

La « cobotique » et l'interaction homme-robot

Par Vincent WEISTROFFER

Ingénieur-chercheur au CEA-List dans le Laboratoire de Simulation Interactive

La « cobotique » dans l'industrie

Dans l'industrie, l'apparition des robots s'est faite progressivement pour prendre en charge des postes pénibles ou dangereux. C'est le cas dans l'industrie automobile, dans laquelle une partie importante des chaînes de montage est automatisée : les postes de ferrailage sont réalisés par des robots imposants pour souder les parties métalliques entre elles, tandis que les postes de peinture sont réalisés par des robots spécialement conçus pour résister aux vapeurs toxiques. Ces robots sont complètement autonomes et interdisent l'intervention de l'homme dans leur espace de travail pour des raisons de sécurité.

Néanmoins, il n'est pas envisageable de robotiser la totalité des postes industriels. Certains postes nécessitent l'agilité, la flexibilité, l'adaptabilité et l'intelligence d'opérateurs humains. C'est par exemple le cas des postes de montage automobile, dans lesquels les opérateurs assemblent de petites pièces dans des endroits parfois difficiles d'accès, tout en gardant un temps de cycle performant et en s'adaptant aux aléas. Pour certains postes, les opérateurs sont assistés par des manipulateurs qui permettent de porter des charges lourdes (comme un tableau de bord), mais qui restent guidés par l'humain.

Pour des raisons d'ergonomie, de performance et de coût, il peut être intéressant de coupler les compétences des opérateurs à celles des robots sur un même poste de travail. Pour permettre aux opérateurs et aux robots de travailler ensemble dans les mêmes espaces, il est nécessaire de mettre en place de nouveaux types de robots, souvent appelés « cobots » (pour robots collaboratifs). Ces



Figure 1 : Montage de porte en « co-présence » avec un robot (Weistroffer, 2014).

« cobots » sont intrinsèquement conçus pour garantir la sécurité des opérateurs à proximité. Ils permettent alors le partage d'espace avec des opérateurs (on parle de « co-présence »), le partage d'activités pour des opérations successives (on parle de « co-action ») ou encore le partage de tâches communes (on parle de « collaboration » ou de « co-manipulation »).

Aujourd'hui, l'utilisation des « cobots » dans l'industrie est soumise à des certifications et des normes de sécurité, comme la norme ISO 15066. Ces normes spécifient des critères de sécurité liés à la vitesse du robot, à l'énergie et aux efforts déployés, ainsi qu'à la distance aux opérateurs. L'utilisation des « cobots » est aujourd'hui plutôt déployée dans des contextes de « co-présence », mais leur utilité dans des contextes plus collaboratifs reste étudiée par les industriels. Notamment, les « cobots » représentent une solution intéressante pour les PME, dont les processus de fabrication doivent être de plus en plus flexibles pour s'adapter aux besoins des clients.

Contrairement à la robotique industrielle classique, la « cobotique » fait intervenir l'humain dans la boucle, en permettant de partager les espaces de travail et d'interagir ensemble. De nouvelles problématiques de recherche apparaissent, autour de la sécurité, de l'ergonomie du poste et de la performance. C'est dans ce contexte que les techniques d'apprentissage artificiel peuvent amener des pistes de réflexion intéressantes.

L'apprentissage artificiel pour la « cobotique »

Avec l'émergence de la « cobotique », les industriels doivent faire face à de nouvelles problématiques de développement. L'une de ces problématiques concerne la transition des postes existants vers des postes collaboratifs et l'aide à la conception de ces nouveaux postes. Une autre problématique concerne l'interaction entre l'homme et le robot et la meilleure façon de collaborer ensemble. Dans la suite, nous abordons ces deux problématiques indépendamment et essayons d'illustrer, pour chacune d'elles, comment peut intervenir l'apprentissage artificiel pour faciliter leur mise en œuvre.

L'aide à la conception du poste collaboratif

La transition d'une robotique industrielle classique à une robotique plus collaborative nécessite, de la part des industriels, de réfléchir à une nouvelle configuration des postes de travail. Alors que, sur les postes traditionnels, les robots sont enfermés derrière des barrières physiques, les « cobots » autorisent désormais un partage d'espace avec les opérateurs. Même si les « cobots » sont dits « intrinsèquement sûrs » (c'est-à-dire qu'ils peuvent détecter les collisions avec les opérateurs et s'arrêter en conséquence, grâce à des capteurs embarqués), des capteurs externes sont parfois nécessaires pour respecter les contraintes imposées par les certifications de sécurité.

Les nouveaux postes collaboratifs sont ainsi plus complexes à concevoir, car un grand nombre de paramètres entrent en jeu. Les outils traditionnels de modélisation rencontrent aujourd'hui des limitations dans la prise en compte des paramètres dynamiques du robot et dans le calcul précis de critères liés à la sécurité, comme la masse apparente ou les efforts déployés par l'effecteur du robot.

Le projet SEEROB⁽¹⁾ (Simulation Ergonomique des Environnements de travail avec des ROBots collaboratifs), développé au CEA-List dans la communauté FactoryLab⁽²⁾ avec PSA et Safran, propose un outil d'aide à la conception des postes collaboratifs. Cet outil permet de visualiser le futur poste collaboratif, de simuler le comportement dynamique des robots, de choisir différents capteurs de sécurité et de calculer en temps réel un ensemble de critères liés à la sécurité et à

(1) <https://www.youtube.com/watch?v=9wMAvunW5jM>

(2) <http://factorylab.fr/>

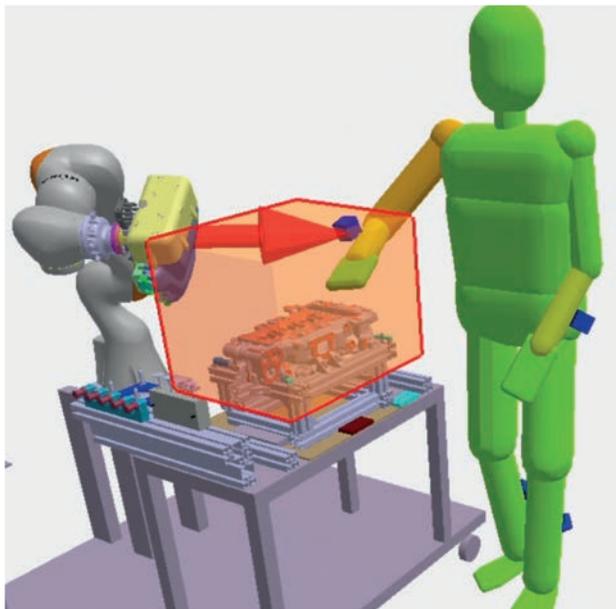


Figure 2 : Simulation dans le logiciel SEEROB pour l'analyse de l'ergonomie et de la sécurité des postes de travail avec des robots collaboratifs.

l'ergonomie du poste. Cet outil peut également être utilisé sur un poste déjà existant dans l'optique de générer un rapport de certification. Cet outil fait aussi intervenir l'opérateur dans la boucle, en utilisant des techniques de réalité virtuelle pour immerger l'opérateur dans la simulation à échelle 1, à l'aide de casques de réalité virtuelle ou de réalité mixte.

Les ingénieurs en robotique disposent ainsi de certains outils d'aide à la conception du poste collaboratif. Cette conception peut néanmoins se révéler laborieuse dans le cas où beaucoup de paramètres sont à prendre en compte : une bonne expertise peut être nécessaire pour optimiser le placement

d'un robot ou la configuration de capteurs de sécurité. C'est dans ce contexte que l'apprentissage artificiel peut apporter son soutien, notamment avec des techniques d'apprentissage par renforcement : l'agent autonome choisit un jeu de paramètres et la simulation lui retourne une récompense (plusieurs scores de sécurité par exemple) ; après plusieurs expériences itérées, l'agent optimise au fur et à mesure son jeu de paramètres. Ces techniques sont encore plus efficaces lorsque plusieurs simulations peuvent être lancées en parallèle sur des *clusters* d'ordinateurs. À l'issue des simulations, les meilleurs résultats sont sélectionnés et placés dans un panel de solutions candidates pour un futur poste collaboratif.

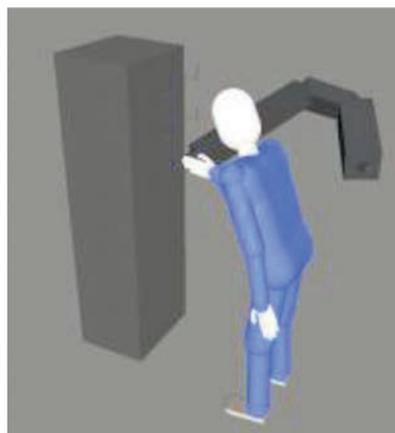
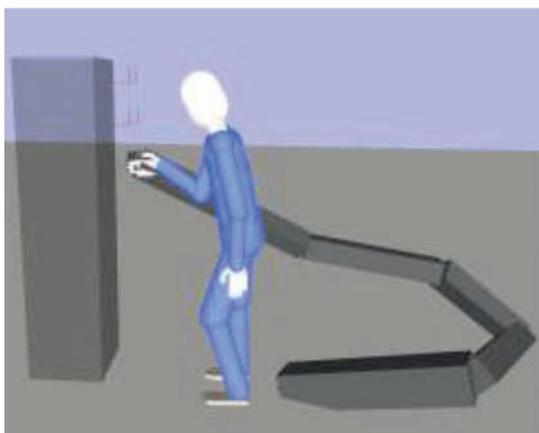


Figure 3 : Utilisation d'algorithmes génétiques dans la conception d'un « cobot » sur une tâche de perçage. À gauche : 10° génération. À droite : 220° génération. Au fur et à mesure des générations, la taille du robot décroît tandis que les sollicitations biomécaniques du mannequin virtuel sont améliorées (Maurice, 2015).

Ces techniques de simulation hors ligne sont utilisées en robotique dans d'autres contextes, par exemple dans la génération de trajectoires ou la génération de prises. Ces techniques ont également été utilisées par Maurice (2015), afin de déterminer la configuration optimale d'un « cobot » (position, structure cinématique) pour soulager les troubles musculo-squelettiques de l'opérateur sur une tâche de perçage. Des algorithmes génétiques ont ainsi été utilisés pour simuler un grand nombre de configurations et converger vers une solution optimale.

L'interaction homme-robot

Une fois qu'un poste collaboratif est conçu au niveau macroscopique, pour garantir sa sécurité et son ergonomie il convient de se pencher plus précisément sur l'interaction entre l'homme et le robot, et la manière dont ils peuvent collaborer. Avec la robotique industrielle classique, les robots répètent les mêmes cycles d'opérations de manière déterministe et n'engagent pas d'interaction avec les opérateurs. Avec le partage d'espace rendu possible par la « cobotique », les robots doivent s'adapter au comportement des opérateurs à proximité, que ce soit pour éviter une collision ou pour échanger des objets. La programmation des robots devient ainsi plus complexe et il devient nécessaire de les doter d'une intelligence supplémentaire pour reconnaître l'activité de l'opérateur et s'adapter en conséquence.

Pour certaines configurations de poste, tout contact entre l'homme et le robot est interdit par mesure de sécurité ; pour d'autres configurations, le contact est nécessaire, car l'opérateur et le robot doivent travailler ensemble sur les mêmes pièces, ou alors l'opérateur doit guider le robot à des endroits précis. L'un des enjeux de la robotique collaborative consiste non seulement à détecter les collisions entre l'homme et le robot, mais également à classifier ces collisions pour distinguer les contacts intentionnels des contacts accidentels, potentiellement dangereux et nécessitant une réaction immédiate. Briquet (2019) propose ainsi une solution qui permet, une fois l'impact détecté, de classifier cette interaction en utilisant des techniques d'apprentissage supervisé et des réseaux de neurones.

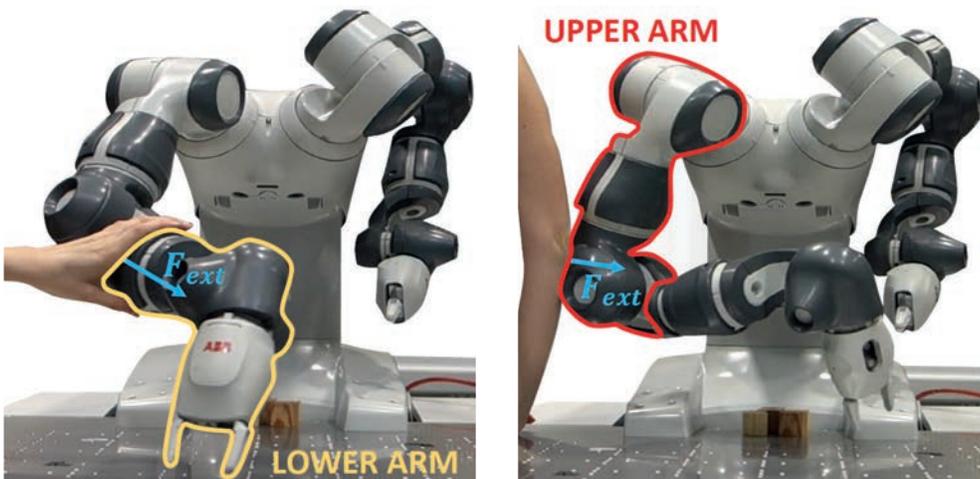


Figure 4 : Utilisation de réseaux de neurones pour la caractérisation du contact. À gauche : une interaction intentionnelle avec le robot. À droite : une collision non désirée (Briquet, 2019).

Au-delà de pouvoir détecter et classifier des contacts avec l'opérateur, le robot doit avoir une connaissance plus fine de son activité afin de rendre l'interaction plus fluide et plus performante. Il s'agit d'analyser les gestes de l'opérateur, d'y répondre correctement, voire de les anticiper. Généralement, des caméras externes sont placées dans l'environnement de travail de l'opérateur

pour détecter ses mouvements. On peut aussi utiliser des capteurs portés par l'opérateur, placés par exemple dans des gants de protection ou sur la tête. C'est le principe mis en œuvre par Coupété (2016) pour analyser les gestes des opérateurs lors de l'assemblage de pièces automobiles en collaboration avec un robot à deux bras. Des algorithmes basés sur des chaînes de Markov cachées sont utilisés pour classifier les gestes des opérateurs selon des catégories prédéfinies. Les résultats de la reconnaissance servent d'entrées pour le comportement du robot.

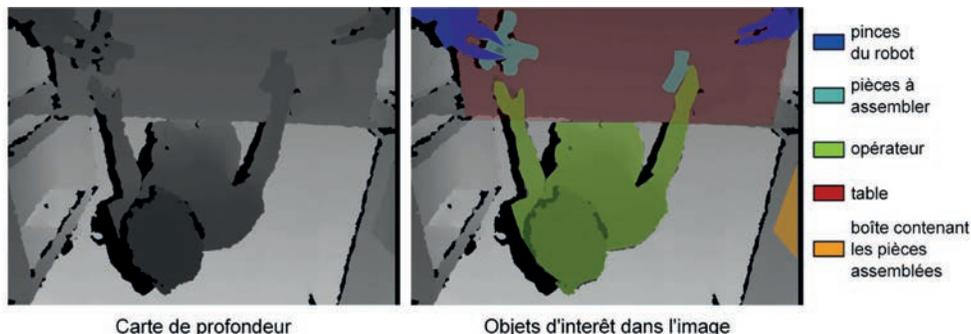


Figure 5 : Utilisation d'une caméra de profondeur pour l'analyse d'activité de l'opérateur et la classification des gestes par chaînes de Markov cachées (Coupété, 2016).

L'utilisation de l'apprentissage artificiel pour la reconnaissance d'activité n'est pas exclusive à l'interaction homme-robot. Les mêmes techniques peuvent être utilisées pour analyser l'ergonomie du poste de travail, reconnaître l'intention d'une personne à domicile ou encore évaluer la performance d'un sportif ou d'un artiste. Ces techniques de reconnaissance nécessitent néanmoins d'établir des catégories de classification, souvent dépendantes du cas d'étude, ce qui peut pénaliser l'industrialisation de cette méthode.

Pour certains postes de travail, s'adapter aux mouvements de l'opérateur avec qui le robot interagit ne suffit pas : le robot doit également s'adapter au profil et à l'expertise de l'opérateur. En effet, le comportement d'un robot n'a pas le même impact sur l'opérateur selon son niveau d'expertise. Aussi, après plusieurs heures de travail avec le robot, le niveau d'expertise de l'opérateur peut évoluer et le robot doit alors modifier ses paramètres dynamiquement pour s'adapter encore mieux au comportement de l'opérateur. Cette problématique nécessite de pouvoir modéliser finement le profil des utilisateurs. Blanchet *et al.* (2019) proposent une approche de modélisation basée sur l'extraction de données brutes internes au robot, lorsque celui-ci est manipulé par les opérateurs. Des expérimentations ont permis de démontrer l'intérêt de cette approche pour distinguer les opérateurs experts des opérateurs novices, mettant en avant la nécessité d'une assistance différente selon le profil des opérateurs.

Limites et extensions de l'apprentissage artificiel pour la « cobotique »

Un petit nombre d'exemples ont permis d'illustrer l'intérêt des techniques d'apprentissage artificiel pour la « cobotique », que ce soit pour assister à la conception des nouveaux postes collaboratifs ou pour améliorer l'interaction entre l'homme et le robot. Leur description n'est néanmoins pas exhaustive et d'autres applications sont envisageables. Il existe également certaines problématiques pour lesquelles l'apprentissage artificiel peut difficilement être appliqué.

La prise en compte du comportement des opérateurs et de sa variabilité reste aujourd'hui une problématique clé. Les outils actuels de simulation permettent de déterminer de plus en plus



Figure 6 : Utilisation de la réalité virtuelle pour la simulation d'un poste de travail avec un robot collaboratif. L'opérateur interagit ici dans un système immersif à trois faces (Weistroffer, 2014).

fidèlement si un poste de travail collaboratif est acceptable du point de vue de sa sécurité et de son ergonomie, mais ils doivent encore considérer le comportement humain, ses incertitudes et ses erreurs pour donner des résultats plus pertinents. Ces aspects sont aujourd'hui difficilement modélisables dans une simulation. C'est pourquoi la nécessité de mener des tests utilisateurs est toujours présente, soit dans des environnements de réalité virtuelle, soit en situation réelle (Weistroffer, 2014).

Enfin, la sécurité, l'ergonomie et la performance d'un poste collaboratif

ne constituent qu'une partie nécessaire au bon déploiement du poste. Des étapes restent encore nécessaires pour que le poste soit considéré comme utilisable et acceptable du point de vue des opérateurs impliqués. Ce sont des critères essentiellement subjectifs et donc difficilement modélisables dans une simulation.

Ainsi, à moins de pouvoir modéliser fidèlement le comportement d'un opérateur, avec ses défauts et ses erreurs, les techniques de simulation et d'apprentissage artificiel devront toujours être accompagnées de tests supplémentaires pour valider ou compléter leurs résultats.

Bibliographie

MAURICE P. (2015), *Virtual Ergonomics for the design of collaborative robots*, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 208 p.

BRIQUET-KERESTEDJIAN N. (2019), *Impact detection and classification for safe physical Human-Robot Interaction under uncertainties*, thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 247 p.

COUPETE E. (2016), *Reconnaissance de gestes et actions pour la collaboration homme-robot sur chaîne de montage*, thèse de doctorat, PSL Research University, 159 p.

BLANCHET K., KCHIR S., BOUZEGHOUB A., LEBEC O. & HEDE P. (2019), "From Raw Signals to Human Skills Level in Physical Human-Robot Collaboration for Advanced-Manufacturing Applications", in GEDEON T., WONG K. & LEE M. (eds.), *Neural Information Processing. ICONIP 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11954, Springer, Cham, pp. 554-565.

WEISTROFFER V. (2014), *Étude des conditions d'acceptabilité de la collaboration homme-robot en utilisant la réalité virtuelle*, thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 229 p.