

Détection et suivi d'interfaces d'objets déformables : application à la mécanique des fluides

Christophe Ducottet et Jacques Fayolle

Laboratoire Traitement du Signal et Instrumentation
UMR CNRS N° 5516, Université Jean Monnet
23, rue du docteur Paul Michelon
42023 Saint-Etienne Cedex

RÉSUMÉ

Le problème traité dans cet article concerne la mesure de déformations locales d'interfaces d'objets déformables en vue d'étudier leur dynamique. Les objets considérés peuvent être des solides déformables ou des fluides, qui ne disposent pas obligatoirement de frontières nettement définies sur toute leur périphérie, et dont les images sont éventuellement bruitées. La méthode proposée repose sur une transformation en ondelettes qui nous permet de sélectionner les frontières qui sont des interfaces et d'estimer leur amplitude et leur longueur de transition. Des points caractéristiques sont ensuite détectés le long de ces interfaces, et la mesure de déformation se fait en suivant ces points entre les images successives. Nous présentons une application à l'étude de la pénétration d'un jet diesel dans une chambre de combustion.

1 Introduction

Lorsque l'on veut étudier la dynamique d'un objet déformable par traitement d'images, on est amené à considérer l'interface de cet objet et à en repérer les déformations. C'est le cas rencontré par exemple en médecine lorsque l'on veut étudier une structure anatomique particulière. La démarche généralement adoptée dans ces cas consiste à établir un modèle paramétrique de l'interface étudiée et d'ajuster les données au modèle considéré [1][2]. Dans cet article, nous présentons un algorithme de détection et de suivi d'interfaces n'utilisant pas de modélisations paramétrique mais fondé sur la segmentation directe des interfaces et sur le repérage de points caractéristiques le long de celles-ci. Cet algorithme s'applique à l'étude d'une grande variété d'objets déformables y compris lorsque la frontière de ceux-ci est floue ou bruitée. Il permet de détecter et sélectionner les frontières correspondant à des transitions ainsi que d'étudier leurs déformations. La seule hypothèse requise est celle de faible déformation des frontières au cours du suivi. L'absence de modélisation paramétrique permet d'étudier aussi des objets fluides comme des nuages de particules. A titre d'exemple nous présentons une application à l'étude de la pénétration d'un jet diesel dans une chambre de combustion.

La méthode que nous proposons pour étudier le mouvement des interfaces déformables est basée sur une décomposition multi-échelle des frontières calculée à partir d'une transformation en ondelettes. Cette analyse nous

ABSTRACT

The subject of this article concerns the measurement of local deformations of deformable object interfaces in order to study their dynamic. The considered objects can be deformable solids or fluids, whose edges are not necessarily clearly defined over all their periphery, and whose images can be noisy. The proposed method is based on a wavelet transform which allows us to select edges which are interfaces and to estimate their amplitude and transition length. Feature points are then detected along these interfaces, and the deformation measurement is made following these points between two successive images. We present an application to the study of the penetration of a diesel jet inside a combustion chamber.

permet de détecter les interfaces des objets et de définir des points caractéristiques le long de ces interfaces. Ces points caractéristiques sont ensuite associés entre les images successives pour suivre les déformations des interfaces. Ainsi, on peut distinguer trois étapes principales qui sont :

- détection des interfaces sur les images,
- détection des points caractéristiques le long des interfaces,
- suivi des points détectés sur une séquence d'images.

Nous présentons au paragraphe 2, de manière assez détaillée, la première étape de notre méthode. Cette étape permet de détecter et de caractériser de manière assez précise les frontières des objets à partir de trois paramètres différents : le type de frontière qui spécifie s'il s'agit d'une interface entre deux niveaux ou un pic, le degré de lissage de la frontière, et le contraste de la frontière. Ces trois paramètres sont obtenus en identifiant le type de singularité sous-jacente à la frontière.

Le paragraphe 3 résume les deux étapes de détection et de suivi. Elles ont été présentées de manière plus détaillées dans les références [3] et [4].

Le paragraphe 4 est dédié à une application de notre algorithme au domaine de la mécanique des fluides : l'étude de la vitesse de pénétration d'un jet de gasoil dans un moteur diesel.

2. Détection d'interfaces d'objets flous

Nous considérons ici des objets dont la frontière n'est pas nécessairement nettement définie sur toute leur périphérie.

De tels objets interviennent par exemple sur des images d'échographies ou sur des images de nuages de particule dans un écoulement. De part leur nature, ces objets se prêtent mal à une définition à partir d'une région. Ainsi, nous préférons les caractériser directement à partir de leurs interfaces. Une interface est définie sur une image comme étant une ligne de transition entre deux zones de niveau de gris constant. Suivant l'origine des images, cette ligne peut avoir des interprétations physiques différentes. Sur des nuages de particules, elle représente la frontière entre deux zones dont la densité en particule est homogène.

Nous présentons dans cette partie, une méthode de détection des interfaces utilisant une analyse multi-échelle des frontières par transformation en ondelettes continues. Cette méthode de détection peut être décomposée en deux parties de rôle différent. La première partie est une étape de caractérisation des interfaces qui a pour objectif le choix d'une échelle de détection, et qui s'appuie sur une analyse multi-échelle des frontières. La deuxième partie qui est la détection proprement dite utilise les résultats de la caractérisation. Cette méthode est présentée pour les images bi-dimensionnelles mais elle est aussi applicable aux signaux mono-dimensionnels.

2.1. Analyse multi-échelle des frontières par ondelettes

Nous définissons la notion de frontière comme une extension du terme interface. Une frontière est définie, à partir du critère de Canny [5], comme l'ensemble des points qui sont des maximums locaux du gradient de la fonction de gris. Plus précisément, un point appartenant à une frontière sur une image est un point dont le module du vecteur gradient en ce point passe par un maximum local dans la direction définie par le vecteur gradient.

Les frontières multi-échelles sont définies comme des frontières obtenues sur des versions lissées de l'image initiale, la taille du filtre de lissage fixant l'échelle d'observation. On peut montrer [6] que les deux opérations lissage suivi du calcul de gradient peuvent être effectuées à partir d'une transformation en ondelettes [9], si l'ondelette utilisée est la dérivée de la fonction de lissage. Considérons une fonction de lissage $\varphi(x, y)$ dont l'intégrale est égale à 1. Nous prendrons une Gaussienne. Soit l'ondelette complexe définie par :

$$\psi(x, y) = \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} + i \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \quad (2.3)$$

L'ondelette dilatée à l'échelle s est donnée par :

$$\psi_s(x, y) = \frac{1}{s^2} \psi\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (2.4)$$

L'image complexe gradient à l'échelle s notée $Gf_s(x, y)$ s'exprime en fonction de la transformée en ondelette calculée avec l'ondelette précédente :

$$Gf_s(x, y) = Wf(s, x, y) = f * \psi_s(x, y) \quad (2.5)$$

où Wf désigne la transformée en ondelette et $*$ le produit de convolution.

Ainsi, la décomposition multi-échelle d'une image est obtenue en calculant sa transformée en ondelette pour un ensemble d'échelles, puis en détectant les points maximum local du module de cette transformée dans la direction donnée par sa phase. Notons que la transformée en ondelette considérée ici n'est pas sous échantillonnée et est définie pour toute valeur positive du paramètre d'échelle. L'ondelette utilisée est obtenue à partir des deux dérivées partielles suivant x et y d'une Gaussienne. En pratique, cette transformation est calculée pour un ensemble discret d'échelles et est échantillonnée spatialement avec le même échantillonnage que l'image initiale. L'algorithme de calcul consiste à évaluer le produit de convolution de la formule (2.5) à partir d'une transformée de Fourier rapide (FFT). La figure 1 présente les frontières multi-échelle détectées sur trois échelles sur un nuage de particules.

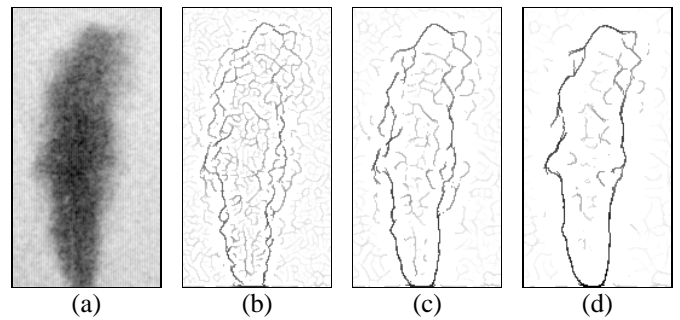


Figure 1 : Frontières multiéchelles détectées sur un nuage de particules à la sortie d'un injecteur (122x231 pixels) (a) pour les échelles 2 pixels (b), 3 pixels (c), et 4 pixels (d).

2.2. Caractérisation des interfaces

L'analyse multi-échelle permet d'obtenir les frontières d'un objet à différentes échelles d'observation. Or, parmi ces frontières, certaines ne correspondent pas à des interfaces d'objets. C'est à dire qu'elles ne correspondent pas à des transitions entre deux niveaux stables de la fonction de gris. C'est le cas par exemple des frontières liées à des pics dus à du bruit, ou à des lignes isolées.

Or, suivant l'échelle d'observation, l'amplitude des frontières liées aux transitions n'évolue pas de la même façon que les autres. Typiquement, les frontières liées au bruit disparaissent lorsque l'échelle d'observation augmente. En fait, il est possible de caractériser précisément le type d'une frontière en fonction de la variation de son amplitude lorsque l'échelle varie.

Considérons trois types de distributions produisant des frontières de type transition, ligne ou pic sur des images. La distribution correspondant au type transition est définie par :

$$D_1(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \text{ et } y \text{ quelconque} \\ 1 & \text{si } x > 0 \text{ et } y \text{ quelconque} \end{cases}$$

La distribution correspondant au type ligne est définie par :

$$D_2(x, y) = \delta(x) \forall y$$

où $\delta(x)$ représente la distribution de Dirac en une dimension. La distribution correspondant au type pic est définie par :

$$D_3(x, y) = \delta(x, y)$$

où $\delta(x, y)$ représente la distribution de Dirac en deux dimensions.

Sur les images, ces distributions apparaissent rarement à l'état pur mais ont une certaine amplitude A et une certaine taille que l'on peut modéliser par un filtrage Gaussien d'écart type σ . Ainsi, les fonctions représentant les trois types de frontières sont définies par :

$$F_i(x, y) = A \cdot D_i * G_\sigma(x, y) \quad i=1, 2 \text{ ou } 3$$

où G_σ représente la Gaussienne normalisée d'écart type σ .

On peut montrer que l'évolution de l'amplitude d'une frontière de l'un des trois types précédent en fonction de l'échelle est donnée respectivement par chacune des fonctions suivantes :

$$M_1(s) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}} \frac{s}{\sqrt{s^2 + \sigma^2}}$$

$$M_2(s) = \frac{A}{\sqrt{2\pi e}} \frac{s}{s^2 + \sigma^2}$$

$$M_3(s) = \frac{A}{2\pi\sqrt{e}} \frac{s}{(s^2 + \sigma^2)^{3/2}}$$

Les interfaces d'objets sont des frontières de type transition et sont caractérisées par une amplitude qui représente la hauteur de la transition et une valeur σ qui est proportionnelle à la longueur de la transition. Pour déterminer si un point d'une frontière appartient à une interface, il suffit de comparer l'évolution de son amplitude à travers les échelles avec la fonction $M_1(s)$. On peut alors estimer son amplitude et sa taille. La méthode proposée pour cette comparaison est un ajustement aux moindres carrés de la courbe expérimentale avec la fonction $M_1(s)$. L'ajustement se ramène à un ajustement linéaire en étudiant la fonction :

$$\left(\frac{s}{M_1(s)} \right)^2 = \frac{2\pi}{A^2} (s^2 + \sigma^2)$$

en fonction de la variable s^2 . Pour déterminer si la fonction correspond à une transition, on évalue le coefficient de corrélation qui doit être proche de 1.

En résumé, la caractérisation des interfaces se fait en trois étapes :

- détermination des frontières par transformation en ondelettes pour une certaine gamme d'échelles,
- détermination des courbes d'évolution de l'amplitude des frontières en fonction de l'échelle,
- ajustement des courbes à la forme théorique par moindres carrés.

On peut ensuite éliminer les frontières ne correspondant pas à des transitions et évaluer l'amplitude et la taille des frontières qui sont des transitions. La figure 2 présente un exemple de résultat de caractérisation d'interfaces.

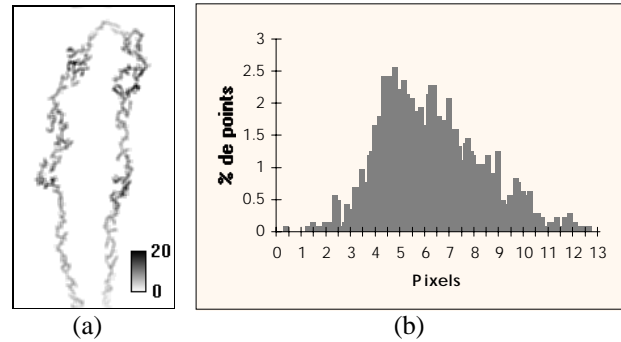


Figure 2 : Caractérisation des interfaces sur le nuage de la figure 1.a calculée pour des échelles de 1 à 10 pixels. Carte des tailles d'interfaces (a) et histogramme des tailles (b).

2.3 Détection des interfaces

La caractérisation de l'interface nous permet d'estimer la taille des transitions de celles-ci. On peut ensuite en déduire la meilleure échelle d'observation s_0 qui est égale à la plus petite taille que l'on veut détecter. Il suffit alors de se reporter à l'analyse multi-échelle et de retenir les frontières de l'échelle s_0 qui sont des transitions. On obtient alors une image ne contenant que les interfaces d'échelle supérieur à s_0 avec en chaque point la valeur des deux composantes du gradient à cette échelle.

En pratique, pour éviter d'avoir à faire la caractérisation des interfaces pour toutes les images de la séquence considérée, on estimera l'échelle s_0 à partir d'une analyse sur un échantillon représentatif d'images, puis on détectera ensuite les interfaces en calculant les frontières uniquement à l'échelle s_0 pour chaque image de la séquence.

3. Détection et suivi de points caractéristiques sur des frontières

En chaque point d'une interface détectée, nous connaissons les deux composantes du vecteur gradient. Or, le vecteur gradient calculé sur un point de l'image représente la normale à la surface associée à la fonction de gris. Pour chaque point d'une interface nous avons donc la normale à cette interface.

Nous définissons les points caractéristiques de l'interface comme des points où la courbure locale passe par un maximum [7]. Ces points sont aussi obtenus comme des points d'inflexion de la direction de la normale à l'interface. Ainsi, la méthode retenue pour détecter ces points consiste d'abord à extraire la phase du gradient le long de chaque interface. On obtient ainsi une fonction de l'abscisse curviligne le long de l'interface appelée fonction de phase. Ensuite, il suffit de détecter les transitions de cette fonction.

Chaque transition peut être caractérisée à partir de la méthode décrite au paragraphe précédent sur les images. Ainsi, nous faisons une analyse multi-échelle de la fonction de phase puis nous mesurons les paramètres d'amplitude et de taille des transitions. Les points caractéristiques retenus sont ceux dont le rapport de l'amplitude sur la taille de la transition est supérieur à un seuil. Ce rapport s'identifie à la courbure locale du point [4]. Un des avantages de cette

méthode d'estimation de la courbure par rapport à des méthodes plus classiques [8] est sa bonne robustesse vis à vis du bruit et le fait qu'elle ne demande pas de binariser l'objet.

Le suivi de l'interface est effectué en résolvant le problème de mise en correspondance entre les points caractéristiques calculés sur deux images successives d'une séquence. Ce problème est résolu à partir d'un critère de distance minimale entre vecteurs gradients associé à des critères de validation des correspondances [3]. Une des particularités de cette technique d'association est de ne pas faire d'hypothèses restrictives sur la nature du mouvement. La seule hypothèse est celle de faible déformation de l'interface durant le mouvement. Un exemple de résultat de mesure de déformation d'interfaces est donné sur la figure 3. Les vecteurs représentés associent les points caractéristiques détectés sur deux images successives de la séquence.

4. Application à l'étude d'un jet de gasoil

Cette étude est une application de l'algorithme précédent à la mesure de la vitesse de pénétration d'un jet de gasoil dans la chambre de combustion d'un moteur diesel. Elle a été menée en collaboration avec le laboratoire de machines thermiques de l'école centrale de Lyon. Pour cela, une maquette du moteur munie de deux hublots a été construite. Le jet est éclairé par ombroscopie et les images sont obtenues à partir d'une caméra à film de 33000 images par secondes synchronisée avec l'injecteur. Les films sont ensuite numérisés sur un banc spécialisé. La technique de suivi de l'interface du jet a été appliquée sur une séquence de 20 images. Deux paramètres essentiels à la compréhension de l'injection ont pu être déterminés : l'évolution de la vitesse de pénétration du jet et l'angle solide à la sortie de l'injecteur. Ces résultats ont pu être comparés à des mesures directes sur photographies et pour la vitesse de pénétration à un modèle empirique [3]. Les comparaisons ont montré que la mesure de vitesse est fiable dans ces conditions d'acquisition difficiles. Un exemple de dépouillement est présenté sur la figure 3.

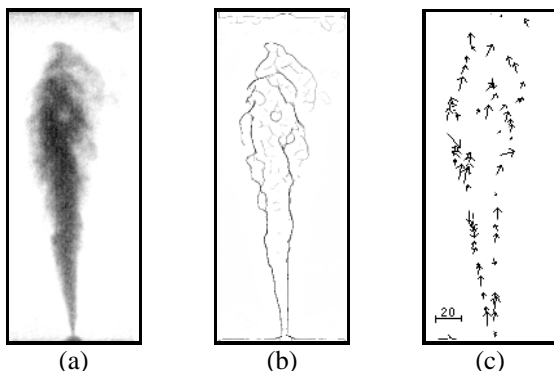


Figure 3 : Image d'un jet de gasoil dans un moteur obtenue à une fréquence de 33000 images par secondes (a), interfaces détectées (b), vecteurs déplacements obtenus (c).

5. Conclusion

La méthode de suivi d'interfaces d'objets déformables présentée dans cet article, s'applique au cas des objets flous ou bruités dont on veut étudier les déformations locales.

Cette méthode utilise les propriétés de la transformation en ondelettes continues pour détecter et caractériser les interfaces des objets, ainsi que pour définir des points caractéristiques le long de ces interfaces.

La première étape de détection et de caractérisation des frontières est assez générale et permet une segmentation efficace d'objets dont les frontières ne sont pas clairement définies ou sont altérées par la présence de bruit. De plus, il est possible de sélectionner les transitions parmi les frontières détectées et de mesurer leur degré de netteté et leur contraste.

L'étude du jet diesel que nous présentons prouve que cette méthode permet de faire des mesures de déformation sur des images où les conditions d'acquisition sont difficiles. La détection des interfaces est fiable sur de longues séquences d'images alors que les limites du jet ne sont pas nettement définies. Cette méthode est donc particulièrement bien adaptée à l'étude de l'évolution de nuages de particules dans un écoulement fluide mais peut être utilisée dans d'autres contextes puisque la seule hypothèse requise est la faible déformation des interfaces.

6. Références

- [1] Cohen L. D., "On active contour models and balloons", Computer Vision, Graphics and Image Processing: Image Understanding, Vol 53 (2), pp 211-218, March 1991.
- [2] Terzopoulos D., Witkin A., Kass M., "Constraints on deformable models recovering 3D shape and nonrigid motion", AI Journal, Vol 36 pp 91-123, 1988
- [3] Fayolle J. "Etude d'algorithme de traitement d'image pour l'analyse du mouvement d'objets déformables : application à la mesure de vitesse d'écoulements", thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 1996.
- [4] Fayolle J., Ducottet C., Fournel T., Schon J.P. "Motion characterization of unrigid objects by detecting and tracking feature points", , IEEE International conference on image processing (ICIP'96), pp 803-806, 1996.
- [5] Canny J. "A computational approach to edge detection", IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 8, n°6, 1986.
- [6] Mallat S., Hwang W.L. "Singularity detection and processing with wavelets", IEEE Transactions on information theory, Vol. 38, n°2, pp 617-643, 1992.
- [7] Attneave F. "Some informational aspects of visual perception", Psychology revue, Vol. 61, n°3, pp 183-193, 1954.
- [8] Wu W. Y., Wang M. J., "Detecting the dominant points by the curvature-based polygonal approximation", Computer Vision Graphical model and Image Processing, Vol 55, n°2, pp79-88, 1993
- [9] Grossmann A., Morlet J., "Decomposition of Hardy function into square integrable wavelets of constant shape", SIAM J. Math., Vol 15, pp 723-736, 1984.