



SUR L'IMPLANTATION PARALLELE ANALOGIQUE D'UN DETECTEUR OPTIMAL DE CONTOUR.

E.BELHAIRE, P.GARDA

I.E.F., C.N.R.S. L.A. 22, Bat. 220, Un. de Paris Sud F-91405 ORSAY

RESUME

Nous proposons une implantation parallèle d'un détecteur de contour qui s'appuie sur un filtre IIR proposé par R.Deriche et qui est optimal au sens de Canny. Nous proposons une réalisation analogique très efficace à l'aide d'un réseau de diffusion.

SUMMARY

In this paper we are concerned with the parallel implementation of a step edge detector optimal under Canny's criteria. We show that optimal IIR filter can be derived from diffusion networks. Thus these filters lead to very efficient parallel implementation as analog combinatorial circuits.

INTRODUCTION.

Nous sommes intéressés par la réalisation monolithique de capteurs intelligents utilisés en reconnaissance des formes, ayant une architecture parallèle de type tableau [Garda88]. Nous avons donc cherché un "bon" détecteur de contour, dont le caractère parallèle nous permette de distribuer son implantation dans le tableau de capteurs.

Nous décrivons ici la conception d'un tel détecteur de contours, optimal d'après les règles de Canny. La section 1 introduit un filtre RII optimal en ce sens pour la détection de contours échelons, la section 2 sa mise en oeuvre par un réseau de diffusion, la section 3 l'implantation de la détection de maxima locaux et la section 4 l'implantation d'un détecteur par "zero-crossings".

1.DÉTECTION D'ÉCHELONS.

1.1.Détection de contour échelon.

Afin d'améliorer les performances des détecteurs de contour, Canny a suggéré une approche systématique de la détermination de leur forme optimale, pour un type de contour donné [Canny86]. Pour cela il a considéré des profils mono-dimensionnels de contours noyés dans du bruit blanc. La localisation du contour est obtenue comme le maximum local de la convolution du signal d'entrée par un filtre f . Ce filtre est déterminé en fonction de trois critères (bonne détection, bonne localisation, absence de réponses multiples) qui ont été formulés par des fonctionnelles de la fonction f . Canny a ainsi pu construire une fonction d'optimisation ne dépendant que de f et de la forme du contour. Dans le cas

d'un contour échelon mono-dimensionnel, il a calculé de cette manière un filtre à Réponse Impulsionnelle Finie, et l'a approximé par la première dérivée d'une gaussienne.

1.2.Filtre RII.

Avec les mêmes critères, Deriche [Deriche87] a calculé un filtre 1-D à Réponse Impulsionnelle Infinie ayant de meilleurs indices de performances que celui de Canny, et dont la réponse impulsionnelle échantillonnée est :

$$g_n = -S.n.e^{-\alpha|n|} \quad (1)$$

La transformée en Z du filtre RII donné par l'équation (1) est :

$$G(z) = -S. \sum_{-\infty \leq k \leq \infty} k.e^{-\alpha|k|}.z^{-k}$$

Les calculs conduisent à l'expression :

$$G(z) = S.(e^{\alpha} + e^{-\alpha}).(z - z^{-1}).[(e^{\alpha} + e^{-\alpha}) - z - z^{-1}]^{-2}$$

Cette expression montre que le filtre G peut être mis en oeuvre en appliquant en cascade deux filtres B dont la transformée en Z est :

$$B(z) = 1/((e^{\alpha} + e^{-\alpha}) - z - z^{-1}) \quad (3)$$

et un opérateur de dérivation discrétisée D dont la transformée en Z est :

$$D(z) = z - z^{-1} \quad (4)$$

c'est à dire tel que : $y_n = x_{n-1} - x_{n+1}$.

Nous allons maintenant présenter une mise en oeuvre parallèle de ce filtre B par un réseau de diffusion analogique.



2. IMPLANTATION DU FILTRE.

2.1. Réseau de diffusion.

Un réseau de diffusion mono-dimensionnel réalisé par un circuit résistif familier, est représenté à la figure 1. Chaque noeud du réseau est connecté :

- à la terre par une résistance de fuite (R_l),
- à ses deux voisins à travers des résistances de diffusion (R_d),
- à une source de courant.

Les entrées sont les courants injectés (X_i), les sorties étant les tensions des noeuds du réseau (V_i).

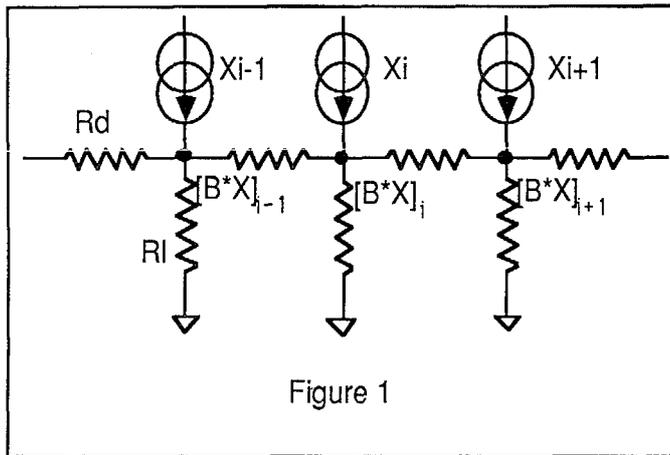


Figure 1

L'égalité des courants (loi de Kirchoff) appliquée au noeud i conduit à :

$$[2+R_d/R_l].v_i = v_{i+1} + v_{i-1} + R_d.x_i \quad (5)$$

Cette équation de récurrence est celle d'un filtre RII B_1 . On remarque de plus que ce filtre est récursif, sa transformée en Z étant :

$$B_1(z) = R_d / ((2+R_d/R_l) - z - z^{-1}) \quad (6)$$

Ainsi, si on choisit les résistances R_d et R_l telles que $(e^\alpha + e^{-\alpha}) = (2+R_d/R_l)$, B_1 est alors le filtre B amplifié par R_d .

L'excentricité du noyau ("largeur" du noyau), que l'on peut définir par $e^{-\alpha}$, est :

$$e^{-\alpha} = ((\sqrt{(R_d/R_l+4)} - \sqrt{(R_d/R_l)})/2)^2$$

Par conséquent, elle peut être modulée par le rapport R_d/R_l . (Noter que $R_d=R_l$ correspond à un coefficient " α " proche de 1).

2.2. Schéma 1-D.

Le schéma 1-D du filtre G est représenté à la figure 2. Les entrées du second réseau de diffusion sont des sources de courant contrôlées par les tensions de noeud du premier réseau. Les deux réseaux de diffusion calculent le filtre $C=B*B$, le différenciateur calculant la dérivée au site i .

2.3. Extension 2-D.

Par analogie avec l'extension 2-D utilisée par [Canny86], nous pouvons appliquer, dans la direction parallèle au contour, un filtre de lissage. Ce filtre est l'intégrale au sens discret, du filtre G , soit C puisque $G=D*C$. Dès lors, le processus de détection d'un contour dans une direction quelconque consiste en un filtrage par un filtre 2-D séparable, suivi d'une dérivation directionnelle.

Dans le but de diminuer la complexité d'intégration, ceci suggère d'utiliser un filtre 2-D non-séparable K , lequel est une extension 2-D directe d'un réseau 1-D de diffusion en un réseau 2-D de diffusion : chaque noeud du réseau étant lié à ses quatre voisins par des résistances de diffusion.

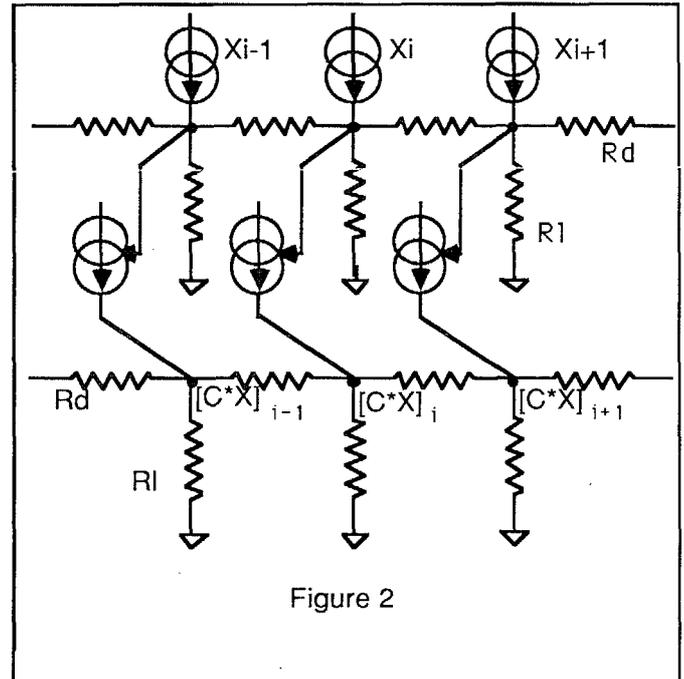


Figure 2

2.4. Résistances.

Un réseau de résistances de grande taille repose nécessairement sur des résistances de grande valeur et de faible surface. Or ceci ne peut être obtenu à l'aide de composants passifs dans une technologie CMOS, et dans ce cas on est conduit à simuler les résistances à l'aide de composants actifs. D'une part, [Sivolitti87] a décrit une implantation combinatoire analogique d'un réseau résistif de diffusion. Chaque résistance est alors construite avec 9 transistors. D'autre part, [Bernard88] a proposé une réalisation d'un réseau résistif à l'aide de capacités commutées, dont l'utilisation pour la détection de contours est décrite dans [Belhaire88].

3. MARQUAGE DES POINTS DE CONTOUR.

Une mise en oeuvre complète d'un détecteur de contour optimal inclut la détection des maxima locaux du gradient [Canny86]. C'est-à-dire qu'elle exige, pour chaque pixel, le calcul de l'amplitude et de la direction du gradient, afin de ne garder que les points qui sont maximum local dans la direction du gradient. Ces maxima locaux sont ensuite

seuillés en fonction de l'amplitude de leur gradient par un seuillage à hystérésis. La suppression des non-maxima apporte des contours d'un pixel de large seulement, le seuillage à hystérésis éliminant les points isolés dus au bruit (point de contour isolé, ou trou dans un contour). Nous allons montrer que presque tous ces procédés peuvent être implantés en utilisant des comparateurs commandant des multiplexeurs analogiques.

3.1. Dérivée directionnelle.

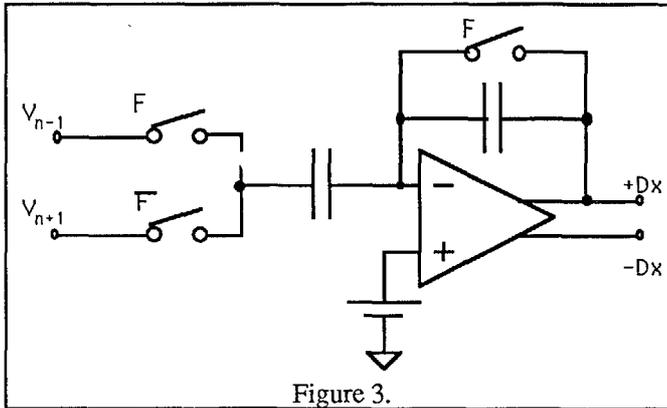


Figure 3.

Le gradient au site (x, y) est calculé par l'opérateur D de l'équation (4) dans les directions X et Y . L'opérateur D dans la direction X (D_X) peut être mis en oeuvre par un intégrateur à capacités commutées auquel on présente successivement la sortie du site $(x+1,y)$ et l'opposé de la sortie du site $(x-1, y)$, (cf. figure 3). Ainsi la fonction de différence de l'équation (4) est facilement calculable. La dérivation dans la direction Y est semblable.

3.2. Direction du gradient.

Afin de diminuer la surface et la complexité d'intégration du réseau analogique à maille carrée, il est préférable de considérer seulement un voisinage 3×3 pour le calcul de direction du gradient. (comme pour l'implantation du détecteur de Canny sur la Connection Machine cf [Little87]). De plus, nous envisageons d'approximer la direction du gradient par une des 4 directions (soit 8 sens) de ce voisinage 3×3 (N-S, E-W, NE-SW, NW-SE).

Un compromis acceptable entre les difficultés de réalisation et l'erreur commise est de définir le secteur de direction d comme l'intersection de deux demi-plans, chacun correspondant à une simple inéquation linéaire. Des secteurs angulaires égaux correspondent à une valeur $a = \text{tg} \pi/8$, laquelle est quelque peu difficile à réaliser. Une bonne approximation est de prendre $a = \text{tg} \alpha = 1/2$. Celle-ci conduit à une large erreur angulaire, mais est tout à fait justifiée sur un voisinage 3×3 (fig 7). Ceci conduit aux prédicats suivants:

$$\Phi_1(X,Y) = [2*X + Y > 0]$$

$$\text{i.e. } \Phi_1(X,Y) = 1 \text{ si } (2*X + Y) > 0$$

$$= 0 \text{ si } (2*X + Y) < 0$$

$$\Phi_2(X,Y) = [X + 2*Y > 0]$$

$$\Phi_3(X,Y) = [X - 2*Y < 0]$$

$$\Phi_4(X,Y) = [2*X - Y < 0]$$

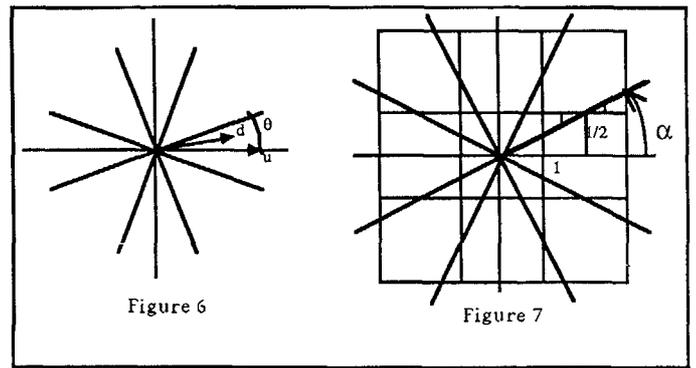


Figure 6

Figure 7

et les directions sont définies comme suit :

$$\text{NE-SW si } \Phi_1(X,Y) \text{ xor } \Phi_2(X,Y) = 1$$

$$\text{E-W si } \Phi_2(X,Y) \text{ xor } \Phi_3(X,Y) = 1$$

$$\text{NW-SE si } \Phi_3(X,Y) \text{ xor } \Phi_4(X,Y) = 1$$

$$\text{N-S si } \Phi_4(X,Y) \text{ xor } \Phi_1(X,Y) \neq 1 (=0)$$

Chacun de ces prédicats est une fonction à seuil bien connue. Il peut être aisément implanté à l'aide d'un comparateur avec des entrées de poids valant 1 ou 2.

3.3. Calcul de l'amplitude du gradient.

La norme Euclidienne $(D_X^2 + D_Y^2)^{1/2}$ peut être implémentée par une porte nor pseudo-NMOS dont les transistors fonctionnent en mode de saturation (où D_X est la dérivée dans la direction X et D_Y dans la direction Y).

3.4. Comparaison des amplitudes du gradient.

La suppression des non-maxima locaux exige une comparaison entre les amplitudes du gradient au site lui-même et aux deux voisins (avant, arrière) dans la direction approximée du gradient. Ceci est aussi réalisé par une comparaison analogique et un multiplexeur.

3.5. Seuillage à hystérésis.

Pour le seuillage à hystérésis, les amplitudes du gradient après suppression de non-maxima locaux (par forçage à zéro) sont seuillés avec une valeur basse et une valeur haute. Ainsi on peut déterminer et ne garder que les segments formés de points d'amplitude au dessus du seuil bas et ayant au moins un point d'amplitude au dessus du seuil haut : ceci est équivalent à une extraction des composantes connexes de l'image binaire résultant du seuil bas, qui contiennent des points au dessus du seuil haut. Un algorithme itératif de logique cellulaire donne ces résultats, et peut être implémenté sur un réseau digital à maille carrée [Garda 88] ou sur un processus analogique combinatoire [Duff 86].

4. ZERO CROSSINGS.

Une autre approche de la détection de contours consiste à utiliser les passages par zéro du laplacien de l'image d'entrée



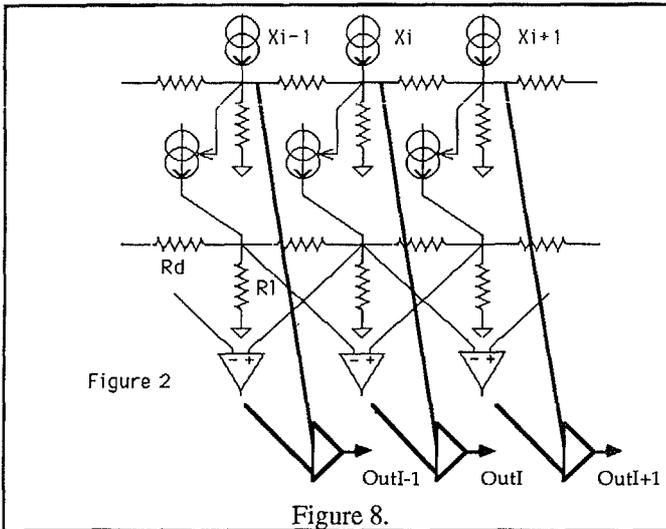
convoluée par un filtre séparable passe-bas. Le filtre passe-bas 1-D f de réponse impulsionnelle

$$f(n) = -k \cdot (1 + \alpha|n|) \cdot e^{-\alpha|n|} \quad (1)$$

constitue une primitive du filtre G . Or, [Deriche88] a montré que le laplacien 2-D du filtre 2-D séparable F de R.I. $F(n, m) = f(n)f(m)$ a pour réponse impulsionnelle :

$$\text{Lap}F(m,n) = b1(n)b1(m) - g(n)g(m)$$

et peut donc être obtenu par la différence entre les sorties du premier réseau de diffusion (B1) et celles du filtre G , comme sur le figure 8. D'ailleurs, il est plus simple de construire comme sortie Out l'image binaire des signes de LapF que les passages par zéro de ce laplacien. Ces derniers peuvent s'en déduire par des opérateurs locaux appliqués par la rétine de [Garda88].



CONCLUSION.

En résumé, nous avons montré que des filtres RII proposés par Deriche et optimaux pour la détection de contour d'après Canny peuvent être réalisés par des réseaux de diffusion. Cette implantation par réseau de diffusion fournit une solution élégante aux circuits complets de détection de contour, une réalisation VLSI, parallèle et analogique pouvant être basée sur des circuits combinatoires analogiques, ou sur des capacités commutées. Une autre approche possible de la détection de contour est la détection des passages par zéro du laplacien de l'image d'entrée lissée.

Ces détecteurs peuvent être utilisés pour des techniques de reconnaissance des formes multi-résolution. Des applications à plus long terme de ces travaux pourraient être trouvées dans l'utilisation d'un tel détecteur comme un système isolé, ou dans un système de vision de bas niveau plus sophistiqué.

REMERCIEMENTS.

Nous remercions T.Bernard, F.Devos et B.Zavidovique pour de fructueuses discussions.

RÉFÉRENCES.

- [Belhaire88] E.Belhaire & al
A diffusion based edge detector
88 Asilomar Conf. , Pacific Grove, Nov. 88.
- [Bernard88] T.Bernard, & al
A family of analog half-toning neural networks
EUSIPCO, Grenoble, Septembre 88.
- [Canny86] J.Canny
A computational approach to edge detection
IEEE PAMI, November 86, Vol. 8, No. 6, 679-698.
- [Deriche87] R.Deriche
Optimal edge detection using recursive filtering
Proceedings First ICCV, London, June 1987.
- [Deriche88] R.Deriche
Fast Algorithms For Low-Level Vision
9th ICPR, 14-17 November 88, Rome, Italy.
- [Duff 86] M.J.B.Duff, T.J.Fountain
Cellular logic image processing
Academic press, London, 1986
- [Garda88] P.Garda & al
Une rétine électronique automate cellulaire
Traitement du signal, n° spécial architectures 1988
- [Little87] J.J.Little, Guy Blelloch, Todd Cass
How to program the CM for computer vision
1987 Workshop on CAPAMI, pp. 1-18, October 5-7, 1987, Seattle
- [Marr82] D.Marr Vision
W.H. Freeman and Co. Ed., San Fransisco, 82.
- [Sivilotti87] M.A.Sivilotti, M.A.Mahowald, and C.A.Mead
Real-Time visual computations using analog CMOS processing arrays
87 Stanford Conf. on VLSI : MIT Press, pp. 295-312.

ILLUSTRATIONS

