

# THÈSE

présentée par

Sébastien AMBELLOUIS

pour obtenir le grade de Docteur  
de l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Spécialité : Productique, Automatique et  
Informatique Industrielle

Analyse du mouvement dans les séquences d'images par  
une méthode récursive de filtrage spatio-temporel sélectif.

Soutenue le 26 Janvier 2000

Christian VASSEUR	Professeur à l'USTL, Président de Jury
Jean DEVARS	Professeur à l'Université Paris VI, Rapporteur
Michael RUDKO	Professeur à Union College, Skenectady NY, Rapporteur
Marc HEDDEBAUT	Directeur de Recherche au LEOST-INRETS, Examineur
Jean-Pierre DEPARIS	Chargé de Recherche au LEOST-INRETS, Examineur
François CABESTAING	Maître de Conférences à l'USTL, Co-directeur de recherche
Jack-Gérard POSTAIRE	Professeur à l'USTL, Co-Directeur de recherche

Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique I<sup>3</sup>D

# Introduction

Lorsque les objets présents dans une scène observée par un système de vision artificielle se déplacent, le contenu de l'image est en constante évolution. Ainsi, il devient nécessaire de traiter une séquence d'images espacées dans le temps, en tenant compte à la fois des propriétés propres aux objets, telles que la forme, la couleur ou la texture, mais également de leur déplacement dans la scène. De ce fait, la détection et l'estimation du mouvement dans une séquence d'images sont des thématiques qui ont préoccupé un grand nombre de chercheurs depuis qu'existe la vision artificielle. Ce problème reste toujours d'actualité, puisqu'aucune méthode universelle n'a été proposée pour permettre de déterminer le mouvement dans toutes les situations de prise de vue, et pour tous les types de mobiles.

De prime abord, le mouvement des objets peut être considéré comme un inconvénient car il impose une plus grande sophistication du système informatique pour traiter les images. Pourtant, dans certaines applications, l'analyse du mouvement constitue un pré-traitement qui permet de diminuer de façon significative la quantité d'informations à prendre en compte. Par exemple, avec l'avènement de nouvelles techniques de compression d'images dynamiques — comme le MPEG — qui sont désormais utilisées dans du matériel grand public, l'analyse quantitative du mouvement dans une séquence d'images a connu un regain d'intérêt. En effet, l'estimation précise des paramètres du mouvement est l'un des points clés de toutes les méthodes efficaces de codage de séquences d'images; codage dont dépend directement la valeur du taux de compression.

Dans la plupart des algorithmes de compression utilisés à l'heure actuelle, il n'est pas nécessaire de déterminer le mouvement réel des objets dans la scène 3D où ils se déplacent, mais seulement d'évaluer la projection de ce mouvement dans le plan image. En fait, cela revient à déterminer le flux optique, qui est par définition l'ensemble des projections dans

le plan image des vecteurs vitesse de chaque point visible de la scène. Ensuite, pour analyser de façon plus précise le mouvement des objets, et éventuellement estimer leur mouvement réel dans l'espace 3D, il faut analyser de façon plus globale le flux optique déterminé auparavant.

Un algorithme idéal devrait permettre de résoudre simultanément le problème de la détermination locale du mouvement et celui de la segmentation de l'image en zones homogènes vis à vis des différentes contraintes locales. Récemment, des chercheurs de l'Université d'Arlington au Texas [MK95] ont proposé d'utiliser des réseaux neuromimétiques permettant de détecter le mouvement. L'architecture décrite du réseau repose sur une structure similaire à celle présente dans l'oeil de certains insectes, en particulier la mouche. Cette méthode s'avère très efficace. Elle permet, en utilisant une structure de traitement simple, d'obtenir des résultats impressionnants.

Dans la plupart des travaux actuels, l'analyse du mouvement est abordée selon deux démarches a priori distinctes. La première vise à appliquer dans le domaine de la vision artificielle les résultats obtenus par des neuro-biologistes cherchant à comprendre le fonctionnement du système visuel animal. Le plus souvent, les mécanismes reproduits sont simplifiés à l'extrême, puisque les chercheurs envisagent simplement de prouver la pertinence du principe utilisé. La seconde approche, déconnectée de tout mimétisme biologique, consiste plutôt à rechercher des solutions algorithmiques au problème de l'analyse du mouvement, en tirant parti de propriétés physiques ou mathématiques de plus en plus complexes liées à la formation des images. C'est par une recherche des similitudes existant entre ces deux approches qu'a débuté le travail présenté dans ce mémoire.

En 1995, à l'issue d'un stage de recherche réalisé dans le cadre d'un DEA au laboratoire d'Automatique I3D, nous avons mis au point une méthode d'évaluation locale du vecteur vitesse, fondée sur l'analyse des variations spatio-temporelles du niveau de gris des pixels dans une séquence d'images [AC95]. Le traitement proposé est parfaitement adapté à une implantation sur une structure de calcul de type réseau de neurones à temps de propagation (Time Delay Neural Network : TDNN), qui avait déjà été utilisée avec succès dans le domaine de la reconnaissance de la parole [UHT91]. Malheureusement, il n'existe toujours pas à l'heure actuelle de structure matérielle permettant de simuler efficacement le fonctionnement des réseaux TDNN comportant un nombre important de neurones.

Le traitement réalisé sur un voisinage spatio-temporel de l'image par un neurone du réseau TDNN est, dans notre méthode, en tout point similaire à une opération de filtrage linéaire. C'est en exploitant cette équivalence que nous avons étudié par la suite les propriétés de notre algorithme d'estimation du mouvement. Pour diminuer le temps de calcul nécessaire à l'estimation du mouvement, nous avons modifié l'expression permettant de calculer la réponse, de manière à tirer parti d'un calcul récursif beaucoup plus efficace. En définitive, le filtre récursif que nous avons obtenu possède les mêmes propriétés de sélectivité vis-à-vis d'une vitesse que le filtre non récursif équivalent au traitement neuronal.

Dans le premier chapitre de ce mémoire de thèse, nous passons en revue les différentes méthodes permettant d'analyser le mouvement à partir des images d'une séquence. Nous décrivons le processus de formation de l'image qui permet d'expliquer les apports, mais également les limitations, de l'analyse du mouvement par un système de vision artificielle. Nous décrivons aussi les différentes techniques standard d'analyse du mouvement dans l'image, fondées soit sur la détection, soit sur l'estimation des paramètres du mouvement apparent.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons plus précisément les méthodes d'estimation du flux optique qui s'appuient sur une interprétation spatio-temporelle ou fréquentielle du contenu de la séquence d'images. En particulier, nous décrivons les principales méthodes basées sur l'analyse de la réponse de filtres sélectifs appliqués à la séquence d'images, comme par exemple le filtre de Gabor [Gab46]. La justification théorique des propriétés de notre méthode d'estimation du mouvement nécessitera l'utilisation de principes très généraux présentés dans ce deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une première version, non récursive, du filtre sélectif que nous avons mis au point. Nous étudions tout d'abord les propriétés de ce filtre dans le domaine spatio-temporel dans lequel les calculs sont réalisés, mais également dans le domaine fréquentiel, ce qui nous permet de préciser la notion de sélectivité. Nous terminons par la présentation de quelques techniques et contraintes liées à l'implantation, comme le choix du voisinage ou le réglage des coefficients.

Dans le quatrième chapitre, nous décrivons une structure générale de filtrage récursif permettant de réaliser un traitement similaire sur une séquence d'images. Nous abordons tout d'abord les techniques de filtrage spatio-temporel, et voyons comment la notion de

causalité d'un filtre, qui devient ambiguë lorsque l'espace n'est plus monodimensionnel, doit être remplacée par des contraintes liées au mode de balayage des images. Dans ce chapitre, nous présentons quelques principes généraux permettant de régler les paramètres d'une famille de filtres afin de garantir leur sélectivité vis-à-vis des vitesses recherchées.

Dans le cinquième chapitre, nous décrivons en détail une famille de filtres déduits de l'expression générale présentée dans le chapitre précédent. Les voisinages spatio-temporels utilisés par ce filtre particulier ne comportant que quelques pixels, le traitement ne nécessite que quelques opérations élémentaires pour chaque valeur recherchée de la vitesse. Nous montrons comment les paramètres des filtres sont ajustés et présentons quelques exemples de traitement sur des images de synthèse.

# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>4</b>
<b>Introduction</b>	<b>8</b>
<b>1 Généralités sur le mouvement</b>	<b>12</b>
1.1 Formation des images . . . . .	12
1.2 Les difficultés liées à l'analyse du mouvement . . . . .	14
1.2.1 Ambiguïté due à la projection . . . . .	14
1.2.2 Variations de l'intensité lumineuse non significatives . . . . .	15
1.2.3 Le problème d'ouverture . . . . .	16
1.3 Comment appréhender le mouvement à partir des images ? . . . . .	17
1.4 La détection du mouvement . . . . .	18
1.4.1 Approche région . . . . .	19
1.4.1.1 Détection par image de référence . . . . .	19
1.4.1.2 Détection inter-images . . . . .	21
1.4.2 Approche contour . . . . .	22
1.4.2.1 Détection par image de référence . . . . .	22
1.4.2.2 Détection inter-images . . . . .	23
1.5 L'estimation du mouvement . . . . .	24
1.5.1 Méthodes fondées sur une mise en correspondance . . . . .	24
1.5.2 Méthodes différentielles . . . . .	26
1.5.2.1 Contrainte de conservation de l'intensité lumineuse . . . . .	26
1.5.2.2 Cohérence spatiale de l'intensité lumineuse . . . . .	28
1.5.3 Méthodes par optimisation globale . . . . .	28
1.5.4 Méthodes par optimisation locale . . . . .	30
1.5.5 Méthodes fréquentielles . . . . .	31
1.6 Conclusion . . . . .	31
<b>2 Les méthodes spatio-temporelles</b>	<b>33</b>
2.1 Représentation spatio-temporelle . . . . .	33
2.2 Représentation fréquentielle . . . . .	36
2.3 Estimation du mouvement par analyse du module . . . . .	38
2.3.1 Filtres orientés fréquence . . . . .	38
2.3.1.1 Le filtre de Gabor . . . . .	38
2.3.1.2 Méthode de Heeger . . . . .	40
2.3.1.3 Méthode de Grzywacs . . . . .	43
2.3.1.4 Méthode de Spinei . . . . .	43

2.3.2	Filtres orientés vitesse . . . . .	43
2.4	Estimation du mouvement par analyse de phase . . . . .	44
2.5	Conclusion . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Analyse du mouvement par filtrage RIF</b>	<b>47</b>
3.1	Démarche initiale . . . . .	48
3.1.1	Analyse du mouvement par corrélation . . . . .	48
3.1.2	Système visuel animal . . . . .	50
3.1.3	Deux formalismes pour un même résultat . . . . .	52
3.2	Description du filtre . . . . .	53
3.2.1	Définition continue . . . . .	54
3.2.2	Implantation discrète . . . . .	56
3.3	Etude dans le domaine fréquentiel . . . . .	58
3.3.1	Transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle . . . . .	59
3.3.2	Lieu des maxima du module . . . . .	60
3.3.3	Interprétation de la sélectivité . . . . .	61
3.4	Techniques et contraintes liées à l'implantation . . . . .	63
3.4.1	Constitution d'un banc de filtres . . . . .	64
3.4.2	Discrétisation temporelle . . . . .	64
3.4.3	Choix du voisinage . . . . .	65
3.5	Exemple de traitement sur une séquence réelle . . . . .	66
3.6	Conclusion . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Analyse du mouvement par filtrage RII</b>	<b>70</b>
4.1	Filtres spatio-temporels RII . . . . .	71
4.1.1	Présentation des filtres RII monodimensionnels . . . . .	71
4.1.2	Filtrage RII multidimensionnel . . . . .	73
4.1.3	Analyse du mouvement par filtres RII . . . . .	75
4.2	Propriétés des filtres . . . . .	76
4.2.1	Filtre non récursif équivalent . . . . .	77
4.2.2	Conditions sur les coefficients . . . . .	79
4.2.3	Propriétés dans l'espace fréquentiel . . . . .	81
4.3	Techniques et contraintes liées à l'implantation . . . . .	83
4.3.1	Choix du mode de balayage . . . . .	83
4.3.2	Interpolation temporelle . . . . .	85
4.3.3	Choix du voisinage . . . . .	85
4.4	Conclusion . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Exemple d'implantation</b>	<b>88</b>
5.1	Méthode de conception d'un banc de filtres . . . . .	89
5.1.1	Choix des voisinages . . . . .	89
5.1.2	Voisinages non récursifs équivalents . . . . .	91
5.2	Propriétés des filtres de base . . . . .	92
5.2.1	Mise en évidence expérimentale . . . . .	92
5.2.1.1	Orientation moyenne . . . . .	93
5.2.1.2	Sélectivité . . . . .	94
5.2.1.3	Retard moyen . . . . .	94
5.2.2	Mesure des propriétés . . . . .	95

5.2.2.1	Orientation moyenne . . . . .	95
5.2.2.2	Sélectivité . . . . .	97
5.2.2.3	Retard moyen . . . . .	97
5.2.3	Technique de recherche des coefficients . . . . .	98
5.2.3.1	Les propriétés du banc de filtres . . . . .	99
5.2.3.2	Détermination des coefficients . . . . .	100
5.3	Résultats expérimentaux . . . . .	101
5.3.1	Sphère en translation . . . . .	101
5.3.2	Sphère texturée en translation . . . . .	103
5.3.3	Disques superposés dont l'un est transparent . . . . .	104
5.4	Conclusion . . . . .	106
<b>Conclusion et perspectives</b>		<b>108</b>
C.1	Quelle famille de filtres devons nous choisir ? . . . . .	110
C.2	Comment étudier la cohérence des réponses des filtres ? . . . . .	112
C.3	Dans le cadre d'une application ? . . . . .	114
C.3.1	Comment définir l'architecture de filtrage de manière dynamique ? .	114
C.3.2	Comment faire face aux problèmes d'implantation ? . . . . .	115
<b>Bibliographie</b>		<b>122</b>

# Liste des figures

1.1	Projection de la scène sur le capteur de la caméra . . . . .	13
1.2	Ambiguïté due à la projection 2D d'une scène 3D . . . . .	14
1.3	Singularités présentes dans le flux optique . . . . .	15
1.4	Singularités inhérentes à l'analyse locale des variations . . . . .	16
1.5	Influence de la taille du voisinage . . . . .	17
1.6	Le flux optique . . . . .	18
1.7	Différence entre l'image courante et une image de référence . . . . .	19
1.8	Différence inter-images . . . . .	20
1.9	Primitives et champ épars. . . . .	25
1.10	Mise en correspondance. . . . .	26
1.11	Droite de contrainte du mouvement apparent . . . . .	27
2.1	Orientation spatio-temporelle d'un mouvement . . . . .	34
2.2	Volumes créés par une barre se déplaçant dans différentes orientations. . . . .	35
2.3	Réponse impulsionnelle d'un filtre spatio-temporel. . . . .	36
2.4	Filtre de Gabor . . . . .	39
2.5	Disposition des 12 filtres de Gabor . . . . .	40
2.6	Disposition des filtres pour les 3 gammes de vitesses . . . . .	42
3.1	Analyse du mouvement par corrélation . . . . .	48
3.2	Incertitude sur la mise en correspondance . . . . .	49
3.3	Structure du réseau proposé . . . . .	51
3.4	Plan des coefficients non nuls . . . . .	53
3.5	Calcul des retards . . . . .	55
3.6	Calcul des coefficients de pondération . . . . .	56
3.7	Valeurs des retards et des coefficients de pondération . . . . .	57
3.8	Faisceau de plans d'équations $P_{i,j}(\omega_x, \omega_y, \omega_t) = 0$ . . . . .	61
3.9	Droite de contrainte . . . . .	62
3.10	Réponse fréquentielle des filtres sélectifs $R_v^1$ et $R_v^2$ . . . . .	63
3.11	Principe de l'analyse par un banc de filtres . . . . .	64
3.12	Relation entre la taille du voisinage et la vitesse . . . . .	66
3.13	Image de la séquence . . . . .	67
3.14	Voisinages $9 \times 9$ extraits de la séquence . . . . .	67
3.15	Résultat de l'analyse du mouvement . . . . .	68
4.1	Balayage d'une image ligne par ligne . . . . .	74
4.2	Autres modes de balayage de l'image . . . . .	75
4.3	Exemple de voisinages . . . . .	77

4.4	Répartition des coefficients selon l'orientation . . . . .	80
4.5	Sélectivité en fonction de la répartition des coefficients . . . . .	81
4.6	Domaine de validité des voisinages . . . . .	84
4.7	Balayage en fonction de la vitesse recherchée . . . . .	84
4.8	Voisinage contenant quelques points épars . . . . .	86
5.1	Voisinages $\Omega_R$ utilisés selon l'orientation de $\vec{v}$ . . . . .	90
5.2	Développement de la forme non récursive. . . . .	91
5.3	Propriétés des voisinages équivalents des filtres de base. . . . .	92
5.4	Réponse impulsionnelle de trois filtres de base horizontaux. . . . .	93
5.5	Trois filtres de même orientation moyenne et de sélectivité différente. . . . .	94
5.6	Deux filtres de base horizontaux de retard moyen différent. . . . .	95
5.7	$a_{h-1} - a_{h+1}$ en fonction de la somme des coefficients et pour différentes orientations. . . . .	96
5.8	Evolution de la sélectivité des filtres de base horizontaux en fonction des valeurs du coefficient $a_{h-1}$ . . . . .	97
5.9	Evolution de la sélectivité des filtres de base diagonaux en fonction des valeurs du coefficient $a_{d-1}$ . . . . .	98
5.10	Produit retard moyen par vitesse pour les filtres de base horizontaux. . . . .	99
5.11	Produit retard moyen par vitesse pour les filtres de base diagonaux. . . . .	100
5.12	Séquence contenant une sphère en translation . . . . .	102
5.13	Séquence contenant une sphère texturée en translation . . . . .	104
5.14	Séquence contenant deux disques texturés en translation . . . . .	105
C.15	Répartition des coefficients selon l'ordre du filtre . . . . .	111
C.16	Voisinage et Multirésolutions . . . . .	112
C.17	Cohérence spatiale de l'estimation . . . . .	113
C.18	Cohérence temporelle de l'estimation . . . . .	113
C.19	Modification dynamique des propriétés des filtres . . . . .	115
C.20	Valeurs entières spatiales ou temporelles . . . . .	116

# Bibliographie

- [AB85] E.H. Adelson et J.R. Bergen. Spatiotemporal energy models for the perception of motion. *J. opt. Soc. Am. A.*, 2(2):284–299, 1985.
- [AB86] E.H. Adelson et J.R. Bergen. The extraction of spatiotemporal energy in human and machine vision. *Proc. IEEE Workshop on visual motion*, pages 151–156, 1986.
- [AC95] Sébastien Ambellouis et François Cabestaing. Analyse du mouvement par réseau de neurones à temps de propagation. In *Proceedings of the International AMSE Conference on Communications, Signal and Systems, CSS'95*, pages 554–559, Rabat, Maroc, 1995.
- [AC96] S. Ambellouis et F. Cabestaing. Motion analysis with a time delayed neural network. In *Computinal Engineering in Sytem Application CESA'96*, pages 328–332, 1996.
- [Ana89] P. Anandan. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion. *International Journal Computer Vision*, 2:283–310, 1989.
- [ASH98] D. Pellerin A. Spinei et J. Héroult. Spatiotemporal energy-based method for velocity estimation. *Signal Processing*, 65(3):347–362, 1998.
- [BB95] S.S. Beauchemin et J.L. Barron. The computation of optical flow. *ACM Computing Surveys*, 27:433–467, 1995.
- [BJ92] M.J. Black et M.J. Jepson. Estimating optical flow in segmented image using variable-order parametric models with local deformations. *IEEE Trans. PAMI*, 18(10):973–986, 1992.

- [BJ94] M.J. Black et J.L. Jepson. Estimating optical flow in segmented images using variable-order parametric models with local deformations. Technical Report SPL-94-053, Xerox Systems and Practices Laboratory, 1994.
- [Bla91] M.J. Black. A robust gradient-méthod for determining optical flow. Technical Report YALEU/DCS/RR-891, Yale University, 1991.
- [Bou86] P. Bouthemy. A method of integrating motion information along contours including segmentation. In *8th Conf. on Pattern Recognition*, 1986.
- [Bou88] F. Boutry. *Analyse de scènes dynamiques par représentation espace-temps des éléments mobiles. Application à la conduite des véhicules guidés*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Mai 1988.
- [BPT88] M. Bertero, T. Poggio, et V. Torre. Ill-posed problems in the early vision. *Proceedings of the IEEE*, pages 869–889, 1988.
- [Bru94] J.L. Bruyelle. *Conception et réalisation d'un dispositif de prise de vue stéréoscopique linéaire - Application à la détection d'obstacles à l'avant des véhicules routiers*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Décembre 1994.
- [BSC98] T. Roska B.E. Shi et L.O. Chua. Hyperacuity in cellular neural networks and the measurement of optical flow. *Int. J. of Circuit Theory and Its Applications*, 26:343–364, 1998.
- [Bur95] J.C. Burie. *Mise en correspondance d'images linéaires stéréoscopiques - Application à la détection d'obstacles à l'avant des véhicules routiers*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Septembre 1995.
- [Cab92] F. Cabestaing. *Détection de contours en mouvement dans une séquence d'images and réalisation d'un processeur cablé Temps Réel*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Janvier 1992.
- [CEB98] K. Konolige C. Evelet et R.C. Bolles. Background modeling for segmentation of video-rate stereo sequences. In *CVPR98*, pages 266–272, 1998.

- [CJS80] R.T. Chien C.J. Jacobius et J.M. Selander. Motion detection and analysis of matching graphs of intermediate level. *IEEE Trans. on PAMI*, 2(6):495–510, 1980.
- [CR68] F.W. Campbell et J.G. Robson. Application of fourier analysis to the visibility of gratings. *J. Physiol. Lond.*, 197:551–566, 1968.
- [Der90] R. Deriche. Fast algorithms for low-level vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(1):78–87, 1990.
- [DK98] D. Dooze et L. Khoudour. Obstacle detection in front of automatic trains by linear stereovision. In *Proceedings of Computers in Railways*, pages 83–92, Lisbonne, 2-4 septembre 1998 1998.
- [DS93] T. Darrel et E.P. Simoncelli. On the use of "nulling" filters to separate transparent motions. In *Proc. Conf. on Comp. Vis. Patt. Recog.*, New York, 1993.
- [FGA83] G. Reynolds F. Glazer et P. Anandan. Scene matching through hierarchical correlation. In *Proc. Conf. on Comp. Vis. Patt. Recog.*, pages 432–441, Washington, 1983.
- [FJ90] D.J. Fleet et A.D. Jepson. Computation of component image velocity from local phase information. *International Journal Computer Vision*, 5:77–104, 1990.
- [Fle92] D.J. Fleet. *Mesurement of optical flow*. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [FP81] M. Fahle et T. Poggio. Visual hyperacuity : spatio-temporal interpolation in human vision. *Proc. R. Soc. London B.*, 213:451–477, 1981.
- [Gab46] D. Gabor. Theory of communication. *J. IEE*, 93:429–457, 1946.
- [GS91] C. Gilbert et N.J. Strausfeld. The functional organization of male-specific visual neurons in flies. *Journal of Comparative Physiology A*, 169:395–411, 1991.
- [GY90] N.M. Grzywacz et A.L. Yuille. A model for the estimate of local image velocity by cells in the visual cortex. *Proceedings Royal Society London B*, 239:129–161, 1990.

- [GY91] N.M. Grzywacz et A.L. Yuille. Theories for the visual perception of local velocity and coherent motion. *Computational models of visual processing, MIT*, pages 231–252, 1991.
- [Hay83] S.M. Haynes. Detection of moving edges. *Computer Graphics and Image Processing*, 21, 1983.
- [Hee87] D.J. Heeger. A model for the extraction of image flow. *Journal Optical Society of America A*, 4(8):1455–1471, 1987.
- [Hee88] D.J. Heeger. Optical flow using spatio-temporal filters. *International Journal of Computer Vision*, pages 297–302, 1988.
- [HN94] T.S. Huang et A.N. Netravali. Motion and structure from feature correspondances: a review. *Proceedings of the IEEE*, 82:252–269, 1994.
- [HS81] B.K.P Horn et B.G. Schunk. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17:185–204, 1981.
- [Jai79a] R. Jain. Extraction of moving objects images through change detection. In *Proceedings of the 6th Int. Conf on Art.Intel.*, pages 425–428, 1979.
- [Jai79b] R. Jain. On the analysis of difference pictures from image sequences of real world scenes. *IEEE PAMI*, Avril 1979.
- [Jai81a] R. Jain. Dynamic scene analysis using pixel-based processes. *Computer*, Aout 1981.
- [Jai81b] R. Jain. Extraction of motion information from peripheral processes. *IEEE PAMI*, pages 1010–1027, septembre 1981.
- [Jai84] R. Jain. Différence and accumulative difference pictures in dynamic scene analysis. *Image and Vision Computing*, 2(2):99–108, may 1984.
- [JBB94] D.J. Fleet J.L. Barron et S.S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques. *International journal of Computer Vision*, 12:43–77, 1994.
- [JJ81] J.R. Jain et A.K. Jain. Displacement measurement and its application in inter-frame image coding. *IEEE Trans. on Comm.*, 29(12):1799–1808, 1981.

- [JKB87] W.B. Thompson J.K. Kearney et D.L. Boley. Optical flow estimation : an error analysis of gradient-based methods with local optimization. *IEEE trans. PAMI*, 9(2):229–244, 1987.
- [JWH92] N. Ahuja J. Weng et T.S. Huang. Motion and structure from line correspondances : closed-forme solution, uniqueness and optimization. *IEEE Trans. on PAMI*, 14(3):318–336, 1992.
- [Kho97] L. Khoudour. *Analyse spatio-temporelle de séquences d'images lignes. Application au comptage des passagers dans les systèmes de transport*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Janvier 1997.
- [KKG90] A. von Brandt K.P. Karmann et R. Gerl. Moving object segmentation based on adaptative reference images. *Signal Processing*, 5:951–954, 1990.
- [Lev83] M.D. Levine. *A rule-based system for characterizing blood cell motion*. Ed. T.S. Huang, 1983.
- [LH88] Y. Liu et T.S. Huang. linear algorithm for determining motion and structure forme line correspondances. *CVGIP*, 44(1):35–57, 1988.
- [LK81] B. Lucas et T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. DARPA Image Understanding Wokshop*, pages 121–130, 1981.
- [LT90] W. Long et Y.H. Tang. Stationary background generation: An alternative to the difference of two images. *Pattern Recognition*, 23(12):1351–1359, 1990.
- [Luc84] B.D. Lucas. *Generalised image matching by the method of differences*. PhD thesis, Carnegie-Mellon University, 1984.
- [LV89] J.J. Little et A. Verri. Analysis of differential and matching methods for optical flow. *IEEE Workshop on Visual Motion*, pages 173–180, 1989.
- [LY90] W. Long et Y.H. Yang. Stationary background generation : An alternative to the difference of two images. *Pattern Recognition*, 23:1351–1359, 1990.

- [Mak96] A. Makarov. Comparison of background extraction based intrusion detection algorithms. In *International Conference On Image Processing ICIP'96*, pages 521–524, 1996.
- [MB94] F.G. Meyer et P. Bouthemy. Region based tracking using affine motion models in long image sequence. *CVGIP : Image Understanding*, 60(2):119–140, 1994.
- [MK95] J.M. Missler et F.A. Kamangar. A neural network for pursuit tracking inspired by the fly visual system. *Neural Networks*, 8(3):463–480, 1995.
- [MU81] D. Marr et S. Ullman. Directional selectivity and its use in early visual processing. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 204:301–328, 1981.
- [Nag83a] H.H. Nagel. Displacement vectors derived from second-order intensity variations in image sequences. *Computer Graphic and Image Processing*, 21:85–117, 1983.
- [Nag83b] H.H. Nagel. On the computation of optical flow : Relation between different approaches and some new results. *Artificial Intelligence*, 33:299–324, 1983.
- [OFT87] F. Lustman O. Faugeras et G. Toscani. Motion and structure from motion from point and line matches. In *Proceedings 1st ICCV*, pages 25–34, 1987.
- [OG90] Ögmen et S. Gagné. Neural network architectures for motion perception and elementary motion detection in the fly visual system. *Neural Networks*, 3:487–505, 1990.
- [Ork92] M. Orkisz. Localisation d'objets mobiles dans les scène naturelles filmées par une caméra fixe. *Traitement du Signal*, 9(4):325–346, 1992.
- [PVY88] T. Poggio, H. Voorhees, et A. Yuille. A regularized solution to edge detection. *Complexity*, 4:106–123, 1988.
- [RGL95] S. Bouzar R. Glachet et F. Lenoir. Estimation des flux de voyageurs dans les couloirs du métro par traitemnt d'images. *Recherche Transport Sécurité*, 46, 1995.
- [Roa79] J.W. Roach. Computer tracking of objects moving in space. *IEEE Trans. on PAMI*, 1(2), 1979.

- [Rob66] J.G. Robson. Spatial and temporal contrast sensitivity functions of the visual system. *J. opt. Soc. Am.*, 56:1141–1142, 1966.
- [Rui97] Y. Ruichek. *Stéréovision linéaire par réseau de neurones de Hopfield*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Février 1997.
- [SBA97] A. Sadji S. Bouchafa, L. Beheim et D. Aubert. Crowd motion estimation in subway corridors using image processing. In *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Berlin, 21-24 octobre 1997.
- [SBB97] A. Califour S.S. Beauchemin et J.L. Barron. Discontinuous optical flow :recent theoretical results. In *Vision Interface*, pages 57–64, 1997.
- [Sch89] B.G. Schunk. Image flow segmentation and estimation by constraint line clustering. *IEEE PAMI*, 11(10):1010–1027, 1989.
- [Sel96] M. Selsis. *Application des modèles de contours actifs au suivi et à la localisation 3D d'objets en mouvement*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Janvier 1996.
- [Sim83] E.P. Simoncelli. *Distributed représentation and analysis of visual motion*. PhD thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science MIT, 1983.
- [Spi98] A. Spinei. *Estimation du mouvement par triades de filtres de Gabor. Application au mouvement d'objets transparents*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Octobre 1998.
- [Ste85] P. Stelmaszyk. *Analyse de scènes dynamiques par recherche des contours en mouvement*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Novembre 1985.
- [TA77] A.N. Tikhonov et V.Y. Arsenin. *Solution of ill-posed problems*. Winston and Wiley, Washington, DC, 1977.
- [TH99] A.B. Torralba et J. Hérault. An efficient neuromorphic analog network for motion estimation. *IEEE Trans. on circuits and system-I:special issue on bio-inspired processors and CNNs for vision*, 46(2):269–280, 1999.

- [TLL96] M. Karjalainen T.I. Laakso, V. välimäki et U.K. Lain. Splitting the unit delay. *IEEE Signal Processing Magazine*, pages 30–54, 1996.
- [UHT91] K.P. Unnikrishnan, J.J. Hopfield, et D.W. Tank. Connected digit speaker-dependant speech recognition using neural network with time delayed connections. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 39(3), 1991.
- [Uns88] M. Unser. Comments on a new approach to recursive fourier transform. *Proceedings IEEE*, 76:1395–1396, 1988.
- [Van97] P. Vannoorenberghe. *Détection de mouvement par analyse de séquence d'images monoculaires. Application à l'estimation de flux de piétons en milieu urbain*. PhD thesis, Laboratoire d'Analyse des Systèmes du Littoral - Université du Littoral, France, 1997.
- [Vie88] C. Vieren. *Segmentation de scènes dynamiques en temps réel. Application au traitement de séquences d'images pour la surveillance de carrefours routiers*. PhD thesis, Université des Sciences and Technologies de Lille, Avril 1988.
- [WA83] A.B. Watson et A.J. Ahumada. A look at motion in the frequency domain. In *ACM Motion:Representation and Perception*, Baltimore, 1983.
- [WA93] J.Y.A Wang et E.H. Adelson. Layered representation for motion analysis. In *Proceedings of CVPR*, 1993.
- [WA94] J.Y.A. Wang et E.H. Adelson. Representing moving images with layers. *IEEE Trans. IP*, 3(5):625–638, 1994.
- [Yak76] Y. Yakimovsky. Boundary and object detection and real world images. *JACM* 23(4), pages 599–618, 1976.
- [YvV95] I.A. Young et L.J. van Vliet. Recursive implementation of the gaussian filter. *Signal processing*, 44:139–151, 1995.

## Résumé

Dans cette thèse, nous présentons la forme générale d'un filtre récursif orienté vitesse dont les paramètres permettent de régler sa sélectivité vis-à-vis d'une vitesse donnée. Une architecture de filtrage, composée d'un ensemble de filtres orientés pour un ensemble de vitesses données, est appliquée à une séquence d'images. L'analyse des réponses de chaque filtre nous permet de définir le champ des vitesses apparentes de la séquence.

Dans un premier temps, en rapprochant les méthodes d'estimation du mouvement qui exploitent le principe de corrélation et la structure biologique du système visuel animal, nous décrivons la structure non récursive d'un filtre sélectif. Nous validons de manière théorique la propriété de sélectivité du filtre en étudiant la transformée de Fourier de son expression mathématique.

Afin de réduire le nombre d'opérations élémentaires nécessaires au calcul de la réponse d'un filtre, nous modifions la définition précédente afin d'aboutir à une formulation récursive.

Nous implantons une architecture de filtrage fondée sur une structure particulière des filtres récursifs. Nous précisons les démarches à suivre pour concevoir un banc de filtres qui nous permette de rechercher un ensemble fini de vitesses. Nous appliquons la méthode sur plusieurs séquences d'images de synthèse dont certains champs des vitesses apparentes présentent des discontinuités.

**Mots clés :** Analyse du mouvement, Filtrage spatio-temporel, Filtrage récursif, Flux optique, Mouvements transparents, Occlusions

## Abstract

In this work, we propose a motion estimation method based on a recursive formulation of a spatio-temporal velocity selective filter. The response is a big value for one specific motion speed and direction. We apply a set of filters in all pixels of the sequence. We analyze all the responses to compute the optical flow of the sequence.

First, we compare correlation based methods with the biological structure of an animal visual system to specify the mathematical formulation of a non recursive spatio-temporal filter. A proof of its tuning property is given by studying it in frequency domain.

The precedent method is processing time expensive. To reduce the elementary operations number required, we describe a recursive formulation of the precedent filter that uses the response value of the same filter in each pixel of a spatio-temporal neighborhood.

Finally, we present a particular family of recursive filters. We explain how to define one to detect a specific speed and direction of motion. We show results using synthetic image sequences. We analyze the case of discontinuities in apparent motion field.

**Keywords :** Motion analysis, Spatio-temporal filtering, Recursive Filtering, Optical flow, Transparent Motions, Occlusions