

PHS2223

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
GÉNIE PHYSIQUE

Expérience 2 : Objectif de caméra

Auteurs :
Guillaume Sheehy
Fabien Picot
Tien Nguyen
Esmat Zamani

Sous la responsabilité de
Pr. Frédéric LEBLOND

27 août 2024

Table des matières

1	Introduction	2
2	Théorie	3
2.1	Objectif de caméra	3
2.1.1	Grossissement	3
2.1.2	Profondeur de champ	4
2.1.3	Vignettage	4
2.2	Optique matricielle	5
3	Expérience à réaliser	7
4	Travail préparatoire	8
5	Rapport final	9

1 Introduction

Les appareils de caméra moderne sont généralement constitués de deux éléments distincts, un capteur optique et un objectif. Le capteur est responsable de détecter la lumière incidente sur une matrice d'éléments semi-conducteurs (*CCD sensors*) alors que l'objectif de caméra a pour but de focaliser l'image sur le capteur. Des objectifs miniaturisés intégrés aux téléphones intelligents modernes coûtant quelques sous, aux objectifs de caméra de production cinématographique coûtant plusieurs dizaines de milliers de dollars, les objectifs de caméra viennent en tout genre pour une multitude de besoins. L'un des modèles d'objectif les plus utilisés est celui de l'objectif de caméra à zoom et focale ajustable prisé pour sa flexibilité et sa performance.

Le but de ce laboratoire est de caractériser un objectif de caméra constitué de trois lentilles. Vous devrez dans un premier temps vous familiariser avec plusieurs notions et concepts généraux d'optique géométrique. Puis, utiliser les méthodes quantitatives de l'optique matricielle, vous développerez un programme Python permettant d'établir les relations entre les grandeurs physiques caractéristiques du système (position et distances focales des lentilles, résolution, profondeur de champ, etc.). Enfin, vous procéderez à la caractérisation expérimentale du montage optique en capturant l'image de plusieurs objets et cibles de résolution.

2 Théorie

2.1 Objectif de caméra

Le rôle fondamental d'un objectif de caméra est de produire l'image réelle d'un objet arbitrairement éloigné à la surface d'un capteur optique (CCD, CMOS, film photographique). Lorsque le plan objet est conjugué à un plan image positionné sur le capteur optique, l'image formée est nette et est dite *au focus* par abus de langage.

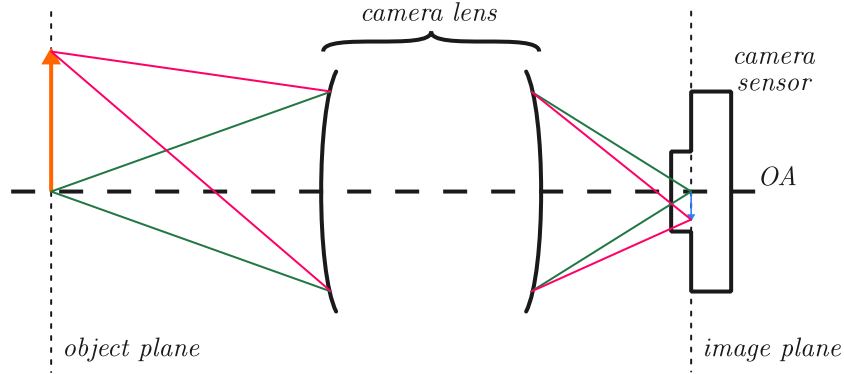


FIGURE 1 – Système de caméra fondamental

L'objectif de caméra le plus simple consiste en une seule lentille convergente placée devant le capteur de la caméra. Celle-ci permet de produire une image nette pour un plan objet unique. Si l'on veut pouvoir ajuster le focus de la caméra ainsi que d'obtenir un grossissement ajustable (zoom), il faut utiliser plusieurs lentilles et permettre l'ajustement de leurs positions relatives. L'objectif à zoom et focus ajustable le plus simple est constitué d'un minimum de 3 lentilles (Figure 2). La première lentille (L_1) est convergente et a une position fixe. La seconde lentille (L_2) est divergente, a une position ajustable et détermine le facteur de grossissement (avec L_1). La troisième lentille (L_3) est convergente, a une position ajustable et sert à ajuster le focus du système de caméra.

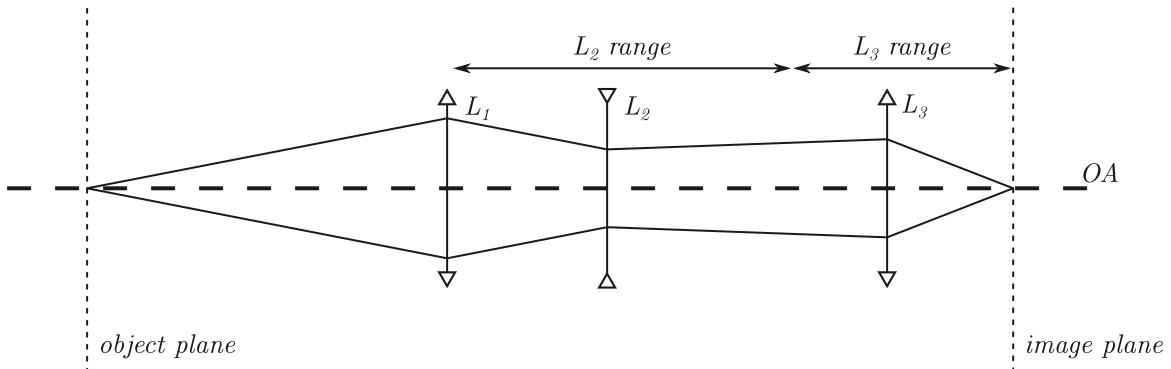


FIGURE 2 – Objectif de caméra à zoom et focus ajustable.

2.1.1 Grossissement

Contrairement à ce que peut suggérer la terminologie *zoom optique*, le grossissement engendré par un objectif de caméra est généralement toujours $|g| \ll 1$ afin de former l'image d'objets pouvant être très grands (personnes, maisons, paysages ...) sur de très petits capteurs ($\sim 1 \text{ cm}^2$). Par ailleurs, l'image (optique) formée sur le capteur par l'objectif est souvent inversée ($g < 0$), ce qui est généralement compensé en inversant aussi l'image numérique. Lorsqu'un objectif est muni d'un zoom ajustable, le

facteur de zoom correspond à l'agrandissement de l'image entre les positions extrêmes de la lentille de zoom ($X_{zoom} = g_{max}/g_{min}$).

2.1.2 Profondeur de champ

La profondeur de champ correspond à la distance entre l'objet le plus près et le plus éloigné qui apparaissent tous deux au focus sur une image.



(a) Petite profondeur de champ



(b) Moyenne profondeur de champ



(c) Grande profondeur de champ

FIGURE 3 – Exemple de différentes tailles de profondeur de champ. (image provenant de https://en.wikipedia.org/wiki/Depth_of_field)

La profondeur de champ (δ_z) d'un système de caméra peut être calculée théoriquement en considérant les composantes optiques de l'objectif ainsi que la taille des pixels (d_{pixel}) du capteur utilisé.

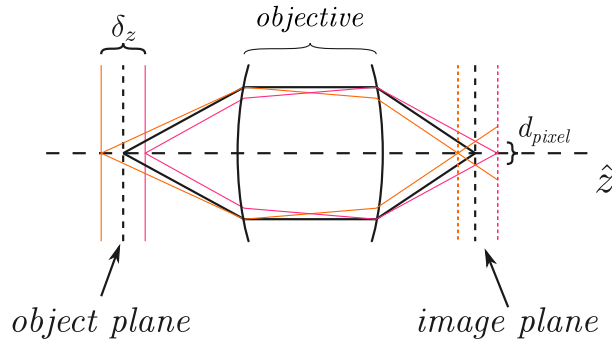


FIGURE 4 – Modèle théorique permettant d'estimer la profondeur de champ d'un système de caméra.

2.1.3 Vignettage

Le vignettage est un phénomène observé en photographie, et souvent utilisé pour raisons artistiques, caractérisé par une diminution de lumière en périphérie de l'image. Cette diminution de la quantité de lumière est liée à l'ouverture d'arrêt du système et aux rayons marginaux qui peuvent passer par l'objectif. Des exemples de vignettage sont montrés à la Figure 5.



(a) Peu de vignettage



(b) Beaucoup de vignettage

FIGURE 5 – Exemples de vignettage sur photographie. (image provenant de <https://en.wikipedia.org/wiki/Vignetting>)

2.2 Optique matricielle

L'optique matricielle est un formalisme puissant permettant de résoudre systématiquement plusieurs problèmes complexes d'optique géométrique tout en offrant une méthode de résolution numérique efficace basée sur l'algèbre linéaire. L'utilisation de ce formalisme est fondée sur le calcul du transfert de rayon entre un plan d'entrée (*input plane*) et un plan de sortie (*output plane*). Confiné dans le plan transverse (contenant l'axe optique), tout rayon passant par le plan d'entrée peut être complètement caractérisé par une hauteur x_1 et un angle θ_1 . De même, tout rayon passant par le plan de sortie est complètement caractérisé par une hauteur x_2 et un angle θ_2 .

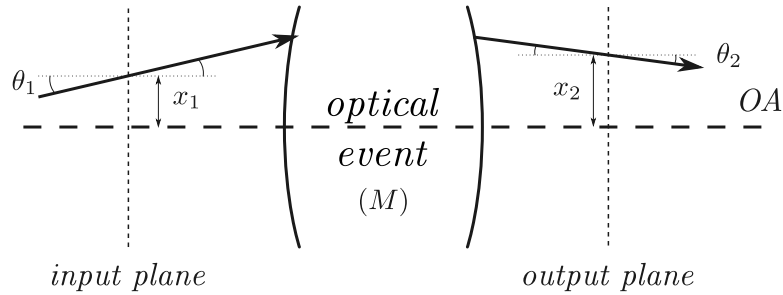


FIGURE 6 – Transfert de rayon en optique matricielle.

Ainsi, toute transformation appliquée à ce rayon doit pouvoir s'exprimer par une matrice 2×2 M par :

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}}_M \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ainsi, un rayon subissant plusieurs transformations ($M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots \rightarrow M_n$) s'exprime

TABLE 1 – Matrices de transfert.

Élément Optique	Matrice M
Propagation d dans un milieu d'indice constant	$\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Réfraction à une surface plane	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$
Réfraction à une surface courbe	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{Rn_2} & 1 \end{pmatrix}$
Lentille mince	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \underbrace{M_n \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1}_M \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Ici, M est la matrice ABCD du système complet et possède certaines propriétés intéressantes. Par exemple, si $A = 0$ alors $x_2 = B\theta_1$. Ceci implique que tout rayon entrant le système avec le même angle (onde plane venant de l'infini) vont passer par un point unique x_2 (focalisé) sur le plan de sortie. Des situations semblables se reproduisent dans le cas ou $B = 0$, $C = 0$ et $D = 0$.

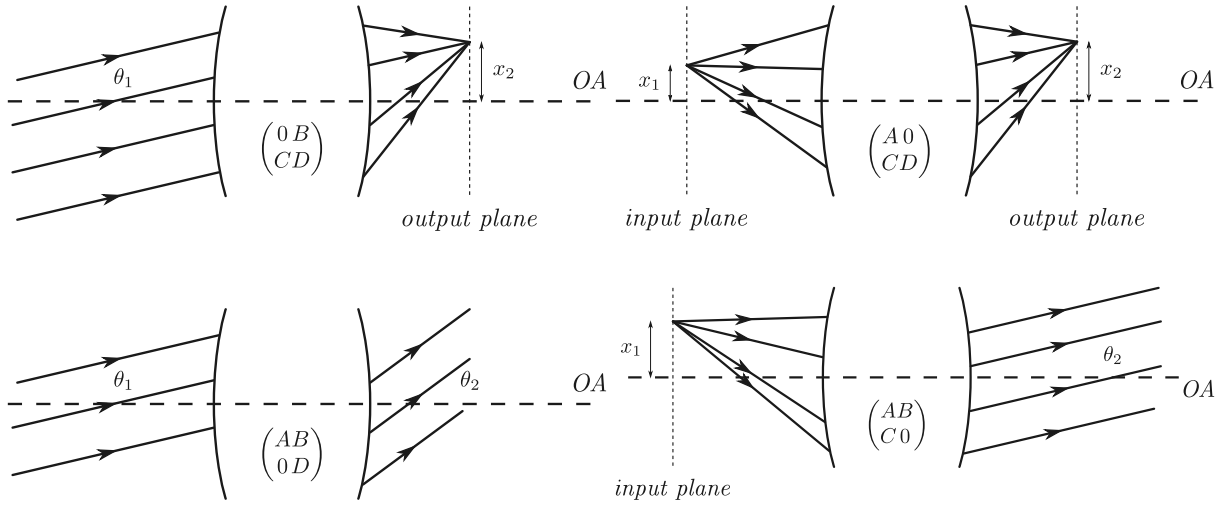


FIGURE 7 – Propriétés remarquables des systèmes optiques.

3 Expérience à réaliser

Le but de cette expérience est de caractériser un objectif de caméra à trois lentilles (Figure 2). Pour ce faire, vous devrez prendre plusieurs images de différents objets avec le système de caméra pour différentes positions de la lentille (voir section 4). Commencez par assembler et aligner le système de caméra en utilisant le matériel suivant,

- Lentille $L_1 = 150$ mm, $\phi_1 = 25.4$ mm
- Lentille $L_2 = -75$ mm, $\phi_2 = 25.4$ mm
- Lentille $L_3 = 75$ mm, $\phi_3 = 25.4$ mm
- Iris ajustable SM1D25
- Tube à lentille ajustable 75 mm (*zoom housing*) SM1NR1
- Plateforme de translation > 25 mm
- Caméra USB Thorlabs DDC1645C
- Pièces optomécaniques nécessaires (BA1, PH2, PH3, TR2, TR3, LMR1, ...)

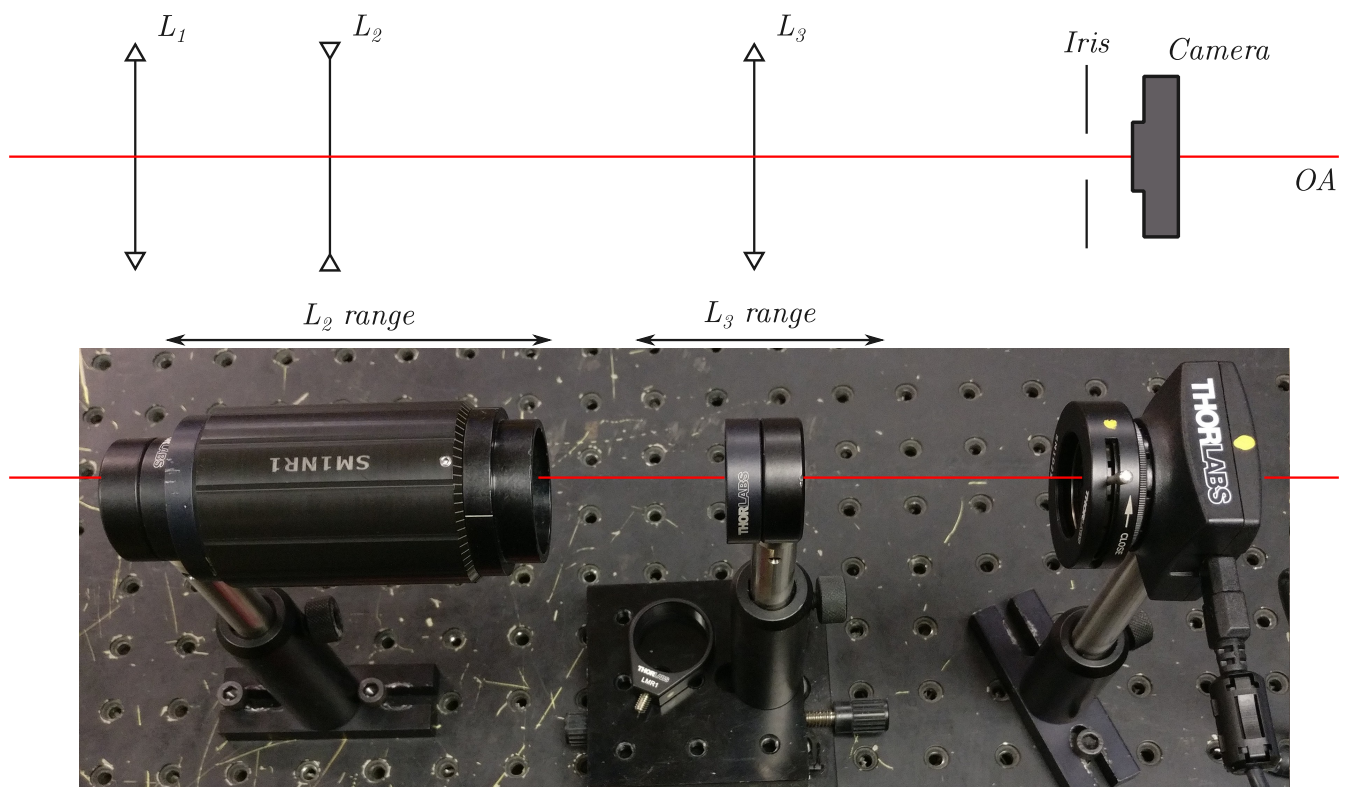


FIGURE 8 – Système de caméra avec objectif à zoom et focale ajustable.

Utilisez le logiciel *Thorcam* afin de prendre vos images. Sauvegardez vos images en format .png (ne jamais utilisez .jpeg pour des images scientifiques). Afin de faciliter votre utilisation de *Thorcam*, utilisez les configurations suivantes ;

- Frame rate \rightarrow max
- Gain \rightarrow auto
- Gainboost \rightarrow on
- White balance \rightarrow auto

4 Travail préparatoire

Vous devez remettre la première moitié de votre rapport de laboratoire **avant le début de la séance**. Cette première partie devra être constituée des sections ; introduction, théorie, méthodologie et hypothèse. La grille d'évaluation suivante sera utilisée pour noter cette partie du rapport.

Partie 1			
Sections	Eléments		
Introduction			/1
Théorie		0	/3
	Système de caméra		/1
	Modélisation matrice transfert		/2
Méthodologie		0	/3
	présentation du montage		/1
	explications		/1
	liste des images à prendre		/1
Hypothèse		0	/3
	Profondeur de champ		/1
	Résolution		/1
	Facteur de zoom		/1
Total		0	/10

Écrivez une courte introduction dans laquelle vous présentez le but de l'expérience, ce que vous allez mesurer ainsi que comment vous allez le mesurer. Présentez un résumé de vos attentes ainsi que du contenu global du rapport. Entrez directement dans le vif du sujet et n'écrivez pas une introduction trop longue (max 1/2 page).

Pour la section théorie, vous devrez reprendre les éléments pertinents qui vous permettent de modéliser un système de caméra à 3 lentilles à l'aide de la méthode des matrices de transfert de rayon. Nous conseillons d'écrire un programme Python (jupyter notebook) permettant de calculer les solutions numériques nécessaires à faire vos hypothèses. Expliquer aussi le fonctionnement de base de ce type d'objectif de caméra (à quoi sert chaque lentille ? Pourquoi permettre de les déplacer?...)

Pour la section méthodologie, vous devrez présenter un schéma du montage et expliquer les manipulations que vous prévoyez devoir faire. Vous devez déterminer quelles sont les images que vous devrez prendre afin de pouvoir déterminer expérimentalement chaque élément demandé pour la deuxième partie du rapport. Pour chacune, décrivez la configuration de l'objectif (positions des lentilles L_2 et L_3) ainsi que l'objet imagé et sa position. **Cette étape est cruciale** pour votre préparation à cette expérience.

Pour la section hypothèse, vous devrez utiliser un programme Python vous permettant de modéliser le système optique de l'objectif de caméra. Vous devrez ensuite vous servir de cet outil afin de calculer numériquement des prédictions pour la profondeur de champ, la résolution et du grossissement. Présentez les graphiques suivants,

- Courbe du grossissement vs position de la lentille L_2 .
- Courbe de la résolution vs position de la lentille L_2 .
- Courbe de la profondeur de champ vs position de la lentille L_2 .

De plus, vous devrez estimer le facteur de Zoom (X_{zoom}) du système (utilisez le graphique du grossissement).

Pour les fins de la modélisation, vous pouvez assumer :

- Que la distance entre la lentille L_1 et la caméra est fixée à 197 mm.
- L'objet est positionné à 1 m de la lentille L_1 .

5 Rapport final

Vous devez remettre la seconde moitié de votre rapport de laboratoire une semaine après la séance. Cette seconde partie devra être constituée des sections ; résultats, discussion et conclusion. La grille d'évaluation suivante sera utilisée pour noter cette partie du rapport.

Partie 2			
Sections	Eléments		
Résultats		0	/5
	profondeur de champ		/1
	analyse de résolution		/1
	vignetting		/1
	facteur de zoom		/1
	tableau des caractéristiques		/1
Discussion		0	/4
	hypothèses vs résultats		/1
	causes d'erreur possibles		/1
	réponses aux questions		/2
Conclusion			/1
Total		0	/10

Pour votre section résultats, vous devez montrer les images prises avec la caméra qui vous permettent ou vous ont permis de mesurer expérimentalement les caractéristiques du système suivantes ;

- La profondeur de champ à 1 m (2 positions extrêmes du zoom)
- La résolution à 1 m (2 positions extrêmes du zoom)
- Mesure du vignetting à 1 m et à ∞ (2 positions extrêmes du zoom)
- Image d'objet à l'infini (2 positions extrêmes du zoom)
- Facteur de zoom du système ($X = g_{max}/g_{min}$)

Décrivez les caractéristiques et la performance du système de caméra et présentez les résultats importants dans un tableau.

Pour votre discussion, commencez par expliquer les différences que vous observez entre les caractéristiques que vous avez estimées théoriquement lors de votre hypothèse et celles que vous avez mesurées. Expliquez ensuite quelles sont les raisons possibles de ces différences. Portez une attention particulière entre les composantes présentes dans la simulation et celles présentes dans le montage réel. Finalement, répondez aux questions suivantes sous forme de texte continu ;

- À quoi sert l'iris dans ce système ? À quoi servent-elles dans des objectifs de caméra commerciale (Nikon, Canon, ...) ? Sont-elles toujours nécessaires ?
- Quelles sont les aberrations optiques les plus fréquentes chez les systèmes de caméra ? Pourquoi ? Comment pouvons-nous les corriger ?