

Correction des variations colorimétriques pseudo-périodiques en vidéo haute vitesse

Ali KANJ¹, Hugues TALBOT¹, Jean-Christophe PESQUET¹, Raoul RODRIGUEZ LUPARELLO²

¹Université Paris-Est, Laboratoire d'Informatique Gaspard Monge
bd Blaise Pascal, Cité DESCARTES, BP 99, 93162 Noisy le Grand CEDEX, France

²Sublab Production
52 Avenue Pierre Semard, 94200 Ivry-sur-Seine, France
ali.kanj@esiee.fr, hugues.talbot@esiee.fr
jean-christophe.pesquet@univ-paris-est.fr, raoul@sublabprod.com

Résumé – Lors de l'acquisition des vidéos à haute vitesse (au delà de 100 images par seconde), l'utilisation d'un éclairage artificiel peut induire un niveau de luminosité non uniforme et une variation colorimétrique d'une image à l'autre, ce qui est couramment dénommé « flicker » en anglais. Il n'est pas toujours facile de supprimer le flicker périodique non uniforme, surtout en présence de mouvement global, parce que son estimation demande un suivi d'objet sur un fond, et la plupart des méthodes de suivi présupposent une luminosité uniforme. Dans cet article, nous proposons une gestion simultanée du suivi et des corrections colorimétriques, en utilisant un algorithme d'appariement par bloc couplé avec une estimation de la variation des couleurs. Nous introduisons ainsi une méthode de stabilisation des variations lumineuses dans les séquences d'images. Une étape de post-traitement est proposée pour éliminer les effets de blocs. L'efficacité de notre méthode est démontrée sur des données réelles et artificielles.

Abstract – When acquiring high-speed video (more than 100 frames per second), artificial lighting can cause severe non-uniform luminosity and chroma variation between frames, commonly called "periodic flicker". Non-uniform periodic flicker is not easy to correct in the presence of general motion, since its estimation requires background and object tracking, and most tracking techniques assume consistent illumination. In this paper, we propose a joint tracking/color correction scheme using a block matching technique paired with color variation estimation. We introduce a robust method for stabilizing brightness variations in image sequences. A post-processing step is also proposed in order to deal with blocking artifacts. We demonstrate the efficacy of our method both on simulated and real data.

1 Introduction

En traitement vidéo, le flicker est généralement défini comme une fluctuation indésirable de luminosité dans une séquence. Il peut survenir à n'importe quelle fréquence d'acquisition et être causé par une grande variété de phénomènes tels que des artefacts de capteurs, des changements brusques de luminosité, des problèmes de transmission et autres... Il peut apparaître d'une manière transitoire ou périodique, et peut affecter toute l'image ou parfois seulement certaines zones précises. Résoudre le problème du flicker est difficile parce que ce phénomène est lié à une variation objective de luminosité dans une séquence vidéo, qu'il n'est pas toujours évident d'identifier. La luminosité peut changer dans une séquence pour des raisons naturelles liée à la scène filmée.

Dans cet article, nous étudions une forme spécifique du flicker, qualifiée de *périodique*, qui est plus fréquente dans les vidéos à haute vitesse. Quand la vitesse d'acquisition d'une séquence éclairée artificiellement s'approche ou dépasse la fréquence du courant alternatif, des artefacts d'illumination deviennent perceptibles, et affectent généralement toute l'image.

Il est relativement aisé d'estimer et de supprimer le flicker

périodique quand le mouvement et l'illumination dans la séquence sont simples. Cependant, quand le mouvement est complexe et la scène est éclairée par des sources multiples, ou si elle-même contient des sources lumineuses, le problème devient plus difficile à résoudre. Les effets de capteur et de saturation peuvent produire des artefacts inesthétiques supplémentaires. Ce problème est devenu plus courant compte tenu de la disponibilité de dispositifs d'acquisition à haute vitesse grand public, par exemple, dans les générations les plus récentes de smartphones ou les caméras "sport/action".

Le problème de la stabilisation de luminosité dans les vidéos est largement étudié dans la littérature, en particulier pour les films archivés et la compression des images et des vidéos.

On peut classer les méthodes existantes pour la suppression du flicker dans les vidéos archivées en deux catégories, suivant le modèle qu'elles utilisent : linéaire ou non linéaire. Les méthodes linéaires utilisent un modèle affine pour compenser le flicker dans des vidéos archivées [4, 1, 12, 13, 8, 14].

D'autre part, certains modèles non linéaires ont été étudiés dans la littérature : [9, 2, 3] utilisent un algorithme d'appariement par histogramme pour compenser le flicker tandis que

[10, 5] sont basés sur des méthodes pixelliques.

Certaines méthodes telles que [11, 6] sont adaptées au domaine de la compression vidéo, où le flicker est dû au fait que les régions similaires entre deux images consécutives ne sont pas encodées de manière cohérente.

La plupart de ces travaux considèrent des images en niveau de gris et ne traite pas spécifiquement le flicker périodique. Toutefois, dans notre cas, la source est en Haute Définition, en couleurs, à haute vitesse (jusqu'à 2000 images par seconde) et éclairée par différentes sources artificielles. Il s'avère donc indispensable de concevoir des solutions mieux adaptées.

La suite de cet article est structurée de la manière suivante : dans la Section 2, nous formalisons brièvement le problème du flicker pour l'acquisition de vidéos à haute vitesse et nous proposons une solution pour la correction colorimétrique de vidéos basée sur un algorithme d'appariement de blocs. En particulier, nous proposons un nouveau schéma pour la suppression des effets des blocs. La Section 3 fournit des résultats expérimentaux démontrant la pertinence de notre approche. Enfin, dans la Section 4, nous concluons cet article et mentionnons quelques pistes pour la suite de ce travail.

2 Suppression du flicker périodique

En imagerie à haute vitesse, le flicker périodique correspond aux variations d'intensité et de couleurs dues à l'interaction entre l'éclairage et la fréquence d'acquisition. Connaissant la vitesse d'acquisition et la fréquence d'alimentation du secteur, il est possible de déterminer la période du flicker. En supposant une variation générale d'intensité intégrée sur un petit nombre de périodes de flicker, il est ainsi facile de trouver le pic d'intensité lumineuse dans une période. Par ailleurs, nous avons étudié les corrélations croisées des canaux entre un pixel d'une image de référence et son correspondant d'une autre image dans la même période de flicker. Nos expérimentations dans [7] ont permis de conclure que la transformation colorimétrique de la majorité des pixels de l'image dégradée vers l'image de référence est linéaire. On peut donc adopter un modèle linéaire de transformation colorimétrique entre une image de référence et une image affectée par le flicker. En théorie, chaque image dans une période de flicker peut servir de référence. Cependant, il est plus facile de détecter le pic de luminosité dans une période de flicker, et utiliser l'image associée comme référence pour cette période. Cette solution semble constituer le meilleur choix en terme du rapport signal sur bruit. Cependant, si le niveau de luminosité des images de référence correspondant à différentes périodes de flicker varie trop vite, il subsistera des discontinuités visibles de luminosité entre des périodes successives. Pour cette raison, il est préférable de corriger chaque image d'une période par rapport aux deux images de référence les plus proches (aux instants t_{r1} et t_{r2}).

En se référant à une même région dans la scène à des instants t and t_r , la transformation colorimétrique entre deux pixels en correspondance (s, t) et (s', t_r) est modélisée par une matrice $M_{s,t/t_r}$ de taille 3×3 , dont chaque ligne correspond à 3 co-

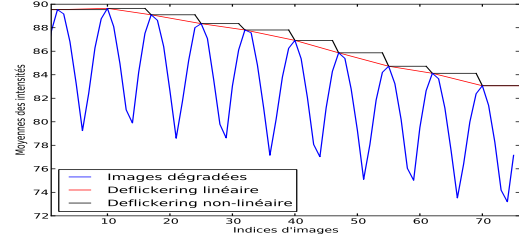


FIGURE 1 – Traitement attendu

efficients de correction appliqués aux canaux de couleur. En utilisant cette matrice,

$$\mathbf{f}(s', t_r) = M_{s,t/t_r} \mathbf{f}(s, t) + \mathbf{w}(s, t), \quad (1)$$

où $\mathbf{f}(s, t) \in \mathbb{R}^3$ est le vecteur des valeurs de chrominance du pixel s à l'instant t et $\mathbf{w}(s, t) \in \mathbb{R}^3$ est un terme traduisant les bruits d'acquisition et de modélisation.

2.1 Méthode de suivi

Dans le cas de sources de lumière multiples, l'effet de flicker devient plus complexe. En particulier, il dépend de la position de chaque source. Cela signifie qu'on ne peut pas modéliser la variation de luminosité par une unique matrice s'appliquant à tous les pixels de l'image. De plus, dans la plupart des vidéos, le fond et les objets sont en mouvement. Il est donc nécessaire de réaliser une mise en correspondance des régions similaires. Cependant, toutes les méthodes de suivi supposent une stabilité colorimétrique entre les images. Pour aborder ce problème, nous proposons une méthode locale pour l'estimation de la transformation colorimétrique. Nous utilisons un algorithme d'appariement par bloc, en attribuant à chaque bloc spatial \mathcal{B}_k indexé par k , ses propres jeux de paramètres. Plus précisément, on a

$$(\forall s \in \mathcal{B}_k) \quad M_{s,t} = \alpha_t M_{s,t/t_{r1}} + (1 - \alpha_t) M_{s,t/t_{r2}}, \quad (2)$$

où $\alpha_t = \frac{t_{r2}-t}{t_{r2}-t_{r1}}$ est un facteur d'interpolation, $M_{s,t/t_{r1}}$ et $M_{s,t/t_{r2}}$ sont les mêmes matrices de correction pour tous les pixels du bloc \mathcal{B}_k , calculées par rapport à leur vis-a-vis dans les images de référence aux instants t_{r1} et t_{r2} .

Nous nous proposons de diviser les images en blocs de taille identique 64×64 , et de mettre en œuvre une approche mixte d'appariement par bloc et d'estimation de la transformation colorimétrique. Conformément à notre modèle expérimental, pour un bloc \mathcal{B}_k donné dans une trame à l'instant t , on cherche à minimiser la fonction d'énergie suivante :

$$\begin{aligned} & J(M_{s,t/t_{ri}}, \mathbf{d}_{k,t/t_{ri}}) \\ &= \sum_{s' \in \mathcal{B}_k} \Phi(M_{s,t/t_{ri}} \mathbf{f}(s', t) - \mathbf{f}(s' - \mathbf{d}_{k,t/t_{ri}}, t_{ri})), \end{aligned} \quad (3)$$

où $i \in \{1, 2\}$, $\mathbf{d}_{k,t/t_{ri}}$ est un vecteur de déplacement entre deux blocs spatiaux qui se correspondent aux instants t et t_{ri} et $\Phi: \mathbb{R}^3 \rightarrow [0, +\infty[$ est une fonction de coût ayant un gradient lipschitzien. Bien que d'autres choix soient possibles pour Φ , le plus simple est $\Phi = \|\cdot\|^2/2$ conduisant à une approche par moindres carrés.

Pour chaque bloc dans l'image courante, deux matrices de correction colorimétrique (chacune comportant 9 paramètres) et deux vecteurs de déplacement sont donc estimés par rapport aux deux images de référence associées, les paramètres de correction de couleurs finaux étant estimés par interpolation linéaire à l'aide du facteur α_t .

Pour résoudre le problème d'optimisation précédent, on peut remarquer que, pour $\mathbf{d}_{k,t/t_{ri}}$ fixé, la solution du problème de moindres carrés est

$$\widetilde{\mathbf{M}}_{k,t/t_{ri}}(\mathbf{d}_{k,t/t_{ri}}) = \left(\sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{B}_{k_s}} \mathbf{f}(\mathbf{s}' - \mathbf{d}_{k,t/t_{ri}}, t_{ri}) \mathbf{f}(\mathbf{s}', t)^\top \right) \mathbf{R}_{k,t}^\dagger \quad (4)$$

où $\mathbf{R}_{k,t} = \sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{B}_{k_s}} \mathbf{f}(\mathbf{s}', t) \mathbf{f}(\mathbf{s}', t)^\top$ et $(\cdot)^\dagger$ désigne l'opération de pseudo-inversion. Il s'en suit que la paire $(\widehat{\mathbf{M}}_{s,t/t_{r1}}, \widehat{\mathbf{M}}_{s,t/t_{r2}})$ optimale est égale à $(\widetilde{\mathbf{M}}_{k,t/t_{r1}}(\widehat{\mathbf{d}}_{k,t/t_{r1}}), \widetilde{\mathbf{M}}_{k,t/t_{r2}}(\widehat{\mathbf{d}}_{k,t/t_{r2}}))$ où $\widehat{\mathbf{d}}_{k,t/t_{ri}}, i \in \{1, 2\}$, est le minimiseur, dans une fenêtre de recherche finie, de

$$\mathbf{d}_{k,t/t_{ri}} \mapsto J(\widetilde{\mathbf{M}}_{k,t/t_{ri}}(\mathbf{d}_{k,t/t_{ri}}), \mathbf{d}_{k,t/t_{ri}}). \quad (5)$$

Après avoir calculé la transformation colorimétrique optimale pour chaque bloc de l'image courante, celle-ci est appliquée à ce bloc de façon à générer une image corrigée. Cette procédure ne garantit cependant pas que des corrections homogènes soient effectuées pour des blocs voisins. De ce fait, les frontières des blocs peuvent devenir perceptibles dans les images de la séquence corrigée, notamment quand les vecteurs de déplacement ne sont pas estimés assez précisément.

2.2 Filtrage anti effets de blocs

Suite à l'étape de la compensation de flicker, nous proposons de retraiter chaque trame de la séquence vidéo pour supprimer les artefacts de blocs de manière efficace. Cette nouvelle approche est basée sur les paramètres de translations et de couleurs déjà estimés. Une idée simple serait d'interpoler les matrices de correction aux alentours des frontières des blocs, mais cette méthode ne donne pas de très bons résultats en pratique, surtout en présence des points aberrants.

Nous proposons de ré-estimer une nouvelle matrice de correction pour chaque pixel, en tenant compte de son voisinage et de sa position dans un bloc par rapport à ceux voisins. Pour chaque pixel \mathbf{s} , nous ré-utilisons les deux paires $(\widehat{\mathbf{M}}_{s,t/t_{r1}}, \widehat{\mathbf{d}}_{k_s,t/t_{r1}})$ et $(\widehat{\mathbf{M}}_{s,t/t_{r2}}, \widehat{\mathbf{d}}_{k_s,t/t_{r2}})$ déjà estimées pour le bloc d'indice k_s qui le contient. Dans le processus d'optimisation, nous introduisons un terme de couplage, pondéré par une constante multiplicative $\lambda \in]0, +\infty[$, ayant un effet régularisant. Une nouvelle fonction d'énergie est définie comme suit :

$$\begin{aligned} & K(\mathbf{M}_{s,t/t_{r1}}, \mathbf{M}_{s,t/t_{r2}}) \\ &= \sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{B}_{k_s}} \Phi(\mathbf{M}_{s,t/t_{r1}} \mathbf{f}(\mathbf{s}', t) - \mathbf{f}(\mathbf{s}' - \mathbf{d}_{k_s,t/t_{r1}}, t_{r1})) \\ &+ \sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{B}_{k_s}} \Phi(\mathbf{M}_{s,t/t_{r2}} \mathbf{f}(\mathbf{s}', t) - \mathbf{f}(\mathbf{s}' - \mathbf{d}_{k_s,t/t_{r2}}, t_{r2})) \\ &+ \frac{\lambda}{2} \sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{V}_s} \|\alpha_t \mathbf{M}_{s,t/t_{r1}} + (1 - \alpha_t) \mathbf{M}_{s,t/t_{r2}} - \widehat{\mathbf{M}}_{s',t}\|_F^2, \quad (6) \end{aligned}$$

où \mathcal{V}_s est un voisinage du pixel \mathbf{s} , $\widehat{\mathbf{M}}_{s',t} = \alpha_t \widehat{\mathbf{M}}_{s',t/t_{r1}} + (1 - \alpha_t) \widehat{\mathbf{M}}_{s',t/t_{r2}}$ et $\|\cdot\|_F$ désigne la norme de Frobenius.

La solution de ce problème d'optimisation matricielle quadratique est donnée par

$$\begin{aligned} & [\mathbf{M}_{s,t/t_{r1}}^\top \quad \mathbf{M}_{s,t/t_{r2}}^\top]^\top \\ &= \left[\begin{array}{c} \sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{B}_{k_s}} \mathbf{f}(\mathbf{s}' - \mathbf{d}_{k_s,t/t_{r1}}, t_{r1}) \mathbf{f}(\mathbf{s}', t)^\top + \lambda \alpha \sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{V}_s} \widehat{\mathbf{M}}_{s',t} \\ \sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{B}_{k_s}} \mathbf{f}(\mathbf{s}' - \mathbf{d}_{k_s,t/t_{r2}}, t_{r2}) \mathbf{f}(\mathbf{s}', t)^\top + \lambda (1 - \alpha) \sum_{\mathbf{s}' \in \mathcal{V}_s} \widehat{\mathbf{M}}_{s',t} \end{array} \right]^\top \\ &\times \left[\begin{array}{cc} \mathbf{R}_{k_s,t} + \lambda \alpha_t^2 |\mathcal{V}_s| I & \lambda \alpha_t (1 - \alpha_t) |\mathcal{V}_s| I \\ \lambda \alpha_t (1 - \alpha_t) |\mathcal{V}_s| I & \mathbf{R}_{k_s,t} + \lambda (1 - \alpha_t)^2 |\mathcal{V}_s| I \end{array} \right]^{-1}. \quad (7) \end{aligned}$$

On notera que cette formulation nous assure que, si nous faisons tendre λ vers zéro, nous retrouvons la solution précédente calculée sur le bloc \mathcal{B}_{k_s} .

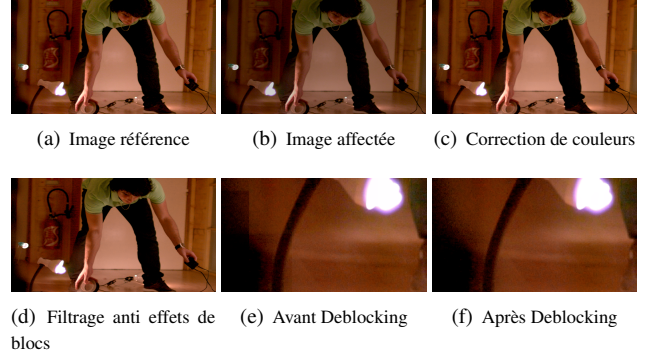


FIGURE 2 – Séquence d'images avec un flicker périodique sous un éclairage artificiel.

3 Résultats et discussions

Dans cette section, nous présentons quelques résultats expérimentaux pour démontrer l'efficacité de la méthode proposée. Les modèles de suppression de flicker et de filtrage anti effets de blocs sont testés sur une séquence éclairée naturellement en ajoutant un flicker artificiel et sur une vidéo réelle acquise dans un studio. Dans le second cas, il existe plusieurs sources de lumière qui causent un flicker réel et on peut aussi noter la présence de mouvements complexes. Tracer le niveau de luminosité global sur toute la séquence d'images nous permet d'évaluer les performances de notre méthode. La Figure 2 montre le résultat du traitement de la séquence réelle dégradée. Nous utilisons le rapport de signal sur bruit crête (PSNR) pour mesurer la ressemblance entre les images dégradées et les images originales d'une part, et d'autre part, entre les images originales et celles restaurées pour la séquence artificielle.

Le flicker artificiel a été créé de manière à présenter des différences de luminosité brusques entre les différentes périodes. Notre but est de démontrer que notre méthode, tirant parti de deux images références sur chaque période, est plus robuste aux changements périodiques de luminosité. Elle apporte en

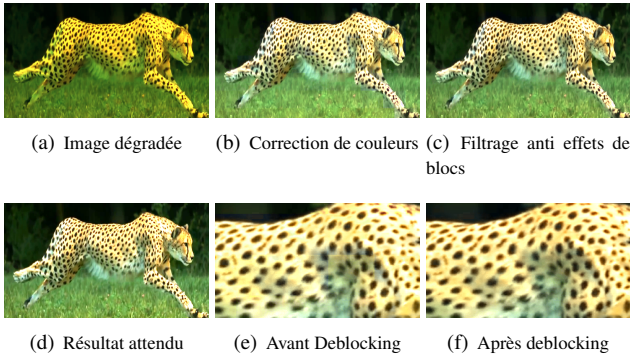
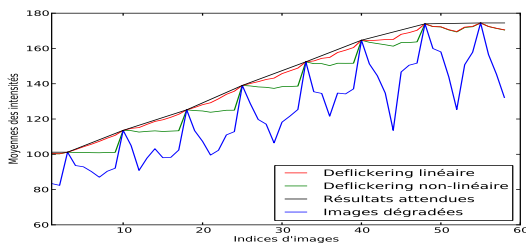
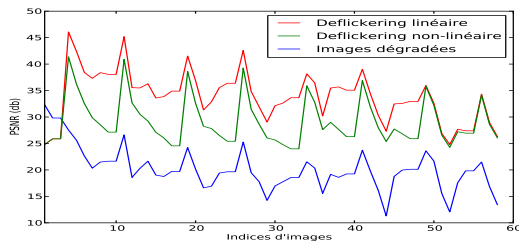


FIGURE 3 – Séquence avec un flicker artificiel.

effet un gain de 7 dB sur le PSNR par rapport à une méthode qui ne prend en compte qu’une seule image de référence par période de flicker. De plus, le bénéfice du filtrage des artefacts de blocs est bien perceptible, comme le montre la Figure 3[e,f],



(a) Variation de luminosité avant et après la correction



(b) Rapport de signal sur bruit

FIGURE 4 – Flicker artificiel : Mesures de similarité.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle méthode pour la réduction du flicker, adaptée à la correction des vidéos couleur à haute vitesse, acquises sous un éclairage artificiel. Une solution a été apportée à ce problème difficile, qui permet d’obtenir des résultats très satisfaisants, même en présence de plusieurs sources de lumière et de mouvements complexes. L’approche variationnelle convexe que nous avons adoptée permet de calculer des matrices de corrections colorimétrique avec une faible complexité numérique, ce qui permet d’envisager son application quasiment en temps réel. On peut cependant se demander si le choix de fonctionnelles plus sophistiquées permettrait encore d’améliorer la qualité des images produites.

Références

- [1] É. Decencière. *Restauration automatique de films anciens*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 1997.
- [2] J. Delon. Movie and video scale-time equalization application to flicker reduction. *IEEE Trans. Image Process.*, 15(1) :241–248, Jan. 2006.
- [3] G. Forbin and T. Vlachos. Nonlinear flicker compensation for archived film sequences using motion-compensated graylevel tracing. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 18(6) :803–816, Jun. 2008.
- [4] C-S. Fuh and P. Maragos. Motion displacement estimation using an affine model for image matching. *Opt. Eng.*, 30(7) :881–887, Jul. 1991.
- [5] F.J. Hampson and J-C. Pesquet. Motion estimation in the presence of illumination variations. *Signal Process. Image Comm.*, 16(4) :373–381, Nov. 2000.
- [6] A. Jimenez Moreno, E. Martínez-Enríquez, V. Kumar, and F. Diaz-de Maria. Standard-compliant low-pass temporal filter to reduce the perceived flicker artifact. *IEEE Trans. Multimedia*, 16(7) :1863–1873, Aug. 2014.
- [7] A. Kanj, H. Talbot, and R. R. Luparello. Global image registration and video color correction in presence of illumination variations. In *IEEE Proc. Digit. Inform. Comm. Technol. Applicat.*, pages 92–95, Lebanon, 1 May. 2015.
- [8] A-C. Kokaram, R. Dahyot, F. Pitié, and H. Denman. Simultaneous luminance and position stabilization for film and video. In *Proc. SPIE Conf. Human Vision and Electronic Imaging VIII*, pages 688–699, San Jose, California, USA, May 2003.
- [9] V. Naranjo and A. Albiol. Flicker reduction in old films. In *IEEE Proc. Int. Conf. Image Process.*, volume 2, pages 657–659, Vancouver, Canada, 10-13 Sep. 2000.
- [10] F. Pitié, B. Kent, B. Collis, and AC. Kokaram. Localised deflicker of moving images. In *Proc. Eur. Conf. Vis. Media Production*, pages 134–143, London, United Kingdom, 29-30 Nov. 2006.
- [11] J. Ren, J. Liu, M. Li, and Z. Guo. Postprocessing of block-coded videos for deflicker and deblocking. In *Proc. Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process.*, pages 1631–1635, Vancouver, Canada, 26-31 May 2013.
- [12] P.M.B. Van Roosmalen, R. L. Lagendijk, and J. Biemond. Correction of intensity flicker in old film sequences. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 9(7) :1013–1019, Oct. 1999.
- [13] X. Yang and M-N Chong. Enhanced approach to film flicker removal. In *Proc. SPIE Int. Symp. Opt. Sci. Technol.*, pages 39–47, Dec. 2000.
- [14] X. Zhang, A. B. E. Masahide, and M. Kawamata. Flicker parameters estimation in old film sequences containing moving objects. *IEICE Trans. Fund. Electron. Comm. Comput. Sci.*, 94(12) :2836–2844, Dec. 2011.