

VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE MÉTHODES DÉDIÉES À L'ESTIMATION EMBARQUÉE DE LA VISIBILITÉ ATMOSPHÉRIQUE

Nicolas Hautière¹, Didier Aubert², Eric Dumont¹, Jean-Philippe Tarel¹

1 LCPC-DESE, 58 boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15

2 LCPC/INRETS-LIVIC, bâtiment 824, 14 route de la Minière, 78000 Versailles

Résumé

Dans le cadre du projet ARCOS financé par le PREDIT, deux systèmes exploitant respectivement une et deux caméras ont été améliorés et développés pour estimer la distance de visibilité à bord d'un véhicule automobile en conditions météorologiques dégradées, en particulier par temps de brouillard. L'objet de cet article est la validation expérimentale de ces deux systèmes. Tout d'abord, nous présentons le modèle de Koschmieder qui décrit la luminance apparente d'objets observés sur fond de ciel par temps de brouillard, définissons les différentes distances de visibilité utilisées dans notre approche et établissons les liens qui les unissent. Ensuite les deux systèmes embarqués conçus pour estimer la distance de visibilité sont succinctement décrits. Dans une troisième partie, nous présentons le site dédié, équipé de mires sur les pistes de Satory à Versailles et son utilisation pour valider ces deux techniques. Finalement, la validation quantitative des deux techniques est réalisée en utilisant des images réelles acquises par temps de brouillard sur ce site expérimental.

1 Introduction

Les équipements de perception embarqués (caméras, laser, etc.) fonctionnent dans des gammes de conditions limitées (sensibilité, dynamique, etc.). Un système fournissant la distance de visibilité atmosphérique permettrait d'adapter automatiquement le fonctionnement de ces capteurs et les traitements associés (détection d'obstacles, suivi de route, etc.) en fonction des conditions de visibilité observées et/ou de prévenir le conducteur que son assistance est momentanément inopérante. Dans le cadre du projet ARCOS (Blosseville, 2003), nous avons développé de tels systèmes utilisant des caméras embarquées. Un premier système détecte la présence de brouillard diurne et estime la distance de visibilité météorologique. Un second système, qui n'est pas discuté ici, utilise l'approche stéréoscopique « v-disparité » pour détecter les obstacles qui occultent une partie de la route et du trafic. Un troisième système estime la distance de visibilité dite « mobilisée » par tout temps. Pour valider quantitativement ces systèmes, nous avons équipé les pistes de Satory (Versailles) avec de grandes cibles qui permettent d'estimer de manière statique la distance de visibilité grâce à l'atténuation de leur contraste. Cette mesure de référence peut ensuite être comparée aux résultats des méthodes embarquées.

Dans la suite, nous définissons les différentes distances de visibilité que nous estimons dans les trois systèmes, de même que les liens qui les unissent. Puis, nous résumons leur méthodologie. Dans la troisième section, nous présentons notre site de validation ainsi que la manière dont nous l'utilisons pour évaluer les différents systèmes. Finalement, nous synthétisons les résultats de la validation utilisant les images réelles du site de validation par temps de brouillard.

2 Vision et distance de visibilité atmosphérique

2.1 Loi de Koschmieder et visibilité météorologique

De jour, le brouillard crée un voile lumineux qui dégrade la visibilité (Paulmier, 2003). En 1924, Koschmieder (Middlton, 1952) a établi une relation simple entre la luminance apparente L d'un objet de luminance intrinsèque L_0 , la distance d'observation d et le coefficient d'extinction du brouillard k :

$$L = L_0 e^{-kd} + L_f (1 - e^{-kd}) \quad (1)$$

où L_f désigne la luminance du ciel à l'horizon. A partir de ces résultats, Duntley (Middlton, 1952) a dérivé une loi d'atténuation des contrastes par l'atmosphère :

$$C = C_0 e^{-kd} \quad (2)$$

où C désigne le contraste apparent à la distance d et C_0 le contraste intrinsèque de l'objet par rapport au ciel. La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE, 1987) a adopté un seuil de contraste de 5 % pour définir la distance de visibilité météorologique, définie comme la plus grande distance à laquelle un objet noir ($C_0=1$) de dimensions convenables peut être reconnu de jour sur fond de ciel :

$$V_{met} = -\frac{1}{k} \ln(0,05) \approx \frac{3}{k} \quad (3)$$

2.2 Distances de visibilité mobilisée et mobilisable

Nous définissons maintenant V_{mob} , la distance de visibilité mobilisée : la distance à l'objet visible le plus éloigné à la surface de la route supposée noire ou au moins sombre. V_{mob} doit être comparée à la distance de visibilité mobilisable V_{max} : la distance maximale à laquelle un objet potentiel à la surface de la route pourrait être vu. V_{max} peut s'exprimer comme une fonction de V_{met} , définie en 2.1, et du seuil de contraste C_{BN} de visibilité d'un objet blanc sur fond noir. En utilisant (1) et (2), nous avons ainsi montré la relation suivante (Hautière, 2006c) :

$$V_{max} = -\frac{V_{met}}{3} \ln \left[\frac{C_{BN}}{1 + C_{BN}} \right] \quad (4)$$

Pour un seuil C_{BN} de 5%, nous avons $V_{max} \approx V_{met}$. Nous avons donc adopté cette valeur pour C_{BN} .

3 Estimation embarquée de la distance de visibilité atmosphérique

3.1 Détection de la présence de brouillard diurne et estimation de la distance de visibilité

En adoptant l'hypothèse de monde plan, qui permet d'associer une distance à chaque ligne image v , la distance d s'exprime comme suit :

$$d = \frac{\lambda}{v - v_h} \text{ si } v > v_h \quad (5)$$

où v_h désigne la position verticale de la ligne d'horizon dans le plan image et λ dépend des

paramètres extrinsèques et intrinsèques de la caméra. Si on effectue le changement de variable (5) dans (1), nous obtenons par double dérivation par rapport à v :

$$\frac{\partial^2 L}{\partial v^2} = k \lambda \frac{L_0 - L_f}{(v - v_h)^3} e^{-k \frac{\lambda}{v - v_i}} \left(\frac{k \lambda}{v - v_h} - 2 \right) \quad (6)$$

L'équation $\frac{\partial^2 L}{\partial v^2} = 0$ a deux solutions, dont une seule est utile : $k = \frac{2(v_i - v_h)}{\lambda}$, où v_i désigne la position du point d'inflexion de L . En conséquence, la seule connaissance de la position v_i du point d'inflexion permet d'estimer le coefficient d'extinction k . Nous déduisons aussi V_{met} :

$$V_{met} = \frac{3\lambda}{2(v_i - v_h)} \quad (7)$$

En pratique, L est obtenue comme l'intensité médiane de chaque ligne d'une bande verticale de l'image. Comme cette bande ne doit prendre en compte qu'une zone homogène et du ciel, nous recherchons par une technique de croissance la région de l'image qui possède une variation minimale de gradient de ligne à ligne quand on la traverse de bas en haut. Une bande de mesure est alors positionnée à partir de cette région. A partir du point d'inflexion de la variation d'intensité verticale L de l'image, nous en déduisons V_{met} en utilisant (7). Un exemple est donné sur la figure 1a. Cette méthode a été brevetée en 2002 (Lavenant *et al.*, 2002). Le lecteur intéressé se référera pour plus de détails à (Hautiere, 2006a).

3.2 Estimation de la distance de visibilité mobilisée

La méthode précédente conduit à de bons résultats par temps de brouillard diurne. Pour étendre la gamme de conditions météorologiques traitées, nous avons développé une approche différente, qui consiste à estimer V_{mob} . Pour cela, nous devons accomplir deux tâches : mesure des contrastes supérieurs à 5% et estimation de la profondeur des objets présents dans la scène.

La mesure des contrastes supérieurs à 5% dans les images est réalisée par une méthode dérivée de la technique de binarisation d'images de Köhler (Köhler, 1981). 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, 2006c).

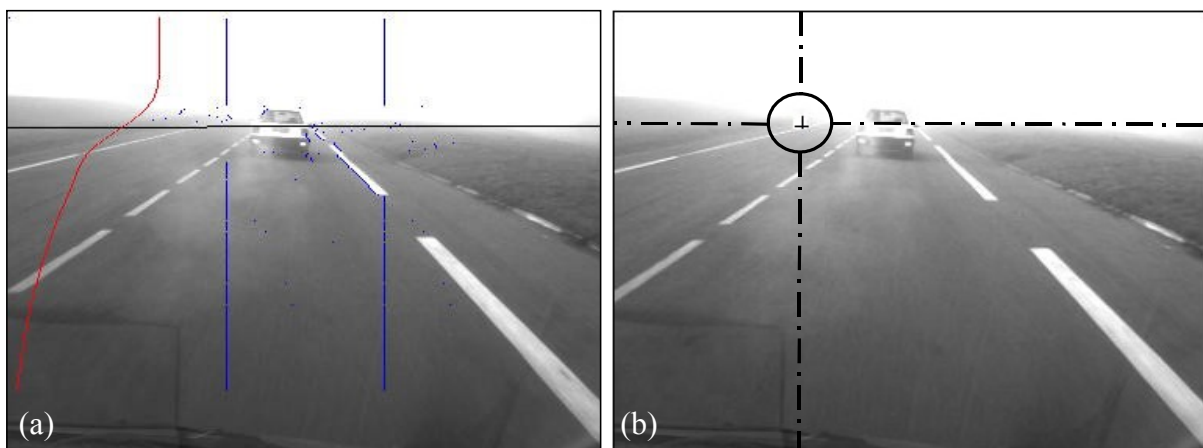


Figure 1 - a) Estimation de la distance de visibilité météorologique par détection du point d'inflexion. La courbe sur la gauche représente l'intensité médiane mesurée sur la bande verticale. La distance de visibilité est représentée par une ligne noire horizontale. b) Estimation de la distance de visibilité mobilisée. La fenêtre la plus éloignée possédant un contraste d'au moins 5 %, sur laquelle la profondeur est connue, est peinte en blanc. Le point est marqué par une croix noire sur cette même fenêtre.

Pour estimer les distances, nous procédons par stéréovision, qui nous permet de déterminer les distances par triangulation. Le LIVIC a développé une méthode efficace de stéréovision (Aubert et

Labayrade, 2005). Elle fournit en deux passes des cartes de disparité de la surface de la route de bonne qualité et détecte les objets au-dessus de celle-ci. Ainsi, comme conséquence de la structure de cette carte de disparité, si on balaie celle-ci de haut en bas, les objets rencontrés sont de plus en plus près du véhicule équipé. La méthode consiste alors à balayer la carte de disparité en partant de la ligne d'horizon et à calculer le contraste pour chaque pixel de disparité connue. Une fois un pixel de contraste supérieur à 5 % trouvé, le processus s'arrête. Grâce à la connaissance de la disparité du point, on remonte à sa profondeur, ce qui constitue la distance de visibilité mobilisée. Un exemple est donné sur la figure 1b. Cette méthode a été brevetée en 2004 (Hautière, 2004b). Pour plus de détails, le lecteur intéressé se référera à (Hautière, 2006b).

4 Protocole expérimental sur site dédié

4.1 Conception du site de validation

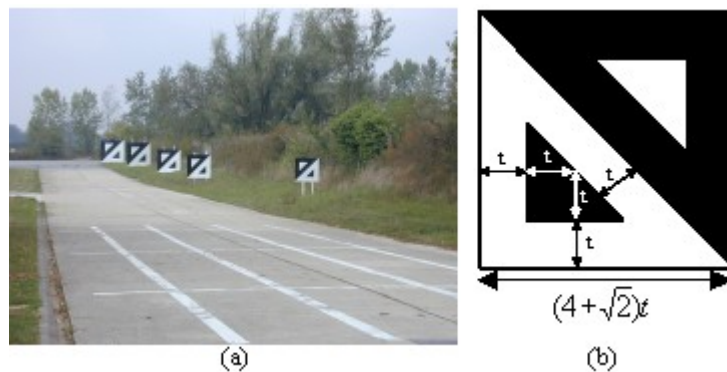


Figure 2- a) Image du site de validation par beau temps.
b) Graphisme retenu pour les mires.

Pour effectuer une validation de nos deux méthodes, nous avons équipé les pistes de Versailles Satory avec cinq grandes mires, situées entre 65 et 200m d'une position depuis laquelle elles ont la même taille apparente (figure 2a). L'idée est de prendre des images de ces mires par conditions météorologiques dégradées et d'estimer le coefficient d'extinction atmosphérique en se fondant sur l'atténuation de leur contraste. Ces mesures statiques peuvent alors être comparées sur les mêmes images aux résultats des méthodes embarquées qui fonctionnent seulement avec les informations extraites sur la route. Les mires ont été conçues pour avoir un contraste intrinsèque maximum comme illustré sur la figure 2b.

4.2 Utilisation des mires

Considérons uniquement les parties noires de deux mires, de luminance L_B , situées respectivement aux distances d_1 et d_2 . Supposons qu'elles aient une luminance intrinsèque nulle ($L_B = 0$). Par temps de brouillard diurne, leurs luminances apparentes sont données par la loi de Koschmieder. En prenant le rapport $r = \frac{L_B(d_1)}{L_B(d_2)}$ de ces valeurs, nous déduisons l'expression du coefficient k de différentes manières :

$$k = \begin{cases} -\frac{1}{d_1} \ln(r-1) & \text{si } d_2 = 2d_1 \\ -\frac{1}{d_1} \ln\left(\frac{\sqrt{4r-3}-1}{2}\right) & \text{si } d_2 = 3d_1 \\ -\frac{1}{d_1} \ln\left(\frac{(r-1)(\sqrt{r+3}-\sqrt{r-1})^2}{4}\right) & \text{si } d_2 = \frac{3}{2}d_1 \end{cases} \quad (8)$$

Une alternative consiste à utiliser les parties blanches L_W et noires L_B des mires, dont les luminances apparentes sont également données par la loi de Koschmieder. En prenant le rapport

$\frac{L_w(d_1) - L_B(d_1)}{L_w(d_2) - L_B(d_2)}$, nous déduisons la valeur de k :

$$k = -\frac{1}{d_2 - d_1} \ln \left(\frac{L_w(d_2) - L_B(d_2)}{L_w(d_1) - L_B(d_1)} \right) \quad (9)$$

On peut ensuite associer une estimation de la variance de k et par là-même de V_{met} à chaque formule (8) ou (9) et moyenner les mesures en les pondérant à l'aide de l'inverse de ces variances pour obtenir une estimation fiable \hat{V}_{met} de la visibilité météorologique à l'aide des différentes cibles.



Figure 3 - Images capturées sur le site de validation selon différentes conditions météorologiques et différents types d'occultation de la route : a) beau temps $V_{met} \approx 5000\text{m}$, b) brume $V_{met} \approx 2000\text{m}$, c) chute de neige $V_{met} \approx 1000\text{m}$; d) brouillard léger $V_{met} \approx 255\text{m}$, e) et f) brouillard dense+obstacles $V_{met} \approx 120\text{m}$.

5 Validation expérimentale

5.1 Construction de données de référence

Des images du site de calibration ont été acquises par différentes conditions météorologiques. Nous nous sommes concentrés sur les situations de brouillard. Nous disposons approximativement de 60 images. Sur certaines images, un véhicule (feux éteints ou allumés) et un piéton sont positionnés sur la chaussée à différentes distances, de façon à tester la robustesse des méthodes aux occultations partielles de la chaussée et du ciel. Des extraits de la base d'images sont données sur la figure 3. Nous avons calculé \hat{V}_{met} et la variance associée pour chaque image en positionnant les cibles visibles de manière interactive.

5.2 Résultats

Sur la figure 4a, nous traçons V_{met} en fonction de \hat{V}_{met} . La corrélation entre les deux mesures est bonne (environ 95%). Sur la figure 4b, nous traçons V_{mob} en fonction de \hat{V}_{met} . La corrélation entre les deux mesures est aussi bonne (environ 96%). Globalement, l'erreur des méthodes est d'environ 10%. Les résultats sont satisfaisants si l'on prend en compte la difficulté de valider expérimentalement ce genre de techniques. En effet, capturer des images de brouillard naturel est difficile, car nous ne pouvons pas contrôler les conditions météorologiques et l'homogénéité du brouillard.

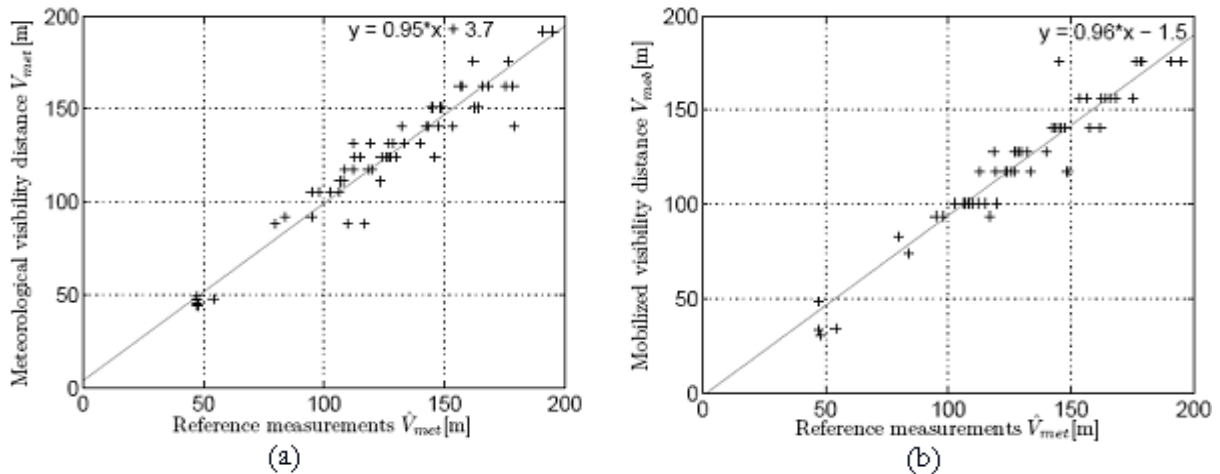


Figure 4 - a) Points : estimation de la distance de visibilité météorologique en fonction de la visibilité de référence, b) Points : estimation de la distance de visibilité mobilisée en fonction de la visibilité de référence. Lignes: droite de corrélation des points, dont l'équation est affichée en haut de chaque graphique.

6 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un protocole de validation pour la mesure de distance de visibilité atmosphérique. Nous avons proposé une solution statique basée sur un site de validation équipé de mires. Le graphisme et la géométrie des mires sont justifiés, ainsi que le protocole de validation. De plus, deux techniques embarquées pour faire la mesure de la distance de visibilité sont décrites succinctement. Nous avons procédé à la validation de ces deux techniques embarquées sur le site. Les résultats sont satisfaisants et le site de validation semble bien adapté.

Bibliographie

- Aubert, D., Labayrade, R. (2005) Détection d'obstacles routiers par stéréovision : l'approche «v-disparité». *Annales des Télécommunications* 60 (3-4), 299-325
- Blosseville, J.-M. (2003) ARCOS, un projet fédérateur. *Autoroutes et mobilités* 9
- Commission Internationale de l'Éclairage CIE (1987) International Lighting Vocabulary. *Publication n°17.4*
- Hautière, N., Labayrade, R., Aubert, D. (2004) Dispositif de mesure de distance de visibilité. Brevet français #0411061, déposé par LCPC/INRETS
- Hautière, N., Tarel, J.-P., Lavenant, J., Aubert, D. (2006a) Automatic Fog Detection and Estimation of Visibility Distance through use of an Onboard Camera. *Machine Vision and Applications Journal* 17(1), 8-20
- Hautière, N., Labayrade, R., Aubert, D. (2006b) Real-Time Disparity Contrast Combination for Onboard Estimation of the Visibility Distance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 7(2), 201-212
- Hautière, N., Aubert, D., Jourlin, M. (2006c) Mesure du contraste local dans les images, application à la mesure de distance de visibilité par caméra embarquée. *Traitement du Signal* 23(2), 145-158
- Köhler, R. (1981) A segmentation system based on thresholding. *Graphical Models and Image Processing* 15, 319-338
- Lavenant, J., Tarel, J.-P., Aubert, D. (2002) Procédé de détermination de la distance de visibilité et procédé de détermination de la présence d'un brouillard. Brevet français #0201822 déposé par LCPC / INRETS
- Middleton, W. (1952) *Vision through the atmosphere*. University of Toronto Press
- Paulmier, G. (2003) La luminance des brouillards diurnes. Élément d'altération de la visibilité. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* 243, 71-81