

La cobotique : des robots industriels aux robots assistants, coopérants et co-opérateurs

Qu'est-ce que la robotique industrielle aujourd'hui ? Des bras manipulateurs autonomes pour réaliser des tâches répétitives à haute cadence, ou des chariots sans conducteur qui suivent des trajectoires fixes... La mise en œuvre de ces solutions robotisées a un fort impact sur l'environnement humain ; elles doivent satisfaire à des contraintes de sécurité et de robustesse et se caractérisent par leur faible versatilité et des capacités d'adaptation limitées.

De nouveaux bras exploitables à proximité d'opérateurs humains sont désormais disponibles sur le marché. De plus, depuis une dizaine d'années, la recherche en robotique progresse très vite, avec pour objectif la robotique de service en milieu humain, et pour cadre applicatif l'assistance aux personnes.

Pourquoi un robot, compagnon de l'homme hors de son environnement de travail, ne pourrait-il pas l'être aussi dans un atelier ? Comment l'industrie peut-elle tirer parti des nouveaux résultats des recherches menées en robotique de service ? Les réponses à ces questions sont complexes, tant les contraintes sont différentes entre les divers domaines applicatifs. Nous évoquerons ici quelques-uns des défis à relever pour qu'émerge la cobotique, une robotique collaborative entre le robot industriel et l'homme.

Par Michel DEVY*

* DR CNRS - CNRS; LAAS; Université de Toulouse ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse Cedex 4, France. Courriel : michel.devy@laas.fr

INTRODUCTION

Nous avons tous en tête les chaînes de montage robotisées, popularisées en particulier dans l'industrie automobile (voir la figure 1). Tel ou tel constructeur a pu communiquer sur tel ou tel site dans lequel une large majorité des actions sont réalisées par des robots, des bras manipulateurs ou des chariots mobiles sans conducteur (AGV). Néanmoins, plusieurs constructeurs sont revenus en arrière et nombreuses sont aujourd'hui les opérations réalisées par des opérateurs assistés de moyens mécaniques leur permettant de limiter leurs efforts physiques, et ainsi de leur éviter des troubles musculo-squelettiques (les TMS).

Pourquoi cela ? Au-delà de la difficulté de la programmation des robots industriels, des problèmes de robustesse, d'échecs des tâches robotisées dès que survient un imprévu ou des contraintes de sécurité rendent plus complexe l'introduction de robots sur un poste donné d'une chaîne de montage : ces bras, très puissants, doivent être isolés des opérateurs humains, et donc mis dans des cages, lesquelles occupent une importante superficie au sol. Par ailleurs, les opérations de logistique sont plus complexes du fait que les robots n'effectuent pas de montage au défilé ; il faut donc prévoir des convoyeurs spécifiques, des files d'attente en entrée des postes robotisés, etc., ce qui rallonge les lignes de production.

Quand on visite une ligne de montage, par exemple dans l'industrie automobile, on est impressionné par l'immensité des sites industriels. Et, malgré cela, l'un des critères importants du choix entre opération manuelle ou opération robotisée, sur un poste donné, (voir les figures 1 et 2), c'est... l'espace ! (s'y ajoute aussi la complexité des opérations de logistique, et donc celle de l'alimentation du poste en composants de base).

D'un côté, de nombreuses contraintes diminuent la plus-value apportée par les solutions robotisées : certains opérateurs humains assistés de moyens mécaniques permettant de limiter leurs efforts réalisent des actions qu'il est difficile d'automatiser, comme l'assemblage d'objets souples (tels que les joints, les revêtements isolants...) ou encore l'assemblage de sous-parties présentant trop de variations.

Mais d'un autre côté, on assiste à un développement important de la robotique de service en milieu humain, avec pour principale motivation, l'assistance aux personnes, à leur domicile, pour faire face au vieillissement de la population dans les pays occidentaux (en particulier au Japon).

Les roboticiens japonais, sous l'impulsion de grands groupes industriels (Honda, Sony,...) ont privilégié les recherches sur la robotique humanoïde sous prétexte qu'un robot à l'apparence humaine (par exemple, le robot HRP2 - voir la figure 3, robot de



Figure 1 : Robots de soudure (© Flore Fauconnier / JDN)



Figure 2 : Ligne d'assemblage General Motors aux Etats-Unis (Crédits photo : Wieck)



Figure 3 : Robots humanoïdes : HRP2 (© LAAS), ICUB (© IIT), NAO (© Aldebaran [1])

gauche) serait plus adapté pour exécuter des tâches dans des environnements humains (monter des escaliers, manipuler des objets, avec deux bras, à partir de la vision...) et serait mieux accepté par l'homme.

En Europe et aux Etats-Unis, il existe aussi des démonstrateurs humanoïdes surtout destinés à des usages dans la recherche et l'enseignement (Icub (au centre) et Nao (à droite), par exemple - voir la figure 3).

De par la complexité de la programmation des robots de service, les plus avancés (au sens de la complexité des tâches qu'ils exécutent) sont plutôt des robots munis de roues (voir la figure 4 de la page suivante) et équipés d'un bras (comme le Care-O-Bot, de IPA, en Allemagne) ou de deux bras (comme le PR2, de Willow Garage aux Etats-Unis).

Un élément particulièrement favorable à cette évolution vers la robotique de service est l'existence, sur le

marché, de robots satisfaisant à la norme ISO 10218. Cette norme définit les exigences de sécurité d'un robot collaboratif, c'est-à-dire d'un robot appelé à exécuter des tâches en présence d'opérateurs humains.

Citons, en particulier, le robot manipulateur 6 axes KUKA LWR (*Light Weight Robot*) [4], initialement conçu au *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* - DLR (Munich, Allemagne). Ces bras sont limités en vitesse ($v < 250$ millimètres/seconde), en puissance (< 80 watts) et en force (< 150 newtons) ; malgré leur faible poids (14 kg), ils ont une bonne capacité d'import (7 kg). Ce robot (voir la figure 5) est disponible dans de nombreux laboratoires, académiques ou industriels.

Au-delà de la conception de robots d'assistance satisfaisant à toutes les contraintes de sécurité, de réactivité et d'acceptabilité propres à l'interaction avec l'homme, il convient de leur donner des capacités autonomes pour percevoir leur environnement, s'y déplacer ou le modifier, et surtout, pour détecter la présence de l'homme et interagir avec lui. Citons, par exemple, le projet ANR ASSIST [6], qui a pour objectif de réaliser un robot compagnon capable d'assister des personnes tétraplégiques lorsqu'elles sont seules à leur domicile. Le robot pourra exécuter des tâches élémentaires, activées par l'homme *via* une interface adaptée (commande vocale, écran tactile, gestes, pointage laser,...). Nous présentons, en figure 6, le *design* du robot ASSIST, qui avec ses deux bras doit pouvoir saisir des objets se trouvant au sol ou sur des étagères. Ces bras sont conçus par le CEA LIST.

Nous avons évoqué deux applications dans lesquelles le robot doit satisfaire des contraintes assez différentes. Pour la production dans l'industrie, les robots, aujourd'hui, sont isolés des opérateurs humains, ce qui prend de l'espace et pose des problèmes de logistique pour organiser une chaîne comportant des postes manuels et des postes robotisés. Les postes robotisés effectuent les tâches qui requièrent rapidité, force et/ou précision : ces tâches sont réalisées en mode autonome, ce sont de ce fait des tâches généralement simples et répétitives. Pour l'assistance à la personne, le robot interagit avec l'homme. Il agit dans sa proximité, voire exécute des tâches partagées avec l'homme. Il est doté d'une autonomie réduite, car il bénéficie de l'expertise humaine, en particulier des capacités sensorielles et décisionnelles de l'homme.

La robotique industrielle doit tirer profit des progrès réalisés en matière de robotique de service pour l'homme. Un nouveau concept est ainsi apparu : la robotique collaborative, ou cobotique, applicable soit à la robotique mobile (par exemple, une boîte à outils robotisée capable de suivre son utilisateur, ou permettant le transport collaboratif de pièces encombrantes), soit à la robotique à poste fixe, avec coaction, ou partage des tâches, entre l'homme et le robot.



Figure 4 : Robots de service à roues : Care-O-Bot (© IPA [2]) et PR2 (© Willow Garage [3])

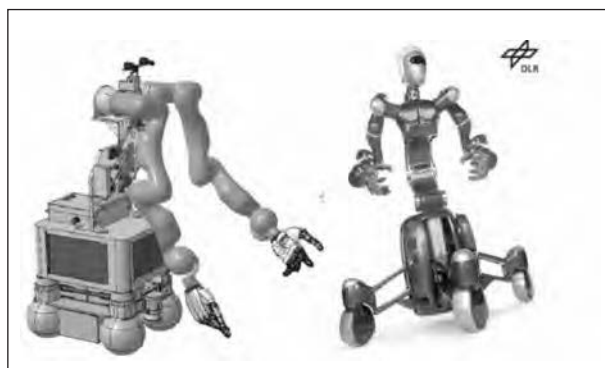


Figure 5 : Bras KUKA LWR [4] embarqués sur les robots JUSTIN (© DLR [5]) en Allemagne, et JIDO2 en cours d'intégration au LAAS (© CNRS)

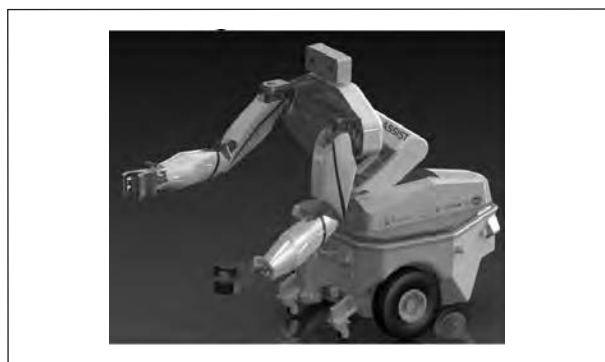


Figure 6 : Démonstrateur du robot ASSIST © CEA LIST

Dans la suite de cet article, nous évoquerons certaines avancées récentes en robotique de service réalisées dans différents domaines, comme la perception de l'homme par le robot, l'exécution de tâches pour la navigation et la manipulation, ou encore le système décisionnel. Nous indiquerons, dans chaque cas, comment décliner ces fonctionnalités sur un robot de service utilisé en milieu industriel. Nous citerons ensuite quelques projets (anciens, en cours ou futurs) portant sur la robotique de service en milieu industriel. Nous concluons, enfin, sur les conditions de réussite de la robotique collaborative dans des applications industrielles.

LA PERCEPTION DE L'HOMME PAR LE ROBOT

Notre « cobot » doit réaliser des tâches en coopération avec l'homme ; il doit se positionner vis-à-vis de l'homme, et comprendre quelles sont ses demandes. Il existe de nombreux schémas d'interaction ; des interfaces plus sophistiquées sont nécessaires, si la tâche est conjointe (c'est-à-dire si elle nécessite la participation active et de l'homme et du robot), si le robot peut prendre l'initiative (le robot peut anticiper les requêtes de l'homme sur la base d'une reconnaissance de l'intention de ce dernier). La perception de l'homme a fait d'énormes progrès au cours de la dernière décennie, essentiellement du fait d'une forte demande pour la vidéosurveillance et, plus récemment, pour les jeux vidéo. Voici quelques exemples de ces fonctions susceptibles d'être transposées sur un cobot.

Apprentissage de l'homme (par le robot)

Au préalable, le robot - plutôt, le cobot - doit connaître l'opérateur avec qui il devra interagir ; cela relève d'un mode d'apprentissage de caractéristiques de l'homme qui soient exploitables par les capteurs embarqués sur le robot : le visage (pour la vision), la voix (pour l'audio), un badge (pour le lecteur RFID (Radio Frequency Identification))... Ce mode d'apprentissage peut être activé hors ligne si l'opérateur ne change jamais, ou bien il peut être activé, en ligne, lorsqu'un nouvel opérateur remplace le précédent. Cette fonction est rapide, mais requiert un protocole spécifique homme-robot

Détection, suivi, identification de l'homme (par le cobot)

Une fois ces caractéristiques connues, le cobot est capable de détecter l'homme auquel il va rendre des services. Les capteurs (caméra, microphone, lecteur RFID, ici connectés à des antennes directionnelles s'agissant du robot de la figure 7) sont embarqués sur le robot. L'exploitation de plusieurs modalités permet d'améliorer les résultats : le capteur audio permet de détecter l'homme, de le localiser en dynamique autour du robot, d'identifier la voix de l'homme (dans un milieu qui peut être bruyant) ; un lecteur RFID apporte sensiblement la même information, si le robot est équipé d'antennes directionnelles ; mais c'est un capteur vidéo qui apporte le plus de précision, grâce à la détection des visages des humains se trouvant à proximité du robot, puis à l'identification parmi tous ces visages de l'homme à assister.

En figure 8, nous illustrons une détection dans l'image par une approche particulière ; chaque point repro-



Figure 7 : Détection de l'homme à partir d'informations multimodales : badge RFID et vision (© CNRS)



Figure 8 : Détection de l'homme par vision (© CNRS)

jeté sur l'image correspond à une hypothèse sur la position de l'homme dans l'image ; est ainsi définie la zone dans laquelle le visage de l'homme sera identifié (zone matérialisée par le rectangle avec des points dans la figure 8). Dès que l'homme a été détecté et identifié dans une image, le cobot va apprendre son apparence, la couleur ou la texture de ses vêtements, dans le deuxième rectangle (celui du bas dans la figure 8), positionné par rapport au visage.

Le suivi des déplacements apparents de l'homme à assister dans la séquence vidéo acquise éventuellement pendant que le robot se déplace, repose lui aussi sur des approches multi-hypothèses fondées sur le filtrage particulaire ; le suivi visuel exploite ces deux fenêtres cadrées sur le visage et sur le corps de l'homme. L'exploitation de deux fenêtres amène plus de robustesse, en particulier lorsque le visage est occulté (dans le cas où l'homme tourne le dos au robot ou passe derrière un obstacle).

Les procédures de détection, de suivi et d'identification sont intimement liées ; c'est la fusion de ces trois fonctions, traitées en fonction de plusieurs modalités (audio, vidéo, RFID), qui permettra de traiter des situations complexes (par exemple, quand l'homme est momentanément occulté, ou qu'il se trouve au milieu d'un groupe de personnes, portant éventuellement toutes une blouse blanche !). Des modèles de

mouvement, pour le robot et/ou pour l'homme, sont exploités pour prédire leurs positions sur chaque image et ainsi pour retrouver l'homme à assister, par exemple après une occultation du champ visuel du robot par une autre personne portant le même vêtement (voir la figure 9a de la page suivante).

Malgré cela, si la dynamique de l'homme est trop rapide, il est fréquent que le suivi visuel « décroche ». En figure 9a, la détection par le lecteur RFID (à droite) permet de relocaliser l'homme, essentiellement en orientation (relativement au robot) et de le ré-identifier, bien qu'il soit vu de dos par le robot (à gauche).

Mouvements conjoints de l'homme et du robot

A partir des données sensorielles (dont il dispose grâce à ses capteurs), le robot peut donc estimer les mouvements de l'homme et le localiser avec une précision dépendant de la nature des capteurs, mais toujours d'un ordre de 10 centimètres.

Le robot peut alors effectuer des déplacements conjoints avec ceux de l'homme, en appliquant une loi de commande afin de maintenir une configuration fixe homme-robot, suivant plusieurs modes possibles.

Par exemple, dans un contexte robot de type Boîte à outils intelligente, le robot suit l'homme, et se maintient à 1 mètre derrière lui. La commande peut être calculée en régulant à 0 l'erreur entre les positions courantes et souhaitées de l'homme par rapport au robot dans l'espace 3D (asservissement visuel 3D), ou entre les positions courantes de l'homme dans l'image (asservissement visuel 2D). Dans un contexte robot-guide, le robot suit une trajectoire déterminée pour atteindre un but, et c'est alors l'homme qui doit suivre le robot (celui-ci doit surveiller l'homme afin d'adapter sa propre vitesse à celle de ce dernier). Dans les deux cas, le robot doit aussi surveiller l'environnement pour éviter tout obstacle (en particulier, d'autres humains ou d'autres robots évoluant dans le même environnement). La détection et l'évitement d'obstacles ne sont pas considérés ici.

Interaction homme-robot

L'interaction homme-robot est un cas particulier de l'interaction homme-machine (IHM), largement étudiée par la communauté informatique. Il est connu qu'un IHM trop complexe ou mal adapté limite l'usage d'un outil, voire, au pire, le rend non acceptable pour l'homme. Ainsi, par exemple, les bras artificiels mis à disposition des personnes handicapées pour étendre leur espace de préhension (bras MANUS ou JACO) sont peu répandus car trop complexes à mettre en œuvre, du fait d'un manque total d'autonomie.

Par ailleurs, un robot assistant avancé offre une grande diversité de services, qu'il peut potentiellement exécuter pour l'homme ; dans un tel cas, une simple télécommande du type commande d'un poste de télévision ne suffit pas.

La commande vocale exploitant l'extraction et la reconnaissance de la parole d'un flot audio nécessite généralement le port d'un micro par l'homme, car l'extraction de sa voix pose problème, en milieu bruyant. Par ailleurs, de nombreuses recherches sont dédiées à la définition du dialogue homme-robot, le but étant de définir le langage à partir d'une « ontologie » partagée, c'est-à-dire de termes qui soient d'un emploi naturel pour l'homme et qui puissent être facilement compris par le robot. Citons en particulier les travaux réalisés à l'INSERM dans le cadre du projet ANR AMORCES [7] concernant l'interaction homme-robot pour l'exécution de tâches collaboratives, et portant notamment sur les impacts respectifs de la communication verbale et de la communication non verbale.

Un clone parlant à visage humain est souvent mis en œuvre sur le robot pour rendre les échanges plus naturels ; le réalisme de ce clone nécessite des traitements très sophistiqués, par exemple pour synchroniser le flot audio avec le mouvement synthétisé de son visage ou de ses lèvres. En figure 9b (de la page suivante), nous présentons l'écran proposé comme IHM sur le robot-guide RACKHAM déployé par le LAAS-CNRS, à la Cité de l'Espace de Toulouse, en 2005. Sur l'écran s'affichait en particulier le plan du site, avec ses différents points d'intérêt, et un clone fourni par le GIPSA-Lab, partenaire du LAAS pour cette opération [8]. Ce clone donnait des explications aux visiteurs.

La détection de gestes est également un mode d'interaction très étudié. De manière générale, la capture des mouvements humains exploite des systèmes multicaméras onéreux et, surtout, nécessite d'équiper l'homme de marqueurs réfléchissants, sur toutes ses articulations. Ces techniques de *Motion Capture* popularisées par l'industrie cinématographique sont trop contraignantes en robotique, même si nous les employons dans les laboratoires afin de suppléer des moyens de perception souvent peu robustes, et aussi afin de donner une « vérité terrain » à nos expérimentations (figure 10 (de la page suivante)).

La capture de mouvements ou de gestes sans marqueurs reste un défi, malgré l'irruption, fin 2010, de la Kinect. Auparavant, nous utilisions la vision monoculaire, stéréo ou 3D (caméras 3D de type Time-Of-Flight ou PMD - *Photonic Mixed Devices* [9]) afin de détecter et de suivre le visage, les mains, voire la configuration de toutes les articulations de l'homme. La figure 10 montre une approche de suivi coordonné des deux mains et du visage par stéréovision ; des contraintes de positionnement entre les mains et le visage permettent de rendre le traitement de ces images plus robuste.

La Kinect, avec sa fonction *Skeleton tracker*, est adaptée des technologies de la société PrimeSense [10] ; elle fournit une solution à ce problème de suivi des gestes de

Figure 9.



(a) Détection de l'homme par RFID (© CNRS)



(b) Ecran tactile utilisé comme IHM (© CNRS)

l'homme. Le capteur, de très faible coût par rapport aux caméras 3D existantes, fournit à la fois une image 3D et une image couleurs de la scène perçue. Il a été largement adopté dans la communauté robotique ; en effet, de nombreux démonstrateurs dans les laboratoires sont équipés de Kinect.

En figure 11, nous montrons le robot Jido, en train d'observer un homme avec sa Kinect : sur l'écran du fond, l'état de la scène (positions des objets, position de l'homme) est mis à jour, en temps réel. Mais le *Skeleton tracker* Version 2011 n'est pas assez robuste en regard des contraintes propres à la robotique pour fournir des données qui soient d'emblée fiables à une détection de gestes et à une reconnaissance des actions de l'homme.

Quelques défis en matière de perception de l'homme

La perception de l'homme est une fonction clé pour développer des stratégies génériques de travail collaboratif homme-cobot. Il est certain que face à un contexte applicatif précis, des solutions d'interactions *ad hoc* peuvent être proposées, qui évitent les difficultés de la reconnaissance vocale ou celles de la détection des gestes ou des actions de l'homme.

Mais à des fins de sécurité (et aussi d'efficacité), il sera nécessaire de doter les cobots de fonctions avancées de perception de l'homme. Certaines fonctions sensorielles pourraient être déportées hors du robot, sur des capteurs fixes (caméras, micros...) enfouis dans l'environnement. Rendre l'environnement plus « intelligent » permettrait certes de multiplier les points de vue sur les scènes à analyser, mais cela 1) accroît les capacités de calcul pour analyser l'ensemble des données nécessaires, 2) rend plus complexes les traitements d'estimation, car ils sont distribués sur plusieurs sites, 3) cela augmente les flux d'informations qui transitent sur le réseau et, enfin, 4) comme pour la vidéo-surveillance, il se pose des problèmes de droit à l'image et de respect de la vie privée.



Figure 10 : Exemple de suivi visage-mains, entrée d'une fonction de détection de gestes (© CNRS)

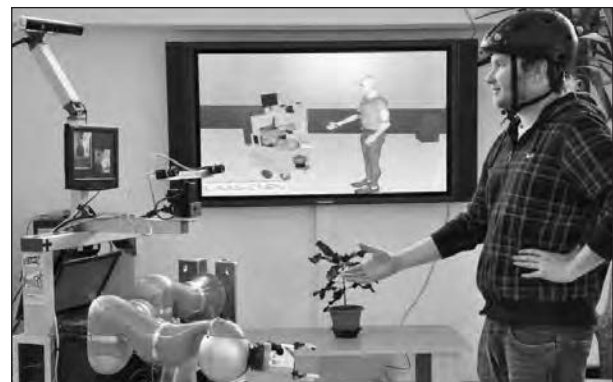


Figure 11 : Perception de l'homme par la Kinect sur le robot Jido du LAAS caméra (© CNRS)

EXECUTION DE TÂCHES ROBOTIQUES

Nous évoquerons ici (sans entrer dans les détails) les défis concernant l'exécution de tâches de type navigation ou manipulation dans le contexte de la robotique industrielle. Un robot assistant de l'homme doit se

déplacer pour satisfaire une requête de l'homme : typiquement, se rendre dans une autre pièce, pour observer et transmettre une image, ou pour aller chercher un objet. Le robot doit saisir cet objet, pour le donner à l'homme à assister ou le rapprocher de celui-ci. Quels sont, en la matière, les défis spécifiques à la robotique industrielle ?

La navigation : exécuter des déplacements

Les opérations de logistique nécessitent de mettre en œuvre de très nombreux chariots (par exemple, pour alimenter les différents postes d'une chaîne d'assemblage en continu). Pour l'automatisation de ces opérations de logistique, de nombreuses compagnies proposent des AGVs (BA Systèmes en France, Neobotix en Allemagne, SwissLog en Suisse,...), mais la mise en œuvre de capacités de navigation autonomes nécessite certains aménagements, dans les ateliers (lignes au sol, *magnets* ou *tags* RFID enfouis,...) pour matérialiser les chemins que les AGVs peuvent suivre.

Peut-on minimiser ces aménagements ? De nombreux travaux, ces dernières années, ont porté sur la navigation autonome, depuis la cartographie ou la génération des représentations de l'environnement nécessaires à un robot pour planifier et exécuter un déplacement de manière sûre, jusqu'à la prise en compte d'imprévus (typiquement, des obstacles).

Il est possible aujourd'hui de définir hors ligne une trajectoire pour un robot, uniquement sur la base d'amers (points de repère), que le robot extrait lui-même. Si les amers sont connus, le robot peut planifier, puis exécuter en ligne un mouvement, en maximisant certains critères (comme passer le plus loin possible des obstacles, minimiser le temps de parcours, maximiser la localisation en cours d'exécution...).

Quels sont les défis à relever dans ce domaine ? Nous citerons les mouvements conjoints homme-robot, qui nécessitent l'asservissement du robot pour suivre les mouvements de l'homme et l'apprentissage de représentations hiérarchisées, indispensables pour des environnements de grandes dimensions. Surtout, il est nécessaire de prendre en compte, dans les planificateurs de trajectoires, les contraintes sociales que doit respecter un robot pour que l'homme en accepte la présence : par exemple, respecter une distance minimale homme-robot, ne pas passer dans le dos de l'homme...

Les manipulations : déplacer des objets

Dans le milieu industriel, la commande de bras manipulateurs a été très largement étudiée, mais plutôt dans un contexte où le bras est isolé, loin de l'homme.



Figure 12 : Le robot tend un objet à l'homme (© CNRS)

La planification et l'exécution de mouvements d'un bras manipulateur à proximité d'opérateurs humains doivent adopter des stratégies intrinsèquement sécurisées qui garantissent la sécurité et le confort des humains. Le planificateur de mouvements HAMP (*Human Aware Motion Planner*) (présenté dans [11]) prend explicitement en compte la présence de l'homme. Ce planificateur se fonde sur l'outil Move3D [12] développé au LAAS-CNRS ; cette technologie a été transférée par la *start up* KinéoCam [13] dans le produit KineoWorks, leader mondial en planification de trajectoires (voir la figure 12).

HAMP génère des mouvements acceptables par l'homme, car ces mouvementsaturent le *jerk*, l'accélération et la vitesse ; en effet, il est montré que dans le contexte de l'interaction homme-robot, la sécurité est directement liée à la limitation de la vitesse, et le confort, à celle de l'accélération. Ces types de mouvements, souples dans l'espace cartésien, sont exploités par le robot pour donner des objets à l'homme (voir la figure 12). Les défis, dans ce domaine de la manipulation, sont nombreux : la préhension dextre, fondée sur des mains anthropomorphiques, telles que les mains SCHUNK [14] qui équipent le robot Justin du DLR (voir la figure 5), doit permettre de réaliser des assemblages complexes.

La planification de trajectoires pour des systèmes robotiques ayant un très grand nombre de degrés de liberté, comme le robot Justin (voir la figure 13), est résolue si les modèles de l'environnement et des objets à manipuler sont connus à l'avance avec précision. Mais, pour prendre en compte l'incertain et l'imprécis, pour corriger une trajectoire planifiée hors ligne au moment de son exécution, il faut étudier des stratégies de planification réactive.

Cela est d'autant plus nécessaire si l'homme est « dans la boucle ». Le robot doit s'adapter à l'homme (et non l'inverse) : le système de perception et de décision embarqué sur le robot doit donc en permanence surveiller l'homme, et comprendre ses intentions afin d'y adapter le comportement du robot.

Un autre défi concerne la programmation de manipulations complexes par apprentissage interactif. Un opérateur peut facilement entrer une trajectoire dans la mémoire du robot en déplaçant physiquement le

bras KUKA LWR. Mais, au-delà de ce mode manuel, l'apprentissage par la démonstration ou par l'exemple permettrait à un robot d'apprendre la manière d'exécuter une tâche (assemblage, saisie...) en observant l'homme en train de la réaliser.

LE SYSTÈME DÉCISIONNEL

Perception-décision-action : tel est le triptyque de la robotique ! Nous ne développerons pas ici la problématique de l'architecture embarquée sur un robot, système complexe dans lequel les couches fonctionnelles (perception, exécution des actions) et décisionnelles communiquent entre elles en permanence. Différents modèles existent, depuis des robots totalement réactifs (*subsumption*) jusqu'aux robots doués de capacités autonomes. Le système embarqué sur le robot doit avoir une architecture qui garantisse à la fois la réactivité (asservissement, prise en compte d'imprévus) et le raisonnement en ligne (réviser les plans, interagir avec l'homme...). Willow Garage [3] a popularisé le *middleware* ROS (Robot Operating System) ; en France, Gostai [15] propose des outils spécifiques pour la programmation de robots.

De manière classique, un robot autonome intervenant dans un environnement non contrôlé doit planifier les tâches à exécuter à partir de représentations de l'espace, de son propre modèle et des actions qu'il peut exécuter. Un robot collaboratif doit aussi raisonner sur ces mêmes connaissances, mais ces représentations, ainsi que le plan à générer, sont partagées avec l'homme ; le cobot doit adopter un comportement acceptable par l'homme, donc un comportement qui soit

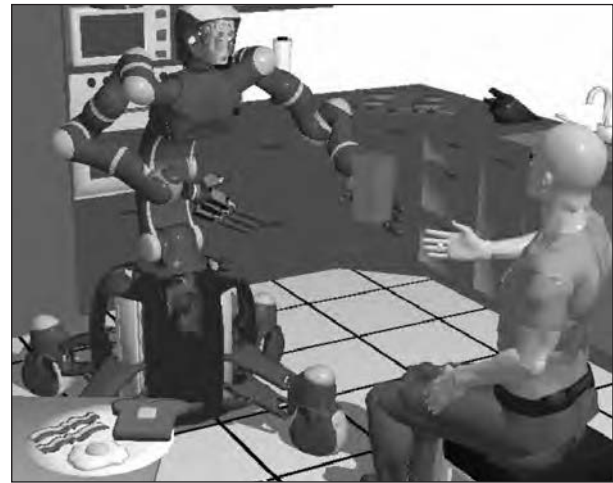


Figure 13 : Planification de mouvements complexes pour l'échange d'objets entre homme et robot (© CNRS)

compris par l'homme et qui respecte les conventions sociales usuelles. Surtout, il doit à tout instant adapter son propre comportement à celui de l'homme.

Afin de raisonner sur les connaissances sur l'espace et sur les tâches à réaliser à un niveau d'abstraction compatible avec l'interaction avec l'homme, de nombreuses recherches exploitent des ontologies afin de représenter l'ensemble des concepts décrivant exhaustivement le domaine dans lequel l'homme et le robot doivent intervenir : ces connaissances sont représentées par un réseau sémantique de concepts liés les uns aux autres par des relations hiérarchiques et sémantiques. Citons ici les travaux réalisés à Munich [16], en particulier le module KnowRob, qui est un système de gestion des connaissances pour un robot de service [17].

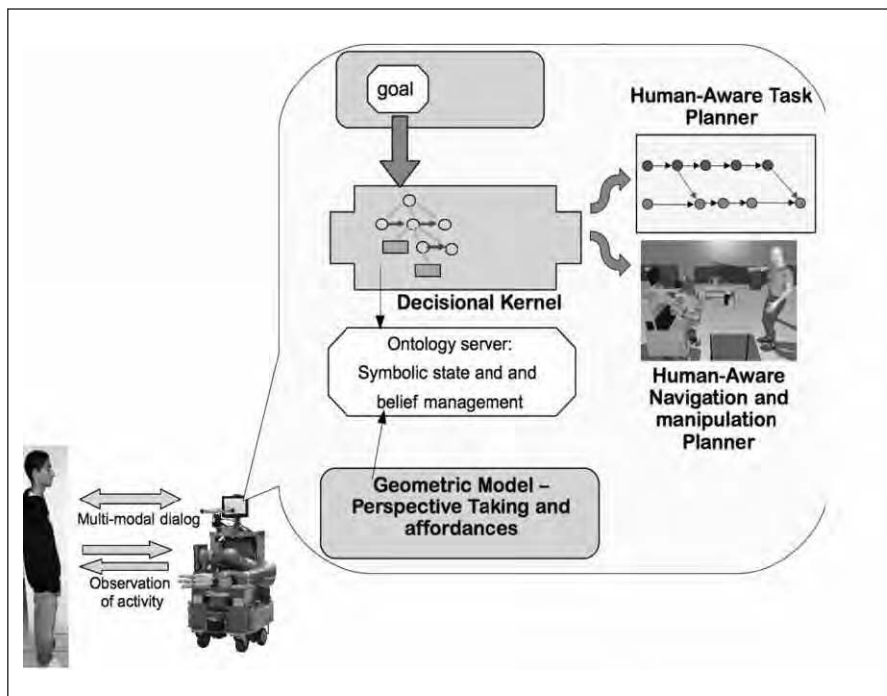


Figure 14 : Système décisionnel d'un cobot (© CNRS)

La figure 14 de la page précédente représente la structure du système décisionnel d'un robot collaboratif vue par l'équipe Robotique et interactions du LAAS-CNRS [18].

Lors de l'exécution du plan généré suite à ces raisonnements, le cobot doit donc détecter, suivre et comprendre les gestes, les actions et les activités qu'exécute l'homme afin de s'y adapter en permanence. L'homme doit rester maître de la cadence, du temps de cycle... et le robot doit, quant à lui, rester *friendly*, non menaçant, prévisible dans son action : il doit *comprendre* ce que l'homme fait.

LES PROJETS

La cobotique, ou robotique collaborative en milieu industriel, doit bénéficier de ces avancées rapides. Citons quelques projets dédiés à cette problématique. Le projet FP6 ROBOT@CWE (*Advanced robotic systems in future collaborative working environments*, 2007-2009) [19] a proposé un environnement permettant d'inclure des robots collaboratifs : les démonstrateurs étaient des robots humanoïdes.

En Europe, le projet FP7 DEXMART (*DEXterous and autonomous dual-arm/hand robotic manipulation with smart sensory-motor skills*, 2008-2012)[20] a pour objectif de reproduire les capacités de manipulation des humains avec des systèmes robotiques dextres à deux bras. Le projet SAPHARI (*Safe and Autonomous Physical Human-Aware Robot Interaction*, 2012-2015) [21] devrait, quant à lui, étudier des interactions physiques intuitives et sûres entre humains et systèmes robotiques.

En France, le projet ANR ICARO (*Industrial Cooperative Assistant Robotics*, 2011-2014) [22] vise à développer des outils destinés à améliorer et à simplifier l'interaction des robots industriels avec les hommes et avec leur environnement. Il réunit des industriels (EADS IW, Peugeot-Citroën-Automobiles SA), des PME innovantes et des laboratoires.

Citons, enfin, le projet CAAMVIS (Contrôle Automatisé d'Assemblages Mécaniques par Vision artificielle) financé par la Région Midi-Pyrénées, qui a pour but le contrôle d'opérations manuelles d'assemblage à partir de capteurs embarqués sur un robot ; les capteurs permettent d'observer l'homme et les objets qu'il manipule. Le but sera de vérifier qu'un assemblage est correctement effectué par l'homme.

CONCLUSIONS

Nous avons décrit dans cet article quelques fonctionnalités développées récemment en robotique de service. Des évolutions rapides ont été possibles grâce à plusieurs éléments.

D'abord, les besoins sociétaux en matière de robotique de service en milieu humain, notamment pour l'assistance aux personnes âgées ou handicapées, ont permis de financer de nombreux projets. Ensuite, des innovations technologiques (micro-caméras, Kinect, RFID, intelligence ambiante...) développées pour d'autres marchés (téléphonie mobile, jeux) ont un impact important en robotique. Enfin, de nouveaux acteurs (Willow Garage, aux Etats-Unis [3], Aldebaran [1]...) se positionnent sur ce nouveau marché. En France, l'association Syrobo [23] vise à développer la robotique de service avec, en particulier, sa promotion à travers le salon Innorobo (Ndlr - Le prochain se tiendra à Lyon au mois de mars 2012).

Mais quelles sont les conditions du succès de la cobotique ? Au niveau technologique, la versatilité et l'auto-adaptabilité permettront au robot d'exécuter toute une gamme de tâches, pour cela le robot devra pouvoir reconnaître plus d'objets, il devra connaître davantage de trajectoires... Un aspect important concerne le temps réel, pour la réactivité, le respect du temps de cycle, et aussi pour éviter la complication de la logistique autour du robot : la réalisation de tâches robotiques « au défilé » en est une des conditions. Là encore, cela complique quelque peu la problématique. Au niveau humain, l'acceptabilité de la coaction homme-robot ne sera effective que si celle-ci apporte une plus-value, par rapport à une action purement manuelle. L'homme peut profiter de la force et de la précision du robot afin de limiter ses efforts, et réduire ainsi la pénibilité de ses tâches et limiter les troubles musculo-squelettiques (TMS) susceptibles de l'affecter. De son côté, le robot peut être plus robuste, plus facile à programmer, car l'homme peut lui apporter son expertise en matière de perception et de décision.

Enfin, au niveau économique, la robotique de service en milieu industriel doit respecter les contraintes industrielles : robustesse/fiabilité, temps de cycle, réduction des coûts, en particulier celui afférent à l'importance de la surface requise par les chaînes d'assemblage.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Entreprise Aldebaran, sur la robotique humanoïde. <http://www.aldebaran-robotics.com>
- [2] Fraunhofer IPA et son robot Care-O-Bot. <http://www.care-o-bot.de/english/>
- [3] Entreprise Willow Garage, USA, sur la robotique de service. <http://www.willowgarage.com/>
- [4] Entreprise KUKA et son bras LWR. <http://www.kuka-robotics.com/en/products/addons/lwr>
- [5] Département *Robotics and Mechatronics* du DLR, et son robot Justin. <http://www.dlr.de/rm-neu/en/>

- [6] Projet ANR ASSIST (1^{er} juillet 2008 / 31 décembre 2012).
<http://www2.lirmm.fr/assist>
- [7] Equipe Inserm Robot Cognition Laboratory.
<http://pfdominey.perso.sfr.fr>
- [8] Département Parole et Cognition du GIPSA Lab.
<http://www.gipsa-lab.inpg.fr/index.php?id=334>
- [9] Entreprise Mesa.
<http://www.mesa-imaging.ch>
- [10] Entreprise Primesense, Israël, sur l'interaction gestuelle, Kinect.
<http://www.primesense.com>
- [11] E.A. Sisbot, L.F. Marin-Urias, X. Broquère, D. Sidobre & R. Alami, "Synthesizing Robot Motions Adapted to Human Presence", *International Journal of Social Robotics*, 2010.
- [12] T. Siméon, J-P. Laumond & F. Lamiroux, *Move3D : a generic platform for motion planning*, Proc. 4th Int. Symp. on Assembly and Task Planning, Japon, 2001.
- [13] Entreprise Kineo CAM, sur la planification de trajectoires.
www.kineocam.com
- [14] Entreprise Schunk, sur les préhenseurs dextres.
<http://www.schunk.com>
- [15] Entreprise Gostai, sur la programmation des robots.
www.gostai.com
- [16] Equipe *Intelligent Autonomous Systems Group* du TUM, Allemagne.
<http://ias.cs.tum.edu>
- [17] M. Tenorth & M. Beetz, *KnowRob: Knowledge Processing for Autonomous Personal Robots*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St.Louis, MO, 2009, pp. 4261-4266.
- [18] Equipe Robotique et Interactions du LAAS-CNRS.
<http://www.laas.fr/RIS/>
- [19] Projet FP6 Robot@cwe, IST-2005-2.5.9.
http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=PROJ_ICT&ACTION=D&CAT=PROJ&RCN=80174
- [20] Projet FP7 DEXMART, ICT-216239.
<http://www.dexmart.eu>
- [21] Projet FP7 SAPHARI.
<http://www.saphari.eu/>
- [22] Projet ANR ICARO.
<http://www2.lirmm.fr/icaro>
- [23] Association Syrobo, salon Innorobo.
<http://www.syrobo.org>
<http://www.syrobo.org>