

Suivi dans des séquences d'images par coopération luminance/couleur

Michèle Gouiffès
 Institut d'Électronique Fondamentale UMR 8622,
 AXIS, Paris XI, Bat 220, 91405 Orsay cedex, France
 michele.gouiffes@ief.u-psud.fr

Résumé – Cet article propose une technique de suivi de points différentielle robuste aux changements d'illumination par la coopération d'attributs couleur invariants et d'une normalisation photométrique en fonction du contexte. En effet, la plupart des invariants couleur s'avèrent bruités ou peu pertinents dans le cas d'une faible saturation et/ou d'une faible intensité, mettant le suivi en échec. Les combiner alors avec une information de luminance aboutit à un suivi plus performant quelles que soient les conditions d'éclairage. Quelques expérimentations prouvent la robustesse et la précision de cette approche.

Abstract – This paper addresses the problem of feature points tracking robust to illumination changes by combining some specific color invariants with photometric normalization according to the context. Indeed, most color invariants become noisy or irrelevant for low saturation and/or low intensity. They can even make tracking fail. Combining them with luminance information yields to a more performant tracking, whatever the lighting conditions are. A few experiments on real image sequences prove the robustness and the accuracy of the procedure.

1 Introduction

Dans de nombreuses tâches de vision par ordinateur, tels que la segmentation, l'indexation ou le suivi, la couleur s'avère pertinente et décisive. En outre, contrairement à la luminance, pour laquelle aucune compensation globale des changements d'illumination n'a été définie, la littérature fournit de nombreux invariants couleur et des méthodes de constance chromatique [1, 3, 4] permettent une bonne robustesse vis-à-vis des variations photométriques, au prix de certaines hypothèses sur les conditions d'acquisition.

À l'inverse, de tels invariants sont peu pertinents et très sensibles au bruit dès lors que la saturation et/ou l'intensité des couleurs est faible. Dans ce cas, la luminance est aussi pertinente que la couleur et s'avère moins coûteuse en temps de calcul. Comment allier ces deux attributs pour assurer la qualité du traitement, quel que soit le contexte ?

À cet égard, cet article s'intéresse au problème du suivi différentiel de points et de fenêtres d'intérêt [7, 9]. La méthode proposée fait coopérer les attributs de luminance et de couleur en fonction de leur pertinence. Lorsque la couleur est suffisamment saturée, le suivi privilégie des attributs pseudo-invariants par rapport aux changements de couleur de l'illuminant, de gain de la caméra, de géométrie d'acquisition et de réflexion spéculaire. Dans le cas contraire, la normalisation photométrique locale de la luminance [10] est favorisée. Elle assure une certaine robustesse vis-à-vis des réflexions spéculaires, des changements d'éclairage et du gain de la caméra, tout en palliant le problème d'apparition de bruit des invariants lorsque l'intensité d'éclairage baisse brutalement dans la séquence d'images.

Cet article est structuré comme suit. La section 2 décrit les attributs couleur et la normalisation, et définit les fonctions de pertinence utilisées. La méthode de suivi est

détaillée dans la section 3. En section 4, quelques résultats expérimentaux montrent la bonne robustesse et la précision de la méthode proposée.

2 Attributs utilisés

Attributs couleur. La plupart des invariants couleur [4] sont valables sous l'hypothèse d'un illuminant blanc, soit pour des matériaux lambertiens ($c_1 c_2 c_3$, normes couleur L_1 et L_2) ou pour des matériaux spéculaires ($l_1 l_2 l_3$, teinte). Par contre, le problème de l'invariance couleur pour les surfaces spéculaires acquises sous un illuminant de couleur variable reste ouvert car il nécessite encore de coûteux algorithmes de constance chromatique [1]. Comme le définit le modèle dichromatique [8], le vecteur couleur $\mathbf{c} = (R, G, B)$ en un point p , projection d'un point physique P d'une surface spéculaire, peut être écrit :

$$\mathbf{c}(p) = m_b(P)\mathbf{c}_b(p) + m_s(P)\mathbf{c}_s(p) \quad (1)$$

où $\mathbf{c}_b = (c_b^R, c_b^G, c_b^B)$ et $\mathbf{c}_s = (c_s^R, c_s^G, c_s^B)$ sont respectivement les couleurs de réflexion diffuse et spéculaire. m_b et m_s dépendent de la géométrie de la scène (angles d'éclairage, d'observation, orientation de la surface). Prenons l'exemple de la composante R , où c_b^R et c_s^R s'écrivent :

$$c_b^R(p) = \int_{\lambda} S_R(\lambda) \mathcal{I}(\lambda, P) \mathcal{R}_b(\lambda, P) d\lambda, \quad c_s^R(\lambda, p) = \int_{\lambda} S_R(\lambda) \mathcal{I}(\lambda, P) d\lambda$$

$S_R(\lambda)$ est la sensibilité du capteur rouge, \mathcal{I} est le spectre de l'illuminant et \mathcal{R}_b est la réflectance du matériau. Supposons que la sensibilité $S_R(\lambda)$ est à bande limitée autour de la longueur d'onde dominante λ_R et peut être approximée par une constante S_R par rapport aux longueurs d'onde λ . En étendant ces hypothèses sur les 3 canaux, on aboutit à la simplification suivante de (1) :

$$\mathbf{c}(p) = \mathbf{a}(p) \cdot \mathbf{c}_I(p) m_b(p) + \mathbf{c}_I(p) m_s(p) \quad (2)$$

où \cdot est le produit d'Hadamard. $\mathbf{c}_I = (I_R, I_G, I_B)$ est la couleur de l'illuminant et dépend des gains (S_R, S_G, S_B) de la caméra. Enfin, $\mathbf{a}(p) = (a_R, a_G, a_B)$ est fonction de la reflectance, supposée constante au cours du temps.

Afin d'obtenir un invariant couleur robuste aux changements de gain des capteurs, nous supposons que m_b, m_s et \mathbf{c}_I varient suffisamment doucement dans l'image pour pouvoir les considérer constants en tout point s dans un voisinage \mathcal{V}_s de taille 3×3 autour de p , avec $s \neq p$. Selon (2), chaque rapport $(R(p) - R(s_0))/(R(s_1) - R(s_2))$ avec s_0, s_1 et $s_2 \in \mathcal{V}_s(p)$ est indépendant des conditions d'éclairage et du gain de la caméra. Cet attribut n'est fonction que du terme (a_R, a_G, a_B) . Afin de réduire la sensibilité au bruit, il est préférable d'opter pour l'attribut suivant :

$$\mathcal{C}_R(p) = [R(p) - \min_{s \in \mathcal{V}_s} R(s)] / \sigma_R(s) \quad (3)$$

où $\sigma_R(s)$ est l'écart-type de R dans le voisinage \mathcal{V}_s . La transformation similaire est opérée sur G et B . Du fait des fortes hypothèses considérées, $\mathbf{c}_{inv}(p) = (\mathcal{C}_R, \mathcal{C}_G, \mathcal{C}_B)$ ne peut être vu que comme un pseudo-invariant, valable pour les surfaces non-lambertiennes acquises sous un illuminant de couleur variable.

Normalisation photométrique. Si la saturation des couleurs est faible ou si \mathbf{c}_{inv} est bruité du fait des faibles valeurs de σ dans (3), la simple utilisation de la luminance I peut s'avérer plus appropriée car moins sensible au bruit. De plus, afin d'améliorer la robustesse du suivi, nous considérons une normalisation photométrique telle que celle utilisée dans [10] : $[I(p) - \mu_I] / \sigma_I$. μ_I et σ_I sont respectivement la moyenne et l'écart-type de I calculés dans une petite fenêtre d'intérêt \mathcal{W} centrée sur p . Cette normalisation assure l'invariance par rapport aux changements affines d'illumination.

Fonction de pertinence des invariants couleur α . Les attributs décrits par (3) s'avèrent sensibles au bruit pour un écart-type faible dans \mathcal{W} . Ainsi, nous définissons une fonction de pertinence $\alpha_i(p)$ pour chaque composante $\{\mathcal{C}_i\}_{i=R,G,B}$ par une fonction sigmoïde $\alpha_i(p)$:

$$\alpha_i(p) = 1 / (1 + \exp(-(\sigma_i(p) - \sigma_0)u_\alpha))$$

où σ est l'écart-type impliqué dans \mathbf{c}_{inv} , σ_0 est l'abscisse du point d'inflexion et u_α est associé à la pente. $\alpha(p)$ est utilisé comme pondération de $\mathcal{C}_i(p)$, si bien que $\{\mathcal{D}_i(p) = \alpha_i(p)\mathcal{C}_i(p)\}_{i=R,G,B}$ sont finalement les invariants couleur retenus pour le suivi : $\mathbf{D} = (\mathcal{D}_R \mathcal{D}_G \mathcal{D}_B)$. Ainsi, les indices d'invariants pertinents sont préservés tout en réduisant l'influence du bruit pour de faibles variations de couleur σ .

Pertinence de la couleur par rapport à la luminance β .

La couleur n'est opportune que si elle est saturée. Ce postulat peut être traduit par une signoïde $\beta(p)$, exprimée en fonction de la saturation au point p : $S = [\max(R, G, B) - \min(R, G, B)] / \max(R, G, B)$. Soient S_0 son point d'inflexion et u_β sa pente.

3 Procédure de suivi

Soient k et k' deux instants successifs de la séquence et $\mathbf{D}_k, \mathbf{D}_{k'}, I_k, I_{k'}$ les différentes images d'attributs. Un point P d'un objet se projette en p , de coordonnées (x, y) dans l'image k et en p' dans l'image k' , après un mouvement relatif entre la caméra et la scène. Notons δ le modèle de mouvement d'une fenêtre d'intérêt \mathcal{W} centrée autour du point à suivre p . δ est paramétré par la matrice \mathbf{A} , et la position p' de P dans l'image k' est donné par $p' = \delta(p, \mathbf{A})$. Soit q un point voisin de p dans \mathcal{W} . Le suivi consiste à calculer \mathbf{A} par minimisation du critère suivant :

$$\epsilon(\mathbf{A}) = \sum_{q \in \mathcal{W}} [\gamma(q, q') \|\mathbf{D}_k(q) - \mathbf{D}_{k'}(\delta(q, \mathbf{A}))\| + (1 - \gamma(q, q')) \|aI_k(q) - I_{k'}(\delta(q, \mathbf{A})) + b\|]^2 \quad (4)$$

$\gamma(p, p')$ est la fonction utilisée pour pondérer la pertinence conjointe de \mathbf{D}_k et $\mathbf{D}_{k'}$:

$$\gamma(p, p') = [\beta_k(p)\beta_{k'}(p') \max(\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B)]^{1/3} \in [0, 1]$$

Enfin, a et b sont les paramètres du modèle photométrique affine, qui peuvent s'écrire en fonction des moyennes et écarts-type de I_k et $I_{k'}$ dans \mathcal{W} :

$$a = \sigma_{I_{k'}} / \sigma_{I_k} \quad \text{et} \quad b = \mu_{I_{k'}} - a\mu_{I_k}$$

Soit $\mathbf{A} = \hat{\mathbf{A}} + \Delta\mathbf{A}$ où $\Delta\mathbf{A}$ est un faible déplacement autour d'une estimation $\hat{\mathbf{A}}$ de \mathbf{A} . $\mathbf{D}_{k'}(\delta(q, \mathbf{A}))$ et $I_{k'}(\delta(q, \mathbf{A}))$ sont approximées par une série de Taylor autour de $\hat{\mathbf{A}}$. En négligeant les termes du second ordre, on obtient :

$$\mathbf{D}_{k'}(\delta(q, \mathbf{A})) = \mathbf{D}_{k'}(\delta(q, \hat{\mathbf{A}})) + \mathbf{G}_D(\delta(q, \hat{\mathbf{A}})) \mathbf{J}_D^{\hat{\mathbf{A}}} \Delta\mathbf{A} \quad (5)$$

$$I_{k'}(\delta(q, \mathbf{A})) = I_{k'}(\delta(q, \hat{\mathbf{A}})) + \mathbf{G}_I(\delta(q, \hat{\mathbf{A}})) \mathbf{J}_I^{\hat{\mathbf{A}}} \Delta\mathbf{A} \quad (6)$$

\mathbf{G}_D et \mathbf{G}_I sont les matrices jacobiennes de $\mathbf{D}_{k'}$ et $I_{k'}$ par rapport à x et y . En injectant (5) et (6) dans (4), on aboutit finalement à un système linéaire en $\Delta\mathbf{A}$:

$$\left(\sum_{q \in \mathcal{W}} \mathbf{v} \mathbf{v}^T \right) \Delta\mathbf{A} = \sum_{q \in \mathcal{W}} \left[\frac{\alpha(q, q')}{3} \left[\sum_{i \in RGB} (D_k^i(q) - D_{k'}^i(\delta(q, \hat{\mathbf{A}}))) \mathbf{v}_i \right] + (1 - \alpha(q, q')) (I_k(q) - I_{k'}(\delta(q, \hat{\mathbf{A}}))) \mathbf{v}_I \right]$$

Dans le cas d'un modèle affine, \mathbf{v}_i pour $i = R, G, B, I$ est exprimé par :

$$\mathbf{v}_i = [g_x^i, g_y^i, xg_x^i, xg_y^i, yg_x^i, yg_y^i]^T$$

où g_x^i et g_y^i sont les dérivées premières de i en q . Pour finir, \mathbf{v} s'écrit $[g_x, g_y, xg_x, xg_y, yg_x, yg_y]^T$ avec :

$$g_x = \left[\sum_i (\gamma/3) g_x^i \right] + (1 - \gamma) g_x^I$$

$$g_y = \left[\sum_i (\gamma/3) g_y^i \right] + (1 - \gamma) g_y^I \quad \text{pour } i = R, G, B$$

4 Résultats d'expérimentation

Puisque les points doivent être suivis en utilisant conjointement la couleur et la luminance, ils sont détectés à la fois par la méthode de Harris [6] dans l'image de luminance I et par sa déclinaison couleur dans l'image \mathbf{D} . Les points détectés par les deux techniques ne sont conservés qu'une fois. Une fenêtre d'intérêt \mathcal{W} de taille 15×15 est utilisée. Un point est rejeté dès lors que ses résidus de convergence

dépassent un seuil (une variation d'intensité de 15 est tolérée en chaque point de \mathcal{W}). Pour réaliser le suivi, un modèle affine de mouvement δ est calculé entre l'image précédente et l'image courante. Enfin, les paramètres de la fonction de pertinence α sont fixés aux valeurs : $\sigma_0 = 30$ and $u_\alpha = 0.2$ et ceux relatifs à β sont $S_0 = 0.1$, $u_\beta = 100$. Les séquences d'images sont jouées de la première image à la dernière puis inversement, de manière à vérifier que les points sont correctement suivis et reviennent donc à leur position initiale. L'erreur est alors obtenue par la distance euclidienne entre la position finale et la position initiale.

La figure 1(a) montre quelques images de la base *Card Game ALOI*¹ [2]. Sur la première image de la séquence, la couleur s'avère discriminante puisque 50 points sont extraits à l'aide de l'attribut couleur **D** (voir Fig.1(b)), contre 22 seulement en utilisant la luminance (voir Fig.1(c)).

Séquence 1. Changement de gain d'illuminant.

La première séquence considérée correspond aux images allant de l2c1.png à r100.png de la base ALOI, qui montrent des changements de température de l'illuminant et pour certaines d'entre elles des changements de position d'éclairage et d'objet.

Quelques résultats sont montrés sur la figure 2. Les figures de 2(a) à 2(c) dessinent en jaune les points correctement suivis et en rouge les points ayant dérivé de leur position réelle au cours de la séquence. Elles se réfèrent respectivement aux résultats obtenus avec la normalisation photométrique (NP), l'attribut couleur **D** et la coopération $NP + \mathbf{D}$. Alors que seul un point est correctement suivi par NP ou par **D**, l'association des deux attributs ($NP + \mathbf{D}$) permet de suivre correctement 9 points.

Séquence 2. Position d'éclairage. La seconde séquence montre des changements de direction d'éclairage et d'intensité (images i110.png to l1c3.png). La figure 3 affiche quelques résultats (images 1, 15, 31), respectivement pour la méthode NP (Fig.3(a)) et pour la technique de coopération $PN + \mathbf{D}$ (Fig. 3(b)). Les résultats obtenus avec **D** ne sont pas montrés puisqu'aucun point n'est correctement suivi jusqu'à la fin de la séquence. 50 points ont été sélectionnés dans l'image de luminance (Fig .3(a)1) et 60 en utilisant l'association luminance + **D** (Fig .3(b)1). 13 points sont suivis correctement par NP contre 18 points par $NP + \mathbf{D}$. Là encore, cela confirme la bonne robustesse de la technique de suivi proposée dans le cas de changements d'illumination.

Séquence 3. Suivi d'un panneau routier. Considérons à présent la séquence *road*² représentée sur la figure 4. La première image est une image RGB issue de cette séquence, tandis que les suivantes correspondent à quelques images de la séquence représentées dans l'espace d'attributs **D**. Cette séquence est bruitée et des changements de gains se produisent. Le suivi a été effectué correctement pour les 3 techniques (NP , **D** et $NP + \mathbf{D}$), avec une fenêtre \mathcal{W} de taille 61×61 . Toutefois les erreurs de suivi sont différentes : 4.87 pixels pour NP , 16.72 pixels pour **D**, et seulement 2.60 pixels en utilisant la coopération $NP + \mathbf{D}$.

L'utilisation conjointe de NP et **D** a permis d'améliorer la précision du suivi.

5 Conclusion

Une méthode de suivi différentielle basée sur l'utilisation combinée d'une normalisation photométrique et d'invariants couleur a été proposée. Lorsque la saturation des couleurs est suffisante, la fonction de coût utilisée privilégie l'attribut couleur, qui s'avère robuste à de nombreux changements photométriques. Dans le cas contraire, une normalisation photométrique de la luminance est exploitée, afin de réduire l'influence du bruit des invariants couleur. Les résultats d'expérimentation ont montré que la combinaison couleur/luminance est plus robuste que l'utilisation seule de la luminance ou de la couleur. Elle permet en effet de suivre correctement un plus grand nombre de points lorsque des changements d'éclairage se produisent. D'autre part, la précision du suivi est améliorée.

Références

- [1] G.D. Finlayson, S. D. Hordley, G. Schaefer, and Gui Yun Tian. Illuminant and device invariant colour using histogram equalisation. 38(2) :179–190, 2005.
- [2] J. M. Geusebroek, G. J. Burghouts, and A. W. M. Smeulders. The Amsterdam library of object images. *Int. J. Comput. Vision*, 61(1) :103–112, 2005.
- [3] J-M. Geusebroek, R. Van den Boomgaard, A. W. M. Smeulders, and A. W. M. Geerts. Color invariance. *IEEE Transactions on PAMI*, 23(12) :1338–1350, 2001.
- [4] T. Gevers and A.W.M. Smeulders. Color-based object recognition. *Pattern Recognition*, 32(1999) :453–464, 1999.
- [5] M. Gouiffès, C. Collewet, C. Fernandez-Maloigne, and A. Trémeau. A photometric model for specular highlights and lighting changes. application to feature points tracking. In *IEEE Int. Conf. on Image Processing, ICIP'2006*, 2006.
- [6] C.G. Harris and M. Stephens. A combined corner and edge detector. In *4th Alvey Vision Conference*, pages 147–151, 1988.
- [7] B.D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 674–679, 1981.
- [8] S.A. Shafer. Using color to separate reflection components. *Color Research and Applications*, 10(4) :210–218, 1985.
- [9] C. Tomasi and T. Kanade. Detection and tracking of point features. Technical report CMU-CS-91-132, Carnegie Mellon University, 1991.
- [10] T. Tommasini, A. Fusiello, E. Trucco, and V. Roberto. Improving feature tracking with robust statistics. *Pattern Analysis & Applications*, 2(4) :312–320, 1999.

¹disponible sur <http://staff.science.uva.nl/aloi/>, images de taille 768×576

²disponible sur <http://vasc.ri.cmu.edu/idb/html/jisct/index.html>.

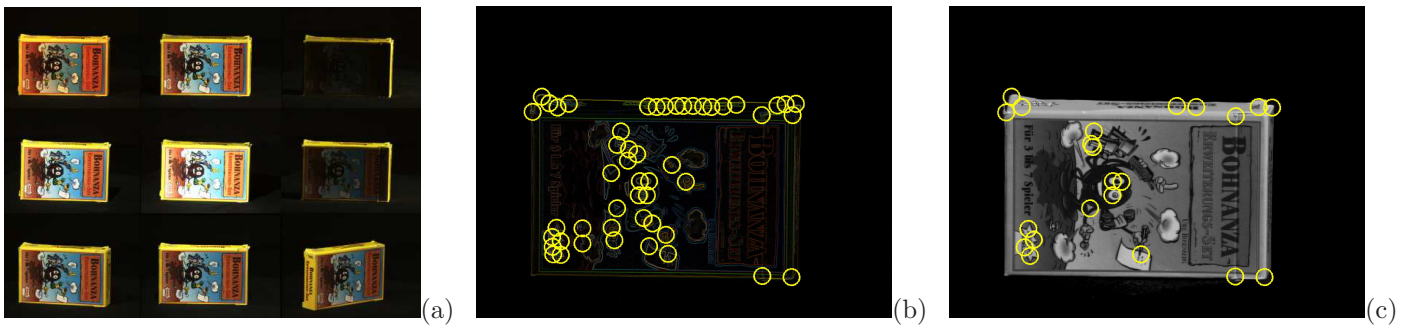
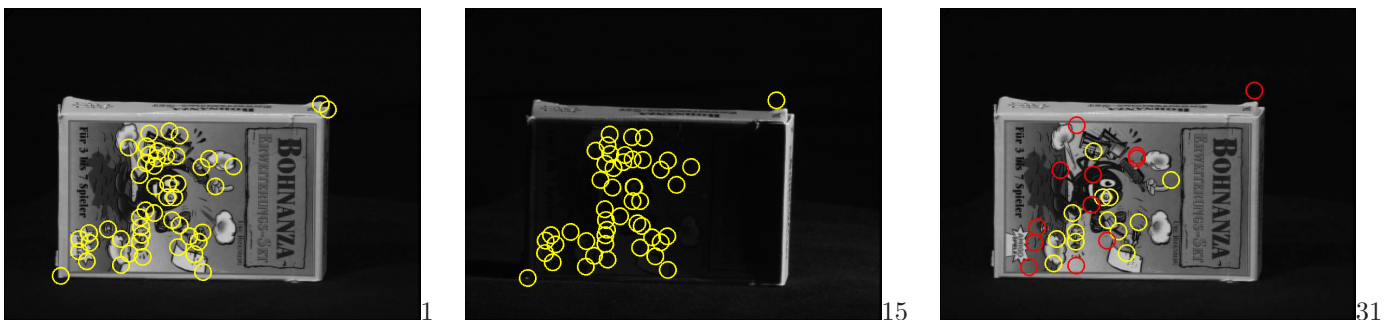


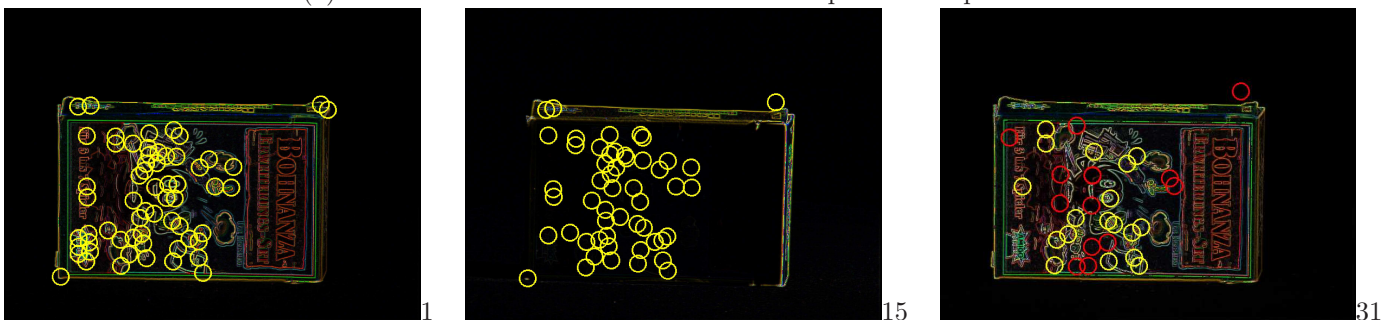
FIG. 1 – (a) Quelques images de la base ALOI. (b) Points détectés dans l'image D et (c) dans l'image de luminance.



FIG. 2 – **Séquence 1.** Résultats de suivi dans le cas de changements de couleur d'illuminant. (a) Normalisation photométrique (NP). (b) Utilisation de D . (c) Utilisation conjointe $NP+D$.



(a) Résultat du suivi avec une normalisation photométrique NP .



(b) Résultat du suivi par utilisation conjointe $NP+D$

FIG. 3 – **Séquence 2.** Résultats du suivi dans le cas de changements d'éclairage (intensité et direction).

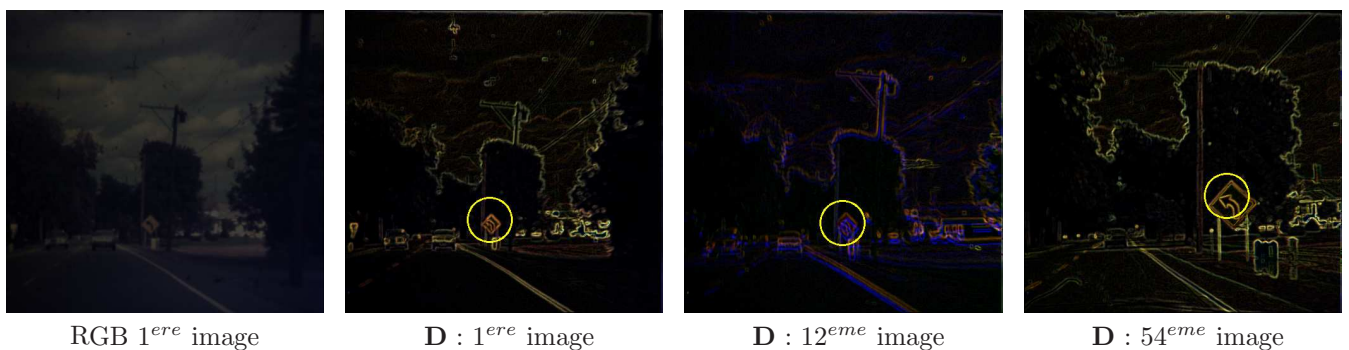


FIG. 4 – **Séquence 3.** Suivi d'un panneau routier dans la séquence *road* par utilisation conjointe d'une normalisation photométrique et de l'invariant couleur $NP+D$.