

Une méthode de relaxation discrète

pour la reconnaissance d'objets 2D

décrits par un modèle

Recognition of 2D modeled objects by a discrete relaxation method

T. Morand *Chercheur*, B. Dubuisson *Professeur*, U.R.A. C.N.R.S. 817 Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes. Université de Technologie de Compiègne, B.P. 649, 60206 COMPIÈGNE CEDEX.

RÉSUMÉ

L'article présente une méthode de relaxation discrète pour la reconnaissance d'objets plans dont on a effectué une modélisation préalable. Cette modélisation est réalisée à l'aide de primitives du type segments de droite ou cercles. L'approche est descendante et ascendante, permettant, par un retour au niveau de l'image pour détecter de nouvelles primitives, d'éviter un prétraitement exhaustif de l'image.

MOTS-CLÉS : Relaxation discrète, reconnaissance d'objets.

SUMMARY

In this paper, a discrete relaxation method is described. The aim of this method is the recognition of 2D objects, a model of which having prealably be established. The model is based on two kinds of features: straight segments and circles. The approach is both forward and backward; so, it is not necessary to detect all the primitives at the beginning of the procedure: new primitives may be detected, if necessary, during the relaxation procedure.

KEY WORDS: Discrete relaxation, object recognition.

Introduction

Le but de la relaxation est d'affecter n objets O_1, O_2, \dots, O_n à m classes C_1, C_2, \dots, C_m . Dans l'analyse d'une image, les objets peuvent représenter les caractères détectés dans l'image et les classes les caractères correspondants du modèle à reconnaître. En stéréovision, cette méthode peut être utilisée pour mettre en correspondance les caractères remarquables des deux images.

Il s'agit, de façon générale, d'essayer de faire correspondre deux entités (deux images ou une image et un modèle) afin d'obtenir la description désirée du phénomène observé. Dans le premier cas (deux images), il peut être question de déterminer le déplacement d'objets d'une image à l'autre, d'extraire l'information 3D à partir de deux vues d'une même scène, etc... La recherche d'objets dans une image, l'identification d'une image aérienne à l'aide d'une carte, ..., se rapportent au second cas (image et modèle).

La relaxation peut s'effectuer de deux façons distinctes qui ne diffèrent non pas par leur principe général mais seulement par la méthode d'itération; on distingue relaxation continue de relaxation discrète.

La relaxation se déroule en trois phases successives: l'initialisation, l'itération, l'arrêt.

On définit lors de l'initialisation un tableau $n \times m$ de probabilités (relaxation continue) ou de possibilités (relaxation discrète) p_{ij} d'affecter l'objet O_i à la classe C_j .

Dans le cas continu la valeur de p_{ij} est comprise entre 0 et 1. Dans le cas discret p_{ij} vaut 0 ou 1.

L'itération permet de faire évoluer ce tableau de façon à converger vers une solution: chacun des objets est alors affecté à une classe précise. Elle s'effectue par propagation locale de contraintes. A cet effet, on définit une fonction de compatibilité C .

Supposons qu'on veuille affecter un objet O_i à une classe C_j et un objet O_h à une classe C_k , $C(i, j; h, k)$ représente la compatibilité de la paire objet-classe (h, k) avec la paire (i, j) et est comprise entre -1 et 1 (cas continu), ou vaut 0 ou 1 (cas discret).

L'incrément de p_{ij} dépend des valeurs des compatibilités sur un voisinage de l'objet O_i et donc de la classe C_j ; elle est définie différemment selon que l'on se trouve dans le cas continu ou le cas discret [6], [7].

L'arrêt du processus de relaxation peut intervenir quand le tableau est stable d'une itération à l'autre (dans les deux cas), quand une ou plusieurs probabilités ont dépassé un

certain seuil de validation (dans certains cas continus), ou quand le nombre d'itérations est trop important.

De nombreux domaines du traitement d'images font appel à la relaxation. A titre d'exemples, des utilisations ont été développées en segmentation (seuillages ou détection de lignes et de courbes dans les contours) [7], [10], en identification d'images aériennes ou satellite (relaxation continue [2], [6], [8], [9] ou discrète [6], [4]) etc... Une bibliographie exhaustive sur la relaxation et ces développements en image dépasse le cadre de cet article ; on peut ajouter [6], [3].

Les techniques de relaxation présentent néanmoins un inconvénient qui peut parfois être majeur : elles sont essentiellement ascendantes et nécessitent une segmentation préalable très efficace et exhaustive.

La méthode, que nous allons proposer, est une méthode de relaxation discrète qui permet d'éviter d'effectuer au préalable une détection exhaustive des primitives de l'image. Elle est initialisée avec un certain nombre de primitives détectées, débute la phase itérative avec cette connaissance partielle et retourne au niveau de l'image pour rechercher de nouveaux éléments afin de compléter cette première connaissance. Les procédures de relaxation sont largement connues et utilisées : l'originalité de la méthode proposée consiste essentiellement en deux points :

— Aucune hypothèse de départ sur la position du modèle dans la scène, mais seulement sur la connaissance du facteur d'échelle.

— Approche ascendante et descendante permettant, par un retour au niveau de l'image afin de détecter de nouvelles primitives, d'éviter les longs et coûteux prétraitements d'amélioration de l'image.

Le principe de cet aller-retour va être décrit dans cet article à partir du problème de reconnaissance d'objets plans décrits par deux types de primitives pour une application en robotique : il est exact que tout choix différent de primitives va modifier les paramètres de la méthode et donc il ne faut considérer l'exemple présenté que comme une illustration de la méthode proposée de relaxation.

Nous rappellerons dans un premier paragraphe le principe de la relaxation, puis nous décrirons la méthode baptisée REPARTIR pour Relaxation Elaborée autour d'un Processus d'Allers-Retours pour le Traitement d'Images Robotiques.

1. Relaxation discrète et relaxation continue

La terminologie relative à la relaxation a été initialement proposée par Rosenfeld [6]. La figure 1 présente les définitions des différents termes que nous allons employer dans la suite de cet article.

Définissons tout d'abord la méthode de relaxation discrète telle que présentée dans [4] :

- les possibilités $p^t(i, s)$ valent 1 (oui) ou 0 (non).
- la fonction de compatibilité est également discrète : $C(i, s; j, u)$ vaut 1 (oui) ou 0 (non).

Les possibilités $p^0(i, s)$ sont initialisées à 0 ou 1 suivant généralement des relations géométriques entre indices et éléments.

Ces possibilités évoluent suivant l'algorithme suivant :

- $p^{t+1}(i, s) = 1$ si les deux conditions suivantes sont vérifiées
 - $p^t(i, s) = 1$
 - il existe au moins q indices du modèle tels que

pour chacun de ces indices m_u on puisse trouver un élément e_j dans l'environnement tel que :

$$p^t(j, u) = 1$$

$$\text{et } C(i, s; j, u) = 1$$

il y a arrêt lorsqu'il y a stabilité du tableau de possibilités :

$$p^{t+1}(i, s) = p^t(i, s) \text{ pour tout couple } (i, s)$$

Définition	Notation	Description
éléments	$e_i \quad 1 \leq i \leq n_E$	primitives détectées dans l'image de la scène
indices	$m_s \quad 1 \leq s \leq n_M$	primitives constituant le modèle (ou primitives d'une seconde image)
environnement	$E = \{e_i, 1 \leq i \leq n_E\}$	ensemble des éléments détectés dans l'image de la scène
modèle	$M = \{m_s, 1 \leq s \leq n_M\}$	ensemble des indices
possibilité ou probabilité	$p^t(i, s)$	possibilité / probabilité que l'élément détecté e_i corresponde à l'indice m_s du modèle à l'itération t
compatibilité	$C(i, s; j, u)$	compatibilité entre les paires élément-indice (i, s) et (j, u)

Fig. 1. — Définitions communes aux différentes méthodes de relaxation.

La compatibilité est définie par Medioni à partir de contraintes géométriques auxquelles doivent obéir les indices et éléments.

La méthode exposée par Medioni nous a paru très intéressante de par son utilisation de la relaxation discrète. Néanmoins, nous avons pu émettre diverses critiques :

— L'initialisation des possibilités, basée sur la similarité d'orientation entre la scène et le modèle ne peut être utilisée dans le cas d'images robotiques où l'on recherche un objet connu avec une position et une orientation quelconques.

— L'approche est par nature exclusivement ascendante : les résultats de la relaxation dépendent de l'efficacité du module bas niveau qui a fourni les segments de droite ; d'où nécessité d'une très grande précision et d'exhaustivité de ce traitement d'obtention de segments. Cela oblige pratiquement à effectuer en premier lieu des prétraitements de l'image de la scène afin d'en améliorer la lisibilité.

— La méthode est spécifique de primitives segments de droite.

Nous présentons maintenant la méthode proposée par Rosenfeld sur la relaxation continue [6].

L'itération a pour but de faire évoluer les probabilités $p^t(i, s)$ à valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$ des valeurs initiales aux bornes 1 ou 0 (convergence) : un élément e_i correspond (ne correspond pas) à l'indice m_s . De plus, quel que soit l'élément e_i et à tout niveau t de l'itération, on a l'égalité suivante :

$$\sum_{s=1}^{n_M} p^t(i, s) = 1.$$

La valeur de la compatibilité $C(i, s; j, u)$ peut varier dans l'intervalle $[-1, 1]$. Une valeur proche de 1 correspond à la compatibilité des paires élément-indice (e_i, m_s) et (e_j, m_u) . Si elle est proche de -1 ces deux paires sont incompatibles. Enfin elles sont considérées comme indépendantes si la valeur de $C(i, s; j, u)$ approche zéro.

Les valeurs sont initialisées sur un raisonnement analogue à ce qui précède, en fonction de la connaissance initiale du phénomène observé et doivent vérifier :

$$\sum_{s=1}^{n_M} p^0(i, s) = 1 \quad \forall 1 \leq i \leq n_E.$$

L'évolution des probabilités est obtenue par :

$$p^{t+1}(i, s) = \frac{p^t(i, s)(1 + q^t(i, s))}{\sum_{s=1}^{n_M} p^t(i, s)(1 + q^t(i, s))}.$$

Le dénominateur permet de normaliser la probabilité afin de satisfaire à la condition énoncée auparavant.

q est une fonction incrémentale fonction des compatibilités.

Le processus d'itération peut être arrêté quand les probabilités $p^t(i, s)$ peuvent être assimilées en totalité ou en partie à l'une des deux valeurs 0 ou 1, ou encore si le nombre d'itérations est trop important.

Une application intéressante analogue à celle de Medioni se trouve dans [8]. Comme précédemment, cette application est uniquement ascendante et les seules primitives utilisées sont les segments de droite.

2. Présentation de REPARTIR

REPARTIR est une méthode de relaxation discrète utilisant deux types de primitives, segments de droite et cercles. Nous n'exposons pas dans cet article les méthodes de traitement qui permettent d'obtenir ces deux types de primitives.

La principale particularité de l'environnement (ensemble des éléments déjà détectés dans l'image) est que son cardinal n'est pas constant, contrairement aux méthodes usuelles de relaxation. Il n'est donc pas question, avant d'utiliser REPARTIR, d'effectuer au préalable une détection exhaustive des primitives de l'image.

En fait l'environnement n'est, au début du traitement, qu'un ensemble vide (aucun élément ou primitive détecté). Ensuite vient la phase d'initialisation ; on recherche alors, à l'aide des « outils bas-niveau », quelques « éléments marquants » qui sont stockés dans l'environnement.

On procède ensuite à l'itération. Il se peut alors, pour des raisons que nous détaillerons plus tard, qu'il soit nécessaire de retourner au niveau de l'image pour rechercher de nouveaux éléments ; ceux qui sont alors détectés sont stockés dans l'environnement qui voit son cardinal augmenter. Cette propriété de l'environnement (cardinal variable) est issue de l'approche à la fois ascendante et descendante de REPARTIR.

Une autre caractéristique originale de la méthode influe sur les définitions de l'élément et de l'indice : le fait d'utiliser les primitives « segment de droite » et « cercle » nécessite de distinguer deux « genres » d'éléments ou d'indices. Ce « genre » est souvent employé dans REPARTIR : l'affectation d'un élément à un indice ne peut se faire que si leurs genres sont identiques. Par exemple, lors de l'initialisation, la possibilité d'affecter un élément e_i à un indice m_s est définie par :

$$p^0(i, s) = 1 \quad \text{si les genres de } e_i \text{ et } m_s \text{ sont identiques}$$

$$p^0(i, s) = 0 \quad \text{sinon.}$$

Nous allons voir maintenant, en exposant la représentation du modèle, que les indices et aussi les éléments, possèdent d'autres « composantes » que le genre qui permettent d'identifier leur position et leur taille (indices et éléments) ainsi que les relations avec les autres indices du modèle (indices uniquement).

2.1. REPRÉSENTATION DU MODÈLE

Le modèle, contrairement à l'environnement est un ensemble de cardinal constant durant toutes les étapes de la méthode. Il doit être créé au préalable. Grâce à un système interactif de saisie manuelle du modèle, l'utilisateur construit le modèle de l'objet à rechercher dans l'image en donnant les genres, positions, tailles et relations entre eux des indices du modèle. Il possède une position de référence ou « origine du modèle ». Les positions des indices sont définies par rapport à cette origine.

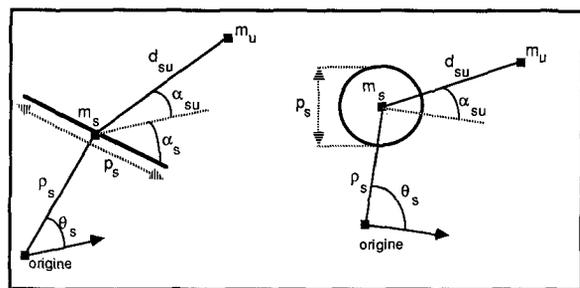


Fig. 2. — Description d'un indice segment et d'un indice cercle.

La figure 2 illustre, dans le cas d'un segment comme dans le cas d'un cercle, les éléments de description d'un indice.

Un indice m_s d'un modèle est caractérisé par :

- son genre (c : cercle, s : segment de droite) ;
- son paramètre p_s (diamètre pour un cercle, longueur pour un segment) ;
- son orientation α_s (néant pour un cercle, angle entre le segment et l'axe origine pour un segment de droite) ;
- sa position (ρ_s, θ_s) par rapport à l'origine du modèle en coordonnées polaires ;
- une liste de r indices m_u en relation avec m_s ainsi que leurs positions relatives vis-à-vis de m_s (d_{su}, α_{su}). Le nombre r n'est pas forcément le même pour tout indice m_s .

Le modèle consiste donc en un graphe dont les nœuds sont les indices et les arcs les relations entre eux.

Les éléments, bien que ne faisant pas partie du modèle, sont très semblables aux indices puisqu'on peut considérer qu'ils en constituent des réalisations dans l'environnement. Aussi leurs caractéristiques sont-elles très proches. Pour identifier un élément, il est nécessaire de connaître :

- son genre (cercle/segment),
- son paramètre (diamètre/longueur),
- son éventuelle orientation (pour un segment),
- sa position.

Cette fois, la position, définie par rapport au repère de l'image de la scène, est exprimée en coordonnées cartésiennes. Les éléments, à l'image des indices, sont ainsi totalement identifiés. Nous pouvons donc décrire maintenant la fonction de compatibilité discrète employée dans REPARTIR.

2.2. COMPATIBILITÉ

La fonction de compatibilité repose sur des contraintes géométriques.

La compatibilité fait intervenir deux paires élément-indice, chaque paire devant être de même genre. Il faut donc faire face aux quatre situations suivantes :

- paire segment-paire segment,
- paire segment-paire cercle,
- paire cercle-paire segment,
- paire cercle-paire cercle.

Nous avons choisi de faire jouer les relations angulaires ainsi que les distances (à un degré moindre) entre les indices et les éléments.

La compatibilité $C(i, s; j, u)$ entre la paire élément-indice (e_i, m_s) et la paire (e_j, m_u) a diverses définitions qu'on précise ci-dessous :

- (e_i, m_s) segment et (e_j, m_u) segment (fig. 3)
 - $C(i, s; j, u) = 1$ si $\alpha < \alpha_0$ et $R < R_0$
 - $C(i, s; j, u) = 0$ sinon.

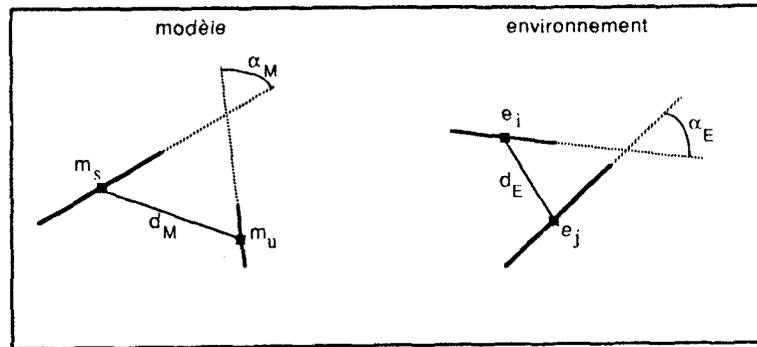


Fig. 3. — Paramètres de la compatibilité segment-segment.

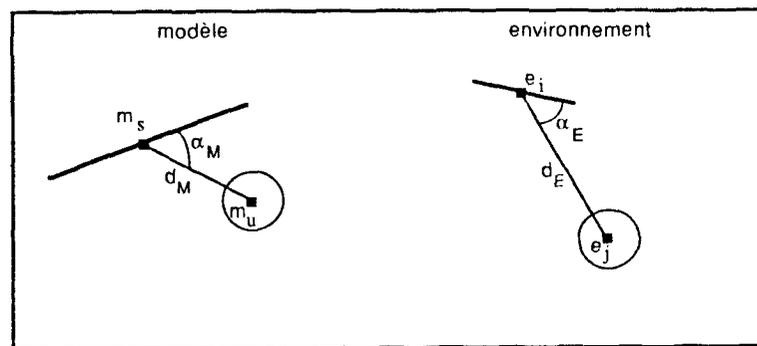


Fig. 4. — Paramètres de la compatibilité segment-cercle.

L'angle α et le rapport R sont définis par :

$$\alpha = |\alpha_M - \alpha_E|$$

$$R = \left| \frac{d_M}{d_E} - 1 \right|$$

Les seuils α_0 et R_0 ont été choisis de façon expérimentale afin de les adapter au problème à résoudre. Ce problème de seuil est délicat, donc discutable parce qu'il nuit à la généralité de la méthode.

— (e_i, m_s) segment et (e_j, m_u) cercle (fig. 4)

- $C(i, s; j, u) = 1$ si $\alpha < \alpha_0$ et $R < R_0$
- $C(i, s; j, u) = 0$ sinon.

α et R sont définis par :

$$\alpha = |\alpha_M - \alpha_E|$$

$$R = \left| \frac{d_M \sin \alpha_M}{d_E \sin \alpha_E} - 1 \right|$$

Dans ce cas, la contrainte angulaire est moins importante que la contrainte de distance. Il nous a semblé que la

distance orthogonale du cercle au segment prime sur l'angle entre le segment et la droite passant par le centre du cercle et le milieu du segment.

— (e_i, m_s) cercle et (e_j, m_u) segment

La formulation est identique à la précédente en inversant le rôle des deux paires.

— (e_i, m_s) cercle et (e_j, m_u) cercle (fig. 5)

- $C(i, s; j, u) = 1$ si $R < R_1$
- $C(i, s; j, u) = 0$ sinon

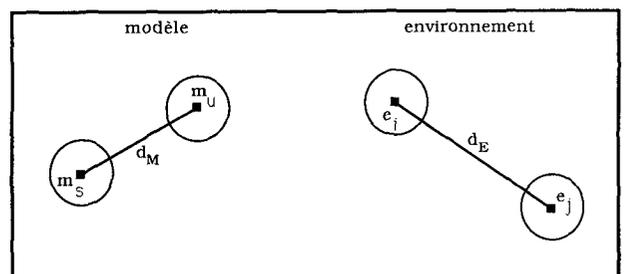


Fig. 5. — Paramètres de la compatibilité cercle-cercle.

R est défini par :

$$R = \left| \frac{d_M}{d_F} - 1 \right|.$$

La compatibilité ne dépend dans ce cas que d'une seule contrainte de distance.

Dans aucun des quatre cas que nous venons de voir, le calcul de la compatibilité ne tient compte directement de la longueur des segments de droite ou du diamètre des cercles bien que le facteur d'échelle soit supposé connu. Nous n'avons pas souhaité l'utiliser pour éviter des erreurs issues du module bas-niveau de détection de segments de droite (découpage d'un segment, erreur de longueur). Cette information pourrait être largement utilisée en ayant recours à un module de détection plus fiable [1].

2.3. EXPLOITATION DESCENDANTE

REPARTIR est une méthode qui fonctionne parfois de façon descendante. Ce retour au niveau de l'image est nécessaire pour détecter de nouveaux éléments. L'initialisation est, en effet, limitée à la détection des éléments les plus « marquants », c'est-à-dire ceux pour lesquels il n'y a aucun problème de détection. Compte tenu donc de la connaissance que l'on a obtenue après un certain nombre d'itérations, on va procéder à une recherche locale dans une zone choisie de l'image. Cette recherche locale sera lancée lorsque l'on a déjà effectué des affectations élément-indice mais que, pour le calcul d'une possibilité $p^{t+1}(i, s)$, le nombre d'éléments disponible est insuffisant (cf. § 3). Il s'agit de définir de façon précise la zone de recherche.

Soit la paire élément-indice (e_i, m_s) : on recherche un élément e_j pouvant correspondre à un indice m_u , m_u étant l'un des indices en « relation privilégiée » avec m_s , donc étant connu.

Deux cas sont à distinguer, illustrés par les figures 6 et 7 : la position de l'indice m_u , de genre quelconque, est représentée par un simple carré.

— Paire (e_i, m_s) de type segment

En supposant que l'orientation des segments soit connue à 2π près (dans la figure 6, les segments sont représentés par des flèches), la zone de recherche peut facilement être déterminée et elle est unique. On calcule la distance entre les indices m_s et m_u et l'angle entre la droite passant par le centre de ces deux indices et l'indice m_s ; puis on reporte dans l'environnement, ce qui détermine un emplacement de recherche précis. La zone de recherche finale Z_j est définie par une zone de tolérance autour de cet emplacement.

Si e_j est de genre cercle, la recherche se fait directement dans la zone ainsi déterminée.

Si e_j est de genre segment de droite, la démarche est légèrement différente. On commence à déterminer l'orien-

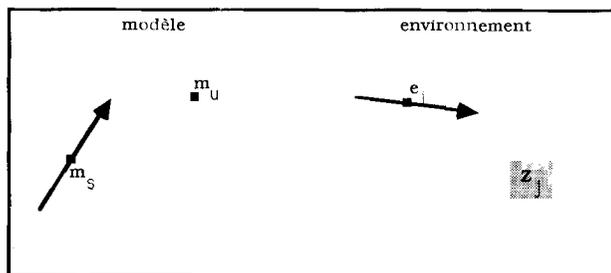


Fig. 6. — La zone de recherche peut être déterminée à partir d'un segment.

tation de e_j dans l'image. Puis, on détermine les segments qui correspondent à cette orientation (c'est la démarche du traitement bas-niveau employé) et on recherche parmi ces segments celui dont la position appartient à la zone Z_j .

— Paire (e_i, m_s) de type cercle

Il est impossible a priori de déterminer directement la zone de recherche Z_j de l'indice e_j puisque la distance entre m_s et m_u est la seule information disponible (fig. 7).

On examine alors l'itération précédente. En effet, si l'on essaie de rechercher de nouveaux éléments pour évaluer la possibilité à l'itération $t+1$, $p^{t+1}(i, s)$, c'est que $p^t(i, s)$ valait 1.

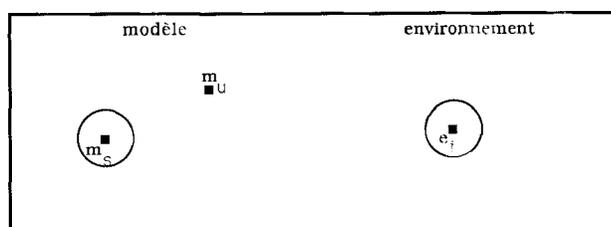


Fig. 7. — Z_j est impossible à déterminer à partir d'un cercle.

Il y a donc déjà eu compatibilité entre cette paire (e_i, m_s) et une autre paire au moins (e_h, m_r) de genre quelconque ($C(h, r; i, s) = 1$). On associe à cette compatibilité la position du modèle dans l'image et notamment l'orientation α correspondante (fig. 8).

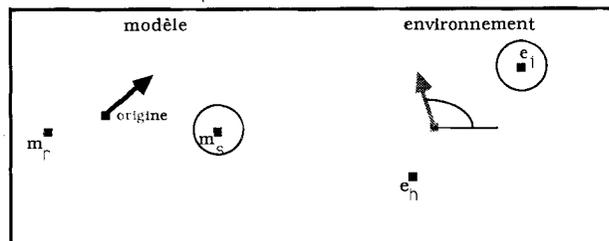


Fig. 8. — Orientation α du modèle dans l'image associée à une compatibilité.

Cet angle α était au départ caractéristique de l'affectation de e_h à m_r (on peut le noter α_{hr}). Il devient également propre au couple (e_i, m_s) : α_{is} .

On a donc $\alpha = \alpha_{hr} = \alpha_{is}$. On peut parler de « propagation » de l'orientation du modèle de α_{hr} à α_{is} .

Une fois obtenue la connaissance de α_{is} , on peut facilement déterminer la zone de recherche Z_j d'un nouvel élément e_j pouvant correspondre à l'indice m_u .

Reste à déterminer l'angle α_{hr} . Deux cas se présentent alors :

— paire (e_i, m_r) de genre segment.

L'orientation α_{hr} du modèle dans l'image correspondant à l'affectation de e_h à m_r , se calcule de façon triviale.

— paire (e_h, m_r) de genre cercle.

L'angle α_{hr} est généralement connu car issu d'une propagation antérieure (itération précédente). Ce raisonnement est valable au cours des itérations, mais il est nécessaire de procéder à une initialisation.

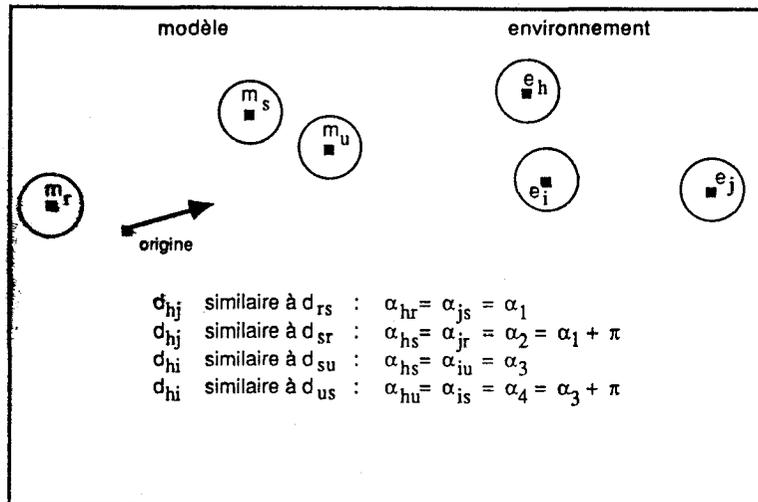


Fig. 9. — Détermination de l'orientation pour chaque couple élément cercle-indice cercle.

La méthode proposée s'appuie sur des contraintes de distance. Elle est illustrée par la figure 9.

Soit d_{ij} la distance entre chaque paire d'éléments cercle (e_i, e_j).

Si cette distance d_{ij} est similaire à une distance d_{su} entre deux indices cercles m_s et m_u du modèle, on détermine l'orientation correspondante α du modèle dans l'image et $\alpha = \alpha_{is} = \alpha_{ju}$. Sinon le ou les angles α_{is} et α_{ju} ne sont pas déterminés ; il peut alors être nécessaire de rechercher des éléments marquants de genre segment de droite.

En examinant en détail l'exemple de la figure 9, on remarque qu'on obtient deux valeurs d'angle différentes α_2 et α_3 pour α_{hs} . Cette multiplicité de valeurs peut, selon les cas de figure, être plus importante et chaque valeur de l'orientation est stockée pour chaque paire mise en correspondance. Ce stockage est réalisé en utilisant le tableau des possibilités qui, naturellement bidimensionnel, devient tridimensionnel pour stocker les différentes valeurs possibles d'orientation α_{is} pour une même paire (e_i, m_s).

3. Algorithme de REPARTIR

3.1. INITIALISATION DE LA RELAXATION

Dans beaucoup de méthodes de relaxation la première phase est simplement constituée de l'initialisation du tableau de possibilités, une détection exhaustive des primitives de l'image ayant déjà été effectuée au préalable. Dans la méthode proposée, nous avons voulu éviter cette estimation exhaustive et tenter de nous limiter à la détection des éléments « marquants » de l'image et donc procéder à l'initialisation des possibilités correspondantes.

Cette approche nécessite de déterminer les différentes orientations α du modèle dans l'image correspondant aux possibilités d'affectation d'un élément cercle à un indice cercle. Si au moins un angle α a été déterminé, on passe directement à l'itération ; sinon il faut chercher des éléments « marquants » segments de droite. Cela permet de créer de nouveaux éléments dont on initialise les possibilités. Vient ensuite l'itération.

L'initialisation des possibilités s'effectue de façon très simple dans le cas de la limitation de la détection d'un indice de chaque catégorie :

- $p^0(i, s) = 1$ si e_i et m_s sont de même genre,
- $p^0(i, s) = 0$ sinon.

En fait, le tableau de possibilités est tridimensionnel puisque, comme indiqué dans le paragraphe précédent, on a suggéré de l'utiliser pour stocker l'orientation. La possibilité initiale d'affecter un élément e^i à un indice m^j ne s'écrit pas $p^0(i, s)$ mais $p_n^0(i, s)$, n étant le numéro de stockage de l'orientation α_{is} . Aussi les possibilités peuvent prendre les différentes valeurs suivantes :

- $p_n^0(i, s) = \text{non}$ si e_i et m_s sont de genre différents.
- $p_n^0(i, s) = \text{oui}$ si e_i et m_s sont de genre segment de droite, ou e_i et m_s de genre cercle sans aucune orientation déterminée.
- $p_n^0(i, s) = \alpha$ si e_i et m_s sont de genre cercle et α est la n -ième valeur d'orientation déterminée.
- $p_n^0(i, s) = \text{non}$ si e_i et m_s sont de genre cercle et si n est supérieur au nombre d'orientations déterminées.

3.2. ITÉRATION

La méthode employée est inspirée de l'approche de Médioni (Médioni 84). Les modifications apportées concernent le genre des éléments ainsi que la détection de nouveaux éléments. L'algorithme est décrit ci-dessous.

La possibilité $p_n^{t+1}(i, s)$ d'affecter un élément e_i à un indice m_s à l'itération $t + 1$ (pour une paire (e_i, m_s) de genre segment, $n = 0$) prend la valeur oui ((e_i, m_s) segment) ou la valeur α ((e_i, m_s) cercle) si les deux conditions A et B sont vérifiées.

A) La possibilité à l'itération t , $p_t^0(i, s)$, a une valeur différente de non ($p_t^0(i, s) = \alpha$ si (e_i, m_s) est de genre cercle).

B) Il existe au moins q indices m_u parmi les r indices qui sont en relation avec m_s tels que pour chacun de ces indices l'une des conditions B1 ou B2 soit vérifiée (nous avons utilisé $q = r/3$).

B1) Il existe un élément e_j déjà détecté tel qu'on ait à la fois :

- $p_t^0(j, u)$ est différent de non ;
- la compatibilité $C(i, s : j, u)$ vaut 1.

De plus, si l'indice m_u est de genre cercle, on détermine l'orientation α_{ju} du modèle dans l'image correspondant au couple de paires ((e_i, m_s), (e_j, m_u)). Cela s'effectue par calcul si (e_i, m_s) est de genre segment de droite ou par propagation de α_{is} (en l'occurrence $\alpha = p_t^0(i, s)$) à α_{ju} . On ajoute alors cette valeur à l'ensemble d'orientations possibles $p_n^t(j, u)$, si elle n'y existe pas déjà.

B2. On peut détecter un nouvel élément e_j dans l'image (phase descendante) tel que la compatibilité $C(i, s, j, u)$ vaille 1. Alors la possibilité $p_0'(j, u)$ prend la valeur oui si (e_j, m_u) est de genre segment ou la valeur α_{ju} (genre cercle). On détermine α_{ju} de la même façon que ci-dessus. Puis on procède à l'initialisation des possibilités d'affectation de ce nouvel élément e_j aux indices m_v autres que m_u :

— $p_0'(j, v) = \text{oui}$ si e_j et m_v de genre identique ;

— $p_0'(j, v) = \text{non}$ sinon.

Si les deux conditions A et B ne sont pas vérifiées il faut supprimer l'orientation α de l'ensemble de valeurs d'orientation $p_n^{t+1}(i, s)$.

Dans le cas d'une paire élément-indice (e_i, m_s) de genre cercle et telle que $p_0'(i, s) = \text{oui}$ (aucune orientation déterminée car d'une part la paire n'est intervenue dans aucune compatibilité et d'autre part aucune valeur d'orientation n'a été affectée à l'initialisation à $p_0^0(i, s)$ à cause de la dissimilarité des distances), on ne modifie pas la possibilité à l'itération suivante : $p_0^{t+1}(i, s) = \text{oui}$. Cela permet à l'élément e_i de faire partie de ceux qui sont recherchés à une itération ultérieure t' . La possibilité $p_0^t(i, s)$ peut alors éventuellement prendre une valeur d'orientation si l'indice e_i est retenu.

L'inconvénient de cette stabilité des possibilités d'une itération à l'autre pour les cercles sans « orientation » est qu'elles peuvent subsister dans le tableau de possibilités au moment de l'arrêt de la relaxation. Ces possibilités étant en partie ou en totalité non significatives, il faut éviter qu'elles entraînent des erreurs dans l'exploitation du tableau final de possibilités (détermination de la ou des positions du modèle dans l'image).

La caractéristique de ces possibilités $p_0(i, s)$ « stables » d'une itération à l'autre est que les paires (e_i, m_s) ne sont intervenues dans aucun calcul de compatibilité donnant une valeur 1. Elle sera donc utilisée dans la détermination des positions du modèle dans l'image, afin de tenir compte le moins possible des possibilités stables.

3.3. ARRÊT

Le critère d'arrêt que nous avons employé est la stabilité du tableau de possibilités d'une itération à l'autre. Les deux conditions suivantes doivent être remplies :

— la taille de l'environnement ne doit pas varier entre deux itérations t et $t + 1$;

— pour tout e_i, m_s et n on doit avoir l'égalité $p_n^{t+1}(i, s) = p_n^t(i, s)$.

4. Résultats

La suite logique de l'algorithme de relaxation est la détermination de la position du modèle dans l'image : cela permettra une interprétation des résultats.

Pour cela, nous avons pondéré les différentes possibilités d'affectation d'un élément e_i à un indice m_s en fonction de leur importance relative. Parallèlement au tableau de possibilités, nous avons donc créé un tableau de scores où chaque élément représente le nombre de fois qu'une paire élément-indice intervient dans une compatibilité valant 1. Lorsqu'à un moment de l'algorithme, $C(i, s, j, u)$ vaut 1, on incrémente les scores de (e_i, m_s) et ceux de (e_j, m_u) . Ce tableau peut aussi être utilisé pour introduire des pondérations si, par exemple, le score d'une paire (e_i, m_s) est inférieur à l'itération t au score maximum de l'indice m_s à l'itération $(t - 1)$ ou si un détecteur bas niveau d'indices est jugé moins performant qu'un autre : le coefficient de pondération peut « forcer » une valeur de possibilité et accélérer ainsi la relaxation, ceci avec le

risque de forcer une solution au détriment du rôle qu'on voulait faire jouer au départ à la relaxation.

La méthode de détermination de la position est la suivante :

— Pour chaque possibilité d'affecter e_i à m_s , différente de non, on détermine l'orientation α_{is} du modèle ainsi que la position (x_{is}, y_{is}) de son origine dans l'image.

— On effectue des regroupements des positions du modèle par un algorithme d'agrégation usuel analysant conjointement les positions des origines (x, y) et des orientations α : les positions finales retenues sont les barycentres des regroupements obtenus, affectées d'un poids correspondant au cardinal du regroupement. Chaque position est caractérisée par un pourcentage, rapport du cardinal du regroupement au nombre total d'origines du modèle identifiées.

L'algorithme a été programmé sur un ordinateur VAX 750, avec un système d'acquisition et de visualisation d'image Grinnell. Ce système possède un certain nombre de fonctions câblées, ce qui permet d'accélérer la phase de prétraitement et d'extraction des éléments. L'ensemble a été programmé en langage C.

La méthode a été testée sur des images d'objets dont un modèle avait été préalablement saisi. Les photos I, II, III représentent des images sur lesquelles sont affichées en surimpression la position du modèle déterminée par la méthode : les positions affichées correspondent à celles qui possèdent le pourcentage de poids total le plus élevé de toutes les positions déterminées après l'arrêt de la relaxation.

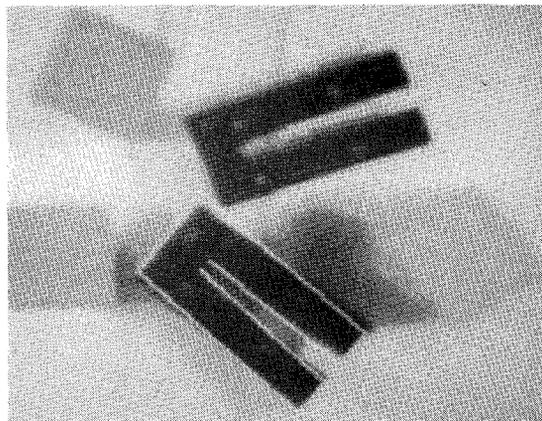


Photo n° I.

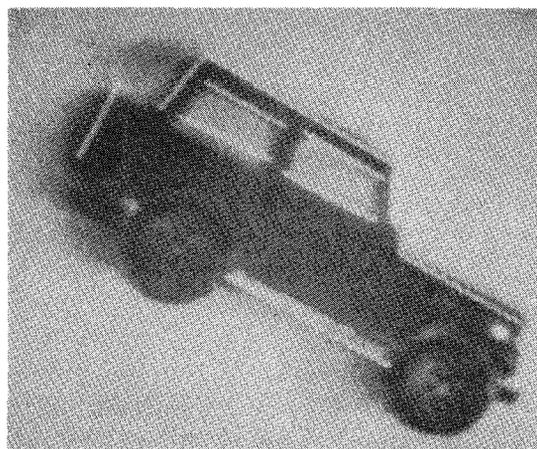


Photo n° II.

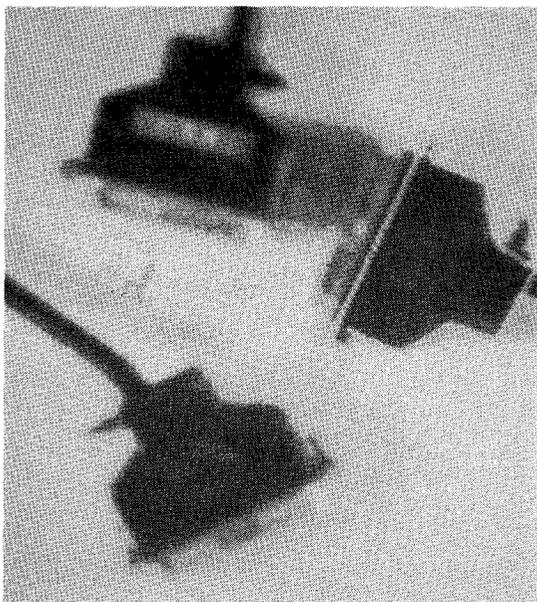


Photo n° III.

Photo n° 1 : première position détectée 47 %, position immédiatement inférieure 11 %.

Photo n° 2 : première position détectée 44 %, position immédiatement inférieure 7 %.

Photo n° 3 : première position détectée 44 %, position immédiatement inférieure 7 %.

Les images ont été saisies sans précaution particulière d'éclairage. Dans le cas de la photo n° 1, seuls des segments de droite sont utilisés dans le modèle et dans la scène. La procédure débute avec la détection des grands segments horizontaux les plus extérieurs ; les segments suivants recherchés sont les segments perpendiculaires aux précédents. Dans le cas de la photo n° 2, le modèle utilise à la fois des primitives du type segment de droite et des primitives du genre cercle. La procédure débute avec la seule détection des segments de droite indiqués sur la figure (dix au total). Les primitives recherchées ensuite sont des cercles. Dans ces deux cas de figure, il y a convergence sans qu'il ait été besoin de détecter toutes les primitives définissant le modèle. La convergence est, bien évidemment, liée à la complexité de l'objet à détecter et de la précision du modèle proposé. Le nombre d'itérations est faible pour la première photo, le temps peut se révéler beaucoup plus long pour la deuxième. Ces résultats satisfaisants pourraient être améliorés en augmentant la performance des extracteurs bas niveau. L'examen de la dernière photo est intéressante puisque la méthode s'est révélée permettre, dans ce cas, plusieurs positions dans la même image : en effet, les différents connecteurs représentés ont été successivement détectés.

5. Conclusion

Nous avons proposé l'utilisation d'une procédure descendante dans une méthode de relaxation discrète : cette procédure évite une détection exhaustive des indices des objets à reconnaître au départ de l'algorithme. A titre d'exemple, car la procédure est nécessairement liée aux éléments descriptifs que l'on a choisi au départ, elle a été présentée pour la reconnaissance de positions d'objets décrits par des segments et des cercles, sans que les processeurs bas niveau aient des performances remarquables. Les résultats obtenus sont très prometteurs, la méthode permet dans certains cas, par exemple, de déterminer les positions de plusieurs objets identiques, ce qui ne correspond pas au but initial qui était moins ambitieux. La méthode peut certainement être améliorée par, entre autres, le recours à une approche multi-modèles et la systématisation d'une base de données d'indices.

Manuscrit reçu le 19 décembre 1989.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. DERICHE, « Optimal edge detection using recursive filtering ». *Proc. Int. Conf. on Computer Vision*, p. 501-505, Londres 1987.
- [2] O. FAUGERAS, K. PRICE, « Semantic description of aerial images using stochastic labelling ». *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Vol. 3, N° 6, p. 633-642, November 1981.
- [3] O. FAUGERAS, M. BERTHOD, « Improving consistency and reducing ambiguity in stochastic labelling : an optimization approach ». *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* PAMI-3, p. 412-424, 1981.
- [4] G. MEDIONI, R. NEVATIA, « Matching images using linear features ». *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Vol. 6, N° 6, p. 675-685, November 1984.
- [5] K. E. PRICE, « Hierarchical matching using relaxation ». *CVGIP*, Vol. 34, p. 66-75, 1986.
- [6] K. E. PRICE, « Relaxation matching techniques-A comparison ». *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* PAMI-7, p. 617-623, 1986.
- [7] A. ROSENFELD, R. A. HUMMEL, S. W. ZUCKER, « Scene labelling by relaxation operations ». *IEEE Trans. System Man and Cybernetics*. Vol. 6, N° 6, p. 420-433, June 1976.
- [8] A. ROSENFELD, A. C. KAK, « Digital picture processing ». Vol. 1 & 2, Academic Press, 1982.
- [9] E. SALMERON, « Mise en coïncidence automatique des contours extraits d'images aériennes et d'éléments cartographiques ». Thèse de doctorat, UTC, mars 1986.
- [10] C. Y. WANG, H. SUN, S. YADA, A. ROSENFELD, « Some experiments in relaxation image matching using corner features ». *Pattern Recognition*. Vol. 16, N° 2, p. 167-182, 1983.
- [11] S. W. ZUCKER, R. A. HUMMEL, A. ROSENFELD, « An application of relaxation labelling to line and curve enhancement ». *IEEE Trans. on Comp.* Vol. 26, N° 4, p. 294-403, April 1977.