

## Avancées récentes en asservissement visuel

François Chaumette

► **To cite this version:**

François Chaumette. Avancées récentes en asservissement visuel. Journée Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'03, 2003, Clermont-Ferrand, France, France. pp.103-108, 2003. <inria-00352073>

**HAL Id: inria-00352073**

**<https://hal.inria.fr/inria-00352073>**

Submitted on 12 Jan 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Avancées récentes en asservissement visuel

François Chaumette\*  
IRISA / INRIA Rennes  
Campus de Beaulieu, 35 042 Rennes-cedex  
Francois.Chaumette@irisa.fr

## Résumé

*La communauté française est très active dans le domaine de l'asservissement visuel. Cet article se propose d'en présenter les avancées récentes, aussi bien sur les aspects théoriques (modélisation d'informations visuelles et élaboration de lois de commande assurant diverses propriétés de robustesse, d'invariance, de stabilité, de découplage, etc.) que sur les nouvelles applications traitées (en robotique médicale, sur des engins volants, etc.). Les travaux en cours et problèmes encore ouverts sont également brièvement présentés.*

## Mots Clef

Asservissement visuel, robotique.

## 1 Introduction

Les techniques d'asservissement visuel consistent à utiliser les informations fournies par une ou plusieurs caméras afin de contrôler les mouvements d'un système robotique. Quelle que soit la configuration du capteur, pouvant aller d'une caméra embarquée sur l'effecteur du robot à plusieurs caméras déportées, il s'agit de sélectionner au mieux un ensemble de mesures, permettant de contrôler les degrés de liberté souhaités, et d'élaborer une loi de commande afin que ces mesures atteignent une valeur désirée ou suivent une trajectoire spécifiée. Le principe de la commande se ramène ensuite à réguler (c'est-à-dire amener et maintenir à zéro) le vecteur d'erreur entre mesure et consigne.

Avec un capteur de vision, fournissant à la base des informations 2D, la nature des mesures potentielles est extrêmement riche, puisque l'on peut considérer en asservissement visuel aussi bien des mesures 2D, telles que les coordonnées de points caractéristiques dans l'image par exemple, que des mesures 3D, fournies par un module de localisation exploitant les informations 2D extraites. De cette richesse provient la difficulté majeure de l'asservissement visuel, à savoir, parmi l'ensemble des informations potentielles, comment sélectionner, construire et combiner celles qui fourniront un comportement satisfaisant au système. Les qualités souhaitées sont nombreuses : stabilité locale voire globale, robustesse aux erreurs de mesure

et aux erreurs de modélisation, absence de singularités et de minima locaux, trajectoires satisfaisantes du robot, mais aussi des informations visuelles dans l'image, découplage maximal entre les informations visuelles et les degrés de liberté commandés, etc. A ces aspects de modélisation des informations visuelles, dont les résultats récents sont décrits en Section 2, sont bien évidemment associés des travaux en commande, décrits en Section 3, afin d'atteindre les propriétés visées ou d'appréhender des systèmes robotiques complexes. Enfin, le domaine de l'asservissement visuel est porteur de nombreuses applications potentielles en et en dehors de la robotique. Celles-ci sont présentées en Section 4.

## 2 Modélisation

Le lecteur intéressé est tout d'abord invité à se reporter à [6] pour découvrir le cas échéant les notions de base en asservissement visuel, ainsi qu'un état de l'art des travaux dans ce domaine portant jusqu'en 2000 environ.

Depuis, une contribution majeure a consisté à proposer une classe de schémas d'asservissement visuel hybride (appelé encore 2D 1/2), qui consiste à sélectionner des informations visuelles issues d'une phase de localisation projective [14]. Les avantages apportés sont nombreux et significatifs : d'une part, il n'est plus nécessaire de connaître le modèle 3D des objets considérés, la localisation s'effectuant à partir de la mise en correspondance entre l'image courante et l'image désirée. D'autre part, le comportement du système est assez satisfaisant grâce au découplage apporté entre les degrés de liberté en translation et ceux en rotation. Ce découplage a permis en outre d'analyser la stabilité du système en présence d'erreurs de calibration et d'établir des conditions analytiques sur les erreurs des paramètres intrinsèques et extrinsèques du capteur de vision pour assurer cette stabilité. Cette approche, valable à l'origine pour des scènes constituées de points et de droites, a récemment été étendue au cas d'objets plans de forme inconnue et complexe (voir Figure 1.a) [17]. De même, ce type de schéma hybride a été appliqué à des objets texturés (voir Figure 1.b) en utilisant les paramètres affines du mouvement 2D pour estimer l'orientation du plan de l'objet [1]. Des travaux sont actuellement en cours pour tenter d'obtenir des lois de commande ayant les mêmes bonnes propriétés, mais en utilisant des informations visuelles extraites directement de l'image courante. Un tel type d'as-

\*Cet article a été réalisé suite à l'envoi de contributions en provenance du Cemif d'Evry, de l'Inria Sophia Antipolis, du Laas de Toulouse, du Lasmea de Clermont-Ferrand, et du LSIIT de Strasbourg.

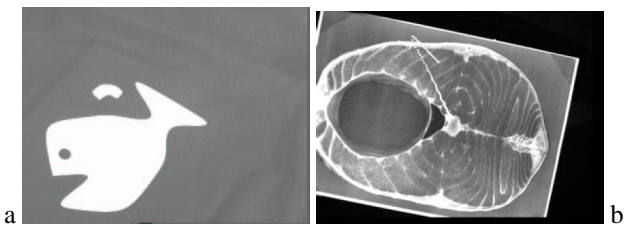


FIG. 1 – Exemples d’écologie de forme complexe qu’il est à présent possible d’appréhender par asservissement visuel

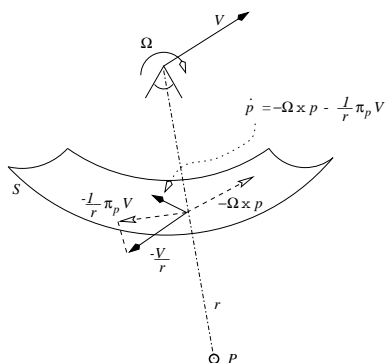


FIG. 2 – Modèle de projection sphérique

servissement visuel 2D permet d’éviter les phases de mise en correspondance et de localisation projective. Pour cela, les travaux décrits dans [24] utilisent les moments d’un objet dans l’image. Ceux-ci sont facilement mesurables à partir d’une segmentation spatiale et permettent de représenter de manière générique des objets de forme complexe et inconnue (voir Figure 1.a). Ils peuvent également se calculer à partir d’un ensemble de points d’intérêt. En utilisant les propriétés d’invariance de certaines combinaisons de moments, il est possible de sélectionner des combinaisons telles que, lorsque l’objet est parallèle au plan image, la matrice d’interaction associée est triangulaire (cette matrice jouant le rôle fondamental équivalent au jacobien d’un robot). Le découplage, l’agrandissement du domaine de convergence ainsi qu’un bon comportement du système sont alors atteints. Ces résultats ont été généralisés très récemment au cas où l’objet n’est pas parallèle au plan image.

Dans le même ordre d’idée, des informations visuelles dotées de la propriété de passivité structurelle ont été déterminées dans [12]. Cette notion de passivité s’apparente au découplage entre degrés de liberté de rotation et de translation. Elle a été obtenue pour des points en considérant un modèle de projection sphérique (voir Figure 2), plutôt que le classique modèle de projection perspective, et pour des droites avec leurs coordonnées de Plücker binormées. Comme nous le verrons en Section 3, ces informations visuelles ont permis l’élaboration de lois de commande pour un drone sous-actionné.

Une autre contribution importante en asservissement visuel 2D a porté sur la mise en œuvre d’une méthode in-

variante aux paramètres intrinsèques de la caméra [18]. Il devient alors possible d’utiliser une caméra avec un zoom variable sans connaître la valeur exacte du zoom, ou d’utiliser une caméra pour apprendre l’image à atteindre et une caméra différente pour réaliser l’asservissement tout en étant assuré que le robot atteigne sa vraie position désirée. La méthode, valide à l’origine pour un nuage de points non coplanaires, a été généralisée au cas de droites non coplanaires [15], et, dans certains cas, à des amers planaires [4]. La méthode repose sur la détermination et l’application d’une transformation projective rendant les informations visuelles invariantes aux paramètres de la caméra. On peut par ailleurs signaler quelques études pour l’instant plus ponctuelles : dans [8], un poids est attribué à chaque information visuelle afin d’éliminer les effets d’erreurs potentielles d’appariement ou de traitement d’images. Ces poids sont calculés à partir de M-estimateurs statistiques robustes aux données erronées et aberrantes. Cette technique est valide dans les schémas d’asservissement visuel utilisant des informations visuelles redondantes. Dans [16], une analyse de la stabilité de l’asservissement visuel 2D en présence d’erreurs dans la profondeur des points considérés montre une faible robustesse par rapport à ces erreurs quand une estimation de la profondeur est injectée dans la loi de commande. Enfin, dans [22], la méthode du Simplexe a été utilisée directement pour minimiser l’erreur dans l’image. Cette méthode générique ne fait aucune hypothèse concernant la géométrie du robot ou les paramètres de la caméra. Elle permet de plus la prise en compte de contraintes dans l’espace articulaire et dans l’espace opérationnel.

Finalement, quelques travaux ont également été réalisés récemment en asservissement visuel 3D (qui consiste à utiliser des informations visuelles issues d’une reconstruction ou d’une localisation 3D de l’objet d’intérêt). Dans [25], un schéma construit à partir de la pose 3D a été proposé afin d’assurer autant que possible la visibilité de l’objet d’intérêt au cours de l’asservissement. Dans [5], un système stéréoscopique a été considéré et une étude des informations visuelles les plus pertinentes a été réalisée (coordonnées redondantes des points dans les deux images ou coordonnées du point 3D reconstruit). Les applications envisagées portent sur le contournement et la navigation autour d’objets complexes.

### 3 Commande

Sur les aspects proches de la commande, des développements importants ont été réalisés ces dernières années sur le couplage entre planification de trajectoires et asservissement visuel. Ces travaux sont intéressants puisqu’ils permettent d’appréhender de grands déplacements à réaliser entre la position initiale et la position désirée. Ils permettent aussi d’accroître sensiblement la robustesse du système vis-à-vis des erreurs de modélisation et de calibration par la poursuite de ces trajectoires par asservissement visuel.

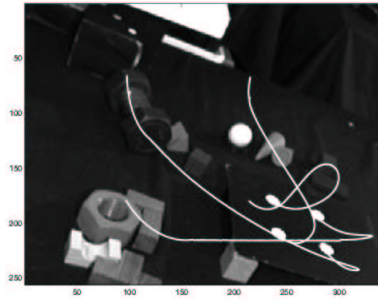


FIG. 3 – Planification de trajectoires dans l’image assurant la convergence et la visibilité de l’objet d’intérêt

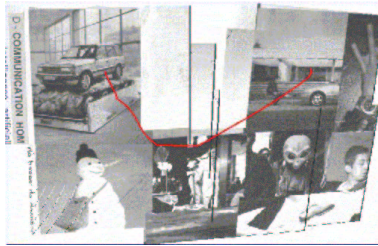


FIG. 4 – Asservissement visuel à partir d’une base de données image pour des déplacements très importants

La première méthode présentée dans [20] est basée sur l’approche des fonctions de potentiels. Elle permet de considérer aussi bien des contraintes sur la trajectoire 3D du robot (la plus proche possible d’une ligne droite) que des contraintes supplémentaires telles l’évitement des butées articulaires, l’évitement d’occultations de parties de l’objet sur lui-même, ainsi que l’assurance que l’objet reste dans le champ de vision du capteur (voir Figure 3). Même si l’absence de minima locaux n’a pas été démontrée, cette méthode semble donner des résultats satisfaisants en pratique. Une deuxième méthode présentée dans [21] est basée sur la commande optimale. Elle permet de calculer la forme analytiques des trajectoires de points dans l’image correspondant à un déplacement optimal de la caméra (translation en ligne droite, rotation selon une géodésique). Ces trajectoires sont indépendantes des paramètres de la caméra, et comme la méthode précédente, s’applique à des objets dont le modèle 3D n’est pas connu. Malheureusement, il semble impossible de déterminer des formes analytiques dès que des contraintes (telle la conservation de la visibilité de l’objet) sont ajoutées au système. Ces méthodes sont actuellement reconsidérées afin de considérer des asservissements visuels à partir d’une base d’images indexées (voir Figure 4).

Des travaux complémentaires sont présentés dans [26]. Tout d’abord, un schéma de planification assurant à tout coup la visibilité de l’objet a été proposé, et ce même en présence d’erreurs de calibration de la caméra. Cette méthode de planification ne permet toutefois pas encore de prendre en compte d’autres contraintes telles l’évitement

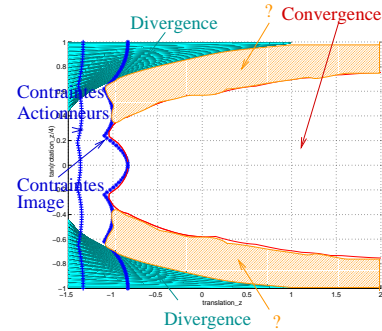


FIG. 5 – Détermination des domaines de convergence et de divergence d’un asservissement visuel à l’aide des techniques LMI

des butées du robot. Par ailleurs, une technique de réglage automatique des gains de l’asservissement et de la vitesse de parcours de la trajectoire permet d’assurer la bornitude de l’erreur de poursuite, connaissant des bornes sur les effets des erreurs de modélisation [27].

Sur les aspects commande, on peut aussi noter les travaux décrits dans [3] qui portent sur la synthèse et l’analyse de lois de commande par asservissement visuel à base d’inégalités linéaires matricielles (LMIs). Sur les aspects de synthèse il s’agit de garantir a priori certaines propriétés telles que la convergence, la non-saturation des actionneurs, la visibilité de l’objet, la satisfaction de contraintes 3D pendant le déplacement, etc. Les résultats obtenus pour l’instant semblent assez conservatifs. Sur les aspects d’analyse, ces techniques permettent de caractériser la région dans laquelle une commande donnée permet la convergence (voir Figure 5), ou d’évaluer les gammes de valeurs de certaines quantités, ou encore d’étudier la sensibilité à divers types d’incertitudes.

La modélisation dynamique complète d’une boucle d’asservissement visuel a par ailleurs été réalisée dans [10]. La boucle comprend un robot manipulateur, une caméra et un système d’acquisition et de traitement d’images. Le modèle multivariable obtenu correspond à une linéarisation autour d’une configuration donnée du robot. Il tient compte à la fois des dynamiques du manipulateur et du système d’acquisition d’images. Pour contrôler cette boucle, les techniques de commande prédictive généralisée (GPC) ont été employées. Elles permettent de garantir l’optimalité de la réponse pour chaque configuration du robot grâce à une technique de séquençage de gain. Deux tâches robotiques différentes ont permis de valider ce modèle : d’une part, le suivi rapide de cible avec une caméra rapide (240 images/sec.) et, d’autre part, un suivi de profilé [10]. Cette technique a été également appliquée récemment pour la compensation de mouvement périodique et a permis de réaliser un asservissement visuel à 500 Hz sur un robot médical [11].

Enfin, des travaux ont été réalisés pour prendre en compte la dynamique d’un robot pour un bras avec transmission

flexible, à l'aide de méthodes issues de la commande robuste  $H_\infty$  et de la commande linéaire à paramètres variants (LPV) [9].

Finalement, l'application des techniques d'asservissement visuel au difficile contrôle de drones aériens a connu ses premiers développements ces toutes dernières années. Pour un dirigeable et pour des tâches de stabilisation au point fixe, d'atterrissage, et de suivi de structures linéiques (routes, lignes électriques,...), une loi de commande unique synthétisée à partir du modèle linéarisé a tout d'abord été testée pour en étudier les limites de validité [2]. La synthèse d'un contrôleur LQR est actuellement en cours d'intégration. Pour un hélicoptère, et comme cela a déjà été évoqué, des techniques de "backstepping" ont pu être mises en œuvre sur des informations visuelles spécifiques disposant de la propriété de passivité structurelle [12].

## 4 Applications

Nous n'abordons pas ici les domaines d'applications anciens utilisant des robots manipulateurs ou des robots mobiles. En sus du contrôle d'engins aériens, le nouveau domaine d'applications le plus spectaculaire des techniques d'asservissement visuel est sans aucun doute celui de la robotique médicale qui a connu ces dernières années des développements et succès importants. On présente également dans cette section deux domaines d'applications en dehors de celui classique de la robotique, à savoir en réalité virtuelle et en réalité augmentée.

### 4.1 Robotique médicale

La première application significative réalisée porte sur l'aide au geste chirurgical par asservissement visuel en chirurgie laparoscopique robotisée [13]. Dans ce cadre, les instruments de chirurgie et l'endoscope sont tenus par des bras robotiques esclaves. Les difficultés principales résidaient dans le fait que l'environnement est peu structuré et que la détection d'indices visuels pertinents est très difficile à réaliser de manière robuste. Par ailleurs, le passage d'outils par un point d'incision contraint les mouvements des robots à 4 ddl, ce qui a nécessité la prise en compte de cette contrainte dans la modélisation des informations visuelles. Le système qui a été développé est constitué d'un pointage laser équipé d'amers et attaché à l'instrument (voir Figure 6). Il permet de conserver l'instrument dans le champ visuel du chirurgien par asservissement visuel sur l'image endoscopique, ceci afin d'éviter tout danger de télé-manipulation. Il permet également de positionner automatiquement l'instrument à une distance prédéfinie par le chirurgien d'un point caractéristique dans la cavité abdominale. Dans le même domaine, des travaux sont actuellement en cours pour l'aide à la suture, geste le plus difficile à réaliser que ce soit manuellement ou avec un système robotique. L'approche explorée est également fondée sur l'asservissement visuel des bras porte-instruments à partir de l'image endoscopique (voir Figure 7).

Par ailleurs, une autre application consiste à compenser les

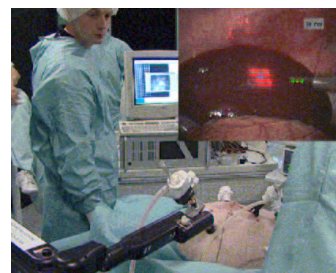


FIG. 6 – Contrôle des mouvements d'instruments en chirurgie laparoscopique par asservissement visuel sur l'image endoscopique

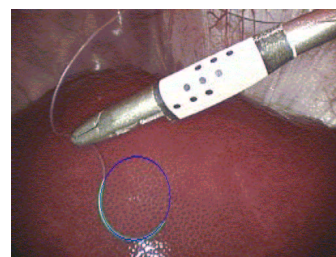


FIG. 7 – Aide à la suture en chirurgie laparoscopique

mouvements des organes induits par la respiration et par les battements cardiaques. Pour cela et comme cela a déjà été évoqué, un asservissement visuel GPC a été développé afin que le système robotique se déplace avec le mouvement des organes, de manière à rendre ces mouvements transparents pour le chirurgien qui le télé-manipule [11].

Enfin, plus récemment, des travaux ont été entrepris pour la réalisation de procédures percutanées en radiologie interventionnelle par imagerie scanner. Une application typique consiste à enfoncer une aiguille dans des minitumeurs du foie (quelques mm) qui ne sont visibles qu'à l'imagerie scanner, afin de les détruire ensuite par radiofréquence. Cette procédure est réalisée aujourd'hui manuellement avec une précision de l'ordre du cm tout en exposant le médecin au rayonnement X. L'objectif de ce travail, effectué dans le cadre du projet Robea Insertion Robotisée d'Aiguille Sous Imagerie Scanner, est de développer un système télé-opéré permettant d'enfoncer une aiguille à distance avec retour d'effort et asservissement visuel sur l'image scanner (voir Figure 8).



FIG. 8 – Insertion d'aiguille sous imagerie scanner

## 4.2 Réalité virtuelle

Les techniques d’asservissement visuel s’appliquent assez directement au domaine de la réalité virtuelle, par exemple pour le contrôle du regard d’un humanoïde virtuel (voir Figure 9.a). Il est également possible de générer par asservissement visuel des mouvements spécialisés de type cinématographie pour la caméra virtuelle de restitution visuelle, ou encore de contrôler les mouvements de cette caméra en évitant les obstacles et les occultations (par exemple pour l’application classique de visite de musée virtuel- voir Figure 9.b) [19].

## 4.3 Réalité augmentée

L’application de l’asservissement visuel au domaine de la réalité augmentée et du suivi 3D semble également assez prometteuse. Il s’agit alors de contrôler les mouvements d’une caméra virtuelle afin de minimiser l’erreur entre l’image observée par la caméra réelle et la projection du modèle CAO des objets sur la vue de la caméra virtuelle. La position de la caméra virtuelle minimisant cette erreur, obtenue à la convergence de l’asservissement visuel “virtuel”, fournit la pose de la caméra réelle. L’application au suivi 3D et à la réalité augmentée est alors immédiate (voir Figure 10). L’originalité des travaux décrits dans [7] porte notamment sur la prise en compte dans la loi de commande d’estimateurs robustes pour appréhender des objets complexes et des occultations potentielles, ce qui élargit au passage le champ d’applications des techniques classiques d’asservissement visuel en robotique.

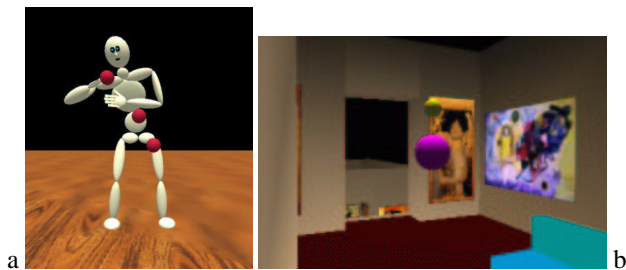


FIG. 9 – Applications de l’asservissement visuel en réalité virtuelle : (a) contrôle du regard d’un humanoïde, (b) visite d’un musée virtuel

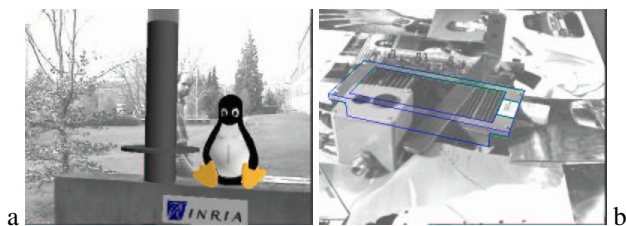


FIG. 10 – Application de l’asservissement visuel en réalité augmentée (a) et en suivi 3D (b)

## 5 Conclusion et perspectives

Comme on l’a vu, les travaux en asservissement visuel sont fructueux au sein de la communauté française. Ils devraient l’être encore à l’avenir tant les travaux en cours et les perspectives sont nombreux.

Sur les aspects de modélisation, outre la recherche du Graal d’informations visuelles idéales, on voit apparaître l’utilisation en asservissement visuel de nouveaux systèmes d’imagerie : projection sphérique, imagerie scanner, comme cela a déjà été évoqué, mais aussi vision omni-directionnelle et imagerie échographique (dans le cadre respectivement des projets Robea Omnibot et Gabie). Ces nouveaux types d’imagerie nécessitent de modéliser les informations visuelles associées, le modèle de projection perspective classique ne s’appliquant plus, et d’en étudier le comportement. De même, l’utilisation de la lumière structurée pour simplifier la perception d’environnements complexes (en médical ou en agro-alimentaire) va connaître un regain d’attention et de nouveaux travaux en modélisation et analyse.

Des progrès sont également évidemment attendus en synthèse et analyse des lois de commande par asservissement visuel.

Par ailleurs, les techniques d’asservissement visuel sont à la base des techniques de commande “bas-niveau” qu’il faut intégrer dans des systèmes plus complets pour en assurer une véritable diffusion. Ce travail important va de la conception d’IHM à l’introduction de systèmes de reconnaissance d’objets, en passant par la robustification des algorithmes de traitements d’images. Pour traiter des applications de haut niveau, il passe également par l’étude d’enchaînement de tâches (comme cela a été considéré de manière générale dans [23] et sera appliqué à l’asservissement visuel dans le projet Robea Enchaînement Dynamique de Tâches Référencées Multi-Capteurs) et par la prise en compte de plusieurs capteurs (couplage vision/force, vision/télémètre, systèmes multi-caméras, etc.) Comme on l’a déjà dit, l’utilisation de l’asservissement visuel en robotique médicale est en plein essor, de même que pour le contrôle d’engins aériens (par exemple dans le cadre du projet Robea Robvolint). Il en sera de même dans le domaine de la robotique mobile, notamment pour l’aide à la navigation et au pilotage automatique de véhicules dans des environnements dont la taille et la complexité n’ont rien à voir avec ceux traités habituellement (on peut citer à ce propos le projet Robea Bodega notamment).

Enfin, pour terminer sur un point technique, les problèmes liés aux retards, dus à une extraction coûteuse des informations visuelles ou à la transmission des images pour des systèmes télé-déportés, peuvent être une source non négligeable de déstabilisation lorsque la dynamique est importante (pour les engins volants par exemple). Ils devront donc être étudiés à l’avenir.

**Remerciements** à tous les “contributeurs” ayant permis la réalisation de ce survol.

## Références

- [1] A. Alhaj, C. Collewet, F. Chaumette : Visual servoing based on dynamic vision, *ICRA'03*, Taipei, Taiwan, Septembre 2003.
- [2] J. Azinheira, P. Rives, J. Carvalho, G. Silveira, E. Paiva, S. Bueno : Visual servo control for the hovering of an outdoor robotic airship. *ICRA'02*, pages 2287–2793, Washington D.C., USA, Mai 2002.
- [3] D. Bellot, P. Danès : Handling visual servoing schemes through rational systems and LMIs. *40th IEEE Conf. on Decision and Control, CDC'01*, pages 3601–3606, Orlando, Floride, Décembre 2001.
- [4] S. Benhimane, E. Malis : Vision-based control with respect to planar and non-planar objects using a zooming camera *IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics, ICAR'03*, Coimbra, Portugal, Juillet 2003.
- [5] E. Cervera, D. Pobil, F. Berry, P. Martinet : Improving image-based visual servoing with 3D features. *Int. Journal of Robotics Research*, Special Issue on Visual Servoing, 2003.
- [6] F. Chaumette : Asservissement visuel. *Commande des robots manipulateurs*, W. Khalil éd., Chap. 3, p. 103-150, Traité IC2, Hermès, 2002.
- [7] A. Comport, E. Marchand, F. Chaumette : A real-time tracker for markerless augmented reality, *ACM/IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, ISMAR'03*, Tokyo, Japon, Octobre 2003.
- [8] A. Comport, M. Pressigout, E. Marchand, F. Chaumette : A visual servoing control law that is robust to image outliers. *IROS'03*, Las Vegas, Nevada, Octobre 2003.
- [9] L. Cuvillon, E. Laroche, J. Gangloff, M. de Mathelin : A gain scheduled control for visual servoing for a flexible arm. *IFAC Symp. on Robust Control Design, ROCOND'03*, Milan, Italie, Juin 2003.
- [10] J. Gangloff, M. de Mathelin : Visual servoing of a 6 DOF manipulator for unknown 3D profile following. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):511-520, Août 2002.
- [11] R. Ginhoux, J. Gangloff, M. de Mathelin, L. Soler, J. Leroy, J. Marescaux : Model predictive control for tracking of repetitive organ motions during teleoperated laparoscopic interventions. *European Conf. on Control, ECC'03*, Cambridge, Royaume-Uni, Septembre 2003.
- [12] T. Hamel, R. Mahony : Visual servoing of an under-actuated dynamic rigid-body system: An image based approach. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(2):187-198, Avril 2002.
- [13] A. Kruppa, J. Gangloff, C. Dognon, M. de Mathelin, G. Morel, L. Soler, J. Leroy, J. Marescaux : Autonomous 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic using visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Special Issue on Medical Robotics, Octobre 2003.
- [14] E. Malis, F. Chaumette : Theoretical improvements in the stability analysis of a new class of model-free visual servoing methods. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(2):176–186, Avril 2002.
- [15] E. Malis, J.-J. Borelly, P. Rives : Intrinsic-free visual servoing with respect to straight lines. *IROS'02*, Lausanne, Suisse, Octobre 2002.
- [16] E. Malis, P. Rives : Robustness of image-based visual servoing with respect to depth distribution errors. *ICRA'03*, Taipei, Taiwan, Septembre 2003.
- [17] E. Malis, G. Chesi, R. Cipolla : 2 1/2 d visual servoing with respect to planar contours having complex and unknown shapes. *Int. Journal of Robotics Research*, Special Issue on Visual Servoing, 2003.
- [18] E. Malis : Visual servoing invariant to changes in camera intrinsic parameters. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2003.
- [19] E. Marchand, N. Courty : Controlling a camera in a virtual environment, *The Visual Computer Journal*, 18(1):1-19, Février 2002.
- [20] Y. Mezouar, F. Chaumette : Path planning for robust image-based control, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):534-549, Août 2002.
- [21] Y. Mezouar, F. Chaumette : Optimal camera trajectory with image-based control, *Int. Journal of Robotics Research*, Special Issue on Visual Servoing, 2003.
- [22] K. Miura, J. Gangloff, M. de Mathelin : Robust and uncalibrated visual servoing without jacobian using a simplex method. *IROS02*, Lausanne, Suisse, Octobre 2002.
- [23] P. Soueres, V. Cadenat, M. Djedou : Dynamical sequence of multi-sensor based tasks for mobile robots navigation, *7<sup>th</sup> Int. IFAC Symp. on Robot Control, SYROCO'03*, Wroclaw, Pologne, Septembre 2003.
- [24] O. Tahri, F. Chaumette : Application of moment invariants to visual servoing, *ICRA'03*, Taipei, Taiwan, Septembre 2003.
- [25] B. Thuilot, P. Martinet, L. Cordesses, J. Gallice : Position-based visual servoing: keeping the object in the field of vision. *ICRA02*, Washington DC, USA, May 2002.
- [26] P. Zanne : *Contributions à l'asservissement visuel robuste* Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, LSIT, Juillet 2003
- [27] P. Zanne, G. Morel, F. Plestan : Sensor based robot control in the presence of uncertainties: bounding the task function tracking errors. *ICRA'02*, Washington DC, USA, Mai 2002.