

Ré–éclairage et Remodélisation Interactifs des Scènes Réelles pour la Réalité Augmentée

Céline LOSCOS

Thèse préparée à iMAGIS-GRAVIR/IMAG-INRIA, et présentée pour obtenir le titre de :

**Docteur de l'Université Joseph Fourier
discipline informatique**

Arrêté ministériel du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992

Soutenue le 20 Décembre 1999 devant la commission d'examen :

Jean–Pierre	PEYRIN	Président
Pascal	GUITTON	Rapporteur
Pierre	POULIN	Rapporteur
Bernard	PÉROCHE	Examineur
George	DRETTAKIS	Directeur
Claude	PUECH	Directeur

Je dédie cette thèse à Jean et Émilienne Noël ainsi qu'à Louisiane Pascal.

Remerciements

Au début de cette thèse, modifier l'éclairage d'environnements réels en temps interactif nous paraissait un problème très difficile. L'aboutissement de ce travail en a été d'autant plus gratifiant. Il reste encore beaucoup à faire avant qu'un utilisateur puisse simuler un nouvel éclairage pour des scènes d'intérieur ou d'extérieur. Nous sommes conscients que le travail développé dans cette thèse n'est qu'une goutte d'eau dans un océan. Mais j'espère qu'un jour, je pourrai concevoir virtuellement l'éclairage et l'agencement de mon appartement avec un logiciel automatique, rapide et facile d'utilisation.

J'ai vraiment apprécié ce thème de recherche un peu particulier car il est à l'intersection de nombreux domaines. Dans ce document, se trouvent trois ans de travail qui n'auraient pu aboutir sans l'aide d'un nombre considérable de personnes. George Drettakis a été la personne la plus directement impliquée dans ce travail. Nous avons souvent discuté des problèmes et essayé de trouver ensemble les solutions adéquates. Certaines étapes ont été particulièrement difficiles et George m'a aidée à être persévérante. Durant ces trois ans, il a su trouver le temps nécessaire pour des réunions ou simplement pour m'aider à régler un problème de programmation. Il était d'ailleurs présent les week-ends et les soirs de semaine lorsqu'il le fallait.

Claude Puech a également largement contribué à l'avancement de mon travail de recherche. Malgré son emploi du temps très chargé, j'ai toujours pu discuter avec lui et obtenir son aide sur divers problèmes annexes à ma thèse. Je reste convaincue que la bonne entente qui règne dans l'équipe iMAGIS lui est due, et je l'en remercie car cela permet d'avoir un environnement de travail très agréable.

Je remercie également les rapporteurs de cette thèse, Pierre Poulin et Pascal Guitton, pour leurs remarques pertinentes et leurs encouragements. Je remercie également Bernard Péroche d'avoir accepté d'être membre de mon jury. J'ai eu le plaisir d'avoir, dans mon jury, Jean-Pierre Peyrin, mon professeur de langage et programmation à l'université Joseph Fourier de Grenoble. J'en profite pour le remercier de son soutien lorsque j'ai décidé de partir à Montréal pendant ma maîtrise, et de m'avoir permis d'enseigner à ses côtés durant ma thèse.

Pour mettre en place cette recherche, j'ai travaillé avec différentes personnes. Notamment, cette thèse n'aurait pas pu aboutir si nous n'avions reçu l'aide de Luc Robert et de Pierre Poulin. Ils nous ont donné accès à leur programme de reconstruction à partir d'images que nous décrivons dans ce document. Ils se sont montrés tous les deux disponibles lorsque nous avons rencontré des difficultés d'utilisation.

Ma collaboration pendant trois mois avec Marie-Claude Frasson a été la période la

plus agréable de cette thèse. Nous avons réalisé ensemble un travail considérable, souvent entrecoupé de fous rires. Cette collaboration a été accompagnée de discussions très enrichissantes et productives avec Bruce Walter et Xavier Granier.

Je remercie les relecteurs de cette thèse, Frédéric Elisei, Fabrice Neyret, Xavier Granier, Xavier Decoret, Mathieu Desbrun et Eric Ferley, pour leurs conseils et les corrections de nombreuses fautes d'orthographe.

Je remercie également les « brighters » pour toutes les classes et fonctions de radiosité que je n'aurais jamais eu le temps d'écrire moi-même, pour leur patience lorsque je venais leur demander de l'aide, pour tous les bugs corrigés, pour ce système énorme, dont on ne se lasse jamais de parcourir les lignes de code[†]. Je remercie en particulier le brighter (et non moins très honorable) François Sillion[‡], pour son intérêt et ses conseils. Je remercie également Félix Sillion d'avoir accepté qu'une de ses œuvres d'art apparaisse dans cette thèse.

J'ai particulièrement apprécié de partager le bureau de Laure France, dans lequel nous avons souvent discuté de choses et d'autres, dont les sujets s'égaraient souvent loin de ceux de nos thèses. Laure a été très présente lors de ces dernières années, et son inconditionnel soutien moral a été très efficace dans la réussite de cette thèse.

Je remercie Alexandre Meyer pour m'avoir accompagnée dans le dernier marathon de l'écriture de ce mémoire (lui même en marathon de soumission), et pour avoir réussi à me détendre en me parlant de « threads » et de sémaphores, de poissons multicolors, de mers et d'océans.

Je remercie également Patricio Inostroza et Jean-Michel Trivi pour leurs nombreux encouragements, ainsi que pour les discussions très intéressantes que nous avons pu avoir.

Je remercie Rosine Ah-Tchou pour sa gentillesse et son accueil toujours souriant, ainsi que Jean-Luc Douville et Jean-Dominique Gascuel qui m'ont aid e à résoudre de nombreux problèmes matériels.

De façon plus générale, je remercie toute l'équipe iMAGIS. Il m'est souvent arrivé de réserver un bureau pendant plusieurs jours pour construire de nouvelles scènes et tout le monde a été très coopératif pour ne pas déplacer les différents meubles et les lampes que j'avais installés. La disponibilité des chercheurs et des thésards d'iMAGIS est exemplaire. Enfin, je ne d mentirai pas la réputation des pauses cafés iMAGIS toujours très animées, ainsi que les fameuses soirées toujours très nombreuses et arrosées.

Enseigner pendant cette thèse a été pour moi un bol d'air frais lorsque la recherche devenait difficile. L'interaction avec les étudiants a souvent été positive et enrichissante et les différents enseignements que j'ai réalisés ont toujours été dans des équipes où régnait une bonne entente.

J'ai eu l'occasion durant ces trois ans de rencontrer de nombreuses personnes, liées ou non à mon travail. Certaines m'ont apporté de précieux conseils pour ma recherche, comme Paul Debevec et Steve Marschner. J'ai particulièrement apprécié mes rencontres avec Xavier Pueyo, James Stewart, Fede Perez, Éric Paquette, Éric Plante, François Bérard,

[†]Ne pas croire les mauvaises langues qui disent qu'il y traîne des « awful hacks » et quelques fois des « very awful hacks ».

[‡]François Sillion est co-auteur avec Claude Puech d'un excellent livre sur la radiosité.

Franck Fourel, Frédéric Vernier, Françoise Mocellin, David Thévenin, Eugenia Montiel, ainsi que de nombreuses autres personnes.

Enfin, cette thèse a été parsemée de moments de doutes et de problèmes personnels. J'ai réalisé dans ces moments-là combien certaines personnes m'étaient devenues proches. J'espère conserver longtemps ces nouvelles amitiés et je remercie tous ceux qui m'ont apporté leur soutien.

Je remercie tout particulièrement Philippe, mes parents, mon frère, et tous les membres de ma famille pour leur soutien continu dans les moments de stress, leur tolérance de mes humeurs inégales, leur compréhension lorsque je travaillais plus que ce que je ne les voyais ; et simplement pour le bonheur de partager avec eux des instants précieux de ma vie.

Table des matières

1	Introduction	17
1.1	Motivations	18
1.2	Contributions	20
1.3	Structure du document	21
2	État de l’art	23
2.1	Radiométrie	23
2.1.1	Propagation de la lumière	23
2.1.2	Fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle	25
2.1.3	Rendu	27
2.2	Simulation de l’éclairage	29
2.2.1	Radiosité	30
2.2.2	Clustering	35
2.2.3	Contrôle des résultats	36
2.3	Environnements dynamiques	36
2.3.1	Radiosité dynamique	36
2.3.2	Lancer de rayons dynamique	38
2.4	Éclairage commun pour la réalité augmentée assistée par ordinateur	39
2.4.1	Présentation générale de la réalité augmentée	39
2.4.2	Reconstruction géométrique des scènes réelles	41
2.4.3	Illumination inverse	45
2.4.4	Éclairage commun	50
2.5	Discussion	56
3	Problèmes d’acquisition	59
3.1	Les caméras utilisées	60
3.2	Reconstruction des scènes réelles à partir de photographies	61
3.2.1	Un premier outil de reconstruction : <i>TotalCalib</i>	62
3.2.2	Un deuxième outil de reconstruction : <i>Rekon</i>	67
3.3	Choix de l’éclairage	70
3.4	Intégration des modèles 3D dans le système de rendu	71
3.4.1	Les matrices de points de vue	72
3.4.2	Modèle Inventor	74

3.5	Discussion	74
4	Modification des propriétés d'éclairage d'une scène réelle à partir d'un seul éclairage connu	77
4.1	Présentation générale du système	78
4.2	Initialisation du système	78
4.2.1	Initialisation de la radiosité hiérarchique	79
4.2.2	Limitations du système ainsi initialisé	81
4.3	Pré-calcul pour permettre le ré-éclairage	82
4.3.1	Raffinement basé sur les textures pour délimiter les ombres	83
4.3.2	Création de la texture représentant l'éclairage indépendant de la visibilité	86
4.3.3	Reprojection des ombres	90
4.4	Éclairage commun et ré-éclairage interactif	93
4.4.1	Insertion d'objets et de lampes virtuels	93
4.4.2	Ré-éclairage interactif	94
4.5	Résultats	95
4.6	Conclusion	98
5	Modification des propriétés d'une scène réelle connue sous différents éclairages	101
5.1	Description générale de la méthode	102
5.2	Acquisition	103
5.3	Estimation de la réflectance	107
5.3.1	Approche générale	107
5.3.2	Estimation de la réflectance pour chaque image de luminance	110
5.3.3	Filtrage des valeurs de réflectance	110
5.3.4	Estimation finale de la réflectance	114
5.4	Initialisation du système d'éclairage	114
5.4.1	Éclairage direct	114
5.4.2	Éclairage indirect	116
5.4.3	Rendu	119
5.5	Ré-éclairage et modification de la géométrie	120
5.5.1	Modification de la géométrie	120
5.5.2	Génération de textures	126
5.5.3	Modification de l'éclairage	128
5.6	Résultats	129
5.7	Conclusion	133
6	Calibrage photométrique	135
6.1	Calibrage photométrique	136
6.1.1	Propriétés contrôlables et non contrôlables de notre appareil photographique	136
6.1.2	Glaire et vignettage	136

6.2	Méthode pour créer des images de luminance à partir de photographies . . .	136
6.2.1	Méthodes existantes	137
6.2.2	Adaptation de la méthode précédente au cas d'un appareil photographique semi-automatique	138
6.3	Utilisation d'images de luminance pour les méthodes de ré-éclairage développées	141
6.3.1	Application à la méthode basée sur la connaissance d'un seul éclairage	141
6.3.2	Application à la méthode basée sur la connaissance de plusieurs éclairages	142
6.3.3	Rendu photographique	157
6.4	Discussion	159
7	Comparaisons et améliorations	161
7.1	Discussion sur les méthodes présentées	161
7.1.1	Différences algorithmiques	161
7.1.2	Utilisation appropriée de chaque méthode	164
7.2	Amélioration de la méthode basée sur la connaissance de plusieurs éclairages	164
7.2.1	Déplacement des objets réels	165
7.2.2	Parallélisme	165
7.3	Combinaison des avantages des deux méthodes	166
7.4	Discussion	166
8	Conclusion	167
8.1	Contributions	168
8.1.1	Méthode de ré-éclairage basée sur la connaissance d'un éclairage unique	168
8.1.2	Méthode de ré-éclairage basée sur la connaissance de plusieurs éclairages	168
8.1.3	Calibrage photométrique	169
8.2	Perspectives	169
8.2.1	Spécularité	170
8.2.2	Changement de point de vue	171
8.2.3	Scènes d'extérieur	171
8.2.4	Vers le temps réel...	172
A	Affichage multi-passes	173
B	Programme de capture automatique de photographies	175
B.1	Propriétés contrôlables de l'appareil photographique Kodak DC260	175
B.2	Script de capture de photographies sur une plage étendue	176

Table des figures

1.1	Exemple réel de design d'intérieur	19
1.2	Exemple de manipulation difficile	19
2.1	Angles et paramètres décrivant la luminance	24
2.2	Angles et paramètres décrivant une BRDF	25
2.3	Différents modèles de réflectance	26
2.4	Gonioréfectomètres	28
2.5	Description des paramètres de facteur de forme	31
2.6	Maillage quadtree	33
2.7	Liens en radiosité hiérarchique	34
2.8	Hiérarchie de clusters	35
2.9	Liens et shafts en radiosité hiérarchique dynamique	39
2.10	Exemple d'outils de reconstruction à base d'images	44
2.11	Résultats de Sato <i>et al.</i> [SWI97]	46
2.12	Résultats de Marschner <i>et al.</i> [MG97]	47
2.13	Résultats de Marschner [Mar98]	48
2.14	Résultats de Debevec [Deb98]	53
2.15	Résultats de Yu et Malik [YM98]	55
2.16	Résultats de Yu <i>et al.</i> [YDMH99]	55
3.1	Appareils photographiques que nous utilisons	61
3.2	Mire de calibrage	62
3.3	Les quatre mosaïques servant d'entrée au programme TotalCalib	63
3.4	Le système <i>TotalCalib</i>	63
3.5	Modèle reconstruit avec le système <i>TotalCalib</i>	64
3.6	Modèle texturé construit avec <i>TotalCalib</i>	64
3.7	Calibrage de la caméra	65
3.8	Exemples de mosaïques	66
3.9	Le système <i>Rekon</i>	68
3.10	Application des contraintes dans <i>Rekon</i>	69
3.11	Exemple de modèle reconstruit par <i>Rekon</i>	69
3.12	Lampe utilisée	71
3.13	Paramètres pour la perspective	73
4.1	Algorithme complet	78

4.2	Le modèle reconstruit par un outil de reconstruction	79
4.3	Le modèle complet incluant quatre lampes réelles	80
4.4	Exemple d'éclairage commun par la radiosité hiérarchique	81
4.5	Échec de ré-éclairage	82
4.6	Première solution de radiosité	84
4.7	Algorithme du raffinement basé sur les textures	85
4.8	Raffinement basé sur les textures	86
4.9	Correction des textures en ajoutant l'éclairage bloqué	87
4.10	Délimitation des régions à modifier	89
4.11	Algorithme de sélection d'un élément de référence	89
4.12	Texture après une correction basée sur la couleur	91
4.13	Radiosité après la correction des textures	92
4.14	Reprojection des ombres	92
4.15	Reprojection des ombres sur les nouvelles textures par une nouvelle solution de radiosité	93
4.16	Modification interactive de l'intensité d'une lampe virtuelle	94
4.17	Résultats de ré-éclairage	95
4.18	Insertion d'une lampe virtuelle	96
4.19	Insertion et déplacement d'un objet virtuel	97
4.20	Textures corrigées	97
4.21	Résultat de ré-éclairage	99
5.1	Photographies servant à la reconstruction 3D de la scène réelle	104
5.2	Modèle 3D reconstruit	105
5.3	Lampe utilisée pour éclairer les scènes lors de nos tests	105
5.4	Images de luminance servant à l'estimation de la réflectance	106
5.5	Structure de données pour l'estimation de la réflectance	108
5.6	Numérotation des polygones en utilisant un « item buffer »	109
5.7	Images de réflectance, et coefficients de validité	111
5.8	Algorithme de filtrage	112
5.9	Résultats à chaque étape du filtrage	113
5.10	Réflectance estimée	115
5.11	Structure de données utilisée pour le rendu	116
5.12	Éléments de la radiosité	117
5.13	Polygones invisibles depuis l'image originale	118
5.14	Photographies additionnelles pour l'estimation de la réflectance des polygones invisibles	118
5.15	Texture servant à l'estimation plus approximative de la réflectance pour le mur	119
5.16	Reprojection des ombres	120
5.17	Structure de shaft	121
5.18	Localisation des modifications lors de l'insertion d'un objet virtuel	122
5.19	Algorithme général pour la modification de la géométrie	124
5.20	Masques utilisés pour enlever l'ordinateur portable	126

5.21	Enlèvement d'un objet réel	127
5.22	Modifications de la géométrie pour la première scène testée	130
5.23	Modifications de l'éclairage pour la première scène testée	131
5.24	Résultats sur une deuxième scène testée	132
6.1	Fonction de caméra de Debevec et Malik [DM97]	139
6.2	Photographies pour calculer la fonction de la caméra.	140
6.3	Fonction de la caméra que nous avons retrouvée	141
6.4	Nouvelles textures corrigées à partir d'images de luminance	143
6.5	Résultats de ré-éclairage en utilisant des images de luminance	144
6.6	Zoom sur les résultats de ré-éclairage en utilisant des images de luminance	145
6.7	Photographie de la lampe allumée ayant servi à la capture	146
6.8	Mesure de la propriété de diffusion de la lampe servant à la capture	147
6.9	Algorithme de recalage	148
6.10	Images obtenues après la première étape du recalage	149
6.11	Réflectance de référence, utilisée pour le recalage des images	150
6.12	Images originales et images recalées	151
6.13	Réflectance estimée avec des photographies calibrées	152
6.14	Réflectance estimée avec des photographies calibrées	153
6.15	Nouvel algorithme d'estimation des réflectances	153
6.16	Réflectance estimée après dix itérations avec des photographies calibrées	154
6.17	Convergence de l'algorithme d'estimation de la réflectance	155
6.18	Reprojection des ombres avec la nouvelle réflectance	155
6.19	Nouvelles images de réflectance pour une deuxième scène	156
6.20	Ré-éclairage avec la nouvelle réflectance pour la deuxième scène	157
6.21	Zoom sur le ré-éclairage avec la nouvelle réflectance pour la deuxième scène	158
7.1	Comparaison des deux méthodes de ré-éclairage	162
A.1	Algorithme d'affichage en multi-passes	174
A.2	Utilisation d'un affichage multi-passes	174

