

Schlieren à décalage de phase (Phase-Shifting Schlieren¹) pour des mesures de profil à haute résolution

Luc Joannes, Didier Beghin, Sébastien Farrinoti,
Renaud Ligot, Olivier Dupont

Lambda-X, Av. F. Roosevelt 50, CP 165/62, B-1050 Bruxelles
(Belgique)

e-mail : ljoannes@lambda-x.com

Nous proposons une technique de Schlieren modifiée de façon à permettre des mesures quantitatives à hautes résolutions. L'utilisation d'un filtre de Schlieren particulier permet de générer des franges de Schlieren (*Schlieren Fringes*) qui peuvent ensuite être décalées de façon à utiliser un algorithme de décalage de phase (*Phase-Shifting*) généralement mis en œuvre en interférométrie. La phase de Schlieren (*Schlieren Phase*) est ensuite convertie en déviation angulaire.

La technique a été validée sur un objet de référence et utilisée pour mesurer le profil de surfaces liquides.

Ces deux mesures ont démontré que cette nouvelle technique pouvait devenir concurrentielle par rapport à l'interférométrie avec l'avantage d'avoir une sensibilité et dynamique variable.

1. Introduction

La technique de Schlieren est très populaire car elle permet de visualiser avec une instrumentation très simple et peu coûteuse des déviations de faisceaux lumineux produites par des gradients de densité ou de température dans un fluide, ou par réflexion sur une surface réfléchissante [1].

Malgré le succès de la technique, des mesures quantitatives ne sont possibles qu'au prix d'une calibration lourde prenant en compte les propriétés de tous les éléments (source lumineuse, filtre, caméra, ...). Cette calibration doit être répétée à chaque modification d'un des éléments de l'équipement.

Nous proposons une alternative qui permet de réduire de façon considérable la tâche de calibration. Elle offre en outre de très hautes résolutions tout en gardant tous les avantages de la technique de Schlieren conventionnel.

2. Principe

La technique PSS (*Phase-Shifting Schlieren*) est basée sur un arrangement conventionnel de Schlieren. Elle peut être implémentée soit en transmission, soit en réflexion.

La Figure 1 montre une vue schématisée du système optique fonctionnant en réflexion.

¹ Patent pending

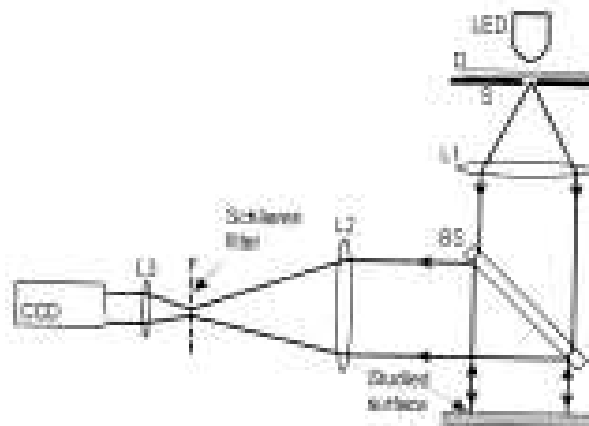


Figure 1 : Vue schématique du montage de Schlieren fonctionnant en réflexion.
 (LED=Light Emitting diode; D=diffuseur; S=Fente; BS=Beam-splitter; L=Lentilles).

La source lumineuse est composée d'une diode électroluminescente (LED), un diffuseur et une fente ajustable. Le faisceau, collimaté par la lentille L1, traverse le séparateur de faisceau (BS), est réfléchi par la surface étudiée et ensuite en partie par le séparateur de faisceau en direction du système d'imagerie. La surface étudiée est imagée sur la caméra (CCD) par les lentilles L2 et L3. Le filtre de Schlieren est localisé au plan focal de la lentille L2 (aussi appelée Lentille de Schlieren).

En Schlieren conventionnel proposé par Töpler, un couteau est utilisé comme filtre (Figure 2a). Une courbe typique décrivant l'intensité lumineuse sur la caméra CCD en fonction de l'angle du faisceau lumineux α est reprise en Figure 2b. La dynamique de mesure est déterminée par la longueur focale f_2 de la lentille de Schlieren et la taille d de l'image de la source.

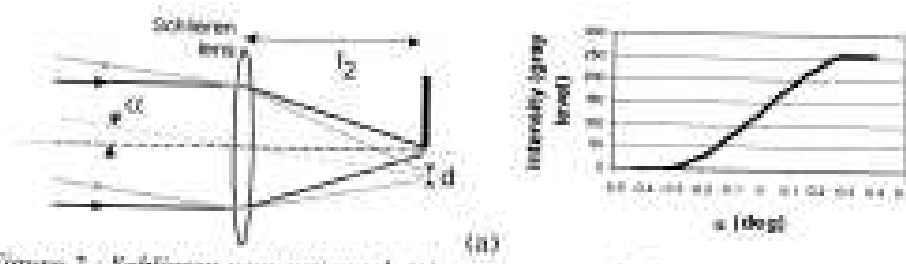


Figure 2 : Schlieren conventionnel. (a): arrangement incluant un couteau ; (b): Courbe de réponse typique.

En Schlieren à décalage de phase, le filtre est un élément périodique, typiquement un élément avec une transmission sinusoidale (Figure 3a). Par une adaptation de la taille de la source lumineuse à la période du filtre, il est possible d'obtenir une courbe de réponse sinusoidale (Figure 3b).



Figure 3 : Phase-Shifting Schlieren (a) Filtré périodique ; (b) Courbe de réponse.

Cet ajustement permet de générer des franges (Schlieren fringes) [2] qui vont pouvoir être exploitées comme en interférométrie classique. Une frange correspond à une dynamique de déviation angulaire α , qui dépend de la période du filtre de Schlieren et de la focale f_2 de la lentille de Schlieren suivant :

$$\tan(\alpha_s) = \frac{\lambda}{f_2} \quad (1)$$

L'angle α_s est indépendant de l'extension de la source qui n'influence que la visibilité et la forme des franges de Schlieren.

Dans le cas d'une réponse sinusoïdale, l'intensité sur la caméra CCD s'écrit :

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\phi(x, y)) \quad (2)$$

où (x, y) définit la coordonnée du pixel sur l'image. La phase est directement déterminée par l'angle du faisceau :

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} (f_2 \tan(\alpha(x, y))) \quad (3)$$

Une fois les franges générées, elles peuvent être décalées en phase en déplaçant le filtre dans son propre plan. Considérons 5 images décalées en phase de $\pi/4$ de période :

$$I_i(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\phi(x, y) + i\varphi) \quad (4)$$

avec $i = 1, 2, \dots, 5$ et $\varphi = \pi/4$. Par application de l'algorithme de calcul de phase de Hariharan [3], la phase peut être extraite pour chaque pixel :

$$\tan[\phi(x, y)] = \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \quad (5)$$

La phase (modulo 2π) doit être déroulée pour obtenir la carte de déviation angulaire. Dans le cas où les déviations angulaires sont produites par réflexion sur une surface réfléchissante, le profil de la surface peut en être déduit par intégration numérique.

Validation expérimentale

La première validation de la technique a consisté à mesurer le profil et le rayon de courbure d'une surface de lentille. Le montage en réflexion est utilisé (Figure 1) ; la lentille de Schlieren a une longueur focale de 300mm et le filtre une période de 1.6mm. La dynamique angulaire correspondant à une frange de Schlieren est donc de 0.306° .

Le faisceau optique est réfléchi par la surface de la lentille ; l'angle de déviation α dépend de la position d'impact par rapport au centre de la lentille (Figure 4) :

$$\alpha = 2 \arcsin\left(\frac{d}{R}\right)$$

(6)



Figure 4 : Angle du faisceau réfléchi par une lentille à la surface d'une lentille.

Une distribution angulaire continue est donc produite par réflexion sur la surface de la lentille, produisant une série de franges de Schlieren linéaire dont l'orientation est déterminée par celle des lignes dans le filtre de Schlieren. La Figure 5a montre une des images de franges. Après acquisition de 5 images décalées en phase, une image de phase est calculée (Figure 5b).

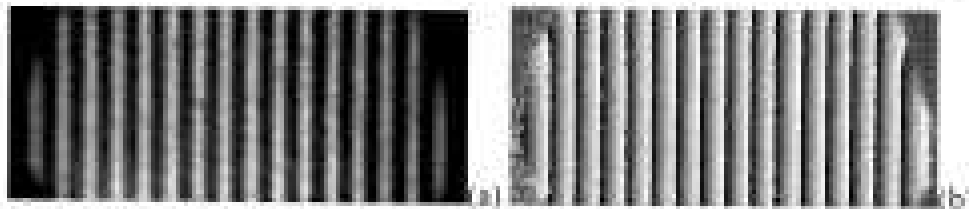


Figure 5 : Franges de Schlieren produite par une lentille (a), et phase correspondante (b).

La phase est alors convertie en déviation angulaire. La Figure 6 montre la déviation angulaire en fonction de la position sur la lentille (courbe obtenue à partir d'une ligne horizontale au centre de l'image de la Figure 5). Nous en avons déduit un rayon de courbure de la lentille de 917mm. Une mesure du rayon de courbure à l'aide d'un sphéromètre nous donne 925mm. L'erreur est donc inférieure à 1%.

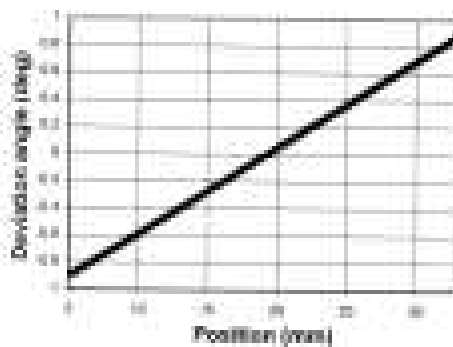


Figure 6 : Déviations angulaire mesurée en fonction de la position.

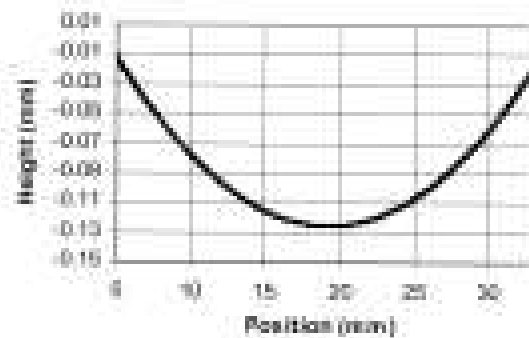


Figure 7 : Profil de la surface de la lentille.

Le profil de la lentille (Figure 7) a été calculé par intégration de la courbe de la Figure 6. Notez que la position pour laquelle la déviation angulaire est nulle a été choisie arbitrairement.