

Accepted: 6 February 2024

Published: 9 February 2024

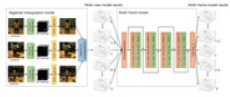


Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Avatar robotics involves remotely controlling a robot to interact with the physical environment on behalf of a human operator, enabling them to virtually embody the robot and perform actions as if physically present [1,2]. This transformative technology extends human presence to remote or hazardous locations, with applications spanning space exploration, disaster response, remote inspection, telemedicine, and diverse domains. Leveraging progress in robotics, teleoperation systems, sensory feedback interfaces, and communication networks, avatar robotics enhances human capabilities, ensures safer operations, and broadens human presence and expertise in various fields [3,4].

Furthermore, cybernetic control functions as a regulatory system utilizing feedback mechanisms to uphold stability and achieve desired outcomes [5]. The incorporation of feedback loops is central to cybernetic control systems, continuously monitoring a system's behavior, comparing it to a reference state, and generating corrective actions to address any deviations. This iterative feedback process facilitates self-regulation and goal attainment



Editor
José Manuel R.S. Torres



Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: www.tandfonline.com/journals/tciv20

EMG model calibration and trajectory tracking of rehabilitation exoskeleton by asynchronous tele-training

Ubaldo Castro Jiménez & Edgar A. Martínez-García

To cite this article: Ubaldo Castro Jiménez & Edgar A. Martínez-García (2024) EMG model calibration and trajectory tracking of rehabilitation exoskeleton by asynchronous tele-training, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 12:1, 2401376, DOI: [10.1080/21681163.2024.2401376](https://doi.org/10.1080/21681163.2024.2401376)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/21681163.2024.2401376>



© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 18 Sep 2024.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 16



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

EMG model calibration and trajectory tracking of rehabilitation exoskeleton by asynchronous tele-training

Ubaldo Castro Jiménez and Edgar A. Martínez-García 

Laboratorio de Robótica, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Juárez, Mexico

ABSTRACT

This study presents a novel kinematic tracking model, designed for a networked exoskeleton system that is asynchronously taught by a remote therapist. The therapist's rehabilitation exercises are quantitatively assessed using a monocular vision system. The resultant metrics are then transmitted asynchronously over the network to patients equipped with exoskeletons. The exoskeleton utilises these metrics as reference paths for exercises, complemented by electromyography (EMG) feedback. This work introduces a calibration approach aimed at estimating angular positions by utilising EMG observations. The calibration model establishes real-time correlations between polynomial reference positions. We further explore redundant kinematics, incorporating an EMG observer for linear, time-variant rehabilitation tracking control. Our methodology is validated using vision-based metric data and experimental EMG measurements including shoulder flexion, elbow flexion, and rowing-like movements. Computer simulations demonstrate the system's ability to reliably, robustly, and effectively follow desired trajectories. This research offers a promising approach for remote personalized rehabilitation.

ARTICLE HISTORY

Received 4 November 2022
Accepted 30 August 2024

KEYWORDS

EMG-feedback; exoskeleton;
tele-rehabilitation;
trajectory-control; kinematic
calibration

1. Introduction



From time to time, mankind has had to confront global infectious diseases with deadly impact, as has recently been the case with the Coronavirus, COVID-19. Family members have been compelled to take on in-home responsibilities due to quarantine, including patients following medical treatments. Pandemic-related robotic systematised solutions have been described for multiple scenarios (Magid et al. 2021). Similarly, telesystems, communication networks, intelligent machines, and information technologies provide support for easy post-pandemic scenarios (Haider et al. 2020; Yang et al. 2020) by keeping us away from contagious scenarios (Touil et al. 2020; Wu et al. 2020).

The current technological market has provided a spectrum of modern communication technology such as distributed networked equipment, Internet-based telesystems, telepresence devices, either synchronous or asynchronous modalities (Barr et al. 2020). Telesystems applications have evolved into Internet shopping, remote academic/job meetings, virtual scholarly classes, and healthcare support, such as tele-rehabilitation therapies.

An exoskeleton is a wearable robot fitted on a human's body, designed to enhance biomechanical functions, with the human serving as the controller (Yang et al. 2008; Pons 2008). To be effective, an exoskeleton must provide a sense of lightness and agility, akin to the human bone structure. The advantages of exoskeleton technology extend to enhancing biomechanical capabilities, addressing diverse needs such as

the substitution of body parts' mobility, providing locomotion assistance (Samadi et al. 2015; Li et al. 2019), and aiding in rehabilitation (Díez et al. 2016; Buongiorno et al. 2018; Pu et al. 2020; Charafeddine 2019). Rehabilitation is particularly crucial in cases of post-corrective surgeries, where constant therapy is required to expedite recovery. Demand for exoskeletons spans various sectors, including athletics, sports, manual labour, and the military, where common surgeries involve conditions like rotator cuff injuries, acromioclavicular articulation injuries, elbow dislocations, hip dislocations, reconstruction of injured anterior cruciate ligaments, knee arthroscopy, and total knee replacement. Prolonged post-surgery rehabilitation plays a critical role in recovery, as prolonged limb immobilisation can lead to a significant reduction in muscle strength and mobility. Additionally, various studies have explored control algorithms for lower-limb wearable robot systems (Jiménez and Verlinden 2011), as well as for upper limbs (Bauer and Pan 2020), to provide power assistance (Li et al. 2014). Wearable robotic hands have been developed for purposes such as haptic feedback, assistive functions, and rehabilitation (Saraç et al. 2019). These devices also find applications in tasks like grasping (Gandolla et al. 2016), the development of multimodal rehabilitation exoskeletons (Li et al. 2017; Sun et al. 2020), and walking assistance (Aguirre-Ollinger et al. 2011).

The work by (He et al. 2015) introduced an adaptive neural control system for rehabilitating lower limbs with unknown model dynamics, focusing on adapting to the complex dynamics of human-exoskeleton interactions. In this study, we

CONTACT Edgar A. Martínez-García  edmartin@uacj.mx  Laboratorio de Robótica, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ave. del Charro 450 Norte, Col Partido Romero, Ciudad Juárez Chihuahua 32310, Mexico

© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

Dynamic Robot Modeling of a Joint Mechanism for Flexible Reconfiguration

Alejandra, Morales Gallegos, B.Eng. Mech., Universidad Autonoma de Ciudad Juarez, Institute of Engineering and Technology, Juarez, Mexico

Rafael, Torres-Cordoba, PhD, Universidad Autonoma de Ciudad Juarez, Institute of Engineering and Technology, Juarez, Mexico

Evgeni, Magid, PhD, Kazan Federal University, Institute of Information Technology and Intelligent Systems, Kazan, Russia

Edgar, Alonso, Martinez Garcia, Ph.D., Universidad Autonoma de Ciudad Juarez, Institute of Engineering and Technology, Juarez, Mexico

1. Introduction

Robotic platforms are extensively utilized across various industries, ranging from manufacturing and entertainment to home services, transportation, construction, education, scientific research, surveillance, security, manufacturing, and search and rescue operations. Over time, the adoption of robotic applications has experienced exponential growth. However, the efficacy of these platforms hinges on their ability to adapt to the specific tasks required in a given environment. For instance, robotic arms are meticulously designed for tasks such as assembly, selection, inspection, manufacturing, and material manipulation. These tasks necessitate platform models with varying morphological designs, tailored to the specific workspace and application requirements. Traditional robotic platforms, with fixed morphologies, may excel in performing specific tasks but could be poorly suited for a broader range of applications within the same environment.

On the contrary, directing research and development efforts towards physically reconfigurable robotic platforms can yield significant advantages. These platforms boast the capability to morph or adjust their physical structures to suit a broader range of tasks within a single environment. Such flexibility empowers them to capitalize on commercial opportunities more efficiently, as they can be customized to fulfill diverse tasks without requiring distinct specialized platforms. As a result, physically reconfigurable robotic platforms emerge as a more versatile solution for tackling a spectrum of tasks across different environments, ultimately enhancing their commercial viability and practicality. To enable a robot to change functionality with good performance in its programmed mission, the reconfiguration function must be practical and/or semi-automatic in the new task. Robotic reconfiguration, as a new physical capability, provides significant benefits in many daily activities of society. The applications of reconfigurable robots need to be sophisticated through engineering techniques to make them incredibly diverse. Advances in robotic engineering tend towards the modularization, reconfiguration, and self-reconfiguration of robots (Vega, Martinez-Garcia and Torres-Cordoba, 2015), allowing the extension of different physical and functional parts of the robot (Rosyid, Stefanini and El-Khasawneh, 2022). Robotics has permeated numerous sectors, with industry standing prominently among them. In industrial landscapes, the incorporation of

modularized robotic platforms offers a myriad of advantages, from cost-saving measures to space optimization. By employing fewer robotic platforms, daily tasks can be executed more efficiently. Yet, the implications of robotic reconfiguration extend far beyond industrial confines. The integration of reconfigurable robots holds the promise of transformative changes in both individual lives and societal paradigms.

This research is dedicated to crafting and modeling a highly adaptable module poised to configure and reconfigure robotic platforms with a spectrum of morphologies and functionalities. It highlights different assembly morphologies for robotic platforms, offering an array of potential reconfigurations spanning walking, rolling, and robotic arms. The primary objective is to seamlessly integrate modularity within robotic platforms, streamlining reconfiguration processes and synchronized control to amplify their capabilities. This entails a meticulous design and modeling approach, culminating in a modular mechanism capable of dynamically reshaping complex robotic structures when interconnected and replicated. Such a mechanism is imbued with synchronization functions and locomotion control algorithms to ensure suitable performance across diverse configurations. Moreover, the study embarks on designing a mechanized system featuring both rotary and prismatic articulations, augmented with redundant sensory capabilities for precise and responsive actuation. This involves an exhaustive exploration of motion dynamics and control algorithms, complemented by the development of observability models tailored to the modular robotic architecture. Additionally, the research entails formulating controller schemes tailored to accommodate the intricacies of diverse robotic reconfigurations, further enriching the platform's adaptability and versatility. Through the development of a modularized robotic mechanism and its mechanical pluralization, a realm of robotic reconfiguration unfolds, broadening the spectrum of tasks achievable by a robotic platform.

In Section 2, we review research akin to our project, delving into recent works on related themes and delineating a robust conceptual framework. Transitioning to Section 3, we showcase the CAD software design of the modular mechanism, while Section 4 offers comprehensive insights into its instrumentation. Section 5 outlines the modeling of motion geometry for the module mechanisms, alongside dynamic and kinematic models. Chapter 6 introduces the local position and velocity models, along with sophisticated global

Biomechanically Compliant Caudal Model Inspired by Cetacean Musculoskeletal Dynamics

Edgar, Soto-Tovar, Autonomous University of Juarez City, Institute of Engineering and Technology, Juarez, Mexico

Evgeni, Magid, PhD, Kazan Federal University, Institute of Information Technology and Intelligent Systems, Kazan, Russia

Edgar, Alonso, Martinez Garcia, Ph.D., Universidad Autonoma de Ciudad Juarez, Institute of Engineering and Technology, Juarez, Mexico

1. Introduction

Remotely operated aquatic vehicles and autonomous underwater robots stand out as the premier choices for a wide array of marine missions, reflecting a paradigm shift in underwater exploration and intervention. However, the deployment of conventional underwater vehicles comes laden with substantial operational complexities and exorbitant costs (Jin, Kim and Seo, 2015). In response to the evolving demands of modern industries, there arises an urgent imperative for locomotive-efficient vehicles capable of meeting diverse operational needs. Within this landscape, rotary electric actuators emerge as a beacon of precision, offering unparalleled control and sustained torque capabilities over extended operational periods. However, the seamless integration of rigid devices into underwater robots demands a level of engineering finesse that goes beyond mere optimization of energy consumption. The addition of motorized components introduces a cascade of challenges, encompassing increased mass, inertia, and friction, each exerting its influence on the overall performance dynamics of the robotic system. Yet, amidst these challenges lies a realm of opportunity; advanced computational modeling and control techniques present a pathway to not only mitigate these adverse effects but also to elevate the efficiency and maneuverability of aquatic robots equipped with rigid components to unprecedented levels of sophistication.

To successfully integrate motorized devices into aquatic robotics, a nuanced approach is required that carefully strikes a balance between energy consumption optimization and managing increased mass and friction. By harnessing the power of advanced engineering solutions, researchers can fully unleash the potential of rigid-based underwater robots, empowering them to perform a broad range of marine missions with heightened efficiency, durability, and ecological responsibility.

Of particular fascination within this realm are dolphins, esteemed members of the order Cetacea. Their skeletal architecture bestows upon them unparalleled swiftness, capable of reaching speeds of up to 55.5 km/h. Dolphins navigate their watery domain by orchestrating vertical oscillations of their tail fin and rear body, while their specialized flippers serve as adept steering appendages. Internally, propulsion is orchestrated through rhythmic activation of the trunk's epaxial and hypaxial muscles (Figure 18.1a). Anchored firmly along the spinal column, these muscles generate substantial forces that propel the dolphin forward, with these forces transmitted to various regions of the dorsal spine, facilitating the creature's dynamic movement. Furthermore, the Extensor Caudae Medianis (ECM) muscle (Figure 18.1b) and the Extensor Caudae Lateralis (ECL) muscle (Figure

Computers and Electronics in Agriculture

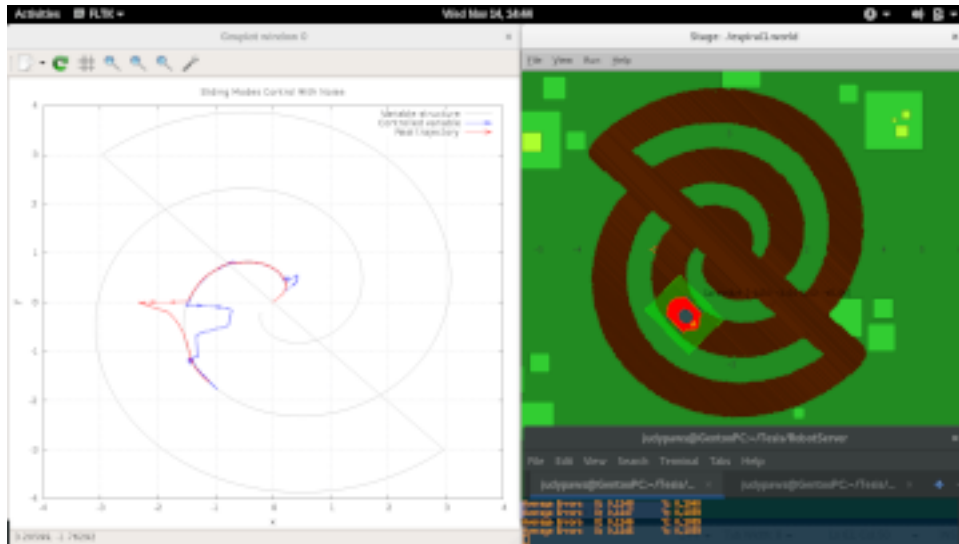
Double Spiraliform Path Planning and Tracking for Agricultural Mobile Robotics

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	COMPAG-D-23-05060R1
Article Type:	VSI:Transforming Plant Agriculture through AI and Robotics
Keywords:	autonomous-vehicles, agriculture-robotics, intelligent-planning, furrow-tracking, trajectory-control
Corresponding Author:	Edgar A. Martinez-Garcia, Ph.D. Autonomous University of Juarez City MEXICO
First Author:	Judith Samaniego
Order of Authors:	Judith Samaniego Edgar A. Martinez-Garcia, Ph.D. Evgeni Magid Elifalet López-González
Abstract:	<p>This study introduces a formulation for double spiraliform path planning and tracking, specifically purposed for wheeled robots used in planting operations. The approach addresses two critical issues: the generation of spiral-type trajectories and tracking control based on variable structure analysis. The robot successfully navigates three combined routes: an upward spiral, a linear middle path, and a downward spiral path. The proposed planer was designed to accommodate various kinematic structures prevalent in agricultural vehicles. Five rolling structures are classified in a unified form that seamlessly integrates with the motion planner. This allows the spiraliform tracking model to suit multiple mobile robotic structures employed in agriculture. The spiraliform path planner is able to generate flexible fields in terms of scale, orientation, and location, providing the robot with a versatile reference trajectory model. Additionally, the sliding controller handles nonlinear input references with discontinuities, showing swift responsiveness to disturbances, including slippage and inherent kinematic constraints. The sliding approach was compared against four controllers using a segment of displacement as a linear reference function: a linear feedback controller, a state-space feedback controller, a proportional controller, and a proportional-integral controller. The evaluation of absolute error (accuracy) and relative error (precision) with respect to the input reference model showed similar performances across the controllers. However, the sliding approach proved superior when the input reference model was nonlinear and had discontinuities. Furthermore, navigational simulations were conducted using the analytical dynamic model for robot driving and steering, showcasing the efficacy of the proposed approach in practical scenarios.</p>
Suggested Reviewers:	<p>Mohan Rajesh Elara, PhD Associate Professor, Singapore University of Technology and Design rajeshelara@sutd.edu.sg Prof. Elara has a large expertise in different topics of Field Robotics and Autonomous Systems.</p> <p>Seth Hutchinson, PhD seth@gatech.edu Prof. Hutchinson has a large reputation in robot control and motion planning.</p> <p>Luz Abril Torres-Mendez abril.torres@cinvestav.edu.mx Prof. Torres-Mendez has considerable expertise in mobile robotics, robot planning and sensing.</p> <p>Zeng-Guang Hou zengguang.hou@ia.ac.cn Prof. Hou has a large experience in robot control techniques, AI and path planning.</p>
Response to Reviewers:	

Graphical Abstract

Double Spiraliform Path Planning and Tracking for Agricultural Mobile Robotics



Highlights

Double Spiraliform Path Planning and Tracking for Agricultural Mobile Robotics

- This study introduces a formulation for double spiraliform path planning and tracking, designed for robotic planting tasks.
- Derivation of a one-way double spiraliform field, incorporating properties such as scale, rotation, and translation.
- Five types of rolling kinematic structures are classified in a unified form that seamlessly integrates with the motion planner and controller.
- The design of a variable structure controller performs based on the double spiral path as the model-based input sliding reference.
- Results on the sliding controller performance are compared against four other controllers.