



Quoi de neuf en asservissement visuel depuis les JNRR'03 ?

François Chaumette, Nicolas Andreff

► To cite this version:

François Chaumette, Nicolas Andreff. Quoi de neuf en asservissement visuel depuis les JNRR'03 ? . Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'07, 2007, Obernai, France, France. 2007. <inria-00350639>

HAL Id: inria-00350639

<https://hal.inria.fr/inria-00350639>

Submitted on 7 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.

Quoi de neuf en asservissement visuel depuis les JNRR'03 ?

François Chaumette
INRIA / IRISA
Campus de Beaulieu
35042 Rennes Cedex

Tél. 02 99 84 72 55 – Francois.Chaumette@irisa.fr

Nicolas Andreff
LaMI/LASMEA – IFMA/UBP/CNRS
Campus des Cézeaux/Clermont-Ferrand
63175 Aubière Cedex

Tél. 04 73 28 80 66 – Nicolas.Andreff@ifma.fr

*Résumé - Cet article de synthèse présente les avancées réalisées en France au cours de ces quatre dernières années dans le domaine de l'asservissement visuel.*¹

Mots-clé - Asservissement visuel, robotique

I. INTRODUCTION

Les premiers travaux en asservissement visuel au sein de la communauté française datent de la fin des années 1980. Depuis lors, ils n'ont cessé de prendre de l'essor, via des contributions méthodologiques propres ou via l'élargissement de leur domaine d'application en se confrontant aux autres domaines de la robotique. Au niveau factuel, depuis le dernier point fait sur l'asservissement visuel aux JNRR'03, on peut noter la soutenance d'une quinzaine de thèses dans le domaine, la publication d'une centaine d'articles dans les conférences et revues internationales (dont cet article tente d'en faire la synthèse), la production d'un article de base [12], ainsi que d'un tutoriel [13], [14], le seul existant jusqu'à présent datant de 1996. Parmi toutes ces publications, on peut mettre en exergue [28], prix du meilleur papier 2005 d'ITRO, faisant suite à celui déjà attribué en 2002, démontrant ainsi l'excellent niveau des travaux réalisés en France sur le sujet. Un effort important de diffusion logicielle a également été réalisé via la mise à disposition de la bibliothèque d'asservissement visuel ViSP [42] et de l'algorithme de suivi ESM [38].

Les contributions récentes touchent à tous les domaines de l'asservissement visuel. Nous décrivons dans un premier temps celles ayant trait à la modélisation des informations visuelles qui sont utilisées en entrée des lois de commande. Sur ce point, on peut particulièrement noter les travaux réalisés pour prendre en compte de nouveaux capteurs tels les capteurs de vision omnidirectionnelle, ainsi que les sondes échographiques en robotique médicale. La prise en compte de contraintes au cours d'un asservissement visuel, soit pour réaliser des tâches complexes, soit pour appréhender des environnements de plus en plus réalistes, a également été largement étudiée. Nous décrivons en section III les travaux basés sur des techniques de

commande avancée telles les LMI ou la commande prédictive, et, en section IV ceux utilisant des techniques de planification ou de séquençage de tâches. Nous présentons ensuite en section V les contributions obtenues dans le domaine de la navigation visuelle en robotique mobile. Celles-ci sont significatives, en raison notamment des progrès réalisés dans le domaine de la vision par ordinateur qui permettent à présent de considérer de manière fiable et robuste des environnements d'extérieur. Comme nous le verrons en section VI, le contrôle d'engins volants par asservissement visuel est également en pleine expansion. Nous terminerons enfin en section VII par la description de travaux plus ponctuels.

II. MODÉLISATION D'INFORMATIONS VISUELLES

Le but de ces études est de déterminer des informations visuelles telles que les lois de commande associées présentent des propriétés remarquables. Nous considérons tout d'abord les études reposant sur un modèle de projection perspective classique, puis sur la modélisation de nouveaux capteurs.

A. Projection perspective

1) *Asservissement visuel 2D étendu* : Les travaux décrits dans [59] portent sur l'analyse d'une commande utilisant comme informations visuelles les coordonnées homogènes de points de l'image exprimées en pixel multipliées par la profondeur du point 3D correspondant, d'où le terme d'asservissement visuel 2D étendu choisi par les auteurs de [59]. On rappelle que ces informations visuelles peuvent être obtenues soit à partir d'un calcul de pose si on dispose d'une caméra étalonnée et du modèle 3D de l'objet considéré, soit à partir de points appariés sur les images courante et désirée en remontant à la structure partielle de l'objet. L'emploi de ces informations visuelles redondantes aboutit à de bonnes propriétés de la commande associée telles la possibilité de caractériser l'ensemble de ses minima locaux, la génération de trajectoires satisfaisantes, ainsi que la stabilité asymptotique globale du système sous l'hypothèse de mesures parfaites et sa stabilité asymptotique locale en présence d'erreurs d'étalonnage.

2) *Homographie*: De nombreux travaux en asservissement visuel utilisent l'estimation d'une homographie, soit pour calculer les informations visuelles comme il est possible de le faire en asservissement visuel 2D 1/2 ou 2D étendu, soit

¹Cet article a été réalisé grâce à l'envoi de contributions en provenance d'Heudiasic, de l'Inria Sophia-Antipolis, d'I3S, du Lab, du Laas, du Lirmm, du Lisir, du LSIT et du LVR. Que leurs auteurs nous pardonnent les mauvais traitements que nous avons fait subir à leur prose !

pour le suivi visuel de texture plane, ou même les deux simultanément [38]. Il est bien connu que l'extraction de la pose partielle de la caméra à partir de l'homographie donne deux solutions possibles. Bien que de nombreuses applications aient pu être réalisées, comme par exemple le suivi automatique de véhicule [6], la double solution issue de la décomposition peut poser des problèmes, qui peuvent être contournés en utilisant la moyenne des deux solutions [66]. Les travaux présentés dans [7] montrent que la décomposition n'est même pas indispensable.

3) *Informations visuelles photométriques*: Pour limiter au maximum la phase de traitement d'image, et donc réduire le risque d'erreur dans le suivi ou la mise en correspondance des mesures utilisées pour construire les informations visuelles, il est possible d'utiliser directement l'intensité lumineuse d'une zone de l'image. Ainsi, dans [43], une loi de commande est proposée afin de maximiser le contraste ou l'éclairage d'un objet dans l'image. Cette commande peut s'appliquer aussi bien pour régler la pose de la source de lumière que celle de la caméra.

4) *Mécanismes parallèles*: L'analyse de la cinématique particulière des robots parallèles a montré que l'asservissement visuel 3D-pose d'un tel type de robot, c'est-à-dire utilisant comme informations visuelles la pose de l'organe terminal du robot par rapport à la caméra, est en fait une simple commande par retour d'état non-linéaire qui ne dépend aucunement de la mesure proprioceptive [18]. Une extension à la dynamique est en cours [47], basée notamment sur la mesure simultanée de la pose 3D et de la vitesse cartésienne de l'organe terminal du robot par caméra à exposition séquentielle [1].

Alternativement, la commande des robots parallèles peut se faire en observant les éléments cinématiques du robot, ce qui permet de mesurer la cinématique du robot (plutôt que de l'estimer par modèle) et de réduire ainsi le jeu de paramètres géométriques nécessaires à la commande. Cette approche a été validée expérimentalement sur la plateforme de Gough-Stewart [4] et sur la famille I4R/Par4 [19].

B. Nouveaux capteurs

1) *Asservissement visuel omnidirectionnel*: La vision omnidirectionnelle a connu un essor important ces dernières années au sein de la communauté de vision par ordinateur. Il est donc naturel que la communauté en asservissement visuel s'y soit également intéressée, notamment pour profiter du champ de vision panoramique qu'elle fournit, particulièrement intéressant pour la navigation d'un robot mobile.

Sur la base d'un modèle de projection sphérique unifiant les capteurs de vision omnidirectionnelle à centre de projection unique et les caméras classiques régies par une projection perspective, des asservissements visuels valables pour tous ces capteurs ont été proposés. L'image de droites est considérée dans [32] et une homographie dans [31], amenant alors à de bonnes propriétés de découplage. Ces résultats ont été validés avec un capteur omnidirectionnel sur un robot manipulateur à six degrés de liberté et sur un robot mobile. Dans ce dernier cas, les lois de commande ont été construites en considérant les

contraintes de non-holonomie [30]. La commande d'un robot parallèle (plateforme de Gough) par vision omnidirectionnelle a également été récemment réalisée [63].

Le modèle de projection sphérique présente également de bonnes propriétés pour déterminer des informations visuelles optimales. Par exemple, des informations visuelles caractérisant l'image d'une sphère, proportionnelles aux coordonnées du centre de la sphère, peuvent être obtenues assez aisément grâce à ce modèle [64]. Il en résulte une loi de commande dont le seul paramètre inconnu est le rayon de la sphère et il est possible d'assurer la stabilité asymptotique globale du système quelle que soit la valeur choisie pour ce rayon. Pour les capteurs catadioptriques disposant d'une zone morte, une variante aux informations initiales peut être choisie afin d'éviter autant que possible de traverser cette zone morte [65].

2) *Lumière structurée*: L'emploi de lumières structurées n'avait pas fait l'objet d'études depuis de nombreuses années. Elles simplifient pourtant sensiblement les traitements d'images et permettent d'appréhender des objets non structurés et non texturés. Dans le cas où la grille projetée est rigidement liée à l'objet d'intérêt, les techniques classiques peuvent s'appliquer directement. Par contre, si les sources lumineuses sont liées à la caméra, la phase de modélisation doit être revue entièrement. Une étude a été effectuée dans ce sens dans [49] pour déterminer le motif de lumière et les informations visuelles associées réalisant au mieux la liaison classique plan sur plan.

3) *Asservissement visuel échographique*: Le travail décrit dans [67] concerne la conception et la commande d'un système robotique permettant de guider un instrument à partir d'images échographiques ainsi que son application pour de la chirurgie intracardiaque à cœur battant. Les informations visuelles utilisées sont composées de l'intersection entre l'instrument et le plan échographique, dont il a fallu déterminer la matrice d'interaction. La difficulté particulière est que le modèle utilisé est corrompu par des incertitudes sur les paramètres estimés. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre, au niveau de l'analyse et de la synthèse, des méthodes avancées pour garantir la robustesse en boucle fermée : méthode indirecte de Lyapunov et adaptation en ligne des gains. Le système proposé a été validé par des expériences *in vitro* et *in vivo* sur animaux. Signalons que les techniques de commande prédictive peuvent être utilisées pour assurer que l'instrument reste visible dans le plan de coupe [56].

Une autre étude dans le domaine de l'utilisation d'images échographiques a porté sur l'utilisation de l'asservissement visuel pour étalonner les paramètres intrinsèques et extrinsèques d'une sonde embarquée [33]. Après étalonnage, il est en effet possible de superposer les différents plans de coupe pour obtenir une reconstruction de la zone observée par la sonde. L'asservissement visuel a été utilisé pour positionner la sonde à des configurations particulières par rapport à une mire d'étalonnage.

Par ailleurs, des travaux très novateurs sont actuellement en cours sur l'utilisation du speckle contenu dans les images

échographiques pour contrôler localement la pose de la sonde [34].

III. COMMANDE

A. Commande sans prise en compte de contraintes

De nombreux travaux sur le développement de nouvelles lois de commande ont également été réalisés. Pour celles utilisant en entrée des informations visuelles redondantes proches des mesures effectuées, telles des coordonnées de points, on peut tout d'abord signaler [16] qui permet de rejeter des informations visuelles aberrantes dues à des erreurs de traitement d'image. Le principe consiste à associer un poids à chaque information visuelle. Ce poids, reflétant la confiance en la mesure associée, peut être calculé automatiquement en utilisant les techniques statistiques robustes à base de M-estimateur.

Dans le même ordre d'idée, pour assurer la continuité de la loi de commande lorsque des informations visuelles disparaissent ou apparaissent (et sous hypothèse qu'un nombre suffisant reste visible), il est possible d'introduire une pondération sur chaque information visuelle, cette pondération étant alors une fonction décroissante de la distance de la primitive visuelle au centre de l'image [27].

Le problème majeur des lois de commande classiques utilisées en asservissement visuel 2D sur des informations visuelles redondantes de type point porte sur les trajectoires réalisées pour de grands déplacements à effectuer. En effet, ces lois de commande ne sont valables que localement. Il est montré dans [37] que des techniques de commande inspirées des méthodes d'optimisation ESM (Efficient Second-order Method) permettent de remédier en bonne partie à ce problème. En pratique, elles consistent à utiliser la moyenne des matrices d'interaction calculées pour la configuration courante et celle désirée.

B. Commande par LMI

Comme cela avait déjà été souligné en 2003, les techniques de commande utilisées en asservissement visuel ont continué à progresser et à se généraliser à des techniques non linéaires plus complexes, capables notamment de prendre en compte des contraintes au niveau de l'asservissement. Dans ce domaine, des avancées concernant l'analyse et la synthèse multicritères de lois de commande par la théorie de Lyapunov et l'optimisation convexe sous contraintes LMI (Inégalités Linéaires Matricielles) ont été obtenues. Ainsi, le problème d'asservissement visuel (3D ou 2D) sous contraintes (visibilité, saturation des actionneurs, contraintes 3D, etc.) peut être résolu de cette manière [20], [62] et formalisé comme la stabilisation d'un système non linéaire rationnel sous des contraintes rationnelles, ce qui permet de réduire le conservatisme habituel de ces approches [21].

C. Commande prédictive

Une autre approche pour prendre en compte des contraintes au niveau de l'asservissement visuel consiste à utiliser les techniques de commande prédictive non linéaire. Dans cette

approche, les objectifs sont exprimés sous la forme d'un problème d'optimisation non linéaire dont la résolution fournit une planification implicite et optimale de trajectoire sous contraintes. De plus, le modèle non linéaire complet du système est considéré. La linéarisation locale via la matrice d'interaction n'est donc plus nécessaire, ce qui permet d'améliorer le comportement du système. Différentes applications ont été réalisées sur des bras manipulateurs [55] et sur des robots mobiles, notamment pour la stabilisation en une image désirée [2], ainsi que pour du guidage sous échographie [56]. Dans tous les cas, l'étude de la stabilité reste un problème ouvert. Le temps de calcul pour résoudre le problème d'optimisation NL, qui doit être effectué à chaque itération de la loi de commande, est parfois aussi une limitation à l'utilisation de cette approche. Il est cependant montré dans [3] que l'utilisation de la propriété de platitude différentielle du système permet de diviser par deux le temps de calcul dans le cas d'un robot mobile.

La commande prédictive peut également être utilisée pour des tâches de poursuite d'un objet en mouvement. Ainsi, un modèle prédictif du mouvement du cœur a-t-il été utilisé dans [28] pour réduire l'erreur de suivi du péricarde en chirurgie à cœur battant. L'objectif de ces travaux vise à réaliser des interventions en laissant le cœur battre librement. Le robot est alors utilisé pour suivre de manière synchrone les mouvements du cœur dans le but d'annuler le déplacement relatif entre l'outil de chirurgie et la zone du péricarde à traiter. De cette manière, le chirurgien a l'impression d'opérer un cœur arrêté. Ces travaux ont été validés par des expériences réalisées sur animaux avec un système robotique contrôlé par asservissement visuel à 500 Hz.

D. Couplage vision/force

Il existe deux façons classiques pour réaliser le couplage vision/force : la méthode par impédance et la méthode dite hybride. Il a été montré dans [46] que la méthode par impédance peut présenter des minima locaux et que la méthode hybride requiert un modèle très précis de la tâche. Pour circonvenir ces difficultés, une nouvelle méthode dite hybride externe a été proposée. L'asservissement visuel y est placé à l'intérieur d'une commande en effort externe, de manière hiérarchique. Le couplage est ainsi fait dans l'espace capteur : la trajectoire de référence générée par asservissement visuel est modifiée par la commande en effort. Cette méthode a été appliquée pour l'exécution de tâches de robotique de service telles l'ouverture de porte et de tiroir [50].

IV. PLANIFICATION ET SÉQUENCÉMENT DE TÂCHES

La planification hors ligne de trajectoire est une approche connue pour pallier aux problèmes des commandes classiques lors de grands déplacements à réaliser et pour pouvoir considérer des contraintes. Dans ce domaine, deux algorithmes, basés sur les coordonnées 2D étendues et fournissant une solution analytique, ont été proposés récemment. Les trajectoires étant planifiées en coordonnées 2D étendues, elles peuvent être injectées à tout asservissement visuel chargé de

suivre ces trajectoires. La première méthode impose à un point image sélectionné de se déplacer en ligne droite, en faisant varier la distance entre caméra et objet pour assurer également la visibilité de tous les autres points images [58]. La seconde méthode cherche à déplacer en ligne droite le centre de la caméra, en admettant d'éventuels écarts locaux pour assurer la visibilité [57].

L'utilisation du formalisme de la redondance est une autre approche classique pour prendre en compte des contraintes. Dans cette approche, celles-ci sont assurées, autant que faire se peut, par les mouvements disponibles ne modifiant pas l'évolution de la tâche visuelle principale. Ceci s'avère être parfois trop contraignant et il est possible d'élargir sensiblement l'ensemble des mouvements permis en considérant tous ceux qui font diminuer la norme de la tâche principale, conservant ainsi sa stabilité [39].

Il n'empêche que des degrés de liberté doivent être disponibles pour pouvoir respecter les contraintes, ce qui n'est pas toujours possible. Il est alors nécessaire de modéliser et de séquencer plusieurs tâches qui seront activées ou désactivées en fonction des événements se produisant, et donc des contraintes à assurer. C'est ce principe qui a été utilisé dans [25] afin de faire naviguer un robot mobile tout en évitant des obstacles et des occultations éventuels. Dans certains cas cependant, il n'est pas possible d'éviter toute occultation tout en naviguant vers le but et en évitant simultanément les obstacles. C'est pourquoi ces travaux ont été améliorés afin de laisser les occultations se produire si cela est nécessaire au bon déroulement de la mission. Pour cela, plusieurs méthodes ont été proposées pour prédire la position des mesures visuelles lorsque celles-ci sont momentanément indisponibles [26].

Plutôt que d'imposer a priori le séquencement à effectuer, ce qui peut s'avérer problématique pour des applications complexes, il est possible de sélectionner automatiquement les tâches et contraintes à activer ou à désactiver au cours de la réalisation de la mission. On se ramène alors à un problème de gestion de pile de tâches [40]. Cette approche a été récemment appliquée sur un robot humanoïde afin de réaliser la saisie d'une balle en mouvement au cours de la marche tout en conservant l'équilibre et en évitant les butées du bras [41].

V. ROBOTS MOBILES

A. Fonctions transverses

Pour les robots non-holonomes, il est bien connu que la stabilisation de la pose complète du robot ne peut pas être résolue de manière générique à l'aide de commandes par retour d'état classiques. L'utilisation de retours d'état très non-linéaires pose alors des problèmes difficiles de robustesse, en particulier vis-à-vis d'erreurs d'estimation de la pose. Dans [5], le suivi d'une cible mobile omnidirectionnelle par un robot de type unicycle muni d'une caméra embarquée est traité, via l'approche de commande par fonctions transverses. Un modèle précis de la cible et des paramètres intrinsèques de la caméra permet une reconstruction fine de la pose, et conduit à de bonnes performances du schéma de commande. Le même

problème a été reconsidéré dans [44] sous l'angle de la robustesse des schémas de commande vis-à-vis d'erreurs de modèle de l'ensemble capteur/cible. Ce travail a montré qu'à partir d'un modèle très grossier, il est toujours possible de garantir de bonnes propriétés de bornitude de l'erreur de suivi, mais il montre aussi une dégradation des performances pour certaines trajectoires de référence, qui se traduit par l'apparition de mouvements parasites autour du point de fonctionnement. Au vu de ces résultats préliminaires, il apparaît que l'étude de l'asservissement visuel pour des systèmes très non-linéaires mérite d'être approfondie.

B. Navigation par localisation 3D

Des travaux très fructueux ont été réalisés ces dernières années dans le domaine de la navigation de robot mobile en milieu urbain. Dans [54], la trajectoire à suivre est donnée au robot suite à une phase d'apprentissage. Pendant cette phase d'apprentissage, la caméra embarquée enregistre une vidéo à partir de laquelle une carte de l'environnement est construite. Cette carte, obtenue par un algorithme de reconstruction 3D basé sur la mise en correspondance de points d'intérêt, est un modèle 3D de la scène observée constitué d'un nuage de points. Au cours de la navigation, les images prises par la caméra permettent de localiser le robot au voisinage de la trajectoire de référence. Cette localisation consiste à mettre en correspondance des points d'intérêt détectés sur l'image courante avec le modèle 3D de la scène, ce qui permet d'en déduire la pose de la caméra et donc du robot. La pose est ensuite utilisée pour commander le robot et faire en sorte qu'il suive de façon autonome le même parcours que durant la phase d'apprentissage ou un parcours légèrement différent.

C. Navigation par mémoire visuelle

Le même type d'application, reposant également sur une phase d'apprentissage, a été traité dans [52] et [8]. La différence principale porte sur le fait qu'une reconstruction globale de l'environnement n'est pas indispensable pour réaliser la navigation, mais que des reconstructions locales suffisent entre les différentes images clés représentant le chemin à parcourir. Une autre différence importante porte sur les lois de commande utilisées. Dans [52], on ne cherche pas à suivre précisément une trajectoire planifiée, mais à progresser le long du couloir de navigation. En termes d'asservissement visuel, cela revient à ce que les informations visuelles restent au sein d'un intervalle, au lieu qu'elles atteignent des valeurs spécifiques. L'application de cette approche pour la navigation d'un Cycab est décrite dans [23] et pour un robot mobile d'intérieur dans [8]. Initiée avec une caméra conventionnelle, cette approche a été récemment généralisée à toutes les caméras à point central unique [17].

VI. ROBOTS VOLANTS

La commande par asservissement visuel d'engins volants a connu elle aussi un essor très important ces dernières années. Les premiers travaux que l'on peut signaler portent sur les dirigeables pour lesquels des asservissements visuels ont été

développés pour la stabilisation en un point fixe, l'atterrissage automatique, ainsi que le suivi de structures linéiques (routes, rivières, lignes électriques,...) [61], [53].

Pour la commande d'hélicoptères, autre type de systèmes sous-actionnés, les premières contributions portent logiquement sur des asservissements visuels 3D utilisant la vision pour estimer la pose du drone [48]. Coté asservissement visuel 2D, des lois de commande cinématiques ont tout d'abord été proposées [9]. Elles reposent sur la mesure du centre de gravité d'une cible après projection sphérique, ce qui permet d'avoir des informations visuelles disposant de la propriété de passivité structurelle. Une commande dynamique a également été récemment proposée [29]. Dans ce type de loi de commande, la mesure de la vitesse de translation de la caméra est supposée connue. Il est démontré dans [35] que, si on suppose que la cible observée est plane, alors, en combinant la vitesse d'un point dans l'image et les mesures fournies par les gyromètres, il est possible d'estimer la vitesse de la caméra à un facteur d'échelle près. Une nouvelle stratégie de contrôle adaptatif a ensuite été développée et expérimentée sur un drone. Le principal inconvénient de cette première méthode réside dans la non observabilité de certains paramètres rendant obligatoire une mesure de la vitesse d'un point dans l'image, très dégradée en pratique avec les capteurs utilisés. Une seconde approche a alors été explorée [36] pour se ramener à un système entièrement observable à partir des simples mesures des amers visuels. Pour cela, la taille de la cible observée par la caméra a été utilisée.

Par ailleurs, la relation entre le sous actionnement et l'analyse des conditions de visibilité d'une cible est un problème très intéressant pour toute réalisation pratique d'un asservissement visuel sur un drone. Pour ce problème, une première approche de contrôle, basée sur les techniques de commande par petits gains et utilisant l'homographie comme information visuelle, a été étudiée dans [45].

Enfin, des études sont également en cours pour réaliser l'atterrissage automatique d'avions. La stratégie proposée dans [10] consiste à planifier une trajectoire compatible avec la dynamique de l'avion permettant de rejoindre la trajectoire nominale d'atterrissage, puis à suivre cette trajectoire en utilisant des lois de commande découplées pour les contrôles latéral et longitudinal en utilisant des informations visuelles extraites de la piste d'atterrissage.

VII. AUTRES APPLICATIONS

Des progrès importants ont également été réalisés dans le domaine du traitement d'images pour suivre des objets de forme ou de texture complexes. Outre le suivi de points d'intérêt déjà évoqué, on peut notamment citer le suivi de surface plane texturée [38] à partir duquel il est possible d'estimer la pose du robot et la structure de la scène. On peut alors concevoir des approches d'asservissement visuel qui ne nécessitent pas une image de référence pour spécifier une position à atteindre [60]. Des techniques de reconstruction locale peuvent également être utilisées pour se positionner par rapport à des objets non polyédriques [15]. Enfin, des

techniques de suivi 3D combinant des mesures de type contour et texture ont été développées, permettant d'appréhender des objets 3D complexes [51]. Des applications d'envergure, autres que celles déjà citées, sont donc à présent considérées, telles la manipulation d'objets en environnement spatial [22], l'aide aux personnes handicapées pour la détection et la saisie d'objets [24], ou la reconstruction 3D d'objets rigides naturels dans les fonds marins par des techniques de perception active [11]. Dans un proche avenir, les techniques d'asservissement visuel seront également utilisées pour des applications de micro-manipulation et de micro-assemblage.

REFERENCES

- [1] O. Ait-Aider, N. Andreff, J.-M. Lavest, P. Martinet, "Simultaneous Object Pose and Velocity Computation Using a Single View from a Rolling Shutter Camera", *ECCV'06*, pp. 56-68, Graz, mai 2006.
- [2] G. Allibert, E. Courtial, Y. Touré, "Visual predictive control", *IFAC Workshop on Nonlinear Predictive Control for Fast Systems*, Grenoble, octobre 2006.
- [3] G. Allibert, E. Courtial, Y. Touré, "A Flat Model Predictive Controller for Trajectory Tracking in Image Based Visual Servoing", *7th IFAC Symp. on Nonlinear Control Systems*, Pretoria, août 2007.
- [4] N. Andreff, T. Dallej, P. Martinet, "Image-based Visual Servoing of a Gough-Stewart Parallel Manipulator using Leg Observations", *Int. Journal of Robotics Research*, 26(7) :677-687, juillet 2007.
- [5] G. Artus, P. Morin, C. Samson. "Tracking of an omnidirectional target with a nonholonomic mobile robot", *ICAR*, pages 1468-1473, 2003.
- [6] S. Benhimane, E. Malis, P. Rives, J. R. Azinheira, "Vision-based control for car platooning using homography decomposition", *ICRA*, pp. 2173-2178, Barcelone, avril 2005.
- [7] S. Benhimane, E. Malis, "Homography-based 2D visual tracking and servoing", *Int. Journal of Robotic Research*, 26(7) :661-677, juillet 2007.
- [8] G. Blanc, Y. Mezouar, P. Martinet. Indoor navigation of a wheeled mobile robot along visual routes. *ICRA*, Barcelona, avril 2005.
- [9] O. Bourquardez, R. Mahony, T. Hamel, F. Chaumette, "Stability and performance of image based visual servo control using first order spherical image moments", *IROS*, Pékin, octobre 2006.
- [10] O. Bourquardez, F. Chaumette, "Visual Servoing of an Airplane for Auto-Landing", *IROS*, San Diego, octobre 2007.
- [11] V. Brandou, E. Malis, P. Rives, A.-G. Allai, M. Perrier, "Active stereovision using invariant visual servoing", *IROS*, pp. 2326-2331, Pékin, octobre 2006.
- [12] F. Chaumette, "Visual Servoing", In *Robot manipulators : Modeling, Performance Analysis and Control*, E. Dombre, W. Khalil (eds.), Chap. 6, pp. 279-336, ISTE, 2007.
- [13] F. Chaumette, S. Hutchinson, "Visual Servo Control, Part I : Basic Approaches", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(4) :82-90, décembre 2006.
- [14] F. Chaumette, S. Hutchinson, "Visual Servo Control, Part II : Advanced Approaches", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1) :109-118, mars 2007.
- [15] C. Collewet, F. Chaumette, "Visual Servoing on Non-Planar Objects From Active Vision", *ICRA*, Rome, avril 2007.
- [16] A.I. Comport, E. Marchand, F. Chaumette, "Statistically robust 2D visual servoing", *IEEE Trans. on Robotics*, 22(2) :415-421, avril 2006.
- [17] J. Courbon, G. Blanc, Y. Mezouar, P. Martinet. "Navigation of a non-holonomic mobile robot with a memory of omnidirectional images". *Workshop on Planning, Perception and Navigation for intelligent vehicles*, *ICRA*, pages 51-56, Rome, Italie, avril 2007.
- [18] T. Dallej, N. Andreff, P. Martinet, "3D pose visual servoing is the canonical choice for the Cartesian control of parallel robots", *IROS*, Pékin, octobre 2006.
- [19] T. Dallej, N. Andreff, P. Martinet, "Image-Based Visual Servoing of the I4R parallel robot without Proprioceptive Sensors", *ICRA*, Rome, avril 2007.
- [20] P. Danès, D. Bellot. "Towards an LMI approach to multicriteria visual servoing in robotics", *Eur. Journal of Control*, 12(1) :86-110, 2006.

- [21] P. Danès, D. F. Coutinho, "Multicriteria analysis of visual servos via biquadratic Lyapunov functions", *5th IFAC Symp. on Robust Control Design*, Toulouse, juillet 2006.
- [22] F. Dionnet, E. Marchand. "Robust stereo tracking for space robotic applications", *IROS*, San Diego, octobre 2007
- [23] A. Diosi, A. Remazeilles, S. Segvic, F. Chaumette, "Outdoor Visual Path Following Experiments", *IROS*, San Diego, octobre 2007.
- [24] C. Dune, E. Marchand, C. Leroux. "One Click Focus with Eye-in-hand/Eye-to-hand Cooperation", *ICRA*, pp. 2471-2476, Rome, avril 2007.
- [25] D. Folio, V. Cadenat, "A redundancy-based scheme to perform safe vision-based tasks amidst obstacles", *Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, décembre 2006.
- [26] D. Folio, V. Cadenat, "A new controller to perform safe vision-based navigation tasks amidst possibly occluding obstacles", *ECC*, Kos, juillet 2007.
- [27] N. Garcia-Aracil, E. Malis, R. Aracil-Santonja, C. Perez-Vidal. "Continuous visual servoing despite the changes of visibility in image features", *IEEE Trans. on Robotics*, 21(6) :1214-1220, décembre 2005.
- [28] R. Ginhoux, J. Gangloff, M. de Mathelin, L. Soler, M.M. Arenas Sanchez, J. Marescaux. "Active Filtering of Physiological Motion in Robotized Surgery Using Predictive Control", *IEEE Trans. on Robotics*, 21(1) :67-79, février 2005.
- [29] N. Guénard, T. Hamel, R. Mahony, "A Practical Visual Servo Control for a Unmanned Aerial Vehicle", *ICRA*, pp. 1342-1348, Rome, avril 2007.
- [30] H. Hadj Abdelkader, Y. Mezouar, N. Andreff, P. Martinet, "Image-based control of mobile robot with central catadioptric cameras", *ICRA*, Barcelone, avril 2005.
- [31] H. Hadj Abdelkader, Y. Mezouar, N. Andreff, P. Martinet, "Decoupled homography based visual servoing with omnidirectional camera", *IROS*, Pékin, octobre 2006.
- [32] H. Hadj Abdelkader, Y. Mezouar, N. Andreff, P. Martinet, "Omnidirectional visual servoing from polar lines", *ICRA*, Orlando, mai 2006.
- [33] A. Krupa, "Automatic Calibration of a Robotized 3D Ultrasound Imaging System by Visual Servoing", *ICRA*, pp. 4136-4141, Orlando, mai 2006.
- [34] A. Krupa, G. Fichtinger, G. Hager, "Full Motion Tracking in Ultrasound Using Image Speckle Information and Visual Servoing", *ICRA*, Rome, avril 2007.
- [35] F. Le Bras, R. Mahony, T. Hamel, P. Binetti, "Adaptive filtering and image based visual servo control of actuated fan flying robot", *CDC*, San-Diego, décembre 2006.
- [36] F. Le Bras, T. Hamel, R. Mahony, "Nonlinear Observer-Based Visual Control of a VTOL UAV", *ECC*, Kos, juillet 2007.
- [37] E. Malis, "Improving vision-based control using efficient second-order minimization techniques", *ICRA*, pp. 1843-1848, New Orleans, avril 2004.
- [38] E. Malis, S. Benhimane. A unified approach to visual tracking and servoing. *Robotics and Autonomous Systems*, 52(1) :39-52, July 2005.
- [39] N. Mansard, F. Chaumette, "Directional redundancy : a new approach of the redundancy formalism", *CDC/ECC*, pp. 5366-5371, Séville, décembre 2005.
- [40] N. Mansard, F. Chaumette, "Task sequencing for sensor-based control", *IEEE Trans. on Robotics*, 23(1) :60-72, février 2007.
- [41] N. Mansard, O. Stasse, F. Chaumette, K. Yokoi, "Visually-Guided Grasping while Walking on a Humanoid Robot", *ICRA*, Rome, avril 2007.
- [42] E. Marchand, F. Spindler, F. Chaumette, "ViSP for visual servoing : a generic software platform with a wide class of robot control skills", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(4) :40-52, décembre 2005.
- [43] E. Marchand, "Control Camera and Light Source Positions using Image Gradient Information", *ICRA*, pp. 417-422, Rome, avril 2007.
- [44] M. Maya-Mendez, P. Morin, C. Samson, "Control of a nonholonomic mobile robot via sensor-based target tracking and pose estimation", *IROS*, pp. 5612-5618, Pékin, octobre 2006.
- [45] N. Metni, T. Hamel, "Visual Tracking Control of Aerial Robotic Systems with Adaptive Depth Estimation". *Int. Journal of Control, Automation, and Systems*. 5(1) :51-60, 2007.
- [46] Y. Mezouar, M. Prats, P. Martinet, "External Hybrid Vision/Force Control", *ICAR*, Jeju, août 2007.
- [47] F. Paccot, N. Andreff, P. Martinet, W. Khalil, "Vision-based computed torque control of parallel robots", *32nd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*, Paris, novembre 2006.
- [48] A. Palomino, P. Castillo, I. Fantoni, R. Lozano, C. Pégard, "Control strategy using vision for the stabilization of an experimental PVTOL aircraft setup", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 13(5) :847-850, septembre 2005
- [49] J. Pagès, C. Collewet, F. Chaumette, J. Salvi, "Optimizing plane-to-plane positioning tasks by image-based visual servoing and structured light", *IEEE Trans. on Robotics*, 22(5) :1000-1010, octobre 2006.
- [50] M. Prats, P. Martinet, A. Del Pobil, S. Lee, "Vision/Force Coupling in Task-Oriented Grasping and Manipulation", *IROS*, San Diego, octobre 2007.
- [51] M. Pressigout, E. Marchand, "Real-Time Hybrid Tracking using Edge and Texture Information", *Int. Journal of Robotics Research*, 26(7) :689-713, juillet 2007.
- [52] A. Remazeilles, F. Chaumette, "Image-based robot navigation from an image memory", *Robotics and Autonomous Systems*, 55(4) :345-356, avril 2007.
- [53] P. Rives, J.R. Azinheira, "Linear structures following by an airship using vanishing point and horizon line in a visual servoing scheme", *ICRA*, New Orleans, mai 2004.
- [54] E. Royer, J. Bom, M. Dhome, B. Thuilot, M. Lhuillier, F. Marmoiton, "Outdoor autonomous navigation using monocular vision", *IROS*, pp. 3395-3400, Edmonton, août 2005.
- [55] M. Sauvée, P. Poignet, E. Dombre, E. Courtial, "Image based servoing through nonlinear model predictive control", *CDC*, pp. 1776-1781, San Diego, 2006.
- [56] M. Sauvée. *Contribution à l'aide aux gestes pour la chirurgie cardiaque à cœur battant. Guidage échographique par asservissement prédictif linéaire*. Thèse de l'Université de Montpellier 2, 2006.
- [57] F. Schramm, F. Geffard, G. Morel, A. Micaelli, "Calibration free image point path planning simultaneously ensuring visibility and controlling camera path", *ICRA*, pp. 2074- 2079, Rome, avril 2007.
- [58] F. Schramm, G. Morel, "Ensuring visibility in calibration-free path planning for image-based visual servoing", *IEEE Trans. on Robotics*, 22(4) :848-854, 2006.
- [59] F. Schramm, G. Morel, A. Micaelli, "Extended 2D visual servoing", *ICRA*, pp. 267-273, New Orleans, avril 2005.
- [60] G. Silveira, E. Malis, P. Rives, "Visual servoing over unknown, unstructured, large-scale scenes", *ICRA*, pp. 4142-4147, Orlando, mai 2006.
- [61] G.F. Silveira, P. Rives. "Reference image computation from a cartesian specifications for model-free visual servoing", *Intelligent and Autonomous Systems*, Lisbonne, juillet 2004.
- [62] P. Souères, S. Tarbouriech, S. Bo Gao, "A robust vision-based controller for mobile robots navigation : application to the task sequencing problem", *IROS*, pp. 2191-2196, Edmonton, août 2005.
- [63] O. Tahri, Y. Mezouar, N. Andreff, P. Martinet, "Omnidirectional visual-servo of a Gough-Stewart platform", *IROS*, San Diego, novembre 2007.
- [64] R. Tatsambon Fomena, F. Chaumette, "Visual servoing from spheres using a spherical projection model", *ICRA*, Rome, avril 2007.
- [65] R. Tatsambon Fomena, F. Chaumette, "Visual servoing from spheres with paracatadioptric cameras", *ICAR*, Jeju, août 2007.
- [66] M. Vargas, E. Malis, "Visual servoing based on an analytical homography decomposition", *CDC/ECC*, pp. 5379-5384, Séville, décembre 2005.
- [67] M.-A. Vitrani, G. Morel, H. Mitterhofer, N. Bonnet, "Robust ultrasound-based visual servoing for beating heart intracardiac surgery", *ICRA*, Rome, avril 2007.