

EXTRACTION DES ARÊTES DANS DES IMAGES DE DISTANCE

EDGE EXTRACTION FROM RANGE IMAGES

Patrick HORAIN

RÉSUMÉ - La reconnaissance d'objets tri-dimensionnels rigides passe en général par une étape de description des objets sous forme de segments de surface homogènes et/ou de lignes caractéristiques. Parmi ces dernières, l'accent est mis sur les *arêtes*, définies comme étant des lignes où la courbure de la surface est extrême. Une méthode est proposée pour extraire les arêtes d'une surface "douce" (C^2 continues); les différentes étapes en sont: 1) calcul de la courbure maximale en chaque point de la surface; 2) recherche des *lignes de crête positives et des thalwegs négatifs de la courbure maximale*; 3) post-traitement des lignes: affinage, seuillage et ébarbulage. Un nouvel algorithme d'extraction des lignes de crête, local, parallélisable et fournissant des lignes fines presque partout, est proposé. Des résultats expérimentaux sont présentés.

Mots clés : Vision par ordinateur, images de distance, description d'objets, arêtes, lignes de crête.

ABSTRACT - An early step towards 3D object recognition consists in describing objects with homogeneous patches and/or characteristic lines. Attention is focused on *edges* which are defined to be lines of extremum curvature. A method is proposed for extracting edges on a smooth surface (C^2 continuous). Its major steps are: 1) computing the maximum curvature at each point of the surface; 2) finding out the *positive crest lines and negative thalwegs of the maximum curvature*; 3) post-processing of these lines: thinning, thresholding and pruning. A new algorithm is proposed for extracting crest lines; it is local, suitable for parallel processing and produces thin lines nearly everywhere. Experimental results are shown.

Keywords : Computer vision, range images, object description, edges, crest lines.

Adresse de l'auteur / Author's address:

TELECOM Paris, Département Images, 46 rue Barrault, 75634 PARIS Cedex 13, FRANCE

1. INTÉRÊT

De plus en plus, des techniques diverses sont développées pour acquérir l'information tridimensionnelle sur la surface (et la position) d'objets observés [Besl 88-a]. Reconnaître un objet semble en effet plus facile si on connaît sa forme (caractéristique intrinsèque des objets rigides) plutôt que si l'on dispose seulement d'une image d'intensité lumineuse (qui dépend de l'objet, mais aussi des conditions d'éclairage et de la position de l'observateur par rapport à l'objet).

Les analyses des images d'intensité lumineuse et de distance passent généralement par une étape commune, la segmentation, qui a pour but de décrire de manière structurée et concise l'ensemble des mesures élémentaires. La segmentation des images d'intensité lumineuse est classiquement menée par deux voies (susceptibles de coopérer): la recherche des lignes de discontinuité et la recherche des zones homogènes. De même, les objets 3D rigides peuvent être décrits en recherchant des lignes caractéristiques sur leur surface et/ou en recherchant des morceaux de surface uniformes au regard d'une certaine caractéristique. Cette caractéristique peut être l'appartenance à une face plane, quadrique [Faugeras 88] ou polynomiale [Besl 88-b], ou une homogénéité par rapport aux valeurs des courbures principales [Kasvand 88, Cartoux 87] ou gaussienne et moyenne [Besl 86, Yokoya 88]. Les lignes remarquables peuvent être des contours extrémaux, certaines lignes de courbure, les lignes de discontinuité de la surface et/ou de son orientation [Brady 85, Faugeras 88, Parvin 89].

Notons dès à présent que ces lignes caractéristiques ne suffisent pas en général à décrire complètement une forme. Néanmoins, leur connaissance peut être suffisante pour identifier un objet; en particulier les lignes d'intersection entre des surfaces élémentaires constituent une information facile à extraire et suffisamment riche pour localiser et identifier des pièces mécaniques [Bolles 86].

Ces lignes d'intersection peuvent être considérées comme un sous-ensemble de la notion générale d'*arête* (saillante ou en creux). Les arêtes sont généralement perçues comme étant des lignes où la surface change brusquement d'orientation, c'est-à-dire où la courbure est particulièrement forte. Les arêtes sont souvent utilisées par les dessinateurs au trait pour suggérer des formes, ce qui souligne leur importance dans la description des surfaces.

Ce travail est consacré à l'extraction des arêtes sur des surfaces paramétrées C^2 continues (dont les dérivées partielles du deuxième ordre existent et sont continues). De telles surfaces ont donc des variations relativement "douces", mais ne sont pas nécessairement composées de primitives géométriques. Le calcul différentiel des courbures est brièvement rappelé dans le chapitre 2.

Nous nous intéresserons ensuite aux arêtes qui sont des lieux de forte courbure, c'est-à-dire où la courbure maximale est grande en valeur absolue. Les arêtes devant être des primitives linéaires, nous les définirons comme étant l'ensemble des *lignes de crête de la courbure maximale* là où celle-ci est *positive*, et des *thalwegs de la courbure maximale* là où celle-ci est *négative*. Les thalwegs sont les lignes de crête du relief retourné et peuvent être obtenus comme tels. Le chapitre 3 est consacré à la détermination des lignes de crête.

2. CALCUL DE LA COURBURE

La géométrie différentielle permet de calculer en chaque point les courbures d'une surface paramétrée $P(u, v)$ de classe C^2 à partir des six coefficients E, F, G, L, M et N des deux formes quadratiques fondamentales [Ramis 81, Besl 86]:

$$E = \left\| \frac{\partial \vec{P}}{\partial u} \right\|^2 \quad F = \frac{\partial \vec{P}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \vec{P}}{\partial v} \quad G = \left\| \frac{\partial \vec{P}}{\partial v} \right\|^2$$

$$L = (EG - F^2)^{-1/2} \left[\frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial u^2}, \frac{\partial \vec{P}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{P}}{\partial v} \right]$$

$$M = (EG - F^2)^{-1/2} \left[\frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial u \partial v}, \frac{\partial \vec{P}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{P}}{\partial v} \right]$$

$$N = (EG - F^2)^{-1/2} \left[\frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial v^2}, \frac{\partial \vec{P}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{P}}{\partial v} \right]$$

Courbure gaussienne: $K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}$

Courbure moyenne: $H = \frac{GL + EN - 2FM}{2(EG - F^2)}$

Courbures principales (maximale et minimale): $k_1, k_2 = H \pm \sqrt{H^2 - K}$

où la notation $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ représente le produit mixte de trois vecteurs.

Les données utilisées ici proviennent d'une caméra à triangulation par faisceau laser [Lelandais 84]. L'objet est placé sur une table mobile en rotation. La position des points est fournie sous une forme fonctionnelle en coordonnées cylindriques: $\rho(\theta, z)$ où ρ , θ et z représentent respectivement la distance à l'axe de rotation vertical Oz , l'angle polaire dans le plan Oxy et l'altitude du point de mesure:

$$P(\theta, z) \begin{cases} x = \rho(\theta, z) \cos \theta \\ y = \rho(\theta, z) \sin \theta \\ z \end{cases}$$

En choisissant de paramétrer la surface par (θ, z) , et en reportant l'expression de $P(\theta, z)$ dans celles des coefficients des formes quadratiques fondamentales, on obtient:

$$E = \rho^2 + \left[\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right]^2 \quad F = \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad G = 1 + \left[\frac{\partial \rho}{\partial z} \right]^2$$

$$L = (EG - F^2)^{-1/2} \left[\rho \left[\frac{\partial^2 \rho}{\partial \theta^2} - \rho \right] - 2 \left[\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right]^2 \right]$$

$$M = (EG - F^2)^{-1/2} \left[\rho \frac{\partial^2 \rho}{\partial \theta \partial z} - \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} \right]$$

$$N = (EG - F^2)^{-1/2} \rho \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2}$$

Les valeurs des dérivées partielles sont estimées en chaque point de l'image discrète $\rho(\theta_i, z_j)$ sur un voisinage de 5×5 pixels. Les valeurs des six coefficients fondamentaux et des courbures sont ensuite calculées à partir de ces dérivées. Notons que les différentiations au 1^{er} et au 2^{ème} ordre sont très sensibles au bruit des données, et qu'il est en général nécessaire de faire précéder le calcul des courbures par un lissage de l'image de distance, par exemple de type gaussien.

Le signe d'une courbure principale indique si, dans la direction propre associée à cette courbure, la concavité est ou n'est pas dirigée du même côté de la surface que le vecteur normal (que nous orientons vers l'extérieur de l'objet). Lorsque la courbure maximale est positive (resp. négative), la surface est donc, dans la direction propre associée, localement rentrante (resp. saillante). Nous qualifierons les arêtes de *saillantes* ou *rentrantes* selon que la courbure maximale y est négative ou positive respectivement.

3. EXTRACTION DES LIGNES DE CRÊTE

3.1 Les différentes démarches possibles

Les lignes de crête sont généralement perçues comme étant un chemin en altitude bordé de part et d'autre par des régions plus basses. Cette configuration est celle classiquement rencontrée lorsqu'on détecte les discontinuités d'une image au moyen d'un opérateur de dérivation. Rechercher les lignes de crête consiste donc à supprimer les points non extrémaux. Le lecteur trouvera un exposé et une discussion des diverses méthodes de recherche des lignes de discontinuité dans [Cocquerez 84], et des méthodes de recherche des lignes de crête topographiques dans [Riazanoff 87].

Plusieurs méthodes [Nevatia 80, Chéhikian 83] recherchent les lignes de discontinuité en utilisant non seulement l'information module du gradient mais aussi sa direction dont on sait qu'elle est perpendiculaire à la ligne de discontinuité recherchée. Il est tentant d'adapter cette démarche à nos images de courbure, en utilisant également l'information de direction propre associée à la courbure maximale dans le plan tangent localement. Malheureusement, la direction propre associée à la courbure maximale ne correspond pas forcément à la direction locale de la ligne de crête.

Les méthodes "structuralistes", qui font suivre les lignes de crête à partir de "points choisis" par un automate qui se déplace suivant une "contrainte" ont l'avantage de fournir des lignes fines, connexes et structurées sous forme d'une liste séquentielle de points voisins [Destival 86, Riazanoff 87]. Toutefois le résultat final dépend très fortement du choix des points de départ, et des règles de déplacement.

La méthode proposée ci-après procède par un balayage ligne par ligne de l'image. Chaque pixel étant examiné, avec son voisinage, indépendamment des résultats pour les autres pixels, cette méthode est parallélisable. Elle s'apparente à celle de [Kim 86] qui définit les points de crête comme étant des changements de pente convexes, c'est-à-dire des maximums locaux, dans l'une des quatre

directions de la 8-connextité, mais a été modifiée pour fournir des lignes connexes et fines presque partout.

3.2 La méthode proposée

Un pixel de l'image de courbure maximale est considéré comme étant ou non un point de crête d'après l'examen de sa valeur et de celles de la liste cyclique de ses huit voisins. Par définition, nous dirons qu'un pixel où la courbure est positive est sur une ligne de crête lorsque la liste cyclique de ses voisins présente au moins deux maximums locaux positifs séparés par des intervalles valides, c'est-à-dire contenant au moins un voisin à une valeur plus faible que celle du pixel central. Ce premier critère de validation des intervalles permet d'obtenir des lignes fines presque partout au sens de la 4-connextité (fig. 1). Ces lignes ne sont pas fines au sens de la 8-connextité en particulier lorsqu'elles sont dirigées suivant une diagonale du plan discret.

Elles peuvent être transformées en lignes 8-connexes fines presque partout en ajoutant la condition suivante pour valider un intervalle: deux extremums quelconques de la liste des voisins du pixel examiné ne doivent pas être reliés par une suite 8-connexte de pixels de ce voisinage qui soient tous à des valeurs plus élevées que celle du pixel central. En d'autres termes, les extremums trouvés ne doivent pas être eux-mêmes voisins au sens de la 8-connextité (ils doivent former un angle d'au moins 90 ou 135° selon leur orientation), et si un ou plusieurs des points du 4-voisinage (Est, Nord, Ouest ou Sud) figure entre eux dans la liste, ce ou ces points doivent être à une valeur inférieure à celle du pixel testé (fig. 1).

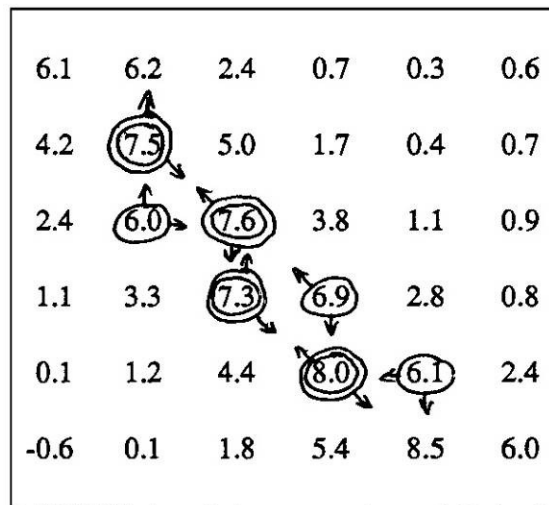


Figure 1: Tableau de valeurs d'une petite partie d'image. Les points entourés vérifient le premier critère (voir le texte; les flèches pointent vers les maximums de la liste des voisins). La ligne obtenue est 4-connexte. En utilisant de plus le deuxième critère de validation des intervalles, seuls les points entourés deux fois sont gardés.

Ce critère supplémentaire de validation est toutefois insuffisant pour garantir que les lignes soient partout fines au sens de la 8-connextité. Un exemple en est donné en figure 2. Il semble difficile de trouver un critère sur les altitudes des pixels permettant de sélectionner une ligne fine 8-connexte à partir d'une ligne 4-connexte. Remarquons en effet qu'un algorithme (rudimentaire) de suivi,

choisissant le plus haut parmi les cinq voisins formant un angle de $\pm 90^\circ$ avec la direction de provenance, sélectionnerait les uns ou les autres des pixels selon le sens de parcours de la ligne de crête (fig. 2)! Le problème des lignes qui sont localement épaisses sera donc réglé par un post-traitement de type affinage, ne tenant pas compte des altitudes des points d'image.

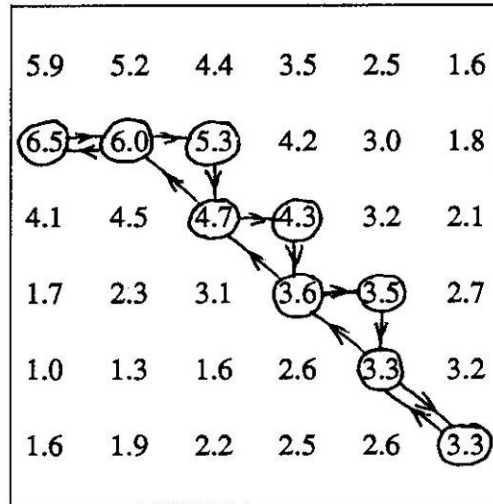


Figure 2: Exemple d'imagette pour laquelle il semble difficile d'obtenir une ligne fine 8-connexe par un critère sur les valeurs des pixels. Les flèches représentent les déplacements d'un automate de suivi rudimentaire (voir le texte).

4. RÉSULTATS

La figure 3 présente une image de distance $\rho(\theta, z)$ fournie par le système d'acquisition. L'angle polaire θ varie de 0 à 360° par pas de 2° en abscisse de l'image; l'altitude z prend 256 valeurs régulièrement espacées suivant les ordonnées. Le niveau de gris correspond à la distance ρ à l'axe de rotation Oz (sombre pour les points proches de l'axe, clair pour les points éloignés).

Cette image de distance est d'abord convoluée par un filtre gaussien (écart-type: 1.5 pixel). Une image de synthèse réalisée à partir de ces données lissées est présentée en figure 4.

L'image des courbure maximale est ensuite calculée à partir de l'image des distances filtrée. Sur la figure 5, les pixels sombres sont des points de courbure maximale négative, les clairs sont ceux de courbure maximale positive; le gris moyen correspond aux points de courbure proche de 0.

Les arêtes 8-connexes sont extraites de l'image précédente par l'algorithme proposé, en utilisant les deux critères de validation des intervalles (fig. 6; les niveaux de gris correspondent à la valeur de la courbure: en sombre les thalwegs négatifs ou arêtes saillantes, en clair les lignes de crête positives ou arêtes en creux). Les lignes obtenues sont fines presque partout. Pour cette image qui comporte 180×256 pixels, l'algorithme d'extraction des arêtes rédigé en PASCAL a nécessité environ 6 s de calcul sur un VAX 8550 (6 Mips).

À titre de comparaison, la figure 7 présente une image des arêtes obtenue par la méthode de [Kim 86]. Les surépaisseurs sont importantes, et le positionnement des arêtes est donc imprécis.

L'image de la figure 6 est ensuite seuillée avec hystérésis [Canny 86] pour les lignes positives d'une part, et pour les lignes négatives d'autre part. Enfin, les lignes sont affinées et ébarbulées.

L'ébarbulage est généralement effectué en itérant des amincissements un nombre de fois proportionnel à la longueur maximale des barbules à détruire, exprimée en nombre de pixels [Serra 82, Destival 86]. Dans le cas de nos arêtes, qui sont des lignes dessinées sur un objet volumique, la longueur des barbules évaluée dans l'espace tri-dimensionnel est un critère plus pertinent que le nombre de pixels qui la composent. L'algorithme d'ébarbulage utilisé procède en construisant une liste des barbules ordonnée par longueur (dans R^3) croissante, puis en détruisant les barbules de plus en plus longues (fig. 8).

La figure 9 présente la projection des arêtes ainsi obtenues sur l'image de synthèse de la figure 4. On constate la bonne localisation de ces lignes sur l'objet.

5. CONCLUSION

Les arêtes des objets sont des lignes caractéristiques importantes pour la description des objets. Il est remarquable en particulier que la dernière image (fig. 10), représentant les arêtes obtenues projetées sur la silhouette de l'objet, soit assez analogue à ce que pourrait être un dessin au trait de cet objet, et suffit à l'observateur humain pour l'identifier facilement. Il semble donc envisageable d'utiliser les lignes ainsi extraites dans des tâches de reconnaissance automatique, ou de mise en correspondance entre objets.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [Besl 86] P. Besl and R. Jain: *Invariant Surface Characteristics for 3D Object Recognition in Range Images*; Computer Vision, Graphics and Image Proc., **33**, 1986, pp. 33-80.
- [Besl 88-a] P. Besl: *Active, Optical Range Imaging Sensors*; Machine Vision and Applications, **1**, 1988, pp. 127-152.
- [Besl 88-b] P. Besl and R. Jain: *Segmentation Through Variable-Order Surface Fitting*; IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell., **PAMI-10**, n° 2, March 1988, pp. 167-192.
- [Brady 85] M. Brady, J. Ponce, A. Yuille and H. Asada: *Describing surfaces*; Computer Vision, Graphics and Image Proc., **32**, 1985, pp. 1-28.
- [Bolles 86] R. Bolles and P. Horaud: *3DPO: A Three-Dimensional Part Orientation System*; The Int. Jour. of Robotics Research, **5**, n° 3, Fall 1986, pp. 3-26.
- [Canny 86] J. Canny: *A Computational Approach to Edge Detection*; IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mach. Intell., **PAMI-8**, n° 6, Nov. 1986, pp. 679-698.
- [Cartoux 87] J.Y. Cartoux, J.T. Lapreste, M. Richetin: *Vers l'authentification ou la reconnaissance automatique de visages à partir de leur image tridimensionnelle*; Actes de MARI 87 (Paris), 1987, pp. 219-224.
- [Chéhikian 83] A. Chéhikian, J. Hérault et J.F. Mendez: *Un processeur de détection de contours en temps réel dans une image de télévision*; Ann. des Télécom., **38**, n° 3-4, 1983, pp.

91-105.

- [Cocquerez 84] J.P. Cocquerez: *Analyse d'images aériennes: extraction de primitives rectilignes et anti-parallèles*; Thèse de Doctorat ès-Science, Université de Paris-Sud, 1984.
- [Destival 86] I. Destival: *Morphologie mathématique appliquée aux images des satellites de télédétection*; 2^{ème} Colloque Image (Nice), 1986, vol. 1, pp. 11-15.
- [Faugeras 88] O. Faugeras: *A few steps toward artificial 3D vision*; INRIA, Rapport de Recherche n° 790 (1988).
- [Kasvand 88] T. Kasvand: *The klk_2 space in range image analysis*; 9th Int. Conf. on Pattern Recognition (Rome), 1988, pp. 923-926.
- [Kim 86] Y.J. Kim: *Reconnaissance de formes géomorphologiques et géologiques à partir de modèles numériques de terrain pour l'exploitation de données stéréoscopiques de Spot*; Thèse D.I., Université de Paris VI, 1986.
- [Lelandais 84] S. Lelandais, A. Clainchard, J. Lopez-Krahe, H. Maître et F. Schmitt: *Numérisation de formes tridimensionnelles*; 4^{ème} Congrès AFCET-INRIA (Paris), 1984, tome I, pp. 339-356.
- [Nevatia 80] R. Nevatia et K. Babu: *Linear feature extraction and description*; Computer Vision, Graphics and Image Proc., **13**, 1980, pp. 257-269.
- [Parvin 89] B. Parvin and G. Medioni: *Adaptative Multiscale Feature Extraction from Range Data*; Computer Vision, Graphics and Image Proc., **45**, 1989, pp. 346-356.
- [Ramis 81] E. Ramis, C. Deschamps, J. Odoux: *Applications de l'analyse à la géométrie*; Cours de Mathématiques Spéciales, vol. 5, éd. Masson (Paris), 1981.
- [Riazanoff 87] S. Riazanoff, B. Cervelle, J. Chorowicz: *Nouveaux algorithmes pour l'extraction de lignes de crête; Application aux modèles numériques de terrain*; Actes de MARI 87 (Paris), 1987, vol. 2, pp. 350-356.
- [Serra 82] J. SERRA: *Image analysis and mathematical morphology*; Academic Press (London), 1982.
- [Yokoya 88] N. Yokoya and M. Levine: *A Hybrid Approach to Range Image Segmentation*; 9th Int. Conf. on Pattern Recognition (Rome), 1988, pp. 1-5.



Figure 3

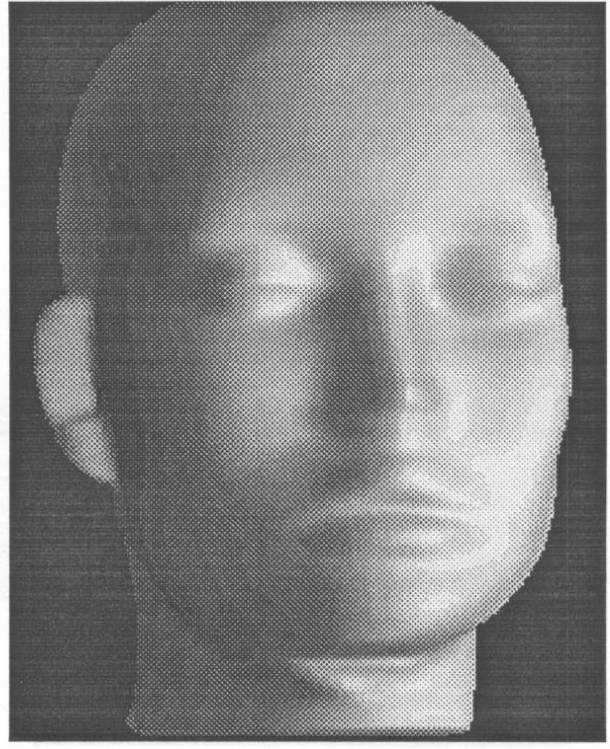


Figure 4



Figure 5

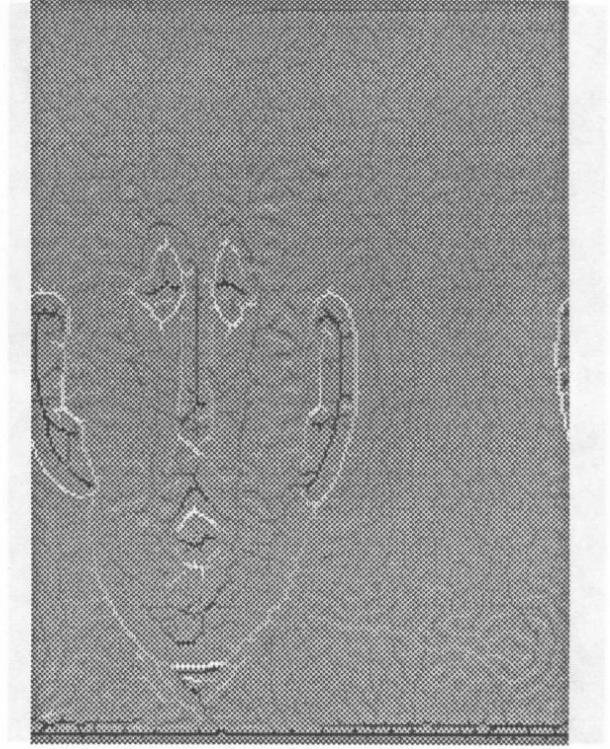


Figure 6



Figure 7

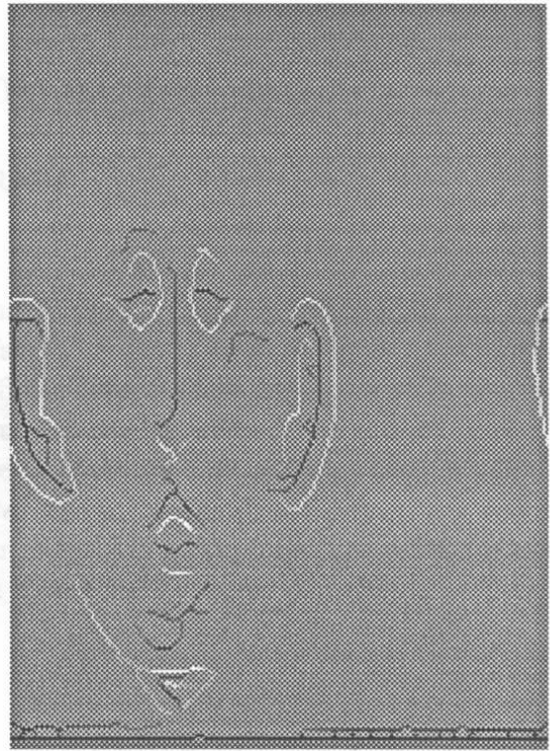


Figure 8

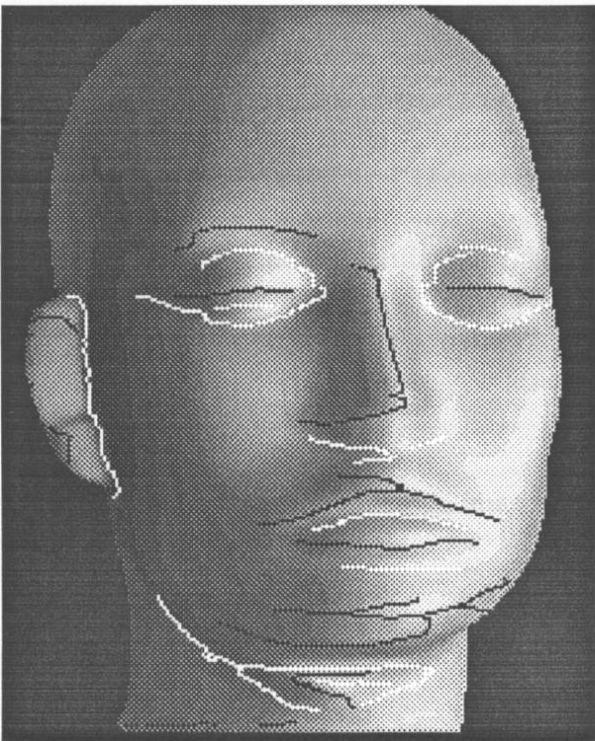


Figure 9

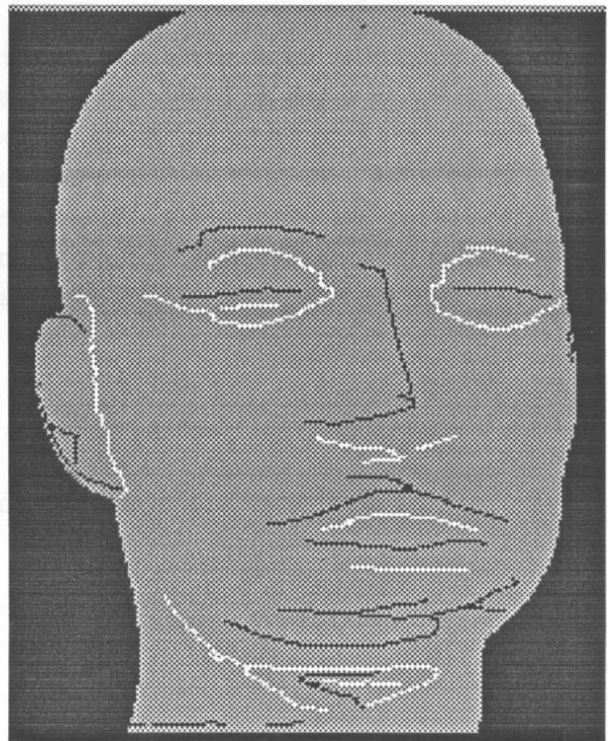


Figure 10