

TP de Co-conception : Optimisation d'un *flutter shutter* et d'une lentille chromatique

31 Mars 2023

1 Objectifs du TP

Ce TP a pour objectif de réaliser deux exemples de co-conception pour deux applications différentes : la correction du flou de bougé à l'aide d'un *flutter shutter* et l'extension de profondeur de champ à l'aide d'une optique chromatique. Dans chaque cas, des modèles simples du système optique et de la performance des algorithmes sont considérés, l'objectif est d'analyser les résultats des optimisations et la démarche de co-conception.

2 Optimisation d'un flutter shutter

2.1 Hypothèses simplificatrices

On supposera ici pour simplifier que le flou provient uniquement d'un mouvement **rectiligne uniforme**, dans la direction horizontale. On suppose également que l'objet se déplace avec une vitesse de 1 pixel/ Δt , Δt étant l'écart temporel entre deux valeurs du code. La FEP correspond donc alors directement au code temporel, **à une normalisation près**.

2.2 Simulation d'un *flutter shutter*

2.2.1 Deux exemples

Vous disposez de deux FEP, l'une correspondant à une ouverture classique du diaphragme, l'autre à un *flutter shutter*. Vous pouvez les charger dans matlab à l'aide de la fonction *load* avec comme argument le nom du fichier à charger.

- Tracer sur un même graphique, les densités spectrales de puissance des FEP associées à ces deux modes d'acquisition, en échelle semi-logarithmique (sur l'axe des ordonnées). Utiliser du *zero-padding* pour améliorer la résolution de ce spectre.
- Quelle est d'après vous la FEP la plus favorable à la déconvolution ? Justifier.

2.2.2 Simulation d'images

- Simuler, pour chacune des deux FEP, l'image floue associée à l'image de référence. (Utiliser *imfilter* avec l'option 'conv'). Ajouter un bruit blanc gaussien d'écart-type $\sigma_b = 1$.
- Déconvoluer ces deux images par la FEP qui lui est associée (utiliser la fonction *deconvnr*, en estimant le paramètre de régularisation). Si besoin, les problèmes de bords peuvent être réduits avec un choix judicieux d'option de la fonction *imfilter*.
- Quel code obtient visuellement le meilleur résultat de déconvolution ?
- Proposer un critère permettant de comparer quantitativement ces résultats, connaissant l'image de référence. Le calculer pour les deux images et commenter.

2.3 Un critère simple de co-conception

Dans [RAT06], le *flutter shutter* est optimisé en maximisant la valeur minimale de la densité spectrale de puissance de la FEP et en minimisant son écart-type. Ils imposent deux contraintes sur les codes potentiels :

- Pour perdre le moins possible de flux lumineux, ils considèrent que le diaphragme est ouvert la moitié du temps, autrement dit soit n la longueur du code, il existe $s = n/2$ valeurs égales à "1" dans le code du *flutter shutter*.
- Pour chaque code, la première et la dernière valeur est égale à "1" .

Vous disposez d'une fonction *gene_code* qui génère l'ensemble des codes binaires possibles, pour une longueur de code n et un nombre de "1" égale à s donnés, avec la contrainte que la première et la dernière valeur soient égales à "1".

- Compte tenu des deux contraintes imposées ici, combien de codes possibles existe-t-il en théorie pour $n = 10$ et $n = 30$? Comparer avec la sortie de la fonction *gene_code*.
- Calculer pour chaque code généré par la fonction *gene_code* avec $n = 10$, la valeur minimale et l'écart-type du spectre de la FEP qui lui est associé (pensez à normaliser les codes issus de la fonction *gene_code* pour qu'ils représentent une FEP). Représenter les résultats sur un graphique ayant pour abscisse les valeurs d'écart-type et pour ordonnée la valeur minimale.
- Trouver pour une taille $n = 10$ le code optimal correspondant au critère proposé dans [RAT06]. Ce code est-il unique ? Pourquoi ?
- Ce critère permet-il d'après vous de prendre en compte tous les paramètres du problème ?

3 Co-conception d'une optique chromatique pour l'extension de profondeur de champ

Dans cette partie l'objectif est d'optimiser une optique chromatique à l'aide d'une modélisation simple basée sur de l'optique géométrique. La première étape consiste à créer les fonctions permettant de simuler les variations de flou de défocalisation pour une optique chromatique et de calculer le critère de performance pour l'extension de profondeur de champ, à savoir ici la profondeur de champ généralisée. Enfin, ces fonctions seront utilisées pour optimiser un paramètre de l'optique chromatique.

Le critère de co-conception proposé pour l'EDOF correspond à maximiser la plage de profondeur dans laquelle au moins l'un des canaux est net. Ceci revient à maximiser l'union des profondeurs de champ (DoF) des trois canaux RVB d'une caméra chromatique, à l'intérieur d'une plage de profondeur d'intérêt L :

$$GDOF = L \cap (\cup_{i \in R,V,B} DoF_i). \quad (1)$$

La figure 1 illustre le concept de profondeur de champ généralisée.

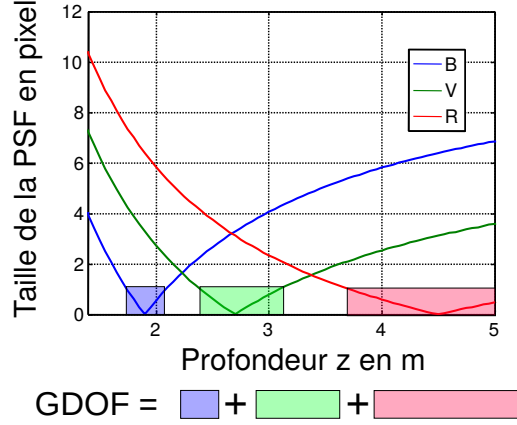


Figure 1: Illustration de la notion de profondeur de champ généralisée d'un imageur chromatique.

3.1 Flou de défocalisation d'une optique conventionnelle

On considère tout d'abord une caméra conventionnelle dont les paramètres génériques sont: distance focale $f'=25$ mm, nombre d'ouverture $N=2.8$, taille des pixels $t_{px}=5 \mu m$. L'objet est situé entre 1 et 5 m de la caméra.

On rappelle la formule caractérisant la taille du flou de défocalisation en fonction des paramètres optiques (f' : focale, D diamètre de la lentille) et de la profondeur x :

$$\epsilon = Dx'_0 \left(\frac{1}{f'} + \frac{1}{x} - \frac{1}{x'_0} \right) \quad (2)$$

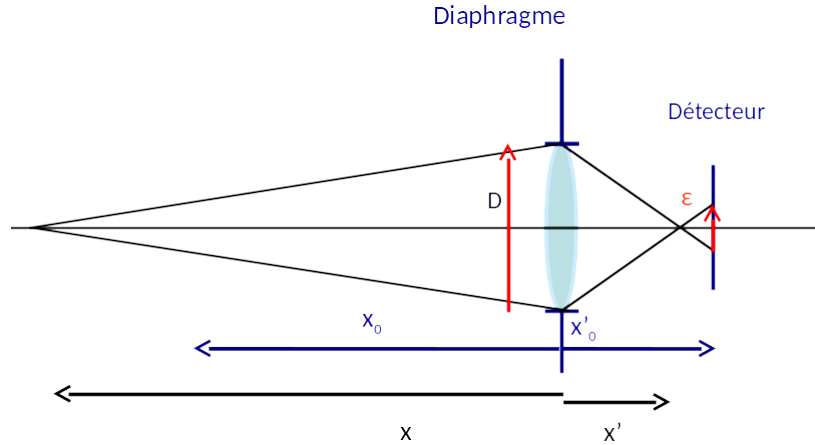


Figure 2: Modélisation du flou de défocalisation d'une optique par optique géométrique.

- On réalise une mise au point à $x_0 = -2\text{m}$. D'après la formule de conjugaison des lentilles minces, quelle est la position x'_0 du capteur ?
- A partir de la formule théorique (2), écrire une fonction qui calcule la taille géométrique du flou de défocalisation, $|\epsilon|$ **en pixel** pour un ensemble de profondeurs donné et une caméra donnée. Cette fonction prendra en entrée la focale f' , le nombre d'ouverture N , la taille du pixel t_{px} , la position du détecteur x'_0 et un vecteur de profondeurs x . (**Attention** les grandeurs x_0 et x sont des grandeurs algébriques négatives). Tracer la variation de $|\epsilon|$ avec la profondeur $|x|$ dans la plage de 1 à 5 m et pour une mise au point à $x_0 = -2\text{ m}$.
- Commenter l'allure de la courbe et mesurer graphiquement la profondeur de champ de cet imageur. On supposera que la profondeur de champ est caractérisée par la zone de l'espace dans laquelle le flou de défocalisation est inférieur à 1 pixel.
- Ecrire une fonction *IsInPdc* qui prend en entrée un ensemble de profondeurs et les paramètres caméras et qui renvoie l'ensemble des profondeurs pour lesquels le flou de défocalisation est inférieur à 1 pixel. Le résultat obtenu est-il cohérent avec votre observation graphique ?

3.2 Flou de défocalisation d'une optique chromatique

On considère une optique chromatique telle que: $f_R = 25.1\text{ mm}$, $f_V = 25\text{ mm}$ et $f_B = 24.8\text{ mm}$. Le nombre d'ouverture est toujours $N = 2.8$ et la taille des pixels $t_{px} = 5\text{ }\mu\text{m}$. L'objet est toujours situé entre 1 et 5 m.

Construire une fonction qui calcule la taille du flou de défocalisation des trois canaux en fonction de la profondeur et des paramètres f_R, f_V, f_B, N, t_{px} et x'_0 . On positionnera le capteur tel que le plan de mise au point x_0 corresponde à la mise au point du canal vert

(on la notera par la suite x_0^V). Tracer sur un même graphique, les courbes de variation de flou de défocalisation des canaux RVB de cette caméra.

3.3 Critère de performance

Utiliser la fonction *IsInPdC* que vous avez créée en section 3.1 pour construire une fonction qui, à partir d'un vecteur de profondeurs, calcule la profondeur de champ généralisée d'une caméra chromatique caractérisée par f_R, f_V, f_B, N, t_{px} et x_0' . Pour cela, il sera utile d'utiliser la fonction *union* qui permet de calculer l'union sans répétition de deux vecteurs. Utiliser votre fonction pour évaluer la profondeur de champ généralisée, caractérisée par le pourcentage de profondeurs pour lesquelles au moins l'un des flous de défocalisation des canaux RVB est inférieur à un pixel, sur la plage totale de profondeurs d'intérêt.

3.4 Modélisation de l'optique chromatique

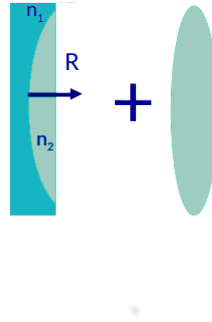


Figure 3: Optique chromatique considérée : association d'un doublet chromatique de rayon de courbure R et d'une lentille idéale de focale f .

On considère une optique chromatique constituée d'un doublet et d'une lentille idéale comme représenté à la figure 3. La fonction *fchrom.m* permet de calculer la focale de cet ensemble pour une longueur d'onde donnée, en fonction du rayon de courbure du doublet R et de la focale de la lentille idéale f .

- Tracer les variations de flou de défocalisation de l'optique chromatique pour les trois canaux R,V,B pour $R = 20$ mm, $f = 25$ mm, et pour un objet placé dans la plage de profondeur de 1 à 5 m, dans le visible. On prendra $\lambda_R = 0,605 \mu\text{m}$, $\lambda_V = 0,530 \mu\text{m}$, $\lambda_B = 0,465 \mu\text{m}$ et le capteur est positionné tel que la mise au point du canal vert soit $x_0^V = -2$ m.
- Comment varie le chromatisme lorsque R varie ?

3.5 Optimisation

- Utiliser les fonctions précédentes pour trouver la valeur du rayon de courbure du doublet de l'optique chromatique permettant d'avoir la profondeur de champ généralisée la plus grande (on gardera $f = 25\text{mm}$). A quel chromatisme (différence de focale entre le canal rouge et le canal bleu) cela correspond-t-il ? Tracer les variations de flous de défocalisation pour le réglage optimal.
- Que pensez-vous de cette approche de co-conception ?
- (Bonus) Optimiser aussi la position du détecteur, quel résultat obtenez-vous pour le couple (R, x'_0) optimal ?

References

- [AR09] A. Agrawal and R. Raskar. Optimal single image capture for motion deblurring. pages 2560–2567, 2009.
- [RAT06] Ramesh Raskar, Amit Agrawal, and Jack Tumblin. Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):795–804, July 2006.
- [TNT⁺08] C.L. Tisse, H.P. Nguyen, R. Tessières, M. Pyanet, and F. Guichard. Extended depth-of-field (EDoF) using sharpness transport across colour channels. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 7061, page 4, 2008.