

Projet ROBOTVIS

Robotique et Vision par Ordinateur

Sophia Antipolis

THÈME 3B

R *apport*
d'Activité

2001

Table des matières

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, Robotvis/Semir]

Pierre Kornprobst [CR]

Théodore Papadopoulo [CR]

Thierry Viéville [CR]

Ingénieur Associé

Lionel Champalaune [à compter de septembre 2001]

Ingénieur Expert

Gerardo Hermosillo-Valadez [à compter de novembre 2001]

Chercheurs post-doctorants

Diane Lingrand [post-doc INRIA Sophia-Antipolis]

Annelise Paradis [post-doc INRIA sur Action MC2, Hôpital de la Salpêtrière, Paris, jusqu'au 1.10.01]

Jan Kybic [post-doc INRIA, sur contrat Mapawamo]

Chercheurs doctorants

Frédéric Abad [Bourse PACA/ADER avec entreprise "RealViz"]

Cédric Barthoux [Bourse INRIA (Centre/Robotvis) jusqu'au 30 juin 2001]

Jacques Bride [Bourse CIFRE avec entreprise "Realviz"]

Christophe Chef d'hôtel [Bourse INRIA, à compter du 1er Août 2001]

Quentin Delamarre [Société "XD Production", Angoulême]

François Gaspard [Bourse INRIA jusqu'au 28 février 2001]

Cyrille Gauclin [Société "XD Production", Angoulême]

José Gomes [Société "IBM research Center", New York]

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

Lucéro Lopez-Perez [Bourse SFERE/CONACYT complémentée INRIA, Université de Nice Sophia-Antipolis, à compter du 1er octobre 2001]

Emmanuel Prados [Bourse M.E.S.R, Université de Nice Sophia-Antipolis, à compter du 1er octobre 2001]

Mikaël Rousson [Bourse INRIA, Université de Nice Sophia-Antipolis, à compter du 15 octobre 2001]

Matthieu Spaier [Bourse de l'ENS, Université de Nice Sophia-Antipolis, à compter du 1er octobre 2001]

Bertrand Thirion [Détachement de l'ENST sur poste d'accueil, Université de Nice Sophia-Antipolis]

David Tschumperlé [Bourse M.E.S.R complémentée INRIA, Université de Nice-Sophia Antipolis]

Collaborateurs extérieurs

Gilles Aubert [UNSA]
Michel Barlaud [I3S, Université de Nice Sophia-Antipolis]
Patrick Chauvel [INRSEM E9926, Hôpital de la Timone, Marseille]
Maureen Clerc [CR, Cermics/ENPC]
Renaud Keriven [CERMICS/ENPC, Marne La Vallée]
Guy Orban [Université de Leuven, Belgique]
Annelise Paradis [CR CNRS, à compter du 1er octobre 2001]
Emmanuel Risler [UNSA, INLN]
Florent Segonne [Realviz]

Stagiaires

Emmanuel Prados [Stage de DEA STIC, Université de Nice Sophia-Antipolis, du 1er avril 2001 au 30 septembre 2001]
Jean-Pascal Pavone [Stage de DEA STIC, Université de Nice Sophia-Antipolis, du 1er avril 2001 au 30 septembre 2001]
Valéry Valentin [Stage de DEA STIC, Université de Nice Sophia-Antipolis, du 1er avril 2001 au 30 septembre 2001]
Martin Sengel [Stage de doctorant, Graz University, du 23 avril 2001 au 31 août 2001 dans le cadre du contrat VIRGO]
Lucero Lopez-Perez [Stage de DEA, ENS Cachan, du 15 mai 2001 au 30 septembre 2001]

Jean-Christophe Imbert [Stage de deuxième année ENS Cachan, du 18 juin 2001 au 30 août 2001]

Christian Saunier [Stage de DEA, projet VISTA, financement sur l'ARC-MC2, du 14 mai 2001 au 31 octobre 2001]

Rami Kanouche [Stage de DEA à l'INT Paris, du 26 juin 2001 au 20 octobre 2001 dans le cadre de l'ARC LSF]

Fabien Lejeune [Stage de DEA au CERMICS, du 1 avril 2001 au 31 juillet 2001]

Matthieu Spaïer [Stage de DEA, ENS Cachan, du 1er mai 2001 au 30 septembre 2001]

Visiteurs

Christophe Chefd'hôtel [Coopération au M.I.T. de Boston, janvier à juillet 2001]

Steve Maybank [Reading University, UK, septembre 2000]

Rolando Grave [Hôpital Universitaire de Genève]

John Oliensis [NEC Research Intitute-Princeton, Mai 2001]

Michal Irani [The Weizmann Institute, Israël, septembre 2001]

Nir Sochen [University of Tel Aviv, Israël, septembre 2001]

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 méthodologiques qui guident notre approche.

Le premier est l'utilisation de méthodes algébriques et géométriques pour l'étude des systèmes multi-caméras. Ces méthodes nous ont permis de développer des algorithmes originaux d'étalonnage de caméras qui ne nécessitent pas l'utilisation de mires de calibration et qui ont trouvé des applications industrielles importantes (voir ci-dessous).

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).

Nous avons montré que bon nombre de ces méthodes variationnelles étaient applicables à des problèmes, apparemment très différents de ceux en traitement d'images, de mesure de l'activité cérébrale, comme les problèmes inverses en Magnétoencéphalographie et en Electroencéphalographie.

Nous avons un assez grand nombre de collaborations avec des industriels français et étrangers vers lesquels nous transférons beaucoup de notre savoir et de nos algorithmes. Nous avons contribué à la création d'une « jeune pousse », **RealViZ**, qui utilise largement nos travaux en géométrie.

Les principales collaborations actuelles au niveau européen et français sont les suivantes. La première est le projet européen **Mapawamo** dont le but est de faire progresser l'État de l'Art en traitement et en modélisation de données d'IRM pour comparer la perception visuelle chez l'homme et le singe. La deuxième est le projet européen **CogViSys** dont le but est de réaliser un système de vision générique dans lequel la connaissance est représentée de manière explicite. Ce système sera illustré avec trois types d'applications : traduction de la langue des signes en langage naturel, description en langage naturelle de séquences de films, et de scènes de rues (cf le projet **Orion**). La troisième est le projet européen **Insight2++** dont le but est de mieux comprendre la vision humaine en combinant des approches neurophysiologiques, psychophysiques, informatiques et mathématiques. La quatrième est le projet français **Rotoscoto**, en collaboration avec la société **RealViz**, dont le but est de développer des méthodes de détournage d'objets dans des séquences d'images plus performantes pour des applications de réalité augmentée ou d'effets spéciaux.

Dans ce contexte, nos efforts ont porté plus spécialement sur les points suivants, détaillés en Sections 5.1, 5.2 et 5.3 :

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

3 Fondements scientifiques

3.1 Géométrie d'un ensemble de vues

Mots clés : géométrie projective, géométrie affine, géométrie euclidienne, étalonnage de caméras, stéréoscopie multivue, suivi dans des séquences stéréoscopiques, synthèse de vues à partir d'images.

Une des questions centrales de la vision par ordinateur est celle du calcul, à partir d'un certain nombre de vues d'une même scène supposée statique dans un premier temps, d'une description géométrique tridimensionnelle de celle-ci. Lorsqu'on pense description géométrique, on pense en général description euclidienne, c'est-à-dire que l'on s'attend à pouvoir mesurer dans la scène des invariants du groupe des similitudes, voire des déplacements, c'est-à-dire des angles et des rapports de longueur, voire des longueurs.

Or ceci ne va pas de soi pour les raisons suivantes. Un appareil photographique, une caméra vidéo, une caméra, produisent des images qui, géométriquement, sont des projections sur une surface plane ou à peu près plane (que nous appelons dans la suite la rétine) telle qu'un film ou un ensemble de photodétecteurs et, photométriquement, sont le résultat d'une interaction complexe entre les sources de lumière, les objets observés, au travers de leur forme géométrique et de leurs propriétés de réflectance, et les capteurs eux-mêmes, au travers de leur sensibilité spectrale, temporelle, etc...

De tout ceci découle d'abord le fait bien connu que l'on perd une dimension d'espace (la distance à la caméra) en acquérant une image. Un regard plus attentif sur la géométrie de la formation des images montre dans un deuxième temps que le cadre naturel pour analyser l'opération de projection est plutôt celui de la géométrie projective que celui de la géométrie euclidienne : en l'absence d'information supplémentaire, la seule information géométrique à laquelle on puisse avoir accès à partir des images brutes est une information projective. De manière plus précise, on dit que l'on sait reconstruire la scène modulo une transformation projective tridimensionnelle quelconque et non pas, comme on l'espérait au départ, modulo une transformation euclidienne ou une similitude. Ce résultat a été obtenu en 1992 [?].

Cependant, même pour une reconstruction projective, il est nécessaire de disposer de plusieurs vues prises simultanément, on parle alors de stéréo ou de séquence spatiale, ou bien d'une séquence temporelle. Pour obtenir cette reconstruction, il est nécessaire de commencer par extraire des primitives images qui soient précises, robustes au bruit et qui se caractérisent par des attributs très discriminants afin de pouvoir établir des correspondances. Les approches décrites dans [?] touchent à la détection des singularités de contours de type points anguleux ou jonctions multiples, qui sont des primitives images très pertinentes et très discriminantes. De manière complémentaire, les approches par modèles décrites dans [DB93] permettent la détection avec des précisions sous-pixelles de primitives images de type contours, points anguleux ou jonctions multiples. D'une manière très générale, l'appariement entre les diverses primitives images s'obtient ainsi en calculant, à l'aide d'opérateurs locaux dans l'image et dans le temps,

[DB93] R. DERICHE, T. BLASZKA, « Recovering and Characterizing Image Features Using An Efficient Model Based Approach », *in: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, IEEE, p. 530-535, New-York, juin 1993.

des attributs. Ces attributs doivent être, autant que faire se peut, *invariants* à des transformations sur les images qui ne changent pas leur contenu, par exemple à des transformations monotones sur les intensités ou bien encore à des transformations géométriques induites par le changement de point de vue. Nous reviendrons plus loin sur cet aspect (voir Section 3.2). Ces attributs, qui sont donc attachés à un élément d'image ou pixel, sont ensuite comparés entre eux. Par exemple, si l'on dispose de deux images (c'est le cas de la stéréoscopie classique), on compare les attributs calculés en deux pixels dans chaque image. Si les deux pixels en question peuvent se situer n'importe où dans les deux images, le nombre de possibilités *d'appariements* est égal au produit du nombre de pixels.

Une analyse élémentaire de la géométrie d'une paire de caméras montre qu'il n'en est rien et que deux pixels ne peuvent être appariés que si chacun se trouve sur une droite déterminée par l'autre. Cette droite s'appelle une droite *épipolaire*. La correspondance entre un pixel et sa droite épipolaire est une relation *projective*, c'est-à-dire un morphisme de rang 2 entre la rétine modélisée comme un plan projectif \mathcal{P}^2 et son dual \mathcal{P}^{*2} , ensemble des droites de l'autre rétine. Dans la pratique, ce morphisme est représenté par une matrice 3×3 , baptisée matrice fondamentale, de rang 2, et dont les propriétés ont été mises en évidence et étudiées par l'équipe [Luo92]. Le problème de l'estimation de cette matrice à partir de correspondances est un problème difficile que nous n'avons résolu de manière satisfaisante que récemment [?]. Algébriquement, ceci se traduit par l'existence d'une contrainte algébrique de degré deux entre les coordonnées de deux pixels appariables.

Plus généralement, lorsque l'on a à faire à plus de deux images, le problème de la complexité de l'obtention des appariements se pose de manière encore plus aiguë. Cependant, la géométrie projective permet encore, comme dans le cas de deux images, de simplifier considérablement le processus d'appariement. Si l'on considère le cas de trois images, on montre que les points appariables satisfont des contraintes algébriques de degré trois [Har97, Sha95]. Celles-ci sont issues d'une application bilinéaire de $\mathcal{P}^{*2} \times \mathcal{P}^{*2}$ dans \mathcal{P}^{*2} qui donne, étant donné deux droites dans deux images, la droite dans la troisième vue qui est l'image de la même droite tridimensionnelle que celle qui a donné lieu aux deux premières. Cette application a été baptisée le tenseur trifocal. De même que les matrices fondamentales sont de rang inférieur ou égal à deux, c'est-à-dire constituent une sous-variété algébrique de l'espace projectif \mathcal{P}^8 , les tenseurs trilineaires constituent une variété algébrique de l'espace projectif \mathcal{P}^{26} dont les équations ont été établies [FP98b]. Comme dans le cas de la matrice fondamentale, l'estimation du tenseur trifocal à partir de correspondances dans trois images est un problème ardu à cause des contraintes algébriques qui existent entre ses coefficients et n'a été résolu dans sa généralité que récemment [FP98a].

-
- [Luo92] 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.
- [Har97] R. I. HARTLEY, « Lines and points in three views and the trifocal tensor », *The International Journal of Computer Vision* 22, 2, mars 1997, p. 125–140.
- [Sha95] A. SHASHUA, « Algebraic functions for recognition », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17, 8, 1995, p. 779–789.
- [FP98b] O. FAUGERAS, T. PAPADOPOULOU, « A nonlinear method for estimating the projective geometry of three views », in: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, IEEE Computer Society Press, p. 477–484, Bombay, Inde, janvier 1998.
- [FP98a] O. FAUGERAS, T. PAPADOPOULOU, « Grassmann-Cayley Algebra for Modeling Systems of Cameras

Si l'on passe maintenant à quatre images et plus, il se passe un phénomène curieux. Tout d'abord pour quatre images, on a démontré que les contraintes algébriques de degré quatre qui existent entre les coordonnées de quadruplets de points appariables sont en fait algébriquement dépendantes des contraintes d'ordre deux et trois qui existent entre les paires et les triplets de points. Ensuite, l'introduction d'une cinquième, puis d'une sixième image, etc... n'apporte en fait rien de plus : les contraintes d'ordre trois sont suffisantes [FM95]. On a donc aujourd'hui une idée assez précise de la manière dont la géométrie de N vues d'une même scène peut être décrite et estimée dans un cadre projectif et comment les contraintes correspondantes peuvent être utilisées pour concevoir des algorithmes de stéréoscopie.

Nous mentionnions plus haut l'importance pratique d'obtenir une description d'une scène qui soit non pas projective mais affine ou euclidienne. Ceci nécessite de connaître non seulement les tenseurs trifocaux qui sont des êtres projectifs mais aussi le plan à l'infini pour le cas affine et les paramètres internes des caméras dans le cas euclidien. L'estimation de ces derniers a préoccupé et préoccupe encore la communauté de photogrammétrie [Zel52, Sla80] ainsi que celle de vision par ordinateur qui toutes deux ont utilisé l'idée que cette estimation passait par l'utilisation de points d'amer situés dans la scène observée et dont les coordonnées cartésiennes sont connues. En vision robotique ces points constituent ce qu'on appelle une mire d'étalonnage.

L'une des découvertes importantes de l'équipe est d'avoir démontré que ces points d'amer étaient en fait inutiles et que les paramètres internes des caméras pouvaient être obtenus en utilisant l'invariance de la conique absolue, ou ombilic, par le groupe des similitudes. L'analyse géométrique sous-jacente consiste à considérer l'espace euclidien habituel comme un sous-espace affine d'un espace projectif ambiant dans lequel on identifie un hyperplan particulier comme le plan à l'infini (en pratique les points situés très loin de la caméra) et, dans cet hyperplan, un cercle imaginaire de rayon $i = \sqrt{-1}$. À cette *stratification* de l'espace en projectif, affine et euclidien correspond une stratification du groupe de transformations géométriques opérant sur la scène en groupe projectif des homographies, groupe affine (le sous groupe du précédent qui laisse le plan à l'infini globalement invariant) et le sous groupe des similitudes (le sous groupe du groupe affine qui laisse l'ombilic globalement invariante) [Fau95, Zel96]. On remarque ensuite que, puisque la conique imaginaire image de l'ombilic dans une caméra doit être invariante aux mouvements de celle-ci, les coefficients de son équation doivent être des fonctions des paramètres internes de la caméra mais ne doivent pas dépendre de sa position et

and the Algebraic Equations of the Manifold of Trifocal Tensors », *Transaction of the Royal society A 356*, mai 1998, p. 1123–1152.

- [FM95] 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.
- [Zel52] M. ZELLER, *Textbook of Photogrammetry*, H.K. Lewis & Company: Londres, 1952.
- [Sla80] C. C. SLAMA (éditeur), *Manual of Photogrammetry*, édition Fourth, American Society of Photogrammetry, 1980.
- [Fau95] 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/html/Papers/faugeras:95.ps.gz>.
- [Zel96] 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>.

de son orientation dans l'espace [?]. Il ne reste plus alors qu'à développer les algorithmes qui, à partir de correspondances entre images, calculent les paramètres internes pour aboutir à des procédures de calibration qui ne nécessitent plus l'utilisation de points d'amer dans la scène d'où une beaucoup plus grande flexibilité d'application [?]^[FLM92,Luo92].

3.2 Équations aux dérivées partielles et vision précoce

Mots clés : équation aux dérivées partielles, méthode de niveaux, restauration et amélioration d'images, stéréoscopie, suivi dans des séquences d'images.

Dans la section précédente nous avons mentionné deux points sur lesquels nous ne nous sommes pas appesantis. Le premier est celui des attributs d'images qu'il est nécessaire de calculer afin d'établir des correspondances entre points d'images. Le second est celui de l'invariance de certains éléments attachés aux images, par exemple celle des attributs précédents à des transformations monotones de l'intensité de l'image ou encore à des changements de point de vue. Nous avons aussi mentionné l'invariance du plan à l'infini par le groupe des transformations affines et celle de l'ombilic par celui des similitudes.

Ces deux remarques ont constitué le point de départ d'un ensemble de travaux de l'équipe dans lesquels nous avons essayé de reprendre les problèmes d'extraction d'attributs d'images de deux points de vue différents. Nous nous sommes tout d'abord efforcés de nous placer soit dans un cadre variationnel pour analyser les phénomènes dits de vision précoce, dont l'extraction d'attributs est un exemple, soit directement dans un cadre différentiel. Nous nous sommes aussi efforcés de développer des représentations invariantes de ces phénomènes. Notons tout d'abord que cette approche n'est pas révolutionnaire. Pour se limiter à quelques exemples, l'approche invariante est au cœur de la Morphologie Mathématique proposée par Serra et Matheron [Mat75,Ser82] et l'approche invariante et l'approche variationnelle/différentielle sont l'une des principales sources d'inspiration des travaux dits du Cérémade [AGLM92] ou des travaux sur l'évolution invariante des courbes [GH86,Gra87,ST93].

Nos apports ont été de plusieurs types. Après un état de l'art sur l'utilisation des méthodes

-
- [FLM92] 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), Springer-Verlag, p. 321–334, Santa Margherita, Italie, mai 1992.
 - [Luo92] 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.
 - [Mat75] G. MATHERON, *Random Sets and Integral Geometry*, John Wiley & Sons, 1975.
 - [Ser82] J. SERRA, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, Londres, 1982.
 - [AGLM92] L. ALVAREZ, F. GUICHARD, P.-L. LIONS, J.-M. MOREL, « Axiomatisation et nouveaux opérateurs de la morphologie mathématique », *C.R. Acad. Sci. Paris*, 1992, p. 265–268, t. 315, Série I.
 - [GH86] M. GAGE, R. HAMILTON, « The heat equation shrinking convex plane curves », *J. of Differential Geometry* 23, 1986, p. 69–96.
 - [Gra87] M. GRAYSON, « The heat equation shrinks embedded plane curves to round points », *J. of Differential Geometry* 26, 1987, p. 285–314.
 - [ST93] G. SAPIRO, A. TANNENBAUM, « Affine Invariant Scale Space », *The International Journal of Computer Vision* 11, 1, août 1993, p. 25–44.

à base d'EDP en Image et Vision par Ordinateur ^[DF96], qui nous a permis de présenter un formalisme unifié pour les méthodes de restauration d'images et de commencer à appliquer ces méthodes aux problèmes de l'estimation de solutions discontinues en stéréo et flot optique ^[RD96, DKA95] nous avons étudié le problème de l'évolution projectivement invariante des courbes planes ^[FK96]. Cette étude était motivée par le désir de généraliser les travaux de Sapiro et Tannenbaum ^[ST93] ainsi que ceux d'Alvarez, Guichard, Lions et Morel ^[AGLM92] au cas projectif, étant donné que c'est plutôt l'invariance projective que l'invariance affine qui est pertinente en vision, comme nous l'avons dit dans la section précédente. Ceci nous a permis au passage de développer une méthode originale de calcul de la courbure affine d'une courbe plane (un invariant différentiel d'ordre 4) ^[FK95] et de nous familiariser avec la méthode dite des lignes de niveau pour résoudre les équations aux dérivées partielles issues des problèmes d'évolution de fronts, des problèmes de conservation hyperbolique, et des équations de Hamilton-Jacobi ^[Set96].

Partant de là, nous avons exploré deux grands aspects de la vision par ordinateur précoce : la stéréoscopie et le suivi de mouvement dans des séquences d'images. En stéréoscopie, nous nous sommes attachés à formuler (formaliser ?) le problème sous forme variationnelle. L'idée de base est de considérer la scène comme un volume occupé par des objets dont on cherche les surfaces, observées par des caméras. Partant d'une surface arbitraire, on cherche à la déformer de telle manière qu'elle vienne se coller à la surface des objets présents sous l'influence de forces générées par les mesures issues des caméras. On est exactement dans un cas où les méthodes de niveau s'appliquent bien : la surface en question est le passage par 0 d'une fonction définie en chaque point du volume de la scène (en pratique, la distance algébrique du point à la surface)

-
- [DF96] 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>.
- [RD96] L. ROBERT, R. DERICHE, « Dense Depth Map Reconstruction: A Minimization and Regularization Approach which Preserves Discontinuities », *in: Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision*, B. Buxton (éditeur), Cambridge, UK, avril 1996, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/robert-deriche:96.ps.gz>.
- [DKA95] R. DERICHE, P. KORNPORST., G. AUBERT, « Optical Flow Estimation While Preserving its Discontinuities: A Variational Approach », *in: Proceedings of the 2nd Asian Conference on Computer Vision*, 2/3, Singapore, décembre 1995, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/deriche-kornprobst-et-al:95.ps.gz>.
- [FK96] 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>.
- [ST93] G. SAPIRO, A. TANNENBAUM, « Affine Invariant Scale Space », *The International Journal of Computer Vision* 11, 1, août 1993, p. 25-44.
- [AGLM92] L. ALVAREZ, F. GUICHARD, P.-L. LIONS, J.-M. MOREL, « Axiomatisation et nouveaux opérateurs de la morphologie mathématique », *C.R. Acad. Sci. Paris*, 1992, p. 265-268, t. 315, Série I.
- [FK95] O. FAUGERAS, R. KERIVEN, « Scale-spaces and affine curvature », *in: Proceedings of Europe-China Workshop on Geometrical Modeling and Invariants for Computer Vision*, R. Mohr, C. Wu (éditeurs), Xidian University Press, p. 17-24, Xi'an, China, avril 1995, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/faugeras-keriven:95b.ps.gz>.
- [Set96] J. A. SETHIAN, *Level Set Methods*, Cambridge University Press, 1996.

et son évolution est régie par une équation aux dérivées partielles (edp) déduite des équations d'Euler-Lagrange issues de la formulation variationnelle du problème.

Nous avons d'abord traité le cas particulier où l'on ne dispose que de deux caméras et où l'on intersecte la scène par un plan arbitraire : ce plan coupe les surfaces des objets selon un ensemble de courbes qu'il s'agit de calculer au moyen des images. On exploite alors un résultat qui veut qu'un plan de l'espace induise une transformation homographique entre deux images, c.à.d. que les images d'un point du plan se correspondent par une transformation du groupe projectif de \mathcal{P}^2 qui ne dépend que des positions relatives du plan et des deux caméras. L'homographie étant connue, les courbes précédentes sont obtenues en minimisant une fonctionnelle prenant en compte cette homographie et les mesures images. La minimisation se fait à partir des équations d'Euler-Lagrange qui sont résolues par une méthode de lignes de niveaux 2D, c'est-à-dire correspondant à l'évolution d'une surface de R^3 dont les passages par zéro sont les courbes cherchées [DBF98].

Nous avons ensuite traité le cas général où l'on dispose d'un nombre arbitraire de caméras et où l'on cherche à reconstruire les surfaces entièrement. Nous avons établi les équations d'Euler-Lagrange d'une vaste classe de fonctionnelles qui décrivent le problème de la stéréoscopie. Ces équations sont intéressantes car, d'une part, nous les avons formulées de manière intrinsèque, c'est-à-dire indépendamment de la façon dont on paramètre les surfaces des objets, et, d'autre part, elles font apparaître de manière très simple (mais que nous ne comprenons pas encore complètement) la première et deuxième forme fondamentale de ces surfaces c'est-à-dire, bien sûr, la géométrie intrinsèque de celles-ci [FK97,FK98].

Le second aspect mentionné plus haut est celui du suivi de mouvement dans des séquences d'images. L'idée de base de l'approche est, comme dans le cas de la stéréoscopie, de formuler le problème de la détection *et* du suivi des objets comme celui de la minimisation d'une certaine fonctionnelle qui prend en compte à la fois le champ des vitesses image et le gradient de l'intensité. Là encore, les équations d'Euler-Lagrange du critère conduisent à une edp qui est résolue par la méthode des lignes de niveau, dont le gros avantage pour cette application est la possibilité qu'elle offre de gérer de manière automatique les changements de topologie des objets suivis [PD98].

Une autre direction de recherche connexe à la précédente consiste à exprimer sous forme variationnelle des problèmes où l'on calcule une image à partir d'une autre image et à étudier et résoudre l'edp issue des équations d'Euler-Lagrange. La méthode des lignes de niveau qui

-
- [DBF98] R. DERICHE, S. BOUVIN, O. FAUGERAS, « Front Propagation and Level-Set Approach for Geodesic Active Stereovision », *in: Third Asian Conference On Computer Vision*, Bombay, Inde, janvier 1998, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/deriche-bouvin-etal:98.ps.gz>.
- [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.
- [FK98] O. FAUGERAS, R. KERIVEN, « Variational principles, Surface Evolution, PDE's, level set methods and the Stereo Problem », *icetip 7*, 3, mars 1998, p. 336–344.
- [PD98] 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, Inde, janvier 1998, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/paragios-deriche:98.ps.gz>.

s'appliquait bien dans les cas de la stéréoscopie et du suivi de contours s'impose moins ici mais la démarche générale demeure identique.

Nous avons traité deux problèmes de ce type. Le premier est celui de la restauration non-linéaire d'images bruitées et, éventuellement, floues. Le second, celui du calcul du champ des vitesses image. Dans le premier cas, on part d'une image bruitée et dégradée par un flou inconnu et on cherche à calculer une image débruitée et plus contrastée. L'approche variationnelle est très pertinente et, tout en nous ayant permis d'unifier un grand nombre de méthodes apparues de manière indépendantes dans la littérature récente, nous a aussi, et surtout, conduit à des résultats spectaculaires [KDA97,KDA98]. L'extension à des séquences d'images bruitées a été naturelle et a permis de coupler détection d'objets en mouvement et restauration [KDA99]. Une étude mathématique de l'existence et l'unicité des EDP considérées a été effectuée en collaboration étroite avec G. Aubert de l'université de Nice. Actuellement, une généralisation au cas des images vectorielles du modèle développé est en train d'être menée avec des applications à l'imagerie couleur, aux tenseurs de Diffusion, et de manière générales à des données vectorielles éventuellement contraintes.

Dans le second cas, le calcul du champ des vitesses, on part d'une séquence d'images et on cherche à calculer une nouvelle séquence d'images vectorielles où le vecteur calculé en chaque pixel représente sa vitesse. Le problème dans ce cas est que, d'une part, on ne peut mesurer en chaque pixel que la vitesse dans la direction du gradient, et que, d'autre part, on cherche à préserver au mieux les discontinuités du champ des vitesses car elles correspondent souvent à des changements d'objet dans la scène. L'approche variationnelle est ici encore très pertinente [DKA95,ADK99]

Plus récemment encore, dans une collaboration internationale avec L. Alvarez et J. Weickert, la méthodologie à base d'EDP a été appliquée au problème de l'estimation dense de cartes de profondeur à partir d'une paire d'images d'un système stéréo faiblement calibré [ADWS00b,ADWS00a]. Ces travaux, qui complètent nos précédents travaux sur la résolution

-
- [KDA97] P. KORNPBST, R. DERICHE, G. AUBERT, « Nonlinear operators in image restoration », *in: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, p. 325–331, San Juan, Puerto Rico, juin 1997, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/kornprobst-deriche-et-al:97.ps.gz>.
- [KDA98] P. KORNPBST, R. DERICHE, G. AUBERT, « EDP, Débruitage et Réhaussement en Traitement d'Image: Analyse et Contributions », *in: 11 ème Congres RFIA, AFCET*, janvier 1998, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/kornprobst-deriche-et-al:98.ps.gz>.
- [KDA99] P. KORNPBST, R. DERICHE, G. AUBERT, « Image Sequence Analysis via Partial Differential Equations », *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 11, 1, octobre 1999, p. 5–26, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/kornprobst-deriche-et-al:99.ps.gz>.
- [DKA95] R. DERICHE, P. KORNPBST., G. AUBERT, « Optical Flow Estimation While Preserving its Discontinuities: A Variational Approach », *in: Proceedings of the 2nd Asian Conference on Computer Vision*, 2/3, Singapore, décembre 1995, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/deriche-kornprobst-et-al:95.ps.gz>.
- [ADK99] G. AUBERT, R. DERICHE, P. KORNPBST, « Computing Optical Flow via Variational Techniques », *SIAM Journal on Applied Mathematics* 60, 1, 1999, p. 156–182, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/aubert-deriche-et-al:99.ps.gz>.
- [ADWS00b] L. ALVAREZ, R. DERICHE, J. WEICKERT, J. SANCHEZ, « Dense Disparity Map Estimation Respecting Image Discontinuities: A PDE and Scale-Space Based Approach . », *Research Report n° 3874*, INRIA, janvier 2000, Accepted for publication in *Journal of Visual Communication*

du problème de la stéréo dense avec préservation des discontinuités de profondeur, offrent surtout un cadre remarquable pour traiter le problème plus général de la régularisation de données sous contraintes, thème sur lequel nous nous investissons de plus en plus.

Dans ce même axe, nous avons continué à contribuer au problème de la segmentation en analyse d'images, et proposé un formalisme nouveau, le modèle des *Régions Actives Géodésiques*, pour adapter et étendre la notion des contours actifs géodésiques à la prise en compte d'informations relatives aux régions délimitées par les contours actifs. Le formalisme de *Régions Actives Géodésiques* a été décliné et instancié sur trois types de problèmes importants en Vision par Ordinateur : la segmentation d'image, la segmentation supervisée d'images texturées, et la détection, le suivi et l'estimation du mouvement d'objets mobiles dans une séquence d'images. Dans toutes ces applications, l'approche adoptée a consisté à reformuler de manière très élégante le problème en une approche variationnelle qui fait usage des informations de frontière et de régions. Une mise en œuvre astucieuse à l'aide du formalisme des ensembles de niveaux permet une résolution très performante des applications considérées en permettant d'évoluer, avec possibilité de changement de topologie, une ou plusieurs courbes initiales vers la ou les frontières des objets d'intérêt. Cette possibilité de segmentation active combinant contours et régions par une approche variationnelle unificatrice combinant des concepts habituellement séparés comme les contours et les régions a fait avancer de manière notable l'État de l'Art du domaine du traitement numérique des images et de la Vision par Ordinateur et constitue depuis une référence incontournable du domaine [PD00b,PD00a,PD99b,PD99a].

Les possibilités d'application et de valorisation des travaux développés dans cet axe sont multiples tant les approches développées se trouvent à la base de plusieurs applications d'importance : on notera en particulier les domaines du traitement des données bruitées et floues dans le cadre de l'aide à la police judiciaire (Projet Improofs et relations avec FSSScotland-Yard, NICC-Belgique), la restauration des films d'archives (collaboration avec DUST.S.A), le

and Image Representation, Special Issue on Partial Differential Equations in Image Processing, Computer Vision and Computer Graphics, Dec. 2000 (to appear)., <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3874.html>.

- [ADWS00a] L. ALVAREZ, R. DERICHE, J. WEICKERT, J. SANCHEZ, « Dense Disparity Map Estimation Respecting Image Discontinuities: A PDE and Scale-Space Based Approach », in : *IAPR International Workshop on Machine Vision Applications*, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, novembre 2000, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/alvarez-deriche-et-al:00b.ps.gz>.
- [PD00b] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « Geodesic active contours and level sets for the detection and tracking of moving objects », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22, mars 2000, p. 266–280, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/paragios-deriche:00c.ps.gz>.
- [PD00a] N. PARAGIOS, R. DERICHE, « Coupled Geodesic Active Regions for Image Segmentation : a level set approach », *II*, p. 224–240, juin 2000, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/robotvis/html/Papers/paragios-deriche:00d.ps.gz>.
- [PD99b] 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, Kerkyra, Greece, septembre 1999, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/paragios-deriche:99d.ps.gz>.
- [PD99a] 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, Kerkyra, Greece, septembre 1999, <ftp://ftp-robotvis.inria.fr/pub/html/Papers/paragios-deriche:99d.ps.gz>.

suivi d'objets en mouvements et détection de textures (RealViZ), la mise en correspondance de cartes bathymétriques (Ifremer)...

Toutes ces tentatives définissent donc à notre avis un domaine de recherche très riche en applications et qui reste en grande partie inexploré : établir, analyser et résoudre numériquement de manière efficace et précise les équations aux dérivées partielles qui régissent la vision précoce, voilà un beau défi à relever !

4 Logiciels

4.1 Robotvis++

Participants : Lionel Champalaune, Robert Fournier, 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.

4.2 ps2html

Participants : Théodore Papadopoulo, Gerardo Hermosillo, Jean-Luc Szpyrka.

ps2html est un petit logiciel destiné à générer des présentations html interactives à partir d'un fichier postscript contenant une suite de transparents pouvant être obtenu de quelque manière que ce soit (\LaTeX , framemaker, ...). Le postscript sert à générer un ensemble d'images. Du JavaScript (fonctionnant uniquement avec netscape 4.7x pour l'instant) est utilisé pour permettre la navigation entre les différentes images de la présentation. **ps2html** sait par ailleurs récupérer des marqueurs hypertextes éventuellement placés dans le postscript, pour créer des hyperliens html (testé uniquement avec des postscript créés avec \LaTeX et dvips). Cet outil a été utilisé pour générer la quasi-totalité des présentations de conférences et de cours du projet cette année et a déjà été diffusé à quelques exemplaires à l'extérieur du projet et de l'UR de Sophia.

Présentation de ps2html

5 Résultats nouveaux

5.1 Géométrie d'un système de caméras et applications

Mots clés : géométrie projective, géométrie affine, géométrie euclidienne, étalonnage de

caméras, stéréoscopie multivue, polynôme, variété algébrique, ensemble caractéristique, algèbre double et relations de Plücker.

5.1.1 Synthèse de films réalistes à partir de photographies.

Participants : Frédéric Abad, Olivier Faugeras, Luc Robert, Imad Zoghliani.

Mots clés : rendu réaliste à base d'images, couches, masques, segmentation, planar-key, graphcut, recalage.

Nous avons développé une nouvelle méthode de rendu réaliste capable de générer de nouvelles images d'une scène représentée par un ensemble fini d'images de référence. Grâce à la gestion optimisée des textures extraites des images de référence (par placage de texture dépendant du point de vue), nous avons pu obtenir de nouvelles images très réalistes de la scène en dépit d'une modélisation tridimensionnelle sommaire. Cela fut en particulier possible grâce à la factorisation de la scène en objets indépendant appelés *couches* et à l'usage des *masques* associés à ces couches.

Notre approche souffrait cependant de deux limitations que nous nous sommes ensuite efforcés de résoudre. La première était la difficulté d'obtention des masques associés à chaque couche dans les images de référence. La seconde était l'apparition d'artefacts de *ghosting* (dédoublément des détails) lors du rendu de régions de la scène où modèle approché et structure réelle différaient trop.

Nous avons donc commencé par mettre au point une méthode de segmentation semi-automatique des caches en utilisant la connaissance a priori de la structure géométrique de la scène comme modalité de segmentation. Ce problème de segmentation, que nous avons appelé *planar-key*, a été posé sous la forme d'une minimisation d'énergie que nous avons résolue par la recherche de la coupe minimale dans un graphe particulier (*graphcut*).

Nous avons ensuite cherché à résoudre les problèmes de ghosting en étudiant un moyen de recalculer les contributions des différentes images de référence pour une même couche. Nous avons pour cela développé une approche permettant de déformer les images de façon à ce que la géométrie exacte de la scène soit respectée (*recalage géométriquement valide*), approche dont nous avons étudié différentes implémentations.

5.1.2 Vision et modélisation géométrique

Participant : Théodore Papadopoulo.

Mots clés : photomodélisation, contraintes géométrique, auto-calibration.

Coopération avec Didier Bondyfalat actuellement au projet LEMME et Bernard Mourrain du projet GALAAD.

Les techniques de photomodélisation classiques ne prennent en compte que la géométrie du système de prise de vues. Dans de nombreuses situations, cependant, de nombreuses contraintes peuvent être exprimées sur la géométrie de la scène observée (orthogonalités, parallélismes, ...).

Dans le cas particulier où l'on dispose d'un plan de la scène à reconstruire, la connaissance de ce plan permet l'utilisation de certaines propriétés géométriques de la scène au plus tôt dans le processus de photomodélisation : on peut exprimer ces propriétés directement à partir des mesures image. On obtient ainsi un algorithme d'étalonnage essentiellement linéaire prenant en compte certaines des propriétés géométriques de la scène. Ce travail a été présenté à ICCV 2001 [?].

5.1.3 Reconstruire la couronne du soleil en 3D

Participants : Gerardo Hermosillo, Théodore Papadopoulo.

Mots clés : stéréoscopie, équation aux dérivées partielles, appariement.

Coopération avec Fabrice Portier-Fozzani du MAX-PLANCK-INSTITUT.

Afin de protéger notamment les satellites en orbites et les réseaux électriques terrestres, un nouveau domaine se retrouve en pleine expansion : "La météorologie spatiale". Il consiste à prévoir si les puissantes éjections solaires seront dirigées vers la terre ou pas. A l'heure actuelle, ces directions sont très imprécises, ce qui amène à des alertes solaires plus fréquentes que nécessaire. Pour cela, la mission STEREO a été définie : elle consiste à envoyer en 2005 deux satellites sur une orbite héliocentrique qui fourniront des images stéréoscopiques du soleil et de ses éruptions. Le but de ces paires stéréoscopiques est la reconstruction en 3D de l'activité solaire qui seule pourra fournir les informations de direction recherchées. En préparation de cette mission, plusieurs groupes développent les méthodes qui seront nécessaires pour traiter les données fournies par ces satellites. Le but de cette collaboration est de voir comment les méthodes de matching utilisées et/ou développées au sein du projet ROBOTVIS peuvent être utilisées à cette fin. Ce travail a donné lieu à plusieurs présentations [?, ?, ?].

5.1.4 Recalage rigide par méthodes linéaires directes : efficacité et robustesse

Participants : Jacques Bride, Gerardo Hermosillo, Peter Meer, Luc Robert, Imad Zoghlami.

Mots clés : recalage rigide, méthodes directes, régression hétéroscédastique.

Nous considérons le problème du recalage *rigide* d'*images* par une approche *directe* et *linéaire*. Il est admis qu'il existe une transformation géométrique globale ou dominante entre deux images qu'il est possible de modéliser par une fonction paramétrique. Etant supposé connu le modèle, l'objectif est d'estimer le meilleur jeu de paramètres permettant de recalibrer ces deux images. Dans le cadre situé ci-dessus, notre étude s'intéresse à deux aspects de robustesse :

Bruit de mesure : Nous nous limitons aux approximations linéaires des méthodes directes qui fournissent une équation de contrainte du mouvement relativement aux variations d'intensité. Puisque toute image est une mesure bruitée d'une vue d'une scène, la meilleure estimation des paramètres est obtenue par des méthodes de moindres carrés. La plus connue, le moindre carré orthogonal, cherche à minimiser une somme des distances orthogonales des mesures par rapport à l'hyperplan des paramètres. Elle suppose que toutes les mesures soient corrompues par un bruit aux propriétés statistiques homogènes. Nous

montrons [?] que dans le cas des méthodes directes, la fonction de transformation induit une amplification non homogène du bruit de mesure, de telle sorte que le classique estimateur moindres-carrés orthogonal est invalide statistiquement pour résoudre notre problème. Nous montrons alors comment adapter des estimateurs plus généraux à l'estimation des paramètres de transformation. Chaque mesure est pondérée par sa matrice de covariance de l'erreur. Nous montrons avec des expérimentations l'importance de la prise en compte de cette amplification non homogène du bruit.

Changements d'illumination : souvent, il est supposé que l'intensité de la projection d'un point physique sur l'image reste constante au cours du temps. Il est facile de généraliser les méthodes directes à une quelconque contrainte de similarité entre intensité, moins stricte, pour qu'elles soient moins sensibles aux changements d'illumination. Par exemple, la mesure d'auto-corrélation rend le critère insensible à toutes transformations affines de l'intensité, ou alors, encore plus général, le critère d'information mutuelle cherche à maximiser la dépendance statistique entre les intensités. Néanmoins, il devient nécessaire de calculer le gradient de cette fonction de similarité par rapport à une variation des paramètres. La littérature des méthodes directes propose des calculs de ce gradient par différence finie, mais nous montrons comment le calculer formellement selon une technique présentée dans les derniers développements de la littérature sur le recalage non rigide [?].

5.1.5 Localisation et Calibration avec un Zoom.

Participants : François Gaspard, Thierry Viéville.

Mots clés : étude du zoom, homographies, localisation 3D, calibration, estimation paramétrique.

François Gaspard a achevé son travail sur l'analyse non calibrée du mouvement de points par rapport au mouvement de structures planes, dans le cas d'un objectif à focale variable. Dans ce cadre, il a développé une méthode originale de minimisation de critères d'estimation paramétrique [?, ?].

5.1.6 Implémentation de méthodes multi-modèles d'estimation paramétrique.

Participants : François Gaspard, Diane Lingrand, Thierry Viéville.

Mots clés : estimation non-linéaire, estimation robuste, estimation paramétrique, multi-modèles.

Nous avons achevé notre étude sur le problème de l'estimation paramétrique en vision par ordinateur, reconsidérant et implémentant ce qui pourrait s'appeler la méthode d'estimation de Kanatani, présentée ici comme un simple problème d'optimisation, donc (a) sans référence directe à un cadre probabiliste mais (b) en considérant (i) des équations de mesures et des contraintes non-linéaires, (ii) une stratégie d'estimation robuste en présence de mesures erronées, (iii) en mettant en concurrence plusieurs modèles au sein d'une hiérarchie [?].

Cela nous a permis de thésauriser les développements méthodologiques réalisés au cours de plusieurs études précédentes.

5.2 Méthodes variationnelles, EDPs et applications

5.2.1 Flots sur des variétés : applications à des problèmes de dimension finie et infinie en vision par ordinateur

Participants : Christophe Chefd'hotel, Olivier Faugeras.

Mots clés : variété, métrique riemannienne, optimisation, méthode variationnelle, équation aux dérivées partielles, carte exponentielle.

Cette étude consiste en une caractérisation géométrique de certaines EDPs et problèmes d'optimisation issus de la vision par ordinateur. Ces problèmes peuvent être interprétés comme des flots issus de champs de vecteurs sur des variétés hilbertiennes. Dans ce cadre, il est possible de prendre en compte de manière intrinsèque d'éventuelles contraintes. Le choix d'une métrique adaptée permet aussi une convergence plus rapide des flots de gradient vers un point critique, ou encore l'intégration directe de contraintes régularisantes. Dans certains cas, l'utilisation de cartes exponentielles sur la variété considérée permet d'approximer numériquement les flots continus tout en préservant la géométrie -contrainte- de l'espace de recherche.

Ce point de vue géométrique est appliqué à la définition de principes variationnels sur le groupe des difféomorphismes, pour la mise en correspondance de formes ou d'images multimodales (dans la suite des travaux réalisés en [?] en collaboration avec G. Hermosillo). Nous considérons aussi la régularisation de fonctions à valeurs matricielles appartenant à un groupe de Lie ou un espace homogène (en collaboration avec D. Tschumperlé). Enfin, nous utilisons cette technique en dimension finie pour réaliser des analyses en composantes indépendantes (ICA) en minimisant des critères entropiques à l'aide de flots de gradient sur le groupe orthogonal.

5.2.2 EDP et Images Vectorielles

Participants : Rachid Deriche, Lucero Lopez-Perez.

Mots clés : Régularisation avec préservation des discontinuités sur des variétés.

Le sujet que nous avons commencé à aborder ici touche à la généralisation au cas des images non planes, comme des sphères, des cylindres ou la surface d'un cortex pour ce qui nous intéresse plus particulièrement, d'une partie de nos travaux déjà développés en régularisation d'images par EDP avec préservation des discontinuités. Le problème de la restauration et de la régularisation de données bruitées qui ont un support non plan est en effet un sujet d'une extrême importance et à très fortes potentialités applicatives en imagerie cérébrale, comme dans bien d'autres domaines. Nous illustrons dans la (Fig.2) les premiers exemples de résultats obtenus dans le cadre du stage pré-doctoral effectué par L.Lopez-Perez.

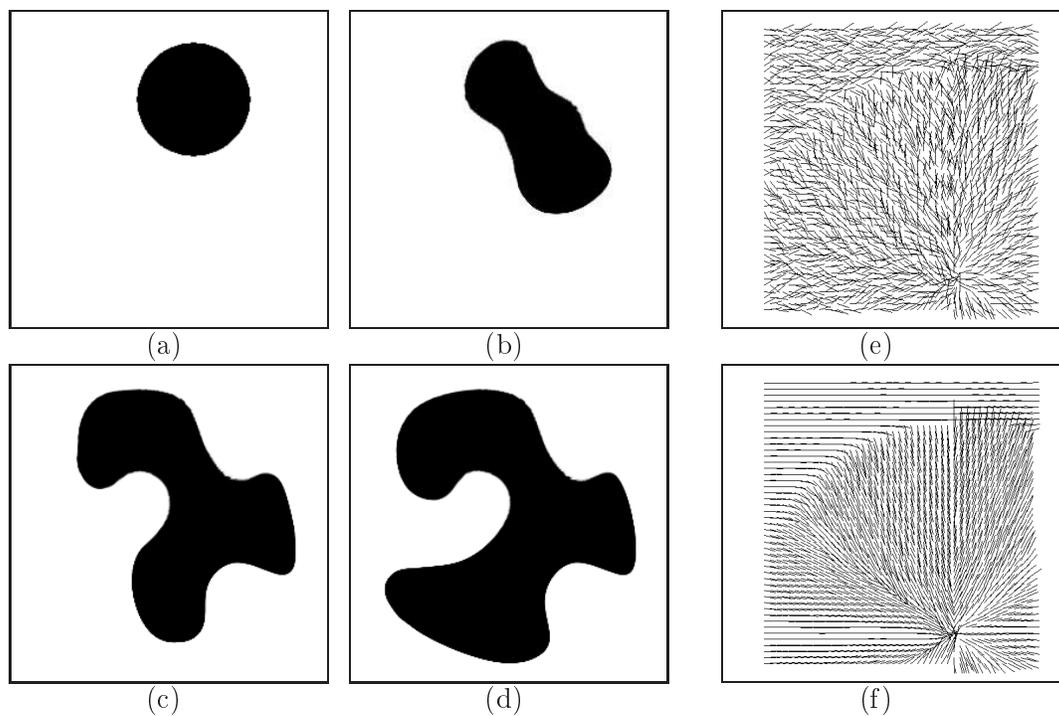


FIG. 1 – (a) à (d) Mise en correspondance de deux formes par estimation d'un difféomorphisme. (e) et (f) Régularisation d'un champ de matrices symétriques définies positives (2×2) par un flot isospectral (implémenté à l'aide d'un schéma exponentiel). Seule la direction principale est représentée ici.

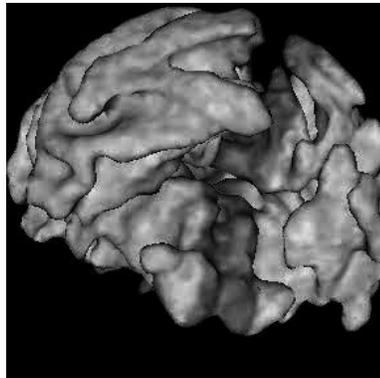
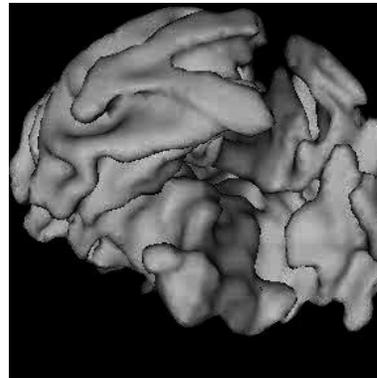


Image originale bruitée



Diffusion anisotrope

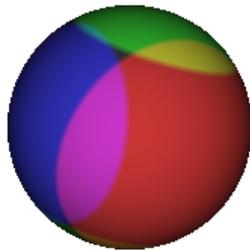


Image Originale

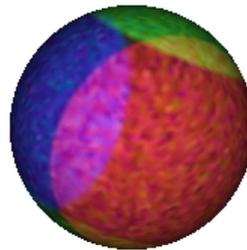
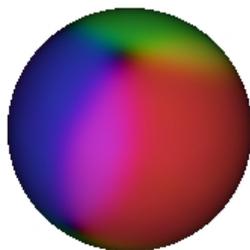
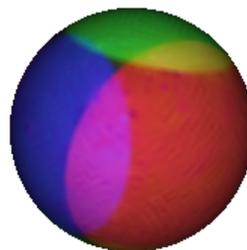


Image bruitée



Diffusion isotrope



Diffusion anisotrope

FIG. 2 – Diffusion isotrope et anisotrope d’images en niveau de gris (resp. en couleur) sur un cortex (resp. une sphère).

5.2.3 EDP et Images Vectorielles

Participants : Rachid Deriche, David Tschumperlé.

Mots clés : Régularisation avec préservation des discontinuités, équations aux dérivées partielles, images vectorielles et couleurs, champs de direction, données du tenseur de diffusion, contraintes..

Nous avons poursuivi nos travaux basés sur l'utilisation de méthodes variationnelles pour régulariser des images vectorielles couleurs et nous les avons adaptés et généralisés au cas du traitement des images multi-valuées avec contraintes. Pour cela, nos efforts ont porté sur les trois sujet parallèles et complémentaires suivants :

- *Régularisation d'images couleurs* :
Nous avons poursuivi nos travaux de l'an dernier et une analyse géométrique du problème de la régularisation à l'aide d'EDP's de diffusion d'images couleur et à valeurs vectorielles a été développée et présentée lors de SCIA'01 ([?]).
- *Régularisation d'images vectorielles contraintes* : Un formalisme variationnel unificateur permettant de régulariser des données vectorielles contraintes a été présenté à VLISM'01 [?]. L'idée développée a été d'adapter et de généraliser au cas contraint les approches que nous avons développées auparavant pour le traitement des données vectorielles sans contrainte. Cette méthode a été appliquée au cas du traitement d'images d'ensembles de vecteurs orthonormés, permettant de retrouver à la fois les méthodes de régularisation à norme constante que nous avons déjà proposées, mais aussi d'ouvrir la voie à la résolution de problèmes nouveaux et d'importance, notamment la régularisation d'images multi-valuée où chaque pixel représente une matrice orthogonales ou un tenseur de diffusion.
- *Régularisation d'images DT-MRI* : Dans le cadre de l'ARC *Mieux Comprendre le Cerveau*, nous avons proposé une méthode de régularisation d'images IRM de tenseurs de diffusion, technique nouvelle qui permet de remonter à une carte des fibres de la matière blanche au sein du cortex cérébral. Le développement de cette méthode originale permet de régulariser un champs de tenseurs de diffusion tout en préservant les différentes contraintes associées. Ce travail est décrit dans l'article qui a été accepté pour publication à IEEE CVPR'01 [?]. Quelques résultats très prometteurs ressortent de l'étude de ce sujet émergent en vision par ordinateur (Fig.3).

5.2.4 Appariements symétriques avec détection des occlusions

Participants : Rachid Deriche, Théodore Papadopoulo.

Coopération avec Luis Alvarez et Javier Sanchez de l'université de Las Palmas aux Canaries.

Les techniques par EDPs se sont révélées très efficaces dans les problèmes d'appariement entre images notamment par leur capacité à intégrer des termes de régularisation non-linéaire qui permettent l'obtention d'une solution lisse dans les régions homogènes de l'image tout en préservant les discontinuités potentielles de la solution au voisinage des contours ou dans les zones fortement texturées. Malheureusement, les critères couramment minimisés dans ces approches introduisent une dissymétrie entre les images (l'une étant considérée comme la «source» et l'autre comme la «destination»). Or, il est bien connu que l'appariement doit être symétrique

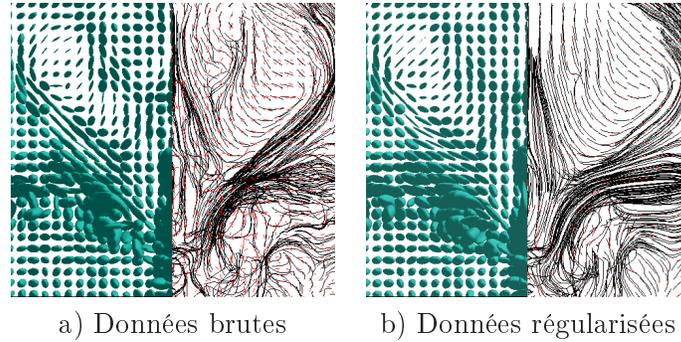


FIG. 3 – Régularisation de volumes de données DT-MRI, avec représentation des tenseurs (à gauche) et fibres calculées (à droite).

(du moins sur le sous-ensemble de l'image où l'appariement est défini c'est à dire en dehors des régions occultées) et cette caractéristique est souvent utilisée dans les algorithmes plus classiques tels que la corrélation. En pratique, on constate effectivement que les appariements obtenus entre une image I_1 et une image I_2 (prises dans cet ordre) et entre I_2 et I_1 ne vérifient cette condition de symétrie et ce tout particulièrement dans les régions occultées. Dans ce travail, nous avons donc cherché à réintroduire la symétrie entre les deux images dans les méthodes par EDPs. Pour cela, il a fallu repenser précisément les définitions des objets mathématiques correspondant aux images et aux fonctions d'appariement. Les expériences montrent que l'appariement obtenu est bien meilleur (réduction des erreurs par un facteur 2) et qu'il semble possible dans certains cas d'identifier automatiquement les occlusions comme étant les régions où le critère de symétrie dépasse un certain seuil.

5.3 Outils pour l'Imagerie cérébrale

5.3.1 Méthodes variationnelles pour la mise en correspondance d'images utilisant des critères statistiques de dissemblance

Participants : Gerardo Hermosillo, Olivier Faugeras, Christophe Chef d'hotel.

Mots clés : Mise en Correspondance Multimodale, Méthodes Variationnelles, Flot Optique, Information Mutuelle, Rapport de Corrélation, Corrélation Croisée, Équations d'Euler-Lagrange, Problèmes d'évolution, Opérateurs maximaux monotones, Semi-groupes d'opérateurs linéaires bornés fortement continus, Semi-groupes d'opérateurs linéaires bornés analytiques..

Notre travail [?, ?, ?] porte sur le problème de la mise en correspondance dense entre deux images, en utilisant des critères statistiques de dissemblance. Deux classes d'algorithmes sont considérées, selon que ces critères soient calculés globalement pour toute l'image, ou localement entre des régions correspondantes. Dans chaque cas, trois critères de dissemblance sont étudiés, définis comme l'opposé des critères de ressemblance suivants : information mutuelle (bien adaptée à une dépendance statistique très générale entre les niveaux de gris), rapport de corré-

lation (adapté à une dépendance fonctionnelle), et auto-corrélation (adaptée à une dépendance affine). La minimisation de la somme du terme de dissemblance et un terme de régularisation défini, à travers les équations d'Euler-Lagrange, un système d'équations fonctionnelles d'évolution. Une particulière importance est accordée à l'établissement des conditions sous lesquelles ces équations d'évolution sont bien posées, c'est à dire ont une solution unique. Il est montré que les algorithmes proposés satisfont ces conditions pour deux classes d'opérateurs linéaires régularisants, dont une est conçue pour encourager des discontinuités de la solution le long des contours de l'image. La discrétisation et l'implémentation numérique des algorithmes de mise en correspondance sont ensuite discutées, et leur performance est illustrée à travers plusieurs exemples synthétiques et réels, aussi bien sur des images 2D que 3D.

5.3.2 Analyse statistique robuste de l'activité cérébrale

Participants : Bertrand Thirion, Olivier Faugeras.

Mots clés : IRMf, modèles Anova, Information mutuelle, entropie, chaîne de Markov, méthode statistique, fuzzy C-means, filtrage robuste, carte d'activation..

Dans cette étude [?], nous proposons un certain nombre de nouvelles manières de détecter des activations dans des séquences d'IRMf, qui nécessitent un minimum d'hypothèses et évitent de pré-modéliser les signaux attendus. En particulier, on évite autant que possible les modèles linéaires. La sensibilité des méthodes par rapport à l'autocorrélation du signal est étudiée et contrôlée, voire réduite. Dans le cas d'un dessin expérimental en bloc, une question très importante est la faculté de prendre en compte les transitions entre les différents niveaux du signal, mais sans introduire de réponse hémodynamique prédéfinie. Les méthodes que nous proposons (voir aussi [?]) reposent sur des modèles d'analyse de variance et de théorie de l'information bien connus. Le problème de la validation statistique des tests est également posé et partiellement résolu. Ces méthodes sont assez puissantes pour permettre d'éviter tout lissage, aussi bien spatial que temporel, des images.

Une fois que la carte d'activation est obtenue, nous essayons de caractériser les activations observées en étudiant les transitions entre les blocs du paradigme expérimental. Cette partie plus descriptive de notre travail peut être poursuivie par une recherche des zones du cortex ayant des caractéristiques homogènes, par exemple des réponses impulsionnelles similaires. Assez naturellement, cette question peut être formulée comme un problème de coalescence, que nous résolvons à l'aide d'un algorithme de *fuzzy C-means*. Cette partie de l'analyse se fait en l'absence de contraintes spatiales ou anatomiques, afin de permettre l'observation de phénomènes inattendus.

Une première application est présentée à partir d'une séquence de tâches visuelles obtenues à l'université de Louvain pour caractériser la perception du mouvement chez le singe. Nous montrons des cartes d'activations, et, comme premier pas vers un modèle spatio-temporel de l'activité corticale, une carte de modèles de réponses impulsionnelles.

5.3.3 Problèmes direct et inverse en EEG/MEG

Participants : David Bouvier, Cédric Barthou, Maureen Clerc, Olivier Faugeras,

Renaud Keriven, Pierre Kornprobst, Jan Kybic, Théodore Papadopoulo.

Mots clés : problèmes inverses, magnétoencéphalographie, électroencéphalographie, équations de Maxwell.

Dans le cadre de l'action coopérative 3D-MEG (voir section 6.2.1) et de l'ACI télémédecine Dir-Inv démarrée cette année, nous avons continué notre activité autour du problème de la reconstitution de l'activité encéphalique à partir de signaux MEG ou EEG qui avait commencé avec l'étude théorique [FCD⁺99].

- Dans ce cadre, notre activité cette année s'est articulée autour de quatre points principaux :
- Extension et amélioration de la méthode surfacique développée précédemment [BK00], notamment pour y intégrer une régularisation de la solution qui soit intrinsèque à la surface du cortex [?]. La technique utilisée à cet effet est celle des ensembles de niveaux pour l'évolution de fonctions sur des surfaces implicites [BCOS00]. L'utilisation de techniques de type multi-pôles pour améliorer les performances de l'algorithme a également été entreprise.
 - Ré-implémentation de la méthode volumique. L'implémentation précédente de la méthode volumique n'était pas complète. Elle ne permettait notamment pas la prise en compte des différentes couches de conductivités différentes dans le cerveau, ni même de contraindre la solution à une certaine partie de la tête (le cortex).
 - Obtention de données combinées IRMa/MEG et IMRa/EEG.

5.3.4 Estimation des conductivités électriques de la tête à partir d'IRMd

Participants : Olivier Faugeras, Diane Lingrand, Théodore Papadopoulo.

Coopération avec Line Garnero de l'Hôpital Pitié - Salpêtrière et Jean-François Mangin du SHFJ - CEA à Orsay.

Le problème inverse de reconstruction de l'activité électrique cérébrale à partir de mesures électriques (EEG) et magnétiques (MEG) consiste à déterminer les sources de l'activité cérébrale à partir d'enregistrements de potentiel électrique et de champ magnétique à l'extérieur du crâne. La résolution de ce problème suppose la connaissance d'un modèle précis de tête, tant au niveau géométrique qu'électrique. En première approximation, on considère toujours que la tête est constituée de quelques (jusqu'à cinq) couches homogènes de propriétés électriques différentes. Pour la composante géométrique de ce modèle plusieurs solutions sont possibles : sphère unique, sphères concentriques ou de manière plus réaliste des modèles issus de la seg-

-
- [FCD⁺99] O. FAUGERAS, F. CLÉMENT, R. DERICHE, R. KERIVEN, T. PAPADOPOULO, J. ROBERTS, T. VIÉVILLE, F. DEVERNAY, J. GOMES, G. HERMOSILLO, P. KORNPROBST, 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>.
- [BK00] D. BOUVIER, R. KERIVEN, « Méthodes intégrales pour le problème direct de la magnéto-électro-encéphalographie tridimensionnelle », *rapport de recherche n° 2000-195*, ENPC-CERMICS, octobre 2000.
- [BCOS00] M. BERTALMIO, L. CHENG, S. OSHER, G. SAPIRO, « Variational Problems and Partial Differential Equations on Implicit Surfaces: The Framework and Examples in Image Processing and Pattern Formation », *UCLA Research Report*, juin 2000.

mentation d'images comme les IRM anatomiques. A chaque couche du modèle géométrique est associée une valeur de conductivité que l'on considère comme homogène et isotrope au sein d'une même couche. De plus, les valeurs de ces conductivités sont mal connues et sont donc souvent fixées de manière quelque peu arbitraire. Cette simplification peut introduire des erreurs dans la résolution du problème inverse.

Nous nous sommes donc intéressés à améliorer le modèle électrique de la tête en utilisant pour cela l'imagerie par Résonance Magnétique de diffusion qui permet le calcul en chaque voxel d'un tenseur de diffusion [Pou99]. Or, il existe des relations entre les tenseurs de diffusion et de conductivité [TWDB98] qui permettent un calcul des conductivités à partir des mesures de diffusion.

Nous arrivons ainsi à distinguer les différents tissus par leurs conductivités et confirmons que certains tissus, en particulier le liquide céphalorachidien, sont beaucoup plus isotropes que d'autres (la matière blanche, par exemple). Ces résultats préliminaires nécessitent une validation à plus grande échelle. Ce travail a été présenté à la réunion annuelle de la SAFC (Société de l'Anatomie Fonctionnelle du Cerveau).

5.3.5 Utilisation de marqueurs pour compenser le déplacement dans une séquence d'images volumiques d'IRM.

Participant : Thierry Viéville.

Mots clés : imagerie IRM, compensation de mouvement, estimation paramétrique.

Dans cette étude, on a proposé de compenser les déplacements et les distorsions observées au sein de séquences d'images IRM à l'aide de marqueurs fixés sur le crâne du sujet.

On a développé une méthode multi-modèles, basée sur une interpolation sous-voxélique de la géométrie, connue, du marqueur utilisé. On analyse les performances, limites et perspectives de la méthode [?].

Ce travail s'est fait dans le cadre du projet Mapawamo (??).

5.3.6 Méthode de super résolution en IRM

Participants : Pierre Kornprobst, Thierry Vieville, Grégoire Malandain.

Mots clés : Super résolution, approches variationnelle, régularisation semi-quadratique, IRM.

Nous nous intéressons aux méthodes de super résolution appliquées à l'IRM. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet européen Mapawamo (voir ??).

[Pou99] C. POUAPON, *Détection des faisceaux de fibres de la substance blanche pour l'étude de la connectivité anatomique cérébrale.*, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, décembre 1999.

[TWDB98] D. TUCH, V. WEDEEN, A. DALE, J. BELLIVEAU, « Electrical Conductivity Tensor Map of the Human Brain using NMR Diffusion Imaging: An Effective Medium Approach », *in: Proceedings of the International Society for the Magnetic Resonance in Medicine*, Sydney, avril 1998.

Pour augmenter la résolution d'images IRM, il est possible d'utiliser des champs de gradients plus importants lors de l'acquisition. Malheureusement, cette méthode n'est pas satisfaisante car cela accroît aussi le niveau de bruit, les distortions et la sensibilité par rapport aux mouvements. Nous proposons alors d'acquérir un ensemble d'images IRM basses résolutions avec des décalages relatifs de moitié la taille des voxels. A partir de cette redondance d'informations, le but est de calculer une image de meilleure résolution.

Il s'agit d'un problème inverse mal posé qui peut-être formulé comme un problème de minimisation. Par analogie avec le problème de la restauration d'images, nous proposons d'ajouter dans la fonctionnelle des termes de régularisation qui préservent les discontinuités. Cette approche a été testée sur des données provenant d'IRM fonctionnelle ou anatomique de différentes résolutions. Un travail est entrepris pour valider cette approche en comparaison avec d'autres techniques existantes mais aussi par rapport à des critères de qualités à définir en collaboration avec nos partenaires.

6 Actions régionales, nationales et internationales

6.1 Actions régionales

6.1.1 Projet Rotoscoto

Participants : Rachid Deriche, Olivier Faugeras, Théo Papadopoulo.

Période : 2000-2002 (18 mois)

Rotoscoto est un projet Priamm, en collaboration avec les sociétés de haute technologie Realviz et Duboi. Il porte sur la rotoscopie et est financé pour une durée de 18 mois. Ce projet vise à l'amélioration de l'opération de rotoscopie qui est l'opération qui consiste à détourner un élément d'une image pour pouvoir ensuite composer cet élément avec une autre image. Ce procédé, qui est à la base de nombreux effets spéciaux numériques est très utilisé en post-production audiovisuelle et cinématographique. Notre participation scientifique porte sur l'aide à la création d'un outil performant de rotoscopie en se basant sur le développement et l'application de méthodes variationnelles à base d'EDP ainsi que sur le développement d'approches de segmentation intégrant diverses formes de contraintes issues de la géométrie du système, d'un opérateur extérieur, ou d'informations *a priori*.

6.2 Actions nationales

6.2.1 Action de Recherche Coopérative INRIA MEG-3D

Cette s'est poursuivie cette année.

6.2.2 Action de Recherche Coopérative INRIA Recalage non Rigide en IRM

Nous avons obtenu un financement de la Direction de l'Évaluation et du Développement de l'INRIA au travers d'une action de recherche coopérative avec Epidaure, Vista, le SHFJ (CEA) et l'INSERM

(Pitié Salpêtrière), portant sur l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et anatomique. Le but est de développer de nouvelles méthodes de recalage pour la compensation du mouvement et pour la fusion d'images inter-sujets.

Programmedetravail

Siteweb

6.2.3 Action de Recherche Coopérative INRIA MC2

Nous avons obtenu un financement de la Direction scientifique de l'INRIA au travers d'une action de recherche coopérative portant sur une intégration plus étroite des techniques d'imagerie par résonance magnétique nucléaire avec celles d'électro-encéphalographie et de magnéto-encéphalographie.

Programmedetravail

Siteweb

6.2.4 Action de Recherche Coopérative INRIA LSF

Nous avons obtenu un financement de la Direction scientifique de l'INRIA au travers d'une action de recherche coordonnée qui se situe dans le domaine de la Communication Homme-Machine et plus spécifiquement dans celui de la communication gestuelle. Son objectif est l'aide à la conception d'un système informatique dédié à la capture, la reconnaissance et à l'interprétation de gestes de la Langue des Signes Française (LSF), qui est la langue pratiquée au sein de la communauté des Sourds en France.

Siteweb

6.2.5 Action Incitative Télémedecine

Participants : Jean-Michel Badier, François Clément, Maureen Clerc, Olivier Faugeras, Paul-Louis George, Véronique Hedou, Jacques Henry, Renaud Keriven, Jan Kybic, Théodore Papadopoulo.

Nous avons obtenu un financement pour trois ans du ministère de la recherche pour étudier les problèmes directs et inverses en Électroencéphalographie et en Magnétoencéphalographie. Le projet est coordonné par l'INRIA. Les participants en sont, à l'INRIA, les projets Estime, Gamma, Ondes et Robotvis, le Cermics à Marne-la-Vallée, l'Hôpital de la Timone à Marseille et l'université Technologique de Compiègne.

6.3 Actions financées par la Commission Européenne

6.3.1 ImaVis : Theory and Practice of Image Processing and Computer Vision

Participants : Rachid Deriche, Olivier Faugeras.

Période : 2000-2003

ImaVis : Theory and Practice of Image Processing and Computer Vision est un projet européen MarieCurieTrainingSitesFellowships, coordonné par Robotvis et monté en collaboration avec Epidaure et Ariana. Ce projet permet l'accueil au total de 108 H/M de thésards Européens sur une durée de 4 ans à partir de novembre 2000, dont 54 H/M pour le projet Robotvis. Les thésards européens seront accueillis pour un séjour d'une durée comprise entre 3 et 12 mois dans le cadre des recherches menées par chacune des équipes d'accueil.

6.3.2 Projet Mapawamo