

Modèles de capteurs infrarouges pour la synthèse d'images thermiques réalistes

Christelle Garnier⁽¹⁾, René Collorec⁽²⁾ et Frank Rousée⁽³⁾

(1) Département informatique, Ecole Louis de Broglie, Campus de Ker Lann, BP 89 35 170 Bruz, France

(2) L.T.S.I. (Laboratoire de Traitement du Signal et de l'Image), Université de Rennes I, Campus de Beaulieu, Bât. 22 35 042 Rennes Cedex, France

(3) SOGITEC, Division électronique, 24 av Lavoisier, Z.A. du Champ Niguel, BP 7408 35 174 Bruz Cedex, France

RÉSUMÉ

La formation des images par les capteurs IR s'accompagne de dégradations qu'il faut reproduire pour générer des images thermiques de synthèse réalistes. Nous proposons des modèles de capteurs IR basés sur l'étude des phénomènes physiques impliqués dans l'acquisition des images. Notre approche repose sur une extension des modèles de caméras existants en synthèse d'images dans le visible et dans l'IR. Les modèles développés explicitent la relation géométrique et énergétique entre les points d'une scène 3D et les pixels de l'image obtenue en sortie du capteur IR. Ces modèles présentent l'intérêt de simuler chaque composant du capteur, suivant la technologie utilisée et la précision désirée. De plus, les données d'entrée sont suréchantillonnées dans le domaine spectral, spatial et temporel par rapport à la résolution du capteur IR.

1 Introduction

Aujourd'hui, les avions sont équipés de capteurs IR, utilisés pour l'aide au pilotage en cas de mauvaise visibilité, la télédétection passive, le contrôle de tir... Pour cette raison, la restitution d'images IR réalistes est une nouvelle fonctionnalité intégrée aux visuels des simulateurs de vol. La génération d'images thermiques réalistes nécessite la modélisation de trois phénomènes physiques : le rayonnement thermique de la scène, la propagation de ce rayonnement à travers l'atmosphère et la formation de l'image par le capteur IR. C'est ce dernier phénomène qui nous intéresse dans cet article.

Nous commençons par présenter les modèles de capteurs existants en synthèse d'images dans le visible et dans l'IR. Puis, après avoir exposé notre approche, nous décrivons les modèles de capteurs développés. Ces modèles sont destinés à être insérés dans une chaîne de modélisation plus vaste développée par la société SOGITEC à Bruz et intitulée SYTHER (SYnthèse d'images THERmiques). Ils simulent la formation géométrique de l'image et calculent la luminance des différents pixels à partir de l'énergie des points correspondants dans la scène 3D visualisée. Ils rendent compte des différents composants de la chaîne d'imagerie, chacun d'eux pouvant être modélisé suivant la technologie mise en oeuvre et la précision désirée.

ABSTRACT

Infrared sensors degrade images. Introduced defaults have to be reproduced to generate realistic synthetic IR images. In this paper we present infrared sensors models based on the laws describing physical phenomena involved in infrared imagery acquisition. Our approach is an extension of current models used in visible and infrared image synthesis. Proposed models simulate properly the geometrical image formation and compute accurately the pixel value of the output image from the spectral radiance distribution of the scene corresponding point. They present the advantage of simulating each infrared sensor component, according to the used technology and the desired accuracy. Moreover, input data are oversampled in the spectral, spatial and temporal dimension in comparison with infrared sensor resolution.

2 Etat de l'art

La modélisation de caméras est l'objet de peu d'investigations en synthèse d'images. Les modèles existants, même s'ils sont incomplets d'un point de vue physique, suffisent généralement à reproduire sur les images les effets désirés. Cependant, dans le cas de la synthèse d'images réalistes basée sur la physique, la connaissance d'un modèle précis de capteur est nécessaire. Parmi les travaux effectués dans le visible, on peut distinguer 3 approches. La première consiste à appliquer les modèles de capteurs sous la forme de post-traitements [1] : une image bidimensionnelle est construite à partir de la scène 3D par un modèle sténopé de caméra, puis dégradée par le modèle de capteur. La deuxième consiste à venir greffer les modèles de capteurs sur un lancer de rayons [2] : la déviation des rayons passant à travers l'optique est alors calculée par les lois de Snell-Descartes. La troisième approche combine les 2 précédentes [3]. Tous ces modèles se réduisent principalement à la description de la partie optique des caméras. Les modèles utilisés dans les générateurs d'images IR, quand ils existent, sont de type post-traitements. Les aspects énergétiques y sont plus approfondis [4], [5]... Il existe aussi quelques modèles de capteurs IR développés comme outils d'aide à la conception et à l'analyse de nouveaux capteurs IR. La plupart prennent en compte la fonction de transfert globale du capteur (optique +

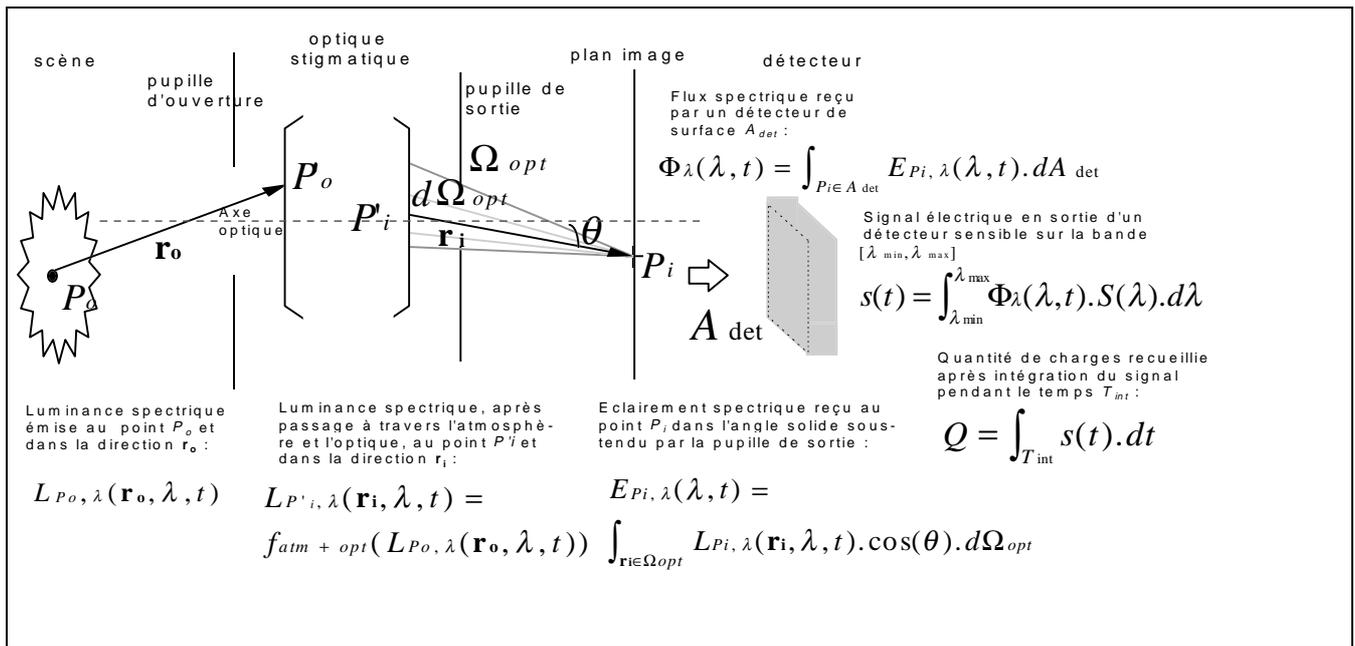


figure 1 : Principales étapes de la conversion de l'énergie thermique en signal électrique par un capteur IR.

détecteur + électronique) supposée invariante sur l'image, les bruits électriques additifs, l'échantillonnage spatial de la scène par le(s) détecteur(s) et la vibration du capteur : Mitsubishi [6], SMARTI [7]... Les phénomènes décrits sont de plus simplifiés. Quelques modèles rendent mieux compte de la réalité : NVSIM [8] par exemple, qui considère une fonction de transfert variable dans le plan image, effectue un rééchantillonnage spatial de l'image suivant la résolution du capteur et simule plus précisément la conversion énergie IR/signal électrique. Il reste, malgré tout, certains phénomènes physiques à modéliser : l'assombrissement sur les bords de l'image, la relation spatio-temporelle entre les détecteurs et la scène visualisée, la modification de la géométrie de l'optique lors de la mise au point... Pour terminer, notons que la plupart des modélisations existantes sont imprécises en ce qui concerne la définition des grandeurs physiques.

3 Principes de modélisation

Nous nous inspirons des modélisations existantes dans le visible et dans l'IR pour construire nos modèles de capteurs IR. Mais nous les remanions et les généralisons de façon qu'elles correspondent réellement à la physique du capteur et qu'un minimum d'hypothèses simplificatrices soient formulées. Dans les paragraphes suivants, nous exposons les principes autour desquels s'articulent nos modèles.

3.1 Lois physiques

Sur la figure 1, nous avons schématisé les étapes de la conversion énergie IR/signal électrique. Les grandeurs physiques manipulées sont des grandeurs spectrales $G(\lambda)$ ou spectrales $G_{\lambda}(\lambda)$ ¹ (densité spectrale de $G(\lambda)$) [9] :

¹ Si $G(\lambda)$ s'exprime en unités U, $G_{\lambda}(\lambda)$ s'exprime en $U \cdot m^{-1}$.

- La luminance spectrique, notée $L_{P, \lambda}(\mathbf{r}, \lambda, t)$, est une grandeur énergétique définie en un point P d'une surface émettrice ou réceptrice et suivant une direction \mathbf{r} . Elle s'exprime en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot m^{-1}$.
- L'éclairement spectrique, noté $E_{P, \lambda}(\lambda, t)$, est une grandeur énergétique définie en un point P d'un récepteur et pour un angle solide Ω . Elle s'exprime en $W \cdot m^{-2} \cdot m^{-1}$.
- Le flux spectrique, noté $\Phi_{\lambda}(\lambda, t)$, représente la puissance émise ou reçue sous forme de rayonnement. Il s'exprime en $W \cdot m^{-1}$.
- La sensibilité spectrale, notée $S(\lambda)$, est le quotient de la réponse électrique $ds_{\lambda}(\lambda)$ d'un détecteur sur le flux spectrique $d\Phi_{\lambda}(\lambda)$ incident. Elle s'exprime en $V(Volts) \cdot W^{-1}$ ou en $A(Ampères) \cdot W^{-1}$.

Les équations de la figure 1, établies à partir de la définition de ces grandeurs, constituent un support d'origine physique pour nos modèles de capteurs IR.

3.2 Décomposition du modèle

La modélisation est basée sur un découpage en plusieurs modules. Chacun d'eux correspond à un élément particulier constituant le capteur IR, et manipule des grandeurs physiques. Pour chaque module, seules les entrées-sorties sont fixées, aucune hypothèse n'est formulée sur les méthodes de calculs à mettre en oeuvre. Cette décomposition permet de dégager une structure unique capable d'accueillir des algorithmes de complexité variable. Chaque constituant est ainsi modélisé suivant la précision désirée et la technologie utilisée. Nos modèles permettent de simuler plusieurs types de capteurs IR [10] ; nous pouvons citer les systèmes utilisant des détecteurs thermiques, photoconducteurs ou photovoltaïques sous la forme de matrices en mode fixe, de monodétecteurs, de barrettes ou de mosaïques associés à un balayage série et/ou parallèle.

3.3 Echantillonnage spatial, temporel et spectral

D'après la figure 1, le problème de la modélisation de capteurs IR peut se résumer par l'équation suivante :

$$L \propto \int_{T_{\text{int}}} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \int_{P_i \in A_{\text{det}}} \int_{\mathbf{r}_i \in \Omega_{\text{opt}}} L_{P_i, \lambda}(\mathbf{r}_i, \lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot \cos(\theta) \cdot d\Omega_{\text{opt}} \cdot dA_{\text{det}} \cdot d\lambda \cdot dt \quad (3.1)$$

La luminance d'un pixel de l'image visualisée est proportionnelle à une expression qui met en oeuvre des intégrales multiples. Dans les modèles existants, l'équation est largement simplifiée :

$$L \propto \sum_{P_i \in A_{\text{det}}} L_{P_i, \lambda}(\mathbf{r}_{\text{opt}}, \lambda_c, t_{\text{ima}}) \cdot S(\lambda_c) \cdot \cos(\theta_{\text{opt}}) \cdot \Omega_{\text{opt}} \cdot (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}) \cdot T_{\text{int}} \cdot dA_{\text{det}} \quad (3.2)$$

avec $\lambda_c = (\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}}) / 2$, \mathbf{r}_{opt} le rayon passant par le centre optique, θ_{opt} l'angle que fait ce rayon avec l'axe optique, et t_{ima} l'instant où le capteur commence à voir la scène. Nos modèles permettent d'obtenir une plus grande précision des calculs. Un échantillonnage spectral permet de considérer les variations des grandeurs physiques (transmission de l'optique, sensibilité...) en fonction de la longueur d'onde. Un échantillonnage spatial de la pupille de sortie permet de résoudre le problème d'occlusion partielle. Enfin, un échantillonnage temporel permet de simuler les taches de mouvement, importantes pour le réalisme des images synthétisées. La finesse de ces échantillonnages est paramétrable, de plus ceux-ci peuvent être de nature régulière, semi-aléatoire ou aléatoire.

3.4 Entrée / sortie

L'entrée des modèles de capteurs IR est constituée d'un ensemble de grandeurs physiques. Celles-ci sont déterminées pour un instant donné, et pour chaque point échantillon de la scène 3D, situé dans un certain angle solide issu d'un point échantillon de la pupille d'entrée. Pour chaque point de la scène, ces grandeurs comprennent les luminances spectrales émises en direction du point de la pupille d'entrée, et modifiées par leur passage à travers l'atmosphère, ainsi que la profondeur le long de l'axe optique. Pour obtenir ces informations, une requête est envoyée à un modèle d'interface qui commande l'algorithme de rendu des images. Aucune hypothèse n'est faite sur celui-ci ; il peut s'agir indifféremment d'un Z-buffer ou d'un lancer de rayons. Dans les cas extrêmes, les requêtes se font pour des angles solides élémentaires (lancer de rayons) ou pour le champ de vue du capteur (rendu de l'image complète). Des solutions intermédiaires sont possibles : dans le cas d'une barrette de détecteurs disposés en parallèle, les données d'entrée sont transmises par « morceaux » d'images, correspondant aux instants où ils sont vus par les détecteurs. Ainsi, l'entrée de nos modèles de capteurs IR est précise et optimisée. La sortie est une image dont la résolution est celle du capteur simulé.

4 Modèles de capteurs IR

Nous présentons les modèles de capteurs IR développés suivant les principes évoqués précédemment. Les notations utilisées sont celles de la figure 1.

4.1 Le balayage

Ce modèle simule la déflexion du faisceau optique par le système de balayage. Il décrit le mode d'analyse de l'image par le ou les détecteur(s), suivant le type de balayage utilisé et la configuration du ou des détecteur(s), les deux étant implicitement liés. Le modèle permet de distinguer plusieurs modes d'analyse :

- balayage optomécanique avec un détecteur unique, une barrette de détecteurs en série ou en parallèle, une matrice de détecteurs.
- balayage électronique avec une matrice de détecteurs couvrant le plan focal.

Ce modèle détermine les zones de l'image d'entrée vues séquentiellement par les détecteurs et les instants entre lesquels elles contribuent à leur éclaircissement.

4.2 L'optique

Le modèle de l'optique comprend :

- une fonction géométrique, qui simule la formation des images dans le cas d'un système optique parfait, ainsi qu'une aberration géométrique : la distorsion optique. D'après le classement des aberrations de Seidel [9], le point P_i , image de P_o par le système optique, est :

$$P_i = G \cdot P_o + C_d \cdot (P_i - GP_o)^3 \quad (4.1)$$

où G est le grandissement et C_d le coefficient de distorsion de l'optique.

- une fonction énergétique, qui simule les phénomènes énergétiques introduits par le système optique. Ce modèle tient compte du facteur de transmission des composants optiques $\tau_{\text{opt}}(\lambda)$, reproduit l'assombrissement dû à la conversion luminance/éclairage, et le vignettage (blocage de l'énergie thermique par des composants optiques autres que la pupille de sortie) sur les bords de l'image. Il permet aussi de superposer à l'énergie reçue, l'énergie émise par le système optique. L'éclaircissement reçu en P_i dans le plan image est :

$$E_{P_i, \lambda}(\lambda, t) = \tau_{\text{opt}}(\lambda) \cdot \int_{\mathbf{r}_i \in \Omega_{\text{opt}}} (L_{P_i, \lambda}^{\text{scène}}(\mathbf{r}_i, \lambda, t) + L_{P_i, \lambda}^{\text{optique}}(\mathbf{r}_i, \lambda, t)) \cdot \cos(\theta) \cdot d\Omega_{\text{opt}} \quad (4.2)$$

- une fonction de « tache optique » non isoplanique, qui introduit les phénomènes optiques affectant la qualité des points de l'image, donc susceptibles de les élargir. Elle inclut toutes les aberrations optiques excepté la distorsion, la diffraction et la profondeur de champ. Ce modèle prend aussi en compte les vibrations de la ligne de visée du capteur IR liées aux mouvements de la plate-forme de fixation. La fonction décrivant l'étalement d'un point P_i (en anglais PSF : Point Spread Function) dans le plan image à un instant donné s'écrit comme la convolution de plusieurs fonctions :

$$h_{P_i}^{\acute{e}talement}(P, \lambda, t) = h_{P_i}^{aberrations}(P, \lambda, t) * h^{diffraction}(P, \lambda, t) * h_{P_i}^{profchamp}(P, \lambda, t) * h^{vibrations}(P, \lambda, t) \quad (4.3)$$

où $h_{P_i}^{aberrations}(P, \lambda, t)$ et $h^{vibrations}(P, \lambda, t)$ sont des gaussiennes, $h^{diffraction}(P, \lambda, t)$ est la tache d'Airy et $h_{P_i}^{profchamp}(P, \lambda, t)$ est à répartition uniforme sur un disque.

4.3 Le(s) détecteur(s) et le refroidissement

Le modèle des détecteurs et du système cryogénique comprend :

- une fonction géométrique, qui simule l'action des détecteurs sur les éclairissements spectraux arrivant dans le plan image. Les détecteurs réalisent un échantillonnage spatial et temporel de l'énergie thermique puisqu'ils sont de dimension finie et qu'ils intègrent cette énergie pendant un temps fini lui aussi. Le modèle prend en compte le temps de réponse des détecteurs et la limitation de leur champ de vue par le cryostat. Dans le cas d'un capteur à balayage optomécanique, le modèle simule les effets dus au déplacement de la scène sur les détecteurs au cours du temps. La quantité d'énergie spectrique reçue par un détecteur est :

$$Q_{\lambda}(\lambda) = \int_{T_{int}} \int_{P_i \in A_{det}(t)} \left[E_{P_i, \lambda}(\lambda, t) * h_{P_i}^{\acute{e}talement}(P_i, \lambda, t) \right] dA_{det}(t). dt \quad (4.4)$$

- une fonction énergétique, qui simule la conversion de l'énergie thermique en signal électrique par un détecteur IR. Au signal électrique, se superposent un bruit électrique additif $b(t)$ ainsi qu'un courant i_{obs} dit d'obscurité, délivré par le détecteur en l'absence de rayonnement thermique. Ce modèle permet de simuler les non-uniformités de la sensibilité ΔS (source d'un bruit multiplicatif) et du courant d'obscurité Δi_{obs} des détecteurs. Il permet aussi de considérer les non-linéarités de la réponse du détecteur, notamment le phénomène de saturation, qui peut engendrer un éblouissement local sur l'image. Le modèle prend en compte les variations de ces grandeurs physiques en fonction de la température des détecteurs. La quantité de charges électriques recueillie en sortie d'un détecteur est :

$$Q_{elec} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} Q_{\lambda}(\lambda). S(\lambda). (1 + \Delta S). d\lambda + \int_{T_{int}} i_{obs}(t). (1 + \Delta i_{obs}). dt + \int_{T_{int}} b(t). dt \quad (4.5)$$

4.4 Le module électronique

Il réalise les différents traitements appliqués dans les capteurs IR réels au signal puis à l'image. Ce modèle se compose des opérations suivantes : amplification (modélisée par un filtrage passe-bas), quantification du signal électrique, couplage alternatif (modélisé par un filtrage passe-haut car il supprime la composante continue du signal) pour les capteurs à balayage optomécanique, contrôle automatique de

gain et d'offset, corrections éventuelles de certains défauts de l'image.

5 Conclusion

Nous avons présenté des modèles de capteurs IR décrits à partir des phénomènes physiques. Ces modèles rendent compte des caractéristiques optiques, énergétiques et électroniques des capteurs IR, suivant les technologies mises en oeuvre et de façon plus ou moins détaillée. De plus les variations des grandeurs physiques sont prises en compte dans le domaine spatial, spectral, et temporel avec la précision souhaitée. Le développement de ces modèles a abouti à une application logicielle en cours de validation. Celle-ci consiste à comparer les grandeurs qui caractérisent les capteurs IR : d'une part, celles mesurées sur le banc CASIMIR² du CELAR³ et d'autre part, celles obtenues par simulation.

6 Références

- [1] M. POTSEMIL and I. CHAKRAVARTY. A lens and aperture camera model for synthetic image generation. In *Computer Graphics*, vol. 15, n°3, pp. 297-305, Aug. 81.
- [2] C. KOLB, D. MITCHELL, P. HANRAHAN. A realistic camera model for computer graphics. In *Computer Graphics Proceedings*, Annual Conference Series, pp. 317-324, 1995.
- [3] M. SHINYA. Post-filtering for depth of field simulation with ray distribution buffer. In *Graphics Interface*, Canadian Information Processing Society, pp.59-66, 1994.
- [4] J.M. CATHCART, A.D. SHEFFER and N.L. FAUST. High-fidelity infrared scene simulation at Georgia Tech. In *Proceedings SPIE : High-Fidelity Simulation for Training, Test Support, Mission Rehearsal, and Civilian Applications*, vol. 2740, pp. 142-152, Apr. 96.
- [5] M.DONN, P.YANNI and U. BERNSTEIN. Realistic approach to an IR mission rehearsal simulator. In *Proceedings SPIE : Infrared imaging systems : design, analysis, modeling and testing VII*, vol. 2743, pp. 290-301, Apr. 96.
- [6] T. AKIYAMA, Y. TAMAGAWA, T. YANAGISAWA. Simulation of visible/infrared sensor images. In *Proceedings SPIE : Infrared Technology and Applications XXII*, vol. 2744, pp. 61-67, Apr. 96.
- [7] A. MARSHALL and K. S. MURPHY. Modeling and simulation of IR scenes and sensors in the UK : current and future capabilities. In *Proceedings SPIE : Infrared Technology and Applications XXII*, vol. 2744, pp. 591-598, Apr. 96.
- [8] J.D. HORGER. NVSIM: UNIX-based thermal imaging system simulator. In *Proceedings SPIE : Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing IV*, vol. 1969, pp. 27-40, Apr. 93.
- [9] J. CANIOU, *L'observation et le mesurage par thermographie*, Afnor, 1991.
- [10] J. S. ACCETTA, D. L. SHUMAKER, editors, *The infrared and electro-optical systems handbook*, Environmental Research Institute of Michigan (ERIM), 1993.

² Caractérisation des Systèmes d'Imagerie IR.

³ Centre d'ELectronique de l'ARmement, situé à Bruz.