

# Utilisation d'une technique de flot optique pour corriger les artéfacts d'un polarimètre imageant à division temporelle

Pierre MARCONNET, Alban FOULONNEAU, Laurent BIGUÉ

Laboratoire MIPS (EA 2332), Université de Haute-Alsace  
12, rue des Frères Lumière 68093 Mulhouse Cedex France

`pierre.marconnet@uha.fr`, `alban.foulonneau@uha.fr`, `laurent.bigue@uha.fr`

**Résumé** – Lorsqu'un polarimètre à division temporelle est utilisé pour mesurer la polarisation de la lumière issue d'une scène en mouvement, des artéfacts apparaissent systématiquement sur les images correspondantes. Nous proposons ici une méthode de post-traitement, basée sur le flot optique, afin de rendre possible les mesures de scènes dynamiques par un tel polarimètre.

**Abstract** – When a division of time polarimeter is used in order to measure the polarization of light in a dynamic scene, some artifacts systematically occur on corresponding images. Here an optical flow based post-processing method is proposed in order to allow the characterization of dynamic scenes using such a polarimeter.

## Introduction

En imagerie de polarisation le problème des artéfacts apparaissant sur l'estimation de la mesure est un problème récurrent, et ce quelle que soit l'architecture de polarimètre employée. Dans le cas d'une architecture à division temporelle, les artéfacts apparaissent dès lors que l'on est en présence de mouvement dans la scène, faussant ainsi toute interprétation physique des estimations de mesure d'un tel polarimètre. Malgré cela il existe très peu de publications traitant de la résolution de ce problème. Cette faible quantité de littérature peut s'expliquer, *a priori*, par la complexité de la tâche. En effet, dans le cas d'une architecture à division temporelle, l'estimation d'une mesure nécessite la combinaison d'au minimum 4 images (appelées ici "images d'états de polarisation") acquises successivement selon des polarisations différentes. Les 4 images ainsi acquises peuvent avoir des dynamiques de niveaux de gris totalement différentes, pouvant rendre difficile le recalage direct d'une séquence d'images polarimétriques dans un cadre général.

Une méthode [4] proposée par Guyot *et al.* en 2007 s'attaque au problème du recalage d'images polarimétriques, mais en se limitant à une séquence acquise avec de faibles amplitudes de mouvement et dont les dynamiques de niveaux de gris permettent une similitude des gradients des structures présentes dans la séquence d'images.

Nous avons proposé en 2008 une solution [3] permettant d'atténuer les artéfacts quelles que soient l'amplitude du mouvement et la dynamique des images. Ce traitement est réalisé par l'application directe d'un filtrage médian temporel aux séquences d'images de Stokes résultants de la combinaison des images d'états de polarisation. Bien qu'améliorant le rendu, ce traite-

ment ne corrige pas correctement les artéfacts dans tous les cas et peut même induire des erreurs à des endroits où aucun artéfact n'est présent.

Dans cet article nous adaptons une technique de flot optique [2] au cas de la correction d'artéfacts issus d'un polarimètre à division temporelle. L'adaptation que nous en proposons n'estime pas le mouvement entre des paires d'images consécutives, mais entre des images d'états de polarisation acquises selon des polarisations identiques. Cette méthode présente les avantages de s'adapter à toutes dynamiques de niveaux de gris et de pouvoir corriger les artéfacts dans le cas de mouvements de grande amplitude. Ainsi notre méthode permet la correction des artéfacts issus d'un polarimètre à division temporelle dans un cadre applicatif très vaste.

Dans la première partie nous décrivons le principe d'acquisition des images permettant l'obtention du vecteur de Stokes par un polarimètre à division temporelle, puis nous expliquons l'origine des artéfacts que nous corrigeons. Dans la seconde partie, nous détaillons le fonctionnement de notre technique de correction. Enfin nous présentons les résultats que nous avons obtenus à l'aide de notre correcteur.

## 1 Principe de la mesure de la polarisation de lumière

La polarisation est une propriété fondamentale de la lumière, au même titre que la longueur d'onde, l'intensité ou la cohérence. La polarisation tient compte de la nature vectorielle de la lumière ; elle décrit l'orientation que prend, au cours de l'évolution temporelle, le champ électrique dans le plan orthogonal à

la direction de propagation du rayon lumineux.

Toute l'information polarimétrique contenue dans un rayon lumineux peut être décrite à l'aide du vecteur de Stokes  $\mathbf{S}$  [5]. Ce vecteur de 4 composantes ( $s_0$ ,  $s_1$ ,  $s_2$  et  $s_3$ ) peut être obtenu à partir de la mesure d'au minimum 4 acquisitions successives. Dans cet article nous nous limiterons aux informations contenues dans les 3 premiers paramètres de Stokes ; à savoir  $s_0 = I_0 + I_{90}$  qui caractérise l'intensité totale (non polarisée) d'un rayon lumineux, et  $s_1 = I_0 - I_{90}$  et  $s_2 = I_{45} - I_{-45}$  qui caractérisent la quantité de lumière polarisée linéairement (respectivement à  $0^\circ/90^\circ$  et  $-45^\circ/+45^\circ$ ).

Ces 3 composantes peuvent être synthétisées en plusieurs quantités telles que le DOLP (degré de polarisation linéaire) ou l'AOP (angle de polarisation). Le premier représente le pourcentage de la lumière polarisée linéairement présente dans un rayon tandis que le second représente l'angle privilégié de la polarisation. Le DOLP se définit par :

$$\text{DOLP} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \quad (1)$$

Le laboratoire MIPS cherche à mesurer la polarisation de la lumière présente dans une scène filmée, et ce à haute cadence (200Hz actuellement). Pour cela, nous avons mis au point un polarimètre imageant portable dont l'architecture est basée sur le principe de la division temporelle.

Ce type d'architecture se caractérise par le fait que les 4 images d'états de polarisation nécessaires pour l'obtention du vecteur de Stokes sont acquises successivement. Dès lors, son principal inconvénient est d'engendrer systématiquement des artefacts sur les composantes du vecteur de Stokes dès lors que la scène n'est pas statique [6], ce qui se produit lorsqu'au moins un des objets filmés se trouve en mouvement, ou bien que la caméra bouge. En effet, dans ce cas les images d'états de polarisation acquises ne représentent pas les objets dans les mêmes positions. Or les composantes du vecteur de Stokes étant obtenues par combinaisons des images d'états de polarisation, le moindre mouvement dans la scène induit l'apparition d'artefacts sur les estimations des vecteurs de Stokes (cf. Fig. 1). Le DOLP ou l'AOP, eux-mêmes estimés à partir du vecteur de Stokes, sont par conséquent également affectés par ces artefacts.

## 2 Correction des artefacts dus au mouvement

### 2.1 Principe général

Afin de corriger les artefacts, l'idée de base de notre traitement est d'estimer les mouvements entre chaque paire de deux images acquises selon le même mode de polarisation ; puis, connaissant ces mouvements, de déformer chacune des images d'états de polarisations selon des mouvements proportionnels

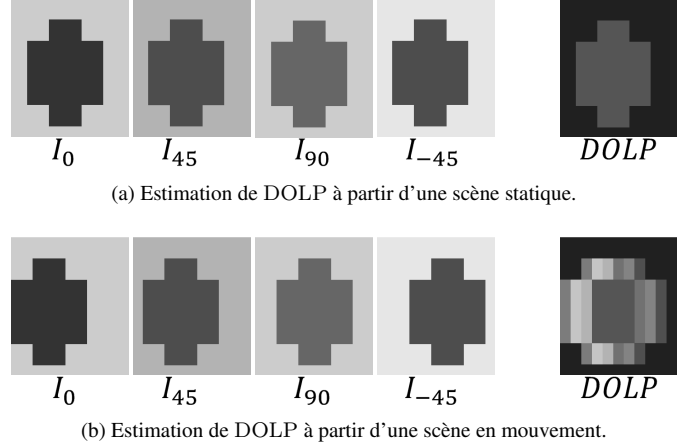


FIGURE 1: Illustration de l'apparition d'artefacts en présence de mouvement. Les images  $I_*$  représentent des images d'états de polarisation acquises successivement, et les images  $DOLP$  représentent les résultats de l'estimation des DOLPs calculés à partir des images  $I_*$ .

à ceux estimés (cf. Fig. 2).

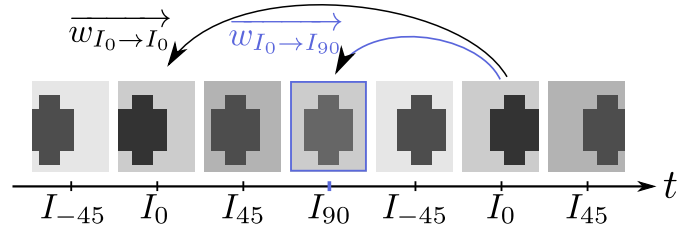


FIGURE 2: Principe de la correction. Sur cet exemple on souhaite déformer  $I_0$  selon le champ de mouvement  $w_{I_0 \to I_{90}}$  afin qu'elle semble avoir été acquise en même temps que  $I_{90}$ . Ce champ de mouvement est obtenu en estimant par flot optique  $w_{I_0 \to I_0}$  ; puis, en considérant que le mouvement est linéaire, le champ recherché est alors obtenu par  $w_{I_0 \to I_{90}} = \frac{1}{2} \cdot w_{I_0 \to I_0}$ .

En estimant le mouvement entre les paires d'images acquises selon le même mode de polarisation, nous nous affranchissons du problème des dynamiques de niveaux de gris différents pour chaque mode de polarisation  $w$ .

Nous avons implanté différentes méthodes d'estimation de mouvement (recalage rigide, block matching, flot optique), et avons au final retenu le flot optique. Plus précisément, nous avons implanté la technique de flot optique proposée par Brox *et al.* qui permet l'obtention d'une bonne précision d'estimation du mouvement [2] et nous permet ainsi d'obtenir une bonne qualité de correction. Par ailleurs pour nous affranchir des problèmes de mouvement de forte amplitude et réduire le temps de calcul, nous avons employé une approche multi-résolution pour l'estimation du champ de mouvement

Au final, appliquer l'ensemble de notre méthode de correction permet de simuler une acquisition simultanée des 4 images d'états de polarisation à partir de 4 images d'états de polarisation

sation acquises successivement.

## 2.2 Description de la technique de flot optique employée

La technique de flot optique que nous avons implantée est une adaptation de la technique proposée par Brox *et al.* [2]. L'estimation du mouvement est alors formulée comme un problème de minimisation. La fonctionnelle  $E$  à minimiser contient, dans notre cas, trois termes ; le premier traduit l'hypothèse de constance des niveaux de gris, le second la constance des gradients de niveaux de gris et le dernier est un terme de régularisation imposant une relative homogénéité du champ de mouvement  $\mathbf{w}$  entre les pixels voisins. Ainsi on peut écrire  $E$  suivant la formule (2) :

$$E(\mathbf{w}) = \beta \cdot \oint \psi \left( \|I(\mathbf{X} + \mathbf{w}) - I(\mathbf{X})\|^2 \right) d\mathbf{X} + \gamma \cdot \oint \psi \left( \|\nabla I(\mathbf{X} + \mathbf{w}) - \nabla I(\mathbf{X})\|^2 \right) d\mathbf{X} + \alpha \cdot \oint \psi \left( \|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2 \right) d\mathbf{X} \quad (2)$$

où  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sont des poids,  $\mathbf{X}$  le système de coordonnées de la séquence d'images  $I$  (avec  $\mathbf{X} = (x, y, t)$ ),  $\mathbf{w}$  le champ de mouvement à estimer (avec  $\mathbf{w} = (u, v, 4)$ ). Ainsi  $I(\mathbf{X})$  représente une image de la séquence d'états de polarisation et  $I(\mathbf{X} + (0, 0, 4))$  la prochaine image de la séquence dont le mode de polarisation est identique à celui de l'image  $I(\mathbf{X})$ .  $I(\mathbf{X} + \mathbf{w})$  représente donc l'image  $I(\mathbf{X} + (0, 0, 4))$  déformée selon le mouvement  $\mathbf{w}$ . Enfin  $\Psi$  est une fonction de régularisation définie par  $\Psi(A^2) = \sqrt{A^2 + \epsilon}$  et  $\epsilon = 10^{-3}$ .

Soient les notations suivantes introduites par Brox *et al.* [1] :

$$\begin{aligned} I_x &= \partial_x I(\mathbf{X} + \mathbf{w}) & I_{xy} &= \partial_{xy} I(\mathbf{X} + \mathbf{w}) \\ I_y &= \partial_y I(\mathbf{X} + \mathbf{w}) & I_{yy} &= \partial_{yy} I(\mathbf{X} + \mathbf{w}) \\ I_z &= I(\mathbf{X} + \mathbf{w}) - I(\mathbf{X}) & I_{xz} &= \partial_x I_z \\ I_{xx} &= \partial_{xx} I(\mathbf{X} + \mathbf{w}) & I_{yz} &= \partial_y I_z \end{aligned}$$

Le théorème d'Euler-Lagrange est employé pour minimiser la fonctionnelle  $E$  selon  $\mathbf{w}$ , nous permettant d'obtenir le système d'équations (3).

$$\begin{cases} \beta \cdot \psi'(I_z^2) \cdot I_x \cdot I_z + \gamma \cdot \psi' (I_{xz}^2 + I_{yz}^2) \cdot (I_{xx} \cdot I_{xz} + I_{xy} \cdot I_{yz}) \\ = \alpha \cdot \text{div} \left( \psi' (\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2) \cdot \nabla u \right) \\ \beta \cdot \psi'(I_z^2) \cdot I_y \cdot I_z + \gamma \cdot \psi' (I_{xz}^2 + I_{yz}^2) \cdot (I_{xy} \cdot I_{xz} + I_{yy} \cdot I_{yz}) \\ = \alpha \cdot \text{div} \left( \psi' (\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2) \cdot \nabla v \right) \end{cases} \quad (3)$$

Les équations du système (3) doivent être linéarisées. Pour cela deux boucles (K et L) d'itérations de point fixe imbriquées sont utilisées [1]. La première boucle (K) linéarise le champ de mouvement  $\mathbf{w}$  par une série de Taylor du 1<sup>er</sup> ordre et l'utilisation de la méthode d'itérations de point fixe ; ce qui nous amène à définir :

$$\begin{aligned} C^k &= \sqrt{\|\nabla u^{k+1}\|^2 + \|\nabla v^{k+1}\|^2} \\ &= \sqrt{\|\nabla(u^k + du^k)\|^2 + \|\nabla(v^k + dv^k)\|^2} \\ A^k &= I_z^{k+1} = I_z^k + I_x^k \\ G_x^k &= I_{xz}^{k+1} = I_{xz}^k + I_{xx}^k \cdot du^k + I_{xy}^k \cdot dv^k \\ G_y^k &= I_{yz}^{k+1} = I_{yz}^k + I_{xy}^k \cdot du^k + I_{yy}^k \cdot dv^k \end{aligned}$$

avec  $du^k$  et  $dv^k$  les incréments des composantes  $u$  et  $v$  du champ de mouvement  $\mathbf{w}$  recherché. Enfin, la deuxième boucle (L) linéarise les expressions toujours non linéaires contenues dans  $\Psi'$  grâce à la même méthode d'itérations de point fixe. Ceci nous permet d'obtenir un système de deux équations aux dérivées partielles dont la première est :

$$\begin{aligned} 0 = & \alpha \cdot \left( \frac{\psi'(C^{k,l^2})_{i+1} - \psi'(C^{k,l^2})_{i-1}}{2} \right) \cdot \nabla (u_i^{k,0} + du_i^{k,l+1}) \\ & + \alpha \cdot \psi'(C^{k,l^2})_i \cdot \Delta (u_i^{k,0} + du_i^{k,l+1}) \\ & - \beta \cdot \psi'(A^{k,l^2})_i \cdot I_x^{k,0} \cdot (I_z^{k,0} + I_y^{k,0} \cdot dv_i^{k,l+1}) \\ & - \gamma \cdot \psi'(G_x^{k,l^2} + G_y^{k,l^2})_i \cdot \left[ I_{xz}^{k,0} \cdot (I_{xz}^{k,0} + I_{xy}^{k,0} \cdot dv_i^{k,l+1}) \right. \\ & \left. + I_{xy}^{k,0} \cdot (I_{yz}^{k,0} + I_{yy}^{k,0} \cdot dv_i^{k,l+1}) \right] \\ & - du_i^{k,l+1} \cdot \left[ \beta \cdot \psi'(A^{k,l^2})_i \cdot I_x^{k,0^2} \right. \\ & \left. + \gamma \cdot \psi'(G_x^{k,l^2} + G_y^{k,l^2})_i \cdot (I_{xx}^{k,0^2} + I_{xy}^{k,0^2}) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

où l'indice  $i$  représente un pixel de l'image, et les exposants  $k$  et  $l$  représentent les indices d'itérations des boucles K et L. Le système peut ensuite être résolu par la méthode de résolution numérique SOR (Successive Over Relaxation) [7].

## 3 Résultats après recalage par flot optique

Dans cette partie nous proposons d'évaluer qualitativement et quantitativement les performances de notre correcteur. Les figures Fig. 3 et Fig. 4 permettent de comparer visuellement les images du DOLP avant et après correction avec une image de DOLP de référence obtenue avec la même scène mais sans mouvement. Sur la figure Fig. 3, nous pouvons constater que

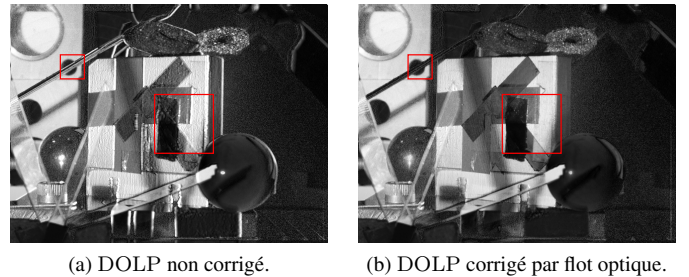


FIGURE 3: Images de DOLP extraites de la séquence capturée avant (a) et après (b) correction. Les cadres rouges délimitent les zones agrandies en Fig. 4.

les artefacts (généralement des bandes blanches situées aux gradients de niveaux de gris des objets mouvants) nettement visibles sur l'image non corrigée (a) ont pratiquement disparu sur l'image corrigée (b). L'agrandissement de deux zones (Fig. 4) permet de mieux apprécier la correction apportée. Pour juger quantitativement de la qualité du résultat de notre correction nous souhaitons que notre critère soit maximal lors-

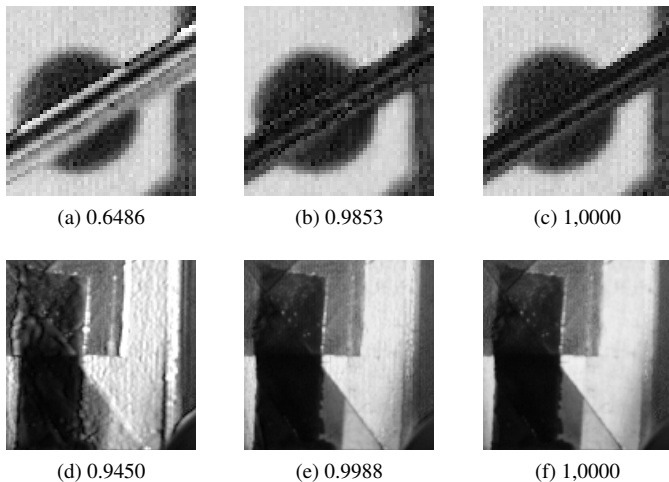


FIGURE 4: Agrandissement des zones encadrées en Fig. 3. Les valeurs indiquées en commentaire correspondent au résultats respectifs par NCC avec la référence. A gauche ((a) et (d)) : DOLP non corrigé, au milieu ((b) et (e)) : DOLP corrigé, et à droite ((c) et (f)) : DOLP sans mouvement.

que les niveaux de gris de l'image de référence et de l'image corrigée sont identiques, ce qui peut revenir à utiliser la somme des différences absolues (SAD). En pratique ce critère n'est minimal qu'à condition que le bruit sur les images soit nul. Or nous souhaitons minimiser l'influence du bruit par rapport à celle des artéfacts. Comme le bruit induit de bien plus faibles différences de niveaux de gris que les artéfacts, nous préférons utiliser la somme des différences au carré SSD. Enfin afin d'être insensible aux différentes caractéristiques de nos images, la SSD est normalisée en retranchant aux images évaluées leurs moyennes respectives et en les divisant par leurs écart-types. Cette version normalisée de la SSD à minimiser revient donc à maximiser l'intercorrélacion normalisée (NCC) :

$$NCC(A, B) = \frac{\sum_{x,y} (A(x, y) - \bar{A}) \cdot (B(x, y) - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{x,y} (A(x, y) - \bar{A})^2 \cdot \sum_{x,y} (B(x, y) - \bar{B})^2}} \quad (5)$$

avec  $A$  étant l'image à comparer à l'image  $B$ .

Ce critère, employé dans un contexte similaire par Guyot *et al.* [4], permet donc de juger de manière objective la qualité de notre correction par comparaison avec une séquence d'images de référence, et ce en limitant l'influence du bruit sur le critère tout en étant indépendant de la dynamique de niveaux de gris des images évaluées.

Finalement, l'évaluation de la NCC (5) pour l'intégralité de notre séquence (cf. Fig. 5) met en évidence l'amélioration de la correction par rapport à notre précédente méthode [3].

## Conclusion

Le problème d'apparition systématique des artéfacts pouvait laisser à penser qu'un polarimètre à division temporelle n'était

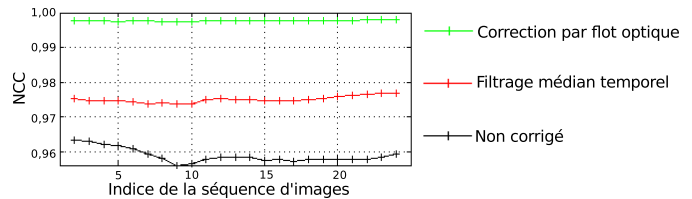


FIGURE 5: Critère de corrélation (NCC) entre les DOLPs de référence et les DOLPs testées sur l'ensemble de la séquence. Pour indication, la moyenne de la NCC est de 0,9588 pour la séquence non corrigée, de 0,9750 pour celle corrigée par filtrage médian temporel [3] et de 0,9977 pour celle corrigée par notre méthode.

pas utilisable dans le cas de mesures de scènes dynamiques [6]. Nous avons proposé une solution de recalage basée sur le flot optique, estimant le mouvement entre paires d'images acquises selon le même mode de polarisation. Les résultats que nous avons obtenus sur des séquences réelles nous permettent d'envisager l'utilisation d'un polarimètre à division temporelle dans le cadre de scènes dynamiques, réglant ainsi son principal défaut.

## Références

- [1] T. Brox, A. Bruhn, N. Papenberg, and J. Weickert, *High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping*, in *ECCV '04 : 8th European Conference on Computer Vision*, vol. 3024 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin / Heidelberg, 2004, pp. 25–36.
- [2] T. Brox, A. Bruhn, and J. Weickert, *Variational motion segmentation with level sets*, in *ECCV '06 : 9th European Conference on Computer Vision*, vol. 3951 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin / Heidelberg, May 2006, pp. 471–483.
- [3] L. Gendre, A. Foulonneau, and L. Bigué, *High-speed acquisition and pre-processing of polarimetric images sequences*, in *ACIVS '08 : Advanced Concepts For Intelligent Vision Systems*, vol. 5259 of *Lecture Notes in Computer Science*, Berlin, Germany, Oct. 2008, Springer-Verlag, pp. 101–112.
- [4] S. Guyot, M. Anastasiadou, E. Deléchelle, and A. De Martino, *Registration scheme suitable to Mueller matrix imaging for biomedical applications*, *Optics Express*, 15 (2007), pp. 7393–7400.
- [5] G.G. Stokes, *On the composition and resolution of stream of polarized light from different sources*, *Trans. Camb. Phil. Soc.*, 9 (1852), pp. 399–416.
- [6] J.S. Tyo, D.H. Goldstein, D.B. Chenault, and J.A. Shaw, *Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications*, *Applied Optics*, 45 (2006), pp. 5453–5469.
- [7] D.M. Young, *Iterative solution of large linear systems*, Academic Press (New York), 1971.