الجمهوريـــــــة الجزائريـــة الديمقراطيـــة الشعبيـــة

PEOPLE'S DEMOCRATIC REPUBLIC OF ALGERIA

وزارة التعليـــم العالـــي والبحـــث العلمـــي

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH

Higher National School of Agronomy — المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

Departement: Rural engineering — القسم :الهندسة الزراعية

Specialty: Digital Agriculture — التخصص :الزراعة الرقمية

Final thesis

To obtain the Master's Diploma in Agronomic Sciences

THEME

Robotic arm powered by artificial intelligence for agricultural work

Presented By: Lyna CHERIF

Thesis defense on : 29 /01/2025

Members of the jury:

Supervisor:

Mr. BOUDHAR Lies MCA, ENSA

President :

Mm. GUEDIOURA Ilham MCA, ENSA

Examiners :

Mr. AIT ALI YAHIA Yassine MCB, ESI

Mr. ETSOURI Salim MCA, ENSA

Promotion 2019/2024

TABLE OF CONTENTS

ABSTRACT :

This study develops a 4-DOF robotic arm to address agricultural challenges—labor shortages, environmental impact, and food demand—by combining kinematic modeling, dynamic analysis, and AI automation. The system achieved ±2.5 mm positional accuracy within a 60 cm workspace using optimized kinematics, enabling precision weed removal and harvesting. Dynamic analysis using Lagrangian mechanics quantified torque (1.47–2.94 N·m) and energy use (100–175 W), validated under field-like conditions. Vision systems and path-planning algorithms (A*, PRM) achieved 92% success in cluttered simulations, while regenerative energy recovery (18%) supported sustainability. Challenges included actuator thermal limits and computational delays, yet modular design and reduced chemical reliance highlighted scalability. Future directions focus on resilient hardware, efficient algorithms, and hybrid energy solutions for real-world deployment. This work advances autonomous farming systems, balancing precision, productivity, and ecological stewardship to enhance food security in climate-vulnerable contexts.

Key Words:
Agricultural Robotics, 4-DOF Robotic Arm, Precision Weed Control, Kinematic Modeling, Dynamic Analysis (Lagrangian Mechanics), Denavit-Hartenberg Parameters, Inverse Kinematics, Machine Vision (Raspberry Pi Camera), Path-Planning Algorithms (A*, PRM), Regenerative Energy Recovery, Sustainable Agriculture, Autonomous Harvesting, Modular Robotic Design, Edge-AI Optimization, Hybrid Energy Systems, Computational Latency, Thermal Limitations in Actuators, Food Security, Environmental Stewardship, Climate-Resilient Farming

ملخص :

تتناول هذه الدراسة تطوير ذراع روبوتي رباعي الدرجات **(4-DOF)** لمعالجة التحديات الزراعية مثل نقص العمالة، والآثار البيئية، والطلب المتزايد على الغذاء، من خلال دمج النمذجة الحركية، والتحليل الديناميكي، والأتمتة الذكية. حقق النظام دقة في تحديد المواقع تصل إلى ±2.5 مم ضمن مساحة عمل نصف كروية (60 سم) باستخدام معلمات دنافيت-هارتينبيرغ المُحسنة، مما مكّن من إزالة الأعشاب الضارة بدقة وحصاد المحاصيل الحساسة. كشف التحليل الديناميكي (بناءً على ميكانيك لاغرانج) عن عزم دوران يتراوح بين 1.47–2.94 نيوتن.متر واستهلاك طاقة (100–175 واط) تحت ظروف تحاكي البيئة الحقلية. حققت أنظمة الرؤية الحاسوبية (كاميرا راسبيري باي) وخوارزميات تخطيط المسار **(A*** ، **PRM)** نجاحاً بنسبة 92% في بيئات محاكاة معقدة، بينما أظهر استرداد الطاقة المتجددة (18%) إمكانات لدعم الاستدامة. على الرغم من تحديات مثل القيود الحرارية في المحركات وتأخيرات الحوسبة، أكد التصميم المعياري والاعتماد المحدود على المواد الكيميائية على قابلية التوسع. تركز التطويرات المستقبلية على تعزيز المرونة الهيكلية**)** مثل محركات **BLDC** عالية العزم**(**، وتحسين الكفاءة الخوارزمية عبر شبكات عصبية خفيفة الوزن، وأنظمة طاقة هجينة للنشر العملي. تسهم هذه الأبحاث في تطوير أنظمة زراعة مستقلة توازن بين الدقة، الإنتاجية، والحفاظ على البيئة، لدعم الأمن الغذائي في ظل التغيرات المناخية والنمو السكاني العالمي.

الكلمات المفتاحية: الروبوتات الزراعية، ذراع روبوتي رباعي الدرجات، التحكم الدقيق في الأعشاب الضارة، النمذجة الحركية، التحليل الديناميكي (ميكانيك لاغرانج)، معلمات دنافيت-هارتينبيرغ، استرداد الطاقة المتجددة، الزراعة المستدامة، الحصاد الذاتي، أنظمة الطاقة الهجينة، الأمن الغذائي.

Résumé
Cette étude développe un bras robotique à 4 degrés de liberté (4-DDL) pour relever les défis agricoles—pénurie de main-d'œuvre, impact environnemental et demande alimentaire—en combinant modélisation cinématique, analyse dynamique et automatisation intelligente. Le système a atteint une précision de positionnement de ±2,5 mm dans un espace de travail hémisphérique de 60 cm grâce à des paramètres Denavit-Hartenberg optimisés, permettant une lutte précise contre les mauvaises herbes et une récolte délicate. L'analyse dynamique (mécanique lagrangienne) a quantifié le couple (1,47–2,94 N·m) et la consommation énergétique (100–175 W), validés dans des conditions proches du terrain. Les systèmes de vision artificielle (caméra Raspberry Pi) et les algorithmes de planification de trajectoire (A*, PRM) ont atteint 92 % de réussite dans des simulations d'environnements encombrés, tandis qu'une récupération d'énergie régénérative (18 %) a souligné le potentiel de durabilité. Malgré des défis comme les limites thermiques des actionneurs et les retards computationnels, la conception modulaire et la réduction des intrants chimiques ont démontré une scalabilité prometteuse. Les travaux futurs visent à renforcer la robustesse matérielle (moteurs BLDC à haut couple), optimiser les algorithmes via des réseaux neuronaux légers, et intégrer des systèmes énergétiques hybrides pour un déploiement pratique. Cette recherche contribue à des systèmes agricoles autonomes, alliant précision, productivité et préservation écologique pour renforcer la sécurité alimentaire face aux changements climatiques et à la croissance démographique.

Mots-clés : Robotique agricole, bras robotique 4-DDL, lutte contre les mauvaises herbes, modélisation cinématique, analyse dynamique (mécanique lagrangienne), paramètres Denavit-Hartenberg, récupération d'énergie, agriculture durable, récolte autonome, systèmes énergétiques hybrides, sécurité alimentaire.