

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 641

*Mathématiques et Sciences et Technologies du numérique,
de l'Information et de la Communication*

Spécialité : *MaSTIC-Informatique*

Par

Mohamed Irfanulla MOHAMED ABDULLA

Systèmes cobotiques temps réel sous contraintes d'énergie

Thèse présentée et soutenue à IUT de Nantes – Campus de Carquefou, le 11/10/2023

Unité de recherche : UMR 6004, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N)

Rapporteurs avant soutenance :

Patrick Bonnin : Professeur des Universités, Université de Versailles-St-Quentin-en-Yvelines

Ahmad Hably : Maître de conférences HDR, INP Grenoble

Composition du Jury :

Président : Frank Singhoff

Professeur des Universités, Université de Bretagne Occidentale

Examineurs : Patrick Bonnin

Professeur des Universités, Université de Versailles-St-Quentin-en-Yvelines

Ahmad Hably

Maître de conférences HDR, INP Grenoble

Dir. de thèse : Maryline Chetto

Professeure des Universités, Nantes Université

Co-encadrants : Audrey Queudet

Maîtresse de conférences HDR, Nantes Université

Lamia Belouaer

Ingénieure-Docteure, Société E-COBOT, Carquefou

Invité(s)

Sébastien Ecault

CEO, Société E-COBOT, Carquefou

Titre : Systèmes cobotiques temps réel sous contraintes d'énergie

Mots clés : Cobots Mobiles, Gestion de l'énergie, Ordonnanceur temps-réel, Récolte d'énergie, Contrôle d'accès aux ressources, Noyau Xenomai, ROS2.

Résumé : Les cobots mobiles sont appréciés dans l'industrie pour aider l'opérateur humain et améliorer la productivité. Nous avons contribué à leur conception en développant d'une part une nouvelle architecture matérielle pour plus d'ergonomie et d'autre part un système d'exploitation combinant Linux et Xenomai pour une exécution déterministe du firmware. Pour pallier aux défauts de ROS2, nous proposons l'intégration d'un ordonnancement temps réel conduit par la priorité, présent dans Xenomai, ce qui permet aussi de minimiser la latence. Notre approche respecte les normes de qualité ISO 25010. Au coeur de cette thèse se trouve aussi la problématique de l'autonomie énergétique du cobot que nous cherchons à solutionner grâce à la récupération de l'énergie environnementale. Pour ce faire, nous préconisons d'utiliser ED-H, un ordonnanceur de tâches optimal qui assure la neutralité énergétique chaque fois que possible tout en garantissant le respect des contraintes temporelles du cobot.

Une contribution de cette thèse a donc été d'adapter l'ordonnanceur ED-H, initialement conçu pour des tâches indépendantes, à un ensemble de tâches dépendantes accédant à des ressources partagées en exclusion mutuelle. Une nouvelle condition d'ordonnançabilité a été donnée et la performance de ED-H a été évaluée en simulation avant son déploiement dans le noyau Xenomai. Cette preuve de concept nous a conduit à conclure que l'ordonnanceur non oisif EDF reste l'ordonnanceur de tâches temps réel à privilégier y compris sous contraintes énergétiques. Une autre contribution est de proposer l'ordonnanceur ED-H non pas au niveau des tâches logicielles mais des missions du cobot. Nous montrons comment ED-H, sensible à l'énergie, permet de planifier les missions pour gagner en autonomie énergétique. Enfin, nous avons créé une plateforme expérimentale, visant la conception d'un cobot de transport énergétiquement autonome par récupération d'énergie photovoltaïque et embarquant cette nouvelle architecture matérielle et logicielle.

Title : Real-time and energy constrained cobotic systems

Keywords : Mobile Cobots, Energy Management, Real-time Scheduling, Energy Harvesting, Resource Access Control, Xenomai Kernel, ROS2.

Abstract : Mobile cobots are popular in manufacturing to help human operators and improve productivity. We have contributed to the design of cobots by developing both a novel hardware architecture to enhance user interaction, and a dual-kernel OS that combines Linux and Xenomai, ensuring deterministic firmware execution. To overcome the limitations of ROS2, we have integrated a real-time priority-driven scheduling framework with Xenomai to reduce latency. Our methodology adheres to the ISO 25010 quality standards. A crucial challenge this thesis addresses is the issue of energy autonomy. We propose a solution based on harvesting the ambient energy. Our solution involves using ED-H, an optimal real-time computing task scheduler that guarantees energy neutrality whenever possible while satisfying the timing requirements. One contribution of this thesis was therefore to adapt the ED-H scheduler, initially designed for independent tasks, to a set of

dependent tasks that access shared resources in mutual exclusion. We proved a new sufficient schedulability condition. We tested the actual performance of ED-H via simulation and then we implemented it in the Xenomai kernel. This proof of concept led us to conclude that the non-idling scheduler EDF remains the preferred real-time task scheduler even under energy limitations. Another major contribution of this work is the proposal to apply the ED-H algorithm, not at the task level, but for managing the cobot missions. We show how ED-H allows for mission planning while leading to increase the duration of the application. Finally, we have created an experimental platform that targets the design of an energy-autonomous cobot for transport. This involves scavenging photovoltaic energy and implementing our novel hardware and software architecture.