

الجمهورية الشعبية الديمقراطية الجزائرية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة العليا للإعلام الآلي 8 ماي 1945 - سيدي بلعباس

Ecole Supérieure en Informatique

8 Mai 1945 - Sidi Bel Abbès



Mémoire de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

Filière: Informatique

Spécialité: Ingénierie des Systèmes Informatiques (ISI)

Thème

Implémentation d'un Jumeau Numérique pour le Robotino4 : Contrôle en Temps Réel et Surveillance de la sûreté

Présenté par:

- Mme Zebboudj Samah

Soutenu le: 17/09/2025

Devant le jury composé de

Mr. Bensenane Hamdane

Président

Mr. RAHMOUN Abdellatif

Encadrant

Mr. Jannik LAVAL

Encadrant

Mr. KHALDI Miloud

Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Abstract

The concept of Digital Twins (DTs) has emerged as a powerful paradigm for bridging the gap between physical and virtual systems. In robotics, DTs enable real-time monitoring, safe experimentation, and predictive maintenance by creating a synchronized virtual replica of a robot. This Engineering degree report focuses on the design and implementation of a Digital Twin framework for the Robotino4 mobile robot. The proposed framework integrates the Robotino4 hardware and its Gazebo-based simulation within the ROS 2 ecosystem. A dedicated bridge was developed to synchronize odometry, velocity commands, and sensor data between the two entities, while a safety mechanism detects deviations and triggers emergency stops.

Experimental validation was conducted through task execution scenarios, demonstrating both successful synchronization and effective anomaly detection in the presence of obstacles. The results highlight the potential of DTs to improve safety, reliability, and maintenance in robotics. Furthermore, this work establishes a foundation for future enhancements such as predictive analytics, enriched simulation environments, and standardized twin models, paving the way for resilient and autonomous robotic systems.

Keywords: Digital Twin; Robotics; Robotino4; ROS 2; Gazebo; Simulation; Predictive Maintenance.

Résumé

Le concept de jumeaux numériques (Digital Twins, DTs) s'impose comme un paradigme puissant pour relier les systèmes physiques et virtuels. En robotique, les DTs permettent la surveillance en temps réel, l'expérimentation sécurisée et la maintenance prédictive grâce à la création d'une réplique virtuelle synchronisée du robot. Ce mémoire d'ingénierie porte sur la conception et la mise en œuvre d'un cadre de jumeau numérique pour le robot mobile Robotino4. Le cadre proposé intègre le matériel Robotino4 et sa simulation sous Gazebo dans l'écosystème ROS 2. Un pont dédié a été développé afin de synchroniser l'odométrie, les commandes de vitesse et les données capteurs entre les deux entités, tandis qu'un mécanisme de sécurité détecte les écarts et déclenche des arrêts d'urgence.

La validation expérimentale a été réalisée à travers des scénarios d'exécution de tâches, démontrant à la fois la synchronisation réussie et la détection efficace d'anomalies en présence d'obstacles. Les résultats mettent en évidence le potentiel des DTs pour améliorer la sécurité, la fiabilité et la maintenance en robotique. De plus, ce travail établit une base pour de futurs développements tels que l'intégration d'outils prédictifs, l'enrichissement des environnements de simulation et l'adoption de modèles standardisés, ouvrant la voie à des systèmes robotiques résilients et autonomes.

Mots-clés : Jumeau numérique ; Robotique ; Robotino4 ; ROS 2 ; Gazebo ; Simulation ; Maintenance prédictive.

ملخص

برز مفهوم التوائم الرقمية كنهج قوي يربط بين الأنظمة المادية والاقتراضية. في مجال الروبوتات، تسمح التوائم الرقمية بالمراقبة في الوقت الحقيقي، وإجراء التجارب بشكل آمن، ودعم الصيانة التنبؤية عبر إنشاء نسخة افتراضية متزامنة للروبوت. يركز هذا البحث لنيل شهادة الهندسة على تصميم وتنفيذ إطار عمل للتوأم الرقمي الخاص بالروبوت المتنقل Robotino4. يدمج الإطار المقترح بين العتاد الفعلي للروبوت ومحاكته في بيئة Gazebo ضمن نظام ROS 2. وقد تم تطوير جسر خاص لمزامنة بيانات العجلات، وأوامر السرعة، وبيانات المستشعرات بين الكيانين، مع آلية أمان تكتشف الانحرافات وتفعّل التوقيفات الطارئة.

تم إجراء التحقق التجريبي من خلال سيناريوهات تنفيذ مهام، مما أظهر نجاح المزامنة وفعالية كشف الانحرافات الناتجة عن العوائق. وتبرز النتائج الإمكانيات الكبيرة للتوائم الرقمية في تحسين السلامة، الموثوقية، والصيانة التنبؤية في الروبوتات. كما يشكل هذا العمل أساساً لتطويرات مستقبلية مثل دمج التحليلات التنبؤية، إثراء بيئات المحاكاة، واعتماد نماذج قياسية للتوائم الرقمية، مما يمهد الطريق نحو أنظمة روبوتية أكثر مرونة واستقلالية.

الكلمات المفتاحية: التوأم الرقمي؛ الروبوتات؛ Robotino4 ROS 2؛ Gazebo المحاكاة؛ الصيانة التنبؤية.
