



**HAL**  
open science

# Conception d'un capteur catadioptrique pour une observation optimale du conducteur et de la scène de conduite

Jean-Francois Layerle, Xavier Savatier, Jean-Yves Ertaud, El Mustapha Mouaddib

► **To cite this version:**

Jean-Francois Layerle, Xavier Savatier, Jean-Yves Ertaud, El Mustapha Mouaddib. Conception d'un capteur catadioptrique pour une observation optimale du conducteur et de la scène de conduite. ORASIS'09 - Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, 2009, Trégastel, France, France. inria-00404611

**HAL Id: inria-00404611**

**<https://inria.hal.science/inria-00404611>**

Submitted on 16 Jul 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Conception d'un capteur catadioptrique pour une observation optimale du conducteur et de la scène de conduite

## Design of a Catadioptric Sensor for an Optimal Observation of the Driver and the Road Scene

Jean-François Layerle<sup>1,2</sup>    Xavier Savatier<sup>1</sup>    Jean-Yves Ertaud<sup>1</sup>    El Mustapha Mouaddib<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Recherche en Systèmes EMbarqués (IRSEEM)

<sup>2</sup>Laboratoire Modélisation, Information et Systèmes (MIS) - Université de Picardie Jules Verne

{layerle,savatier,ertaud}@esigelec.fr  
mouaddib@u-picardie.fr

### Résumé

Dans cet article, nous présentons la conception et l'évaluation d'un système de vision permettant l'observation simultanée de l'activité oculaire du conducteur et de la scène de conduite. Ce dispositif est destiné à être intégré dans un système d'aide à la conduite afin d'exploiter la corrélation entre la direction du regard du conducteur et la scène routière. Le capteur est basé sur une configuration catadioptrique combinant deux surfaces différentes de miroir. L'une permet de capturer une vue panoramique de l'environnement intérieur et extérieur du véhicule. L'autre a été conçue pour obtenir une résolution suffisante pour le suivi des yeux du conducteur. Avec ce nouveau capteur, le visage du conducteur peut être observé suivant deux points de vue différents sur la même image et permet ainsi d'envisager une perception 3D par stéréovision. La conception est validée avec une étude de la précision de reconstruction.

### Mots Clef

Vision catadioptrique, conception de miroirs, système d'aide à la conduite.

### Abstract

In this paper, we propose the design and the evaluation of a new compact vision system to capture simultaneously the driver eye activity and the road scene. This device will be embedded in a driver assistant system to correlate the driver gaze direction and the road scene. The sensor is based on a catadioptric configuration combining two different mirror shapes. One allows the capture of a panoramic view inside and outside the vehicle. The other was designed to obtain a sufficient resolution for an eye tracking of the driver. With this new sensor, the driver face can be observed following two different point of view on the same image : a 3D perception by stereovision can be

considered. The design is validated with the study of the reconstruction accuracy.

### Keywords

Catadioptric Vision, Mirror Design, Driver Assistant System.

## 1 Introduction

L'émergence des systèmes de vision dans le véhicule permet d'accroître la perception de son environnement. De plus, un grand nombre de fonctionnalités peut être associé à un même capteur observant l'extérieur du véhicule (détection de piétons ou d'obstacles, franchissement de lignes, reconnaissance de la signalétique) ou l'intérieur (détection des passagers pour l'activation de l'airbag, authentification du conducteur, détection de la fatigue ou analyse de la direction de son regard). La vigilance du conducteur est un paramètre critique en sécurité routière. En France, l'hypovigilance (baisse ou détournement de l'attention) est responsable de 30% des accidents sur autoroute et de 15% sur l'ensemble des accidents [9]. La vigilance est étroitement liée à l'activité oculaire du conducteur (d'après l'ASNAV<sup>1</sup>, plus de 90% des décisions nécessaires au contrôle d'un véhicule dépendent des yeux du conducteur).

Le dispositif de vision d'un système d'aide à la conduite doit être efficace pour surveiller l'attention du conducteur. La perception du dispositif doit inclure un maximum d'informations pertinentes sur :

- l'environnement (infrastructure routière, trafic, piétons, signalétique) avec un champ de vue aussi large que possible (incluant celui du conducteur et les angles morts),
- le conducteur (pose du visage et mouvements des pupilles).

<sup>1</sup>www.asnav.org

De plus, le dispositif doit être non intrusif et compact (pour éviter de gêner le conducteur dans sa tâche), capable d'observer les yeux avec une résolution suffisante et capable de capturer la scène de conduite et l'environnement du véhicule en temps réel.

Afin d'intégrer un dispositif plus compact dans le véhicule, nous proposons la conception d'un nouveau capteur de vision pour observer simultanément avec une seule caméra la scène routière et l'habitacle. Basé sur une combinaison de deux surfaces réfléchissantes, nous obtenons à la fois une vue panoramique de l'environnement du véhicule et une vue du visage du conducteur avec une résolution suffisante pour pouvoir estimer la direction de son regard. De plus, avec une approche stéréovision, une reconstruction 3D de points d'intérêts est envisagée afin d'estimer l'orientation du visage et reprojeter un vecteur regard dans la vue panoramique.

## 2 Systemes de vision pour l'observation du conducteur

On distingue deux types de dispositif pour l'observation du conducteur. Les dispositifs montés sur la tête permettent d'obtenir les meilleures performances mais sont très intrusifs pour la conduite. Ils sont utilisés uniquement dans un contexte d'expérimentation pour des travaux de recherche et ne conviennent pas pour des systèmes d'aide à la conduite. Les dispositifs déportés (la caméra est généralement placée sur le tableau de bord en direction du conducteur) sont non intrusifs, moins précis mais ne gênent pas le conducteur dans sa tâche. Ils sont bien adaptés pour s'intégrer dans un système d'aide à la conduite.

### 2.1 Caméras perspectives classiques

Plusieurs dispositifs non intrusifs sont proposés aujourd'hui sur le marché. Le système Antisleep<sup>2</sup> [2] est composé d'une seule caméra et d'une illumination infrarouge et permet d'estimer la position de la tête du conducteur, la fermeture de ses yeux et la direction de son regard avec une précision de  $\pm 10^\circ$ . Le système le plus performant actuellement est le dispositif Facelab<sup>3</sup>. Ce système de vision est constitué d'une paire stéréo de caméras pour capturer la tête du conducteur. La pose 3D du visage et la direction du regard sont estimés en temps réel avec une précision de  $\pm 3^\circ$ . Le système doit être couplé à un autre capteur pour la route. Dans [4], le dispositif FaceLAB est complété par un système CeDAR (paire stéréo de caméra) pour observer la scène de conduite. L'ensemble permet de corréler la signalétique, le regard et les actions du conducteur. Néanmoins, la taille et le nombre de capteurs (au moins quatre caméras à l'intérieur du véhicule) ne permettent pas de définir le système comme non intrusif. De plus, l'utilisation de caméras perspectives dont le principal inconvénient est d'avoir un champ de vue limité, n'autorise pas une ob-

servation de tout l'environnement du véhicule avec un minimum de caméras.

### 2.2 Caméras catadioptriques

Une solution pour augmenter le champ de vue avec une seule caméra est l'utilisation d'un capteur catadioptrique (association de miroirs et de lentilles). Largement utilisée depuis une dizaine d'années en robotique mobile, cette solution permet d'avoir, en une seule prise, une image panoramique de la scène.

Récemment, l'intérêt des systèmes catadioptriques dans un véhicule a été illustré par [18] pour augmenter le champ de vue extérieur à différentes positions (sur le toit [6], sous les rétroviseurs extérieurs [3] ou intérieurs [8], à l'avant ou à l'arrière). Dans [12], les auteurs ont placé le système dans l'habitacle pour estimer l'orientation du visage afin de déterminer ce qu'il regarde dans la scène. Notre approche est similaire mais nous proposons une solution permettant d'augmenter la résolution du visage du conducteur.

En effet, ce type de capteur présente un facteur limitant : la faible résolution de ses images. L'information acquise est plus importante que pour une caméra classique mais la taille du plan image reste la même avec, de plus, une utilisation partielle (60% du plan image). La résolution des capteurs catadioptriques classiques n'est pas non plus constante.

### 2.3 Une nouvelle solution

A partir des éléments précédents, nous proposons la conception d'une nouvelle configuration catadioptrique combinant deux formes différentes de miroir, l'une pour obtenir une vue panoramique de la scène de conduite et l'autre pour augmenter la résolution de la capture du conducteur.

## 3 Conception d'un nouveau système catadioptrique pour estimer la direction du regard

La formation des images d'un système catadioptrique est déterminée par la forme du (des) miroir(s). La conception dépend alors des propriétés géométriques de projection désirées pour l'application.

Dans les travaux de [1], les auteurs ont défini une classe de miroirs vérifiant la théorie du point de vue unique. Cette contrainte d'unicité du point de vue permet d'assurer une projection centrale des rayons de l'environnement et ainsi, par exemple, de faciliter le dépliement des images panoramiques. D'autres travaux ont été proposés pour obtenir des caractéristiques de projection en résolution constante [5], [7] et [11]. Dans tous ces cas, les miroirs ont toujours une symétrie centrale afin de simplifier leur modèle analytique et leur fabrication.

Dans les travaux de [10], la méthode de la surface fixe a été proposée pour concevoir un miroir à partir d'une projection définie. La méthode est basée sur une formulation différentielle du champ de normales à la surface du miroir.

<sup>2</sup>SmartEye : Antisleep 2.0 ([www.smarteye.se](http://www.smarteye.se))

<sup>3</sup>Seeing Machines : FaceLAB 4 ([www.seeingmachines.com](http://www.seeingmachines.com))

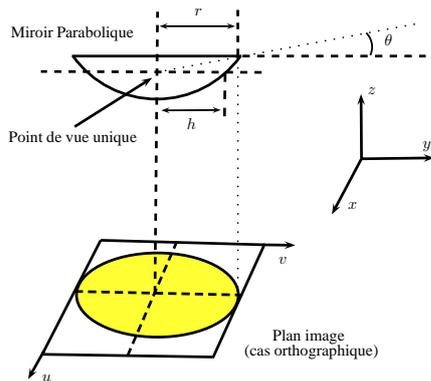


FIG. 1 – Miroir parabolique avec le paramètre  $h$ , le rayon  $r$  et l'angle supérieur du champ de vue  $\theta$ .

Une approche similaire a été considérée dans [17] avec une approximation de la surface par des fonctions splines. Ces méthodes permettent de concevoir une classe beaucoup plus large de miroirs (symétriques ou non, avec ou sans point de vue unique).

### 3.1 Conception des miroirs pour une observation optimale du conducteur et de la scène de conduite

Parmi les solutions de conception de miroirs, le système de réflexion du nouveau capteur a été réalisé en combinant :

- l'approche classique de [1] pour la vue panoramique (un point de vue unique facilitera la projection du regard du conducteur sur la scène),
- la méthode de la surface fixe proposée par [10] afin d'augmenter la résolution du visage du conducteur avec un second miroir.

**Vue panoramique.** Pour capturer tout l'environnement du véhicule et conserver une projection centrale, le choix s'est porté sur une surface parabolique. Ce type de miroir (1), de paramètre  $h$ , permet d'avoir moins de contraintes d'alignement sur le plan  $Oxy$  et un modèle géométrique simple notamment pour la calibration. De plus, l'utilisation d'une optique télécentrique facilite la conception du second miroir.

$$z = \frac{x^2 + y^2}{2h} - \frac{h}{2} \quad (1)$$

La position du capteur dans le véhicule influence directement la conception du miroir panoramique. Dans notre cas, la capture des yeux du conducteur doit être effectuée en évitant de gêner son champ de vue. Un compromis doit donc être trouvé entre les caractéristiques du véhicule (dimensions du tableau de bord et des équipements), les informations à capturer dans la scène (conducteur, véhicules, piétons, signalétique), les caractéristiques des lentilles télécentriques (limitations sur le rayon du miroir) et l'usage des miroirs. A partir de (1) et des remarques précédentes, le paramètre  $h$  du paraboloïde est déterminé par (2).



FIG. 2 – Une portion d'autoroute avec différents véhicules dont celui du centre contient le capteur catadioptrique

$$h = r \left( \sqrt{\tan^2 \theta + 1} - \tan \theta \right) \quad (2)$$

Un autre paramètre, la hauteur du miroir, dépend de  $r$ ,  $\theta$  et  $h$  et doit être choisi par rapport à la profondeur de champ disponible avec les optiques télécentriques.

L'évaluation du système a été faite par des simulations dans un environnement de ray-tracing. La scène de conduite (Figure 2) représente une portion d'autoroute avec différents véhicules dont celui du centre contient le dispositif catadioptrique. Une simulation du capteur avec un miroir parabolique est proposé sur la figure 3.

Une vue panoramique dans le véhicule permet de capturer l'ensemble de son environnement intérieur et extérieur (conducteur, passagers, route, angles morts). Cependant, la faible résolution du visage du conducteur ne permet pas d'estimer la direction de son regard. Pour une caméra VGA ( $640 \times 480$ ), la résolution du visage est de seulement  $70 \times 70$  pixels avec  $3 \times 3$  pixels pour chaque oeil. Sachant que la rotation de l'oeil est d'environ  $70^\circ$  dans toutes les directions, on ne pourra obtenir qu'une précision d'environ  $20^\circ$  par pixel. Il est à noter que le centre de l'image est inutile (capture du tableau de bord et en dessous). De plus, en pratique, cette zone centrale est inutilisable à cause de la réflexion de la caméra sur le miroir. Afin de conserver un dispositif compact, cette zone pourra donc être utilisée pour une nouvelle forme de miroir permettant d'augmenter cette résolution des yeux du conducteur pour une estimation précise du vecteur regard.

**Vue dédiée conducteur.** Une bonne précision pour le suivi du regard implique un champ de vue très restreint sur les yeux du conducteur alors que la capacité à suivre un maximum de mouvements de la tête nécessite un plus large champ de vue.

Une grande partie des systèmes actuels utilisent plusieurs caméras pour estimer le vecteur regard. Une à deux caméras à champ large permettent de déterminer l'orientation 3D de tête (donnant une approximation de la direc-

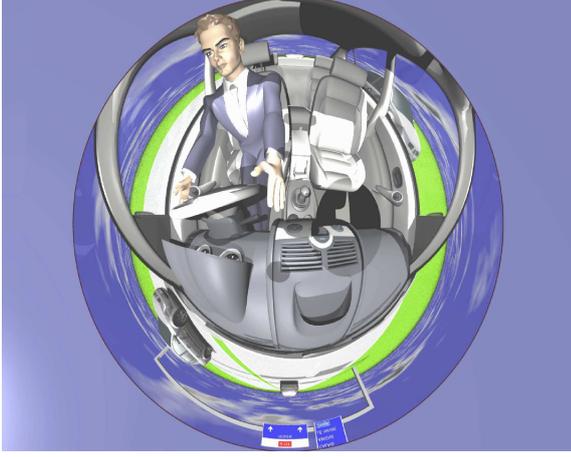


FIG. 3 – Miroir parabolique avec  $r = 3\text{cm}$  et  $\theta = 17^\circ$  :  $h = 2.235$ .

tion du regard à  $10 - 15^\circ$  près) et la localisation des yeux dans les images. Une autre caméra à champ restreint sur un oeil est spécifique pour une estimation très précise de la direction du regard (à partir d'un modèle 3D de l'oeil). Le compromis champ de vue large et haute résolution sur les yeux est difficile à obtenir avec une seule caméra. Cependant, les travaux de [14] ont montré qu'une résolution minimale de 15 pixels sur un oeil permet d'obtenir des erreurs de suivi inférieures à 10%. De plus, dans les travaux de [13] l'estimation de la position du regard d'un conducteur en situation est précise à  $3.2^\circ$  avec une seule caméra. Nous pouvons donc envisager le suivi du regard avec la caméra précédente et un second miroir dédié pour augmenter la résolution insuffisante du visage de la vue panoramique.

Une solution simple consisterait à placer un miroir plan. Cependant, dans le cas orthographique, le champ de vue est défini par la taille du miroir. Pour cette application, ce champ de vue n'est pas suffisant pour capturer le visage complet du conducteur.

La forme du miroir dédié à la vue du conducteur a donc été définie en utilisant la méthode de la surface fixe de [10]. Afin de simplifier par la suite les équations aux dérivées partielles introduites par la méthode, il est souhaitable de poser le problème sous la forme suivante (Figure 4).

Une portion de l'espace (plan objet de dimension  $(\beta \times \beta)$ ) positionnée avec un angle  $\theta$  par rapport à l'axe  $x$  et à une distance  $k$  par rapport à l'origine est projetée sur le plan image de dimension  $(\alpha \times \alpha)$ . La surface du miroir a pour origine  $(0, 0, 0)$ . Le plan image est positionné à  $z = -c$  avec  $c > 0$  parallèlement au plan  $Oxy$  (le cas d'une projection orthographique permet de simplifier les équations grâce à l'invariance verticale sur l'axe  $z$ ). La méthode permet de trouver une surface de réflexion  $z = f(x, y)$  telle que la projection entre le plan objet et le plan image soit de la forme (3).

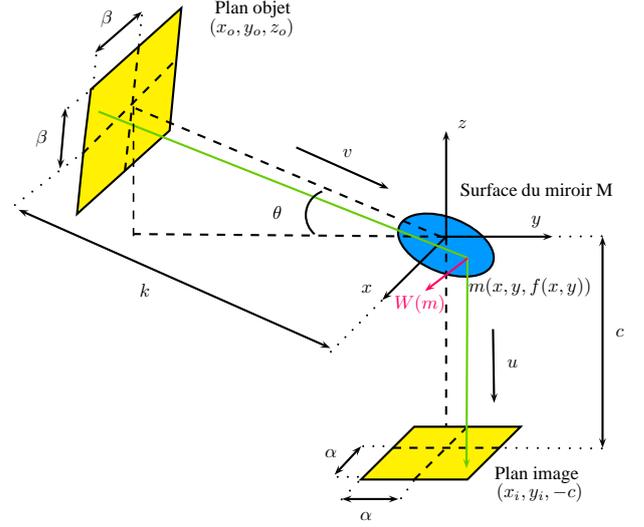


FIG. 4 – Projection pour l'observation du conducteur (plan objet) sur le plan image

$$\begin{bmatrix} \frac{\beta}{\alpha}x \\ -k \cos \theta - \frac{\beta}{\alpha}y \sin \theta \\ -k \sin \theta + \frac{\beta}{\alpha}y \cos \theta \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Un rayon intersectant le plan image en un point  $(x, y, -c)$  et provenant du plan objet à partir d'un point  $(\frac{\beta}{\alpha}x, -k \cos \theta - \frac{\beta}{\alpha}y \sin \theta, -k \sin \theta + \frac{\beta}{\alpha}y \cos \theta)$ , intersecte la surface du miroir en un point  $m = (x, y, f(x, y))$ . La normale en ce point d'intersection  $\mathbf{W}(m)$  est défini par (4), en posant  $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$  et  $f_y = \frac{\partial f}{\partial y}$ .

$$\mathbf{W}(m) = \frac{1}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2 + 1}} \begin{bmatrix} -f_x \\ -f_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dans le cas d'une projection orthographique, tous les rayons entre le miroir et le plan image de la caméra sont parallèles au vecteur  $\mathbf{u} = [0, 0, -1]^T$ . Soit  $\mathbf{v}$  le vecteur directeur du rayon entre le plan objet et le miroir. Pour une réflexion spéculaire sur le miroir, la loi de Snell-Descartes pour la réflexion implique que les vecteurs  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{v}$  et  $\mathbf{W}(m)$  soient coplanaires et que l'angle d'incidence soit égal à l'angle de réflexion. On déduit alors une expression pour  $\mathbf{v}$  sous la forme (5).

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} - 2(\mathbf{u} \cdot \mathbf{W}(m))\mathbf{W}(m) = \begin{bmatrix} -2f_x(f_x^2 + f_y^2 + 1)^{-1} \\ -2f_y(f_x^2 + f_y^2 + 1)^{-1} \\ 2(f_x^2 + f_y^2 + 1)^{-1} - 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

On peut également exprimer le rayon incident provenant du plan objet  $(\frac{\beta}{\alpha}x, -k \cos \theta - \frac{\beta}{\alpha}y \sin \theta, -k \sin \theta + \frac{\beta}{\alpha}y \cos \theta)$  et intersectant le miroir en  $m = (x, y, f(x, y))$  avec  $d$  la distance entre un point du plan objet et le miroir :

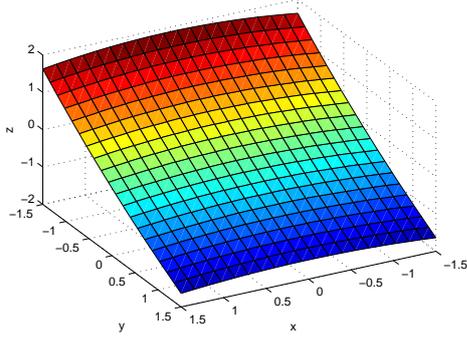


FIG. 5 – Miroir de forme concave pour l’observation du conducteur :  $\alpha = 1.5cm$ ,  $\beta = 13cm$ ,  $k = 55cm$  et  $\theta = 6^\circ$ .

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ f(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\beta}{\alpha}x \\ -k \cos \theta - \frac{\beta}{\alpha}y \sin \theta \\ -k \sin \theta + \frac{\beta}{\alpha}y \cos \theta \end{bmatrix} + d \mathbf{v} \quad (6)$$

Il est possible de simplifier le système en prenant comme hypothèse que le plan objet observé est à l’infini ( $k \rightarrow \infty$ ). On pose alors  $\beta = \lambda k$  avec  $\lambda = \tan \frac{\gamma}{2}$  et  $\gamma$  le champ de vue dédié à l’observation du conducteur. On obtient un système de 2 équations ne pouvant pas aboutir à une solution exacte (7).

$$\begin{cases} f_y \frac{\lambda}{\alpha} x + (\cos \theta + \frac{\lambda}{\alpha} y \sin \theta) f_x = 0 \\ 2f_y (-\sin \theta + \frac{\lambda}{\alpha} y \cos \theta) - (\cos \theta + \frac{\lambda}{\alpha} y \sin \theta) (1 - f_x^2 - f_y^2) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Dans [10], les auteurs considèrent une solution approchée  $f$  de forme polynomiale et satisfaisant la première équation du système :  $f(x, y) = \sum_{i=1}^n c_i (-\frac{\lambda}{2} x^2 + \alpha y \cos \theta - \frac{\lambda}{2} y^2 \sin \theta)^i$ . Les coefficients  $c_i$  sont déterminés par minimisation de la fonctionnelle (8).

$$\mathcal{G}(f) = \iint \left( 2f_y (-\sin \theta + \frac{\lambda}{\alpha} y \cos \theta) - (\cos \theta + \frac{\lambda}{\alpha} y \sin \theta) (1 - f_x^2 - f_y^2) \right)^2 dx dy \quad (8)$$

Pour une position donnée du catadioptré et du conducteur, il est possible de définir les valeurs  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  et  $k$  pour déduire  $\lambda$ . A partir d’une forme polynomiale cubique, la méthode de Nelder-Mead a été appliquée pour minimiser (8). Le domaine d’intégration est défini par la région d’intérêt dédiée à la vue du conducteur sur le plan image. Un résultat de l’application de la méthode de la surface fixe est proposé sur la figure 5.

**Système catadioptrique complet.** La position du capteur n’est pas exactement en face du conducteur. Une rotation autour de l’axe  $z$  est nécessaire pour l’observer. Une simulation du dispositif complet est proposé sur les figures 6 et 7. Le prototype du miroir et quelques exemples

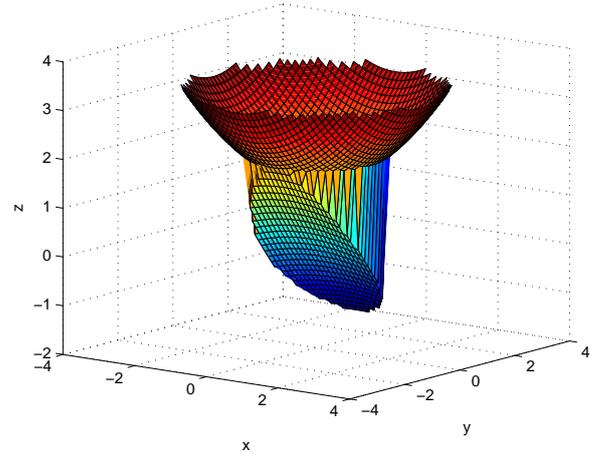


FIG. 6 – Géométrie du miroir complet combinant une surface parabolique et une surface concave pour l’observation du conducteur

de rendus sont proposés sur les figures 8 et 10. Associé à une lentille télécentrique et une caméra VGA, nous obtenons (Figure 7) une résolution de  $13 \times 13$  pixels pour chaque oeil du conducteur dans la vue dédiée (dans la vue panoramique, la résolution est de  $3 \times 3$  pixels par oeil).

Une caractéristique intéressante de ce capteur est d’avoir, sur la même image, deux points de vue différents du conducteur. La conception du miroir rend possible une approche stéréovision sur le visage du conducteur. De plus, la stéréovision exploitée avec une seule caméra a plusieurs avantages en comparaison avec les systèmes basés sur plusieurs caméras : réponse optique similaire, pas de problèmes de synchronisation, coût et robustesse.

**Modélisation Ad-hoc du capteur complet.** Le modèle complet du capteur est introduit pour définir la formation des images sur le capteur au travers des miroirs. Le modèle d’une caméra catadioptrique utilise une approche similaire à celle des caméras classiques. Il suffit simplement d’introduire, dans le modèle, les projections sur les surfaces de réflexion (Figure 11).

Pour le miroir parabolique, la projection d’un point 3D  $P = [x_P; y_P; z_P]^T$  sur le miroir au point  $M_1 =$



FIG. 7 – Simulation du capteur catadioptrique complet à deux miroirs dans le véhicule pour une vue panoramique de la scène de conduite et une vue à résolution plus élevée pour le visage du conducteur.



FIG. 10 – Acquisition du visage.



FIG. 8 – Prototype du double miroir.

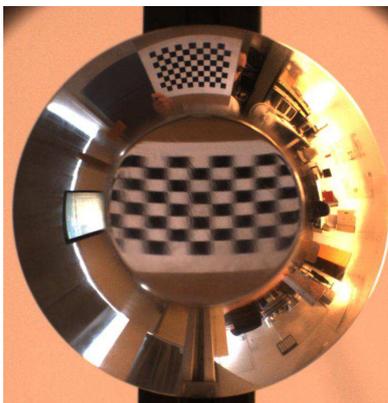


FIG. 9 – Acquisition d'une mire pour illustrer la résolution constante de la projection au centre de l'image.

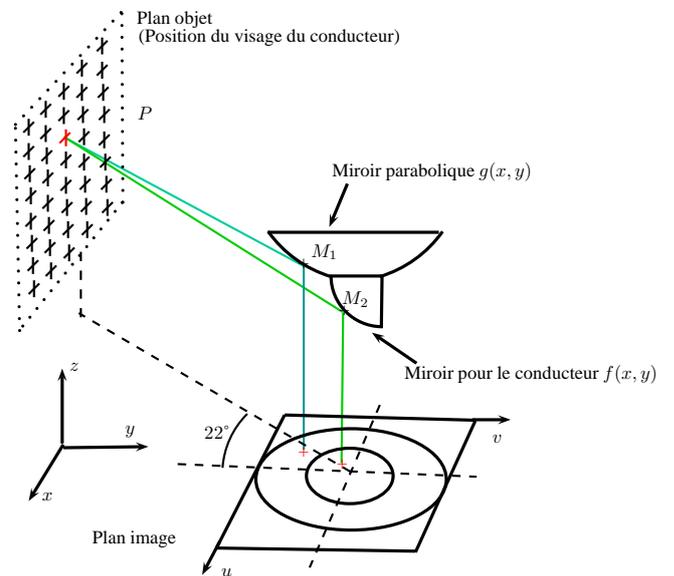


FIG. 11 – Projection d'un point 3D du plan objet (équivalent à des points d'intérêts sur le visage du conducteur) sur les deux miroirs de notre système.

$[x_{M_1}; y_{M_1}; z_{M_1}]^T$  peut être défini avec (9) (résultat détaillé dans [15]).

$$\begin{bmatrix} x_{M_1} \\ y_{M_1} \\ z_{M_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{hx_P}{\sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z_P^2} - z_P} \\ \frac{hy_P}{\sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z_P^2} - z_P} \\ \frac{hz_P}{\sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z_P^2} - z_P} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Pour le second miroir, défini par la méthode de la surface fixe, la projection d'un point  $P$  sur le miroir au point  $M_2 = [x_{M_2}; y_{M_2}; z_{M_2}]^T$  nécessite une méthode de minimisation pour trouver les points  $M_2$  (miroir à projection non centrale). Le vecteur incident  $v = \frac{(M_2 - P)}{\|M_2 - P\|}$  est aussi défini avec (5). On en déduit le système (10) qui permet de trouver les points  $M_2$  des projections des points 3D de la grille sur le miroir. La méthode de Nelder-Mead permet de déterminer les coordonnées des points  $M_2$  qui minimisent  $F$ .

$$F(M_2) = \begin{cases} \frac{(x_{M_2} - x_P)}{\|M_2 - P\|} - 2f_x (f_x^2 + f_y^2 + 1)^{-1} \\ \frac{(y_{M_2} - y_P)}{\|M_2 - P\|} - 2f_y (f_x^2 + f_y^2 + 1)^{-1} \\ \frac{(z_{M_2} - z_P)}{\|M_2 - P\|} + 2(f_x^2 + f_y^2 + 1)^{-1} - 1 \end{cases} \quad (10)$$

Comme la projection des points du miroir sur le plan image de la caméra est orthographique, les coordonnées des pixels  $(u, v)$  se déduisent facilement pour chaque point de la projection avec (11).

$$\begin{cases} u = \alpha_u x_{M_i} + u_0 \\ v = \alpha_v y_{M_i} + v_0 \end{cases} \quad (11)$$

$\alpha_u$  et  $\alpha_v$  sont les rapports de conversion *cm/pixels* suivant  $Ox$  et  $Oy$  et  $(u_0, v_0)$  sont les coordonnées pixelliques du centre optique dans l'image.

## 4 Evaluation du système catadioptrique

Afin de valider la conception du miroir, une évaluation de la précision de reconstruction de notre système stéréo est proposée. La stéréovision nous permet de trianguler des points d'intérêt du visage du conducteur à partir des deux vues, panoramique et dédiée. Une grille de 100 points (10 séries de 10 points) est positionnée au niveau du visage du conducteur dans l'environnement (la même que celle utilisée pour la conception du miroir) (Figure 11). Ces points peuvent être interprétés comme des points d'intérêts du visage pour l'estimation de l'orientation de la tête. Pour chacun de ces points, les points images (pixel) sont calculés à partir du modèle défini précédemment puis reprojétés dans l'environnement pour reconstruire la grille 3D. La précision de reconstruction est mesurée en simulant un bruit pixellique équivalent à la moyenne de la moitié d'un pixel [16].

Sur la figure 12, deux vues de cette reconstruction 3D sont représentées. On peut noter que la distribution des erreurs

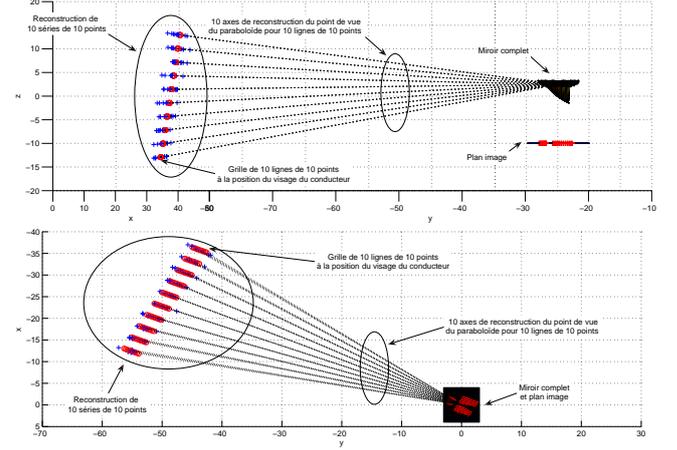


FIG. 12 – Reconstruction 3D d'une grille de 100 points avec un bruit sur le plan image équivalent à la moyenne de la moitié d'un pixel (+ : points reconstruits avec le bruit). La grille a la même position (au niveau du visage) que celle utilisée pour concevoir le miroir dédié au conducteur (plan objet).

Erreur	Moyenne	Ecart-type
Profondeur (cm)	0.6695	0.4386
Azimut (rad)	$4.3119 \times 10^{-4}$	$2.9919 \times 10^{-4}$
Élévation (rad)	$6.0222 \times 10^{-4}$	$4.0327 \times 10^{-4}$

TAB. 1 – Erreur de reprojektion de la grille de 100 points en coordonnées sphériques

est principalement en profondeur par rapport au point de vue du paraboloïde (axes de reconstruction). Dans la table 1, les moyennes et écart-type de ces erreurs en coordonnées sphériques, par rapport au point de vue du paraboloïde, illustrent cette remarque. La précision angulaire obtenue est suffisante pour envisager une reconstruction 3D efficace de points d'intérêt du visage du conducteur.

## 5 Conclusion

Dans l'avenir, les véhicules intégreront de plus en plus de systèmes de vision capables de surveiller simultanément l'activité du conducteur dans sa tâche de conduite et l'environnement de son véhicule. Parmi ces systèmes, les capteurs catadioptriques combinant des formes de miroir adaptés apparaissent comme des solutions intéressantes en terme d'intégration et de fonctionnalités.

Le dispositif présenté dans cet article pour les systèmes d'aide à la conduite, combine une caméra et deux formes de miroirs pour optimiser une observation simultanée du visage du conducteur en résolution suffisante, et quasi-constante, et de la scène de conduite en panoramique.

L'architecture de ce nouveau dispositif offre également de nouvelles perspectives dans le domaine de la sécu-

rité routière (détection de l'hypovigilance, étude du comportement des conducteurs et des infrastructures routières) ou de la protection du véhicule à l'arrêt (identification biométrique, détection d'intrusion).

La prochaine étape de ces travaux sera dédiée à la définition d'une méthode de calibration et d'un algorithme robuste et efficace pour le suivi et l'estimation de la direction du regard du conducteur.

## Références

- [1] S. Baker and S. K. Nayar. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *International Journal of Computer Vision*, 35(2) :175–196, November 1999.
- [2] L. Bretzner and M. Krantz. Towards low-cost systems for measuring visual cues of driver fatigue and inattention in automotive applications. In *Proc. of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2005.
- [3] T. Ehlgren and T. Paidla. Maneuvering aid for large vehicle using omnidirectional cameras. In *Proc. of the IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 2007.
- [4] L. Fletcher, G. Loy, N. Barnes, and A. Zelinsky. Correlating driver gaze with the road scene for driver assistance systems. *Robotics and Autonomous Systems*, 52(1) :71–84, May 2005.
- [5] S. Gaechter, T. Pajdla, and B. Micuvik. Mirror design for an omnidirectional camera with a space variant imager. In *Proc. of the Workshop on Omnidirectional Vision Applied to Robotic Orientation and Nondestructive Testing*, pages 99–105, August 2001.
- [6] T. Gandhi and M. M. Trivedi. Parametric ego-motion estimation for vehicle surround analysis using an omnidirectional camera. *Machine Vision and Applications*, 16(2) :85–95, 2005.
- [7] J. Gaspar, C. Decco, J. J. Okamoto, and J. Santos-Victor. Constant resolution omnidirectional cameras. In *Proc. of the IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, page 27, June 2002.
- [8] S. K. Gehrig. Large-field-of-view stereo for automotive applications. In *Proc. of the Workshop on Omnidirectional Vision*, 2005.
- [9] R. Guyot. Gisements de securite routiere. Technical report, DRAST et METLTM, 2002.
- [10] R. A. Hicks and R. K. Perline. The fixed surface method for catadioptric sensor design. Technical report, Drexel University Department of Mathematics, 2004.
- [11] R. A. Hicks and R. K. Perline. Equiresolution catadioptric sensors. *Applied Optics*, 44(29) :6108–6114, October 2005.
- [12] K. Huang and M. M. Trivedi. Driver head pose and view estimation with single omnidirectional video stream. In *Proc. of Workshop on In-Vehicle Cognitive Computer Vision Systems*, Graz, Austria, April 2003.
- [13] T. Ishikawa, S. Baker, I. Matthews, and T. Kanade. Passive driver gaze tracking with active appearance models. In *Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems*, October 2004.
- [14] T. Moriyama, T. Kanade, J. Xiao, and J.F. Cohn. *Meticulously Detailed Eye Region Model*, chapter 1, pages 23–53. Springer, 2008.
- [15] E. M. Mouaddib. Introduction a la vision panoramique catadioptrique. *Traitement du Signal*, 22(5) :409–417, 2005.
- [16] E. M. Mouaddib, R. Sagawa, T. Echigo, and Y. Yagi. Stereo vision with a single camera and multiple mirrors. In *Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005.
- [17] R. Swaminathan, M.D. Grossberg, and S.K. Nayar. Designing mirrors for catadioptric systems that minimize image errors. In *Proc. of the Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical cameras*, May 2004.
- [18] M. M. Trivedi, T. Gandhi, and J. McCall. Looking-in and looking-out of a vehicle : Computer-vision-based enhanced vehicle safety. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(1) :108–120, March 2007.