

Estimation de performance, Test et Contrôle des Systèmes d'Objets Connectés Utilisant un Réseau de Communication Non-Idéal

Student: Richard Candell, Université de Bourgogne, France & NIST, USA.

Supervisor: Sebti Foufou, Université de Bourgogne, France

Abstract

La technologie sans fil est un catalyseur clé des promesses de l'industrie 4.0 (fabrication intelligente). En tant que telle, la technologie sans fil sera adoptée comme mode de communication principal au sein de l'usine en général et dans les unités de production en particulier. La communication des unités de production en usine a des exigences particulières en matière de latence, de fiabilité, d'échelle et de sécurité qui doivent d'abord être satisfaites par la technologie de communication sans fil utilisée. Le sans fil est considéré comme une forme de communication non idéale dans la mesure où par rapport aux communications câblées, il est considéré comme moins fiable (avec perte) et moins sécurisé. Ces dégradations possibles entraînent un retard et une perte de données dans un système d'automatisation industrielle où le déterminisme, la sécurité et la sûreté sont considérés comme primordiaux. Cette thèse étudie les exigences d'une communication sans fil dans les unités de production et l'applicabilité de la technologie sans fil existante dans ce domaine. Elle présente une modélisation SysML de l'architecture du système et des flux de données. Elle fournit une méthode d'utilisation des bases de données de type graphe pour l'organisation et l'analyse des données de performance collectées à partir d'un environnement de test. Enfin, la thèse décrit une approche utilisant l'apprentissage automatique pour l'évaluation des performances d'un système d'objets connectés dans le domaine de fabrication.

Introduction

La fabrication intelligente fournit une vision des futurs systèmes de fabrication qui intègrent des systèmes physiques hautement dynamiques, des systèmes de communication robustes et réactifs et des paradigmes informatiques pour maximiser l'efficacité, permettre la mobilité et réaliser les promesses de

l'usine numérique. La technologie sans fil est un catalyseur clé de cette vision. La communication sans fil est intrinsèquement plus sujette à la latence et au retard que ses homologues câblés. De plus, la communication sans fil implique l'utilisation du spectre électromagnétique qui est un support accessible au public avec une capacité limitée et plus sujet aux cyberattaques. Alors que les données transmises peuvent être protégées numériquement par le biais de l'authentification et du cryptage, les appareils sans fil sont sujets aux interférences et au brouillage par des émetteurs voyous et amis, exacerbant les problèmes de fiabilité et de latence affectant les performances de l'usine sans compromettre la sécurité des données. La communication sans fil dans les usines est souvent limitée par la durée de vie de la batterie et très certainement par la disponibilité du spectre électromagnétique. Alors que la dépendance à l'égard des dispositifs sans fil au sein de l'usine se poursuit, des étapes vers le développement d'un réseau de communications sans fil plus robuste doivent être développées. Ces étapes comprennent:

- ★ Le système d'automatisation doit devenir sensible à la situation et s'adapter à la connaissance des tendances de l'occupation du spectre électromagnétique et des événements aigus; et
- ★ L'intelligence du système d'automatisation doit se rapprocher du système physique. Cela signifie déplacer l'intelligence pour le contrôle vers l'actionneur; et
- ★ Des méthodes d'essai de performance doivent être développées et incorporées dans les dispositifs à franges industriels. Les méthodes d'essai doivent être fiables et en même temps faciles à utiliser par un personnel d'usine non formé aux techniques de la communication sans fil; et
- ★ Les protocoles de communication sans fil existants doivent être analysés et adaptés, et de nouveaux protocoles doivent être développés pour équilibrer la fiabilité, la latence et l'évolutivité; et
- ★ La sécurité du réseau doit être maintenue et doit inclure la disponibilité comme caractéristique primordiale.

Cette thèse comprend le développement d'approches de test pour mesurer les performances des réseaux sans fil industriels déployés dans des cellules de travail de fabrication intelligentes. Ainsi, l'objectif principal de cette thèse est

la découverte de méthodes et d'approches pour l'évaluation des performances des cas d'utilisation industrielle pour les cas d'utilisation dans lesquels la technologie de communication sans fil est utilisée comme mode de communication principal. La principale motivation de la recherche est de découvrir des méthodes d'essai et d'évaluation pratiques pour évaluer les performances d'une cellule de travail industrielle, améliorant ainsi la sécurité, la sûreté et la fiabilité en général. Les résultats et les résultats du travail de thèse sont inclus dans la thèse et publiés en tant qu'articles de journaux et actes de conférence. Les données résultantes sont également mises à disposition.

Contributions et organisation

Cette thèse est présentée en trois grandes parties. Dans la partie I, la thèse fournit une introduction historique au contexte de la fabrication intelligente. Il présente les prémisses de la technologie sans fil industrielle, les principaux défis de l'utilisation du sans fil dans un environnement d'usine et les indicateurs acceptés qui sont actuellement utilisés dans l'application du sans fil dans les environnements d'usine. Ensuite, l'état actuel de la technique est présenté pour orienter le lecteur vers la contribution de la thèse. Cet état de l'art comprend une discussion sur le paysage de la technologie sans fil industrielle, les normes et une cartographie provisoire de ces technologies dans les domaines d'application. Une discussion des approches de modélisation des systèmes est ensuite fournie avec un accent sur le langage de balisage des systèmes. Ensuite, une discussion sur les approches de l'utilisation des bases de données suit. Dans la partie II, textit Thesis Contributions, les contributions techniques de cette thèse sont présentées. Enfin, dans la partie III, la thèse fournit une discussion détaillée des quatre principales contributions de ce travail de thèse. Les remarques finales et l'orientation future sont fournies en tant qu'avis du candidat à la thèse. Les contributions de thèse sont présentées comme suit:

Exigences [1] [2] [3] [4] Un examen du paysage de la technologie sans fil est effectué. Les technologies sans fil existantes et futures sont évaluées pour leur applicabilité appropriée aux cas d'utilisation industrielle.

La modélisation [5] [6] Afin de mieux comprendre la composition architecturale de la cellule de travail à l'aide de la communication sans fil

industrielle, des techniques de modélisation sont utilisées pour identifier et décomposer les pièces, les interfaces et les flux de données. SysML est adopté pour ce processus et une bibliothèque de modélisation proposée est créée et présentée. Le modèle avec diagramme conceptuel est rendu public indépendamment de l'outil qui a été utilisé pour créer le modèle.

Application de la base de données Graph [7] Une méthode est développée pour collecter, nettoyer, organiser et présenter les indicateurs de performance cyberphysiques des expériences menées dans le banc d'essai sans fil industriel NIST. La méthode développée utilise la base de données de graphes Neo4j et est présentée comme une nouvelle approche par rapport aux approches traditionnelles utilisant une base de données relationnelle, des feuilles de calcul et un traitement de fichiers bruts.

Apprentissage automatique [8] [9] Une technique d'apprentissage automatique est développée et appliquée à la prédiction des niveaux de signal à interférence dans un réseau de cellules de travail sans fil utilisant un bras de robot dans un appareil de recherche de force. La méthode d'apprentissage automatique permet à un réseau entraîné de déterminer avec précision le niveau signal-interférence en utilisant l'état physique du bras du robot plutôt que l'état de la liaison sans fil elle-même.

L'auteur cite également son article [10] soumis à une prochaine conférence sur la gestion du cycle de vie des produits. L'auteur présente une nouvelle conception de banc d'essai sans fil industriel qui motive la recherche universitaire et répond aux besoins de l'industrie. Le banc d'essai est conçu pour servir à la fois de plate-forme de démonstration et de recherche pour la cellule de travail sans fil. Le travail s'appuie sur les enseignements tirés des incarnations passées, notamment un scénario de maintenance de machine à double robot et un appareil de bras de robot à recherche de force et de couple. Cette version du banc d'essai comprend des éléments de calcul et de communication tels que le fonctionnement du système physique est sensiblement dégradé sous l'influence des interférences radio, du trafic réseau concurrent et des effets de propagation radio appliqués dans le laboratoire. Les principaux indicateurs de performance du banc d'essai sont sélectionnés et présentés, notamment les indicateurs des systèmes de communication, de calcul et physiques. Ce nouveau banc d'essai sera utilisé pour effectuer de futures recherches motivées par cette thèse.

Une contribution supplémentaire de l'auteur pour laquelle il n'était pas l'auteur principal mais a joué un rôle important est citée ici [11]. Dans ce travail, l'auteur a conçu, construit et exécuté une expérience en collaboration avec l'auteur principal dans laquelle un appareil de portique bidimensionnel typique était contrôlé par un contrôleur local qui recevait des commandes de code G sans fil sur un réseau Wi-Fi. Le canal sans fil industriel a été reproduit à l'aide d'un émulateur de canal radiofréquence (RF) où divers scénarios ont été envisagés et divers paramètres de canal sans fil ont été étudiés. Le mouvement de l'outil du système de portique a été suivi à l'aide d'un système de suivi de la vision pour quantifier l'impact du canal sans fil sur les performances du système. Des résultats numériques ont été présentés, y compris le temps d'exécution total d'un processus industriel et les temps de séjour à différentes positions tout au long du processus. Cette contribution n'est pas discutée dans la thèse.

Cartographie des exigences

La première contribution a été une exposition des différentes technologies sans fil qui ont été développées spécifiquement pour un usage industriel ou qui ont une utilisation tangentielle dans l'industrie. Des classes de cas d'utilisation industrielle ont été définies et une cartographie de l'applicabilité de chaque technologie sans fil à la classe de cas d'utilisation a été fournie. Cette cartographie représentait l'opinion du candidat sur la base de son expérience et de ses connaissances de la technologie sans fil au moment de la contribution. Cette exploration a représenté une contribution majeure à la distillation de la pléthore d'exigences de performance trouvées dans la littérature et dans les articles commerciaux concernant les attentes de performance des réseaux sans fil industriels et les exigences de conduite derrière les cas d'utilisation qui les utilisent. Dans cet article, des considérations de réussite sont présentées pour le déploiement du sans fil dans les usines et les cellules de travail en usine, y compris celles envisagées pour la fabrication intelligente. Ces considérations de réussite sont définies et incluent la fiabilité. L'indicateur de performance *textit* fiabilité est une considération principale dans cette thèse et représente l'essentiel des préoccupations pour les déploiements sans fil. La fiabilité comprend tout élément ayant un impact sur le flux d'informations au sein d'un système cyberphysique. Cela inclut à la fois la perte et le retard des informations.

Dans cette contribution, plusieurs composants comprennent l'espace problématique des déploiements sans fil dont deux résonnent d'une importance critique pour les travaux traités par cette thèse. Le premier est le problème de l'instrumentation qui comprend tous les éléments de l'usine qui incluent la détection et l'actionnement. Le deuxième élément important est l'évaluation des performances qui comprend des méthodes de test pour lesquelles cette thèse aborde à travers l'identification des flux d'informations, puis l'évaluation des performances de ces flux d'informations et de leurs impacts sur les performances physiques. Par conséquent, cette contribution est nécessairement importante car elle fournit une perspective essentielle du problème du déploiement de systèmes sans fil industriels, puis de la motivation derrière la modélisation, l'application de base de données et l'apprentissage automatique pour l'évaluation des performances du réseau. La contribution de ce travail illustre le besoin clair de comprendre les exigences et les méthodes de test créatives pour l'examen des systèmes cyberphysiques sans fil. Il ressortait clairement de cette contribution que des méthodes d'essai faciles à utiliser étaient essentielles; cependant, ce n'était pas un objectif de cette thèse. Essentiellement, cette contribution pose le problème de la sélection et du déploiement de réseaux sans fil dans les usines. Il décrit les aspects techniques à considérer. Enfin, il fournit un point de départ pour l'applicabilité des technologies sans fil à des classes de cas d'utilisation et, ce faisant, fournit une motivation pour acquérir une meilleure compréhension de la cellule de travail grâce à une décomposition formelle et à la création d'un cadre pour communiquer ces idées.

Modélisation à l'aide de SysML

La deuxième contribution était une abstraction du système cyberphysique industriel qui est le travail en usine utilisant SysML. Dans ce travail, un modèle a été construit en utilisant des primitives représentant chaque composant architectural majeur de la cellule de travail et les interfaces à l'intérieur de la cellule de travail et aux systèmes à l'extérieur de la cellule de travail. Ces interfaces sont utilisées pour représenter des éléments du flux d'informations. Les flux d'informations représentés représentent les performances du réseau support. Par la suite, le système physique qui fonctionne en utilisant ce réseau a ses propres performances qui sont directement connectées aux performances du réseau. Chaque flux d'information identifié à l'aide du modèle

SysML représente une opportunité d'étude. Par exemple, le système élaboré par le schéma fonctionnel interne Fig. 1 chacun des principaux acteurs (Robot Controller 1, Robot Controller 2 et Supervisor) sont tous connectés à un réseau 802.11ax.

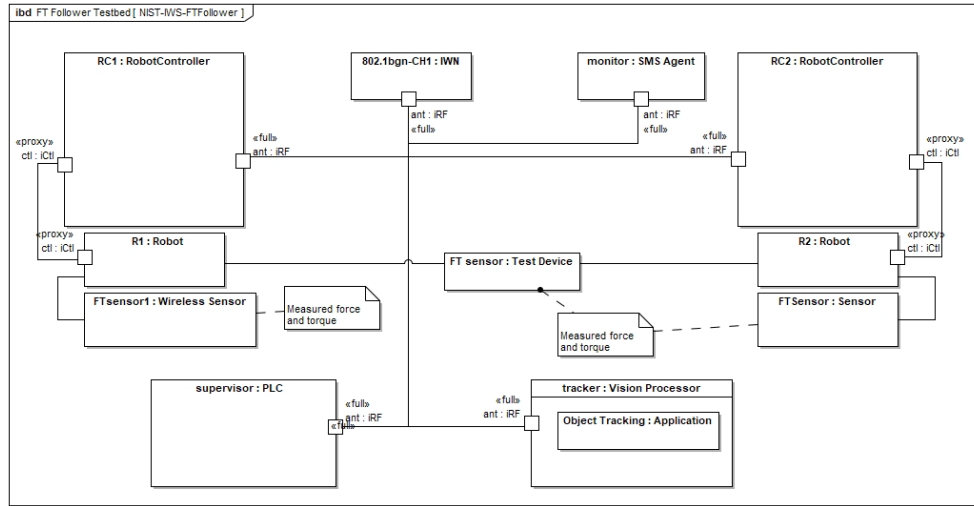


Figure 1: Schéma fonctionnel interne d'une cellule de travail équipée d'une application de levage robot-suiveur.

On peut clairement voir que le chemin complet du flux d'informations dans le modèle proposé traverse le support radio, le réseau sans fil industriel, les émetteurs-récepteurs embarqués et chaque application de contrôle. Par conséquent, il est possible d'utiliser ce modèle proposé pour représenter le canal radio, modéliser ses impacts sur les performances du réseau sans fil, et par la suite les impacts des performances du réseau sans fil sur les performances des applications de contrôle elles-mêmes. Ce n'est pas une perspective facile et pourrait être très difficile pour un ingénieur qui tente de le faire; cependant avec le modèle présenté, c'est tout à fait possible. Cela représente une opportunité pour affiner le modèle proposé pour être plus intuitif et peut-être plus facile à utiliser.

Avec une dépendance accrue aux communications sans fil pour des systèmes de fabrication plus complexes, la projection des exigences de fabrication sur le système de communication sans fil devient moins évidente. Une telle analyse de cette projection est essentielle pour la recherche future des systèmes de fabrication. A ce titre, les éléments architecturaux et les flux

Application de base de données graphique

Les bases de données graphiques sont conçues pour fournir un cadre de modélisation puissant pour le stockage et la visualisation des données dans lesquelles les relations et les connexions entre les données peuvent être importantes mais difficiles à détecter ou à visualiser dans le monde réel. Quand on entend le mot «base de données», on imagine généralement une base de données relationnelle telle que MySQL ou Oracle dans laquelle la base de données elle-même stocke les informations d'une manière hautement structurée dans laquelle les tables sont construites d'une manière prédéterminée avec des colonnes, des lignes et des données définies de manière rigide les types. En revanche, les bases de données graphiques ne sont pas rigides dans leur structure et leur organisation. Les données sont des bases de données graphiques qui sont nativement stockées dans des nœuds et des sommets (connexions). Chaque nœud et sommet peut avoir des propriétés associées et ainsi stocker des données. Dans le graphique, il existe des unités d'informations (nœuds) avec des lignes de relations entre ces unités d'informations représentées sous forme de lignes. Les lignes de connexion entre les nœuds représentent des relations qui sont le bloc de construction essentiel utilisé dans la contribution présentée dans la thèse.

La base de données graphique a été utilisée dans le cadre de cette thèse. Il a été démontré comme un outil efficace pour modéliser et capturer des informations sur les performances pour la recherche et éventuellement pour la connaissance de la situation du fonctionnement de l'usine. L'objectif de l'utilisation d'une base de données graphique était essentiellement de 1) tirer parti de la connectivité inhérente aux données résultant des expériences menées au sein du NIST Industrial Wireless Laboratory, et 2) démontrer que les réseaux sans fil pouvaient être utilisés pour une classe significative de cas d'utilisation sans impact sur les performances du système physique. Pour soutenir les recherches effectuées pour cette contribution, un banc d'essai a été construit. Deux bras de robot ont été utilisés pour déplacer et inspecter les pièces à travers une série de quatre (4) machines à commande numérique par ordinateur (CNC). Chaque robot est équipé d'un capteur de couple de force 6 DOF dans son poignet. Le contrôle conjoint de chaque robot est effectué via un ensemble informatique de contrôleur de robot séparé. Un contrôleur logique programmable (PLC) a été utilisé pour superviser l'activité au sein de la cellule de travail et a été appelé le superviseur. Le réseau et les performances physiques de la cellule de travail simulée ont été capturés

complètement indépendamment du type de réseau de communication utilisé. Grâce à l'adaptateur et aux dispositifs de prise réseau illustrés dans le diagramme, il a été possible de capturer les données de vol par paquets de telle sorte que le type de technologie utilisé pour la communication ne modifie pas le routage des informations. Ce faisant, le schéma du graphique basé sur les données est resté relativement inchangé entre les expériences tandis que différents protocoles filaires et sans fil ont été étudiés. De nombreuses instanciations de bases de données graphiques ont été produites pour chaque expérience réalisée à l'aide du banc d'essai.

Applications d'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique est ce vaste domaine de la science et de l'ingénierie qui traite de l'application d'algorithmes de calcul pour effectuer des actions sans être explicitement programmé pour le faire. Dans les applications générales, l'apprentissage automatique est utilisé à partir d'applications allant de la reconnaissance vocale dans l'électronique personnelle, le filtrage du spam dans les e-mails, et la réalisation de prévisions de trafic pour les navetteurs à la fourniture de services tels que l'identification des amis et la reconnaissance faciale dans les médias sociaux. Dans les applications industrielles, l'apprentissage automatique a la promesse d'un large éventail d'applications telles que l'autonomie des robots et la détection des anomalies de sécurité. Dans cette thèse, un cadre d'apprentissage automatique a été démontré pour la prédiction du rapport signal / interférence dans une liaison de communication utilisée pour la commande d'un bras de robot enfonçant un appareil à ressort. Le cadre ML s'est révélé utile et précis dans la prédiction de la qualité de la liaison. L'estimation de la qualité de la liaison est une mesure importante dans le système de communication sans fil. Il s'agit d'un terme général utilisé pour décrire le niveau de qualité d'un lien de communication. La métrique du rapport signal / brouillage est un rapport entre le signal prévu transmis et le niveau d'interférence en concurrence avec le signal prévu. Les interférences, qu'elles soient causées par un brouillage malveillant ou non, sont un facteur entravant l'adoption du sans fil dans les systèmes de fabrication intelligents. Par conséquent, il est clairement intéressant d'avoir une image claire de la conscience de la situation du niveau d'interférence et de la qualité des liaisons de communication utilisées. La contribution présentée dans cette thèse répond à un besoin évident d'améliorer la détection et

l'estimation des événements de qualité du signal dans la cellule de travail.

References

- [1] R. Candell and M. Kashef, “Industrial wireless: Problem space, success considerations, technologies, and future direction,” in *2017 Resilience Week (RWS)*, Sep. 2017, pp. 133–139.
- [2] K. Montgomery, R. Candell, Y. Liu, and M. Hany, “Wireless User Requirements for the Factory Work-cell,” Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/publications/wireless-user-requirements-factory-workcell>
- [3] R. Candell, M. Hany, K. B. Lee, Y. Liu, J. Quimby, and K. Remley, “Guide to industrial wireless systems deployments,” National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Tech. Rep., Apr. 2018. [Online]. Available: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ams/NIST.AMS.300-4.pdf>
- [4] R. Candell, M. Kashef, Y. Liu, K. B. Lee, and S. Foufou, “Industrial wireless systems guidelines: Practical considerations and deployment life cycle,” in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 6–17, Dec. 2018.
- [5] R. Candell, M. Kashef, Y. Liu, and S. Foufou, “A sysml representation of the wireless factory work cell,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–22, 2019.
- [6] R. Candell, “A SysML Model of the Wireless Factory Work-cell,” *NIST Journal of Research*, 2018.
- [7] R. Candell, M. Kashef, Y. Liu, K. Montgomery, and S. Foufou, “A graph database approach to wireless iiot work-cell performance evaluation,” in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Feb. 2020.
- [8] R. Candell, K. Montgomery, M. Kashef, Y. Liu, and S. Foufou, “Wireless interference estimation using machine learning in a robotic force-seeking scenario,” in *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Jun. 2019, pp. 1334–1341.

- [9] —, “Machine learning based wireless interference estimation in a robotic force-seeking application,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, to appear.
- [10] *Smart Manufacturing Testbed for the Advancement of Wireless Adoption in the Factory*, ser. International Conference on Product Lifecycle, 07 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/MSEC2019-2896>
- [11] *On the Impact of Wireless Communications on Controlling a Two-Dimensional Gantry System*, ser. International Manufacturing Science and Engineering Conference, vol. Volume 1: Additive Manufacturing; Manufacturing Equipment and Systems; Bio and Sustainable Manufacturing, 06 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/MSEC2019-2896>