

Évitement des butées articulaires et des singularités internes en asservissement visuel

Éric Marchand, François Chaumette, Alessandro Rizzo

IRISA - INRIA Rennes - Université de Rennes I
Campus universitaire de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, France
Email {marchand, chaumett}@irisa.fr

1 Introduction au problème

Dans toutes les tâches robotiques, et notamment dans le cas de l'asservissement visuel, un problème très important est d'essayer d'éviter les butées articulaires et les singularités internes du robot. Les premières sont des limites physiques à l'extension de l'espace opérationnel du robot, tandis que les deuxièmes sont des configurations particulières où le robot perd localement des degrés de liberté en rendant impossible l'obtention de certains mouvements. Dans notre cas d'asservissement visuel, aucune planification des trajectoires ne peut être réalisée car la commande du robot est calculée en ligne. Si l'on ne prend pas en compte ces limites, les tâches d'asservissement visuel ne peuvent pas être réalisées lorsque la loi de commande produite amène le robot en singularité ou sur ses butées articulaires. Dans le cadre de la reconstruction 3D, nous avons été amenés à constater que ces butées articulaires étaient un facteur très handicapant qui limitait fortement la mobilité du manipulateur et donc la possibilité de reconstruire une primitive. Nous avons donc élaboré une loi de commande qui tient compte de ces limites.

Concernant l'évitement des singularités internes ou externes (butées articulaires), des travaux ont été récemment réalisés. Chang et Dubey [1] décrivent une méthode basée sur une solution à "norme minimale pondérée" pour un robot redondant. Ils ne considèrent que la tâche visuelle et calculent une solution à norme minimale en pénalisant les mouvements articulaires qui amènent le robot près des butées. La pénalisation de ces mouvements est réalisée en multipliant les composantes de la norme de la solution par une matrice de poids. Des résultats satisfaisants ont été obtenus, surtout en ce qui concerne l'évitement des butées. Cependant, avec cette méthode, la réalisation de la tâche visuelle est perturbée par l'introduction des pénalisations, et des déviations par rapport à une convergence idéale peuvent apparaître. Elle n'est donc plus réalisée de façon indépendante de la tâche d'évitement des butées. Une autre approche a été suivie par Nelson et Khosla dans [9]. Ils proposent une loi de commande classique pour réaliser la tâche visuelle et/ou le suivi d'une cible (minimisation d'une fonction d'objectif dans l'espace opérationnel du manipulateur). Pour résoudre le problème des butées et des singularités, ils définissent une fonction qui pénalise les mouvements amenant le robot près de ces singularités. Ils utilisent cette fonction en exploitant la redondance du système, c'est-à-dire les degrés de liberté non utilisés pour réaliser la tâche visuelle. En ce qui concerne les singularités internes une partie de la fonction de pénalisation tient compte des configurations singulières. Durant le suivi de cible le robot s'éloigne des butées et des singularités. Cette méthode ne semble pas obtenir de bons résultats lors d'un départ exactement en configuration de singularité interne. De plus les mouvements générés peuvent produire d'importantes perturbations dans le processus d'asservissement visuel car ils ne sont généralement pas compatibles avec la régulation à zéro des primitives visuelles sélectionnées.

Dans cette étude nous avons choisi d'adopter l'approche fonction de tâche [10] appliquée à l'asservissement visuel [5]. Ce choix entraîne la recherche d'une fonction de tâche secondaire, appropriée à notre objectif. Afin d'appliquer cette approche, la fonction de coût à minimiser doit être telle qu'elle atteigne sa valeur maximale quand le manipulateur arrive dans une singularité, soit interne (quand le manipulateur perd des degrés de liberté), soit externe (quand le manipulateur arrive à une butée articulaire).

Cet article est structuré en trois parties. La première rappelle succinctement la théorie de l'asservissement visuel. La deuxième partie définit des lois de commande qui prennent en compte le problème des singularités internes et des butées articulaires. Enfin, nous validons l'approche proposée en décrivant divers résultats expérimentaux.

2 Asservissement visuel

L'asservissement visuel consiste à introduire en boucle fermée les informations extraites de l'image dans une boucle de commande [5][7]. Le problème est spécifié en termes de régulation dans l'image et ne nécessite pas la reconstruction tridimensionnelle de la scène à chaque itération de la boucle de commande. Les lois de commande en asservissement visuel sont généralement exprimées dans l'espace opérationnel du robot (c'est-à-dire dans le repère caméra), les commandes étant ensuite calculées dans l'espace articulaire en utilisant le Jacobien inverse du robot [5][6][9][7]. Cependant, afin d'associer à l'asservissement visuel un processus d'évitement des singularités internes ou externes du robot, il paraît plus intéressant d'exprimer les lois de commande directement dans l'espace articulaire, les butées articulaires et les singularités internes du manipulateur étant directement exprimées dans cet espace. De plus, en ce qui concerne les singularités internes, on est alors capable de réaliser l'asservissement visuel même si le robot traverse une singularité, et ce tant que la tâche elle-même n'est pas singulière. Nous proposons tout d'abord une version modifiée de la loi de commande proposée dans [5], permettant de commander directement le manipulateur dans l'espace articulaire.

Soit \underline{p} l'ensemble des informations visuelles choisies pour réaliser la tâche d'asservissement visuel. Pour amener \underline{p} à sa valeur désirée \underline{p}_d , il est nécessaire de connaître la matrice d'interaction $L_{\underline{p}}^T$ correspondante, définie par l'équation classique [5] :

$$\dot{\underline{p}} = L_{\underline{p}}^T(\underline{p}, \underline{P})T_c \quad (1)$$

où $\dot{\underline{p}}$ représente la variation de \underline{p} dans l'image due à un mouvement de la caméra T_c . Les paramètres \underline{P} dont dépendent $L_{\underline{p}}^T$ représentent l'information de profondeur entre l'objet considéré et le repère de la caméra. Le torseur cinématique de la caméra est lié à la vitesse $\dot{\underline{q}}$ des coordonnées articulaires du robot à travers l'équation $T_c = J(\underline{q})\dot{\underline{q}}$ où $J(\underline{q})$ est le jacobien du robot. On en déduit :

$$\dot{\underline{p}} = H_{\underline{p}}^T(\underline{p}, \underline{P}, \underline{q})\dot{\underline{q}} \quad \text{avec} \quad H_{\underline{p}}^T(\underline{p}, \underline{P}, \underline{q}) = L_{\underline{p}}^T(\underline{p}, \underline{P})J(\underline{q}). \quad (2)$$

La fonction de tâche \underline{e} à réguler est alors donnée par :

$$\underline{e} = W^+W\widehat{H}_{\underline{p}}^{T+}(\underline{p} - \underline{p}_d) + (\mathbb{I}_n - W^+W)g_s^T \quad (3)$$

où

- $\widehat{H}_{\underline{p}}^{T+}$ est la pseudo inverse d'un modèle ou d'une approximation de $\widehat{H}_{\underline{p}}^T$ (jouant le rôle d'un jacobien inverse) ;
- g_s^T est une tâche secondaire, définie comme le gradient d'une fonction de coût à minimiser ($g_s = \frac{\partial h_s}{\partial \underline{q}}$). Cette tâche dont le rôle est ici d'éviter les singularités et les butées articulaires du robot sera décrite dans le paragraphe suivant.
- W est une matrice de rang plein telle que $\text{Ker } W = \text{Ker } \widehat{H}_{\underline{p}}^T$. Les matrices W^+W et $\mathbb{I}_n - W^+W$ forment deux opérateurs de projection orthogonale qui garantissent que le mouvement de la caméra dû à la tâche secondaire est compatible avec la régulation de \underline{p} vers \underline{p}_d . Plus précisément, la fonction de coût secondaire h_s est minimisée sous la contrainte $\underline{p} = \underline{p}_d$ lorsque $\widehat{H}_{\underline{p}}^T = H_{\underline{p}}^T$. En effet, d'après la définition de W , $\mathbb{I}_n - W^+W$ appartient au noyau $\text{Ker } \widehat{H}_{\underline{p}}^T$ et on a alors $\dot{\underline{p}} = \widehat{H}_{\underline{p}}^T(\mathbb{I}_n - W^+W)g_s^T = 0, \forall g_s^T$. Evidemment, si la tâche d'asservissement visuel contraint les n degrés de liberté du robot, on a alors $W = \mathbb{I}_n$, ce qui implique $\mathbb{I}_n - W^+W = 0$. Il est alors impossible de considérer une quelconque tâche secondaire.

La stratégie de contrôle adoptée, qui assure une décroissance exponentielle de la fonction de tâche \underline{e} , est donnée par :

$$\dot{\underline{q}}_d = -\lambda\underline{e} - W^+W\widehat{H}_{\underline{p}}^T\frac{\partial \underline{p}}{\partial t} - (\mathbb{I}_n - W^+W)\frac{\partial g_s^T}{\partial t} \quad (4)$$

où

- $\dot{\underline{q}}_d$ est la vitesse articulaire envoyée au contrôleur du robot ;
- λ est un gain assurant une convergence exponentielle de \underline{e} ;

- $\widehat{\frac{\partial p}{\partial t}}$ représente une estimation d'un éventuel mouvement de l'objet considéré. Si celui-ci est animé d'un mouvement propre, cette estimation doit être introduite dans la loi de commande afin de supprimer les erreurs de trainage. Elle peut être obtenue en utilisant des techniques classiques de filtrage de Kalman [2]. Au contraire, dans le cas d'un scène statique, on peut supposer : $\frac{\partial p}{\partial t} = \widehat{\frac{\partial p}{\partial t}} = 0$.

3 Évitement des butées articulaires et des singularités internes

Comme nous l'avons déjà indiqué, quand la tâche visuelle ne contraint pas tous les degrés de liberté du robot, une tâche secondaire peut être combinée à la tâche d'asservissement visuel. Nous pouvons ainsi utiliser les degrés de liberté redondants [10][3] pour réaliser l'évitement des singularités internes ou externes.

3.1 Évitement des butées articulaires

L'approche classique [10] consiste à maximiser la distance entre la position du robot et ses butées articulaires, ce qui revient à amener chaque axe au milieu de son extension possible :

$$h_s = \sum_{i=1}^n (q_i - \frac{q_{i_{min}} + q_{i_{max}}}{2})^2 \quad (5)$$

où $q_{i_{min}}$ et $q_{i_{max}}$ représentent les valeurs des butées articulaires de l'axe i .

Cependant, il est souvent inutile d'atteindre cette position idéale et généralement suffisant de s'éloigner, si besoin, des butées pour réaliser la tâche visuelle. On définit donc des seuils d'activation de la fonction tâche secondaire par $\tilde{q}_{i_{min}}$ et $\tilde{q}_{i_{max}}$ tels que :

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{i_{min}} &= q_{i_{min}} + \rho(q_{i_{max}} - q_{i_{min}}) \\ \tilde{q}_{i_{max}} &= q_{i_{max}} - \rho(q_{i_{max}} - q_{i_{min}}) \end{aligned} \quad (6)$$

où $0 < \rho < 1/2$. La fonction de tâche secondaire est alors donnée par :

$$h_{s_b} = \frac{\beta}{2} \sum_{i=1}^n \frac{s_i^2}{q_{i_{max}} - q_{i_{min}}} \quad \text{où} \quad s_i = \begin{cases} q_i - \tilde{q}_{i_{max}} & \text{si } q_i > \tilde{q}_{i_{max}} \\ q_i - \tilde{q}_{i_{min}} & \text{si } q_i < \tilde{q}_{i_{min}} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (7)$$

Le gradient de la fonction de tâche secondaire est alors donné par :

$$g_{s_i} = \begin{cases} \frac{\beta(q_i - \tilde{q}_{i_{max}})}{(q_{i_{max}} - q_{i_{min}})} & \text{si } q_i > \tilde{q}_{i_{max}} \\ \frac{\beta(q_i - \tilde{q}_{i_{min}})}{(q_{i_{max}} - q_{i_{min}})} & \text{si } q_i < \tilde{q}_{i_{min}} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \quad \frac{\partial g_{s_i}}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Cette fonction de coût visant à éloigner le robot de ses butées articulaires est similaire à la mesure de manipulabilité de Tsai utilisée dans [9]. Elle est cependant plus simple puisqu'elle permet de définir les seuils d'activation avec le seul paramètre ρ . On peut noter finalement que \underline{g}_s et $\frac{\partial \underline{g}_s}{\partial t}$ sont continues, ce qui permet de ne pas avoir de discontinuités dans la commande.

3.2 Éloignement des singularités internes

Quand le robot se trouve en singularité, il n'est plus possible d'inverser son jacobien, qui n'est plus de rang plein. Cela signifie que le robot perd un ou plusieurs degrés de liberté. En utilisant une loi de commande exprimée directement dans l'espace opérationnel comme c'est le cas dans [9], il est impératif d'éviter ces configurations particulières pour assurer une réalisation correcte de la tâche spécifiée. Dans notre cas, comme nous l'avons dit précédemment, un tel processus n'est pas utile si la matrice d'interaction H_p^T demeure de rang plein (ce qui est généralement le cas même si le robot est lui même en singularité). Cependant dans certains cas, et spécialement si la tâche de vision nécessite un nombre de degrés de liberté supérieur à ceux disponibles en singularité, il est important de pouvoir éviter ces singularités.

Il est possible, comme pour les butées articulaires, de définir une fonction de coût qui permet d'assurer le bon fonctionnement de la tâche d'asservissement tout en s'éloignant des singularités. Dans le cas de la perte

de degrés de liberté du manipulateur, le déterminant du jacobien devient nul. Nous utilisons cette propriété pour définir une fonction de coût h_{sing} à minimiser :

$$h_{sing} = \frac{1}{\det(J(\underline{q}))} \quad (9)$$

Dans ce cas, g_{s_i} et $\frac{\partial g_{s_i}}{\partial t}$ sont donnés par :

$$g_{s_i} = -\frac{1}{\det(J(\underline{q}))^2} \frac{\partial \det(J(\underline{q}))}{\partial q_i} \quad \text{et} \quad \frac{\partial g_{s_i}}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

D'un point de vue pratique, afin de ne pas obtenir une valeur infinie pour la fonction de coût et pour son gradient en singularité, nous avons adopté un déterminant saturé de la forme :

$$\det_{sat}(J(\underline{q})) = \begin{cases} \det(J(\underline{q})) & \text{si } |\det(J(\underline{q}))| \geq \varepsilon \\ \pm\varepsilon & \text{si } |\det(J(\underline{q}))| < \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

3.3 Une fonction de tâche globale

On peut réunir les deux tâches d'évitement des butées articulaires et des singularités internes dans une même fonction de tâche globale. Celle-ci est obtenue comme étant une somme pondérée des deux fonctions définies précédemment :

$$h_s = h_{sb} + Kh_{sing} \quad (12)$$

où K est une constante destinée à régler l'importance d'une sous-tâche par rapport à l'autre. Dans [9], la combinaison de ces deux tâches est réalisée par un simple produit ($h_s = h_{sb}h_{sing}$). L'importance relative des deux tâches est alors impossible à régler.

4 Résultats expérimentaux

L'objectif est de positionner une caméra embarquée sur un robot à six degrés de liberté de telle sorte que la position d'un objet soit au centre de l'image. Plus précisément, les informations visuelles utilisées sont constituées des coordonnées du centre de gravité de la projection de l'objet dans l'image $\underline{p} = (x, y)$ et la valeur désirée \underline{p}_d est fixée à $\underline{p}_d = (0, 0)$. La position initiale du manipulateur est proche de quatre butées articulaires (q_1, q_2, q_4 et q_6) et de plus en singularité ($q_5 = 90dg$) (voir Tableau 1).

En utilisant une approche d'asservissement visuel classique, le manipulateur atteint les butées sur les axes 1 et 2 avant d'avoir pu réaliser la tâche prescrite (voir Figure 1), l'erreur $\underline{p} - \underline{p}_d$ étant alors égale à (17,7) pixels. En utilisant la méthode proposée, on peut constater que la tâche visuelle est correctement réalisée et les butées articulaires ont été évitées (voir tableau 1 et Figure 2). Nous avons choisi comme seuil d'activation 10% du débattement de chaque axe ($\rho = 0.1$). On peut voir sur la Figure 2.c que le robot s'éloigne du voisinage des butées articulaires pour atteindre les régions situées à l'intérieur des seuils d'activation (qui correspondent sur cette figure à la valeur ± 0.8). On peut également noter que le fait que le robot soit initialement en singularité, ne perturbe pas la tâche d'asservissement visuel. En fait la tâche visuelle est ici toujours de rang 2, même quand le jacobien du robot n'est plus de rang plein. De fait l'éloignement de cette singularité est parfaitement réalisé (voir Figure 2.d). Ajoutons que dans cette expérience on a $K = 0.0005$ et $\beta = 0.4$.

Les résultats portant sur la poursuite de cet objet en mouvement sont décrits sur la Figure 3. L'objet est animé de divers mouvements de translation inconnus. Afin de supprimer les erreurs de traînage pendant le suivi, un filtre de Kalman à accélération constante et bruit coloré est utilisé pour estimer le mouvement apparent de la cible (pour plus de détails se référer à [2]). Le robot étant dans le voisinage de trois butées articulaires, cette tâche n'est pas réalisable si l'on ne considère pas un processus d'évitement des butées. En utilisant la tâche secondaire décrite précédemment l'éloignement des butées est réalisé sans perturber le comportement du suivi.

	$q_1(mm)$	$q_2(mm)$	$q_3(mm)$	$q_4(dg)$	$q_5(dg)$	$q_6(dg)$
Butée max $q_{i_{max}}$	750	640	500	162	141	90
Butée min $q_{i_{min}}$	-740	-750	-496	-171	-5	-90
Position initiale $q_{i_{init}}$	741	634	170	-145	90	83
Seuils activation Max	601	501	400	129	126	72
Seuils activation Min.	-591	-611	-396	-138	9	-72
Position finale	601	501	171	-121	101	52

TAB. 1 – *Éloignement des butées : données significatives*

5 Conclusion

Afin d'améliorer la faisabilité d'une tâche visuelle en présence de limites physiques (butées articulaires) et géométriques (singularités internes), nous avons proposé des stratégies reposant sur l'utilisation de l'approche fonction de tâche. Les degrés de liberté non contraints par la tâche visuelle sont utilisés afin de s'éloigner du voisinage des butées ou des singularités. Pour ce faire, des fonctions de coût secondaire, reflétant la manipulabilité du robot dans le voisinage de ces butées ou singularités, ont été définies et les résultats expérimentaux obtenus confirment la validité et l'intérêt de l'approche fonction de tâche. Des résultats plus complets, portant notamment sur des asservissements par rapport à des segments et des droites sont présentés dans [8]. Concernant les singularités internes, si tous les axes du robot sont contraints par la tâche, une autre approche reposant sur la décomposition en valeurs singulières amorties peut être utilisée [4]. Cette approche réalise un compromis entre la faisabilité et la précision de l'exécution de la tâche.

Références

- [1] T.F. Chang, R.V. Dubey. – A weighted least-norm solution based scheme for avoiding joints limits for redundant manipulators. – *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 11(2):286–292, Avril 1995.
- [2] F. Chaumette, A. Santos. – Tracking a moving object by visual servoing. – In *12th IFAC World Congress*, vol. 3, pp. 643–648, Sidney, Australie, Juillet 1993.
- [3] J.L Crowley, M. Mesrabi, F. Chaumette. – Comparison of kinematic and visual servoing for fixation. – In *IROS'95*, pp. 335–341, Pittsburgh, Août 1995.
- [4] O. Egeland, M. Ebdstrup, S. Chiaverini. – Sensory control in singular configurations-application to visual servoing. – In *IEEE Int. Workshop on Intelligent Motion Control*, pp. 401–405, Istanbul, Août 1990.
- [5] B. Espiau, F. Chaumette, P. Rives. – A new approach to visual servoing in robotics. – *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8(3):313–326, Juin 1992.
- [6] J.T Feddema, C.S.G. Lee, O.R. Mitchell. – Weighted selection of image features for resolved rate visual feedback control. – *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 7(1):31–47, Février 1991.
- [7] K. Hashimoto, editor. – *Visual Servoing: Real Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback*. – World Scientific Series in Robotics and Automated Systems, Vol 7, World Scientific Press, Singapour, 1993.
- [8] E. Marchand. – *Stratégies de perception active pour la reconstruction et l'exploration de scènes statiques*. – Thèse de doctorat, Université de Rennes I, IRISA, No 1589, Juin 1996.
- [9] B. Nelson, P.K. Khosla. – Strategies for increasing the tracking region of an eye-in-hand system by singularity and joint limits avoidance. – *International Journal of Robotics Research*, 14(3):255–269, Juin 1995.
- [10] C. Samson, M. Le Borgne, B. Espiau. – *Robot Control: the Task Function Approach*. – Clarendon Press, Oxford, Royaume Uni, 1991.

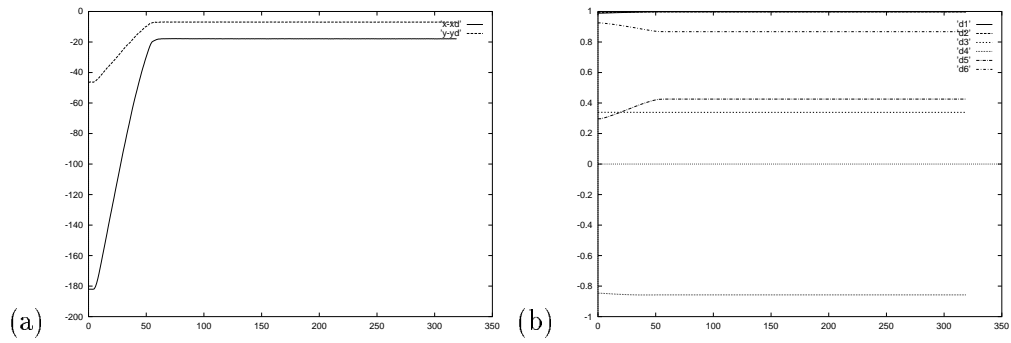


FIG. 1 – Positionnement par rapport à un objet sans évitement des butées: (a) Erreur $(\underline{p} - \underline{p}_d)$ en pixels (b) distances aux butées articulaires $\frac{q - q_{end}}{q_{max} - q_{end}}$

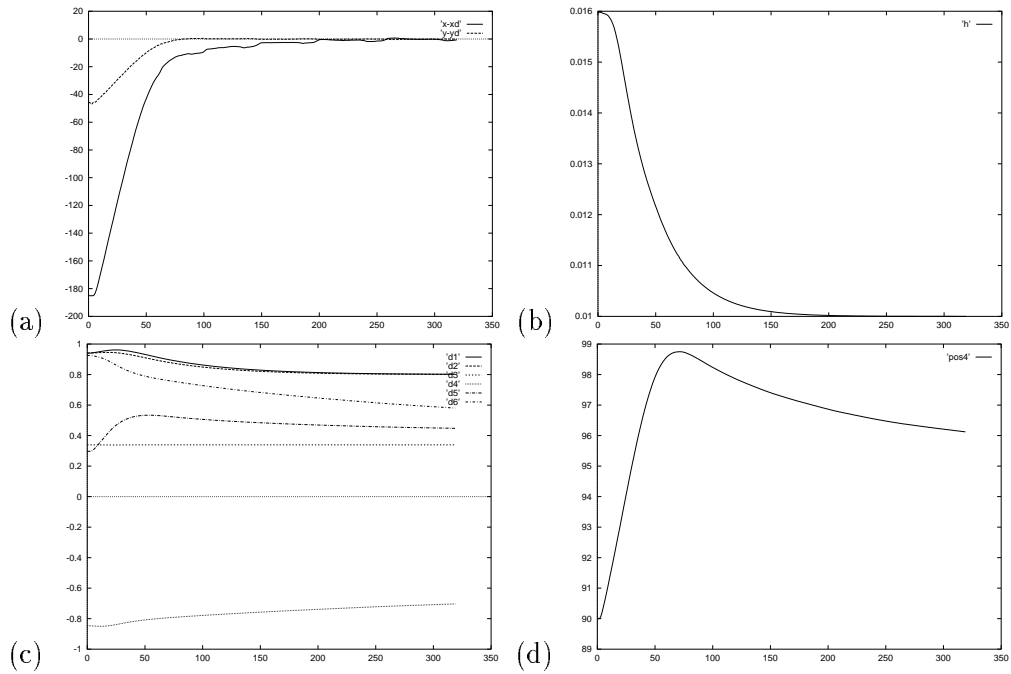


FIG. 2 – Positionnement par rapport à un objet: évitement des butées articulaires et des singularités (a) Erreur $(\underline{p} - \underline{p}_d)$ en pixels (b) fonction de coût secondaire (c) distances aux butées articulaires $\frac{q - q_{end}}{q_{max} - q_{end}}$ (d) comportement de l'axe 5 (en dg), en singularité pour $q_5 = 90^\circ$

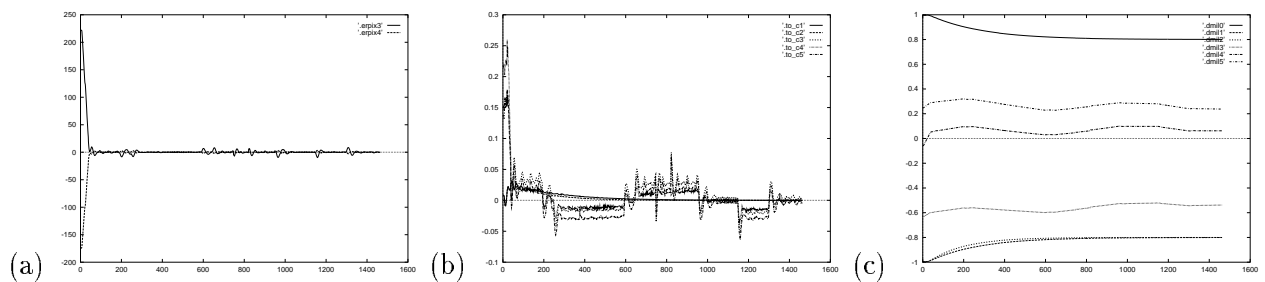


FIG. 3 – Suivi de cible et éloignement des butées articulaires (a) erreur $(\underline{p} - \underline{p}_d)$ en pixels (b) vitesses articulaires \dot{q} (en m/s et rad/s) (c) distance aux butées articulaires