

Compensation radiométrique d'un système de projection immersive grand-public

Julien DEHOS¹, Eric ZEGHERS², François ROUSSELLE¹, Christophe RENAUD¹ et Laurent SARRY³

¹ LIL, Université du Littoral Côte d'Opale

² LAIC, Université d'Auvergne

³ ERIM, Université d'Auvergne

Résumé

Catopsys est un système de projection immersive grand-public destiné à des applications de réalité mixte. Il est composé d'un vidéo-projecteur, d'un miroir convexe et d'une caméra, et peut être utilisé dans des salles qui n'ont pas été conçues spécifiquement pour la projection. Le système permet d'afficher un environnement immersif en projetant une image dans toute la salle. Cependant, l'environnement ainsi affiché est perturbé par la réponse du projecteur, les matériaux composant la salle et les réflexions multiples inhérentes à toute pièce partiellement close. La compensation radiométrique de la projection a pour but de réduire l'influence de ces perturbations.

Dans ce papier, nous présentons notre système de projection et le processus radiométrique correspondant. Nous proposons ensuite un modèle radiométrique prenant en compte, en autres, la réponse du projecteur, les matériaux de la salle et les réflexions multiples particulièrement importantes avec notre système. Nous proposons également des méthodes de calibrage et de compensation basées sur ce modèle. Notre méthode de compensation peut être intégrée dans une application de réalité virtuelle ou mixte comme un post-traitement corrigeant les perturbations radiométriques de la projection. A notre connaissance, nos méthodes sont les premières à prendre en compte à la fois les réflexions multiples et la non-linéarité du projecteur.

Mots clé : Informatique Graphique, visualisation, réalité virtuelle, réalité mixte, compensation radiométrique

1. Introduction

1.1. Motivation

Dans le cadre de la réalité mixte, un environnement immersif est un environnement partiellement ou totalement artificiel, créé autour de l'utilisateur. Les environnements immersifs ont de nombreuses applications : simulateurs (de vol, de conduite...), prototypage, bureaux virtuels, environnements d'ambiance, jeux vidéo... Deux types de systèmes peuvent produire de tels environnements : les systèmes portables comme les casques de réalité virtuelle [Sut98] et les systèmes grand écran comme les CAVEs [CNSD93].

Catopsys (CATadiOptric Projection SYStem) est un projet de recherche dont le but est de rendre la réalité mixte accessible au grand public grâce à un système de projection immersive autocalibrant. Ce système est composé d'un projecteur, d'un miroir convexe et d'une caméra en rotation (voir figure 1). Une fois posé dans une salle, le système détermine automatiquement la géométrie de ses divers éléments

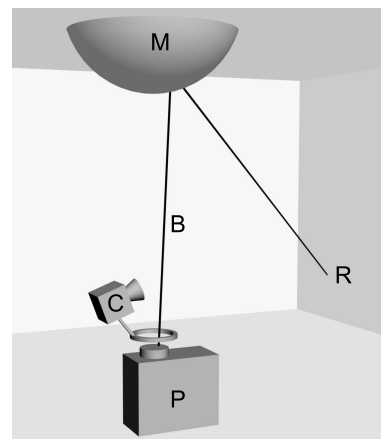


Figure 1: Principe du système de projection Catopsys. Le projecteur (P) pointe vers le miroir (M). Ainsi, un rayon de lumière (B), émis par P, est réfléchi par M puis propagé dans la salle (R). La caméra (C) est en rotation autour de l'axe optique de P, ce qui permet de visualiser la salle pour calibrer le système.

ainsi que de la salle [ASLZ08]. La projection immersive peut alors être réalisée, pour des applications de réalité virtuelle mais également de réalité mixte (car le couplage projecteur-caméra permet d'obtenir des informations sur la géométrie et la radiométrie de l'environnement réel). [YT08] présente un système utilisant les mêmes appareils. Cependant, celui-ci nécessite un écran de projection spécifique, ce qui le destine à des applications différentes.

Les images projetées par notre système sont radiométriquement perturbées au cours de la projection. Tout d'abord, la réponse du projecteur n'est pas neutre. De même, les matériaux de la salle ont peu de chance d'être adaptés à la projection (i.e. blanc lambertien). Enfin, les réflexions multiples entre les différentes surfaces qui composent la salle sont particulièrement importantes à l'intérieur d'un espace clos. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces phénomènes au niveau de l'image projecteur afin que l'environnement visible après projection soit proche de l'environnement souhaité. Pour réaliser cette compensation radiométrique, le système dispose d'un point de vue panoramique (la caméra en rotation) et d'une source de lumière omnidirectionnelle contrôlable (l'association projecteur-miroir).

1.2. Contribution

Dans ce papier, nous présentons le processus radiométrique de projection-acquisition et en proposons un modèle radiométrique. A partir de ce modèle, nous proposons une méthode de calibrage et une méthode de compensation autonomes et automatisées. La méthode de compensation est utilisable comme post-traitement d'applications de réalité mixte. Les différents aspects de notre système de projection sont pris en compte : le mapping géométrique entre la caméra et le projecteur, la réponse radiométrique de la caméra et les perturbations radiométriques causées par la projection (influence du projecteur, des matériaux et des réflexions multiples particulièrement importantes avec notre système de projection).

1.3. Travaux précédents

La restitution fidèle d'images projetées sur des surfaces non adaptées à la projection a fait l'objet de nombreux travaux récents [BIWG07]. Nous n'évoquons ici que quelques méthodes de compensation en deux passes utilisant un système projecteur-caméra. Ces méthodes consistent à évaluer, hors ligne, la réponse radiométrique du système puis à inverser cette réponse pour calculer, en ligne, les images de compensation.

[NPGB03] propose un modèle de projection sur des surfaces non adaptées. Les auteurs donnent également une méthode de calibrage et de compensation basée sur ce modèle. Leur méthode modélise la projection par une réponse non linéaire de chaque canal de couleur suivi d'un mélange linéaire de ces canaux. Cependant, elle suppose que l'écran

de projection est plat et donc qu'il n'y a pas de réflexion multiple (ce qui n'est pas le cas de notre application).

[BGZ*06] propose une méthode de compensation prenant en compte les réflexions multiples entre surfaces diffuses grâce au concept de radiosité inverse (*reverse radiosity*). Cependant, les auteurs n'expliquent pas comment obtenir la géométrie et les réflectivités de la salle nécessaires à leur méthode. De plus, ils supposent linéaire la réponse du projecteur.

Enfin, une méthode de compensation par calibrage exhaustif est proposé dans [WB07]. Cette méthode consiste à mesurer la matrice du transport de la lumière, c'est-à-dire l'influence de chaque pixel projecteur sur chaque pixel caméra. Les images de compensation peuvent être calculées grâce à la matrice inverse. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte la non-linéarité de la réponse du projecteur. De plus, l'obtention de la matrice demande un très grand nombre d'acquisitions caméra (avec notre projecteur 1400x1050 et notre caméra 1024x768 à 6 pas de rotation, il faut théoriquement plus de 6.10^{12} images).

1.4. Sommaire

La section 2 présente le système de projection Catopsys. La section 3 décrit le processus radiométrique réalisé par ce système et pose la problématique sous-jacente. La section 4 propose une modélisation de ce processus. Les sections 5 et 6 proposent une méthode de calibrage et une méthode de compensation basées sur le modèle radiométrique. Enfin, la section 7 présente et analyse quelques résultats et la section 8 résume les travaux présentés et introduit quelques perspectives.

2. Système de projection

Le système de projection Catopsys vise à rendre la réalité mixte abordable. Pour cela, il doit être immersif, auto-calibrant et grand-public. La solution retenue est un système projecteur-caméra catadioptrique (voir figure 1). Un miroir convexe (M) est fixé au plafond. Un vidéo-projecteur (P) est placé sous le miroir et pointe vers lui. Ainsi, un rayon de lumière (B) émis par P est réfléchi par M dans la salle. Enfin, une caméra grand-angle (C) est placée au-dessus du projecteur, en direction des murs de la salle. La caméra peut tourner autour de l'axe optique du projecteur grâce à un moteur pas-à-pas. Le projecteur, la caméra et le moteur sont contrôlés par un ordinateur.

Ce système répond aux trois critères désirés. Tout d'abord, la projection immersive est obtenue grâce à l'association du projecteur et du miroir convexe. Selon la configuration de ces éléments et de la salle, la projection peut être réalisée sur pratiquement toute la pièce (4π sr).

Ensuite, le système est capable de s'autocalibrer grâce au système projecteur-caméra qui permet de projeter une

image et de capturer le résultat dans la pièce. Plus précisément, le système doit être calibré géométriquement (positions et orientations relatives des appareils, géométrie de la salle), optiquement (distorsions des optiques) et radiométriquement (propagation de la lumière dans la pièce, réponse des appareils).

Enfin, le système est composé uniquement d'appareils relativement peu coûteux. En effet, depuis quelques années, les vidéo-projecteurs sont de moins en moins chers et peuvent désormais être envisagés pour des applications grand-public. De même, il existe des modèles de caméra contrôlée par ordinateur abordables. Enfin, les autres composants de notre système ont un coût négligeable (notre implémentation utilise un miroir de surveillance et un moteur pas-à-pas contrôlé via une carte IEEE 1284). A terme, un système produit industriellement serait encore moins coûteux.

La caméra est une caméra vidéo couleur, matricielle, classique. Elle est équipée d'un grand-angle et est en rotation autour de l'axe optique du projecteur. Elle peut ainsi acquérir une grande partie de la scène (sur notre système 6 pas permettent d'effectuer une rotation complète). On appelle *image caméra* une image retournée par la caméra (à un pas de rotation donné), dans le système de couleurs et de la résolution de la caméra. On appelle *image projecteur* l'image envoyée au projecteur, dans son système de couleurs et de sa résolution. Après calibrage et correction de la caméra (voir section 5), on peut considérer que le système dispose d'une primitive d'acquisition d'*images projecteur mesurées*. On définit ces images ainsi : un pixel dans l'image projecteur se projette en un point particulier de la pièce ; la lumière vue par la caméra en ce point donne la valeur du pixel dans l'image projecteur mesurée. Cette dernière utilise donc le système de couleurs de la caméra et est de la résolution du projecteur.

Dans la suite de ce papier, la réflexion par le miroir convexe est ignorée. En effet, son influence radiométrique est quasi nulle et son influence géométrique est prise en compte par le calibrage géométrique du système projecteur-caméra (voir section 5).

3. Processus radiométrique

Une image projetée par le système Catopsys subit des perturbations radiométriques. En effet, les vidéo-projecteurs ne produisent pas une image parfaitement fidèle à l'image d'entrée. De même, les murs d'une pièce, utilisés comme support de projection dans notre application, sont très différents d'un écran de projection dédié (c'est-à-dire à peu près plat, blanc et lambertien). La problématique qui se pose alors est la suivante : comment faire pour que la projection restituée à l'utilisateur une image donnée, malgré les perturbations radiométriques ? L'unique degré de liberté autorisé par le système réside dans le contenu de l'image envoyée au projecteur. L'idée de la compensation radiométrique est de modifier cette image de telle sorte qu'une fois projetée, et donc

“radiométriquement perturbée”, elle apparaisse à l'utilisateur comme l'image désirée initialement. Cette compensation radiométrique n'est cependant réalisable qu'après avoir caractériser les perturbations. Ceci nécessite un appareil de mesure, ici la caméra. Le dernier problème qui se pose alors est qu'une caméra n'est généralement pas un appareil de mesure fidèle et induit, elle aussi, des perturbations radiométriques.

Le processus radiométrique de projection-acquisition, réalisé par le système Catopsys, est présenté figure 2. Une image d'entrée est envoyée au projecteur. Celui-ci émet la lumière correspondante dans la pièce. La lumière est ensuite réfléchi de mur en mur, de nombreuses fois, ce que l'on appelle classiquement les *réflexions multiples*. Finalement, une partie de la lumière est réfléchi par les murs vers la caméra. Cette lumière subit les perturbations de la caméra avant de constituer l'image renvoyée par celle-ci à l'ordinateur. Pour notre application, on suppose que la lumière perçue par l'utilisateur correspond à la lumière perçue par la caméra c'est-à-dire que l'utilisateur est proche de la caméra et voit donc la scène à peu près de la même façon.

Les perturbations radiométriques introduites au cours du processus de projection-acquisition sont résumées table 1. Elles sont détaillées ci-dessous, suivant l'ordre de la table.

- L'image envoyée au projecteur par l'ordinateur est codée dans un certain système de couleurs (en général, un système normalisé comme le sRGB). Le projecteur utilise son propre système de couleurs, donné par la réponse spectrale de ses différents canaux. Ceci produit un mélange inter-canaux linéaire. Par exemple, si l'image envoyée est rouge et que le projecteur allume son canal rouge, de réponse spectrale différente, la lumière émise aura dans le système de couleur initial, des composantes verte et bleue non nulles.
- La puissance de la lumière émise par le projecteur n'est pas toujours proportionnelle au niveau de l'image d'entrée. Le projecteur introduit ainsi une non-linéarité entre l'intensité d'entrée du canal et la puissance émise correspondante.
- Le système optique du projecteur laisse passer plus de lumière au centre qu'au bord. Ce phénomène, appelé *vignetting*, atténue la lumière d'un facteur constant, donné par la position du pixel correspondant.
- La lumière émise par le projecteur atteint un point de la salle. Elle est alors réfléchi dans toutes les directions, plus ou moins fortement. La lumière se propage ensuite dans toute la salle, atteint d'autres points où le processus se répète à nouveau, réalisant ainsi une répartition de la lumière par réflexions multiples. Cette répartition dépend de la géométrie et des matériaux de la salle. En simplifiant, on peut dire que la lumière atteignant un point, après réflexions multiples, est une combinaison linéaire de la lumière initiale incidente aux différents points de la salle.
- En un point donné de la salle, une partie de la lumière

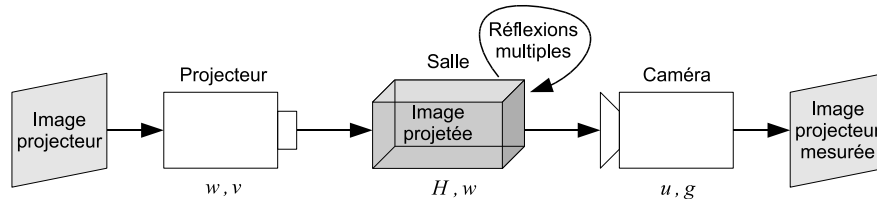


Figure 2: Processus radiométrique du système projecteur-caméra. Les composantes du modèle radiométrique mises en jeu sont données en italique (voir section 5).

Origine	Perturbation	Description	Modélisation
projecteur	système de couleurs	mélange inter-canaux linéaire	—
projecteur	transfert d'intensité	non-linéarité intra-canal	<i>w</i>
projecteur	vignelage	pondération constante du pixel	<i>w</i>
salle de projection	réflexions multiples	mélange inter-pixels linéaire	<i>H</i>
salle de projection	réflexion vers la caméra	pondération constante intra-canal	<i>w</i>
caméra	vignelage	pondération constante du pixel	<i>u</i>
caméra	réponse du capteur	non-linéarité intra-canal	<i>g</i>
caméra	système de couleurs	mélange inter-canaux linéaire	<i>v</i>

Table 1: Description et modélisation des perturbations radiométriques au cours du processus de projection-acquisition.

incidente (éventuellement après réflexions multiples) est réfléchi dans la direction de la caméra. Comme la géométrie (de la salle et du système) et les matériaux sont constants, cette réflexion se ramène à une pondération constante (chaque canal de chaque pixel a son propre facteur).

- Comme pour le projecteur, le système optique de la caméra produit du vignelage, c'est-à-dire que chaque pixel est atténué d'un facteur constant qui lui est propre.
- Le capteur de la caméra introduit une non-linéarité entre la puissance reçue et l'intensité renvoyée. Ceci est dû non seulement à la réponse d'intensité du capteur mais également à son exposition qui pose des problèmes de saturation.
- Enfin, la couleur renvoyée par la caméra est codée dans son propre système de couleurs donné par la réponse spectrale de ses différents canaux.

4. Modèle radiométrique

Dans la section précédente, nous avons détaillé les perturbations radiométriques introduites par le processus de projection-acquisition du système Catopsys. Dans cette nouvelle section, nous proposons une modélisation de ce processus, inspirée de celle proposée par Nayar et al. dans [NPGB03].

Notre modèle radiométrique est illustré figure 3 (voir également table 1). Lors de la projection, chaque canal de chaque pixel de l'image subit une transformation non-linéaire *w* (transfert d'intensité du projecteur, vignelage du projecteur et réflexion de la lumière depuis la salle vers la

caméra). Puis les canaux de chaque pixel font l'objet d'une combinaison linéaire *v* (due à l'utilisation de différents systèmes de couleurs tout au long du processus de projection-acquisition). Enfin, les réflexions multiples se traduisent par une combinaison linéaire *h* des pixels. En ce qui concerne la caméra, l'acquisition subit une pondération *u* propre à chaque pixel (vignelage caméra) puis une transformation non-linéaire *g* commune à tous les pixels (réponse d'intensité). L'image ainsi capturée est codée dans le système de couleurs de la caméra.

Le reste de cette section décrit plus précisément le modèle radiométrique, en considérant que les systèmes de couleurs sont à 3 dimensions[†]. Soit *p* un pixel de l'image à projeter. Soit $x = [x_r \ x_g \ x_b]^T$ la couleur de *p* dans le système de couleurs initial (*r, g, b*). Soit $y = [y_R \ y_G \ y_B]^T$ la couleur de *p* dans le système de couleur final (*R, G, B*), celui de la caméra. La conversion de *x* dans (*r, g, b*) en *y* dans (*R, G, B*) est modélisée par une combinaison linéaire des canaux de couleur, c'est-à-dire $y = tx$, avec

$$t = \begin{bmatrix} t_{Rr} & t_{Rg} & t_{Rb} \\ t_{Gr} & t_{Gg} & t_{Gb} \\ t_{Br} & t_{Bg} & t_{Bb} \end{bmatrix}$$

Soient *v* et *v'* définis par :

$$v = \begin{bmatrix} 1 & t_{Rg} & t_{Rb} \\ t_{Gr} & 1 & t_{Gb} \\ t_{Br} & t_{Bg} & 1 \end{bmatrix}$$

[†] Il s'agit d'un choix pour expliquer la méthode plus simplement, non d'une limitation.

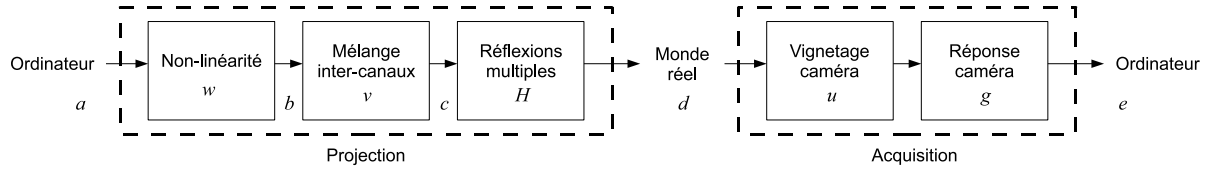


Figure 3: Modèle radiométrique du système projecteur-caméra.

$$v' = \begin{bmatrix} t_{Rr} - 1 & 0 & 0 \\ 0 & t_{Gg} - 1 & 0 \\ 0 & 0 & t_{Bb} - 1 \end{bmatrix}$$

On a donc $t = v + v'$. Intuitivement, v traduit les transformations inter-canaux de la conversion de (r, g, b) à (R, G, B) et v' les transformations intra-canal.

Ceci nous permet de décrire les différentes composantes du modèle radiométrique. Soit a la couleur du pixel p dans l'image à projeter. On note a_λ la valeur du canal λ de la couleur a (donc ici $\lambda \in \{r, g, b\}$). La première composante du modèle est la fonction non-linéaire w_λ qui modélise la non-linéarité et les pondérations intra-canal du processus pour le pixel p (transfert d'intensité du projecteur, vignelage du projecteur et réflexion de la lumière depuis la salle vers la caméra). On notera que w_λ contient implicitement le terme $v'_{\lambda\lambda}$ décrit précédemment. En appliquant w_λ sur a on obtient la couleur b par :

$$b_\lambda = w_\lambda(a_\lambda) \quad (1)$$

La composante suivante v modélise la conversion, en p , dans le système de couleurs de la caméra (mélange inter-canaux). On obtient la couleur c par :

$$c = vb \quad (2)$$

Enfin, la dernière composante, pour la projection, modélise les réflexions multiples entre pixels (ou, plus précisément, entre les surfaces éclairées par la lumière correspondant aux pixels). Soit C_λ le vecteur des couleurs, comme calculées précédemment pour p , de tous les pixels. H_λ modélise le transport de la lumière entre les surfaces c'est-à-dire la lumière apportée en chaque surface par réflexions multiples de la lumière des autres surfaces. On obtient alors D_λ , vecteur des couleurs, réellement visibles, de tous les pixels, par :

$$D_\lambda = C_\lambda + H_\lambda C_\lambda \quad (3)$$

On notera que H_λ est une matrice de taille $n \times n$ où n est le nombre de pixels de l'image c'est-à-dire une matrice très grande qu'il n'est pas raisonnable de manipuler telle quelle en pratique. Pour résoudre ce problème, on peut regrouper les pixels en groupes et modéliser les réflexions multiples entre groupes.

La couleur d donnée par les vecteurs D_λ pour le pixel p correspond à la couleur visible dans la salle de projection, depuis le point de vue de la caméra. Son acquisition par la

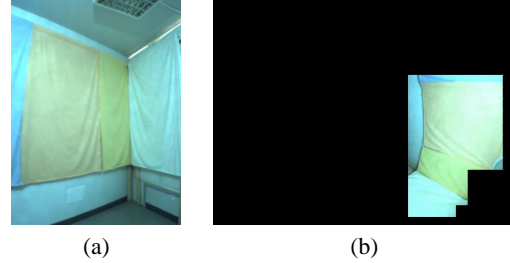


Figure 4: Image caméra (a) et image projecteur correspondante (b).

caméra est modélisée ainsi : le facteur de pondération u_λ modélise le vignelage caméra en p et la fonction non-linéaire g_λ la réponse d'intensité de la caméra (identique pour tous les pixels de la caméra). Finalement, la couleur e_λ retournée par la caméra pour p , après projection et acquisition, est :

$$e_\lambda = g_\lambda(u_\lambda d_\lambda) \quad (4)$$

5. Méthode de calibrage

Les sections précédentes ont permis de proposer un modèle radiométrique du processus de projection-acquisition du système Catopsys. L'objectif est maintenant d'établir une méthode de calibrage c'est-à-dire une méthode pour déterminer les paramètres v, w, H, u et g caractérisant un système Catopsys particulier.

Dans cette section, nous présentons une méthode de calibrage automatisée et autonome. L'unique primitive requise est une fonction projetant une image donnée et retournant l'image capturée par la caméra pour un temps d'exposition donné et à un pas de rotation donné. Notre méthode comporte plusieurs étapes :

- calibrer géométriquement la caméra et le projecteur
- calibrer radiométriquement la caméra :
 - déterminer u et g
- calibrer radiométriquement la projection :
 - déterminer v (sans réflexions multiples)
 - déterminer w (sans réflexions multiples)
 - déterminer H (réflexions multiples)

5.1. Mapping géométrique

Calibrer un système Catopsys nécessite de pouvoir connaître, pour chaque pixel projeté, la couleur correspondante vue dans la salle. Pour cela, le système dispose d'une caméra matricielle en rotation. On peut donc projeter une image (image projecteur) et capturer des images de la scène à différents angles de rotation (images caméra) pour voir le résultat de la projection dans presque toute la salle. Le mapping géométrique consiste à établir une correspondance entre l'image projecteur et les images caméra. L'objectif est d'obtenir une image projecteur mesurée c'est-à-dire une image donnant, pour chaque pixel de l'image projecteur, la couleur correspondante vue par la caméra.

On considère que la caméra utilise toujours les mêmes pas de rotation. Pour obtenir le mapping géométrique, on projette un point (image projecteur noire sauf en un pixel, blanc) et on récupère les images caméra de cette scène. On retrouve ainsi à quel pixel de quelle image caméra correspond le pixel projecteur. En pratique, un pixel projecteur peut correspondre à plusieurs pixels d'une ou plusieurs images caméra ; il suffit alors de calculer une moyenne des couleurs caméra pour obtenir la couleur projecteur mesurée. Théoriquement, on peut ainsi obtenir un mapping pour tous les points de l'image projecteur. En pratique, on se contente de quelques points et on interpole les données manquantes. On peut même précalculer, pour chaque pas de rotation, une carte donnant pour chaque pixel de l'image caméra, le pixel projecteur correspondant et le facteur de pondération du moyennage. Ainsi, calculer une image projecteur mesurée revient à initialiser une image projecteur, puis à parcourir tous les pixels caméra en ajoutant à chaque fois la couleur au pixel projecteur correspondant affectée de la pondération associée (voir figure 4). Ceci implique que tout pixel caméra doit correspondre à au plus un pixel projecteur. En pratique, cette limitation n'est pas un problème car la caméra a vocation à mesurer tous les pixels projecteurs. Pour cela, on s'efforce d'avoir une correspondance 1 pixel projecteur - n pixels caméra, ce qui nous permet bien d'attribuer, à chaque pixel caméra, un pixel projecteur au plus.

5.2. Calibrage de la caméra

5.2.1. Réponse d'intensité

La couleur retournée par une caméra n'est pas toujours proportionnelle à l'intensité de la lumière perçue. De plus, si cette lumière est trop intense, le capteur sature. Il existe des méthodes (voir [DM97] pour la plus connue) permettant de calibrer la réponse d'intensité du capteur (g) et de capturer des images à grande dynamique (HDR) sans saturation. Pour cela, ces méthodes nécessitent d'utiliser uniquement des images d'une même scène avec des temps d'acquisition différents. On notera cependant que ces méthodes traitent chaque canal de couleur indépendamment. On peut étalonner les canaux entre eux en pondérant leur réponse d'intensité à partir d'un blanc de référence (voir figure 5).

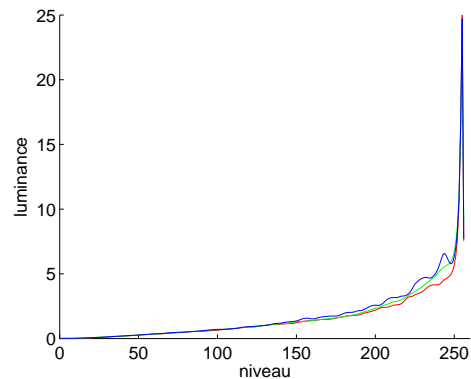


Figure 5: Réponse de notre caméra 3-CMOS.

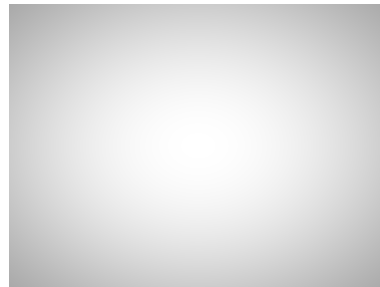


Figure 6: Vignetage de notre caméra grand-angle.

5.2.2. Vignetage

Le vignetage est à l'origine du fameux effet "coins noirs" visible sur les images issues de caméra ou d'appareil photo. Le vignetage est en partie dû à la géométrie du système optique. En effet, la lumière pouvant atteindre le capteur est plus faible aux bords qu'au centre car l'ouverture du système optique y est plus petite. Il existe plusieurs modèles caractérisant le vignetage. Pour notre application, nous utilisons le modèle de Goldman-Chen [GC05] qui est un modèle polynômial à 5 paramètres.

Caractériser le vignetage caméra revient donc à déterminer le facteur d'atténuation (u) en fonction du pixel caméra (voir figure 6). Le système Catopsys dispose de tous les éléments pour résoudre ce problème. En effet, il permet d'afficher un point, via le projecteur, et de mesurer ce point en plusieurs pixels caméra, via la rotation de la caméra. Dans la salle de projection, le point produit toujours la même lumière mais sur les images caméra, le pixel atteint est différemment. Le vignetage et donc la couleur renvoyée peuvent également varier, uniquement à cause du vignetage. Ainsi, en considérant suffisamment de points ou de pixels caméra, on obtient un ensemble de données suffisant pour déterminer les paramètres du modèle de vignetage de la caméra. Pour notre application, on utilise la méthode classique d'optimisation

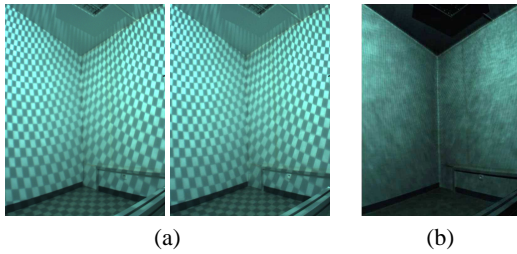


Figure 7: Acquisition de la lumière directe. Projection de damiers (a). Lumière directe (b).

de Levenberg-Marquardt. Lorsque u est ainsi déterminé, il est immédiat de corriger, sur une image caméra, la pondération causée par le vignettage.

5.3. Calibrage de la projection

Les étapes précédentes fournissent une primitive d'acquisition caméra fidèle à la réalité. Cette primitive prend en entrée une image projecteur et retourne une image projecteur mesurée HDR dont la réponse d'intensité et le vignettage de la caméra ont été corrigés. En d'autres termes, cette primitive inverse l'équation 4 et donne les couleurs d des pixels projecteur.

Il s'agit maintenant d'estimer les composantes restantes du modèle radiométrique, celles relatives à la projection. L'idée essentielle de la méthode proposée ici est de décorréler les réflexions multiples des autres composantes. Pour cela, on utilise une méthode de mesure de la *lumière directe*, ce qui permet d'annuler l'influence des réflexions multiples et donc de ramener l'équation 3 à :

$$D_\lambda = C_\lambda$$

Il est alors possible d'estimer w puis v sans l'influence des réflexions multiples qui sont estimées dans un dernier temps.

5.3.1. Lumière directe

La lumière directe est la lumière que verrait la caméra s'il n'y avait pas de réflexions multiples c'est-à-dire la lumière émise par le projecteur et réfléchi une seule fois, dans la direction de la caméra.

L'acquisition de la lumière directe est réalisée selon la méthode proposée dans [NKGR06]. Cette méthode nécessite un système projecteur-caméra. Elle permet de séparer la lumière vue par la caméra en une composante directe et une composante indirecte d'une scène éclairée uniformément par le projecteur. Elle consiste à projeter un damier (où les carreaux alternent entre la couleur d'éclairage et le noir). Un point de la salle correspondant à un pixel d'un carreau noir n'est pas éclairé directement par le projecteur. Donc, la lumière correspondante, capturée par la caméra est exclusivement de la lumière indirecte. En répétant ceci avec un damier différent, par exemple dont les carreaux sont décalés,

on obtient la lumière indirecte au niveau de chaque pixel. Finalement, on calcule la lumière directe d'après les carreaux colorés : ici, la lumière est la somme de la composante directe et de la composante indirecte. Comme la composante indirecte est désormais connue, on retrouve la composante directe (voir figure 7).

En théorie, la méthode fonctionne en projetant deux images : un damier et son dual. En pratique, on obtient un meilleur résultat en projetant un plus grand nombre d'images. Dans notre implémentation, on projette des damiers dont les carreaux font 6 pixels de côté et on les décale de 3 pixels selon l'une ou l'autre des deux dimensions, soit un total de 16 images à projeter et à capturer.

5.3.2. Mélange inter-canaux

La méthode de mesure de la lumière directe permet d'utiliser la méthode proposée dans [NPGB03] pour déterminer v . En reprenant les notations de la section 4 où (r, g, b) est le système de couleurs initial et (R, G, B) le système de couleurs de la caméra :

$$a = \begin{bmatrix} a_r \\ a_g \\ a_b \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_r \\ b_g \\ b_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_r(a_r) \\ w_g(a_g) \\ w_b(a_b) \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} 1 & v_{Rg} & v_{Rb} \\ v_{Gr} & 1 & v_{Gb} \\ v_{Br} & v_{Bg} & 1 \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} c_R \\ c_G \\ c_B \end{bmatrix} = vb$$

Pour trouver les coefficients de v , par exemple v_{Gr} et v_{Br} , on projette deux images en faisant varier un seul canal. Par exemple, en faisant varier le canal rouge du pixel projecteur, on obtient :

$$a^{(1)} = \begin{bmatrix} a_r^{(1)} \\ a_g^{(1)} \\ a_b^{(1)} \end{bmatrix}, \quad a^{(2)} = \begin{bmatrix} a_r^{(2)} \\ a_g^{(1)} \\ a_b^{(1)} \end{bmatrix}$$

Le pixel mesuré correspondant c vérifie :

$$\begin{bmatrix} c_R^{(1)} \\ c_G^{(1)} \\ c_B^{(1)} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} b_r^{(1)} \\ b_g^{(1)} \\ b_b^{(1)} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} c_R^{(2)} \\ c_G^{(2)} \\ c_B^{(2)} \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} b_r^{(2)} \\ b_g^{(1)} \\ b_b^{(1)} \end{bmatrix}$$

D'après la définition de v :

$$\begin{aligned} \Delta c_R &= \Delta b_r \\ \Delta c_G &= v_{Gr} \Delta b_r \\ \Delta c_B &= v_{Br} \Delta b_r \end{aligned}$$

Ce qui équivaut à :

$$v_{Gr} = \frac{\Delta c_G}{\Delta c_R}, \quad v_{Br} = \frac{\Delta c_B}{\Delta c_R}$$

C'est-à-dire que l'on calcule v_{Gr} et v_{Br} d'après la variation de couleur mesurée. Les autres coefficients de v se calculent de façon similaire, en faisant varier le canal vert puis le canal bleu de l'image projecteur. Enfin, on notera que le calcul

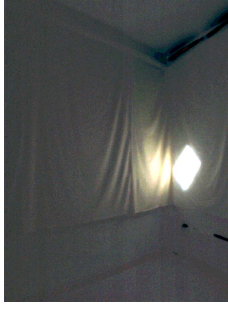


Figure 8: Mesure des réflexions multiples. On éclaire un groupe de points et on mesure l'éclairement des autres groupes dû aux réflexions multiples.

est indépendant d'un pixel à un autre et que donc toutes les matrices v peuvent être calculées en projetant uniquement 4 images (4 images de lumière directe soit 64 images de damiers avec notre implémentation).

5.3.3. Non-linéarité

Pour déterminer w , on utilise, ici aussi, la méthode proposée dans [NPG03], appliquée sur des captures de lumière directe. La fonction w_λ peut être estimée en projetant toutes les valeurs de a_λ . En effet, si on projette a_λ , on peut capturer c_λ et calculer $b = v^{-1}c$. Comme $b_\lambda = w_\lambda(a_\lambda)$, on a bien caractérisé w_λ pour a_λ . En projetant des images grises, on peut obtenir w_r , w_g et w_b d'après les mêmes images. Pour réduire le nombre de projection-acquisitions, on mesure w_λ pour quelques valeurs uniquement et on interpole pour les valeurs manquantes (notre implémentation utilise 10 images soit 160 images de damiers).

5.3.4. Réflexions multiples

La dernière étape du calibrage consiste à déterminer la matrice H_λ où $H_{\lambda,pq}$ est la proportion de lumière (du canal λ) qui, partant du point de la salle atteint par le pixel projecteur p , est propagée dans la salle jusqu'au point de la salle atteint par le pixel projecteur q puis réfléchi vers la caméra. On obtient ainsi une matrice donnant l'influence d'un point de la salle sur un autre. Plus précisément, on connaît, les v , w et a , ce qui nous permet de calculer les c . De plus, la caméra nous donne les d ce qui nous permet de calculer, en utilisant l'équation 3, les matrices H_λ .

[SCG*05] propose une méthode hiérarchique pour déterminer de telles matrices. Dans notre implémentation, on se contente de diviser l'image en groupes de pixels. Ainsi, pour mesurer $H_{\lambda,pq}$, on projette une image dont les pixels du groupe p sont blancs et les autres pixels noirs. Avec la caméra, on capture ensuite la lumière complète (et non plus la lumière directe) et on retrouve $H_{\lambda,pq}$ d'après les pixels du groupe q . En fait, cette image permet d'obtenir $H_{\lambda,pq}$ pour tous les q (voir figure 8). Notre implémentation regroupe

les pixels en carrés de 25×25 pixels ce qui nécessite la projection-acquisition d'environ 2000 images.

6. Méthode de compensation radiométrique

La méthode de calibrage proposée dans la section précédente permet de déterminer les paramètres du modèle radiométrique caractérisant un système Catopsys particulier. Ceci nous permet de connaître comment une image donnée sera altérée lors de la projection. Dans cette nouvelle section, on s'intéresse au problème inverse : on veut faire apparaître une image donnée dans la salle, quelle image faut-il projeter pour cela ?

La méthode de compensation proposée ici consiste à inverser le modèle radiométrique. Plus précisément, il s'agit tout d'abord de restreindre l'image désirée à une image affichable par le système puis à compenser successivement les réflexions multiples, le mélange inter-canaux et la non-linéarité.

6.1. Tone mapping inverse

Schématiquement, le modèle radiométrique effectue une transformation du domaine de définition des images projecteur $[0,255]^3$ dans le domaine de valeurs $D_r \times D_g \times D_b \in \mathbb{R}^{+3}$ (images HDR). Ainsi, seules les images à valeurs dans $D_r \times D_g \times D_b$ peuvent être compensées et affichées par le système de projection. La première étape de la compensation consiste donc à convertir l'image désirée dans le domaine affichable. Il s'agit du problème classique de tone mapping inverse, i.e. convertir une image LDR (à basse dynamique) en image HDR. Si diverses solutions à ce problème ont été proposées [BLD*07, RTS*07], un simple redimensionnement linéaire de la dynamique donne généralement de bons résultats [AFR*07]. Cependant, avec notre modèle radiométrique chaque canal de chaque pixel possède son propre domaine de valeurs. Pour résoudre ce problème, on détermine un domaine commun en moyennant les bornes des domaines de chaque pixel. Ce compromis permet de limiter la saturation sans perdre trop de dynamique.

6.2. Compensation des réflexions multiples

L'image désirée étant désormais dans le domaine de valeurs du modèle radiométrique, on peut calculer l'image de compensation correspondante c'est-à-dire la réciproque selon le modèle radiométrique. Pour compenser les réflexions multiples, on remarque que l'équation 3 équivaut à :

$$C_\lambda = F_\lambda D_\lambda \quad (5)$$

où

$$F_\lambda = (I + H_\lambda)^{-1} = I - H_\lambda + H_\lambda^2 - \dots$$

car, de par la conservation de l'énergie, $\|H_\lambda\|_\infty < 1$.

Comme expliqué dans la section 5, les réflexions multiples sont caractérisées en considérant des groupes de pixel. Il faut donc établir une relation entre un groupe et les pixels correspondants. On définit la valeur d'un groupe de D_λ par la somme des pixels mesurés correspondants. Ceci permet de calculer l'équation 5, ce qui donne C_λ . On peut alors compenser les réflexions multiples en pondérant chaque pixel de l'image désirée par la valeur du groupe correspondant de C_λ moyennée par le nombre de pixels du groupe. Cependant, des discontinuités seront visibles aux frontières des groupes. Pour limiter ce phénomène, on utilise un lissage de Gouraud classique [Gou71].

6.3. Compensation intra-pixel

La dernière étape consiste à inverser l'équation 2 puis l'équation 1 avec

$$b = v^{-1}c, \quad a_\lambda = w_\lambda^{-1}(b)$$

Projeter les couleurs a doit faire apparaître, dans la salle, les couleurs d désirées compensant ainsi les perturbations radiométriques de la projection.

Contrairement à l'étape de calibrage, la compensation est réalisée, en ligne, pour chaque image à projeter. Elle doit donc être effectuée le plus rapidement possible. Pour cela, on peut pré-calculer v^{-1} et F pendant le calibrage. Si on utilise l'espace de couleurs RGB et qu'on appelle T (resp. N) le nombre de groupes (resp. de pixels), alors le calcul de F demande trois produits d'une matrice de taille $T \times T$ par un vecteur de taille T ainsi qu'un lissage de Gouraud. La compensation de v nécessite le produit d'une matrice de taille 3×3 par un vecteur de taille 3, pour chaque pixel (soit N produits). Enfin, compenser w_λ (pour chaque canal de chaque pixel) revient à inverser une fonction discrétisée c est-à-dire à chercher un encadrement et à interpoler les valeurs réciproques.

7. Résultats

Nous avons testé notre méthode sur notre implémentation du système de projection composée d'un projecteur DLP SXGA et d'une caméra XGA 3-CMOS. Notre salle de test présente des murs de peinture blanche assez spéculaire. Nous y avons placé quelques morceaux de tissu colorés. Les méthodes de calibrage et de compensation ont été implémentées sur CPU sans parallélisme et testées sur un processeur Intel® Core™ 2 Duo E6600 2,4 GHz.

L'étape de calibrage nécessite environ 6 heures. Le temps est principalement consacré aux acquisitions caméra. En comparaison, le temps de calculs est négligeable. En pratique, la durée du calibrage n'est pas gênante car la méthode est automatisée et peut se dérouler pendant un moment d'inutilisation. De plus, le calibrage doit être mis à jour uniquement lorsque le système ou la salle sont modifiés, ce qui est censé être exceptionnel.

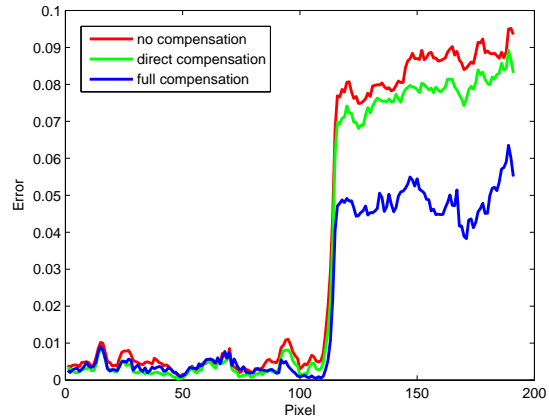


Figure 10: Erreur de la projection sans compensation (rouge), avec compensation de la première réflexion (vert) et avec compensation complète (bleu) sur une ligne de l'image.

La compensation est réalisée à environ 5 images par seconde. Le temps de calcul est principalement consacré à compenser les réflexions multiples et notamment au passage pixel-groupe-pixel. Une implémentation GPU devrait améliorer ce résultat de façon significative grâce aux fonctionnalités de texturage, de lissage et de parallélisme que ce genre de calculateur apporte.

Pour analyser les images obtenues, on définit l'erreur d'une image mesurée par $\frac{1}{N} \sum_p \|c_p - \hat{c}_p\|_2^2$ où N est le nombre de pixels et c_p (resp. \hat{c}_p) la couleur, dans l'espace métrique $L^*u^*v^*$, du pixel p de l'image désirée (resp. de l'image mesurée).

La figure 9 illustre le résultat de la compensation sur une scène de réalité mixte. L'image à projeter (a) est une vue panoramique d'un paysage de montagne. Nous avons fixé des pièces de tissus rose, jaune et blanc en un coin de la salle de test. Sans compensation radiométrique, la projection est très perturbée et l'image vue par l'utilisateur (b) est très différente de l'image souhaitée. Avec compensation des mélanges de couleurs et des non-linéarités (c), la projection est plus fidèle mais l'influence des réflexions multiples reste visible dans les coins de la salle. La compensation complète (d) atténue ce phénomène et donne un résultat relativement satisfaisant. On remarque sur cette dernière image, une légère perte de détails due au calibrage assez grossier des réflexions multiples. En utilisant des groupes de pixels plus restreints dans les zones détaillées selon une approche hiérarchique, on devrait pouvoir résoudre ce problème sans augmenter le temps de calibrage.

Les résultats présentés figure 9 ont été obtenus avec un prototype basse définition du système de projection. En effet, la zone utile de l'image projecteur est de seulement 1000×1000 pixels. De plus cette zone est répartie dans toute la salle

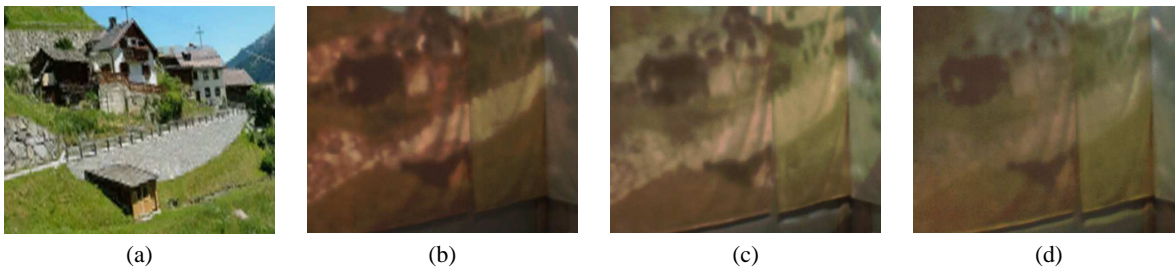


Figure 9: Résultats de la compensation radiométrique de la projection. Simulation de l'environnement souhaité (a), photo de l'environnement vu par l'utilisateur sans compensation (b) (erreur = 0.023), avec compensation de la première réflexion (c) (erreur = 0.019) et avec compensation complète (d) (erreur = 0.015). Ces résultats ont été obtenus avec un prototype basse définition du système de projection.

(murs, sol et plafond). On est donc loin des hautes définitions des CAVEs classiques de plus de 1000×1000 pixels par face (mur, sol ou plafond). Nous travaillons actuellement sur un système dont la zone utile sera de 2000×2000 pixels et qui devrait donner des résultats beaucoup plus intéressants.

La figure 10 montre l'évolution de l'erreur, sur une ligne de l'image, sans compensation, avec compensation des premières réflexions et avec compensation complète. Vers le pixel 110, la ligne passe d'un morceau de tissu coloré à un autre, moins bien compensé. On constate que si l'influence des matériaux n'est pas totalement compensée, l'erreur est globalement plus faible avec la compensation complète, notamment dans les zones fortement perturbées.

8. Conclusion et perspectives

Le système de projection Catopsys combine un vidéoprojecteur, un miroir et une caméra en rotation. Il peut s'installer dans une salle qui n'a pas été construite pour servir d'écran de projection. Le système est auto-calibrant, grand-public et permet de réaliser de la projection immersive.

Dans ce papier, nous avons détaillé le processus radiométrique de projection-acquisition, depuis le projecteur jusqu'à la caméra puis nous avons proposé un modèle radiométrique de ce processus. Concernant la projection, le modèle tient compte des réflexions multiples (entre les pixels de l'image), des mélanges inter-canaux (entre les canaux d'un pixel) et des non-linéarités (au sein d'un canal d'un pixel). Concernant l'acquisition, le modèle tient compte de la réponse d'intensité et du vignetage de la caméra.

A partir de ce modèle, nous avons proposé une méthode complète de calibrage. Cette méthode consiste tout d'abord à établir un mapping géométrique entre la caméra et le projecteur. Puis, elle caractérise les composantes du modèle radiométrique relatifs à la caméra, ce qui permet de corriger les images données par la caméra. Enfin, le calibrage de la projection consiste à caractériser les composantes restantes du modèle en annulant l'influence des réflexions multiples

puis à caractériser ces réflexions multiples dans une dernière étape.

Enfin, nous avons proposé une méthode de compensation permettant de calculer l'image à projeter pour afficher une image donnée dans la salle. Cette méthode revient à calculer l'inverse du modèle sur l'image désirée. Cette compensation peut être utilisée comme post-traitement d'applications de réalité mixte pour corriger automatiquement les perturbations de la projection.

Ces méthodes nécessitent encore quelques améliorations notamment au niveau du temps de traitement. Pour cela, on peut envisager de calibrer les réflexions multiples selon une approche hiérarchique, ce qui devrait réduire le nombre d'acquisitions nécessaires tout en améliorant la précision des résultats. Enfin, une implémentation de la compensation sur GPU devrait permettre un traitement temps-réel indispensable aux applications de réalité mixte auxquelles le système Catopsys se destine.

9. Remerciements

Le projet Catopsys est financé par le programme Audiovisuel et Multimedia de l'Agence Nationale pour la Recherche (référence ANR-06-RIAM-001).

Références

- [AFR*07] AKYÜZ A. O., FLEMING R., RIECKE B. E., REINHARD E., BÜLTHOFF H. H. : Do hdr displays support ldr content ? : a psychophysical evaluation. In *ACM Transactions on Graphics* (2007), vol. 26, p. 38.
- [ASLZ08] ASTRE B., SARRY L., LOHOU C., ZEGHERS E. : Automatic calibration of a single-projector catadioptric display system. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2008).
- [BGZ*06] BIMBER O., GRUNDHOFER A., ZEIDLER T., DANCH D., KAPAKOS P. : Compensating indirect scattering for immersive and semi-immersive projection dis-

- plays. In *VR '06 : Proceedings of the IEEE conference on Virtual Reality* (2006), pp. 151–158.
- [BIWG07] BIMBER O., IWAI D., WETZSTEIN G., GRUNDHÖFER A. : The visual computing of projector-camera systems. In *EuroGraphics (STAR)* (2007).
- [BLD*07] BANTERLE F., LEDDA P., DEBATTISTA K., CHALMERS A., BLOJ M. : A framework for inverse tone mapping. *Vis. Comput.*, Vol. 23, Num. 7 (2007), 467–478.
- [CNSD93] CRUZ-NEIRA C., SANDIN D. J., DEFANTI T. A. : Surround-screen projection-based virtual reality : the design and implementation of the cave. In *SIGGRAPH '93 : Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1993), pp. 135–142.
- [DM97] DEBEVEC P. E., MALIK J. : Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *SIGGRAPH '97 : Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1997), pp. 369–378.
- [GC05] GOLDMAN D. B., CHEN J.-H. : Vignette and exposure calibration and compensation. In *ICCV '05 : Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1* (Washington, DC, USA, 2005), pp. 899–906.
- [Gou71] GOURAUD H. : *Continuous Shading of Curved Surfaces*, vol. 20. IEEE Computer Society, 1971, pp. 623–629.
- [NKGR06] NAYAR S. K., KRISHNAN G., GROSSBERG M. D., RASKAR R. : Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 25, Num. 3 (2006), 935–944.
- [NPGB03] NAYAR S. K., PERI H., GROSSBERG M. D., BELHUMEUR P. N. : A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections. In *ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PRO-CAMS)* (2003).
- [RTS*07] REMPEL A. G., TRENTACOSTE M., SEETZEN H., YOUNG H. D., HEIDRICH W., WHITEHEAD L., WARD G. : Ldr2hdr : on-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs. In *SIGGRAPH '07 : ACM SIGGRAPH 2007 papers* (2007), p. 39.
- [SCG*05] SEN P., CHEN B., GARG G., MARSCHNER S. R., HOROWITZ M., LEVOY M., LENSCH H. P. A. : Dual photography. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 24, Num. 3 (2005), 745–755.
- [Sut98] SUTHERLAND I. E. : *Seminal graphics : pioneering efforts that shaped the field*. ACM, 1998, ch. A head-mounted three dimensional display, pp. 295–302.
- [WB07] WETZSTEIN G., BIMBER O. : Radiometric compensation through inverse light transport. In *PG '07 : Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications* (2007), pp. 391–399.
- [YT08] YUEN N. P. Y., THIBAUT W. C. : Inexpensive immersive projection. In *VR* (2008), pp. 237–240.