

Modèle d'architecture de rétine biologique à base d'Automates Cellulaires et de Filtres Morphologiques

François DEVILLARD¹, Bernard HEIT²

¹Université de Nancy - IUT de Saint-Dié des Vosges
11 rue de l'Université, F-88100 Saint-Dié-des-Vosges, France

²Université de Nancy - IUT Nancy-Brabois
6 rue du Colonel Clarenthal, F-54300 Lunéville cedex, France

francois.devillard@iutsd.uhp-nancy.fr, bernard.heit@iutnb.uhp-nancy.fr

Résumé – La vision biologique des mammifères présente des performances globales dont nous nous sommes inspirés pour l'extraction de caractéristiques dans les images naturelles en vue de la reconnaissance de formes. La modélisation de l'architecture des premières couches de la rétine biologique couplée au concept d'automate cellulaire ouvre des perspectives nouvelles dans le développement d'outils adaptatifs pour la vision par ordinateur. Le traitement cellulaire est réalisé par des opérateurs simples morphologiques dans l'objectif de permettre une implémentation temps réel.

Abstract – The vision of mammals has very good efficiency to perform and analyse visual scene. Thus these research works are inspired by the architecture and properties of the first retinian layers. The goal is to obtain new kind of methods of image processing and particularly for the pattern recognition. The first retinian layers are modeled by cellular automatas and should permit the design of a large range of tools dedicated to image processing for computer vision. Currently the cellular treatments use simple morphological operators that are well adapted to real time implementations.

1 Introduction

Les systèmes visuels biologiques présentent des capacités de traitement qui suscitent notre intérêt à développer des dispositifs innovants de vision pour l'ordinateur. Le système visuel des mammifères en particulier est riche en propriétés dont les connaissances actuelles de neurobiologie nous permettent d'en tirer des modèles simplifiés d'architecture. La mise en évidence d'indices visuels statiques et dynamiques en tirant profit des mécanismes du système visuel nous permet d'obtenir une architecture ouverte, implémentable et polyvalente. La lourdeur architecturale engendrée par l'utilisation d'automates cellulaires nous permet en contre-partie d'introduire une capacité d'adaptations locales à notre algorithme.

1.1 Positionnement de nos travaux

La solution proposée apporte une méthodologie débouchant sur des outils permettant d'extraire des indices visuels de type contrastes et mouvements caractérisant les images naturelles. Dans cet article nous présentons un modèle d'architecture s'appuyant sur une méthode d'implémentation sous la forme d'un traitement distribué avec la perspective de réelles capacités d'adaptations locales dans l'image. Notre travail présente l'implémentation d'un modèle d'architecture simplifiée des couches rétinienne. Le fonctionnement des couches rétinienne met en œuvre des processus complexes basés sur la notion de champ-récepteurs en tant que processeur élémentaire. Le parallélisme des opérations a conduit vers une solution à base

d'automates cellulaires (AC). Les AC, à partir de cellules agencées en réseau et soumises à des règles de fonctionnement, permettent de reproduire des processus complexes [9] de manière simple et évolutive. Au niveau cellulaire, pour mettre en évidence les contours statiques et dynamiques nous avons utilisé des opérateurs de filtrage morphologique.

1.2 Plan de l'article

Cet article est organisé selon le plan suivant :

- La partie suivante présente l'architecture rétinienne et ses voies de perception parvocellulaire et magnocellulaire (P et M respectivement). Ces 2 voies sont respectivement le siège de la perception du contraste et du mouvement.
- La troisième partie présente le traitement élémentaire de la couche modélisée par un automate cellulaire.
- Nous présentons ensuite les résultats obtenus pour la modélisation des 2 voies P et M. Une analyse est menée à partir de tests appliqués sur des vidéos de synthèse et une naturelle.
- Et enfin la dernière partie conclut l'article en commentant les résultats et donne des évolutions possibles de cette approche algorithmique d'inspiration biologique.

2 Architecture de la rétine

2.1 La rétine biologique

La perception visuelle commence avec la couche Plexiforme Externe (PLE [5]) par l'acquisition de la scène observée avec les cellules cônes qui transforment l'intensité lumineuse en signaux exploitables. La couche des cellules horizontales estime localement les référentiels de luminance. La couche des cellules bipolaires différencie, par triades synaptiques, la réponse des cellules cônes et horizontales pour mettre en évidence les contrastes de luminance. Les axones des cellules bipolaires se terminent à la couche Plexiforme Interne (PLI [2]) où elles entrent en contact avec diverses catégories de cellules amacrines et ganglionnaires. Les cellules amacrines travaillent transversalement comme les horizontales et répondent aux variations temporelles des potentiels des cellules bipolaires. Les cellules ganglionnaires sont le siège du traitement de la PLI. Elles présentent une grande diversité morphologique créant des canaux spécialisés de perception. Au niveau cellulaire, la réponse est le résultat d'une sommation non linéaire et pondérée des entrées synaptiques. Cette réponse est proche de celle d'un filtre passe-bas spatio-temporel [11]. Ainsi l'utilisation de filtres adaptés travaillant en maillage permet d'élaborer une couche cellulaire aux comportements similaires à ceux d'une couche rétinienne de régularisation.

2.2 Modélisation des couches

Pour notre algorithme, chaque cellule est affectée au traitement d'un pixel de l'image. Chaque couche est constituée d'un maillage carré de cellules. On distingue 3 types de couche dans la modélisation architecturale de la rétine [11]. La couche de transduction (cône), celles de régularisation (horizontale et amacrine) et enfin celles de différenciation (bipolaire et ganglionnaire) [4] :

- Les couches de différenciation sont implémentées actuellement par de simples opérateurs de différence qui modélisent le traitement des cellules naines.
- Pour la couche de régularisation, chaque cellule se comporte comme un filtre spatio-temporel que nous modélisons par une machine d'état élémentaire.
- La couche de transduction assure un rôle de régularisation mais de très large bande-passante pour la zone considérée, la fovéa. Le modèle actuel de nos cellules cônes utilise une loi constante de transduction linéaire agissant sur la luminance.

3 Implémentation par AC

Toutes les couches de régularisation sont implémentées sous la forme d'un automate cellulaire ([6][9]). L'AC est organisé en maillage de cellules. Chaque cellule de l'AC est autonome et soumise aux règles d'une machine d'états. Le filtrage spatio-temporel est effectué en 5 étapes de traitement :

- L'acquisition du signal d'entrée de la cellule (ACQ),
- Une itération de filtrage spatial (FS),
- La mise à jour de la sortie de la cellule pour le filtrage spatial (FSC),

- Le filtrage temporel (FT),
- L'attente de synchronisation de l'AC (STOP).

Concernant le filtrage cellulaire, il est composé de 2 traitements cascades :

- La composante spatiale du filtrage utilise une méthode de lissage morphologique (midpoint filter [8]). Les itérations traduisent l'étalement dendritique de la cellule.
- La composante temporelle est un filtre de lissage morphologique oublieux qui est défini comme une solution hybride de filtrage morphologique et linéaire [7]. Ce filtre permet de révéler rapidement les variations de fortes amplitudes des signaux tout en atténuant progressivement les variations plus anciennes.

3.1 Implémentation cellulaire

L'automate cellulaire supervise toutes les cellules fonctionnant avec les mêmes règles. Les paramètres n_c et a_c des cellules sont individualisés.

n_c représente le nombre entier d'itérations du filtre *midpoint*. Ce filtre est appliqué avec un élément structurant \mathcal{V} composé des pixels connexes situés en haut, en bas, à gauche et à droite.

a_c compris entre $]0,1[$, est le coefficient d'oubli de la composante de filtrage morphologique oublieux de la cellule. Plus sa valeur est forte plus l'oubli est important (faible persistance cellulaire). L'entrée de la cellule est désignée par *in* et la sortie par *out*.

3.1.1 Machine d'états cellulaire

Chaque cellule a une activité traduite par sa propre machine d'états. Les paramètres sont individualisés pour pouvoir modifier par exemple les propriétés des cellules en fonction de leur environnement (luminance ou contraste locaux). La machine d'états, illustrée figure 1, parcourt une séquence composée de 5 états.

Les conditions des transitions entre états sont :

$$acq_1 \equiv (n_c > 0); \quad acq_2 \equiv (n_c = 0) \cap (a_c \neq 1)$$

$$fs_1 \equiv true$$

$$fsc_1 \equiv (a_c \neq 1); \quad fsc_2 \equiv (n_c \neq 0)$$

$$fsc_3 \equiv (n_c = 0) \cap (a_c = 1)$$

$$ft_1 \equiv true$$

$$stop_1 \equiv true$$

Les traitements ¹associés aux états sont :

$$\text{Pour ACQ} : \quad rgi_1 \leftarrow in; \quad rgi_2 \leftarrow in;$$

$$\text{Pour FS} : \quad rgo_1 \leftarrow MAX_{\mathcal{V}}(rgi_1); \quad rgo_2 \leftarrow MIN_{\mathcal{V}}(rgi_2);$$

$$\text{Pour FSC} : \quad rgi_1 \leftarrow rgo_1; \quad rgi_2 \leftarrow rgo_2; \quad n_c \leftarrow n_c - 1;$$

$$\text{Pour FT} : \quad rgo_1 \leftarrow a_c \cdot rgo_1 + (1 - a_c) \cdot MAX(rgo_1; rgo_{1t});$$

$$rgo_2 \leftarrow a_c \cdot rgo_2 + (1 - a_c) \cdot MIN(rgo_2; rgo_{2t});$$

$$rgo_{2t} \leftarrow rgo_2; \quad rgo_{1t} \leftarrow rgo_1;$$

$$\text{Pour STOP} : \quad out \leftarrow (rgo_1 + rgo_2)/2;$$

¹Les notations $MIN_{\mathcal{V}}$ et $MAX_{\mathcal{V}}$ sont les opérateurs morphologique MIN et MAX appliqués avec un élément structurant \mathcal{V} . Par défaut d'élément structurant, ils s'appliquent sur les scalaires en paramètres.

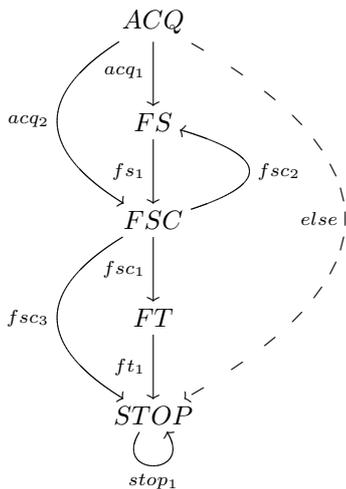


FIG. 1: Diagramme de la machine d'états cellulaires.

3.2 Implémentation de la rétine

L'architecture rétinienne est constituée de 3 automates cellulaires implémentant les couches cône, horizontale et amacrine. Les couches sont traitées en partant de la couche cône vers la couche ganglionnaire. L'exécution de chaque AC est itérative jusqu'à stabilisation complète où toutes les cellules sont en attente de synchronisation. L'étape de synchronisation est nécessaire car les cellules sont paramétrables individuellement si bien que leur traitement peut ne pas progresser à la même vitesse. Pour planifier et contrôler les actions conduisant aux objectifs, un superviseur agit directement sur les AC en paramétrant les cellules. Fonctionnellement, le superviseur synchronise l'activité des cellules de l'AC, il gère ainsi leur ordonnancement.

Notre implémentation actuelle ne calcule qu'une seule voie de traitement à la fois, la supervision obtient de la rétine les voies de perception P ou M en paramétrant différemment les couches.

4 Résultats

Nos travaux ont conduit à la réalisation d'une chaîne continue de traitement permettant d'extraire les premiers indices visuels détaillant la scène. De manière similaire, à l'organisation existante sur la rétine des mammifères, l'organisation de l'architecture des voies a pu être modélisée et les résultats obtenus approchent les mécanismes de perception biologique. Ainsi comme l'illustre respectivement les figures 4 et 5, la modélisation de la voie P révèle l'ensemble des caractéristiques statiques et dynamiques et la voie M est spécialisée dans le mouvement à travers la séquence d'images. Le paramétrage des couches spécialise le comportement de la voie considérée :

- Le paramétrage dual des cellules cônes et horizontales (notion de champ récepteur) sélectionne la taille des contrastes perçus par la PLE. A noter que les cônes peuvent être utilisés pour décaler la voie de perception vers de plus faible résolution (simulation de la zone macula de la rétine [5]).

TAB. 1: Paramétrages des couches

Couche	Cône		Horizontale		Amacrine	
	n_c	a_c	n_c	a_c	n_c	a_c
<i>Voie P</i>	0	1	3	0.5	0	0.01
<i>Voie M</i>	4	1	10	0.5	0	0.1

- Le paramétrage des cellules amacrines règle la bande passante temporelle de la couche PLI.

On applique en entrée de rétine une séquence synthétique. Cette séquence est composée de 2 carrés statiques CARRE1 et CARRE2. Ce sont respectivement des carrés de 2 et 16 pixels de coté et de niveau 128 illustrés par leur profil de luminance représenté en rouge figure 2. CARRE1 teste la réponse impulsionnelle de la rétine alors que CARRE2 révèle une réponse indicielle étant donné la taille inférieure des centres ON des champs récepteurs simulés (1 et 9 pixels pour respectivement les voies P et M).

Pour la PLE, on constate que les réponses impulsionnelles sont centrées et de même intensité en positif et négatif. Elles approchent par leurs résultats l'allure de la réponse DOG décrite par Marr [1]. Les réponses indicielles caractérisent la réponse à un contour idéal. La voie P agit comme un laplacien qui nous permet de détecter et localiser les contours détaillant les objets. La voie M agit également comme un laplacien à la différence qu'il apparait une zone de transition centrée sur le contour de dimension la taille du ON de la voie M. Les pics en bord de palier et cernant les contours sont l'émanation des cônes.

Pour la PLI, on constate pour les mêmes images mais observées durant une séquence, une atténuation lente du signal pour la voie P et rapide pour la voie M. Le filtre temporel réalisé pour la voie M estompe les détails statiques de la réponse PLE.

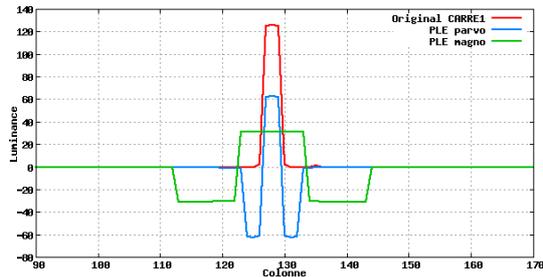
5 Conclusion

Les résultats de cette modélisation d'architecture de rétine sont encourageants. Dans cette configuration la voie P révèle tous les contours (statiques ou non) dans une résolution élevée décrivant finement le détail des objets. La voie M est sensible à des résolutions plus faibles et atténuée donc les détails fins et d'autant plus rapidement s'ils sont statiques. Cette voie révèle principalement les événements dans les séquences tels que le mouvement, l'apparition ou la disparition des objets.

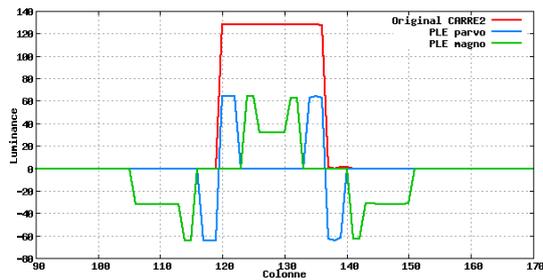
Les perspectives d'évolutions sont nombreuses, ainsi 3 axes sont en cours d'études :

- L'individualisation du traitement cellulaire dans l'objectif d'apporter des capacités d'adaptation fonction de la couche concernée (effet Michaelis Menten [8] [10], ...),
- L'exploitation des résultats à la sortie de la PLI,
- L'implémentation matérielle dans l'objectif d'un traitement réalisé en temps réel[3].

Annexes

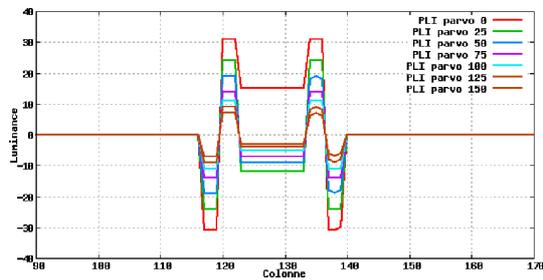


(a) CARRE1

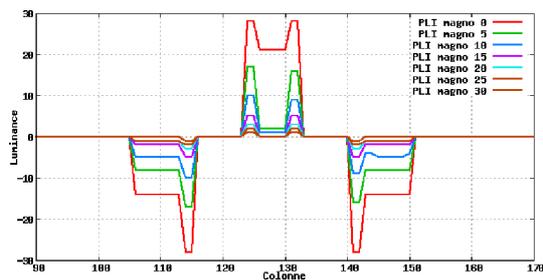


(b) CARRE2

FIG. 2: Résultats de la PLE pour les voies P et M.



(a) Sortie PLI-Parvocellulaire



(b) Sortie PLI-Magno cellulaire

FIG. 3: Résultats de la PLI sur CARRE2.

Notre modèle est appliqué sur un exemple de séquences vidéos de carrefour (http://i21www.ira.uka.de/image_sequences/) avec les mêmes paramétrages des cellules utilisés pour les résultats de la figure 2 et 3.

On remarque sur les images résultats que la voie P détaille précisément tous les objets, l'atténuation temporelle de la PLI est sensible mais lente. La voie M détecte grossièrement les objets en déplacement dans la rue.

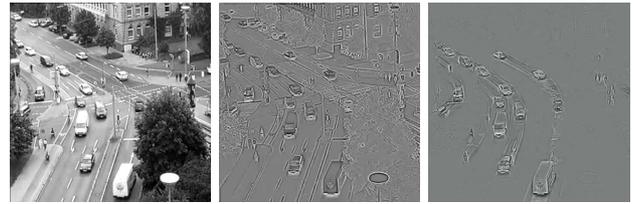


FIG. 4: Résultats de la voie P. De gauche à droite, on a l'image d'origine, les sorties de la PLE et PLI.

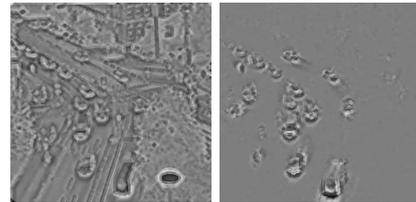


FIG. 5: Résultats de la voie M. De gauche à droite, on a les sorties de la PLE et PLI.

Références

- [1] D.Marr. *Vision*. W. H. Freeman and Company, 1982.
- [2] D.M.Dacey. The mosaic of midget ganglion cells in the human retina. *Journal of Neuroscience*, 13 :5334–5355, December 1993.
- [3] F.Devillard B.Heit et S.Gobron. Implémentation temps réel sur GPU d'une architecture de rétine biologique à base d'automates cellulaires. In *GRET-SI'07*. XXIeme GRETSI conference, Troyes, France, Septembre 11-14 2007.
- [4] H.Kolb. How the retina works. *American scientist*, January-February 2003.
- [5] J-M.Jolion. Les systèmes de vision. *Hermès Science Publications*, 2001.
- [6] J.H.Conway. Game of life. *Scientific American* 223, pages 120–123, 1970.
- [7] J.Richefeu. *Détection et analyse du mouvement sur système de vision à base de rétine numérique*. PhD thesis, Laboratoire d'Electronique et d'Informatique - ENSTA, 2006. 253 pages.
- [8] R.C.Gonzalez and R.E. Woods. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 1989.
- [9] S.Wolfram. *A new kind of science*. Wolfram Media Inc., 1st edition, 2002.
- [10] W.F.Schreiber. *Fundamentals of Electronic Imaging Systems*. Information Sciences, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [11] W.H.A.Beaudot. *Le traitement neuronal de l'information dans la rétine des vertébrés - Un creuset d'idées pour la vision artificielle*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994. 228 pages.