

# Prototypage d'un capteur monoculaire générique de visibilité pour véhicule traceur

Clément Boussard<sup>‡</sup>, Nicolas Hautière<sup>±</sup>, Dominique Gruyer<sup>⊥</sup>

<sup>‡</sup>CAOR, Ecole des Mines de Paris, clement.boussard@ensmp.fr, <sup>±</sup>LCPC, DESE, nicolas.hautiere@lcpc.fr, <sup>⊥</sup>LIVIC, INRETS/LCPC, dominique.gruyer@inrets.fr

**Résumé :** La présence d'une zone de visibilité dégradée est une information pertinente à transmettre aux conducteurs automobiles en amont de cette zone. Pour cela, nous développons un capteur générique de visibilité utilisant une caméra à même d'être embarquée sur un véhicule équipé de moyens de communication véhicule-infrastructure. Notre approche consiste à estimer la distance à l'objet le plus éloigné appartenant au plan de la route possédant au moins 5% de contraste. L'originalité de cette approche réside dans le fait que la carte de profondeurs de l'environnement du véhicule utilisée est obtenue par un algorithme de recalage homographique d'images successives exploitant la dynamique du véhicule, estimée ou observée à l'aide de capteurs proprioceptifs. Dans cet article, nous présentons le principe de notre approche, ainsi que la plate-forme virtuelle de prototypage que nous avons réalisée pour mettre au point les différentes composantes algorithmiques.

**Mots-clés :** Vision, Véhicule, Visibilité, Homographie, Recalage Temporelle, Dynamique.

## 1 INTRODUCTION ET OBJECTIF

Dans le cadre du projet REACT [REACT], nous développons un capteur de visibilité. Un des buts de ce projet est de faire progresser la sécurité routière par de la communication véhicule-infrastructure. Notre objectif est donc d'être capable de venir mesurer localement à l'aide d'une caméra embarquée sur véhicule, la distance de visibilité, dans le but de venir tracer les baisses de visibilité dues à des facteurs climatologiques. Le véhicule peut être vu comme un capteur inséré dans le trafic qui communique les mesures à un centre régional de gestion du trafic.

## 2 ETAT DE L'ART SUR LA MESURE DE LA VISIBILITÉ ATMOSPHÉRIQUE

Différentes études, quant à la mesure de la distance de visibilité, existent. Parmi les plus importantes, on trouve :

- des méthodes s'appuyant sur la détection des marquages routiers : Pomerleau [D. Pomerleau, 1997] estime la visibilité en mesurant l'atténuation du contraste des marquages routiers à différentes distances devant le véhicule.
- des méthodes monocaméra adaptées au brouillard : à

l'aide du modèle de Koschmieder [Middleton, 1952] (modèle donnant la luminance apparente d'un objet en fonction du coefficient d'extinction atmosphérique), on peut obtenir par temps de brouillard diurne, une estimation de la distance de visibilité [N. Hautière, 2005].

- des méthodes utilisant la stéréovision. Ces méthodes sont génériques et non réduites au brouillard : à partir de la stéréovision, une carte des profondeurs de bonne qualité peut être réalisée [R. Labayrade, 2003]. La distance de l'élément de la scène le plus éloigné ayant un contraste de plus de 5% donne la distance de visibilité [N. Hautière, 2006a].

## 3 MÉTHODE VISÉE

La méthode que nous visons se veut aussi générique que celle utilisant la stéréovision mais n'utilisant qu'une seule caméra. Dans ce but, nous estimons la distance du dernier objet sur la surface de la route ayant un contraste supérieur ou égal à 5%. Cette méthode tient compte de la définition de la visibilité donnée par la Commission Internationale de l'Eclairage [CIE, 1987] et est décomposée en trois parties. La première consiste à créer une carte des profondeurs de l'environnement du véhicule par recalage homographique d'images successives (partie 3.1). La deuxième consiste à calculer les éléments de l'image ayant un contraste supérieur à 5% (partie 3.2). Enfin, la distance de visibilité est obtenue à partir de la combinaison de la carte des profondeurs et du contraste (partie 3.3).

### 3.1 Reconstruction d'une carte de profondeur par recalage homographique

Par monovision, il est impossible d'accéder directement à la profondeur dans les images. L'hypothèse classique du *monde-plan* permet d'associer à une ligne de l'image une distance, ceci n'étant vrai que pour les objets appartenant au plan de la route. L'enjeu est donc de discerner les objets lui appartenant des autres. La manière la plus générique d'y parvenir est de faire du recalage d'images successives. Par projection perspective, les objets appartenant au plan de la route se recalent d'une image à l'autre. A l'opposé, les objets verticaux sont déformés. Ce procédé permet, en théorie, de distinguer les points qui appartiennent au plan de la route des autres. En général, le recalage d'images successives se fait à l'aide de techniques de traitement d'images classiques

[A. Shashua,1994]. Ces méthodes consistent à appairer des contours entre les deux images. Dans notre contexte de visibilité dégradée, cette approche est peu adaptée car les contrastes sont fortement dégradés. L'originalité de notre approche est de faire du recalage homographique à l'aide de la connaissance du déplacement de la caméra, observé ou mesuré par des capteurs proprioceptifs.

### 3.1.1 Modélisation de la caméra

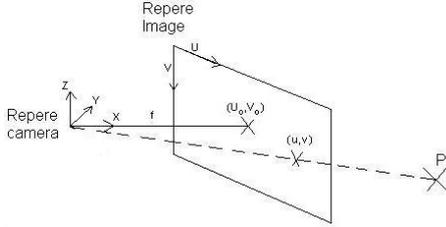


FIG. 1 – Repère caméra et repère image de la caméra

Dans le système de coordonnées du repère caméra, la position d'un point dans le plan image est donnée par ses coordonnées  $(u, v)$ . Le centre optique de l'image sera noté  $(u_0, v_0)$  dans le repère image et considéré comme le centre de l'image (Fig.1).

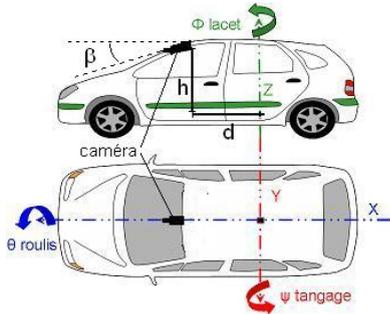


FIG. 2 – Position de la caméra et dynamique du véhicule

La transformation entre le repère véhicule (situé au centre de gravité du véhicule) et le repère caméra, est représentée par une translation de vecteur  $\vec{t} = d\vec{X} + h\vec{Z}$  et une rotation autour de l'axe  $Y$  d'un angle  $\beta$ . On notera  $T$  la matrice de translation et  $R$  la matrice de rotation. Le changement de coordonnées entre le repère image et le repère caméra peut être exprimé à l'aide de la matrice projective  $M_{proj}$  suivante [Horaud, 1995] :

$$M_{proj} = \begin{pmatrix} u_0 & 0 & -\alpha & 0 \\ v_0 & -\alpha & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

où  $\alpha$  représente le rapport entre la focale de la caméra et la taille d'un pixel.

Finalement, on obtient la matrice de transformation  $T_r$  entre le repère véhicule et le repère image :

$$T_r = M_{proj}RT \quad (1)$$

Si  $P$  est un point de coordonnées homogènes  $(X, Y, Z, 1)$  dans le repère véhicule, ses coordonnées homogènes dans le repère image seront  $p = T_r P = (x, y, z)^T$ .

Nous pouvons alors calculer les coordonnées  $(u, v)$  de la projection de  $P$  dans le repère image :

$$\begin{cases} u = \frac{x}{z} = u_0 + \alpha \frac{\cos \beta (Z+h) - \sin \beta (X+d)}{\cos \beta (X+d) + \sin \beta (Z+h)} \\ v = \frac{y}{z} = v_0 - \alpha \frac{Y}{\cos \beta (X+d) + \sin \beta (Z+h)} \end{cases} \quad (2)$$

### 3.1.2 Homographie Monde-Plan

Considérons  $I_1$  et  $I_2$  les images prises aux instants  $t_1$  et  $t_2$ . Une connaissance de la dynamique du véhicule nous permet, grâce à (Eq.2), d'obtenir une estimation de l'image  $I_2$  à partir de l'image  $I_1$ . Soit  $\tilde{I}_{12}$  cette image estimée et  $P$  un point dont la projection dans le repère image lui appartient. Nous supposons que ce point appartient à la route plane, c'est-à-dire que si  $(X_2, Y_2, Z_2)$  sont les coordonnées de ce point dans le repère véhicule, alors  $Z_2 = 0$ . Ainsi l'expression de  $X_2$  et  $Y_2$  se déduit de (Eq.2) :

$$\begin{cases} X_2 = \frac{\cos \beta [d(u-u_0) + \alpha h] + \sin \beta [h(u-u_0) - \alpha d]}{\alpha \sin \beta - \cos \beta (u-u_0)} \\ Y_2 = \frac{-h(v-v_0)}{\alpha \sin \beta - \cos \beta (u-u_0)} \end{cases} \quad (3)$$

### 3.1.3 Déplacement du véhicule

Le mouvement  $M$  de la caméra entre les deux instants peut être représenté par une rotation et une translation. Ces transformations sont en fait celles que subit le véhicule entre deux instants. Si nous notons  $\phi$  l'angle de lacet,  $\psi$  l'angle de tangage et  $\theta$  le roulis (Fig. 2), alors la matrice de rotation  $Rot$  s'écrit :

$$Rot = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \phi \cos \psi \\ r_{12} &= -\sin \psi \cos \theta + \cos \psi \sin \theta \sin \phi \\ r_{13} &= \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \cos \theta \sin \phi \\ r_{21} &= \cos \phi \sin \psi \\ r_{22} &= \cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \theta \sin \phi \\ r_{23} &= -\cos \psi \sin \theta + \sin \psi \cos \theta \sin \phi \\ r_{31} &= -\sin \phi \\ r_{32} &= \sin \theta \cos \phi \\ r_{33} &= \cos \theta \cos \phi \end{aligned}$$

La translation peut se décomposer suivant les axes  $X, Y, Z$  et sera notée  $Trans = (t_x, t_y, t_z)^T$ .

La rotation-translation peut donc être réécrite en coordonnées homogènes à l'aide du système suivant :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Rot^T & t_x \\ & t_y \\ & t_z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

### 3.1.4 Recalage

A partir de la connaissance des coordonnées du point  $P$  (Eq. 3) ainsi que de la dynamique du véhicule (Eq. 5), on peut exprimer les coordonnées du point  $P$  dans le repère caméra de l'instant  $t_1$  :

$$(x_{12}, y_{12}, z_{12})^T = T_r M (X_2, Y_2, 0)^T \quad (6)$$

où  $M$  est la matrice de rotation/translation du véhicule (Eq. 5) entre deux instants.

On obtient les coordonnées  $(u_{12}, v_{12})$  de  $P$  dans le repère image de  $I_1$

$$u_{12} = \frac{x_{12}}{z_{12}} \quad \text{et} \quad v_{12} = \frac{y_{12}}{z_{12}} \quad (7)$$

La comparaison de l'image  $I_1$  et de l'image estimée  $\tilde{I}_{12}$  permet d'obtenir une carte de distance à l'image de ce qui est fait en stéréovision. Comme nous avons fait l'hypothèse que tous les points de l'image  $I_2$  appartiennent au plan de la route (voir partie 3.1.2), une distance faible nous permet de valider l'hypothèse Monde-Plan.

### 3.2 Estimation du contraste

La mesure du contraste supérieur à 5% dans les images est réalisée par une méthode dérivée de la technique de binarisation d'images de Köhler [Köhler, 1981]. Cette dernière recherche le seuil qui maximise le contraste entre les deux parties de l'image. Elle a été optimisée en temps de calcul et adaptée à la formulation du contraste utilisée par la CIE [CIE, 1987] pour définir la distance de visibilité météorologique [Hautière et al., 2006b].

### 3.3 Estimation de la visibilité

Pour estimer la distance de visibilité, on combine la mesure des contrastes supérieurs à 5% avec la carte des contours appartenant au plan de la route. Pour cela, on calcule localement le contraste des points de l'image appartenant au plan de la route en balayant celle-ci de haut en bas en partant de la ligne d'horizon. Dès que l'on trouve un point de contraste supérieur ou égal à 5%, le calcul s'arrête et la distance de visibilité n'est autre que la distance à laquelle se situe ce point.

## 4 PROTOTYPAGE DE LA MÉTHODE

Le point essentiel dans notre approche est l'estimation de la matrice  $M$  (Eq.5) caractérisant le mouvement du véhicule. Or il est difficile d'estimer la dynamique du véhicule à l'aide des capteurs automobile classiquement utilisés en robotique mobile. En effet, les sorties des capteurs sont généralement bruitées et inexploitable pour réaliser un recalage homographique suffisamment précis. Des observateurs/estimateurs robustes peuvent être développés [Chou, 2002] pour obtenir la précision requise. Afin de valider notre démarche, nous nous sommes placés dans un contexte de simulation. Nous avons donc utilisé un simulateur de capteur pour véhicule (SiVIC) [Gruyer, 2005]. Après avoir présenté le simulateur, on expliquera comment l'estimation du mouvement relatif du véhicule a été réalisée puis nous parlerons du développement de la plate-forme de prototypage.

### 4.1 Présentation du simulateur SiVIC

Ce simulateur est une plate-forme de prototypage de capteurs virtuels développée par le LIVIC. Son objectif principal est de reproduire le plus fidèlement possible la réalité d'une situation routière, le comportement

d'un véhicule et le fonctionnement des capteurs embarqués sur ce véhicule. Son point fort est de proposer les mêmes types d'interactions que celles présentes sur les véhicules réels : angle au volant, accélération, freinage, etc. Ceci permet alors de prototyper des solutions d'aide à la conduite, de tester des applications en situations dangereuses sans risque matériel et de pouvoir reproduire des scénarii. Afin de gérer les scénarii complexes, le simulateur dispose d'un ensemble de fonctionnalités, telles que la modélisation de capteurs proprioceptifs embarqués (odomètres, accéléromètres, gyromètres ...) et de capteurs extéroceptifs (caméras, télémètres laser à balayage).

### 4.2 Estimation du mouvement relatif du véhicule

L'estimation de la dynamique du véhicule se fait à l'aide de deux capteurs :

- un odomètre qui fournit des informations sur le nombre de tours réalisés par une roue. Si on considère le rayon de la roue fixe, nous pouvons avoir une estimation de la distance parcourue par cette roue, donc par le véhicule.
- une centrale inertielle qui fournit les vitesses angulaires des trois axes de rotation du véhicule (roulis, tangage, lacet) ainsi que les accélérations suivant les trois axes  $(X, Y, Z)$  du véhicule.

L'intégration numérique des vitesses angulaires données par la centrale inertielle nous permet d'estimer les variations angulaires relatives entre deux instants.

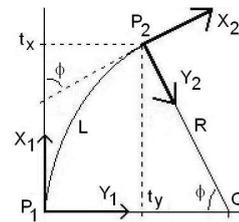


FIG. 3 – Déplacement du véhicule entre les instants  $t_1$  ( $P_1$ ) et  $t_2$  ( $P_2$ )

Quand l'angle de lacet  $\phi$  n'est pas nul, on peut considérer que le véhicule se déplace sur un arc de cercle de rayon  $R$  et de centre  $O$  (Fig.3). Si  $\phi$  est l'angle de lacet et  $L$  la distance parcourue entre les instants  $t_1$  et  $t_2$ , on peut approximer  $t_x$  et  $t_y$  par :

$$\begin{cases} t_x = R \sin(\phi) \\ t_y = R \cos(\phi) + R \end{cases} \quad \text{avec} \quad R = \frac{L}{\phi}$$

### 4.3 Développement de la plate-forme de prototypage

Afin de finaliser notre plate-forme de prototypage, nous avons besoin de :

- Faire varier la distance de visibilité en faisant varier la densité de brouillard. Ceci est réalisé sur le capteur avec la création d'un brouillard physiquement réaliste fondé sur la loi de Koschmieder [Middleton, 1952].
- Tester différents modes de recalages. Ceci est réalisé à travers le choix du nombre de degrés de liberté et de la distance parcourue par le véhicule avant de réaliser un recalage.

- Faire varier le scénario. Ceci est réalisé à travers le choix de la trajectoire du véhicule ainsi que de sa vitesse.

## 5 MISE EN OEUVRE DE LA PLATE-FORME

### 5.1 Recalage

Voici des exemples de recalage. Sur la Fig.4 des distances de 1m (en haut) et 2m (en bas) ont été parcourues avant de réaliser le recalage.

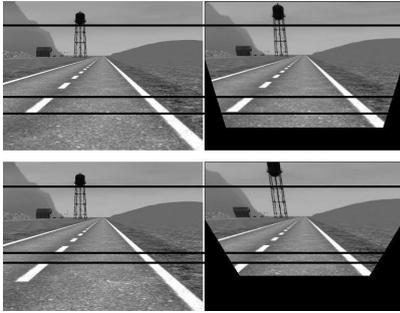


FIG. 4 – gauche : image courante / droite : image recalée  
haut : 1m avant recalage / bas : 2m avant recalage

Des grands traits parcourent les images pour mettre en évidence le fait que les objets appartenant au plan de la route ne sont pas déformés (marquages, bas de la tour, ...) à l'inverse des objets n'y appartenant pas. On peut en effet remarquer que le haut de la tour est déformé et ceci d'autant plus que la distance avant recalage est grande.

### 5.2 Génération de brouillard réaliste

Sur la Fig.5, on peut voir des exemples de simulation de différentes densités de brouillard où le coefficient d'extinction atmosphérique  $k$  vaut (de gauche à droite) :  $k = 0$  (pas de brouillard),  $k = 0.01$  et  $k = 0.05$ .



FIG. 5 – Exemples de brouillard simulé avec, de gauche à droite,  $k = 0$ ,  $k = 0.01$  et  $k = 0.05$  ( $k$  : coefficient d'extinction atmosphérique)

## 6 CONCLUSION ET PROCHAINES ÉTAPES

Nous venons de présenter un principe générique d'estimation de la visibilité par monocaméra ainsi qu'une plate-forme de prototypage qui va nous permettre de valider ce principe. Pour ce faire, nous devons calculer la distance de visibilité sur le simulateur à l'aide de notre méthode.

Notre but étant de faire fonctionner notre capteur de visibilité sur véhicule, nous allons avoir besoin de faire des observateurs/estimateurs des 6 degrés de liberté du

mouvement du véhicule (Eq.5). Il apparaît clair que certains de ces degrés de liberté ont un rôle plus important que d'autres : le déplacement vertical du véhicule doit être négligeable devant le déplacement longitudinal. Une des prochaines étapes sera donc d'identifier les variables prépondérantes afin de créer des observateurs/estimateurs de ces variables dans le but de réaliser des tests sur véhicule.

## BIBLIOGRAPHIE

- [REACT] "Realizing Enhanced Safety and Efficiency in European Road Transport", <http://www.react-project.org/>.
- [CIE, 1987] "International lighting vocabulary". Commission Internationale de l'Éclairage, 1987, No. 17.4.
- [D. Pomerleau, 1997] Pomerleau D., "Visibility estimation from a moving vehicle using the RALPH vision system". IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pages 906-911, Novembre 1997.
- [N. Hautière, 2005] Hautière N., Aubert D. et Jourlin M., "Détection des conditions de visibilité et estimation de la distance de visibilité par vision embarquée". MajecSTIC 2005, Rennes, France, Novembre 2005.
- [N. Hautière, 2006a] Hautière N., Labayrade R. et Aubert D., "Real-Time Disparity Contrast Combination for Onboard Estimation of the Visibility Distance". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 7(2), Juin 2006.
- [R. Labayrade, 2003] Labayrade R. et Aubert D., "in-vehicle characterization of obstacles by stereovision", 1st International Workshop on In-Vehicle Cognitive Computer Vision Systems, Graz, Autriche.
- [A. Shashua, 1994] Shashua A., "Projective Structure from Uncalibrated Images : Structure from Motion and Recognition". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI) Vol. 16(8), pp. 778-790.
- [Middleton, 1952] Middleton W., "Vision through the atmosphere". University of Toronto Press, 1952.
- [Heraud, 1995] Radu Heraud et Olivier Monga, "Vision par ordinateur, outils fondamentaux". 1995 (second edition), Editions Hermès.
- [Kohler, 1981] Köhler R., "A segmentation system based on thresholding". Graphical Models and Image Processing, Vol.15, pp.319-338.
- [Hautière et al., 2006b] Hautière N., Aubert D. et Jourlin M., "Mesure du contraste local dans les images, application à la mesure de distance de visibilité par caméra embarquée". Traitement du Signal, Vol. 23(2), 2006.
- [Chou, 2002] Chou H., "Contribution au Contrôle Global de châssis", Thèse de l'École des Mines de Paris, décembre 2002.
- [Gruyer, 2005] Gruyer D., Royere C. et Glaser S., "SiVIC, une plate forme de prototypage d'environnement routier et de capteurs virtuels pour la conception et l'évaluation de systèmes d'aide à la conduite". Journée Automatique Automobile, 8-9 Novembre 2005, Bordeaux.