

Evaluation de l'adaptation homme-machine basée sur un modèle biologique

Yves Rybarczyk^{1,2}, Daniel Mestre¹, Philippe Hoppenot², Etienne Colle²

¹Laboratoire Mouvement et Perception, Aix-Marseille II, 163 av. de Luminy, 13288 Marseille

²Laboratoire Systèmes Complexes, IUP d'Evry, 40 rue du Pelvoux, 91020 Evry

rybar | mestre@laps.univ-mrs.fr

rybarc | hoppenot | colle@iup.univ-evry.fr

Résumé

L'objectif recherché lorsqu'on conçoit une machine devant être utilisée par l'homme, et d'autant plus quand il s'agit d'un dispositif d'assistance au handicap, est que celle-ci soit la plus adaptée possible à son utilisateur. Suivant cette logique, le système idéal est celui qui s'intégrera parfaitement à la boucle sensori-motrice humaine de manière à disparaître du champ de la conscience pour ne plus laisser transparaître que le but de l'action. Cet article propose une méthode basée sur les modèles biologiques de contrôle du comportement, pour évaluer si un opérateur placé en situation de téléguidage parvient à assimiler la dynamique du robot qu'il commande, au niveau de ses schèmes sensori-moteurs. Dans cet exemple, le modèle choisi est la « loi de puissance » qui relie la géométrie à la cinématique du mouvement.

1. Introduction

1.1. Le problème de l'adaptation d'un téléopérateur à un robot mobile

Un individu ayant à téléguider un robot mobile, se retrouve dans une situation de contrôle sensori-moteur très singulière. En premier lieu, il n'agit pas directement sur l'environnement, mais via le système robotisé, et n'a accès, également, qu'à une perception indirecte des résultats de ses actions, à travers un écran vidéo [1]. La présence de cette fracture entre l'entité ordonnatrice et l'entité exécutive va avoir pour conséquence la plus notable, d'engendrer des appauvrissements sensoriels préjudiciables à l'accomplissement de la tâche. En effet, les contraintes techniques inhérentes à tous systèmes mécaniques vont constituer un obstacle à la bonne restitution de l'ensemble des informations sensorielles nécessaires, ou du moins facilitatrices, à une exécution efficace du mouvement. Sur le plan de la modalité visuelle, par exemple, les limitations sont importantes [2]. Elles concernent la diminution de la taille du champ visuel causée par la dimension réduite des champs optiques de caméra. Une difficulté à percevoir la profondeur due à une absence quasi-systématique de vision binoculaire. Ainsi que de possibles latences du retour visuel qui sont le fait des délais de transmission de

l'image vidéo. Une autre modalité sensorielle très sensible aux conditions de téléopération est la proprioception [3]. A la différence d'une situation naturelle, l'opérateur ne bénéficie rarement d'un retour d'effort ou, si celui-ci est présent, il possède un pouvoir discriminatif bien moindre que l'information kinesthésique résultant du contact direct de l'individu sur l'environnement. Il en résulte que la discrimination des variations fines des textures et de la résistance des surfaces à la déformation doit moins s'appuyer sur les indices somatosensoriels que visuels, ce qui a pour contrepartie de contribuer à saturer ce dernier canal d'information [4]. Il faut noter, également, qu'au-delà du fait que des modalités sensorielles soient retransmises d'une manière dégradée, certaines autres peuvent même se voir totalement absentes, comme c'est souvent le cas pour le sens auditif, tactile...

La dernière caractéristique majeure d'une tâche médiatisée par une machine concerne les particularités du contrôle moteur qu'elle implique. Des actions qui sont, d'ordinaire, naturellement automatisées chez l'individu doivent nécessiter maintenant un enclenchement simultané de boutons, avec un nombre de combinaisons possibles très important. De plus, des délais parfois conséquents entre l'exécution du geste de l'utilisateur et le mouvement du robot viennent s'y ajouter. Ils sont eux-mêmes accompagnés par des trajectoires de déplacement de la machine édifiées selon des règles de fonctionnement qui lui sont propres et qui peuvent, au final, fortement perturber l'opérateur [5]. Enfin, malgré l'importance de l'éventail des contraintes qui vient d'être exposé, celui-ci ne constitue en rien une liste exhaustive des difficultés liées au contrôle à distance d'un système et laisse donc présager de l'effort considérable auquel l'individu devra faire face pour s'adapter à cette nouvelle situation. Ainsi, une condition de téléopération et même, plus généralement, de relation homme-machine pose naturellement le problème de l'adaptation de l'utilisateur à son outil.

Une des grandes forces de l'Être humain est de parvenir à s'adapter à des situations plus hétéroclites les unes que les autres. Si bien qu'on a trop facilement tendance à croire que cet état finit toujours par être atteint quel que soit le degré d'incongruité auquel est confronté l'individu. A la vérité, il y a nécessité d'une mise en place de schèmes, qui peut s'avérer complexe

et n'aboutissant pas inéluctablement à l'instauration d'une adaptation. Ces schèmes constituent un ensemble structuré des caractères généralisables de l'action qui permettent de répéter la même action ou de l'appliquer à de nouveaux contenus. Ainsi, de mêmes schèmes peuvent être utilisés pour des situations différentes. Concrètement, par leur proximité d'apparence ou de fonctionnement, des objets nouveaux peuvent être assimilés à des schèmes préexistants. Aussi, cette tendance d'une conduite à être conservée se définit comme un processus d'assimilation [6]. Cependant, lorsque les réalités extérieures ne permettent pas une assimilation directe, il s'instaure le second processus par lequel un individu parvient à s'adapter : l'accommodation [6]. C'est le cas, par exemple, lorsqu'une personne est confrontée à un système qui présente un mode de fonctionnement fort différent de celui de l'homme. Dans cette situation, l'opérateur ne va pas pouvoir se contenter de généraliser ses propres schèmes mais bien d'accommoder, c'est-à-dire de modifier ceux-ci afin de disposer de la batterie sensori-motrice indispensable au contrôle de la singularité opératoire du système.

Ainsi, à la différence des processus assimilateurs, les processus accommodateurs impliquent la création de nouveaux schèmes sensori-moteurs. Cela signifie que ce dernier mécanisme nécessitera une élaboration schématique coûteuse à l'organisme du point de l'acquisition d'une nouvelle habileté motrice [7]. De plus, il n'est nullement assuré qu'une telle entreprise aboutisse systématiquement. Enfin, elle suggère un apprentissage relativement laborieux et long dans le temps. Aussi, les nombreux désavantages associés aux mécanismes d'accommodation ne tendent pas à privilégier ce type de processus d'adaptation. En effet, d'une manière générale, il est préférable de placer l'individu dans une situation à dominante assimilatrice. Il est important de préciser « à dominante », car toute situation nouvelle impliquant majoritairement des processus d'assimilation s'accompagne, néanmoins, obligatoirement de processus d'accommodation. En d'autres termes, c'est un non sens de penser qu'il est possible de s'adapter à un système en envisageant ce phénomène vierge de l'un des deux processus d'adaptation. Ceci dit, s'il apparaît plus pertinent que l'opérateur mette en jeu des mécanismes principalement assimilateurs, il reste le délicat problème de s'assurer que l'individu est bien engagé dans un phénomène d'adaptation à dominante assimilatrice. Effectivement, s'il est relativement évident de savoir dans quelle condition un sujet est plus efficace que dans telle autre, sur la base d'indices phénoménologiques simples tels que le pourcentage de réussite dans la réalisation d'une tâche et/ou sa rapidité d'exécution, il est beaucoup plus compliqué d'évaluer le type de processus qui a été mis en jeu suivant la condition. A ce niveau, il est nécessaire de recourir à une analyse beaucoup plus approfondie que celle limitée aux performances brutes. Aussi, cet article propose une méthode basée sur les lois

biologiques qui régissent les comportements humains développés en situation naturelle pour parvenir à une évaluation fiable de l'assimilation d'une machine par son utilisateur.

1.2. Exemple de modèle comportemental d'évaluation de l'assimilation : la loi de puissance

L'avantage d'utiliser des modèles comportementaux est que ce sont les seuls qui renseignent avec une grande précision sur le processus par lequel l'individu s'adapte à la machine. A la différence, un paramètre tel que le temps d'exécution de la tâche est beaucoup trop relatif pour indiquer si l'opérateur a réellement assimilé le système. En effet, on ne sait pas à l'avance l'atteinte de quel seuil de vitesse nous permettra de conclure à la présence d'une assimilation. Les seules valeurs références dont nous disposons sont celles de la performance humaine naturelle. Or, une machine aussi perfectionnée soit-elle ne peut assurer à son utilisateur une aisance sensori-motrice lui conférant une rapidité de mouvement aussi élevée, quelle que soit la situation, que celle dont dispose l'homme. Ainsi, il est vain de chercher dans la performance brute un marqueur fiable qui puisse nous informer sur une éventuelle assimilation de la machine, puisque les larges différences d'efficacité enregistrées systématiquement entre ces deux entités « homme » versus « homme-machine », nous empêcherons de conclure à une quelconque adaptation. Celle-ci nous permet tout au plus de comparer des conditions expérimentales entre-elles afin de déterminer laquelle fournit à l'opérateur la meilleure performance, mais sans la moindre considération absolue. Au contraire, une loi biologique par sa capacité de vérification de l'adéquation d'un comportement à un modèle, constitue un indice absolu. Du reste, nombre de ces lois obéissent à des relations mathématiques, ce qui leur confère un pouvoir applicatif parfaitement exploitable à des fins d'évaluations tant quantitatives que qualitatives.

Dans le cas d'une tâche de guidage du mouvement, il existe une loi totalement indiquée pour rendre compte du type de schème sous-tendant le contrôle de l'action. Celle-ci est connue sous le nom de « loi de puissance » [8] [9]. Cette loi définit la relation particulière que l'Etre humain entretient entre la géométrie et la cinématique de la trajectoire de la majorité des membres qu'il mobilise. Précisément, elle démontre que la vitesse angulaire de l'extrémité de l'organe effecteur est proportionnelle à la racine deux tiers de sa courbure ou, de manière équivalente, que la vitesse tangentielle instantanée est proportionnelle à la racine cubique du rayon de courbure. Cela signifie que durant le geste d'écriture, par exemple, la vitesse de la main diminue dans les parties les plus courbes de la trajectoire et augmente quand la trajectoire devient plus droite. Les origines neuronales de cette loi demeurent encore inconnues. Cependant, le plus

remarquable est de constater que cette loi ne semble pas seulement gouverner la génération des mouvements de bras mais, aussi, celle de la locomotion humaine [10]. Ainsi, le maintien de ce rapport de puissance un tiers entre le rayon de courbure et la vitesse tangentielle du mouvement quelque soit le membre impliqué, semble constituer un indice robuste témoignant d'une caractéristique fondamentale des schèmes moteurs de l'homme. En cela, il représente un modèle comportemental tout à fait pertinent pour nous éclairer sur la relation que l'opérateur humain entretient avec la machine. En effet, si après analyse on constate que l'opérateur reproduit au niveau du déplacement du robot une relation vitesse/courbure qui respecte la loi de puissance, on peut raisonnablement penser que la restitution de cette relation propre à l'homme au sein de l'entité homme-machine révèle, bien, qu'il y a conservation du schème humain et donc une adaptation à dominance assimilatrice. A contrario, si cette loi n'est pas retrouvée, cela suggère soit que l'individu n'a pas réussi à s'adapter, soit que l'adaptation s'est réalisée par des processus à dominance accommodatrice. Pour trancher, l'analyse des paramètres de performance plus basiques (réussite, vitesse...) s'avère nécessaire. Afin de vérifier nos hypothèses, nous avons appliqué notre méthode d'évaluation pour comparer la qualité du téléguidage d'un robot mobile, suivant que celui-ci dispose d'un mécanisme d'anticipation visuo-motrice plus ou moins fidèle au comportement humain.

2. Application : effet du sens du couplage visuo-moteur sur la relation homme-machine

Comme précisé en introduction, la téléopération est une situation caractérisée par la détérioration voire la perte de nombreuses propriétés sensori-motrices en comparaison des conditions naturelles. Aussi, une des rares modalités encore présente et donc surexploitée est le sens de la vision. Ainsi, cette modalité occupe une position centrale en téléopération [4]. Il en résulte que toutes dégradations à son niveau auront de lourdes conséquences sur le contrôle du robot. A l'inverse, la maîtrise du déplacement de l'engin peut se voir fortement amplifiée en améliorant la qualité de l'information visuelle. En téléopération, les limitations visuelles sont principalement liées à la réduction importante du champ visuel ainsi qu'à des délais de retransmission de l'image [11]. En définitive, il s'agit de contraintes associées à la dimension spatiale et temporelle de la perception visuelle. En condition naturelle, les animaux sont soumis, même si c'est dans une moindre mesure, à ces mêmes limitations. Aussi, la stratégie qu'ils ont développée au cours de l'évolution pour réduire ce problème réside en une anticipation visuo-motrice sur le déplacement. Celle-ci consiste à poser le regard dans un endroit de l'espace avant de déplacer en ce lieu tout ou partie de son

corps. Par exemple, lors du contrôle de son déplacement locomoteur dans des portions courbes, l'individu ne conserve pas l'axe de son regard rigoureusement aligné avec le reste du corps mais dirige celui-ci vers l'intérieur de la trajectoire [12]. Ainsi, l'orientation du regard guiderait le déplacement en anticipant systématiquement les changements de direction de la locomotion d'un intervalle de l'ordre de la seconde. Une stratégie de type « je vais là où je regarde » et non pas « je regarde là où je vais », semble sous-tendre ce guidage du déplacement [13]. Il en va de même pour le contournement d'un repère. Les enregistrements des mouvements du regard et du corps montrent, en effet, que le regard pointe en direction du repère bien avant que l'individu ne se trouve à son niveau, le réaligement de la tête dans la direction de la marche ne s'effectuant qu'après son franchissement [14]. Ceci suggère que l'orientation du regard est contrôlée pas à pas selon un mécanisme prédictif de la nouvelle direction à emprunter.

De telles observations ont également été recueillies dans le cas de la conduite automobile. Dans ces conditions, on constate un déplacement de l'axe du regard du conducteur une à deux secondes avant d'atteindre la convexité de la courbe. De plus, on remarque, malgré le décalage temporel, une déviation angulaire des roues identique à celle du regard [15]. Par cette stratégie l'automobiliste cherche à utiliser les propriétés optiques particulières de la tangente au virage pour guider son déplacement. En effet, dans cette partie de la courbe il y a une annulation dans la direction du flux optique, qui reste à une même position dans le champ visuel pour une courbure de virage constante, rendant ce point particulièrement pertinent pour stabiliser la trajectoire du véhicule. En ce sens, une tâche de suivi de trajectoire s'apparente à un cas particulier de contournement de repère, puisque dans les deux situations l'individu va chercher à se baser sur ces repères physiques stables de l'environnement pour contrôler son déplacement [13]. Des études psychophysiques montrent que cette stratégie de fixation correspond également à une optimisation de la prise d'information utile pour le contrôle de la trajectoire [16]. Ce comportement d'anticipation visuelle sur le déplacement apparaît donc comme une formidable stratégie que la nature a mise au point pour pallier aux limitations spatio-temporelles inhérentes au système visuo-moteur des animaux supérieurs. Aussi, comme il a déjà été souligné précédemment, les systèmes télérobotiques présentant des limitations identiques, nous avons cherché à implémenter sur le robot mobile de téléopération ce même type de comportement. Le résultat escompté était une facilitation du contrôle de la navigation du robot, à l'instar de la locomotion humaine appuyée par les propriétés prédictives du cerveau.

Pour cela, une analogie a été effectuée entre la direction du regard humain et la caméra mobile qui équipe le robot. Au vu de l'architecture fonctionnelle

de notre système, il s'offrait deux possibilités d'implémenter une anticipation visuelle sur le déplacement : soit (i) par automatisation du mouvement anticipatoire de la caméra en fonction des commandes de navigation que l'opérateur transmet au robot (figure 1) soit, inversement, (ii) par automatisation de la navigation du robot à partir des commandes que l'opérateur envoie à la caméra (figure 2). Ces deux sens opposés de couplage caméra-robot diffèrent fondamentalement par leur caractère plus ou moins fidèle au comportement humain. En effet, alors que le second reproduit assez scrupuleusement l'architecture spatio-temporelle du mécanisme d'anticipation visuo-motrice de l'homme, laquelle est organisée dans un sens allant de la tête jusqu'aux pieds, le premier ne respecte pas du tout le modèle humain. Aussi, l'objet de cette étude est de savoir si le fait d'implémenter une anticipation visuo-motrice selon une architecture spatio-temporelle de type humaine versus de type non-humain va influencer la nature de l'adaptation de l'opérateur à la machine. Notre hypothèse est que lorsque le couplage visuo-moteur suit le modèle humain l'individu devrait parvenir à s'adapter au système par un processus à dominante assimilatrice et, inversement, cette adaptation doit nécessiter la mise en jeu de davantage de processus accommodateurs lorsque l'anticipation n'est pas de type humaine.

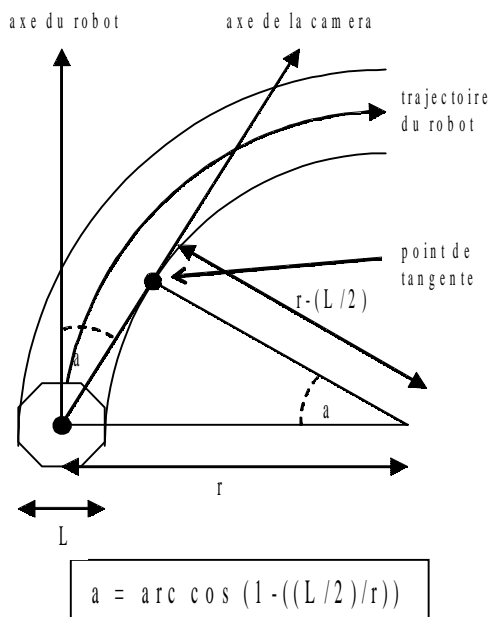


Figure 1. Implémentation de l'anticipation visuo-motrice selon un modèle de type non-humain. L'angle de rotation de la caméra est calculé à partir du rayon de courbure (r) de la trajectoire du robot, par utilisation des règles trigonométriques. Ici, $\cos(a) = (r - (L/2))/r$, où $L/2$ correspond à la demi-largeur du robot. Le rayon (r) est obtenu par le rapport de la vitesse de translation sur la vitesse de rotation du robot.

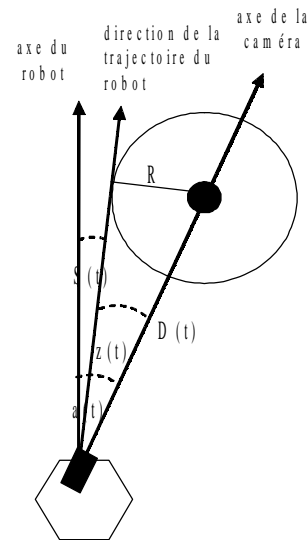


Figure 2. Implémentation de l'anticipation visuo-motrice selon un modèle de type humain. L'angle de navigation du robot (S) est défini par la différence entre l'angle (a), compris entre la direction de la caméra celle de l'avant du robot, et de l'angle (z), compris entre la direction de la caméra et un axe imaginaire tangent à l'orbite de sécurité (R). Cet angle (z) est calculé par règles trigonométriques telles que $\sin z(t) = R/D(t)$. D , la distance entre le robot et le repère de navigation, est obtenue par la vitesse linéaire (v) du véhicule rapportée au taux de variation d'angle de la caméra (a), tel que $D = (v / (da / dt)) \sin a$.

2.1. Matériel et méthode

Le système télérobotique utilisé est constitué de deux éléments principaux : une plate-forme mobile et une station de contrôle. La plate-forme robotique est dotée d'une caméra orientable en azimut. Le robot est mû par deux roues motrices indépendantes, une roue « folle » à l'avant stabilisant le véhicule. Les moteurs sont du même type que ceux qui équipent les fauteuils roulants électriques. Le champ optique de la caméra est de 50° à l'horizontale par 38° à la verticale. Ce capteur retourne à l'opérateur une image de l'environnement dans lequel le robot évolue, sur un terminal de visualisation de 31 sur 23 cm. L'ensemble du système, moteurs et capteurs, est piloté par un PC embarqué sur le robot. Ce dernier est relié au PC de la station de contrôle par l'intermédiaire d'une liaison TCP/IP HF. Une architecture client/serveurs structure la partie informatique. L'interface de commande est matérialisée par les touches du clavier du PC, lesquelles permettent à l'opérateur de contrôler la direction ainsi que de moduler la vitesse du déplacement de la plate-forme.

Trois groupes indépendants de sept sujets ont effectué chacun l'une des trois conditions expérimentales d'anticipation visuo-motrice. La

première condition sert de situation « contrôle ». Pour celle-ci l'anticipation est nulle, puisque la caméra est maintenue immobile droit devant. Dans la seconde, dite « non-humain » la caméra anticipe visuellement sur le déplacement de la plate-forme, par contrôle indirect de l'opérateur. La seconde, dite de « type-humain », est une condition où l'opérateur commande activement l'orientation de la caméra. Dans les trois cas, les sujets sont placés en situation de téléopération, c'est-à-dire qu'ils n'ont qu'une vision indirecte de l'environnement expérimental. La tâche à laquelle sont soumis les sujets consiste à faire exécuter au robot un parcours de slalom entre quatre balises. La consigne qui leur est donnée est de réaliser le parcours le plus rapidement possible tout en évitant les collisions contre les balises. L'analyse des résultats est effectuée sur deux paramètres qui sont le temps d'exécution du trajet et la relation unissant la géométrie et la cinématique des trajectoires du robot.

Ce dernier paramètre est obtenu en calculant les rayons de courbure et les vitesses tangentielles des diverses trajectoires. Après une transformation logarithmique, le coefficient de corrélation ainsi que la pente de la ligne de régression entre ces deux valeurs ont été analysés statistiquement. Puis, les rayons de courbure et vitesses tangentielles ont été normalisés (réduits à un même nombre de points) pour chaque essai et représentés ensembles suivant la condition de vision. Pour que la condition de téléopération suive la « loi de puissance un tiers », l'analyse de la corrélation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles doit révéler une relation linéaire de rapport 1/3 lorsque les deux variables sont représentées suivant une échelle logarithmique. En cas contraire, le comportement ne peut être considéré comme obéissant encore à cette loi biologique.

2.2. Résultats

En ce qui concerne le paramètre de performance brute, la figure 3 montre que les sujets s'avèrent significativement plus rapides quand la caméra anticipe sur le déplacement (modèle « non-humain » et « type-humain ») que lorsque cette anticipation est absente (F[2,18]=7,28 ; p<0,005). En revanche, le temps d'exécution du parcours n'est pas statistiquement différent quand l'orientation de la caméra est automatisée, ou lorsque celle-ci est activement contrôlée par l'opérateur (F[1,12]=0,28 ; N.S).

Cependant, la manière par laquelle ces derniers sujets parviennent à cette similarité de vitesse semble très différente d'une condition à l'autre. Ainsi, dans le cas de l'anticipation de type « non-humain », on n'observe pas de corrélation statistiquement significative entre vitesses tangentielles et rayons de courbure (R=0,16 ; N.S). De plus, lorsqu'on dresse la droite de régression la plus représentative de la relation logarithmique rayons/vitesses, on constate que sa pente est loin d'égaliser le fameux rapport d'1/3

(t=7,02 ; p<0,0004 pour ddl=6) s'approchant plutôt d'une valeur nulle (figure 4).

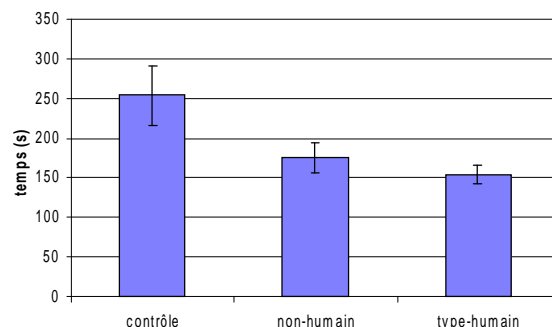


Figure 3. Temps moyen d'exécution du parcours suivant l'existence ou non et la nature de l'anticipation visuelle sur le déplacement.

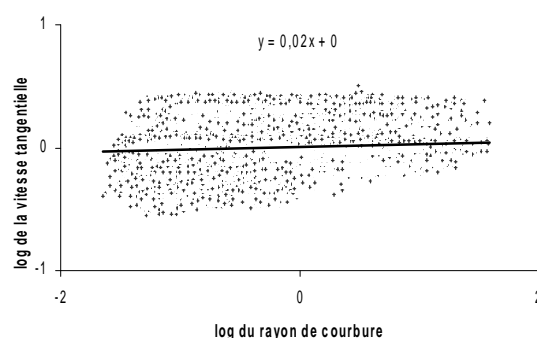


Figure 4. Représentation logarithmique et normalisée de la relation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles pour l'ensemble des essais de la condition d'anticipation de type « non-humain ».

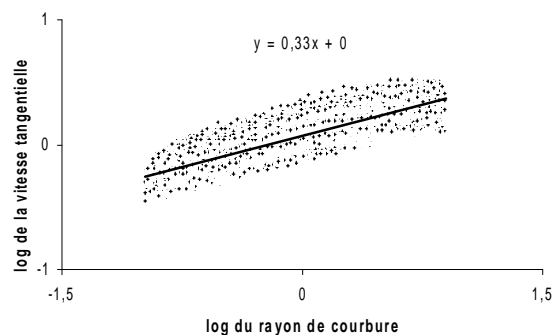


Figure 5. Représentation logarithmique et normalisée de la relation entre rayons de courbure et vitesses tangentielles pour l'ensemble des essais de la condition d'anticipation de « type-humain ».

Au contraire, lorsque l'opérateur pilote un robot doté d'une anticipation de « type-humain », on constate que les vitesses tangentielles de déplacement et les rayons de courbure sont significativement corrélés (R=0,76 ; p<0,001). En effet, la figure 5 montre nettement que plus le rayon augmente plus la

vitesse s'élève proportionnellement. Le plus remarquable est que la pente du pattern obtenu ne diffère pas statistiquement du rapport d'1/3 pour l'ensemble des sujets de cette condition ($t=0,12$; N.S pour $ddl=6$).

3. Conclusions

Cette étude montre qu'il est plus informatif d'utiliser des lois biologiques pour évaluer l'adaptation de l'homme à la machine, que de se contenter d'une analyse limitée à la performance brute des sujets. En effet, de tels modèles comportementaux indiquent de manière beaucoup plus valide si l'opérateur est réellement parvenu à s'adapter au système et par quel processus. Il en résulte donc une économie dans le nombre de paramètres à utiliser et une plus grande fiabilité d'évaluation.

Ici, on voit que lorsque le mécanisme implémenté sur le robot suit un modèle humain, l'opérateur tend à une adaptation à dominante assimilatrice. Néanmoins, cela ne signifie pas pour autant que le sujet ne parvient pas à s'adapter lorsque le mécanisme est architecturé de manière « non-humaine ». Le fait que les sujets de cette dernière condition parviennent à une efficacité dans le temps d'exécution comparable à celle des sujets de la condition de « type-humain » en est d'ailleurs la preuve. Simplement, quand le modèle est proche de l'architecture spatio-temporelle du programme moteur de l'homme, l'opérateur semble assimiler le mode de fonctionnement de la machine à ses schèmes initiaux, avec ce que cela suppose d'aisance d'adaptation [7]. En ce sens, la loi biologique confirme sa plus universelle utilité, puisqu'en plus de rendre compte de l'efficacité, elle témoigne aussi de la charge de travail nécessaire à la maîtrise d'un système, ces variables représentant les deux piliers de l'évaluation ergonomique.

Cependant, on peut objecter à cette méthode que, de part la mécanique particulière de certaines machines, il est possible qu'on ne puisse retrouver une loi biologique humaine. Aussi, il est important de souligner qu'à travers ce type d'évaluation, il n'est nullement prétendu que la non reproduction de lois biologiques implique une non adaptation mais, qu'à l'inverse, la restitution de telles lois nous permet de conclure avec une grande confiance à l'instauration de ce phénomène. De plus, sur un plan plus fondamental, la possible entrave ou non à la reproduction des lois biologiques selon la singularité mécanique de la machine contrôlée par l'homme, va permettre d'enrichir en retour la connaissance sur le fonctionnement de ce dernier. En effet, la restitution de la « loi de puissance » dans une mécanique aussi éloignée de l'homme que celle de notre robot tend davantage vers une explication de cette relation basée sur un modèle interne, plutôt que sur des contraintes biomécaniques externes. Au final, cette situation expérimentale peut donc aider à trancher entre des interprétations divergentes des comportements

humains et ainsi participer à une interfécondation de ces deux disciplines que sont la robotique et les neurosciences.

Références

- [1] P. Peruch, D. Mestre, J. Pailhous, and A. Savoyant, "Visual interface in driving remote-controlled vehicles", North-Holland, vol. 4, pp. 237-242, 1993.
- [2] T. Smith, and K. Smith, "Human factors of workstation telepresence", SOAR, 1990.
- [3] K.A. Grimbergen, "Minimally invasive surgery : human-machine aspects and engineering approaches", Perspectives on the Human Controller, pp. 223-231, 1997.
- [4] C. Terré, "Conduite à distance d'un robot mobile pour la sécurité civile : approche ergonomique", Thèse, 1990.
- [5] S.V. Gray, and J.R. Wilson, "User safety requirements for robot safety, a task analysis approach", EIAS, 1988.
- [6] J. Piaget, "La naissance de l'intelligence chez l'enfant", Delachaux et Niestlé, 1936.
- [7] P. Rabardel, "Les hommes et les technologies. Approche cognitive des instruments contemporains", A. Colin, 1995.
- [8] F. Lacquaniti, C. Terzuolo, and P. Viviani, "The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements", Acta Psychologica, vol. 54, pp. 115-130, 1983.
- [9] P. Viviani, and R. Schneider, "A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements", Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, vol. 17, pp. 198-218, 1991.
- [10] S. Vieilledent, Y. Kerlirzin, S. Dalbera, and A. Berthoz, "Relationship between velocity and curvature of a human locomotor trajectory", Neuroscience Letters, vol. 305, pp. 65-69, 2001.
- [11] M. Massimo, and T. Sheridan, "Variable force and visual feedback effects and teleoperator man/machine performance", Nasa Conference on Space Telerobotics, 1989.
- [12] R. Grasso, S. Glasauer, Y. Takei, and A. Berthoz, "The predictive brain : anticipatory control of head direction for the steering of locomotion", NeuroReport, vol. 7, pp. 1170-1174, 1996.
- [13] M.F. Land, "The visual control of steering", Cambridge University Press, pp. 163-180, 1998.
- [14] R. Grasso, P. Prévost, Y.P. Ivanenko, and A. Berthoz, "Eye-head coordination for the steering of locomotion in humans : an anticipatory synergy", Neuroscience Letters, vol. 253, pp. 115-118, 1998.
- [15] M.F. Land, and D.N. Lee, "Where we look when we steer ?", Nature, vol. 369, pp. 742-744, 1994.
- [16] D. Mestre, "Dynamic evaluation of the functional visual field in driving", Proceedings of Driving Assessment, pp. 234-239, 2001.