Ministry of Higher Education and
Scientific Research
University of Mosul
College of Computer Science and
Mathematics
Department of Computer Science

Container-based Provisioning and Orchestration of IoT Application on the Edge and Cloud

**A Thesis Submitted to the Council of the College of
Computer Science and Mathematics
University of Mosul
as a Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in
Computer Science**

By

Haleema Essa Solayman Omar

Supervised by

Assistant Prof. Dr. Rawaa Putros Polos

2023 A.D. **1444 A.H.**

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) has great potential to be adopted by applications covering several smart domains. IoT applications contain several components that may need to be deployed in different environments. Over the past decade, Cloud Computing has grown in importance and usage, especially for IoT applications' storage and computing needs. However, developing IoT applications based on standard Cloud Computing technology requires more efficient architecture due to the increased demands for real-time response and low latency. Furthermore, the growing use of an IoT is prompting businesses to seek complementary architectural approaches; in order to minimize the expense of transporting massive data volumes to the centralized Cloud. Among these approaches is the use of Edge Computing to process the data at or close to the origin point. On the other hand, Container virtualization has become the preferred solution for cloud-based IoT applications due to its execution isolation, portability, lightweight deployment, and reduced design time compared to hypervisor-based virtualization. Due to its heterogeneity and infrastructure diversity, orchestrating an IoT application requires complex configuration and setup for each IoT environment. IoT applications and their dependencies, in terms of environments, protocols, and message-brokers, must be described and configured. Thus, the Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications (TOSCA) standard can be used for distributed IoT application modeling and automatic provisioning.

In this thesis, TOSCA, Continuous Integration/Continuous Deployment (CI/CD), and Container-based technologies have been integrated to systematically describe, design, and develop a Container-based framework, that is responsible for the instantiation, packaging, and management of an IoT-distributed system to guarantee portability, self-contained, and reusability, in a flexible scenario. This integration has been exploited for a comprehensive, portable, and reusable modeling of a real IoT application for monitoring the ICU (Intensive Care Unit) in Al-Salam-Hospital, Mosul/Iraq to reduce the required work for manual setting up and modeling the diversity of its components and dependencies as well as the heterogeneity of the hosted environments of the ICU monitoring application. The proposed application has been distributed on different infrastructures: Data Gateway, Edge, and Cloud. To demonstrate the portability of the

proposed IoT system, it was applied on the Amazon Web Services (AWS) infrastructure and the University of Mosul (UoM) Server, which are used for IoT data storage, processing, and visualization. In addition, the integration of TOSCA-runtime environment with Continuous Integration/Continuous Deployment (CI/CD) has been accomplished to fully automate the provisioning, orchestration, and deployment of the IoT application over various heterogeneous environments. This integration has been supported through the use of GitHub and Docker Hub for maintaining the source code and Docker images respectively, which directly improve the system's portability, and reusability.

The experiments carried out in this thesis proved the efficiency of the presented work in terms of the automation of provisioning and orchestration, the flexibility of employing a single and multi-container for the IoT application, and the portability of applying the work on different infrastructures.

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الموصل
كلية علوم الحاسوب والرياضيات
قسم علوم الحاسوب

النشر والتنسيق القائم على تقنية الحاويات لتطبيق انترنت الاشياء في بيئة الحافة والسحابة

اطروحة مقدمة
الى مجلس كلية علوم الحاسوب والرياضيات في جامعة الموصل
كجزء من متطلبات نيل شهادة دكتوراه فلسفة في
علوم الحاسوب

من قبل

حليمة عيسى سليمان عمر

بإشراف
أ.م.د. رواء بطرس بولص

٢٠٢٣ م ١٤٤٤ هـ

الخلاصة

يتمتع إنترنت الأشياء بإمكانيات كبيرة يمكن أن تتبناها التطبيقات التي تغطي العديد من المجالات الذكية. تحتوي تطبيقات إنترنت الأشياء على العديد من المكونات التي قد تحتاج إلى نشرها في بيئات مختلفة. على مدار العقد الماضي، نمت أهمية الحوسبة السحابية واستخدامها، خاصةً بالنسبة لاحتياجات الحوسبة والتخزين الخاصة بتطبيقات إنترنت الأشياء. ومع ذلك، فإن تطوير تطبيقات إنترنت الأشياء على أساس تكنولوجيا الحوسبة السحابية القياسية يتطلب معمارية أكثر كفاءة؛ نظرًا للطلبات المتزايدة للاستجابة في الوقت الفعلي وزمن الوصول المنخفض. علاوة على ذلك، يدفع الاستخدام المتزايد لإنترنت الأشياء الشركات إلى البحث عن معمارية تكميلية؛ لتقليل نفقات نقل كميات ضخمة من البيانات إلى السحابة المركزية، من بين هذه الأساليب استخدام حوسبة الحافة لمعالجة البيانات عند نقطة الأصل أو بالقرب منها. من ناحية أخرى، أصبحت المحاكاة الافتراضية للحاويات هي الحل المفضل لتطبيقات إنترنت الأشياء المستندة إلى السحابة نظرًا لعزل التنفيذ، إمكانية النقل، النشر الخفيف، وتقليل وقت التصميم مقارنةً بالافتراضية المستندة إلى برنامج وسيط. نظرًا لعدم تجانسه وتنوع البنية التحتية، يتطلب تنظيم تطبيق إنترنت الأشياء تكوينًا معقدًا وإعدادًا لكل بيئة. اذ يتوجب وصف وتهيئة تطبيقات إنترنت الأشياء وتوابعها، مثل البيئات، البروتوكولات، ووسطاء الرسائل. وبالتالي، يمكن استخدام مواصفات الطوبولوجيا والتنسيق للتطبيقات السحابية في نمذجة تطبيقات إنترنت الأشياء الموزعة والتزويد التلقائي.

في هذه الأطروحة، تم دمج مواصفات الطوبولوجيا والتنسيق للتطبيقات السحابية، التكامل المستمر/النشر المستمر، والتقنيات القائمة على الحاويات لوصف، تصميم، وتطوير إطار عمل قائم على الحاوية يكون مسؤولاً عن تكوين، تغليف، وإدارة نظام انترنت الاشياء الموزع؛ لضمان قابلية النقل، الاكتفاء الذاتي، وقابلية إعادة الاستخدام في سيناريو مرن. تم استغلال هذا التكامل لنمذجة شاملة، محمولة، وقابلة لإعادة الاستخدام لتطبيق إنترنت الأشياء الحقيقي لرصد وحدة العناية المركزة في مستشفى السلام، الموصل/العراق، لتقليل العمل المطلوب للإعداد اليدوي والنمذجة لمكوناته المتنوعة وتبعياته بالإضافة إلى البيئات الغير المتجانسة المستضيفة لتطبيق مراقبة وحدة العناية المركزة. تم توزيع التطبيق المقترح على بنى تحتية مختلفة: بوابة البيانات، الحافة، والسحابة. ولإثبات قابلية نظام إنترنت الأشياء المقترح للتنقل، تم تطبيقه على البنية التحتية لمزود خدمة الامازون وخادم جامعة الموصل، والتي تُستخدم لتخزين بيانات إنترنت الأشياء ومعالجتها وتصورها.

بالإضافة إلى ذلك ، تم تحقيق تكامل بيئة وقت تشغيل TOSCA مع التكامل المستمر / النشر المستمر (CI / CD) لأتمتة توفير وتنسيق ونشر تطبيق إنترنت الأشياء عبر بيئات غير متجانسة مختلفة. تم دعم هذا التكامل من خلال استخدام GitHub و Docker Hub للحفاظ على

كود المصدر وصور Docker على التوالي ، مما يحسن بشكل مباشر من قابلية النظام للنقل وإعادة الاستخدام.

أثبتت التجارب التي أجريت في هذه الأطروحة كفاءة العمل المقدم من حيث أتمتة التزويد والتنسيق، مرونة استخدام حاوية واحدة وحاويات متعددة لتطبيق إنترنت الأشياء، وإمكانية نقل تطبيق العمل على البنى التحتية المختلفة.