

Mesure de netteté par Transformée en ondelettes.

Définition et comparaison pour l'autofocus de caméra.

Michel Desvignes(2), Jalal M. Fadili (1), Frederic Bataille(1),

(1)GREYC UMR 6072 9 bd maréchal juin 14050 CAEN

(2)LIS UMR5083 961 rue de la houille blanche 38000 Grenoble

Michel.Desvignes@lis.inpg.fr, Jalal.Fadili@greyc.ismra.fr

Résumé – Dans cet article, nous présentons une nouvelle mesure de netteté d'image destinée à l'autofocus de caméra numérique que nous comparons à des mesures classiques telles que celles fondées sur les caractéristiques différentielles ou de quantité d'information de l'image. Cette mesure utilise la quantification de la régularité locale d'un signal, en étudiant l'évolution des coefficients des maxima de la transformée en ondelettes du signal. Les expérimentations montrent une bonne robustesse au bruit de cette méthode et une bonne réponse lorsque le contenu informatif de l'image est faible (basse lumière, faibles contrastes).

Abstract – In this paper, we present a new focus measurement for digital camera autofocus. It is compared to classical measures such as differential indices or entropy measurement. This new measure is based upon the local regularity of a signal. This regularity is quantified using the evolution of the maximum of the wavelet transform. Experimentations on synthetic and real images show that this method is robust to noise and has a good sensitivity in low illuminations

1. Position du problème

La mise au point automatique ou autofocus est un problème largement abordé dans la littérature des domaines de la microscopie, de la vision par ordinateur ou de la photographie. Cette mise au point est réalisée en modifiant la distance entre l'ensemble ou une partie des lentilles de l'objectif et le capteur d'image. Nous nous intéressons au cas d'un autofocus de type passif sans calibration préalable du capteur, ni de dispositifs annexes. Il s'agit de rechercher dans l'espace des paramètres du capteur (en général la distance lentille – capteur et la distance focale) l'optimum d'une mesure réalisée sur l'image. Il est donc nécessaire de disposer de mesures réalisées sur l'image qui montrent un extremum marqué, si possible unique, dans cet espace de paramètres.

S'il a été montré expérimentalement que de nombreuses mesures offraient un maximum au point de focalisation, sous réserves d'hypothèses faibles sur la fonction de transfert optique, l'influence du bruit du capteur n'a pas été précisé dans le modèle optique et la pratique révèle que les hypothèses ne sont pas respectées intégralement dans des conditions d'acquisition difficile. Nous étudions ici cette influence d'un point de vue expérimental et proposons une mesure robuste aux conditions difficiles de prises de vue (faible contenu informatif, fort bruit, basse lumière).

Dans une première partie, nous présenterons le modèle géométrique associé au système de prise de vue et les principales sources de bruit susceptibles d'influer sur les mesures de focus. Nous définissons ensuite les méthodes basées sur les caractéristiques différentielles et celle que nous

proposons. Les simulations et les expérimentations pratiques termineront notre présentation.

2. Modélisation du système

Le but essentiel de cette modélisation est de construire des simulations réalistes afin de tester et comparer les mesures de netteté. Classiquement, elle se compose d'un modèle physique (optique géométrique) et d'une analyse des bruits contaminant le signal utile.

Le modèle géométrique est assimilé à une lentille simple. Nous supposons que le système d'acquisition est à symétrie circulaire et sans pertes d'énergie interne. Dans ces conditions, l'image floue d'un point source est une tâche circulaire d'intensité constante. La fonction d'étalement ou PSF $h(x,y)$ et la fonction de transfert optique $H_1(w,m)$ pour une position fixe de la mise au point sont données par :

$$h(x,y) = \frac{1}{\pi R^2} \quad \text{et} \quad H_1(w,m) = 2 \frac{J_1(R\sqrt{w^2+m^2})}{R\sqrt{w^2+m^2}}$$

où J_1 est la fonction de Bessel de première espèce

Dans la pratique, la symétrie circulaire est bien respectée, mais avec pertes internes. La PSF est alors assimilée à une gaussienne. Un objet de forme quelconque, représenté par une fonction d'intensité $f(x,y)$ sera alors imagé par une convolution avec cette PSF, donnant l'image floue.

Du point de vue du bruit, le capteur utilisé est un capteur CMOS, dont la technologie produit des images sensiblement plus bruitées que les capteurs CCD. Les deux types de bruit susceptibles de contaminer le signal sont les bruits internes produits par la chaîne de détection (capteur CMOS, étages d'amplification, numériseur...) et les bruits externes (bruit de signal, bruits électromagnétiques...).

Le bruit du signal d'obscurité est un bruit interne blanc produit par la génération thermique de porteurs qui vont s'accumuler dans les puits de potentiel. Ce bruit a peu d'influence.

Le bruit en $1/f$ a des origines internes souvent diverses, liées à la physique complexe des composants de la caméra. En pratique cependant, il n'est pas perceptible.

Le bruit de lecture se compose des bruits de la chaîne de lecture du pixel CMOS (bruits d'amplification, reset conversion). Il constitue le bruit interne majoritaire avec un RSB de l'ordre de 700.

Enfin, le bruit externe considéré est le bruit de grenaille photonique (poissonien) qui réduit le RSB à environ 70 en basse lumière.

3. Mesures de netteté

3.1 Mesures classiques

Deux grandes classes de méthodes permettent de faire des mesures de netteté :

- l'étude de défocalisation estime le flou à partir du modèle de PSF gaussien : l'aspect estimatif et local rend ces méthodes peu robustes aux conditions difficiles.
- l'analyse de focalisation basée sur une caractérisation globale ou régionale de l'image. Parmi ces dernières, nous avons évalué les mesures suivantes :

3.1.1 Mesures différentielles

Lorsque le dispositif est défocalisé, la PSF distribue l'intensité de chaque pixel sur plusieurs pixels adjacents, moyennant ainsi leurs niveaux de gris. Les fonctions mesurant la différenciation présenteront donc un extremum pour l'image la mieux focalisée. La quantité observée sera l'énergie de l'image dérivée. Lorsque l'image est fortement défocalisée, les lobes secondaires de la fonction de transfert optique modifient le comportement attendu. Une solution consiste à lisser l'image avant de la différencier. Les mesures réalisées sont l'énergie du gradient, l'énergie du gradient lissé, l'énergie du laplacien, l'énergie du laplacien lissé.

3.1.2 Mesures du contraste global

De nombreuses mesures de contraste local existent. Pour atteindre une mesure globale sur l'image, nous utilisons la variance de l'image. Elle mesure les variations des niveaux de gris sur tous les pixels de l'image sous la forme de la déviation standard de l'intensité.

3.1.3 Mesures d'information

La défocalisation diminue l'étalement de la distribution des niveaux d'intensité de l'image. Une image non focalisée présente a priori moins de niveaux d'intensité que l'image focalisée et moins d'information. Une mesure classique est alors l'entropie de l'image.

3.1.4 Mesures de corrélation

L'intercorrélation compare deux signaux en décalant l'un des deux signaux et en mesurant leur similitude en fonction du décalage. Dans le cas d'une image floue, les niveaux de gris étant moyennés par le filtrage, l'autocorrélation restera assez élevée pour une valeur importante du décalage. Pour une image nette au contraire, le décalage va rapidement apporter une diminution de la similitude entre les deux signaux. Cela signifie que le gradient de la fonction d'autocorrélation décroît rapidement selon l'axe du décalage. La mesure utilisée sur une image 2D est l'énergie du gradient de la fonction d'autocorrélation de l'image sur le cercle unité.

3.2 Une mesure de netteté basée sur la régularité

Les mesures précédentes partent du principe que sur les contours d'objets présents dans l'image, la fonction intensité présente des dérivées fortes, voire infinies dans le cadre théorique, donc des singularités. Au contraire, les images défocalisées présentent des fonctions intensités continues, dérivables et à valeurs de dérivée faible. Une caractérisation de la dérivabilité ou régularité de la fonction intensité est donc une mesure potentiellement valide pour exprimer la netteté d'une image. Elle est abordée ici au travers des exposants de Lipschitz et de la transformée en ondelettes (TO).

3.2.1 Régularité et ondelettes

Les exposants de Lipschitz, aussi appelés exposants de Hölder, fournissent des mesures de régularité uniforme sur des intervalles, mais également en un point quelconque. Dans le cas où f est singulière, c'est-à-dire non dérivable, alors l'exposant de Lipschitz caractérise ce comportement singulier par une valeur faible alors qu'une fonction dérivable présentera une valeur forte de cet exposant.

La régularité de Lipschitz d'un signal est reliée au comportement asymptotique des coefficients de sa TO. La régularité de Lipschitz de la fonction $f(x,y)$ est estimée au moyen de l'évolution à travers les échelles 2^j du module de son gradient multi-échelle. En notant $Mf(2^j, x, y)$ le module de la TO à l'échelle 2^j , on peut démontrer que f est uniformément Lipschitz α sur un domaine borné de \mathbb{R}^2 si et seulement si il existe $A > 0$ tel que pour tout (x,y) dans ce domaine et à toute échelle 2^j ,

$$|Mf(2^j, x, y)| \leq A \times 2^{j(a+1)}$$

La régularité Lipschitzienne du contour est estimée à l'aide du théorème précédent en mesurant la pente des maxima de $\log_2 |Mf(2^j, x, y)|$ en fonction de j .

3.2.2 Mesure de netteté

La mesure de netteté est faite en estimant la valeur a de la régularité à partir des maxima. L'ondelette est une spline d'ordre 3 approximant la dérivée d'une Gaussienne et on utilise l'algorithme à trous pour le calcul de la TO discrète. Il s'étend aux signaux à deux dimensions en appliquant la transformation 1D sur toutes les lignes puis toutes les colonnes.

La mesure se décompose alors en :

- calcul de l'image basse-fréquence à partir de celle de l'échelle précédente
- calcul de l'image haute-fréquence horizontale à partir de l'image basse-fréquence de l'échelle précédente
- calcul de l'image haute fréquence verticale à partir de l'image basse-fréquence de l'échelle précédente
- calcul de l'image de module et de l'image d'angle à partir des images haute-fréquence
- mise à jour des filtres par insertion de zéros
- détection des maxima locaux en module dans l'axe du gradient, seuillage et chaînage entre échelles des maxima de module
- passage à l'échelle suivante.

On obtient ainsi une série d'images de maxima de module de la TO suivant les échelles d'observation. Pour chaque chaîne de maxima, on représente l'évolution en échelle log-log des coefficients d'ondelette en fonction de l'échelle et on en déduit une estimation du caractère Lipschitzien de ce point en mesurant la pente de cette courbe.

Une moyenne de ces pentes est ensuite calculée sur toute

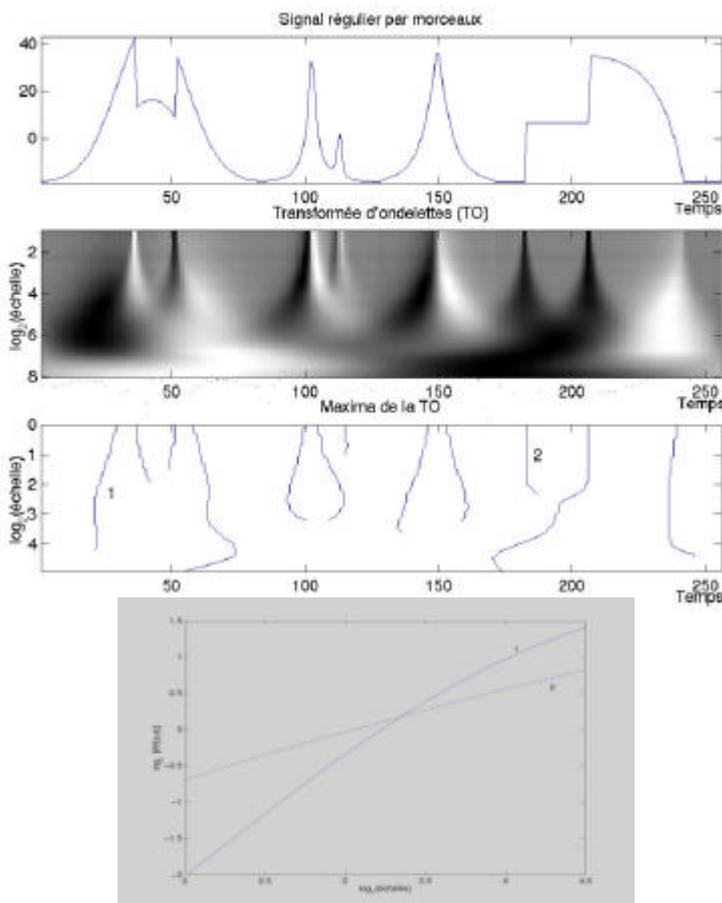


Figure 1 : Calcul de la mesure de netteté
En haut : maxima de la TO du signal
En bas : évolution selon les échelles de 1 et 2

l'image. C'est cette moyenne qui sera notre critère de focalisation de l'image. La figure 1 illustre les principales étapes de ce calcul. Le logarithme du coefficient d'ondelette de chaque point de l'image des maxima est étudié le long des échelles.

4. Résultats

4.1 Simulations

Les simulations sont fondées sur la synthèse d'images simples (rond / carré blanc sur fond noir) soumises aux modèles de défocalisation et de bruit de la caméra (§ 2). Une séquence d'images non bruitées sur lesquelles un flou graduel (filtre moyenneur) a été appliqué, a été produite. Dans un deuxième temps, cette séquence a été bruitée conformément aux caractéristiques du bruit.

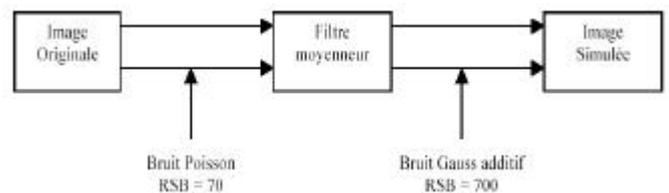


Figure 2 : génération des images simulées

4.2 Evolution qualitative des mesures sur simulations

En l'absence de bruit, tous les critères de netteté se

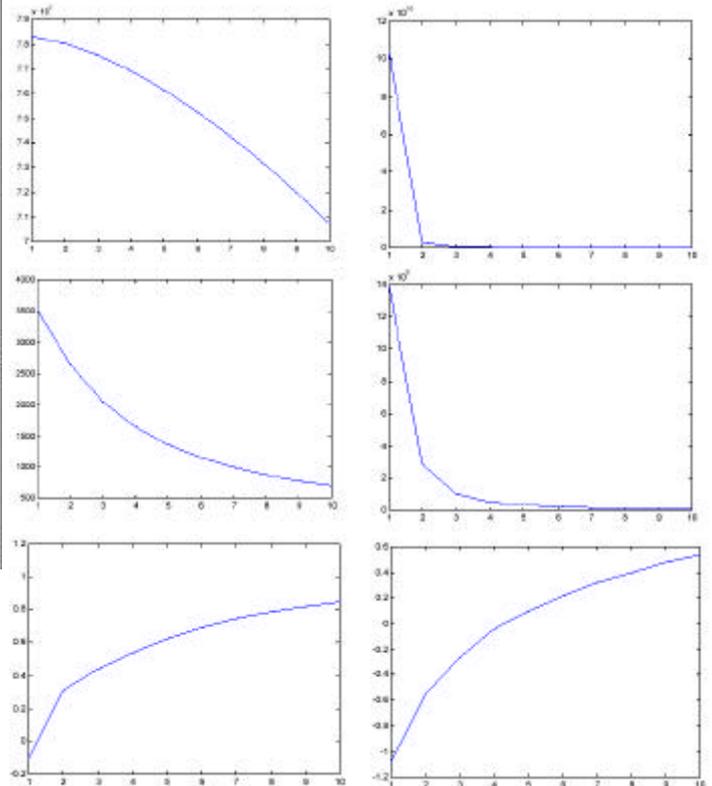


Figure 3 : évolution des critères de netteté (gradient, corrélation et ondelettes) en fonction de la défocalisation sans (droite) et avec (gauche) bruit.

comportent de façon satisfaisante puisqu'ils évoluent de façon monotone en fonction de la défocalisation. En présence de bruit, seul le critère basé sur les ondelettes est presque insensible à cette introduction.

4.3 Scènes réelles

Nous avons ensuite comparé les critères sur des images acquises à partir d'un dispositif expérimental. De nombreuses séquences ont été acquises en faisant varier la mise au point d'avant en arrière. Les tests ont été effectués sur la luminance d'images couleurs, en faisant varier les paramètres d'acquisition que sont l'éclairage global (haute ou basse lumières : de 50 à 1000 lux), le bruit et le type de scène (peu ou beaucoup d'information). La figure 4 illustre quelques unes de ces scènes.



Figure 4 : Exemples de scènes réelles utilisées :Mire plate, cannettes,, textures diverses, cannettes avec miroir.

La réalisation d'un autofocus passe par la recherche, sur la plage de mise au point du dispositif d'acquisition, d'un extremum de la mesure de netteté en fonction de la distance de mise au point. Ce pic doit être le précis (localisation, largeur) et unique (figure 5a) au contraire de la courbe (figure 5b).

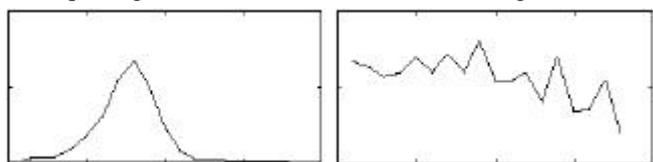


Figure 5 : Courbes mesure/distance

4.3.1 Mesures

Les mesures réalisées pour effectuer la comparaison des algorithmes de netteté en fonction de la défocalisation sont des paramètres de position du pic (hauteur, distance au pic théorique, pics secondaires), de dispersion (largeur du pic) et de forme (kurtosis) de la mesure de netteté. Ils ont été calculés sur 18 séquences. Afin de s'affranchir des variations de luminance entre images, ces séquences ont aussi été normalisée en utilisant la valeur moyenne de l'intensité.

Les algorithmes utilisant le gradient et la corrélation sont très précis au niveau de la position du pic de focalisation et présentent en général peu de maxima secondaires au contraire du laplacien ou de l'entropie. La mesure « ondelette » se situe dans la moyenne.

4.3.2 Influences diverses

L'influence de la luminance est testée en diminuant l'ouverture de la caméra ou par variation manuelle du niveau d'éclairage de la scène.

Pour la plupart des mesures, la courbe reste la même. La position du pic est inchangé. La hauteur du pic est divisée par 10 pour une variation de 400 lux à 50 lux. La largeur à mi hauteur varie relativement peu, par contre le kurtosis décroît, indiquant un aplatissement du pic qui devient plus difficile à détecter. Le nombre de maxima locaux n'augmente pas de manière significative. Toutes les mesures se dégradent ainsi en basse lumière, sauf pour la mesure « ondelette » dont le comportement reste identique et assez bon en basse lumière (variation de 10% de la hauteur, même position).

L'influence du bruit est plus difficile à caractériser Elle a été testée en augmentant le gain du dispositif d'acquisition en basse lumière de 0 à sa valeur maximale(0, max/2, max). Dans ces conditions expérimentales, nous n'avons pas retrouvé l'allure des courbes que les simulations nous laissaient espérer. Le modèle utilisé ne correspond aux conditions expérimentales de variations du gain faites.

Lorsque l'image ne présente pas assez d'information ou peu de contraste (figure 4c), l'énergie de l'image et la transformée en ondelettes se révèlent relativement efficaces.

5. Conclusion

En conclusion, la mesure basée sur la transformée en ondelettes est intéressante dans les cas de fort bruit, du moins d'un point de vue théorique et/ou de basse lumière. Dans un cadre plus classique, l'énergie du gradient, voire la corrélation sont de bons choix.

6. Bibliographie

- [1] A.Santos et all,« Evaluation of Autofocus Functions in Molecular Cytogenetic Analysis », Journal of Microscopy, Vol. 188, Pt 3, Decembre 1997, pp. 264-272
- [2] F. Rooms, M. Ronsse, A. Pizurica, W. Philips, « PSF Estimation with Applications in Autofocus and Image Restoration », Proceedings of the IEEE Benelux Signal Processing Symposium, March 21-22, 2002
- [3] X. Tang, P. L'Hostis, Y. Xiao, « An Auto-Focusing Method in Microscopic Testbed for Optical Discs », Journal of research of the national institute of standards and technology, vol.105, no. 4, july-august 2000
- [4] S. Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1998.
- [5] R. Yu, A.R. Allen, J. Watson, « Focus measure for speckle noisy images based on wavelet multiresolution analysis », Department of Engineering, University of Aberdeen