

# Transformée de Hough discrète et bornée.

## Application à la détection

### de droites parallèles et du réseau routier

The application of the Hough transform to the detection of parallel straight lines



#### Jaime LOPEZ-KRAHE

ENST, Département IMAGES, 46, rue Barrault, 75634 PARIS CEDEX 13.

DEA Psychologie (1978), Doctorat en Informatique par l'Université de Paris (1979) et par l'Université de Madrid (1982). Enseignant associé et membre du groupe de recherche en IA à l'Université de Paris-VIII depuis 1976. Chercheur au Département IMAGES à l'ENST depuis 1979.

De par sa double formation, il effectue des travaux de recherche en Reconnaissance de Formes, et compréhension des images, plus particulièrement détection de structures symétriques, recherche de primitives, interprétation et analyse de scènes.



#### Pascale POUSSET

MATRA, Laboratoire de Traitement d'Images, 18-20, rue Grange-Dame-Rose, BP n° 40, 78141 VÉLIZY.

Ingénieur ECL (1986). Mastère "Traitement des images", ENST (1987). Travaux de recherche en imagerie satellite et en cartographie au Laboratoire de Traitement d'Images à MATRA. Chargée de cours à l'Université Paris-VIII, en traitement numérique des images.

### RÉSUMÉ

Nous présentons dans cette communication les principaux problèmes posés par l'application de la Transformée de Hough (TH) sur une image de dimensions réduites.

Nous abordons le problème de la discrétisation de l'espace image qui rend la distribution des paramètres dans l'espace de Hough non homogène et non équiprobable. Une solution est alors présentée, dans le cas de la détection de droites, afin de corriger cet effet, accentué lorsque les dimensions de l'image sont réduites.

Cette méthode de correction permet la détection de droites parallèles sur une fenêtre de balayage carrée. Enfin, nous montrons une application dans le cadre d'un projet de recherche du réseau routier sur une carte géographique.

### MOTS CLÉS

Transformation de Hough, équiprobabilité des paramètres, bruit de la visualisation, suites de Farey, détection de droites parallèles, détection de primitives, détection du réseau routier.

### SUMMARY

*In this paper we study the principal problems posed by the application of the Hough Transform to small scale images.*

*We show that the discretization of image space makes the distribution of parameters in the Hough space non-homogeneous and non-equiprobable. One solution to this defect, which is accentuated by picture limitations, is presented in the case of the detection of straight lines.*

*This method of correction allows the rapid detection of parallel straight lines on a square scan window. We also present an application in the framework of a project for finding the road network on a map.*

### KEY WORDS

*Hough Transform, equiprobability of parameters, display noise, Farey series, detection of straight parallel lines, detection of primitives.*

## 1. Introduction

L'utilisation de la Transformation de Hough <HOU-62> pour la détection de structures et de courbes paramétriques ou non paramétriques dans les images est aujourd'hui courante dans les problèmes de reconnaissance d'objets de forme prédéfinie. Plusieurs travaux s'y réfèrent <DUD-72>, <SHA-75>, <DAN-82>, <MAI-84>. Malgré tout, son application reste encore limitée à l'analyse globale des images à l'aide de rétines d'assez grandes dimensions, de manière à pouvoir utiliser une hypothèse de continuité dans l'image.

Le plus souvent, les problèmes induits par les bornes de l'image sont ignorés et les erreurs qui en découlent sont considérées comme négligeables. Maitre <MAI-86> a étudié les fonctions de probabilité qui affectent les paramètres de l'espace de Hough dans le cas de la détection de droites ou de cercles. Cette étude a été réalisée en utilisant une hypothèse de continuité de la fonction image pour différentes formes des rétines d'analyse : circulaire, rectangulaire. Cette hypothèse est acceptable sous certaines conditions et en particulier lorsque l'image analysée est de dimension suffisante. Mais lors d'une analyse locale ou lors de l'utilisation d'une fenêtre de balayage, le bruit provoqué par les bornes ou par l'échantillonnage discret de l'image peut dégrader le signal. Cette dégradation est telle que si aucune précaution de modélisation et de correction du bruit n'est prise, le signal devient complètement inexploitable.

Cohen et Toussaint <COH-77> avaient souligné le biais introduit par la dimension finie de l'image dans la transformation. L'utilisation d'une quantification non uniforme (au maximum d'entropie) fut proposée pour compenser ce bruit.

Timouni <TIM-85> a évoqué le sujet de la discrétisation dans le cas de la détection des droites et l'influence que ceci pouvait avoir dans l'espace des paramètres. Il avait d'ailleurs constaté l'inhomogénéité des paramètres, propre à celle des rationnels. Enfin, une première introduction au problème de la discrétisation et du bornage dans un contexte de balayage de l'image par une fenêtre peut être trouvée dans <LOP-87>. La méthode est utilisée pour détecter les éléments terminaux d'une grammaire bidimensionnelle adaptée à l'interprétation d'images à composantes rectangulaires.

Dans cette communication, nous étudions l'effet de la discrétisation sur le calcul des paramètres caractéristiques d'une droite, puis le dénombrement de l'espace de Hough dans le cas d'une fenêtre d'analyse de forme carrée et de taille donnée. Nous présentons ensuite un modèle de correction affectant la distribution de ces paramètres, dans le cas des droites, afin de faciliter l'interprétation de l'espace de Hough. Nous exposons alors une méthode de détection des droites parallèles, utilisée dans le cadre d'un projet de reconnaissance et de poursuite du réseau routier sur une carte géographique numérique.

## 2. Rappels et notations

Nous présentons ici la TH appliquée exclusivement à la détection des droites et postérieurement à la détection de droites parallèles. Nous avons utilisé sa forme « m à 1 » (plus rapide), les problèmes de bruit qui seront abordés étant équivalents à la forme d'origine « 1 à m », comme nous allons le voir par la suite. Une version plus générale peut être trouvée dans <MAI-85>.

### 2.1. NOTATIONS

Soit  $\mathcal{H}$  un ensemble de  $P$  points appartenant à une image :  $\mathcal{H} = \{P_1, P_2, \dots, P_P\}$ .

Ces points, appelés points caractéristiques, sont généralement obtenus après filtrage et seuillage de l'image, un point  $P_k$  de  $\mathcal{H}$  a pour coordonnées image  $(i_k, j_k)$  :

Une droite peut être définie par son équation :

$$y = ax + b$$

en coordonnées cartésiennes, ou

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$$

en coordonnées polaires;

Deux points suffisent à définir une droite dans l'espace image. Soit  $B(\mathcal{H})$  l'ensemble des bipoints formés à partir des éléments de  $\mathcal{H}$ .

Dans le cas général :

$$B(\mathcal{H}) = \{(P_1, P_2), (P_1, P_3), \dots, (P_1, P_P), \dots, (P_k, P_{k+1}), \dots, (P_{P-1}, P_P)\}$$

Avec :

$$\text{Card}(B(\mathcal{H})) = P(P-1)/2$$

Dans sa version « m à 1 », la transformée de Hough associe à chaque bipoint  $(P_m, P_k)$  le point dont les coordonnées  $(\theta, \rho)$  sont dans l'espace des paramètres, en utilisant l'équation polaire :

$$(1) \quad \theta = \text{Arctg} \left( \frac{j_m - j_k}{i_m - i_k} \right) \quad \left( -\frac{\pi}{2} < \theta \leq \frac{\pi}{2} \right)$$

$$(2) \quad |\rho| = \frac{|i_m j_k - i_k j_m|}{\sqrt{(i_k - i_m)^2 + (j_k - j_m)^2}},$$

$$\rho = [-N\sqrt{2}, N\sqrt{2}]$$

où  $N$  est le côté de l'image carrée.

Si il y a  $h$  points qui appartiennent à une droite, les accumulateurs associés aux paramètres de cette droite seront incrémentés  $h(h-1)/2$  fois.

Dans sa version « 1 à m », un point  $P_m(i_m, j_m)$  de l'espace image incrémente dans l'espace de Hough tous les compteurs correspondant :

à la droite, en coordonnées cartésiennes :

$$(3) \quad j_m = ai_m + b$$

à la sinusoïde en coordonnées polaires :

$$(4) \quad \rho = i_m \cos \theta + j_m \sin \theta$$

De même pour un point  $P_k(i_k, j_k)$  :  
la droite

$$(5) \quad j_k = ai_k + b$$

ou la sinusoïde

$$(6) \quad \rho = i_k \cos \theta + j_k \sin \theta$$

Ainsi les compteurs associés aux points  $(a, b)$ , solutions des équations (3) et (5) ou ceux des points  $(\theta, \rho)$ , en coordonnées polaires, après résolution des équations (4) et (6) seront comptabilisés deux fois, et en général  $h$  fois s'il y a  $h$  points de l'ensemble  $\mathcal{H}$  appartenant à la même droite.

Si nous considérons l'espace des compteurs de paramètres de la TH « 1 à  $m$  » comme  $C_n$  et «  $m$  à 1 » comme  $C'_n$  et si nous ignorons les compteurs qui dans  $C_n$  ne sont comptabilisés qu'une fois, nous pouvons établir la correspondance  $C'_n = C_n(C_n - 1)/2$ .

Ainsi le problème de la détection de droites sur une image est remplacé par celui de la détection de nuages de points dans un espace de paramètres, chaque nuage correspondant à une famille de points colinéaires < COC-84 >.

Les problèmes de décision dans les deux formes présentées ici de la TH restent équivalents puisque la structure d'ordre entre deux accumulateurs reste bien sûr conservée : si dans  $C_n$ ,  $n > m$  alors, dans  $C'_n$ ,  $n(n-1)/2 > m(m-1)/2$  (à l'exception des compteurs égaux à 1 dans  $C_n$ ).

Par ailleurs, les problèmes de bruit posés par la discrétisation de l'espace image dont nous parlerons plus tard sont aussi équivalents, les accumulateurs incrémentés dans les deux cas étant les mêmes : Éq. (1), (2).

Nous avons choisi la paramétrisation polaire, car elle permet d'obtenir facilement la distance entre deux droites parallèles, la distribution du paramètre  $\rho$  étant par ailleurs plus homogène que celle du paramètre  $b$ .

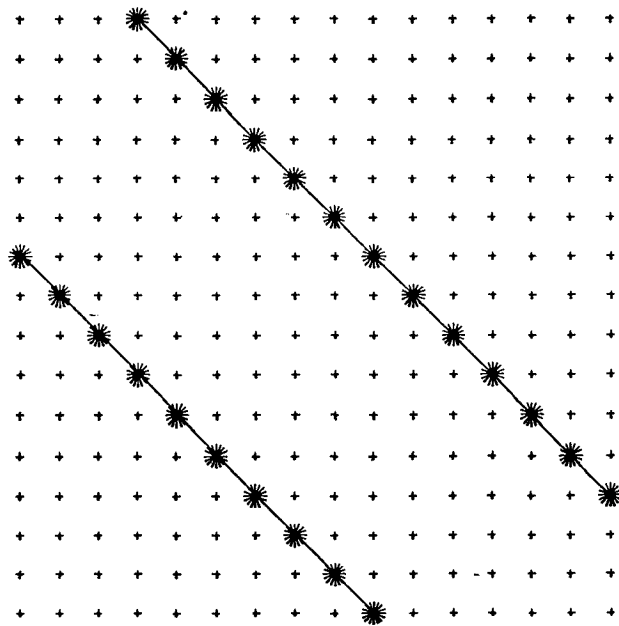
## 2.2. EXEMPLES

Dans la figure 1a nous avons une représentation théorique de deux droites discrétisées parallèles dans une fenêtre  $16 \times 16$ . Les figures 1b et 1c donnent les représentations (en  $\theta$  et  $\rho$ ) des accumulateurs dans la version  $m$  à 1 et 1 à  $m$  respectivement (dans ce dernier cas, les compteurs de niveau égaux à 1 ont été supprimés).

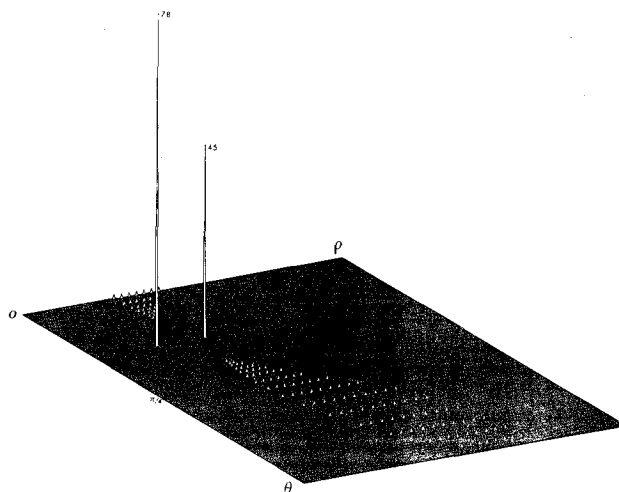
Les deux droites sont représentées dans l'espace image par 10 et 13 points respectivement.

Les accumulateurs dans la version «  $m$  à 1 » (fig. 1b) contiennent 45 et 78 points respectivement, les accumulateurs égaux à 1 correspondent aux couples de points appartenant à chacune des droites.

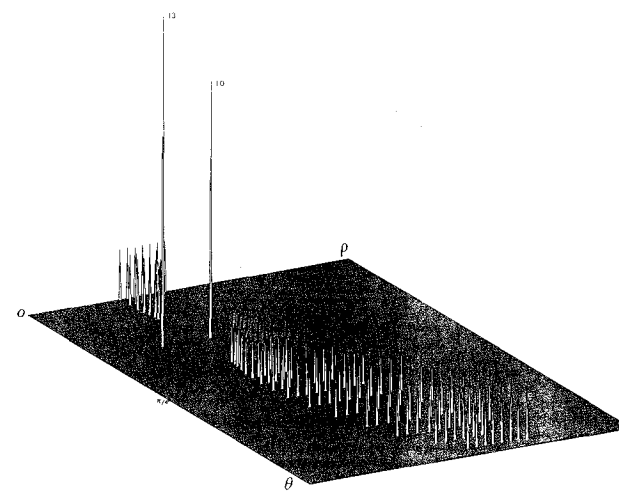
La figure 1c nous représente la version « 1 à  $m$  », les pics contiennent 10 et 13 éléments respectivement, les couples de points qui appartiennent à chaque droite différente sont représentés par 2 éléments. Ceux qui devaient comporter un seul élément ont été supprimés.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. — Segments de droites parallèles dans l'espace image et dans l'espace de Hough.

### 3. Discrétisation et bornage de l'image

#### 3.1. INTRODUCTION

Nous allons maintenant étudier l'effet de la discrétisation et du bornage de l'image sur la distribution du paramètre angulaire  $\theta$  et du paramètre  $\rho$ , caractéristiques d'une droite. Les deux éléments calculés à partir d'un ensemble fini de rationnels ou de réels se comportent de manière inhomogène sur leur intervalle de définition et ils ne sont pas équiprobables. Nous allons étudier successivement chacun de ces deux paramètres.

#### 3.2. ÉTUDE DU PARAMÈTRE ANGULAIRE $\theta$

Le paramètre  $\theta$  peut être écrit sous la forme :

$$\theta = \text{Arctg}(p/q) \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} -(N-1) \leq p \leq (N-1) \\ -(N-1) \leq q \leq (N-1) \end{aligned}$$

où  $N$  est la dimension de l'image et  $p$  et  $q$  les nombres entiers de colonne et de ligne séparant les deux points constituant un bipoint.

Pour des raisons de symétrie (horizontale, verticale et diagonale) l'intervalle de variation se limite alors à  $]0, \pi/4[$ .

L'étude peut être limitée au cas :

$$0 \leq p \leq q < N; \quad \text{PGCD}(p, q) = 1$$

L'occurrence de l'angle défini par  $\text{tang}(\theta) = p/q$  obéit à des lois particulières, selon la périodicité d'apparition des couples  $(p, q)$  dans l'espace discret. En particulier, il y a autant de directions possibles sur l'image que d'éléments distincts de la forme  $p/q$  ( $\text{PGCD}(p, q) = 1$ ).

Étudions l'exemple suivant, pour une fenêtre de dimension  $4 \times 4$ ;

Les couples possibles  $(p, q)$  sont :

- $p=0, 0 < q < 4; \theta = \text{Arctg}(0)$ ;
- $p=1, q=1; \theta = \text{Arctg}(1)$ ;
- $p=1, q=2; \theta = \text{Arctg}(1/2)$ ;
- $p=1, q=3; \theta = \text{Arctg}(1/3)$ ;
- $p=2, q=3; \theta = \text{Arctg}(2/3)$ .

Nous reconnaissons les termes de la suite de Farey d'ordre  $N$  (4 dans le cas présent), suite ascendante des fractions irréductibles comprises entre 0 et 1, et dont le dénominateur est inférieur à  $N$   $f_4 = \{0, 1/3, 1/2, 2/3, 1\}$ .

Les seules directions angulaires possibles sont celles dont la tangente appartient à la suite de Farey, définies pour une fenêtre de taille donnée. Qui plus est, certaines configurations de bipoints seront plus fréquentes que d'autres, comme les segments horizontaux ou verticaux sur une image carrée.

En effet, avec le même exemple, si l'on dénombre les bipoints contribuant à la formation de chacune des directions :

- pour  $\theta = \text{Arctg}(0)$ , il existe 24 bipoints;
- pour  $\theta = \text{Arctg}(1/2)$ , il existe 6 bipoints;
- pour  $\theta = \text{Arctg}(1/3)$ , il existe 3 bipoints;

- pour  $\theta = \text{Arctg}(1/1)$ , il existe 14 bipoints;
- pour  $\theta = \text{Arctg}(2/3)$  il existe 2 bipoints.

Notons que <DORS-85> avaient déjà présenté cette notion de périodicité dans leur article sur la théorie du spirographe.

La figure 2 représente le dénombrement de tous les bipoints possibles dans un carré de  $100 \times 100$ . En abscisse est représentée la suite de Farey (pentes), en ordonnée les occurrences des bipoints qui définissent une droite avec cette pente.

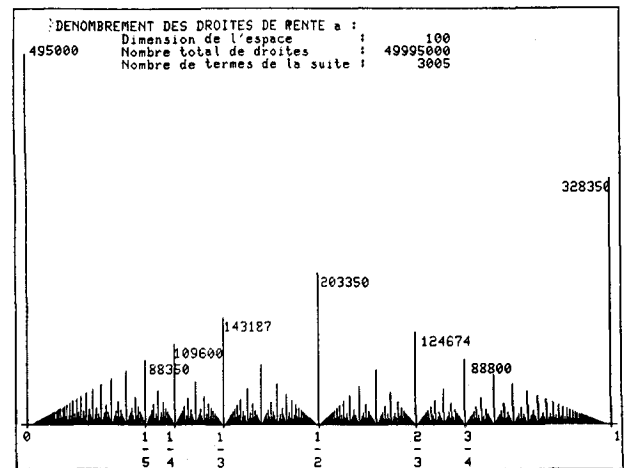


Fig. 2. — Distribution des bipoints dans un carré  $100 \times 100$  en fonction de  $\text{tang } 0$ .

#### 3.3. ÉTUDE DU PARAMÈTRE $\rho$

Le paramètre  $\rho$  est calculé suivant l'expression (2) le signe de  $\rho$  étant défini selon le signe du paramètre  $b$  dans l'équation cartésienne. La modélisation de la distribution de ce paramètre est évidemment plus complexe que celle du paramètre angulaire. En effet, sa définition en fonction d'entiers est la suivante :

$$|\rho| = \frac{|p_1 q_2 - p_2 q_1|}{\sqrt{(p_1 - p_2)^2 + (q_1 - q_2)^2}} \quad \begin{aligned} (0 \leq p_i \leq N-1) \\ (0 \leq q_i \leq N-1) \end{aligned}$$

Les points  $(p_1, q_1)$  et  $(p_2, q_2)$  étant distincts.

Malgré tout, les valeurs distinctes prises par  $\rho$  sont en nombre fini et pourraient être déterminées, même si leur nombre est plus important que dans le cas précédent, lors de l'étude de  $\theta$ .

Étudions le cas d'une fenêtre  $2 \times 2$  : La formule ci-dessus nous fournit 6 droites, dont 3 seulement définies par un paramètre  $\rho$  différent :

- 3 droites avec  $\rho=0$ ;
- 2 droites avec  $\rho=1$ ;
- 1 droite avec  $\rho = \sqrt{2}/2$ .

L'occurrence de chaque paramètre  $\rho$  obéit lui aussi à des lois particulières. Ceci est aussi une conséquence de la discrétisation et du bornage de l'image. Le dénombrement théorique des valeurs prises par  $\rho$  sur une fenêtre de taille donnée s'avère beaucoup plus complexe.

#### 4. Correction de l'espace des paramètres

Si nous considérons la sélection des points caractéristiques comme un tirage aléatoire de points dans une image, nous devons trouver une distribution dans l'espace des paramètres semblable à celle calculée théoriquement. Cette distribution n'étant pas équiprobable, les paramètres théoriquement plus probables vont être détectés plus facilement que ceux qui sont moins fréquents.

L'effet de discrétisation agit comme un bruit qui dégrade le signal à tel point qu'il peut devenir inexploitable. Les « droites privilégiées » masquent la reconnaissance des autres droites lors de la détection des nuages de points dans l'espace de Hough. Une correction en fonction des distributions théoriques calculées peut corriger ce bruit.

Nous pouvons considérer deux aspects dans la correction :

- l'une, selon le paramètre angulaire  $\theta$ , qui peut être modélisé à l'aide des suites de Farey;
- l'autre, selon le paramètre  $\rho$ , qui peut être étudié à l'aide d'un dénombrement. Ces corrections ne sont pas indépendantes, mais  $\theta$  apparaît comme le paramètre qui introduit le bruit le plus important.

##### 4.1. MODÈLE DE CORRECTION ASSOCIÉ AU PARAMÈTRE $\theta$

Nous considérons la distribution de  $\theta$  comme un bruit prédictible. Nous obtenons alors des courbes de probabilités, après normalisation par le cardinal de l'ensemble des bipoints (voir fig. 2). Il est alors possible (après la transformation de Hough) de corriger l'histogramme représentant les poids relatifs à chaque direction détectée. Pour cela, une pondération des résultats est effectuée grâce aux courbes de probabilités, issues du dénombrement théorique.

Notons que la pondération des coefficients est à chaque fois fonction de la taille de la rétine utilisée. La figure 3 nous montre la distribution théorique de  $\theta$  dans une rétine  $16 \times 16$  qui sera utilisée par la suite. Les bipoints adjacents ont été supprimés pour conserver la cohérence avec le traitement expérimental. En effet, pour éliminer les points trop proches qui ne seraient pas très représentatifs d'une droite sur

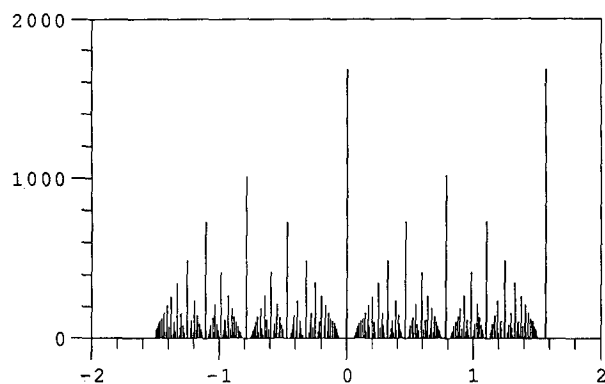


Fig. 3. - Distribution théorique de  $\theta$  (rad) dans une rétine  $16 \times 16$  pour tous les bipoints dont la distance est supérieure à  $\sqrt{2}$ .

l'image, ne seront conservés que les bipoints dont les éléments les constituant sont à une distance supérieure à un certain seuil.

##### Quantification de l'espace de Hough suivant le paramètre $\theta$

L'ensemble des valeurs prises par l'angle  $\theta$ , pour une fenêtre donnée, étant connue (suite de Farey, comme indiqué au paragraphe 3.2), une nouvelle quantification de l'espace des paramètres selon  $\theta$  peut être appliquée :

Soit  $N$  la dimension de la fenêtre :

Soit  $r_0, r_1, \dots, r_N$  la suite de Farey d'ordre  $N$  ( $F_N$ ).

On a  $\theta_i = \text{Arctg}(r_i)$ .

Nous pouvons définir dans l'espace de Hough le paramètre angulaire par le rationnel  $p/q$  et non plus par l'angle  $\theta$  ( $\theta = \text{arctg } p/q$ ).

La quantification ne sera alors plus linéaire et sera fonction de la taille de la fenêtre analysée; nous pouvons ainsi conserver l'exactitude de la mesure de ce paramètre jusqu'à la fin de la correction.

##### 4.2. CORRECTION ASSOCIÉE AU PARAMÈTRE $\rho$

Nous avons vu précédemment que la distribution de  $\rho$  était aussi inhomogène, sans toutefois la modéliser. Malgré tout, il est possible de corriger cet effet après avoir effectué un dénombrement sur une image de taille donnée.

##### Quantification suivant $\rho$

Ne connaissant pas pour l'instant les valeurs théoriques prises par  $\rho$ , il est seulement possible de définir une quantification linéaire. Toutefois, on pourrait envisager de déterminer numériquement l'ensemble des valeurs prises par  $\rho$ , puis de quantifier l'espace de Hough de façon à obtenir une correction exacte.

Nous ne développerons pas davantage la correction suivant cet unique paramètre, du fait qu'elle est aussi dépendante de la direction; mais plutôt le principe de correction simultanée suivant les deux paramètres  $\theta$  et  $\rho$ .

##### 4.3. CORRECTION BIDIMENSIONNELLE DE L'ESPACE DE HOUGH

Nous avons effectivement vu la nécessité de quantifier l'axe relatif à  $\theta$  suivant les éléments de la suite de Farey.

Pour une fenêtre carrée de dimension donnée  $N \times N$ , nous considérons les distributions liées de  $p/q$  et de  $\rho$ . Un histogramme bidimensionnel peut alors représenter les résultats (cf. fig. 4). Le résultat est particulièrement représentatif de l'effet de la discrétisation sur l'image. Les classes correspondant à des angles nuls et à un paramètre  $\rho$  entier sont prédominantes, ainsi que celles obtenues pour  $\theta = 45^\circ$  et la valeur de  $\rho$  correspondant à la diagonale de l'image.

Au vu de cette distribution, il semble alors nécessaire de ne pas négliger ce bruit et d'effectuer systématiquement une correction adaptée à la fenêtre d'utilisation.

Nous considérons l'ensemble des bipoints  $B(\mathcal{H})$  obtenus à partir des points caractéristiques extraits d'une

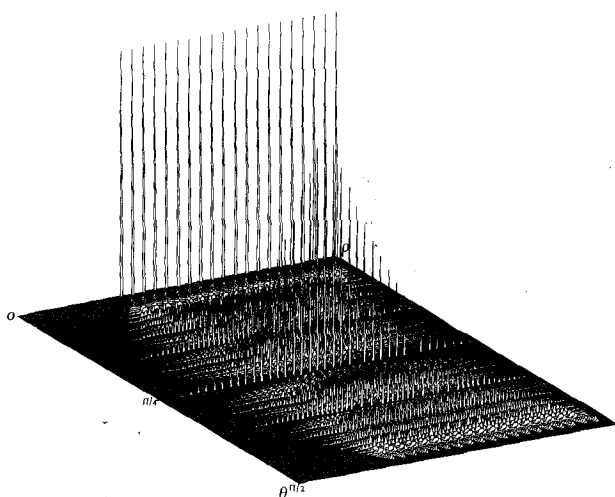


Fig. 4. — Distribution théorique des paramètres  $\theta$ ,  $\rho$  dans l'espace de Hough pour une image  $20 \times 20$  dont tous les points sont pris comme des points caractéristiques.

image dans cette fenêtre comme étant un tirage aléatoire parmi tous les bipoints de l'image. La distribution des paramètres calculés à partir de ces bipoints doit correspondre à celle calculée théoriquement, et leur différence (pondérée par le nombre de bipoints) fera apparaître un bruit blanc, sauf dans le cas où la distribution observée correspond à un ensemble structuré de points caractéristiques. La présence de droites dans l'image pourra être observée par un pic significativement supérieur à zéro.

### 5. Application à la détection de droites parallèles

La détection de parallèles (ou « segments anti-parallèles ») est fréquente en traitement des images et en particulier dans l'analyse de vues aériennes et du réseau routier. Scher, Schneier et Rosenfeld <SCH-82> définissent des segments anti-parallèles comme étant des segments parallèles qui se font face et qui ont des contrastes opposés.

Les méthodes présentées dans la littérature utilisent principalement des critères géométriques pour la détection de ces primitives <NEV-80> avec un regroupement des segments compatibles en fonction de l'intensité en niveau de gris <TAV-82> ou du voisinage <SCH-82> ;

Nous proposons une méthode de détection et poursuite de segments de parallèles, fondée sur l'application des corrections du bruit de discrétisation et bornage que nous avons évoquée, associée à la transformation de Hough.

L'image de deux droites parallèles dans l'espace de paramètres  $(\rho, \theta)$  est représenté par deux pics  $(\rho_1, \rho_2)$  alignés suivant une valeur de  $\theta$  (cf. fig. 1).

#### 5.1. PRINCIPE

La distance  $\Delta\rho = |\rho_1 - \rho_2|$  entre les ordonnées des deux pics maximaux dans l'espace de Hough représente la distance entre les deux droites.

La détection des droites parallèles sur une image s'effectuera alors en recherchant dans l'espace de Hough, l'ensemble de paires de nuages alignés verticalement (pour la représentation ci-dessus), pour lesquels les compteurs d'accumulation sont supérieurs à un certain seuil.

Les différentes méthodes présentées pour la détermination de classes prépondérantes dans l'espace des paramètres  $\theta, \rho$  ne donnent de résultats que si le rapport Signal/Bruit est favorable. Autrement une erreur peut être commise si aucune correction de l'espace de Hough n'est effectuée. L'existence de directions privilégiées peut masquer celles qui existent réellement, en particulier dans le cas d'utilisation de fenêtres partielles de l'image pour la recherche des parallèles. La correction de l'espace des paramètres présentée précédemment permet au contraire de compenser l'effet de la discrétisation.

### 6. Application à la détection du réseau routier sur une carte

#### 6.1. PRÉSENTATION

Cette méthode de détection des droites parallèles a été appliquée dans un projet de reconnaissance du réseau routier sur une carte géographique numérique (binaire) (cf. fig. 5). En effet, les routes sont souvent

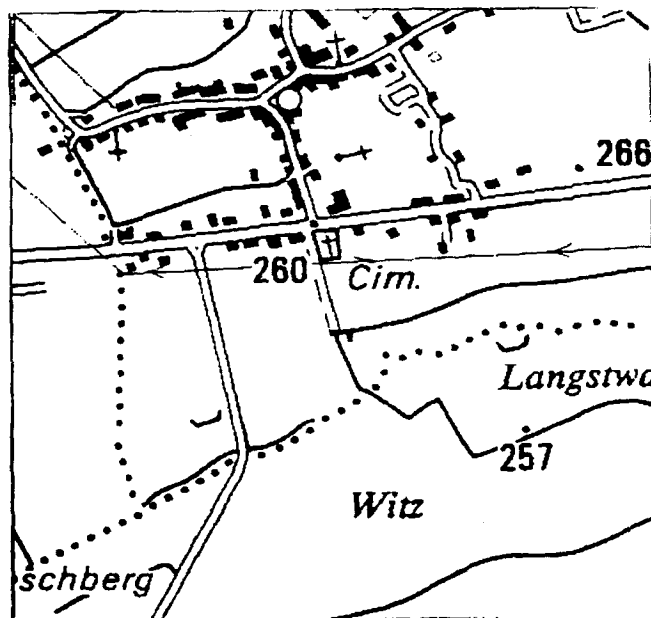


Fig. 5. — Image de la carte routière.

modélisées par des suites quasi continues de segments parallèles. La superposition d'autres éléments de la carte (bâtiments, symboles...) rend l'image bruitée. La richesse de ce type de carte rend l'application de la transformée de Hough sur l'image entière impossible. Aussi avons-nous utilisé une fenêtre carrée d'analyse,

déplacée sur l'image, afin de détecter les segments parallèles, constituant les contours des routes.

La connexité du réseau sera exploitée postérieurement en effectuant un suivi des routes grâce à cette fenêtre et à la poursuite des parallèles trouvées. En effet, dans un premier temps, on balaye l'image suivant les  $x$  et  $y$  croissants, puis dès qu'un tronçon de route a été détecté sur la fenêtre, nous pouvons prédire la position de la fenêtre suivante et poursuivre cette voie. Les carrefours sont stockés dans une pile qui permet la gestion de la structure des données. Cette opération de suivi issue de l'analyse de la fenêtre ayant déjà été effectuée lors d'applications analogues (détection des routes sur image haute résolution <ZHU-86>), nous ne développerons pas particulièrement cette étape, mais plutôt celle de la détection des segments parallèles.

## 6.2. ANALYSE D'UNE FENÊTRE PAR TRANSFORMÉE DE HOUGH

La taille de la fenêtre est liée à la résolution de l'image (distance maximale des parallèles cherchées). En ce qui nous concerne, nous avons utilisé une fenêtre carrée  $16 \times 16$ , dont les côtés sont parallèles aux axes  $O_x$  et  $O_y$  de l'image.

Théoriquement, la taille et la forme de cette fenêtre peuvent être quelconques, mais la pondération de l'espace de Hough est fonction de ces paramètres.

L'algorithme de traitement est le suivant :

- (1) Détection des points caractéristiques.
- (2) Calcul de l'espace des paramètres  $H_n$  ( $\tan \theta$ ,  $\rho$ ) correspondant.
- (3) Intégration de cet espace suivant  $\rho$  et correction de l'espace monodimensionnel obtenu  $D_n$  suivant le paramètre  $\tan \theta$ , à l'aide d'un fichier de données préalablement déterminé  $D_{0n}$  (dénombrement); on obtient ainsi l'espace  $D'_n$ .
- (4) Détection des maxima sur  $D'_n$  suivant  $\tan \theta$  selon un critère adaptatif.
- (5) Détection des maximums sur  $H_n$  suivant  $\rho$ , pour chacune des valeurs de  $\tan \theta$  précédemment sélectionnées. On obtient ainsi les paramètres des droites parallèles détectées.
- (6) Rejet des droites parallèles dont la distance est supérieure à un certain seuil (largeur maximale des routes).

Remarques :

— l'étape (1) est triviale, du fait que notre image est binaire;

— pour la partie (2), il faut ajouter qu'il est préférable d'utiliser un référentiel ( $\tan \theta$ ,  $\rho$ ) relatif lié à la fenêtre. En effet, le caractère inhomogène de la distribution suivant le paramètre  $\rho$  (pas de symétrie), mis en évidence dans la figure 4, déconseille le choix d'un référentiel absolu lié à l'image, pour la représentation des paramètres ( $\tan \theta$ ,  $\rho$ ). L'espace de Hough associé à la fenêtre est donc de dimension  $[-1, 1] \times [-N\sqrt{2}, N\sqrt{2}]$  où  $N$  est le côté de la fenêtre. Les coordonnées des points caractéristiques sont donc exprimées dans le repère lié à la fenêtre de façon à conserver la régularité de la correction.

La quantification de l'espace  $D_n$  peut être faite de manière exacte selon  $\theta$ , en quantifiant suivant les valeurs possibles  $p/q$  de  $\tan \theta$  (cf. 4. 1).

L'étape (3) de correction de l'espace  $D_n$  par l'espace théorique  $D_{0n}$ , déterminé auparavant par dénombrement, correspondant à une distribution théorique des droites dans l'image de Hough, fournit un nouvel espace des paramètres  $D'_n$ , dont les compteurs indiquent le poids des droites détectées.

L'utilisation d'un critère adaptatif (4) pour extraire les maxima de l'image s'est révélée nécessaire. Ce dernier a été déterminé expérimentalement, à partir des résultats obtenus sur l'image. Notons toutefois qu'il est bien discriminant du fait de la bonne qualité de détection des droites par la transformée de Hough. Le principe général de ce critère est de calculer la moyenne des coefficients des  $M$  premiers pics de l'histogramme (monodimensionnel) et de sélectionner les valeurs maximales du paramètre à l'aide de ce seuil.

## 6.3. APPLICATION A LA DÉTECTION DU RÉSEAU ROUTIER

La détection des segments ou des paires de segments parallèles par la méthode exposée nous fournit, en plus des paramètres des droites détectées, des coefficients relatifs à chacune d'elles. La valeur de ceux-ci nous donne une indication sur la fiabilité de l'existence d'une route sur la zone analysée. En effet, rappelons que l'image comporte aussi des éléments tels que des bâtiments, des symboles, etc. qui ont souvent des contours rectilignes. Dans un tel cas, la détection fournit des droites avec un score suffisamment bas pour que l'on puisse régler les cas de « conflit ».

Dans les exemples qui vont suivre, nous n'effectuons des corrections qu'en fonction du paramètre  $\theta$ ; des travaux expérimentaux sont en cours sur la correction bidimensionnelle et feront l'objet d'une publication ultérieure. Nous pouvons remarquer l'efficacité de la méthode exposée en comparant les résultats obtenus sans correction et avec correction de ce paramètre.

La figure 6a nous montre une fenêtre image  $16 \times 16$  avec un exemple de route simple.

Les figures 6b et 6c correspondent aux distributions obtenues avant et après correction avec la courbe représentée dans la figure 3.

Les droites détectées dans les deux cas sont représentées par les figures 6d et 6e.

La figure 7a nous montre le cas d'un carrefour, nous pouvons observer les deux distributions (7b et 7c) ainsi que les détections obtenues avant correction (7d) et après correction (7e).

D'autres analyses plus profondes de l'image peuvent être déclenchées, permettant d'interpréter immédiatement l'objet présent (par exemple de le classer comme non-route) avant de poursuivre aveuglément dans la direction détectée (on peut par exemple agrandir la fenêtre d'analyse, rechercher des bâtiments...).

La gestion du suivi du réseau sera alors étayée d'un certain nombre de règles, propres à la structure même du réseau et son environnement. Lorsque plusieurs directions convergent vers un point (croisement),

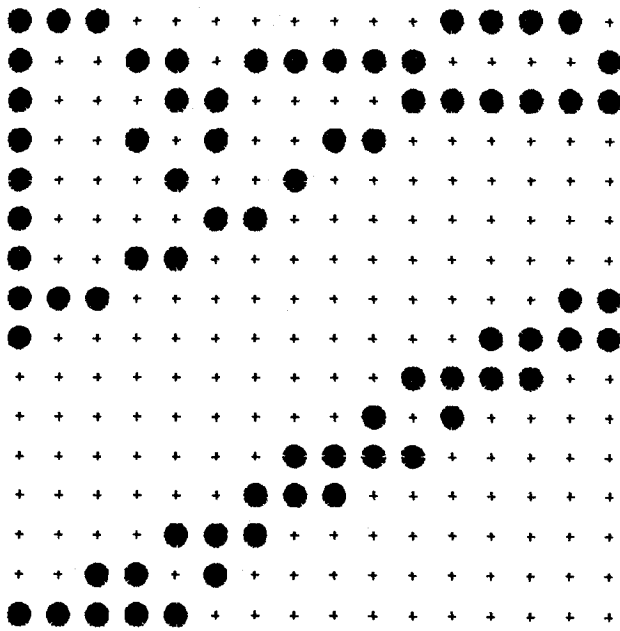


Fig. 6 (a)

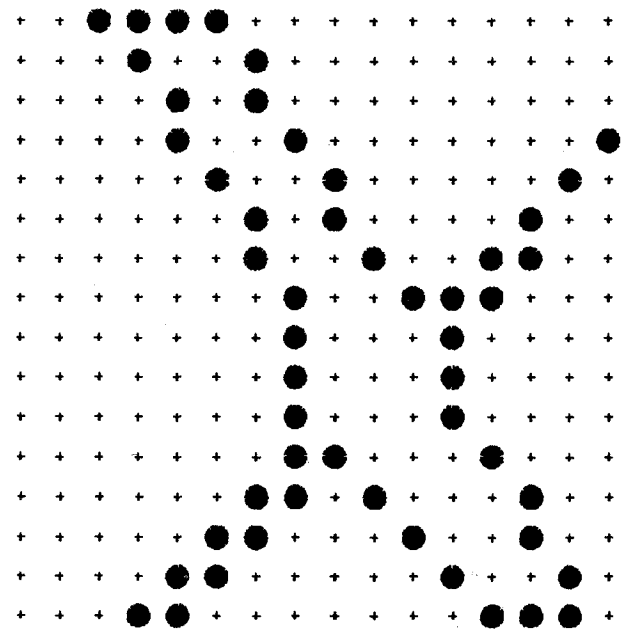


Fig. 7 (a)

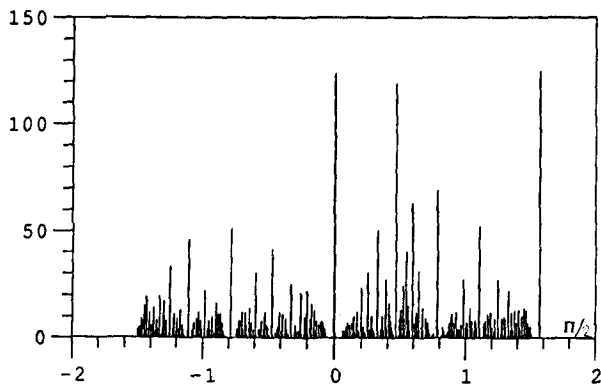


Fig. 6 (b)

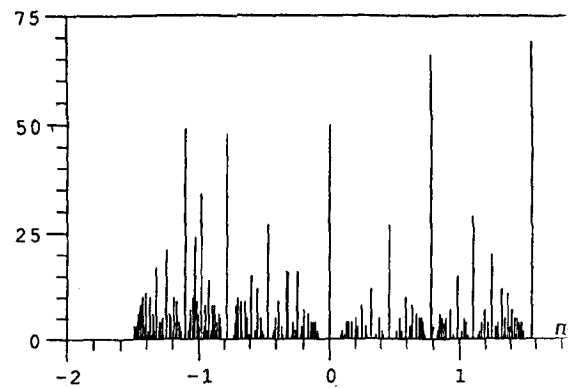


Fig. 7 (b)

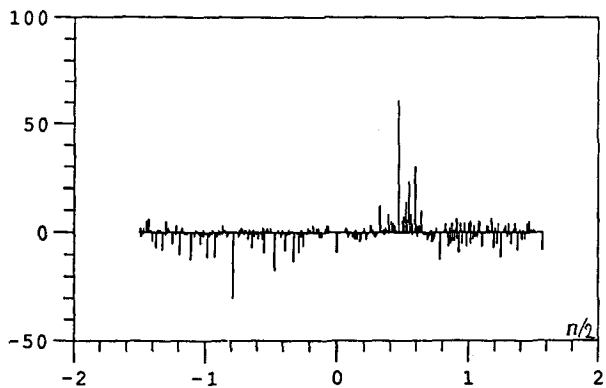


Fig. 6 (c)

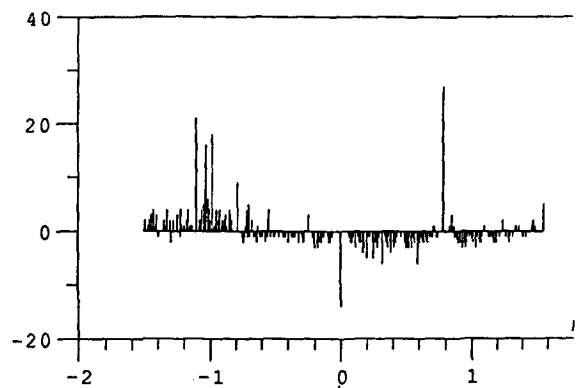


Fig. 7 (c)

celui-ci sera stocké dans une pile afin d'analyser les directions secondaires par la suite, puis on continuera de poursuivre la route sur laquelle on se trouvait.

Cette dernière phase est pratiquement indépendante de l'étape de détection des droites parallèles et n'est pas encore développée.



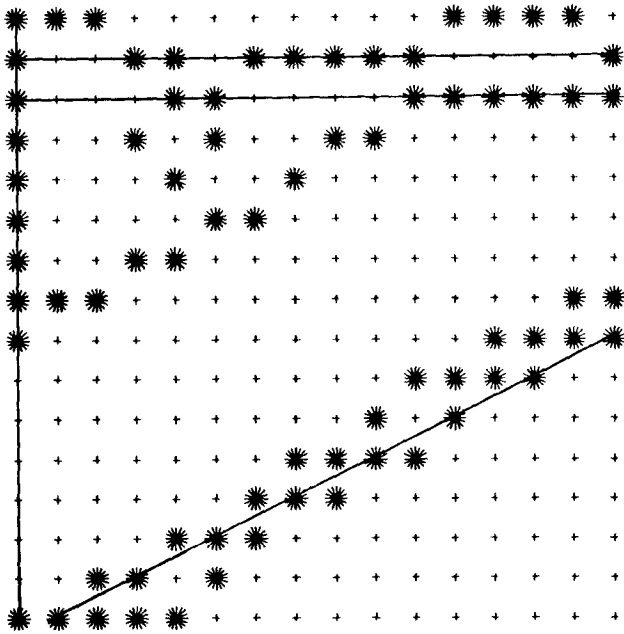


Fig. 6 (d)

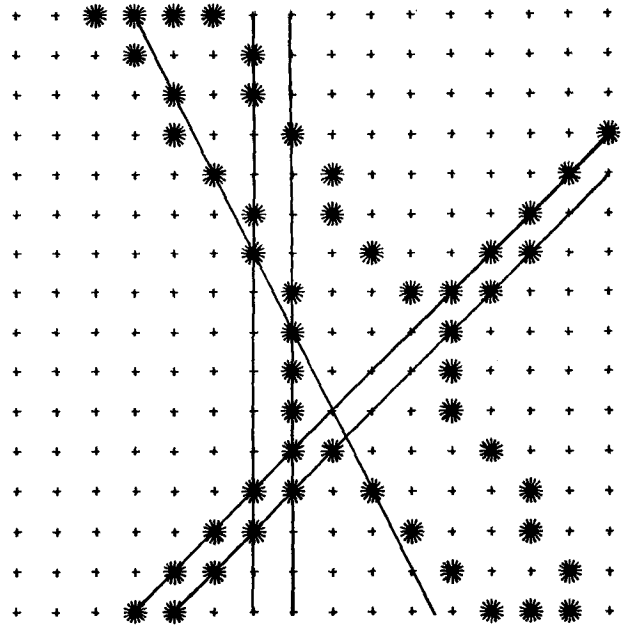


Fig. 7 (d)

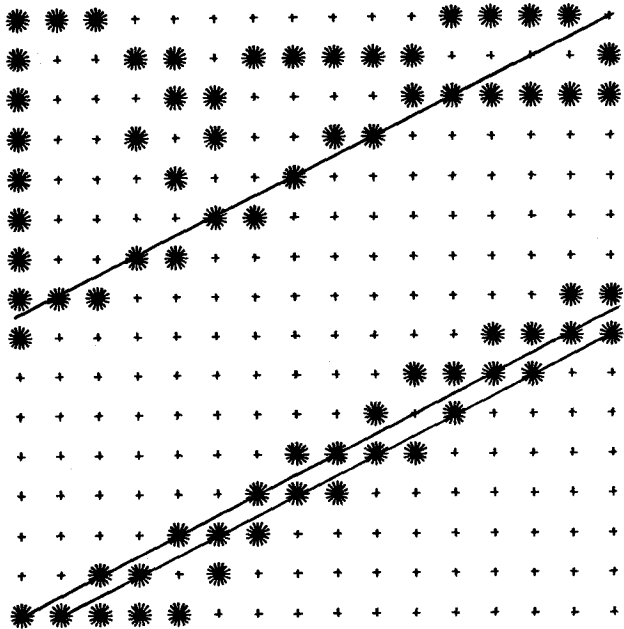


Fig. 6 (e)

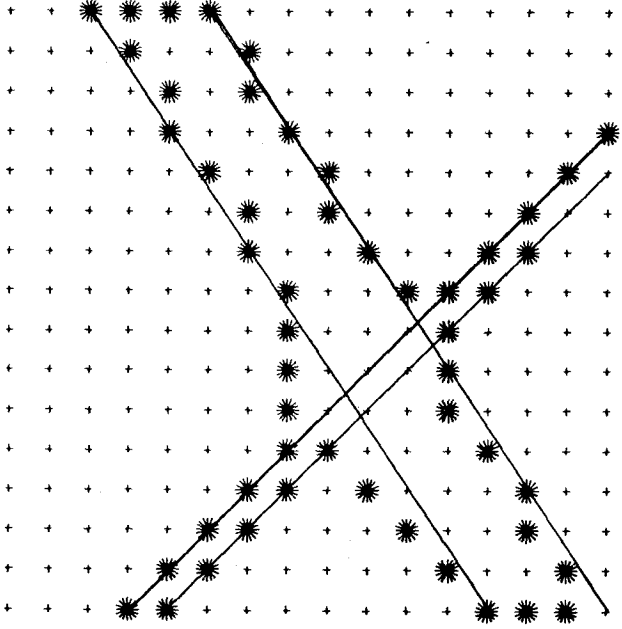


Fig. 7 (e)

## 7. Conclusion

La méthode proposée peut être généralisée et permettre la détection d'éléments primitifs de formes à contenu plus complexe pour être appliquée par la suite à des interprétations sémantiques de l'image, une première tentative a été développée < LOP-87 > dans la détection de primitives de formes pour interpréter les connexions des circuits intégrés.

L'originalité de cette communication est de présenter de nouvelles perspectives d'utilisation de la transformation de Hough, en particulier sur les fenêtres de faibles dimensions. La modélisation du bruit généré par la discrétisation de l'image et son bornage, permet de corriger son effet, en ponctuant la distribution du paramètre angulaire  $\theta$ . Ce dernier paramètre obéissant à des lois complexes, la modélisation de l'erreur qui en découle n'est pas encore complète, mais la correction pourrait être effectuée en cas de besoin par dénombrement complet de l'espace de Hough sur la totalité de la fenêtre utilisée.

## Remerciements

Nous remercions MM. Asselineau, D. Goossens, H. Maitre, F. Saunier et F. Schmitt pour leur collaboration et leurs commentaires dans la rédaction de cet article.

Manuscrit reçu le 26 février 1988.

## BIBLIOGRAPHIE

- <COH-79> M. COHEN et G. T. TOUSSAINT, On the detection of structures in noisy pictures, *Patt. Recognition*, 9, 1979, p. 95-98.
- <COC-84> J. P. COCQUEREZ, Analyse d'images aériennes : extraction de primitives rectilignes et antiparallèles, *Thèse d'État*, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, n° 2966, déc. 1984.
- <DAV-82> S. DAVIS, Hierarchical generalized Hough Transforms and live segment based generalized Hough Transforms, *Pattern Recognition*, 15, 1982, p. 277-285.
- <DUD-72> R. O. DUDA et P. E. HART, Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures, *Communication of the ACM*, 15, n° 1, Jan. 1972, p. 11-15.
- <DORS-84> DORST et DUIN, Spirograph theory: A Framework for calculations on Digitized Straight Lines, *IEEE Trans on PAMI*, PAMI-6, n° 5, Sept. 1984, p. 632-639.
- <HOU-62> P. V. C. HOUGH, Method and means for recognizing complex patterns *United States Patent*, n° 3, 069, 654, 18 Dec. 1962.
- <LOP-87> J. LOPEZ KRAHE et R. VILATA, Transformation de Hough discrète et bornée. Application à la détection de primitives rectangulaires, *Proc. MARI 87*, 2, p. 36-41, Paris, La Villette, 18-22 March 1987.
- <MAI-84> H. MAITRE et J. LOPEZ KRAHE, Transformation de Hough: théorie et application à la détection de symétries circulaires, *Congrès AFCET*, Paris, Jan. 1984, p. 255-264.
- <MAI-86> H. MAITRE, Contribution to the prediction of performances of the Hough Transform, *IEEE PAMI-8*, n° 5, September 1986, p. 669-674.
- <MAI-85> H. MAITRE, Un panorama sur la transformation de Hough, *Traitement du signal*, 2, n° 4, 1985, p. 305-317.
- <NEV-80> NEVATIA et BABU, Linear Feature Extraction and Description, *Comput. Gr. Image Process*, 13, 1980, p. 257-269.
- <SCH-82> SCHER, SCHNEIER et ROSENFELD, Clustering of Collinear Line Segments, *Pattern Rec.*, 15, n° 2, 1982, p. 85-91.
- <SHA-75> D. SHAPIRO, Transformations for the Computer Detection of Curves in Noisy Pictures, *Computer Graphics and image processing*, n° 4, 1975, p. 328-338.
- <SKL-78> J. SKLANSKY, On the Hough technique for curve detection, *IEEE Trans. Comput.*, C-27, Oct. 1978, p. 923-926.
- <TAV-82> TAVAKOLI et ROSENFELD, Building and Road Extraction from Aerial Photographs, *IEEE Trans. on Syst. Man and Cybern.*, 10, SMC-12, n° 1, Jan./Feb. 1982, p. 84-91.
- <TIM-85> R. TIMOUNI, Quelques aspects théoriques et numériques de la transformation de Hough, *Thèse*, Univ. Paris Sud-Orsay, 1985.