

Projet Robotvis

Robotique et Vision par Ordinateur

Sophia Antipolis

THÈME 3B



*R*apport
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	5
3	Logiciels	5
3.1	Robotvis++	5
3.1.1	Librairies	5
4	Résultats nouveaux	6
4.1	Géométrie d'un système de caméras et applications	6
4.1.1	Autocalibration	6
4.1.2	Etude des cas particuliers de mouvement et de projection	7
4.1.3	Localisation tridimensionnelle d'une mire planaire avec un zoom	9
4.1.4	Utilisation de contraintes algébriques dans les méthodes de calibration	10
4.1.5	Suivi de caméra	11
4.1.6	Paramétrisation et estimation du tenseur trifocal	12
4.2	Analyse de séquences d'images spatiales(=stéréo) ou temporelles	13
4.2.1	EDP et ensembles de niveau pour la détection et le suivi d'objets en mouvements	13
4.2.2	EDP et ensembles de niveau pour la segmentation d'images	13
4.2.3	Reconstruction stéréoscopique par la méthode des ensembles de niveaux.	15
4.2.4	Corrélation stéréoscopique à base de filtres récursifs, appliquée à l'estimation de la matrice fondamentale	16
4.2.5	Reconstruction automatique de bâtiments à partir d'imagerie aérienne	19
4.2.6	Synthèse de films réalistes à partir de photographies	20
4.2.7	Suivi d'objets articulés dans des séquences d'images	21
4.2.8	EDP et Restauration d'images couleur	22
4.2.9	Restauration d'images	24
4.3	Imagerie cérébrale	25
4.3.1	Mise en correspondance de données fonctionnelles et anatomiques en IRM	25
4.3.2	Déploiement cortical par ensembles de niveaux	26
4.3.3	Segmentation du cortex cérébral humain	27
4.3.4	Problèmes directs et inverse en EEG et MEG: approche état adjoint	27
4.3.5	Problèmes direct et inverse en EEG et MEG: méthode "one-shot"	30
4.3.6	"Snakes" géodésiques de codimension 2: application à la segmentation de vaisseaux sanguins	31
4.3.7	Utilisation de probabilité a priori de forme en segmentation d'images	33
5	Actions régionales, nationales et internationales	36
5.1	Action nationale	36
5.2	Actions financées par la Commission Européenne	37
5.2.1	Projet Cumuli	37
5.2.2	Projet Improofs	37

5.3	Réseaux et groupes de travail internationaux	38
5.3.1	Réseau TMR VIRGO	38
5.4	Relations bilatérales internationales	38
5.4.1	Europe	38
5.4.2	Chine	38
5.4.3	Divers	38
6	Diffusion de résultats	38
6.1	Animation de la communauté scientifique	38
6.2	Enseignement universitaire	39
6.2.1	D.E.A. Aravis	39
6.2.2	D.E.A. Informatique	39
6.2.3	D.E.A Algorithmique	39
6.2.4	Massachusetts Institute of Technology	39
6.3	Autres enseignements	39
6.3.1	Institut National des Télécommunications- Evry	39
6.3.2	EERIE	39
6.3.3	Computer Vision Course broadcast by satellite	40
6.3.4	Divers	40
6.3.5	ISIA	40
6.3.6	École des Mines	40
6.3.7	ESSI	40
6.3.8	ESINSA	40
6.3.9	Université de Montevideo	40
6.4	Participation à des colloques, séminaires, invitations	40
7	Bibliographie	41

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Olivier Faugeras [DR]

Responsable permanent

Rachid Deriche [DR]

Assistante de projet

Marie-Cécile Lafont [TR]

Personnel Inria

Robert Fournier [IR, mi-temps Robotvis/Semir à partir du mois de mars 1998]

Théodore Papadopoulo [CR]

Thierry Viéville [CR]

Ingénieur expert

Bernard Gai-Chéca

Chercheurs post-doctorants

Manolis Lourakis [Post-doc européen TMR/VIRGO à partir du 1er février 1999, encadrement scientifique par R. Deriche]

Imad Zoghلامي [Post-doc industriel REALVIZ, encadrement scientifique par O. Faugeras jusqu'au 30 septembre 1999]

Sylvain Bougnoux [Post-doc industriel à partir du 15 août 1999]

Chercheurs doctorants

Frédéric Abad [Bourse PACA/ADER, université de Nice-Sophia Antipolis]

Stéphane Abello [Bourse MESR, université de Paris VII depuis le 1er octobre]

Sylvain Bougnoux [action ATRIA, jusqu'au 15 mai 1999, bourse INRIA du 15 mai au 15 août 1999]

Jacques Bride [Bourse CIFRE, entreprise REALVIZ, université de Nice-Sophia Antipolis]

Quentin Delamarre [Bourse MESR, université de Nice-Sophia Antipolis, jusqu'au 30 septembre 1999, bourse INRIA à partir du 1er Octobre 1999]

François Gaspard [Bourse cofinancée INRIA/RégionPACA]

Cyrille Gauclin [Bourse INRIA]

José Gomes [Bourse AMX, université de Nice-Sophia Antipolis]

Gerardo Hermosillo [Bourse SFERE/CONACYT, université de Nice-Sophia Antipolis]

Diane Lingrand [1/2 ATER jusqu'au 31 août 1999, ATER à partir de septembre, université de Nice-Sophia Antipolis,]

Nikos Paragios [Bourse TMR réseau VIRGO jusqu'en novembre 1999]

David Tschumperlé [Bourse MESR, université de Nice-Sophia Antipolis depuis le 1er octobre]

Christophe Vestri [Bourse CIFRE, entreprise ISTAR, université de Nice-Sophia Antipolis]

Collaborateurs extérieurs

Frédéric Devernay

Michel Barlaud

Professeurs invités

Peter Meer [Rutgers University, du mars 1999 au mai 1999]

Quang-Tuan Luong [SRI, du 16 novembre 1999 au 15 décembre 1999]

Stagiaires

Christophe Chefd'hôtel [Stage de DEA Mathématiques et Intelligence Artificielle, ENS-Cachan du 4 mars 1999 au 30 juin 1999]

Alexandre Negri [Stage de DEA sur l'action LARA encadrement Robotvis, ESSI du 1 mars 1999 au 30 septembre 1999]

Mohammed Chouchane [Stage de DEA ARAVIS, ESSI du 1 mars 1999 au 30 septembre 1999]

David Tschumperlé [Stage de DEA ARAVIS, ESSI du 1 mars 1999 au 30 septembre 1999]

Eric Vecchie [Stage de DEA ARAVIS, Moitié Robotvis/Chir, ESSI du 1 mars 1999 au 30 septembre 1999]

Stéphane Abello [Stage de DEA Algorithmique, université Paris VII Denis Diderot, du 1 mars 1999 au 30 septembre 1999]

Guillaume Petitjean [Stage de DEA TELECOM PARIS 1 juillet 1999 au 31 juillet 1999 et du 1 septembre au 24 décembre 1999]

Hassan Baraa [ENSIAS, Maroc, du 1 février 1999 au 31 mai 1999]

Christophe Prévot [Stage 2ème année ESSI, 1 juillet 1999 au 15 septembre 1999]

Raquel Romano [MIT, 16 mai 1999 au 15 juin 1999]

Jérôme Dufon [ESSI, du 15 novembre 1999 au 15 avril 2000, 4 demi-journées par semaine]

Fabien Lydoire [ESSI, du 15 novembre 1999 au 15 avril 2000, 4 demi-journées par semaine]

2 Présentation et objectifs généraux

Les objectifs scientifiques et technologiques du Projet sont de trois types.

- élaborer des théories de la perception visuelle par ordinateur et plus particulièrement de la perception tridimensionnelle dynamique,
- démontrer leur intérêt en les appliquant à des problèmes concrets,
- les confronter à celles de la perception humaine que permettent d’élaborer les nouvelles méthodes d’imagerie cérébrale et de mesure du fonctionnement du cerveau.

Nous accordons une importance centrale à la formalisation et tout particulièrement à la formalisation mathématique en ayant cependant toujours recours à l’expérimentation, seule façon, pensons-nous, de valider une théorie. De ce point de vue, il apparaît nettement deux grands axes théoriques qui guident notre approche. Le premier est l’utilisation de méthodes algébriques et géométriques pour l’étude des systèmes multi-caméras (voir les rapports des années précédentes). Le second axe est l’utilisation de méthodes d’analyse, principalement issues de la théorie des équations aux dérivées partielles, pour l’étude des problèmes plus spécifiques de traitement et d’analyse d’images (amélioration, restauration, contours, stéréo, mouvement). Là encore, il s’agit d’une orientation durable que nous souhaitons renforcer. Nous avons montré récemment que bon nombre de ces méthodes étaient applicables à des problèmes apparemment très différents de mesure de l’activité cérébrale, voir la section 4.3. C’est une orientation nouvelle pour notre projet, orientation que nous souhaitons poursuivre et renforcer.

Nous avons aussi développé dans le passé un assez grand nombre de collaborations avec des industriels, avec lesquels nous avons travaillé surtout dans le cadre de projets européens et vers lesquels nous avons transféré beaucoup de notre savoir et de nos algorithmes. Nous continuons à rechercher de telles collaborations, mais plutôt dans les domaines de l’imagerie cérébrale, de la mesure de l’activité cérébrale ou des neurosciences.

Dans ce contexte, nos efforts ont porté plus spécialement sur les points suivants, détaillés en Sections 4.1, 4.2 et 4.3 :

- géométrie d’un système de caméras et applications,
- traitement des séquences spatiales et temporelles,
- imagerie cérébrale.

3 Logiciels

3.1 Robotvis++

3.1.1 Bibliothèques

Participants : Jacques Bride, Cyrille Gauclin, José Gomes, Gerardo Hermosillo, Théodore Papadopoulo.

Un gros effort a été mené pour organiser le logiciel du projet sous forme de bibliothèques C++ utilisables par tous. Ces bibliothèques sont en cours d’évolution mais parmi les fonctionnalités

d'ores et déjà présentes, on trouve :

- Utilitaires variés : primitives géométriques, opérations de base sur les images, entrées-sorties, méthodes d'optimisation, ...
- Évolution de surfaces par les méthodes d'ensembles de niveaux : cette implémentation est basée sur des tableaux creux permettant de limiter l'explosion mémoire relative à l'augmentation de la dimension.
- Calcul de la géométrie d'un système de caméras à partir de différents types de primitives.

4 Résultats nouveaux

4.1 Géométrie d'un système de caméras et applications

Mots clés : géométrie projective, géométrie affine, géométrie euclidienne, étalonnage de caméra, stéréoscopie multivue, polynôme, variété algébrique, ensemble caractéristique, algèbre double et relations de Plücker.

4.1.1 Autocalibration

Participants : Rachid Deriche, Manolis Lourakis.

Mots clés : auto-calibration, équations de Kruppa, SVD, propagation d'erreurs, reconstruction et mesures 3D.

Cette contribution traite du problème de l'auto-calibration d'une caméra à partir d'un ensemble de points appariés entre différentes images. Une méthode basée sur les équations de Kruppa, bien connues dans le cadre de cette application, a été développée. Nous avons fait usage de la décomposition en valeurs singulières de la matrice fondamentale pour dériver de manière purement algébrique des équations de Kruppa simplifiées. Ces équations s'expriment simplement en fonction des vecteurs lignes et colonnes des matrices associées à la décomposition en valeurs singulières de la matrice fondamentale, ainsi que des éléments non nuls de la matrice diagonale associée. Ceci nous a permis en particulier de résoudre le problème du choix des deux équations de Kruppa à utiliser parmi l'ensemble plus grand des équations dérivées par la méthode classique. Dans cette méthode, on ne fait nullement usage de l'interprétation géométrique à base de la conique absolue, ni de celle liée au plan à l'infini, et on n'utilise pas explicitement les épipoles, dont l'estimation pratique est connue pour être instable. Enfin, afin de réduire l'influence du bruit et de la connaissance incertaine de la matrice fondamentale, nous avons développé cette approche tout en propageant la matrice de covariance associée à la matrice fondamentale jusqu'aux nouvelles équations de Kruppa. Chaque équation obtenue se voit ainsi attribuée une incertitude, qui est ensuite utilisée pour pondérer les différentes équations lors de la procédure d'optimisation permettant de remonter aux paramètres intrinsèques de la caméra lors de la phase d'autocalibration. Cette méthode a été mise en œuvre pour retrouver les paramètres intrinsèques de différentes caméras à partir de données synthétiques bruitées et de plusieurs images réelles. Plusieurs tests de comparaisons avec les approches plus classiques,

et notamment celles développées au préalable au sein de l'équipe, montrent clairement l'apport de cette nouvelle approche, et en particulier toute l'importance de la prise en compte de l'incertitude dans ce cas applicatif. La figure 1 ainsi que le tableau 1 illustrent quelques exemples de résultats obtenus par cette approche et publiés dans [43].

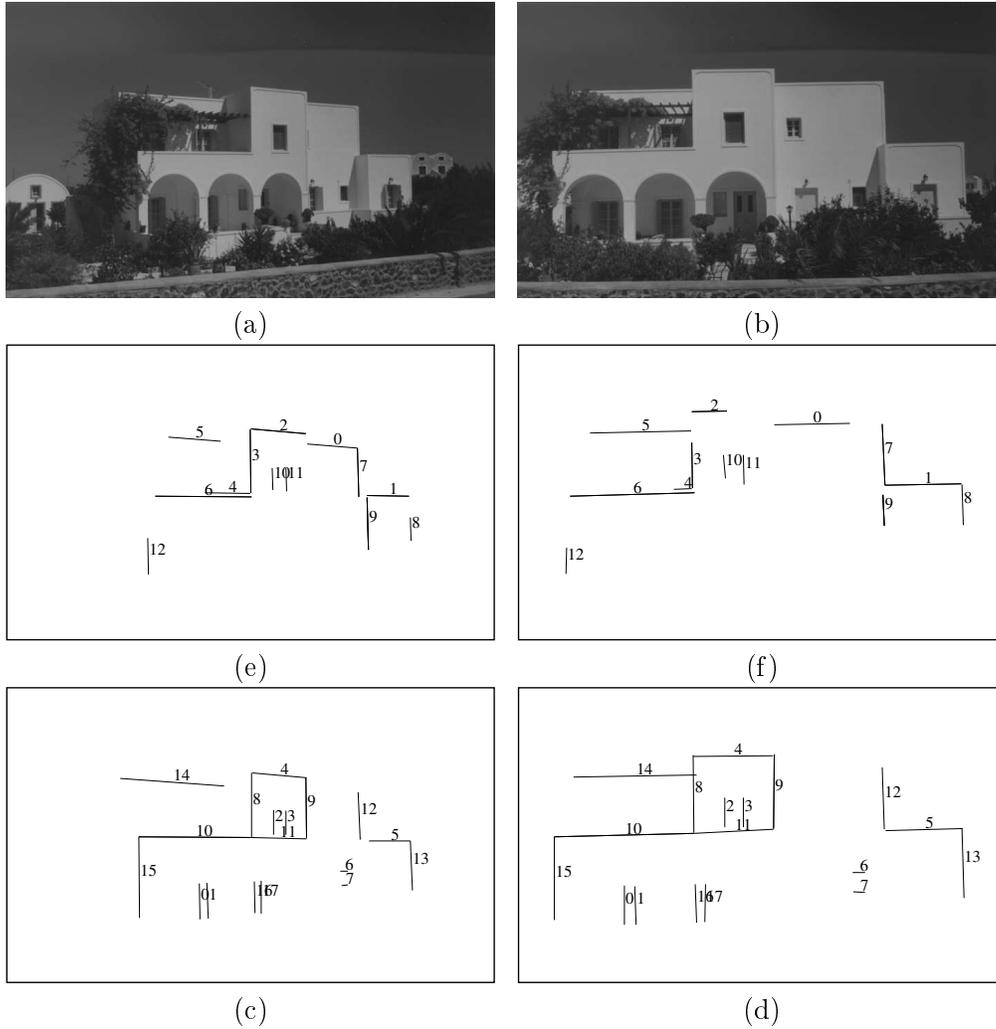


FIG. 1 – Images et Segments de droites : (a)-(b) Images originales, (c)-(d) Segments utilisés pour mesurer les angles 3D, (e)-(f) Segments utilisés pour la mesure des rapports de longueur 3D.

4.1.2 Etude des cas particuliers de mouvement et de projection

Participants : Diane Lingrand, Thierry Viéville.

Mots clés : homographies, singularités, cas particuliers, auto-calibration.

Angle segments	Segments de 1 (a)-(b)			Segments de 1 (c)-(d)		
	Vrai angle (deg)	Estimé cos	Estimé angle (deg)	Droite Segments	Vrai Rap. de long.	Estimé Rap. de long.
0 - 1	0	0.991	7.43	0 - 1	1.0	0.935
1 - 2	0	0.995	5.39	2 - 3	1.0	1.111
2 - 3	90	0.018	88.92	4 - 5	1.0	0.866
3 - 4	90	0.002	89.82	6 - 7	1.0	0.994
5 - 6	0	0.999	2.10	8 - 9	1.0	1.406
7 - 8	0	0.999	1.15	10 - 11	2.0	2.067
7 - 9	0	0.999	0.90	12 - 13	1.0	0.950
10 - 11	0	0.993	6.46	10 - 14	1.0	1.046
9 - 12	0	0.999	1.49	8 - 15	1.0	0.875
6 - 9	90	0.019	88.87	16 - 17	1.0	1.025

TAB. 1 – *Comparaison entre vérité terrain et grandeurs estimées pour la mesure des angles (gauche) et des rapports de longueur (droite).*

Cette étude s'insère dans un programme de travail relatif à l'analyse des propriétés géométriques et cinématiques des scènes, des modèles de caméra et des mouvements au sein de séquences monoculaires non calibrées, dans le but d'obtenir le plus d'informations possibles sur l'auto-calibration, le mouvement et la structure de la scène (objets géométriques, relations, structure 3D).

Le nombre de cas particuliers pour ces modèles étant très élevé, nous avons étudié cette année les formes particulières des matrices fondamentales et matrices homographiques. Dans un premier temps, nous avons déterminé deux ensembles de cas particuliers : ceux pour lesquels il existe une relation fondamentale entre les projetés des deux images et ceux pour lesquels la relation est homographique. Le résultat était bien connu dans le cas de la projection perspective, mais des résultats équivalents ont été obtenus dans les cas des projections para-perspective et orthographique.

Les cas particuliers générés sont au nombre de $3 \cdot 10^8$, que l'on peut ramener à $3 \cdot 10^6$ en éliminant des redondances évidentes, la complexité du problème ne permettant pas d'éliminer tous les cas redondants. Cependant, on a recherché les matrices fondamentales ou homographiques, selon les cas, de même forme, cela, en utilisant des règles simples et rapidement exécutables. On a ainsi obtenu environ 200 formes différentes de matrices fondamentales et 200 formes de matrices homographiques, ce qui constitue une excellente partition des cas particuliers. On a ensuite montré expérimentalement qu'entre plusieurs modèles valides, c'est celui comportant le moins de paramètres qui fournit en pratique la meilleure estimée des paramètres homographiques (voir également figure 2).

Il reste maintenant à déterminer la famille de cas correspondant à chaque forme particulière afin de disposer d'un arbre efficace de parcours des cas particuliers. Ce travail est en cours de réalisation.



FIG. 2 – Scène pour laquelle la caméra a effectué un mouvement approximatif de rotation autour de l'axe optique et translation. Le module développé a permis de retrouver automatiquement la forme de matrice homographique générée par un tel cas particulier.

4.1.3 Localisation tridimensionnelle d'une mire planaire avec un zoom

Participants : François Gaspard, Thierry Viéville.

Mots clés : zoom, minimisation non linéaire, auto-calibration, homographies.

Suite à l'analyse réalisée l'année dernière sur l'application du zoom à l'analyse visuelle, en particulier dans le domaine des transports, nous avons développé un système permettant, à partir d'une caméra montée sur une tourelle et disposant d'un zoom, de localiser un plan dans l'espace.

L'utilisation de cette tourelle à deux degrés de liberté en rotation permet, d'une part, d'auto-calibrer le système en effectuant des rotations d'axe fixe et d'angle connu et, d'autre part, de recentrer une région d'intérêt dans l'image avant d'utiliser le zoom pour en obtenir une image avec une meilleure résolution.

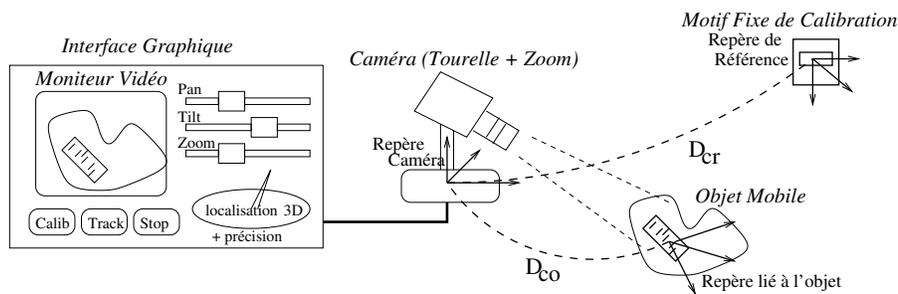


FIG. 3 – Application de localisation tridimensionnelle d'un plan

Par ailleurs, nous considérons une scène contenant un plan dans lequel la position de certains points est connue. La position des points dans chaque image est donc reliée à la position des points dans le plan par une homographie H . L'étude des équations que l'on peut dériver de ces homographies nous a permis à la fois d'en déduire la position et l'orientation \mathbf{D}_{cr} du plan dans l'espace (voir figure 3), mais aussi de trouver deux équations quadratiques dépendant uniquement des paramètres intrinsèques et pouvant éventuellement permettre d'améliorer la calibration du système visuel. Nous avons aussi constaté que les homographies obtenues en

utilisant plusieurs vues du même plan à différentes focales (valeurs de zoom) étaient reliées entre elles par des contraintes non linéaires, et, par conséquent, que ces homographies ne permettaient pas une auto-calibration du système.

Afin d'estimer directement la position tridimensionnelle du plan sans extraction de points d'intérêts, nous minimisons un critère non linéaire calculé en fonction du gradient de l'image étant donné que le gradient des points situés le long des contours présente un maximum local. D'autre part, nous utilisons un algorithme de minimisation randomisé, permettant de prendre en compte à la fois la précision des mesures et la précision des paramètres à estimer lors de la minimisation du critère non linéaire.

La validation expérimentale ainsi qu'une étude sur la précision des résultats sont en cours.

4.1.4 Utilisation de contraintes algébriques dans les méthodes de calibration

Participants : Didier Bondyfalat, Bernard Mourrain, Théodore Papadopoulo.

Mots clés : étalonnage de caméra, modélisation 3D, démonstration automatique, géométrie algébrique, analyse de graphes.

Dans le cadre du projet européen CUMULI, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la modélisation tridimensionnelle de structures architecturales (quartiers de ville, bâtiments) à partir de « photos ». L'idée générale consiste à introduire du calcul symbolique et algébrique dans le processus d'étalonnage de caméras, et ce à plusieurs niveaux : directement lors de l'étalonnage par la prise en compte de l'information fournie par un plan, après un étalonnage projectif au travers de la résolution des équations de Kruppa, et, pour finir, au niveau de la méthode des ajustements de modèles.

L'idée d'utiliser un plan (projection orthographique, comme par exemple un plan cadastral ou bien un plan d'occupation au sol) dans le processus d'étalonnage est nouvelle. Elle permet un étalonnage euclidien linéaire des caméras sous la contrainte de connaître quelques propriétés géométriques élémentaires de la scène (essentiellement la verticalité, le parallélisme et l'orthogonalité de droites).

Les récentes techniques matricielles de résolutions nous ont permis d'obtenir une solution algébrique aux équations de Kruppa qui constitue une bien meilleure initialisation à une optimisation que l'approche directe.

Les techniques de vision par ordinateur permettent de reconstruire des modèles tridimensionnels qui, souvent, ne vérifient pas parfaitement la géométrie élémentaire de la scène. Notre but consiste à déformer ces modèles de manière à ce qu'ils satisfassent une description géométrique symbolique de la scène. Cet ajustement consiste à minimiser les erreurs de reprojection dans les images d'un modèle satisfaisant aux contraintes géométriques. Pour faire cela, une méthode possible consiste à représenter la scène avec une paramétrisation minimale. La recherche de cette paramétrisation minimale est le problème auquel nous nous sommes attaqués.

Dans chacun de ces travaux, l'information géométrique est déduite des photos ou de la carte. La vérification de la cohérence de ces propriétés est un problème difficile qui est équivalent à la démonstration automatique. Nous avons pour cela amélioré notre algorithme de recherche d'ordonnement des propriétés géométriques, cela a fait l'objet de l'article [26].

Ces travaux reposant sur des modules logiciels hétérogènes doivent maintenant être intégrés dans un ensemble cohérent pour pouvoir montrer de manière effective leurs possibilités.

4.1.5 Suivi de caméra

Participants : Jacques Bride, Luc Robert, Peter Meer, Théodore Papadopoulo.

Mots clés : étalonnage de caméra, méthodes d'estimation robustes de paramètres..

L'objectif de ce travail est d'étalonner une caméra en mouvement. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse de type CIFRE, en collaboration avec l'entreprise REALVIZ, spécialisée dans le «trucage» de séquences d'images. Cette année, nous nous sommes restreints au cas d'une caméra évoluant dans un décor relativement fixe et connu (un studio de cinéma ou de télévision). Supposant donné l'étalonnage initial de la caméra, le problème revient à déterminer des petites variations dans les paramètres externes (position) et internes (focale) de la caméra. Deux points principaux nous ont occupés.

Supprimer le découplage du suivi 3D et 2D : Généralement, le suivi d'une caméra est séparé en deux étapes. Tout d'abord, une série d'images visuelles sont suivies en 2D dans la séquence. Connaissant leurs coordonnées 3D, il est alors possible de remonter au déplacement relatif de la caméra. Cette méthode a le désavantage de favoriser l'accumulation d'erreurs, et de multiplier le nombre de paramètres à estimer. Nous nous sommes penchés sur une méthode unificatrice en prenant soin de ne pas introduire de primitives 2D intermédiaires dans le calcul, pour estimer directement les paramètres 3D en utilisant seulement les informations d'intensités et de gradients d'intensités 2D des images. Toujours sous l'hypothèse de petites variations dans le déplacement de la caméra, il est facile de déterminer une relation linéaire unique, d'inconnue la variation des paramètres de la caméra, entre l'image des différences entre deux images successives et l'ensemble des dérivées partielles de l'intensité de l'image par rapport aux paramètres à estimer. Cette relation est globale à l'ensemble des données, contrairement à la méthode du flot optique 2D qui, bien que très similaire, est locale [Low92,LK81].

Estimation robuste des paramètres et élimination des éléments erronés : Afin de garantir la qualité du suivi, il est indispensable de tenir compte de l'introduction de bruit dans les mesures (les caméras ne sont pas parfaites) et aussi de savoir détecter les mesures erronées (un amer est momentanément caché). Malgré la simplicité apparente de résolution d'un système linéaire, celle-ci n'en demeure pas moins très délicate. La méthode des moindres carrés complets généralisée (GTLS: Generalized Total Least-Squares) est mieux adaptée à toute une classe de problèmes que la méthode des moindres carrés traditionnelle. Néanmoins, dans notre cas, la linéarisation introduit une dépendance entre les erreurs estimées (hétéroscédasticité), ce qui

[Low92] D. LOWE, « Robust Model based Motion Tracking Through the Integration of Search and Estimation », *International Journal of Computer Vision* 8, 2, 1992, p. 113–122.

[LK81] B. LUCAS, T. KANADE, « An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision », *in: International Joint Conference on Artificial Intelligence*, p. 674–679, 1981.

sort du cadre du GTLS standard. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes plus élaborées de renormalisation telles que celle développées par K. Kanatani ou P. Meer [LM99]. Puis, des méthodes de recherches de maximum de densité sont appliquées dans un ensemble d'estimation de nos paramètres pour sélectionner le jeu de paramètres définitif, ce qui nous permet d'éliminer les estimations provenant de mesures erronées.

4.1.6 Paramétrisation et estimation du tenseur trifocal

Participants : Olivier Faugeras, Théodore Papadopoulos.

Mots clés : tenseur trifocal, caractérisation projective de systèmes à 3 caméras.

Le tenseur trifocal est un objet fondamental[Sha94,Har94] qui décrit la géométrie d'un système de trois caméras d'un point de vue projectif : c'est en quelque sorte une généralisation de la matrice fondamentale (définie pour deux caméras). Ce tenseur permet de prédire simplement la position de la projection d'une primitive (point ou droite) dans une image uniquement à partir de la connaissance des positions de ses projections dans les deux autres. Un tel tenseur peut être facilement décrit par l'ensemble de ses 27 coefficients. Cependant, il est prouvé que les systèmes de trois caméras ne possèdent que 18 degrés de liberté [LV94]. Les 27 coefficients du tenseur ne sont donc pas libres et doivent satisfaire un ensemble de contraintes.

Du point de vue pratique, un noyau de librairie C++ (dont l'écriture avait commencé l'an passé) est opérationnel et permet l'estimation de ce tenseur à partir de différentes combinaisons de points et de droites. Différentes normalisations des données initiales ont été implémentées et testées : comme pour la matrice fondamentale, les résultats montrent que si la normalisation est essentielle pour la bonne stabilité numérique des résultats, sa nature exacte influe peu sur ceux-ci. Outre les classiques méthodes linéaire et non-linéaire, la méthode d'estimation algébrique proposée par Hartley[Har98] a également été implémentée (sous une forme légèrement modifiée) et est en cours d'évaluation.

D'un point de vue théorique, notre quête de la caractérisation des tenseurs trifocaux qui correspondent à la situation où les paramètres intrinsèques sont constants (cas particulière-

-
- [LM99] Y. LEEDAN, P. MEER, « Heteroscedastic regression in computer vision: problems with bilinear constraint », *to appear in IJCV*, 1999, <http://www.caip.rutgers.edu/~meer/RIUL/PAPERS/heteroscedastic.ps.gz>.
 - [Sha94] A. SHASHUA, « Trilinearity in Visual Recognition by Alignment », *in: Proceedings of the 3rd European Conference on Computer Vision*, J.-O. Eklundh (éditeur), *Lecture Notes in Computer Science*, 800-801, Springer-Verlag, p. 479-484, Stockholm, Sweden, mai 1994.
 - [Har94] R. I. HARTLEY, « Lines and points in three views-an integrated approach », *in: Proceedings of the ARPA Image Understanding Workshop*, Defense Advanced Research Projects Agency, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1994.
 - [LV94] Q.-T. LUONG, T. VIÉVILLE, « Canonic representations for the geometries of multiple projective views », *in: Proceedings of the 3rd European Conference on Computer Vision*, J.-O. Eklundh (éditeur), *Lecture Notes in Computer Science*, 800, Springer-Verlag, p. 589-599, Stockholm, Sweden, mai 1994.
 - [Har98] R. I. HARTLEY, « Minimizing Algebraic Error in Geometric Estimation Problems », *in: Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, IEEE Computer Society Press, Bombay, India, janvier 1998.

ment intéressant dans le cadre de l'auto-calibration) a été poursuivie. Des résultats initiaux intéressants ont été obtenus, mais il reste encore à faire un travail de validation poussé.

4.2 Analyse de séquences d'images spatiales(=stéréo) ou temporelles

Mots clés : mosaïque, chromaKey, mouvement de la main, synthèse de vues, stéréoscopie multivue.

4.2.1 EDP et ensembles de niveau pour la détection et le suivi d'objets en mouvements

Participants : Rachid Deriche, Nikos Paragios.

Mots clés : détection et suivi d'objets en mouvement, estimation de mouvement, EDP, méthodes d'ensembles de niveaux.

La formalisation par une méthode variationnelle du problème de la détection et du suivi d'objets en mouvement dans une séquence monoculaire d'images a été poursuivie en s'attaquant au problème de l'estimation du mouvement des objets mobiles détectés et suivis.

Pour cela, nous avons repris la méthode à base de propagation de fronts pour généraliser et traiter de manière unifiée les problèmes de la détection, du suivi et de l'estimation du mouvement d'objets mobiles non rigides dans une séquence d'images monoculaire. Nous avons développé un modèle de **Régions Actives Géodésiques** qui fait usage des informations liées aux régions et aux contours des objets en mouvement pour suivre et estimer au mieux le modèle affine de mouvement attaché aux objets suivis. Une énergie, qui intègre les apports des différents modules illustrés dans le synopsis de la figure 4, est associée au principe variationnel que doivent respecter les paramètres de position des contours des objets suivis et leur modèle de mouvement. Cette énergie est minimisée à l'aide d'une technique de descente de gradient, qui déforme les contours initiaux, considérés comme des frontières de régions d'objets en mouvement et les fait déplacer sous l'influence de forces associées aux contours, aux régions et aux paramètres de mouvements des objets suivis.

La méthode des ensembles de niveaux est ensuite mise en œuvre durant le processus d'évolution des contours, ce qui permet de gérer automatiquement d'éventuels problèmes de changement de topologie de type fusion et/ou scission d'objets au cours du processus de suivi.

L'approche a été validée par plusieurs résultats expérimentaux obtenus sur diverses séquences réelles prises à l'extérieur et comportant des déplacements importants (séquence d'auto-route, de football, etc.) (voir figure 5). Les descriptifs détaillés des différents travaux menés dans ce cadre sont disponibles dans les articles [35, 45, 37]

4.2.2 EDP et ensembles de niveau pour la segmentation d'images

Participants : Rachid Deriche, Nikos Paragios.

Mots clés : segmentation, texture, EDP, méthodes d'ensembles de niveaux, mixtures de gaussiennes.

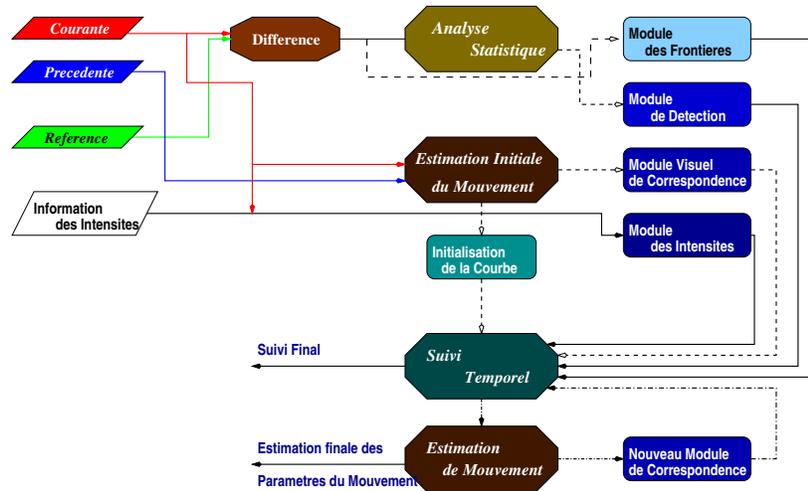


FIG. 4 – *Synopsis du suivi d'objets et de l'estimation du mouvement par régions actives géodésiques.*

Nous avons poursuivi l'étude entamée l'année dernière sur le problème de la segmentation supervisée d'images texturées. Une approche variationnelle qui reformule ce problème comme un problème de propagation de front a été développée et mise en œuvre, et plusieurs tests expérimentaux sur des images réelles ont pu être menés afin de valider l'approche proposée. Ceci nous a permis de tester l'importance des différents modules qui forment le système mis en œuvre, et d'axer nos efforts plus particulièrement sur l'amélioration des performances de certains modules, comme celui associé à la phase d'apprentissage, où nous avons pu rajouter une mesure de fiabilité à chaque opérateur utilisé. Divers exemples de résultats obtenus par cette méthode peuvent être trouvés dans les publications [34, 36, 44].

Nous nous sommes ensuite intéressés au problème de la segmentation non supervisée d'images. Une approche variationnelle pour traiter ce problème à l'aide du modèle de Régions Actives Géodésiques, qui permet de prendre en compte de manière unifiée les informations liées aux régions et aux contours, a été développée. En premier lieu, l'histogramme de l'image observée est approximé par une mixture de gaussiennes. Cette densité de probabilité est ensuite utilisée pour déduire le nombre de régions et leurs propriétés statistiques (voir dans la figure 6, l'approximation de l'histogramme de la maison de la figure 7 par une mixture de 5 gaussiennes). Les contours des régions sont ensuite caractérisés par une analyse statistique qui permet de définir une énergie incluant aussi bien un terme de région qu'un terme de contour. L'équation d'Euler-Lagrange associée à la minimisation de l'énergie est alors résolue à l'aide de la méthode des ensembles de niveaux. Un ensemble de courbes initiales va ainsi se déplacer sous l'influence d'une contrainte de régularité et de forces associées aux contours et aux régions. Les changements de topologie sont naturellement traités grâce à la mise en œuvre d'une approche à base d'ensembles de niveau. Afin de pouvoir segmenter complètement l'image i.e. aussi bien les parties intérieures qu'extérieures des différentes régions, nous avons proposé et développé une nouvelle approche basée sur une propagation multi-phase à base d'un système

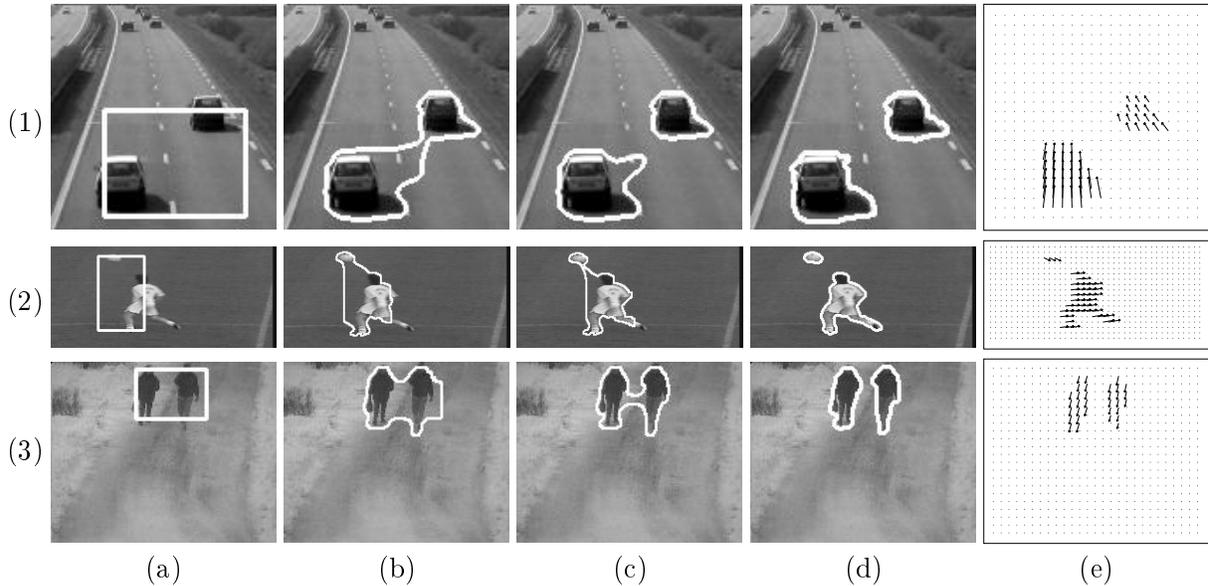


FIG. 5 – (a) Courbe initiale, (b,c) Evolution des courbes (d) Courbe finale, (e) Estimation du mouvement. (1) : Séquence d’auto-route. (2) : Séquence de foot-ball, (3) : Séquence de passants

d’EDP couplées permettant de faire évoluer différents ensembles de niveaux sur une image. Le couplage introduit entre les différentes équations d’évolution permet à tout pixel de l’image de n’être attribué qu’à une seule région à la fois. Ceci est mis en pratique par l’apparition d’un terme de vitesse supplémentaire qui pénalise les évolutions de courbes pouvant converger vers de telles configurations conflictuelles. Enfin, une approche multi-échelle est développée afin d’accélérer le processus et de l’aider dans sa phase de convergence. Plusieurs résultats expérimentaux, obtenus à partir de séquences d’images réelles, illustrent les diverses potentialités de cette approche, qui offre la possibilité de récupérer toutes les frontières des objets i.e. aussi bien celles qui se trouvent à l’intérieur que celles qui se trouvent à l’extérieur des objets [44]. La figure 7 illustre les différentes étapes de la segmentation d’une maison en cinq régions.

4.2.3 Reconstruction stéréoscopique par la méthode des ensembles de niveaux.

Participants : José Gomes, Olivier Faugeras.

Mots clés : stéréoscopie, équations aux dérivées partielles, méthode des ensembles de niveaux.

Nous avons poursuivi l’étude menée depuis deux ans sur la reconstruction stéréoscopique par la méthode des ensembles de niveaux. Il s’agit de retrouver la structure tridimensionnelle d’une scène en partant de photographies prises simultanément de points de vue différents. La scène est modélisée par une iso-surface d’une fonction réelle sur \mathbb{R}^3 et sa déformation est régie par une équation aux dérivées partielles (EDP).

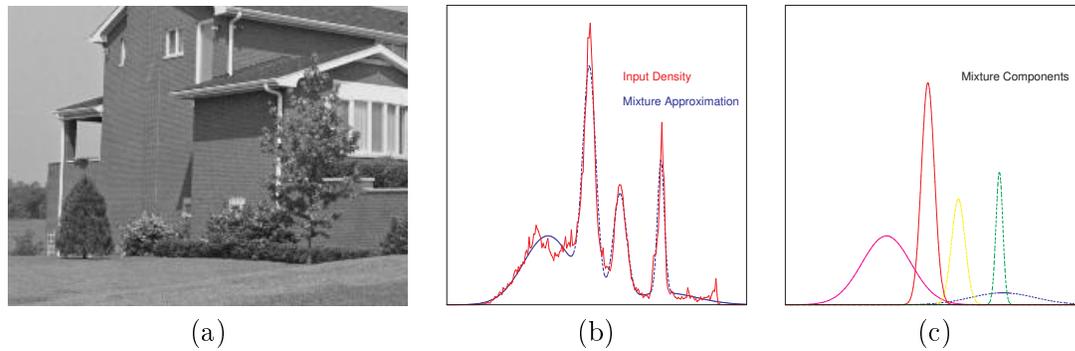


FIG. 6 – (a) Image, (b) Histogramme et approximation: Nombre de composants: 5, Erreur moyenne d'approximation: $2.3e-06$, Nombre d'itérations: 421, (c) Propriétés des différentes régions.

L'an passé, nous avons mis en oeuvre cette théorie telle que présentée par Faugeras et Keriven ^[FK97] et cette année, nous avons cherché à diminuer les temps de calcul très importants en introduisant une nouvelle EDP qui diminue la redondance de calcul du critère de corrélation [40, 28] (Cf. Fig. 8). En effet, d'après la méthode classique des ensembles de niveaux (telle que proposée par Osher et Sethian) le hamiltonien de l'équation aux dérivées partielles doit être calculé dans tout \mathbb{R}^3 , ce qui, dans le cas de la corrélation croisée, est très coûteux. Ce problème provient du fait que le plongement de la surface dans \mathbb{R}^3 proposé par Osher et Sethian est partiellement arbitraire. En choisissant une fonction implicite intrinsèque à la surface en mouvement, il est possible de réduire le domaine de calcul du critère de corrélation à la surface (vue comme un sous-ensemble de \mathbb{R}^3). Cette technique permet un gain de temps de 25%.

Du point de vue pratique, la librairie C++ (dont l'écriture avait commencé l'an passé) permettant de faire évoluer des surfaces en différentes dimensions (2, 3, ou 4) est opérationnelle et en cours de documentation. Cet outil de programmation nous a permis de mettre en commun une grande partie des mises en oeuvre de plusieurs applications utilisant des méthodes par ensembles de niveaux.

4.2.4 Corrélation stéréoscopique à base de filtres récurrents, appliquée à l'estimation de la matrice fondamentale

Participants : Cyrille Gauclin, Théodore Papadopoulos.

Mots clés : matrice fondamentale, corrélation, stéréoscopie dense, multi-échelle, rectification.

[FK97] O. FAUGERAS, R. KERIVEN, « Level set methods and the Stereo Problem », *in: Proc. of First International Conference on Scale-Space Theory in Computer Vision*, B. ter Haar Romeny, L. Florack, J. Koenderink, M. Viergever (éditeurs), *Lecture Notes in Computer Science*, 1252, Springer, p. 272–283, 1997.

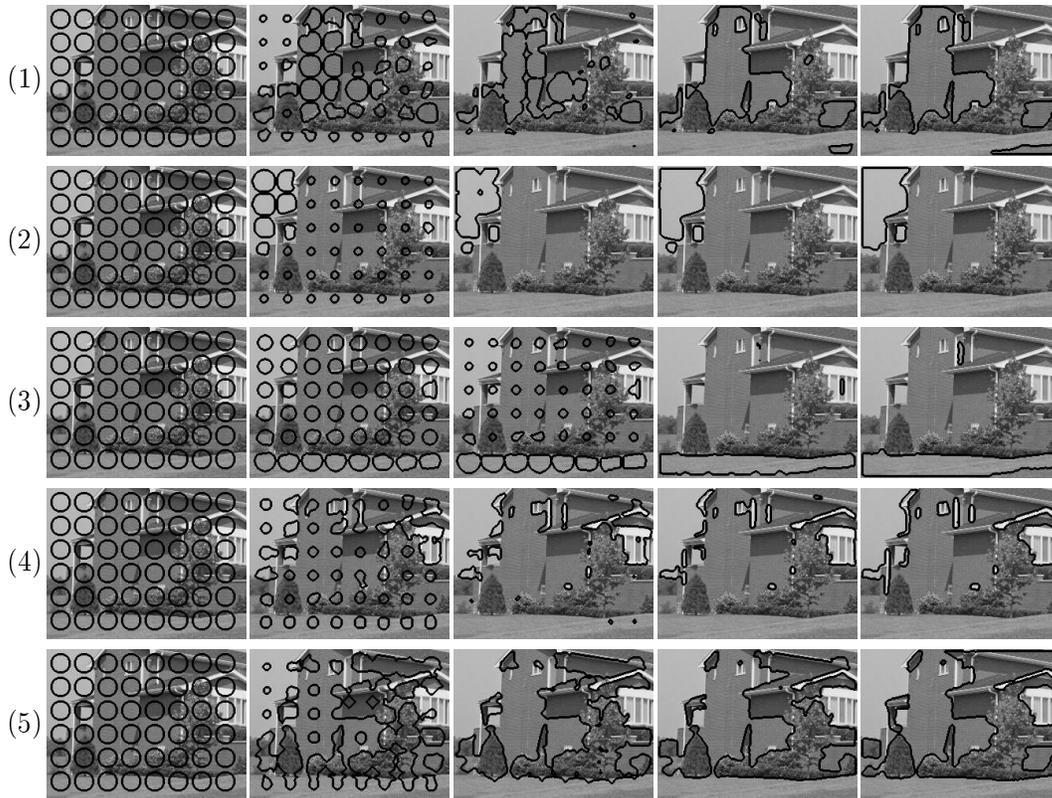


FIG. 7 – Segmentation en 5 régions. Propagation des courbes de gauche à droite (1) Murs, (2) Ciel, (3) Sol, (4) Fenêtres, (5) Végétation, ombres.

Généralement, les méthodes de stéréoscopie par corrélation à partir d'images non étalonnées procèdent en deux étapes : Tout d'abord, elles commencent par établir la géométrie épipolaire (matrice fondamentale), à partir de quelques correspondances de points entre les images. Ensuite, ces images sont rectifiées et corrélées afin d'obtenir une carte de disparité. Nous proposons de rendre le procédé circulaire-itératif à rétro-action, c'est à dire d'utiliser les scores de corrélation comme information supplémentaire permettant l'estimation de la géométrie épipolaire. Cette boucle permet d'améliorer à la fois la géométrie épipolaire mais aussi la carte de disparité. Bien que cette méthode ne soit pas limitée à une technique de corrélation particulière, nous avons développé une nouvelle méthode de corrélation basée sur l'utilisation de filtres récursifs. Cette méthode possède l'avantage de permettre une corrélation pondérée et multi-résolution sans pour autant entraîner d'augmentation importante des temps de calcul. Les résultats présentés ici ont été obtenus à partir de paires d'images prises au microscope électronique à balayage (MEB). Ce travail a été accepté pour publication à ACCV'2000 et RFIA'2000. Comme le montre la figure 9, le raffinement apporté par notre méthode a permis de ramener les droites épipolaires à l'horizontale.



FIG. 8 – Les trois images en haut à gauche ont été prises simultanément de différents points de vue. L'image en haut à droite montre la surface initiale (une sphère) et les trois images sont projetées dessus. La reconstruction est obtenue en déformant cette surface de façon à satisfaire l'équation aux dérivées partielles associée au problème variationnel. Les 15 autres images montrent la reconstruction résultante de plusieurs points de vue.

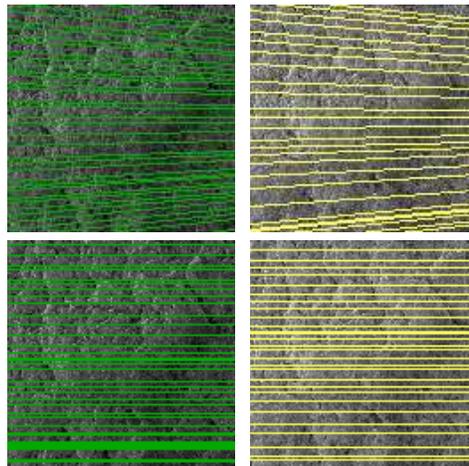


FIG. 9 – En haut: faisceaux épipolaires gauche et droit obtenus par une méthode standard de minimisation de la distance des points aux droites épipolaires. En bas: faisceaux épipolaires gauche et droit obtenus par notre méthode

Afin de valider notre méthode et de tester sa robustesse, nous avons appliqué un bruit gaussien, d'écart-type variant entre 0,2 et 2, à l'ensemble des correspondances de points servant à estimer la géométrie épipolaire initiale. Nous avons ensuite estimé la géométrie épipolaire correspondante ainsi que la carte de scores de corrélation. Puis, en utilisant cette même géométrie épipolaire comme initialisation, nous avons ensuite calculé une nouvelle carte de scores, cette fois, à l'aide de notre méthode. Les résultats présentés dans le tableau suivant montrent, pour chaque valeur d'écart type du bruit gaussien, les trois éléments suivants :

1. la variation (en pourcentage) du score moyen, c'est à dire de combien de pourcents s'est déplacé le score moyen vers le score idéal (le meilleur score étant 0),
2. le nombre de résolutions utilisées,
3. le temps de calcul exprimé en secondes.

σ	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0
$\Delta\%$	+5.1	+10.4	9.6	+14	+8.1	+7.2	+7.1
Résolutions	2	2	3	2	4	3	4
Temps (s)	425	553	767	641	725	572	832

4.2.5 Reconstruction automatique de bâtiments à partir d'imagerie aérienne

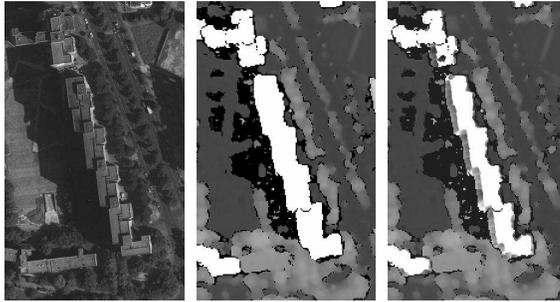
Participants : Christophe Vestri, Frédéric Devernay, Olivier Faugeras.

Mots clés : stéréoscopie, corrélation, reconstruction, MNE, imagerie aérienne.

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre applicatif de la modélisation automatique de bâtiments à partir d'imagerie aérienne. Nous cherchons principalement à améliorer un Modèle Numérique d'Élévation urbain (MNE). Le MNE initial est construit par stéréoscopie par corrélation. Nous utilisons un algorithme de corrélation pour obtenir une information tridimensionnelle dense de la scène. L'inconvénient principal de cet algorithme est sa difficulté à gérer et préserver les discontinuités de profondeur de la scène. La corrélation nous permet de reconstruire des points appartenant aux toits et au sol mais ne peut reconstruire les points 3D sur les façades des bâtiments. Les principales erreurs présentes dans le MNE initial correspondent dans notre cas à des bavures des toits en dehors de leurs limites. Modéliser correctement la scène étudiée devient difficile. Notre objectif est l'élimination de ces défauts a posteriori pour obtenir un MNE respectant les limites des bâtiments.

L'idée directrice de notre approche est de retrouver les points 3D appartenant aux façades pour délimiter les bâtiments et éliminer les bavures présentes aux bords de ceux-ci ([38]). Pour reconstruire ces points, nous supposons tout d'abord connaître l'orientation dans la scène de la façade étudiée. Pour cette façade, nous choisissons deux prises de vues et construisons de nouvelles images dans lesquelles la façade étudiée sera perçue identiquement. L'appariement des points 3D correspondant à cette façade devient facile et nous utilisons le même algorithme de corrélation pour reconstruire ces points 3D. Nous utilisons ensuite un filtre tridimensionnel dérivé des notions de groupement perceptuel pour supprimer les données aberrantes introduites par l'étape de corrélation. Nous corrigeons ensuite le MNE. Pour cela, nous utilisons le fait qu'aucun point physique ne peut se situer entre le point 3D de la facade reconstruit et les centres

optiques des vues utilisées pour construire ce point. Nous creusons le MNE en éliminant les points du MNE définis entre ces deux points.



La figure ci-dessus présente les résultats obtenus. La première image est une ortho-image du bâtiment étudié et la seconde le MNE lui correspondant (l'altitude des points est définie par leur couleur, blanc pour une altitude élevée et inversement). Le toit du bâtiment bave en dehors des véritables limites. La dernière image présente le MNE corrigé par notre algorithme. Ces bavures sont maintenant corrigées. Pour traiter toutes les façades du bâtiment, nous traitons toutes les orientations de façade de manière exhaustive. Ceci nous permet d'obtenir un système de correction à la fois indépendant du nombre d'images disponibles sur la scène, de l'orientation des façades et plus généralement de la forme des bâtiments.

4.2.6 Synthèse de films réalistes à partir de photographies

Participants : Frédéric Abad, Olivier Faugeras, Luc Robert.

Mots clés : rendu réaliste, image-based-rendering, view-dependent texture mapping, décomposition en couches.

Les travaux menés jusqu'à présent ont porté sur le développement d'une nouvelle méthode de rendu réaliste, à mi-chemin entre le traditionnel *rendu à partir de modèles (model-based rendering)* et le plus récent *rendu à partir d'images (image-based rendering)*, le but étant de synthétiser des séquences d'images à partir de quelques photographies.

Un modèle tridimensionnel sommaire de la scène (ainsi que la calibration des caméras) est obtenu initialement à partir de quelques images de référence par photomodélisation. Pour de nouveaux points de vue, il s'agit ensuite de synthétiser des images les plus réalistes possibles malgré la simplicité du modèle 3D. On va utiliser pour cela la nouvelle technique du *view-dependent texture mapping* qui nous permet de recouvrir notre modèle 3D avec les textures extraites des images de référence les plus appropriées au rendu de la nouvelle vue. Cela se traduit par un meilleur rendu des détails non modélisés en 3D, la réduction des artefacts de désoccultation et une meilleure résolution des nouvelles images.

Afin de gérer plus facilement les effets de parallaxe (occultations, désoccultation) dans la scène, l'usage du *view-dependent texture mapping* est précédé d'une *décomposition de la scène en couches (layer factorisation)* qui isole dans des couches distinctes les éléments 3D susceptibles d'être occultés. On calcule alors séparément les images de chaque couche et on obtient l'image

finale en fusionnant (étape de *composition*) ces différentes images en tenant compte de la profondeur dans la scène de leur couche associée.

Une étape ultérieure de raffinement des nouvelles images est à l'étude afin de réduire les effets de *ghosting* (flou dû à la mauvaise superposition des contributions de différentes images pour une même couche) quand le modèle 3D approché dévie trop de celui réel. Ce recalage passe par l'estimation de l'erreur entre modèle approché et modèle réel, suivie d'un *warping 2D* des images en conséquence. Et enfin, dernier problème abordé, la segmentation de la scène en couches fait l'objet d'une attention particulière afin que l'action de l'utilisateur (actuellement prédominante) se limite à terme à une simple étape d'initialisation des couches (en particulier, étude de techniques de segmentation utilisant informations 2D et 3D telles que le *planar key*).

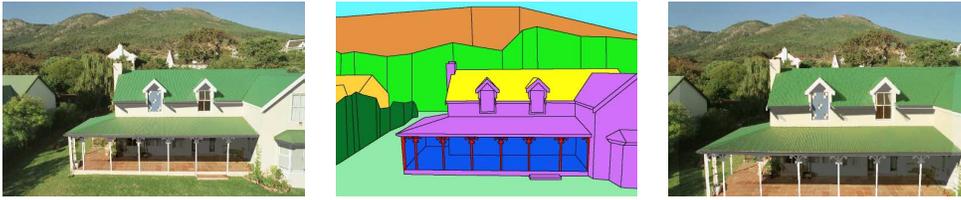


FIG. 10 – De gauche à droite : première image de référence, décomposition en couches et image nouvellement synthétisée.

4.2.7 Suivi d'objets articulés dans des séquences d'images

Participants : Quentin Delamarre, Olivier Faugeras.

Mots clés : suivi du mouvement, multi-vues, modèles 3D articulés, segmentation du mouvement, stéréo-corrélation, dynamique.

Notre but ici est de faire estimer automatiquement par un algorithme le mouvement et les déformations d'un objet filmé par une ou plusieurs caméras vidéo. Nous nous sommes surtout intéressés au suivi du mouvement du corps humain, car les applications sont multiples : interfaces homme-machine (souris "3D", animation de marionnettes virtuelles, communication dans des environnements très bruyants), étude du geste (sportif, clinique), vidéo-surveillance de personnes (musées, autoroutes) ou de robots (dans les usines), constitution de preuves à partir de vidéo amateurs (projet européen Improofs), ...

Pour y parvenir, nous modélisons l'objet suivi grâce à un système de parties rigides (sphères, pavés, cônes tronqués) liées entre elles par des articulations simples. Un tel choix a deux avantages : un modèle 3D articulé est assez simple à manipuler, réduisant le nombre de degrés de liberté du système, tout en permettant de simuler tous les mouvements de celui-ci.

La position du modèle 3D est initialisée manuellement dans les premières images. Dans la suite de la séquence, on utilise un filtre de Kalman linéaire (vitesse constante) pour mettre à jour les paramètres du modèle 3D et ainsi estimer la position de l'objet suivi dans les images suivantes. Cette estimée est très approximative et va être affinée par la méthode suivante, qui

dépend du type d'information que nous pourrions extraire des images :

- **dans le cas où les positions et les directions de visée des caméras sont proches les unes des autres :** mise en correspondance des textures entre images, pour reconstruire l'objet suivi en 3D par stéréo-corrélation, avant de le mettre en correspondance avec son modèle 3D ;
- **dans le cas où les caméras sont éloignées les unes des autres :** segmentation du contour de l'objet en mouvement dans les images par des EDPs (voir la section 4.2.1) et mise en correspondance avec la projection du modèle 3D dans les images.

Dans chacun de ces deux cas, on va créer des forces entre le modèle 3D et les informations tirées des images (reconstruction 3D ou contours de la silhouette de la personne filmée). Un algorithme rapide de calcul de la dynamique du modèle articulé soumis à ces forces va faire converger celui-ci vers la position estimée de l'objet suivi (pour plus de détails, voir [31]). On contourne ainsi la difficulté d'avoir à minimiser sur un grand nombre de degrés de liberté.

Des tests encourageants ont été effectués sur des modèles de doigts (8 degrés de liberté (ddl)), de mains (27 ddl) et de personnes (22 ddl) (voir figure 11).

Voir aussi le site web <http://www.inria.fr/robotvis/personnel/qdelam/>.

4.2.8 EDP et Restauration d'images couleur

Participants : Rachid Deriche, David Tschumperle.

Mots clés : EDP, images vectorielles, couleur, restauration d'images bruitées et floues.

De nombreuses méthodes basées sur les équations aux dérivées partielles (EDP) sont apparues ces dernières années pour résoudre le problème de la restauration d'images ou de séquences d'images scalaires [30]. Après avoir contribué ces dernières années à unifier le problème de la restauration d'images scalaires bruitées et floues au sein d'un formalisme à base d'EDP, et montré comment la plupart des approches proposées récemment dans la littérature entraient dans le cadre de ce formalisme, nous nous intéressons maintenant à l'application de cette méthodologie à base d'EDP au cas des images vectorielles. De telles images se retrouvent dans un grand nombre d'applications d'importance (images médicales, images couleurs, images multi-spectrales etc.). À cette fin, nous avons développé une nouvelle approche pour restaurer des images couleurs bruitées et floues en combinant les techniques de restauration scalaire avec l'analyse d'images vectorielles. Soit m le nombre de composantes et u une image, $u : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^m$. On peut voir alors cette image comme une surface d'un espace à $m + 2$ dimensions. Cette surface admet une première forme fondamentale d^2u qui permet de mesurer les changements de contrastes dans l'image. Ainsi, pour un vecteur unitaire v , $d^2u(v)$ nous donne une mesure du changement suivant la direction donnée par v . Les vecteurs propres de la matrice G donnent les directions de changement, respectivement, maximal et minimal et les valeurs propres μ_1, μ_2 donnent le contraste suivant ces directions. On remarquera que pour $m = 1$ on a $\mu_1 = |\nabla u|^2$ et $\mu_2 = 0$. On fait usage alors de ces informations qui prennent en compte la corrélation entre les différents canaux pour étendre au cas de la couleur nos précédents travaux établis dans le cadre scalaire. Nous obtenons ainsi une EDP de restauration d'images couleur qui supprime le bruit par lissage anisotropique, mais qui permet également de rehausser les contours flous, grâce à

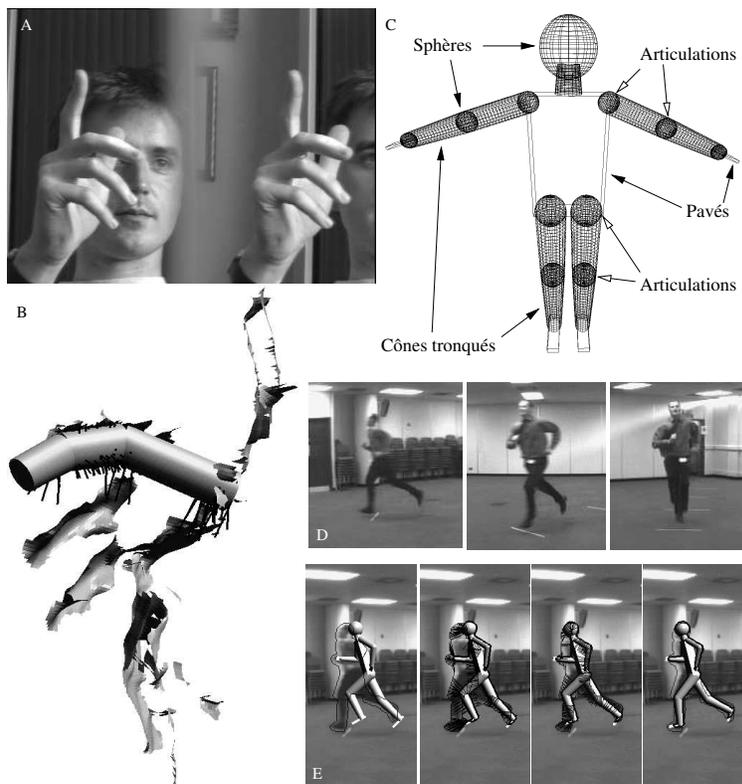


FIG. 11 – A : deux vues de la main d’un utilisateur. B : la reconstruction 3D de cette même main, vue sous un autre angle, et sur laquelle on a fait converger un modèle 3D de doigt. C : un modèle 3D humain. D : trois vues d’une personne courant à un instant t . E : la convergence du modèle 3D humain sur la première caméra (position initiale + contours de la silhouette en noir ; forces ; itération intermédiaire ; pose finale).

une généralisation de la notion de filtre de choc au cas des images couleurs. Cette approche se compare favorablement, aussi bien dans l'analyse du comportement qu'expérimentalement, aux approches les plus récentes proposées dans le domaine, telles que celles de Sapiro [SR96] et de Blomgren [BC98] qui ne comportent qu'une diffusion directionnelle, pas de terme d'attache aux données et pas de terme de traitement du flou. L'image 12 illustre un exemple de résultat obtenu par cette approche. D'autres résultats peuvent être consultés dans [46]. Ce travail a été accepté pour publication et sera présenté lors de la prochaine conférence RFIA'2000.



a) Image floue et bruitée

b) Image restaurée

FIG. 12 – Résultats de restauration d'image couleur

4.2.9 Restauration d'images

Participant : Bernard Gai-Checa.

Mots clés : restauration, équations aux dérivées partielles, bruit, lissage, laplacien, convergence, target junior.

Les travaux concernant le projet Européen IMPROOFS (Image Processing Operations For Forensic Support) ont été poursuivis tout au long de l'année 1999. Nous avons ainsi continué à développer les algorithmes de restauration d'images et de séquences d'images que nous avons commencé à mettre au point l'année précédente. En particulier, nous avons engagé une collaboration plus étroite avec nos partenaires de NICC et FSS pour tester nos logiciels sur des images et des séquences d'images réelles.

Ces algorithmes de restauration sont basés sur l'évolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) décrites par Rachid Deriche et Pierre Kornprobst au sein du projet. Nous avons continué

[SR96] G. SAPIRO, D. RINGACH, « Anisotropic Diffusion of Multivalued Images with Applications to Color Filtering », *IEEE Transactions on Image Processing* 5, 11, 1996, p. 1582–1585.

[BC98] P. BLOMGREN, T. CHAN, « Color TV: Total Variation Methods for Restoration of Vector-Valued Images », *IEEE Trans. Imag. Proc.* 7, 3, 1998, p. 304–309, Special Issue on Partial Differential Equations and Geometry-Driven Diffusion in Image Processing and Analysis.

d'utiliser Target Junior comme plateforme de vision. Par contre, nous avons changé d'interface graphique en évoluant d'InterViews vers Fresco. Nous avons ainsi gagné en performances au niveau rapidité, interactivité et facilité d'implantation. De plus un manuel plus précis avec de nombreux exemples a été écrit pour permettre à un débutant de progresser rapidement avec le système.

Par ailleurs nous avons aussi continué à développer des interfaces relatives au projet IMPROOFS et en particulier à l'analyse de silhouettes (voir les travaux de Nikos Paragios et Quentin Delamarre).

4.3 Imagerie cérébrale

4.3.1 Mise en correspondance de données fonctionnelles et anatomiques en IRM

Participants : Olivier Faugeras, Gerardo Hermosillo, Thierry Vieville.

Mots clés : mise en correspondance, critère d'information mutuelle, visualisation d'activité neuronale.

Nous avons appliqué des techniques de recalage pour mettre en correspondance des données acquises par résonance magnétique fonctionnelle avec des images anatomiques. L'étude de ce type de données permet de localiser les zones d'activation lors de stimuli visuels. La première étape dans leur analyse est la mise en correspondance entre images fonctionnelles acquises à différents instants. Après une étude statistique de l'intensité de chaque voxel au cours du temps, une mise en correspondance anatomique-fonctionnelle est nécessaire pour visualiser les zones significatives d'activation. Cette mise en correspondance est faite d'une manière semi-automatique, la partie automatique consistant en un recalage fin en utilisant des outils développés l'année dernière, en particulier en ce qui concerne le critère d'information mutuelle. La figure 13 montre les résultats du recalage anatomique-fonctionnel avec 9 degrés de liberté (six pour la transformation rigide et trois facteurs d'échelle).

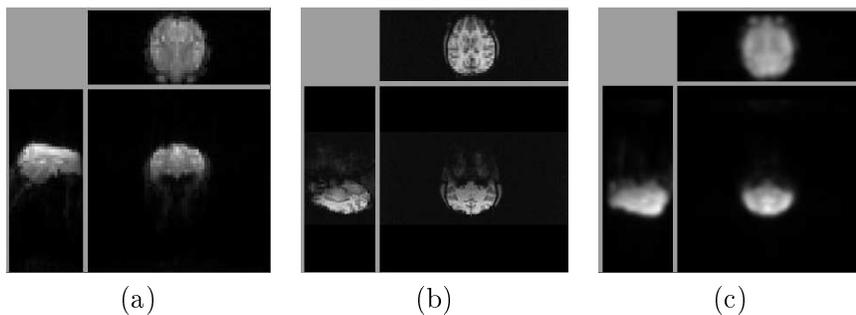


FIG. 13 – (a) Données fonctionnelles avant recalage, (b) Données anatomiques, (c) Données fonctionnelles après recalage

4.3.2 Déploiement cortical par ensembles de niveaux

Participants : Olivier Faugeras, Gerardo Hermosillo.

Mots clés : évolution de surfaces, équations aux dérivées partielles, méthodes de surfaces de niveaux, visualisation d'activité neuronale.

Cette année, nous avons travaillé sur le problème du déploiement de surfaces [41, 29]. Une fois effectuée la mise en correspondance (recalage) entre des images nous renseignant sur l'anatomie (l'IRM par exemple) et d'autres nous donnant l'activation neuronale (l'IRMf par exemple), l'activation sur le cortex peut être visualisée par le biais de la segmentation. Le déploiement de la surface corticale permet d'améliorer cette visualisation, en faisant correspondre à chaque point de la surface initiale un point d'une surface simplifiée, par exemple un ellipsoïde ou une sphère.

Pour une certaine classe de surfaces, un lissage permet d'obtenir cette correspondance à condition de pouvoir lisser "infiniment". Ce lissage consiste à déformer la surface de façon à la régulariser, une possibilité étant de la déformer proportionnellement à sa courbure moyenne en chaque point. Il s'agit d'une approche variationnelle, le flot de courbure moyenne étant le gradient de la fonctionnelle donnée par l'aire de la surface. Ce flot peut être mis en œuvre d'une manière robuste par les méthodes de surfaces de niveaux [20]. Nous nous sommes concentrés sur la résolution de deux problèmes qui apparaissent lorsqu'on se place dans ce contexte.

Le premier est le fait que le lissage rétrécit la surface, rendant impossible un lissage "infini". Nous avons proposé une solution à ce problème en généralisant, aux cas de surfaces fermées de \mathbb{R}^3 un résultat obtenu pour l'évolution de courbes planes [22]. Elle consiste à appliquer une homothétie à l'espace à chaque instant de l'évolution, de telle sorte que l'aire totale ou le volume intérieur soient préservés.

Le deuxième problème provient du fait que dans l'approche par ensembles de niveaux, il n'est pas possible d'associer une valeur (scalaire ou vectorielle) à chaque point de la surface, celle-ci n'étant pas représentée explicitement. Nous avons proposé une solution qui consiste à suivre les points d'un maillage représentant la surface initiale et contenant les données d'intérêt, en leur appliquant la vitesse calculée à partir de la fonction implicite (dont la surface est le niveau zéro par exemple). La figure 14 montre un exemple des résultats obtenus.

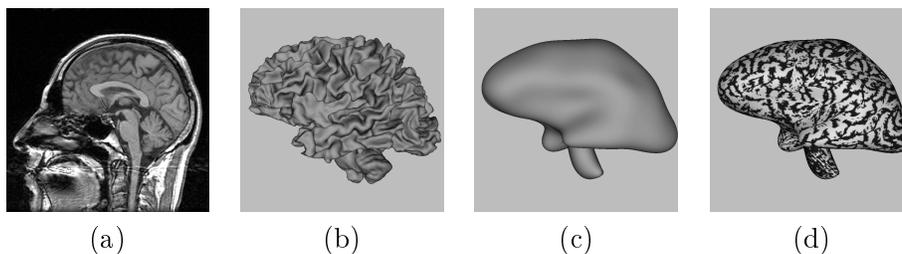


FIG. 14 – (a) Données IRM, (b) surface originale, (c) surface lissée, (d) signe de la courbure initiale représentée sur la surface lisse

4.3.3 Segmentation du cortex cérébral humain

Participants : José Gomes, Olivier Faugeras.

Mots clés : segmentation, équations aux dérivées partielles, méthode des ensembles de niveaux, IRM.

Il s'agit d'étudier comment les méthodes d'ensembles de niveaux peuvent nous aider à segmenter le cortex cérébral dans des Images par Résonance Magnétique. La connaissance de la géométrie du cortex humain est un élément important dans la résolution des problèmes inverses de la magnéto-encéphalographie.

Suivant le travail de Zeng *et. al.* [ZSSD98], nous avons modélisé le cortex non pas comme une surface mais comme le volume fin compris entre deux surfaces (presque) parallèles. En effet, il est connu par ailleurs que le cortex a une épaisseur d'environ 3 mm chez l'humain. Le problème de la segmentation du cortex est donc réécrit comme un problème variationnel dont sont solutions les deux surfaces. Lors de la résolution de l'équation aux dérivées partielles associée au problème variationnel, les deux surfaces sont sujettes à deux forces de déformation : *primo*, un terme d'attache aux données provient directement de l'intensité de l'image IRM sur chaque surface les attire vers les bords intérieurs et extérieur de la matière grise, *deuxio*, les deux surfaces sont couplées par une force qui tend à les rapprocher lorsqu'elles s'éloignent de plus de 3 mm et à se rapprocher dans le cas contraire. Naturellement, ce terme de couplage utilise les fonctions implicites décrivant les deux surfaces pour mesurer la distance qui les sépare. Dans la plupart des applications utilisant une méthode par ensembles de niveaux, la représentation implicite la plus naturelle est la distance signée à la surface fermée en mouvement. Osher et Sethian proposent de soumettre cette fonction implicite à l'action d'une équation de Hamilton-Jacobi. Malheureusement, aucune fonction distance n'est solution de cette EDP, ce qui est une contradiction. Par l'introduction d'une nouvelle EDP, nous proposons une alternative à l'utilisation des équations de Hamilton-Jacobi éliminant cette contradiction. Avec cette nouvelle technique, la fonction implicite est, par construction et à chaque instant, la fonction distance à la surface en évolution. Cette technique permet une meilleure évaluation de la distance entre les deux surfaces et il en résulte une segmentation plus précise [40, 28, 32] (cf. Fig. 15).

4.3.4 Problèmes directs et inverse en EEG et MEG : approche état adjoint

Participants : Stéphane Abello, Rachid Deriche, Olivier Faugeras, Théodore Papadopoulo, François Clément (projet Ondes), Renaud Keriven (CERMICS).

Mots clés : problème inverse, méthode de l'état adjoint.

L'activité électrique du cerveau induit des variations du potentiel électrique et du champ magnétique au voisinage du crâne. Ces variations sont mesurables par les méthodes d'électro-encéphalographie (EEG) pour les premières, par les méthodes de magnéto-encéphalographie

[ZSSD98] X. ZENG, L. H. STAIB, R. T. SCHULTZ, J. S. DUNCAN, « Volumetric Layer Segmentation Using Coupled Surfaces Propagation », *in: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, Santa Barbara, California, juin 1998.

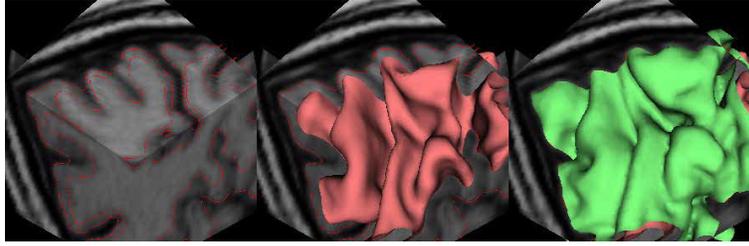


FIG. 15 – *Segmentation du cortex humain à l'aide de deux surfaces couplées.*

(MEG) pour les secondes. Ces deux méthodes sont complémentaires en ce qu'elles ne mesurent pas les mêmes composantes de l'activité électrique des neurones. Leur utilisation pour l'obtention d'une description spatio-temporelle de l'activité du cerveau pose un certain nombre de problèmes.

Si on modélise cette activité par une distribution volumique de dipôles de courant $\mathbf{J}(\mathbf{r})$, la théorie électromagnétique (en l'occurrence les équations de Maxwell dans leur approximation quasi-statique) permet de relier ces sources au potentiel électrique $V(\mathbf{r})$ qu'elles créent dans l'espace :

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \nabla V = \nabla \cdot \mathbf{J} \quad (1)$$

avec des conditions aux limites du type Neumann qui expriment le fait qu'il n'y a pas de courant qui sort de la tête :

$$\frac{\partial V}{\partial \mathbf{n}} = \nabla V \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (2)$$

$\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur de conductivité des tissus qui composent la tête (peau, os, liquide céphalo-rachidien, matière grise, matière blanche). Ce tenseur est supposé connu. Dans le cas de l'EEG, on mesure le potentiel en un certain nombre de points $\mathbf{r}_i, i = 1, \dots, n$ du crâne grâce à des électrodes (en fait les différences de potentiel par rapport à une électrode de référence) et on cherche à reconstruire le champ de dipôles \mathbf{J} . Il s'agit donc d'un problème de contrôle de système régi par l'équation aux dérivées partielles (1), dite équation d'état.

Les méthodes proposées dans la littérature supposent en général que l'activité électrique est bien modélisée par un nombre fini de dipôles électriques $\mathbf{J}_i(\mathbf{r}_i), i = 1, \dots, p$ où p est en général inférieur à 10. Dans ce cas on peut découpler les variables d'espaces (les positions \mathbf{r}_i des dipôles) et les variables électriques (les vecteurs \mathbf{J}_i). Le problème est linéaire en les \mathbf{J}_i et non linéaire en les \mathbf{r}_i . On peut alors appliquer une méthode de relaxation qui alterne la résolution du problème linéaire et du problème non linéaire jusqu'à convergence du critère d'erreur qui mesure la différence entre les potentiels mesurés et les potentiels prédits à l'aide de l'équation (1).

Nous avons développé et commencé à implémenter une approche alternative, dite de l'état adjoint. Cette approche consiste à introduire une nouvelle fonction inconnue, l'état adjoint $w(\mathbf{r})$, dont on montre qu'elle satisfait une autre EDP :

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \nabla w + s_{EEG} = 0$$

où s_{EEG} est une fonction qui dépend des mesures de potentiel et du potentiel solution de (1) en les points de mesure. La condition aux limites est du même type que pour le potentiel.

L'intérêt de l'introduction de cette fonction est que son gradient ∇w donne en chaque point du volume d'intérêt une direction de descente pour l'inconnue \mathbf{J} et que le problème est linéaire en \mathbf{J} .

L'algorithme, en cours d'implémentation par Stéphane Abello, consiste, à partir d'une estimée initiale $J_0(\mathbf{r})$ de la distribution de courants, à itérer les opérations suivantes :

1. résoudre l'équation d'état (1),
2. résoudre l'équation d'état adjoint (2),
3. à l'aide du gradient de l'état adjoint, faire varier la distribution de courants.

Nous sommes partis d'un code développé en Fortran par F. Hecht et O. Pironneau pour résoudre l'équation de Poisson en 3D et nous l'avons fait évoluer en C++ pour permettre de résoudre des équations telles que (1) et (2). Nous présentons quelques résultats de simulation préliminaires obtenus à l'aide de ces programmes.

La gauche de la figure 16 montre la distribution de potentiel créée par un dipôle électrique placé dans le cortex d'un singe macaque. La géométrie de ce cortex est obtenu par un algorithme de segmentation décrit dans la section 4.3.3. Les variations de teinte reflètent celles du potentiel. Nous avons résolu le problème inverse par l'algorithme précédent et obtenu une distribution de dipôles qui crée une distribution de potentiel électrique qui apparaît à droite de la figure 16. Nous avons simulé 256 capteurs répartis uniformément sur toute la surface du cortex. L'erreur initiale est de 3.3×10^{-2} unités, l'erreur finale de 2×10^{-3} . La gauche de la figure 17 montre la distribution de potentiel électrique à l'intérieur du cortex, dans le plan du dipôle, la droite de la figure 17 montre la même distribution calculée à partir de la distribution de dipôles estimée.

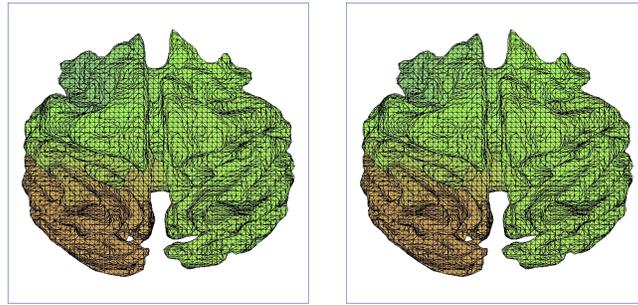


FIG. 16 – *Distribution de potentiel électrique à la surface du cortex, réelle (gauche) et mesurée (droite).*

Le cas des mesures magnétiques (MEG) se traite de manière assez similaire. L'équation de Biot-Savart permet de prédire le champ magnétique en un point quelconque de l'espace :

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mathbf{B}_0(\mathbf{r}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \int \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}') \nabla' V \times \nabla' \left(\frac{1}{R} \right) d\mathbf{r}' \quad (3)$$

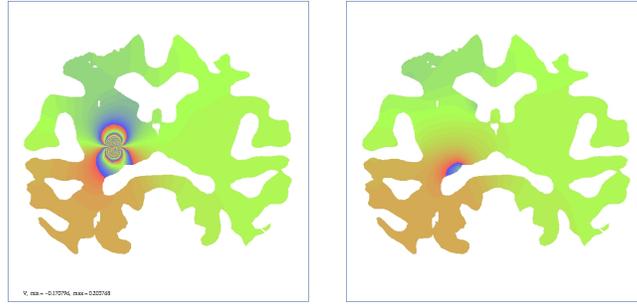


FIG. 17 – *Distribution de potentiel électrique dans le plan du cortex contenant le dipôle électrique, réelle (gauche) et mesurée (droite).*

où $R = \|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|$ et

$$\mathbf{B}_0(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \nabla' \left(\frac{1}{R} \right) d\mathbf{r}'$$

Les mesures fournissent une des composantes du vecteur champ magnétique en un certain nombre de points $\mathbf{q}_j, j = 1, \dots, m$ à proximité du crâne. Nous proposons de résoudre le problème du calcul de la distribution de courant \mathbf{J} par la même technique que précédemment : l'équation d'état (1) ne change pas, l'équation d'état adjoint doit être modifiée pour prendre en compte les nouvelles mesures :

$$\nabla \cdot \sigma \nabla w + s_{EEG} + \nabla \sigma \cdot \mathbf{s}_{MEG} = 0 \quad (4)$$

On a supposé ici par souci de simplicité que les conductivités électriques étaient scalaires.

Un rapport de recherche contenant les détails de ces calculs a été publié [39].

4.3.5 Problèmes direct et inverse en EEG et MEG : méthode “one-shot”

Participants : Guillaume Petitjean, Olivier Faugeras, Théodore Papadopoulo, Alain Dervieux (projet Sinus).

Mots clés : problème inverse, méthode de l'état adjoint, méthode “one-shot”.

Nous avons vu dans la section 4.3.4 que la résolution du problème inverse en EEG ou MEG est un processus dans lequel chaque itération nécessite la résolution de deux EDP elliptiques du deuxième ordre. Ce processus peut être très coûteux en temps. C'est la raison pour laquelle, en collaboration avec le projet Sinus, nous avons exploré une solution alternative qui combine l'idée des méthodes multigrilles et celle de ne pas résoudre complètement les deux équations précédentes à chaque itération. Cette dernière méthode, dite méthode “one-shot”, permet dans certains cas des gains considérables en temps calcul [Ta'91, Mar95]. Le code, en cours d'évolution,

[Ta'91] S. TA'ASAN, « One Shot Methods for Optimal Control of Distributed Parameter Systems. I: Finite Dimensional Control », *rapport de recherche n° 91-2*, ICASE, 1991, NASA Contractor Report 187497.

[Mar95] N. MARCO, *Optimisation de formes aérodynamiques 2D et 3D par une méthode multi-niveau en maillages non structurés*, thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, novembre 1995.

est développé en C++.

La figure 18 donne un exemple des résultats préliminaires obtenus par cette méthode. Il s'agit du problème similaire à celui de la section 4.3.4 dans lequel un dipôle est placé dans le cortex du singe. Le nombre de points de mesures du potentiel est ici 2000, répartis de manière homogène sur la surface du cortex. Le bas de la figure montre la distribution du potentiel électrique dans le plan du dipôle, le haut représente la distribution engendrée par la distribution de dipôles calculée. On a utilisé la méthode "one-shot", mais pas dans sa version multigrille. Elle consiste donc à appliquer quelques itérations du gradient conjugué pour la résolution des systèmes linéaires correspondants aux équations (1) et (2) et une itération de descente de gradient sur la distribution des dipôles. Le temps calcul est de six minutes. L'erreur relative (le rapport entre l'erreur initiale et l'erreur finale) est de 10^{-1} .

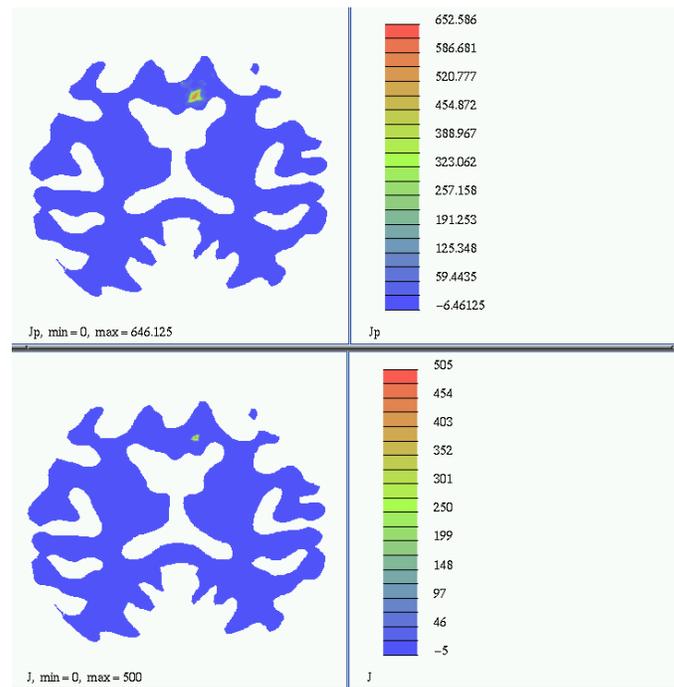


FIG. 18 – La partie basse représente la distribution de potentiel électrique créée par un dipôle situé dans le plan de la figure. La partie haute représente la distribution de potentiel électrique créée par la distribution de dipôles calculée par l’algorithme “one-shot”.

4.3.6 “Snakes” géodésiques de codimension 2 : application à la segmentation de vaisseaux sanguins

Participants : Liana Lorigo (MIT), Olivier Faugeras, Eric Grimson (MIT), Renaud Keriven (Cermics).

Mots clés : snakes, vaisseaux sanguins, angiographie par résonance nucléaire.

Ce travail a eu lieu au MIT, dans le cadre du Laboratoire d'Intelligence Artificielle et en collaboration avec le Brigham Woman's Hospital. L'idée de départ était de généraliser à une codimension quelconque les travaux sur les snakes géodésiques de codimension 1 [CCCD93,CKS97,KKO⁺95]. Nous avons suivi une approche basée sur l'idée des ensembles de niveaux [20, 23] et fondée sur les travaux d'Ambrosio et Soner [AS96]. Le cas le plus simple après celui des hypersurfaces est celui des courbes de R^3 (dimension 1, codimension 2). Supposons que l'on cherche à faire évoluer une courbe $\mathbf{C}(p,t)$ (p est un paramètre de la courbe, t le temps) selon l'équation

$$\mathbf{C}_t = \kappa \mathbf{N} - \mathbf{\Pi} \mathbf{d}, \quad (5)$$

avec comme conditions initiales $\mathbf{C}(p,0) = \mathbf{C}_0(p)$. κ est la courbure de la courbe, \mathbf{d} est un champ de vecteurs créé par des données, $\mathbf{\Pi}$ est l'opérateur de projection sur le plan normal à la courbe.

De manière schématique, Ambrosio et Soner ont montré qu'on pouvait remplacer l'évolution lagrangienne (5) par une évolution eulérienne en procédant de la manière suivante. On introduit une fonction auxiliaire lisse et régulière $v : R^3 \rightarrow R^+$, dont le niveau 0 est la courbe \mathbf{C}_0 . L'intuition est que les ε ensembles de niveau de la fonction v (i.e. les points x tels que $v(x) = \varepsilon, \varepsilon > 0$) sont, pour ε assez petit, des voisinages "tubulaires" de la courbe, des surfaces, dont l'une des courbures principales (la plus forte) est liée à ε et l'autre (la plus faible) est liée à la géométrie de la courbe. Soit

$$\mathbf{\Pi}_{\mathbf{q}} = \mathbf{I} - \frac{\mathbf{q}\mathbf{q}^T}{\|\mathbf{q}\|^2}$$

l'opérateur de projection sur le plan orthogonal au vecteur \mathbf{q} . Si l'on note $\lambda(\nabla v(x,t), \nabla^2 v(x,t))$ la plus petite des valeurs propres non nulles de la matrice 3×3 $\mathbf{\Pi}_{\nabla v} \nabla^2 v \mathbf{\Pi}_{\nabla v}$, Ambrosio et Soner ont démontré que l'évolution lagrangienne (5) était équivalente à l'évolution eulérienne

$$v_t = \lambda(\nabla v(x,t), \nabla^2 v(x,t)) + \nabla v \cdot \mathbf{d} \quad (6)$$

Nous avons appliqué cette théorie au problème de la détection de vaisseaux sanguins dans des images d'angiographie par résonance magnétique (ARM). Les vaisseaux sont modélisés comme les ε -ensembles de niveaux d'une certaine courbe (leur axe). Soit $I(x)$ l'intensité de l'image ARM. Les parois des vaisseaux correspondent à des points x en lesquels le gradient ∇I de l'image est élevé. On cherche donc, classiquement, les courbes de R^3 qui minimisent la fonctionnelle suivante

$$\int g(|\nabla I(\mathbf{C}(p))|) |\mathbf{C}'(p)| dp$$

-
- [CCCD93] V. CASELLES, F. CATTE, T. COLL, F. DIBOS, « A Geometric Model For Active Contours », *Numerische Mathematik* 66, 1993, p. 1-31.
- [CKS97] V. CASELLES, R. KIMMEL, G. SAPIRO, « Geodesic Active Contours », *The International Journal of Computer Vision* 22, 1, 1997, p. 61-79.
- [KKO⁺95] S. KICHENASSAMY, A. KUMAR, P. OLVER, A. TANNENBAUM, A. YEZZI, « Gradient flows and geometric active contour models », in : *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society Press, Boston, MA, juin 1995.
- [AS96] L. AMBROSIO, H. M. SONER, « Level set approach to mean curvature flow in arbitrary codimension », *J. of Diff. Geom.* 43, 1996, p. 693-737.

où $g : R^+ \rightarrow R^+$ tend vers 0 à l'infini.

Les équations d'Euler-Lagrange conduisent à l'évolution

$$\mathbf{C}_t = \kappa \mathbf{N} - \frac{g'}{g} \Pi \left(\mathbf{H} \frac{\nabla I}{\|\nabla I\|} \right)$$

où \mathbf{H} est le hessien de l'intensité I . Cette équation est précisément du type de (5) et nous avons mis en œuvre la version eulérienne :

$$v_t = \lambda(\nabla v(x,t), \nabla^2 v(x,t)) + \frac{g'}{g} \nabla v(x,t) \cdot \mathbf{H} \frac{\nabla I}{\|\nabla I\|}$$

Les expériences que nous avons effectuées nous ont conduits à modifier légèrement cette équation en nous autorisant d'une part à donner un poids différent au terme de régularisation $\lambda(\nabla v(x,t), \nabla^2 v(x,t))$ et au terme d'attache aux données et d'autre part en encourageant le gradient au ε -ensemble de niveau à être aligné avec celui de l'image. L'équation d'évolution résultante ne dérive plus d'une fonctionnelle :

$$v_t = \lambda(\nabla v, \nabla^2 v) + \rho \frac{g'}{g} \nabla v \cdot \nabla I \nabla v \cdot \mathbf{H} \frac{\nabla I}{\|\nabla I\|}$$

La figure 19 montre quelques uns des résultats obtenus à partir du programme CURVES développé au MIT par Liana Lorigo à partir d'un code développé au CERMICS et à l'INRIA par Renaud Keriven. Ce travail a fait l'objet des publications suivantes [33, 42].

4.3.7 Utilisation de probabilité a priori de forme en segmentation d'images

Participants : Michael Leventon (MIT), Eric Grimson (MIT), Olivier Faugeras.

Mots clés : segmentation d'image, modèles de formes aléatoires.

Le problème traité ici est celui de l'incorporation d'une information a priori de forme dans le processus de segmentation d'images. Notre approche est de combiner une approche "classique" à base de "snakes" géodésiques avec une modélisation de formes stochastiques. Cette modélisation utilise une représentation des formes (courbes 2D ou surfaces 3D) par leur fonction distance signée. Cette fonction distance signée est bien sûr redondante. L'apprentissage d'une forme donnée consiste en l'observation de n occurrences de celle-ci et donc en une collection $\mathcal{T} = \{u_1, \dots, u_n\}$ de fonctions distances, chacune d'entre elle étant échantillonnée sur une grille régulière. On fait l'hypothèse que tous ces vecteurs sont issus d'une distribution gaussienne de moyenne $\mu = \frac{1}{n} \sum_i u_i$. Il est naturel de s'attendre à ce que cette distribution soit concentrée dans un sous-espace de petite dimension du fait de la redondance de la représentation utilisée. On effectue donc la décomposition en valeurs singulières de la matrice $M = [\hat{u}_i]$ où $\hat{u}_i = u_i - \mu$:

$$U \Sigma V^T = M$$

la matrice orthogonale U représente les modes orthogonaux de variation autour de la forme moyenne. Nous choisissons de représenter une forme u par ses k premiers coefficients $\alpha = U_k^T (u - \mu)$ (ses k premiers modes), où U_k est la matrice des k premiers vecteurs colonne de U .

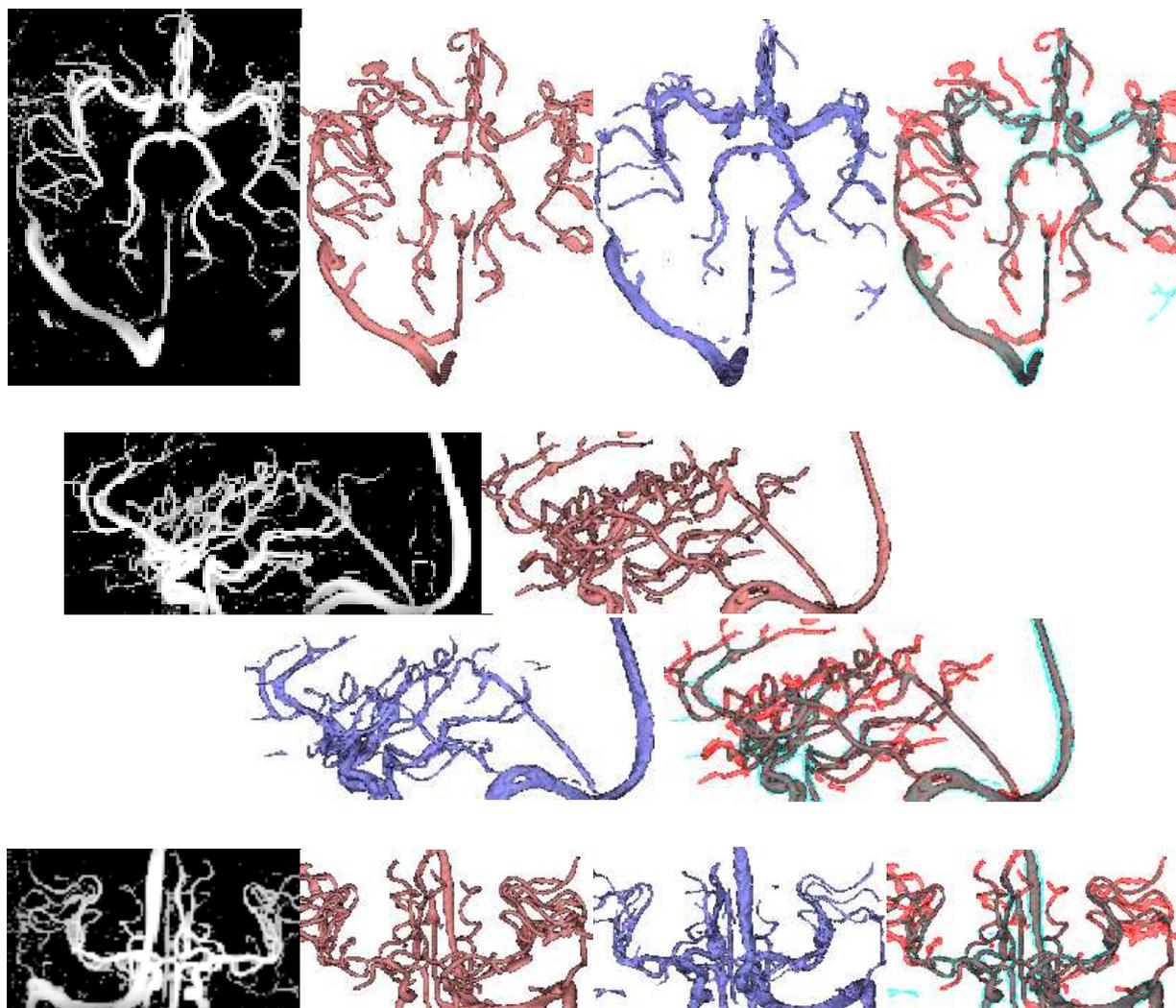


FIG. 19 – Les mêmes données ARM sont présentées de trois points orthogonaux. Pour chaque point de vue, on montre la projection de l'intensité maximale, la segmentation obtenue à l'aide de CURVES (rouge), la segmentation manuelle obtenue par un expert (bleu) et une combinaison des deux afin de faire ressortir les différences. Le programme CURVES, en cours d'évaluation au Brigham Woman's hospital est jugé très performant par les cliniciens.

Réciproquement, étant donné un vecteur à k dimensions, α , une estimée \tilde{u} de la forme qu'il représente, peut être obtenu par la formule

$$\tilde{u} = U_k \alpha + \mu$$

Grâce à l'hypothèse gaussienne, la forme représentée par le vecteur α a la probabilité

$$P(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^k |\Sigma_k|}} e^{-\frac{1}{2} \alpha^T \Sigma_k^{-1} \alpha} \quad (7)$$

où Σ_k est la sous-matrice $k \times k$ de Σ construite à partir de l'élément (1,1).

La figure 20 montre les passages par zéro des fonctions distance signée à une section plane des corps calleux de 6 parmi 51 patients de l'ensemble d'apprentissage. La figure 21 montre les trois premiers modes obtenus. Le processus de segmentation d'image combine

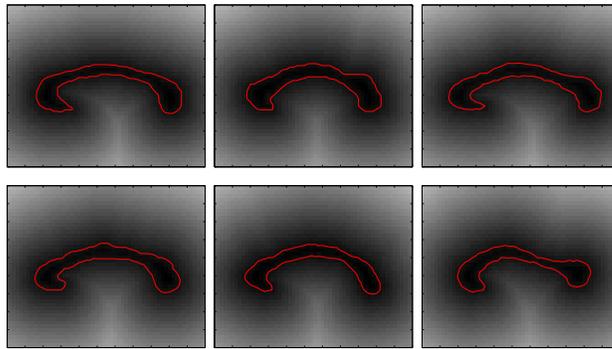


FIG. 20 – Silhouettes des coupes du corps calleux de 6 parmi 51 patients de l'ensemble d'apprentissage. Ce sont les passages par zéro des fonctions distance signées.

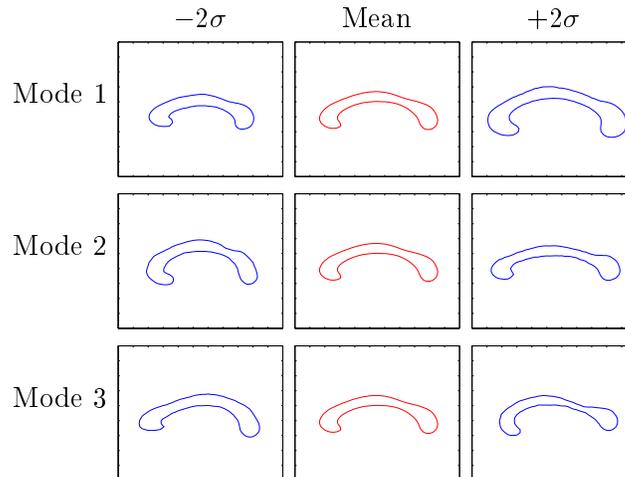


FIG. 21 – Les trois premiers modes de variance de l'ensemble d'apprentissage du corps calleux.

alors deux procédés: un procédé classique basé sur l'évolution d'un "snake" géodésique avec (et c'est l'élément nouveau de notre travail) un procédé d'estimation basée sur le maximum

de vraisemblance des paramètres définissant ce snake. Ces paramètres incluent les paramètres de forme α ainsi que des paramètres de position et d'orientation du snake résumés par un vecteur \mathbf{p} . De manière plus précise, étant donné la forme courante u , on cherche le couple $(\alpha_{MV}, \mathbf{p}_{MV}) = \operatorname{argmax}_{\alpha, \mathbf{p}} P(\alpha, \mathbf{p} \mid u, \nabla I)$ qui maximise la probabilité de α et de \mathbf{p} étant donné la forme u et le gradient de l'image I . L'utilisation de la formule de Bayes et une modélisation adéquate des probabilités $P(u \mid \alpha, \mathbf{p})$, $P(\nabla I \mid \alpha, \mathbf{p}, u)$, $P(\alpha)$ (voir équation (7)) et $P(\mathbf{p})$ permet de résoudre par optimisation numérique ce problème. Pour le moment, la distribution $P(\mathbf{p})$ est uniforme sur tous les paramètres c'est-à-dire que nous n'utilisons pas d'information a priori sur les paramètres de déplacement. Nous obtenons donc une estimation u^* de la forme la plus probable pour l'itération courante.

La mise à jour se fait ensuite de la manière suivante :

$$u(t+1) = u(t) + \lambda_1 \Delta u_{snake}(t) + \lambda_2 (u^*(t) - u(t))$$

où $\Delta u_{snake}(t)$ est la correction de la forme courante $u(t)$ issue du processus de "snake" géodésique et λ_1, λ_2 sont des paramètres ajustables.

La figure 22 montre l'algorithme à l'œuvre sur un exemple de segmentation d'une coupe de fémur. La courbe rouge est le passage par zéro de la surface en cours d'évolution, la verte est l'étape suivante de son évolution, la courbe magenta est l'estimation courante du maximum de vraisemblance. La méthode a été programmée en 2 et 3 dimensions. Notre prochain but

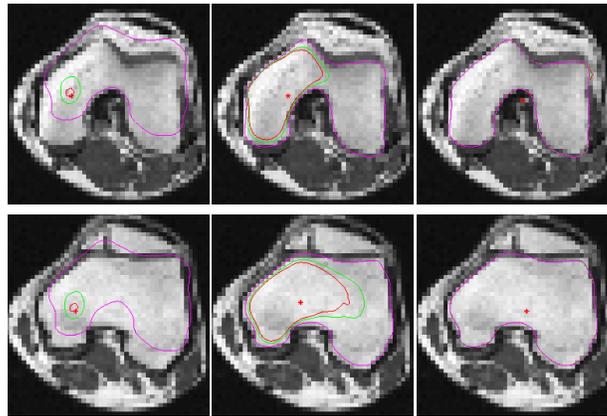


FIG. 22 – Segmentations initiales, intermédiaires et finales de deux coupes IRM du fémur. L'ensemble d'apprentissage est constitué des 18 couches les plus proches, sans la coupe segmentée et ses deux plus proches voisines.

consiste notamment à tenter d'unifier les deux processus en un seul.

5 Actions régionales, nationales et internationales

5.1 Action nationale

Nous avons obtenu le financement par la Direction scientifique d'une action de recherche coopérative intitulée 3D-MEG (<http://cermics.enpc.fr/keriven/3dmeg/>) en collaboration avec

les projets INRIA Gamma, Ondes et Estime et le CERMICS. Nous avons aussi collaboré sur ce thème avec le projet Sinus. Les motivations de cette action sont les suivantes : l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) rend compte de l'activité du cerveau de manière indirecte au travers de la mesure des débits sanguins. Sa résolution spatiale est satisfaisante, mais sa résolution temporelle de l'ordre de quelques secondes est insuffisante. Les spécialistes estiment en effet à quelques millisecondes la résolution nécessaire à une étude convenable des phénomènes cérébraux. La problématique est la suivante : l'Electro-encéphalographie (EEG) et la Magnéto-encéphalographie (MEG) qui mesurent respectivement les champs électrique et magnétique en un certain nombre de points extérieurs au cerveau ont une résolution temporelle satisfaisante. La reconstruction du phénomène tridimensionnel source des signaux observés est un problème inverse difficile qui se pose naturellement sous la forme d'un problème de minimisation. Les méthodes actuellement proposées offrent malheureusement une résolution spatiale très insuffisante... L'objectif est donc de rechercher une modélisation géométrique et physique plus fine des phénomènes liés à l'activité cérébrale en vue d'une augmentation de la résolution spatiale en reconstruction EEG et MEG, voir section 4.3.

5.2 Actions financées par la Commission Européenne

5.2.1 Projet Cumuli

Participants : Didier Bondyfalat, Olivier Faugeras, Diane Lingrand, Théodore Papadopoulo, Thierry Viéville.

Durée : 1996-1999 Dans le cadre du projet Esprit LTR CUMULI, nos partenaires sont le projet MOVI de l'INRIA Grenoble (coordinateur) (F), l'université de Lund (S) et le Fraunhofer-IGD (DE), les sociétés Innovativ Vision (S) et Imetric (SCH). L'objet du contrat est la compréhension de calculs pour Images multiples.

5.2.2 Projet Improofs

Participants : Sylvain Bougnoux, Quentin Delamarre, Rachid Deriche, Olivier Faugeras, Bernard Gai-Chéca, Théodore Papadopoulo.

Dates : 1997-2000

Dans le cadre du projet IMPROOFS (IMage PROcessing Operations for Forensic Support), nos partenaires sont la Katholieke Universiteit Leuven, ESAT-MI2 (B), l'University of Oxford, Robotics Research Group (UK), Royal Institute of Technology, KTH, NADA (S), le Nationaal Instituut voor Criminalistiek & Criminologie (B) et le Forensic Science Services Metropolitan Laboratory (UK). Ce projet concerne le développement et l'application de techniques de traitement et d'analyse des images à des fins d'aide au monde judiciaire (problèmes de criminalité, etc.)

5.3 Réseaux et groupes de travail internationaux

5.3.1 Réseau TMR VIRGO

Durée : 1996-1999

Dans le cadre du projet VIRGO (Vision-Based Robot Navigation Research Network), nos partenaires sont ICS-Forth (coordinateur)(Gr), l'université d'Aalborg (DK), l'université de Gênes (It), l'université de Graz (A), le Kungliga Tekniska hogskolan (KTH)(S), G.M.D. (D), l'université de Zürich (SCH), l'université de Copenhague (DK), et l'université de Bonn (D). l'objet de ce projet est la coordination de la recherche européenne dans le domaine du développement de systèmes robotiques intelligents capables de naviguer dans des environnements partiellement inconnus et éventuellement variables. La page du projet est <http://www.ics.forth.gr/virgo/>.

5.4 Relations bilatérales internationales

5.4.1 Europe

Un projet d'action intégrée PICASSO avec l'équipe de Luis Alvarez de l'université de Las Palmas (Dept. Inform. & Syst.) a été accepté pour financement pour 1 année, renouvelable. Ce renouvellement a été obtenu pour 1999. Ce projet porte sur l'application des méthodes mathématiques à base d'EDP en Image et Vision par Ordinateur.

5.4.2 Chine

Olivier Faugeras est membre du comité scientifique du laboratoire franco-chinois (LIAMA) dirigé par Song de Ma et Olivier Monga.

5.4.3 Divers

R. Deriche est en charge des affaires européennes pour l'UR Sophia depuis janvier 1993, et en charge des relations internationales pour l'UR de Sophia depuis avril 1996. Voir <http://www.inria.fr/robotvis/personnel/der/ec/ec.html>.

6 Diffusion de résultats

6.1 Animation de la communauté scientifique

R. Deriche est membre du comité de rédaction des revues scientifiques TS, Traitement du Signal et TSI, Technique et Science Informatiques. Il est membre du comité des professeurs invités et du comité des bourses à l'UR de Sophia. Il est coanimateur du GT Vision et Perception au sein du GDR Mathématiques des systèmes perceptifs et cognitifs (avec Laurent Cohen et Laurent Younes). Il est membre de la Commission de Spécialiste CS 61 *Génie informatique, automatique et traitement du signal* à l'université de Nice Sophia Antipolis. Il est le correspondant UR pour les Affaires européennes depuis Janvier 1993 (<http://www.inria.fr/robotvis/personnel/der/ec/ec.html>) et le Correspondant UR pour les Relations Internationales depuis Avril 1996.

Olivier Faugeras est membre de l'Académie des Sciences de l'Institut de France. Il est chargé de mission INRIA pour la Prospective. Il est co-éditeur en chef de l'« International Journal of Computer Vision » (IJCV), membre du comité éditorial de l'« AI Journal ». Il est membre suppléant de la Commission de Spécialiste CS 61 *Génie informatique, automatique et traitement du signal* à l'université de Nice Sophia Antipolis.

6.2 Enseignement universitaire

6.2.1 D.E.A. Aravis

Université de Nice Sophia Antipolis : Rachid Deriche est responsable du module de Techniques avancées pour l'imagerie et la vision, Olivier Faugeras et Théodore Papadopoulo sont co-responsables du module de Vision 3D, Thierry Viéville est responsable du module de Vision dynamique. Chaque module est d'une durée de 15 heures. Rachid Deriche et Olivier Faugeras sont membres du comité scientifique de ce DEA. Rachid Deriche y est responsable des stages proposés aux élèves.

6.2.2 D.E.A. Informatique

D.E.A. commun aux universités Paris XI et Paris XII, le Centre d'Orsay, l' E.N.S. Cachan, Sup'elec : Rachid Deriche est co-responsable du module Perception 3D qu'il enseigne en commun avec Nicholas Ayache (projet Epidaure). Module de 24 heures.

6.2.3 D.E.A Algorithmique

DEA commun à l'École Polytechnique, l'E.N.S. Ulm, l'E.N.S. Cachan, les universités Paris VI, Paris VII, Paris-Sud. Olivier Faugeras et Rachid Deriche enseignent un module de 10 heures sur la vision par ordinateur.

6.2.4 Massachusetts Institute of Technology

Olivier Faugeras y est professeur à temps partiel dans le département d'« Electrical Engineering » et de « Computer Science ». Il est rattaché au Laboratoire d'Intelligence Artificielle.

6.3 Autres enseignements

6.3.1 Institut National des Télécommunications- Evry

École d'Ingénieurs - 3ème année - Option : Traitement et Applications de l'Image. Rachid Deriche enseigne au sein des modules de « Vision par Ordinateur » et « Imagerie Dynamique » (18h).

6.3.2 EERIE

École pour les Études et la Recherche en Informatique et Electronique - Nimes - École d'Ingénieurs - 3ème année. Option : Imagerie Numérique. Rachid Deriche est responsable du module « Vision par Ordinateur » (18h).

6.3.3 Computer Vision Course broadcast by satellite

Rachid Deriche a participé comme conférencier à ce cours (EuroPACE 2000-ECVNet-K.U. Leuven).

6.3.4 Divers

Rachid Deriche enseigne aussi la Vision par Ordinateur à l'École des Mines de Paris (6H) et à l'ENSTA (3H).

6.3.5 ISIA

Thierry Viéville y est responsable du cours de Calcul Symbolique : 6 heures.

6.3.6 École des Mines

Thierry Viéville y est responsable du cours de Vision Robotique (30 heures dont 6 enseignées par lui, 6 par Rachid Deriche).

6.3.7 ESSI

Thierry Viéville y est responsable des cours de Vision 3D et de Vision Temps-Réel : 50 heures.

6.3.8 ESINSA

Thierry Viéville y est responsable des cours de Vision 3D et de Vision Temps-Réel : 12 heures.

6.3.9 Université de Montevideo

Theodore Papadopoulos a donné une semaine de cours sur la vision 3D (section Electrical Engineering) 20 heures.

6.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Rachid Deriche a été membre du comité de programme de la IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR'99, de l'International Conference on Scale-Space Theory in Computer Vision - Scale-Space'99.

Olivier Faugeras est membre du comité des sages de l'« European Conference on Computer Vision » (ECCV). Il est aussi membre du comité de programme de la IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR'99 et membre du comité des sages de l'International Conference on Scale-Space Theory in Computer Vision - Scale-Space'99.

7 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] R. DERICHE, T. BLASZKA, « Recovering and Characterizing Image Features Using An Efficient Model Based Approach », *in: Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, IEEE, p. 530–535, New-York, NY, juin 1993.
- [2] R. DERICHE, O. FAUGERAS, « Les EDP en Traitement des Images et Vision par Ordinateur », *Traitement du Signal* 13, 6, 1996, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/deriche-faugeras:96b.ps.gz>.
- [3] R. DERICHE, G. GIRAUDON, « A Computational Approach For Corner And Vertex Detection », *The International Journal of Computer Vision* 10, 2, 1993, p. 101–124, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/deriche-giraudon:93.ps.gz>.
- [4] F. DEVERNAY, *Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces*, thèse de doctorat, École Polytechnique, février 97, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Thesis/devernay:97.ps.gz>.
- [5] O. FAUGERAS, R. KERIVEN, « On projective plane evolution », *in: ICAOS'96*, M.-O. Berger, R. Deriche, I. Herlin, J. Jaffré, J.-M. Morel (éditeurs), *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 219, Springer-Verlag, p. 66–73, 1996, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/faugeras-keriven:96.ps.gz>.
- [6] O. FAUGERAS, R. KERIVEN, « Level set methods and the Stereo Problem », *in: Proc. of First International Conference on Scale-Space Theory in Computer Vision*, B. ter Haar Romeny, L. Florack, J. Koenderink, M. Viergever (éditeurs), *Lecture Notes in Computer Science*, 1252, Springer, p. 272–283, 1997.
- [7] O. FAUGERAS, R. KERIVEN, « Variational principles, Surface Evolution, PDE's, level set methods and the Stereo Problem », *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, Use faugeras-keriven:98 instead.
- [8] O. FAUGERAS, T. LUONG, S. MAYBANK, « Camera self-calibration: theory and experiments », *in: Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision*, G. Sandini (éditeur), *Lecture Notes in Computer Science*, 588, Springer-Verlag, p. 321–334, Santa Margherita Ligure, Italy, mai 1992.
- [9] O. FAUGERAS, B. MOURRAIN, « About the correspondences of points between n images », *in: Proceedings of the Workshop on the representation of visual scenes*, Cambridge, Massachusetts, USA, juin 1995.
- [10] O. FAUGERAS, « What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig », *in: Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision*, G. Sandini (éditeur), *Lecture Notes in Computer Science*, 588, Springer-Verlag, p. 563–578, Santa Margherita Ligure, Italy, mai 1992.
- [11] O. FAUGERAS, *Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint*, MIT Press, 1993.
- [12] O. FAUGERAS, « Stratification of 3-D vision: projective, affine, and metric representations », *Journal of the Optical Society of America A* 12, 3, mars 1995, p. 465–484, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/tmp/faugeras/josa95.ps.gz>.
- [13] Y. LEEDAN, P. MEER, « Heteroscedastic regression in computer vision: problems with bilinear constraint », *to appear in IJCV*, 1999, <http://www.caip.rutgers.edu/~meer/RIUL/PAPERS/heteroscedastic.ps.gz>.
- [14] D. LOWE, « Robust Model based Motion Tracking Through the Integration of Search and Estimation », *International Journal of Computer Vision* 8, 2, 1992, p. 113–122.

- [15] B. LUCAS, T. KANADE, « An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision », in : *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, p. 674–679, 1981.
- [16] Q.-T. LUONG, O. FAUGERAS, « Self-Calibration of a Moving Camera from Point Correspondences and Fundamental Matrices », *The International Journal of Computer Vision* 22, 3, 1997, p. 261–289.
- [17] Q.-T. LUONG, T. VIÉVILLE, « Canonical representations for the geometries of multiple projective views », *CVGIP: Image Understanding* 64, 2, 1996, p. 193–229.
- [18] Q.-T. LUONG, *Matrice Fondamentale et Calibration Visuelle sur l'Environnement-Vers une plus grande autonomie des systèmes robotiques*, thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, décembre 1992.
- [19] S. J. MAYBANK, O. D. FAUGERAS, « A Theory of Self-Calibration of a Moving Camera », *The International Journal of Computer Vision* 8, 2, août 1992, p. 123–152.
- [20] S. OSHER, J. SETHIAN, « Fronts propagating with curvature dependent speed : algorithms based on the Hamilton-Jacobi formulation », *Journal of Computational Physics* 79, 1988, p. 12–49.
- [21] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « A PDE-based Level Set Approach for Detection and TRacking of Moving Objects », in : *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, IEEE Computer Society Press, Bombay,India, janvier 1998, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/paragios-deriche:98.ps.gz>.
- [22] G. SAPIRO, A. TANNENBAUM, « Area and Length Preserving Geometric Invariant Scale-Spaces », *PAMI* 17, 1, janvier 1995, p. 67–72.
- [23] J. A. SETHIAN, *Level Set Methods*, Cambridge University Press, 1996.
- [24] C. ZELLER, *Calibration Projective Affine et Euclidienne en Vision par Ordinateur*, thèse de doctorat, École Polytechnique, février 1996, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Thesis/zeller:96.ps.gz>.
- [25] Z. ZHANG, R. DERICHE, O. FAUGERAS, Q.-T. LUONG, « A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry », *Artificial Intelligence Journal* 78, octobre 1995, p. 87–119.

Articles et chapitres de livre

- [26] D. BONDYFALAT, B. MOURRAIN, T. PAPADOPOULO, « An Application of Automatic Theorem Proving in Computer Vision », in : *Automated Deduction in Geometry*, D. Gao, X.-S. and Wang et L. Yang (éditeurs), *LNAI*, 1669, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1999.
- [27] G. CSURKA, O. FAUGERAS, « Algebraic and Geometric Tools to Compute Projective and Permutation Invariants », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21, 1, janvier 1999.
- [28] J. GOMES, O. FAUGERAS, « Reconciling Distance Functions and Level Sets », in : *Scale-Space Theories in Computer Vision*, M. Nielsen, P. Johansen, O. Olsen, et J. Weickert (éditeurs), 1682, Springer, 1999.
- [29] G. HERMOSILLO, O. FAUGERAS, J. GOMES, « Unfolding the Cerebral Cortex Using Level Set Methods », in : *Scale-Space Theories in Computer Vision*, M. Nielsen, P. Johansen, O. Olsen, et J. Weickert (éditeurs), 1682, Springer, 1999.
- [30] P. KORNPBOST, R. DERICHE, G. AUBERT, « Image Sequence Analysis via Partial Differential Equations », *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 11, 1, octobre 1999, p. 5–26.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [31] Q. DELAMARRE, O. FAUGERAS, « 3D Articulated Models and Multi-View Tracking with Silhouettes », *in: Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, IEEE Computer Society Press, p. 716–721, Corfu, Greece, septembre 1999.
- [32] J. GOMES, O. FAUGERAS, « Segmentation of the inner and outer surfaces of the cortex in man and monkey: an approach based on Partial Differential Equations », *in: Proc. of the 5th Int. Conf. on Functional Mapping of the Human Brain*, 1999.
- [33] L. LORIGO, O. FAUGERAS, W. GRIMSON, R. KERIVEN, R. KIKINIS, C.-F. WESTIN, « Co-Dimension 2 Geodesic Active Contours for MRA Segmentation », *in: Proc. Int'l Conf. Information Processing in Medical Imaging*, p. 126–139, juin 1999.
- [34] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « Geodesic Active Contours for Supervised Texture Segmentation », *in: Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, Fort Collins, Colorado, juin 1999.
- [35] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « Geodesic Active Regions for Motion Estimation and Tracking », *in: Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, IEEE Computer Society Press, Corfu, Greece, 1999.
- [36] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « Geodesic Active Regions for Supervised Texture Segmentation », *in: Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, IEEE Computer Society Press, Corfu, Greece, 1999.
- [37] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « Unifying Boundary and Region-based Information for Geodesic Active Tracking », *in: Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, Fort Collins, Colorado, juin 1999.
- [38] C. VESTRI, F. DEVERNAY, « "Redressement de façades", propositions et étude d'une nouvelle méthodologie pour l'aide à la reconstruction automatique de bâtiments », *in: Bulletin SFPT no 153, ISPRS Workshop*, Institut Géographique National, St Mandé, France, avril 1999.

Rapports de recherche et publications internes

- [39] O. FAUGERAS, F. CLÉMENT, R. DERICHE, R. KERIVEN, T. PAPADOPOULOU, J. ROBERTS, T. VIÉVILLE, F. DEVERNAY, J. GOMES, G. HERMOSILLO, P. KORNPORST, D. LINGRAND, « The inverse EEG and MEG problems: The adjoint space approach I: The continuous case », *rapport de recherche n° 3673*, INRIA, mai 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3673.html>.
- [40] J. GOMES, O. FAUGERAS, « Reconciling Distance Functions and Level Sets », *rapport de recherche n° 3666*, INRIA, avril 1999.
- [41] G. HERMOSILLO, O. FAUGERAS, J. GOMES, « Cortex Unfolding Using Level Set Methods », *rapport de recherche n° 3663*, INRIA, avril 1999.
- [42] L. LORIGO, O. FAUGERAS, W. GRIMSON, R. KERIVEN, R. KIKINIS, C.-F. WESTIN, « Co-dimension 2 Geodesic Active Contours for MRA Segmentation », *rapport de recherche n° 1662*, MIT, 1999.
- [43] M. I. LOURAKIS, R. DERICHE, « Camera Self-Calibration Using the Singular Value Decomposition of the Fundamental Matrix: From Point Correspondences to 3D Measurements », *Research Report n° 3748*, INRIA Sophia-Antipolis, août 1999, <http://www.inria.fr/rapports/sophia/RR-3748.html>.
- [44] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « Coupled Geodesic Active Regions for Image Segmentation », *rapport de recherche n° 3783*, I.N.R.I.A., octobre 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3783.html>.

- [45] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « Geodesic Active Regions for Motion Estimation and Tracking », *rapport de recherche n° 3631*, INRIA, France, mars 1999, <http://www.inria.fr/rapports/sophia/RR-3631.html>.
- [46] D. TSCHUMPERLE, « Restauration et Interpolation d'images vectorielles par EDP », *rapport de recherche*, DEA ARAVIS - UNSA, juin 1999, Stage proposé et encadré par R. DERICHE.