

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMARI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Automatique

Thème

Reconstruction 3D à partir

D'une image 2D

Proposé et dirigé par : **M^{me} O. ADJEMOUT**

Présenté par :

M^r. SIDALI Karim

M^r. Belghit Ahmed

Soutenu le: 06 / 10 /2011

Promotion 2011

Remerciement

Tout d'abord, nous présentons notre remerciement les plus sincères à notre promotrice Ouiza ADJEMOUT épouse KARA, pour sa disponibilité et son encadrement, ainsi pour son soutien tout au long de l'année. C'est grâce à elle que nous avons pu mener à bien ce travail.

Nous tenons ensuite à remercier chaque un des membres de jury pour nous avoir fait l'insigne honneur d'accepter d'examiner notre travail.

Nos remerciements et notre gratitude vont aux professeurs et enseignants de l'UMMTO ainsi que son personnel côtoyés tout au long de notre cursus universitaire.

Nous remercions également toute personne ayant contribué à notre éducation et notre formation.

Et enfin, que mes chers parents et familles, et bien avant tout, trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de m'assurer cette formation d'ingénieur dans les meilleures conditions.

Dédicaces

Louange à dieu, le seul et l'unique,

A ma très chère mère,

A mon très cher père,

A mes grandes mères, et mon grand père,

A mes frères Samir, Azedine, Massi et Ali,

A mes sœurs Nadia, Fazia, Hayet, et Fifa,

A mes tantes et leurs enfants,

A mes très cher(e)s ami(e)s,

A mon très cher ami et binôme Karim et sa famille,

A mes proches grands et petits,

A tous mes amis,

A tous ceux qui ont participés de près ou de loin dans la réalisation de ce travail,

Je dédie ce modeste travail.

Ahmed

Dédicaces

Louange à dieu, le seul et l'unique,

A ma très chère mère,

A mon très cher père,

A ma grande mère,

A mon très cher frère Samir,

A mes très chères sœurs Nina, et El-kaissa,

A ma tante et ses enfants,

A mes très chers amis Amine, Qaqi, Moussa GS,

Brahim, Moh TCT, Yacoub, dahman, Aba, et Tchicou,

A mon très chère ami et binôme Ahmed et sa famille,

A mes proches grands et petits,

A tous ceux qui reconnais le mot amitié,

A tous ceux qui ont participés de près ou de loin dans la réalisation de ce travail,

Je dédie ce modeste travail.

Karim

Sommaire

Sommaire

Introduction générale

CHAPITRE I : GENERALITE ET NOTIONS SUR LA PHOTOMETRIE

Introduction.....	2
I.1. Définition de l'image	2
I.2. Formation d'une image	2
I.3. Définitions photométriques	3
I.3.1. Grandeurs indépendantes de la scène.....	3
I.3.1.1. Densité du flux lumineux.....	3
I.3.1.2. Intensité d'une source lumineuse ponctuelle	4
I.3.1.3. Le flux lumineux	4
I.3.2. Grandeurs relatives à une surface d'écrans.....	5
I.3.2.1. Éclairement (irradiance).....	5
I.3.2.2. La luminance (radiance)	5
I.3.2.3. L'émittance (ou exitance)	8
I.3.3. Grandeurs relatives au matériau.....	9
I.3.3.1. L'albédo	9
I.3.3.2. La réflectance	9
I.4. Les différents types de réflexions	9
I.4.1. La réflexion spéculaire	10
I.4.2. La réflexion diffuse	11
I.4.3. La fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle	11
I.5. Conclusion	12

Sommaire

CHAPITRE II : RECONSTRUCTION EN 3D PAR SHAPE FROM SHADING

Introduction.....	13
II.1. Problème général de la vision du relief.....	13
II.2. Exposé de la problématique	14
II.3. Hypothèses usuelles du shape from shading	14
II.4. Formulation Mathématique et mise en équation	15
II.5. Méthodes de résolution du problème SFS	18
II.5.1 Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles	18
II.5.1.1 Lignes caractéristiques et courbes de niveau.....	18
II.5.1.2 Approximation des solutions de viscosité	19
II.5.2 Méthodes de résolution par optimisation	19
II.5.2.1 Choix des inconnues.....	20
II.5.2.2 Choix d'une fonctionnelle	20
II.5.2.3 Choix d'une méthode d'optimisation.....	20
II.5.3 Méthodes de résolution par approximation de l'équation de luminance	21
II.5.3.1 Méthodes locales.....	21
II.5.3.2 Méthodes linéaires.....	21
II.6. Conclusion.....	21

CHAPITRE III : TEST ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Introduction.....	22
III.1. Application d'une méthode de reconstruction	22
III.2. Approche linéaire de Tsai et Shah	22
III.3. Algorithme de Tsai et Shah.....	24
III.4. Tests et résultats	26
III.5. Conclusion	31

Conclusion Générale

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction Générale :

La problématique générale de cette étude se situe dans le cadre de la vision par ordinateur, et plus particulièrement dans celui de la reconstruction tridimensionnelle d'une scène à partir d'une ou de plusieurs images de cette scène. Le type de méthodes le plus répandu est sans conteste la stéréovision multi-oculaire, qui consiste à appairer plusieurs images d'une même scène pour reconstruire le relief. Ce processus de résolution procure les meilleurs résultats, car il utilise un grand nombre d'informations relatives à la scène. Néanmoins, une des clés de la réussite de ce type de méthodes est la mise en correspondance des images, qui n'est réalisable qu'avec des images suffisamment texturées. Il est donc nécessaire de trouver d'autres méthodologies capables de reconstruire en 3D des scènes constituées d'objets peu ou pas texturés.

Le shape from shading semble être une bonne alternative pour la reconstruction de ce type de scènes. En effet, cette technique est basée sur l'analyse de l'éclairage et ne fait intervenir qu'une seule image. Cependant, l'information étant bien moins importante que dans le cas de la stéréovision, un certain nombre d'hypothèses sur la scène, sur la caméra et sur les sources lumineuses sont nécessaires pour rendre possible la résolution du problème. Ce nombre important d'hypothèses rend très difficile voire impossible une mise en œuvre du shape from shading sur des images réelles. Il est donc primordial de trouver de nouvelles modélisations et de nouvelles techniques de résolution, pour permettre à terme d'élargir le champ d'applications potentielles du shape from shading.

Ce mémoire présente le problème de reconstruction tridimensionnelle à partir d'une seule image. Il est divisé principalement en trois chapitres, dans le premier chapitre nous allons exposer la problématique de la reconstruction en 3D en utilisant une seule image, le deuxième chapitre présente des aspects mathématiques et les équations fondamentales qui ont menés à la modélisation de ce problème, le troisième chapitre est destiné aux tests et interprétation des résultats obtenues.

Une méthode de reconstruction 3D est testée sur des images de synthèses puis sur des images réelles.

CHAPITRE 1

Généralités et Notions sur la photométrie

Introduction

La photométrie désigne les techniques de mesure de la lumière considérée comme porteuse de l'excitation visuelle. A cause de la complexité du rayonnement lumineux et surtout de sa propagation, les métrologues ont dû introduire un nombre relativement important de définitions et de grandeurs photométriques que l'on va tâcher de définir le plus clairement possible.

I.1. Définition de l'image

On appelle image un domaine bidimensionnel fini D dont chaque point est caractérisé par la valeur d'une fonction positive bornée appelée *niveau de gris*.

C'est une application bidimensionnelle de \mathbb{R}^2 dans \mathbb{R} qui à tout point A fait correspondre $I(A)$ tel que $0 < I(A) < M \forall A \in D$

Où $I(A)$ représente la luminance (intensité) d'une image.

I.2. Formation d'une image

Pour prendre une photographie, il faut mettre en présence trois éléments : une scène, une ou plusieurs sources lumineuses et un appareil photographique.

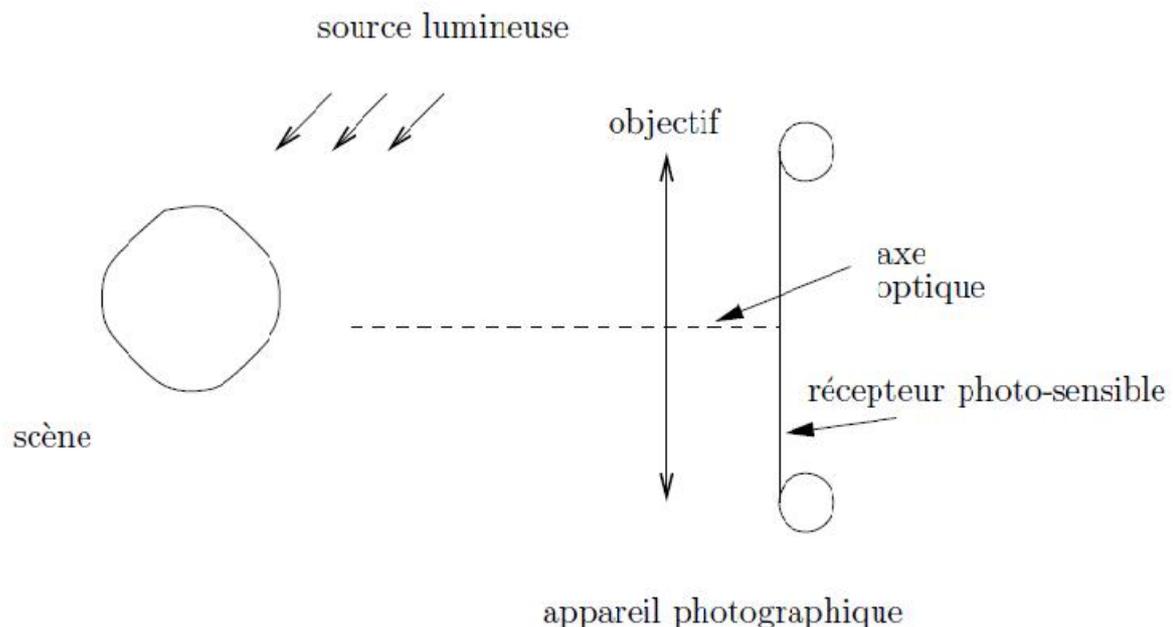


Fig. I.1 – Description schématique des éléments permettant une prise de vue.

Les rayons lumineux, issus de la source lumineuse, se réfléchissent sur la scène, et certains d'entre eux, après un parcours plus ou moins tourmenté, vont finir leur vie sur le récepteur photosensible de l'appareil photographique. L'énergie d'une source lumineuse primaire est émise sous forme de photons qui vont ricocher sur la scène. Certains pourront être absorbés par celle-ci, tandis que d'autres seront réémis, faisant de la scène une source lumineuse secondaire.

I.3. Définitions photométriques

Les différentes grandeurs essentielles de la photométrie peuvent se scinder en deux groupes distincts : celles qui sont indépendantes du matériau des objets composant la scène, et au contraire, celles qui sont relatives à un écran élémentaire de surface matérielle.

I.3.1. Grandeurs indépendantes de la scène

I.3.1.1. Densité de flux lumineux

Soient un vecteur unitaire caractéristique d'un rayon lumineux, et P un point quelconque de l'espace. On appelle *densité de flux*, le flux lumineux par unité de surface orthogonale à \vec{u} , par unité de temps (unité : lumen par m^2). Cette grandeur sera notée, $\varphi(\vec{u}, P)$.

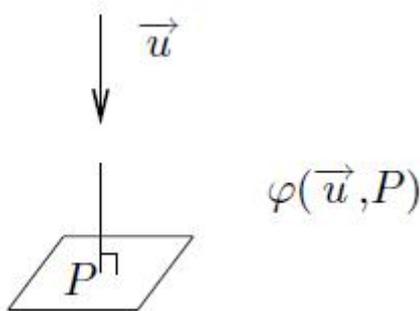


Fig. I.2 – Densité de flux lumineux.

Remarquons que, ne dépend que de la direction du rayon lumineux \vec{u} et d'une position dans l'espace P. On peut donc considérer la densité de flux lumineux de n'importe quel faisceau, qu'il soit incident $\varphi(\vec{u}_i, P)$, ou réémis $\varphi(\vec{u}_e, P)$. Nous pouvons également remarquer que pour le cas d'un faisceau réémis, tous les rayons lumineux réémis sont concourants en un point P, donc il ne semble pas incohérent de penser qu'une autre grandeur photométrique décrira de manière plus fine l'énergie d'un faisceau réémis.

I.3.1.2. Intensité d'une source lumineuse ponctuelle

Les rayons lumineux issus d'une source ponctuelle sont concourants. Caractérisons cette énergie par unité d'angle solide. L'intensité d'une source lumineuse ponctuelle O est le nombre de photons par unité de temps et par unité d'angle solide autour d'une direction \vec{u} (unité : candela). Cette grandeur sera notée $I(\vec{u})$.

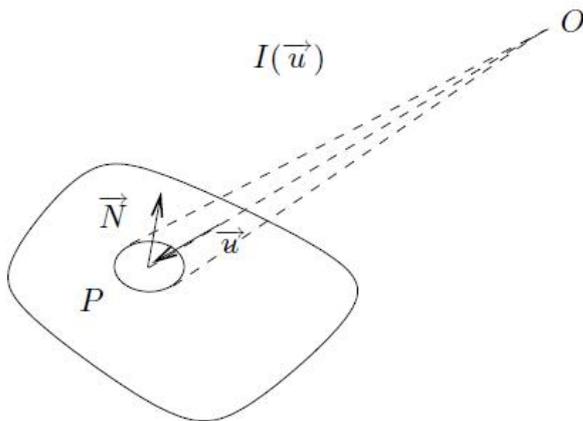


Fig. I.3 – Intensité d'une source lumineuse ponctuelle.

Il en résulte donc que, quel que soit un point P de la scène :

$$I(\vec{u}) = \varphi(\vec{u}, P) d^2(1)$$

Où d étant la distance de la source au point P et \vec{u} un vecteur unitaire de direction \overrightarrow{OP} .

Rappelons que :

$$d\Omega = \frac{\cos(\vec{u}, \vec{N})}{d^2} d\Sigma(2)$$

Les équations (1) et (2) permettent d'obtenir :

$$\varphi(\vec{u}, P) \cos(\vec{u}, \vec{N}) d\Sigma = I(\vec{u}) d\Omega(3)$$

Où :

O : point d'émission d'une source lumineuse ponctuelle.

P : point de la scène.

\vec{N} : vecteur unitaire normal à la surface, au point P .

I.3.1.3. Le flux lumineux

L'énergie lumineuse, c'est-à-dire l'énergie émise sous forme de radiations visibles, dans toutes les directions, par unité de temps, constitue le flux lumineux de cette source, noté Φ .

Si la source émet un flux élémentaire $d\Phi$ dans un angle solide élémentaire $d\Omega$ autour de la direction définie par le vecteur unitaire \vec{u} , alors l'intensité lumineuse de la source est définie comme suit :

$$I(\vec{u}) = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{d\Phi}{d\sigma} \quad (5)$$

I.3.2. Grandeurs relatives à une surface d'écran

I.3.2.1. L'éclairement (*irradiance*)

L'éclairement E est le flux lumineux qui tombe sur une surface. En définit l'éclairement en un point M comme suit :

$$E(M) = \frac{d\Phi}{dA} \quad (6)$$

L'éclairement s'exprime à partir de l'intensité dans la direction α considérée en reprenant la définition du flux lumineux issu d'une source S:

$$d\Phi = I d\Omega = I \frac{dA \cos \alpha}{R^2} \quad (7)$$

d'où l'expression de l'éclairement:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = I \frac{dA \cos \alpha}{R^2 dA} = \frac{I \cos \alpha}{R^2} \quad (8)$$

Où dA représente une surface d'écran.

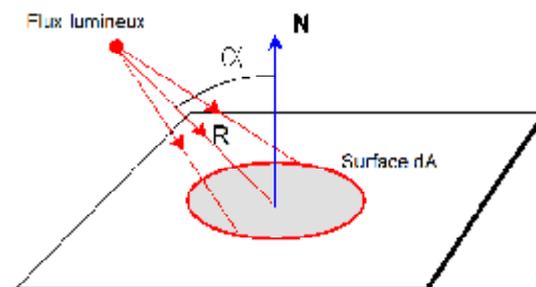


Fig. I.4 – éclairement d'une surface matérielle.

Cas particuliers :

- ∅ La source de lumière est un faisceau parallèle. Donc l'énergie du faisceau peut être décrite par un unique vecteur \vec{S} , et on a donc: $\|\vec{S}\| = \varphi$, et ceci, quel que soit la position où l'on désire prendre la mesure. Il en résulte donc que $E = \|\vec{S}\| \cos(\vec{N}, -\vec{S})$, ou autrement dit, $E = -\vec{S} * \vec{N}$.
- ∅ La source ponctuelle est unique et à une distance d , finie, de la scène.

$$E = \frac{I \cos \theta}{d^2} \quad (9)$$

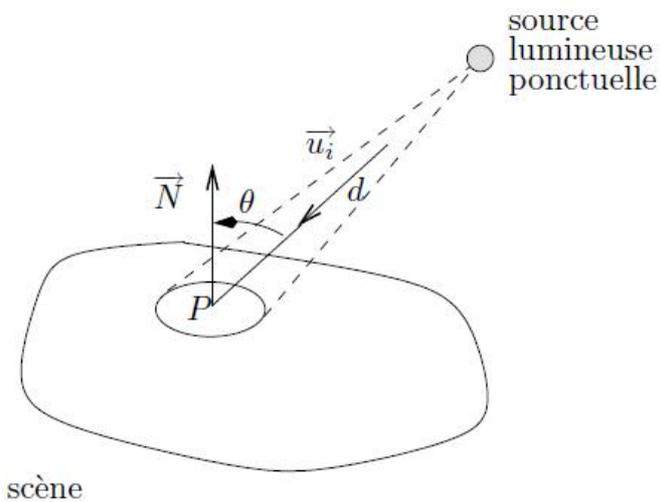


Fig. I.5 – éclairage d'une surface matérielle par une source ponctuelle.

I.3.2.2. La luminance (Radiance)

Soit l'élément de surface dA de l'objet rayonnant une énergie lumineuse totale $d\Phi$ dans toutes les directions de l'espace.

Soit $d^2 \Phi$ l'énergie rayonnée dans la direction α' ; caractérisée par une intensité dI' .

On définit la luminance L de la surface dA par le rapport entre l'intensité émise et la surface

apparente de la surface émissive vue sous l'angle α' : $L = \frac{dI'}{dA \cos \alpha'}$

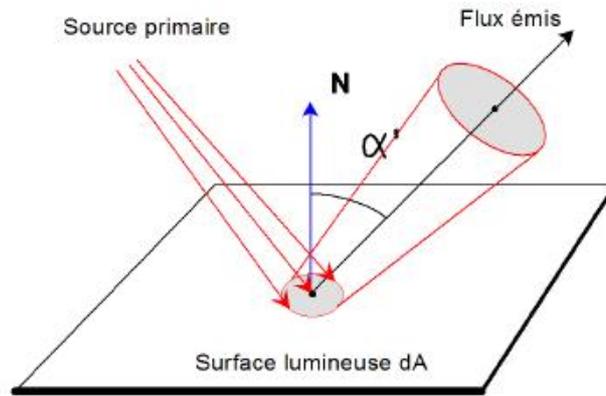


Fig. I.6– Rayonnement d’une surface lumineuse ou irradiance

En utilisant la définition de la luminance incidente, on a donc : Relation entre luminance et éclairement. Conformément à la figure I.7, nous allons donner la relation entre l’éclairement d’une surface élémentaire $d\sigma_{IM}$ de l’image et la luminance émise par surface élémentaire $d\sigma_{SC}$ de la scène.

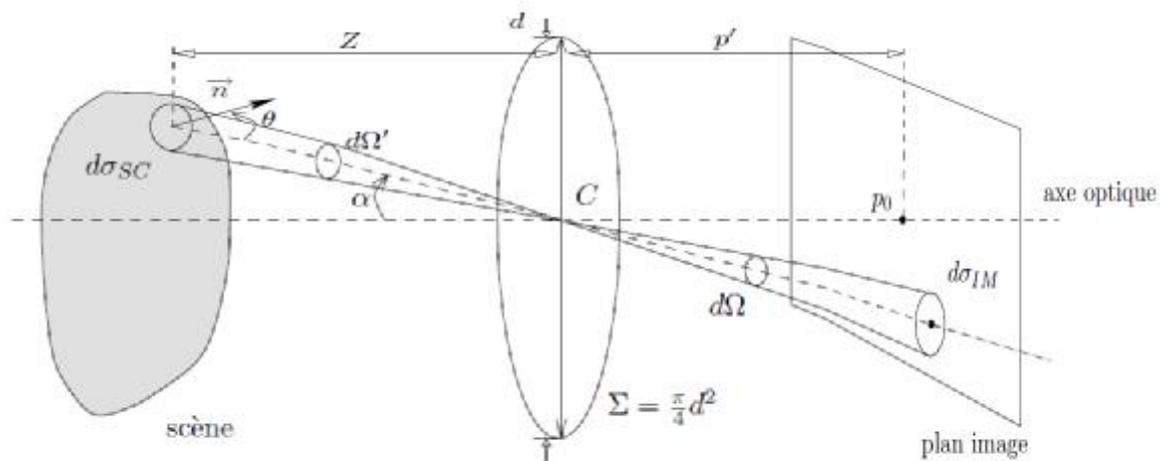


Fig. I.7 – Relation entre luminance et éclairement.

Nous avons vu précédemment la définition de l’éclairement comme étant :

$$E = \frac{d\phi}{d\sigma_{IM}} \quad (10)$$

Or, en appelant $d\Omega'$ l’angle solide élémentaire sous lequel on voit la surface élémentaire $d\sigma_{IM}$, on trouve :

$$d\sigma_{IM} = \frac{\left(\frac{p'}{\cos \alpha}\right)^2}{\cos \alpha} d\Omega' \quad (11)$$

D'où :

$$E = \frac{\cos^3 \alpha}{p'^2} \frac{d\phi}{d\Omega'} \quad (12)$$

De plus, le flux envoyé par $d\sigma_{SC}$ à travers l'ouverture Σ s'écrit :

$$d\phi = L \frac{\pi}{4} d^2 \cos \alpha d\Omega \quad (13)$$

On a donc :

$$E = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{p'}\right)^2 \cos^4 \alpha L \frac{d\Omega}{d\Omega'} \quad (14)$$

Or, l'angle solide $d\Omega'$ sous lequel on voit $d\sigma_{IM}$ du centre de la lentille est égal à Ω , l'angle solide sous lequel on voit $d\sigma_{SC}$ du centre de la lentille, c'est-à-dire :

$$d\Omega = d\Omega' \quad (15)$$

On obtient donc la relation entre la luminance de la scène et l'éclairement du récepteur :

$$E = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{p'}\right)^2 \cos^4 \alpha L \quad (16)$$

On obtient donc l'équation fondamentale du SFS, qui va permettre d'obtenir l'orientation de la scène en fonction de l'intensité de l'image.

I.3.2.3. L'émittance (ou exitance)

C'est le nombre de photons émis par unité de temps et par unité de surface d'écran (unité : lumen par m^2). Cette grandeur sera notée M . Par la définition de la luminance (émise).

I.3.3. Grandeurs relatives au matériau

Prenons le cas d'une source lumineuse ponctuelle qui éclaire une scène. Les photons arrivent sur la scène, puis certains sont réémis. Il est évident que la quantité de photons absorbés par la scène est directement liée aux spécificités du matériau.

I.3.3.1. L'albédo

L'albédo est le rapport entre l'émittance et l'éclairement. Cette grandeur est sans unité :

$$\rho(P) = \frac{M(P)}{E(P)} \quad (17)$$

L'albédo caractérise donc la capacité du matériau à réémettre les photons reçus. Soit le matériau réémet tout ce qu'il reçoit, auquel cas $\rho = 1$, soit il absorbe une partie des photons, et dans ce cas $0 < \rho < 1$, soit il absorbe tous les photons, et donc $\rho = 0$.

I.3.3.2. La réflectance

La réflectance est une grandeur qui caractérise la capacité du matériau à réémettre la lumière dans toutes les directions, et pour n'importe quel rayon incident. Elle représente le rapport entre la luminance élémentaire émise selon une direction (θ_e, ψ_e) , et l'éclairement élémentaire reçu dans la direction (θ_i, ψ_i) , c'est-à-dire que :

$$R(\theta_i, \psi_i, \theta_e, \psi_e) = \frac{dL_e(\theta_e, \psi_e)}{dE(\theta_i, \psi_i)} \quad (18)$$

Avec: (θ_i, ψ_i) : coordonnées sphériques du vecteur \vec{u}_i .

(θ_e, ψ_e) : Coordonnées sphériques du vecteur \vec{u}_e .

I.4. Les différents types de réflexion

La lumière incidente sur la surface d'un objet donné peut subir différentes interactions avec celle-ci. Dans le cas d'une surface opaque, trois phénomènes entrent en concurrence pour donner à la matière l'apparence qu'on lui connaît : l'absorption, la réflexion - ou réflexions spéculaire et la diffusion encore appelée réflexion diffuse. La réflexion spéculaire se produit à la surface de l'objet. Il n'y a peu d'interaction de la lumière avec la matière de l'objet - et notamment ses pigments. La couleur de la lumière réfléchi est donc proche de la couleur

de la lumière reçue. Au contraire, la diffusion a lieu plus en profondeur et la lumière émise est teintée de la couleur des pigments.

I.4.1. La réflexion spéculaire

La réflexion est dite spéculaire lorsque le rayonnement réfléchi par la surface l'est dans une seule et même direction. Ce type de réflexion est régi par les lois de Descartes, l'angle du rayonnement réfléchi θ_r est donc le symétrique de celui du rayonnement incident θ_i par rapport à la normale (figure I.8). La réflexion spéculaire se produit uniquement sur des surfaces lisses, dont les aspérités ont une taille inférieure à la longueur d'onde du rayonnement incident. En télédétection, on peut observer une réflexion spéculaire sur des surfaces d'eau calme. Sur les images, la réflexion spéculaire se traduit par une tâche éblouissante si le capteur se situe exactement dans la direction du rayonnement réfléchi, ou bien sombre dans le cas contraire.

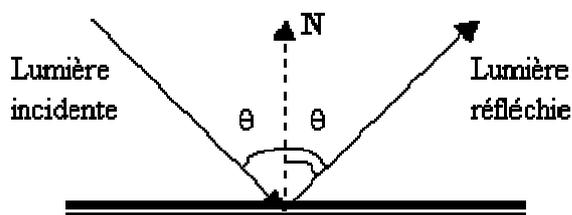


Fig.I.8 –Réflexion spéculaire.

I.4.2. La réflexion diffuse

La réflexion diffuse s'applique à la majorité des objets de la vie courante. Ces objets, à l'apparence mate, émettent une luminance indépendante de la direction d'observation. Un exemple de ce type de réflexion est le modèle de Lambert.

Ainsi, dans le cas où la luminance est indépendante de la direction d'observation, on appelle ce type de surface, surface lambertienne.

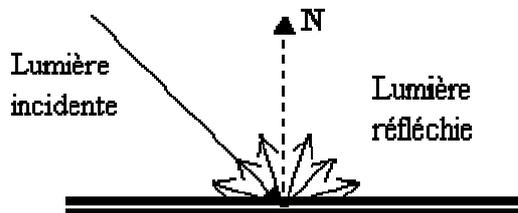


Fig.I.9 –Réflexion diffuse.

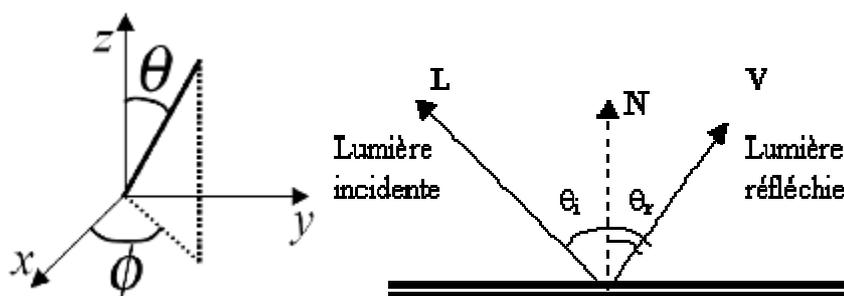
I.4.3. La fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle

Les directions de lumière sont définies dans un système de coordonnées locales à l'aide de deux angles, θ et Φ , qui désignent respectivement l'angle polaire et azimutal tel qu'illustré sur la figure.

Les quantités de lumière incidentes et réfléchies sont liées par la fonction de réflectance spectrale bidirectionnelle (en anglais : Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF), initialement introduite dans Nicodemus[2] notée $f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$, qui va nous permettre de caractériser la surface de l'objet. Elle est définie comme étant le rapport entre la luminance réfléchie par la surface et l'éclairement de celle-ci et vérifie la relation suivante :

$$f(q_i, f_i, q_r, f_r) = \frac{\partial L(q_i, f_i)}{\partial E(q_r, f_r)} \quad (19)$$

Avec $\partial L(q_i, f_i)$ la quantité de lumière incidente en direction (q_i, f_i) et $\partial E(q_r, f_r)$ la radiance vue de la direction (q_r, f_r) .



(a)(b)

Fig. I. 10-Direction de lumière :(a)système de coordonnée locale:angle polaire et angleazimutal, (b)la réflexion de lumière sur une surface de normale n.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de définir le processus de formation des images. Nous avons commencé par rappeler quelques définitions photométriques, ces notions sont très importantes pour comprendre le problème de shapefromshading ainsi que les équations qui ont mené à la modélisation de ce problème qui sera détailler dans le troisième chapitre.

CHAPITRE 2

Reconstruction en 3D par SFS

Introduction

La reconstruction 3D à partir d'une seule image ou photoclinoétrie, encore connue sous le terme Shape From Shading (SFS) est une technique de reconstruction 3D à partir des ombres dont le principe a été établi par Horn [4]. Cette technique consiste à retrouver le relief d'une scène à partir d'une seule photographie de cette scène, en exploitant les ombres. Le terme ombrage (Shading) désigne l'ensemble des phénomènes à cause desquels un même élément de surface matérielle apparaît plus ou moins clair sur une photographie.

II.1. Problème général de la vision du relief

Nous choisissons un repère tridimensionnel $R = (Cxyz)$ lié à l'appareil photographique, dont l'origine est le centre optique C et l'axe Cz coïncide avec l'axe optique. Dans ce repère, la surface visible de la scène est un graphe décrit par l'équation $z = u(x, y)$. La figure 1 illustre ce repère et positionne les trois entités fondamentales qui sont mises en présence : la scène ; la source lumineuse ; l'appareil photographique, constitué de l'objectif et du récepteur photosensible, ce dernier étant mis en coïncidence avec le plan de mise au point qui est le conjugué du plan moyen de la scène, afin d'obtenir une image nette.

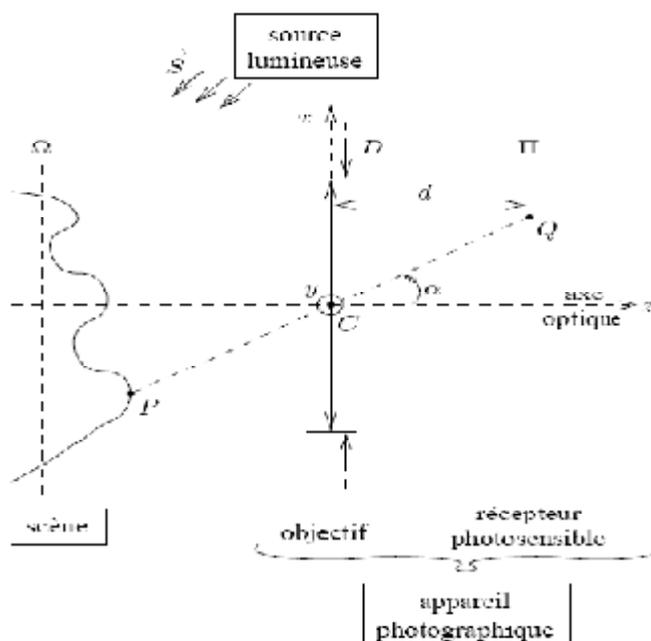


Fig. II.1- Schéma d'un montage photographique.

II.2. Exposé de la problématique

Laphotoclinométrie, connue sous le thèmeShape From Shading (SFS), consiste à reconstruire le relief 3D d'une scène à partir d'une seule image, grâce à l'analyse des ombres propres de la scène. Pour cettereconstruction,on dispose en générale d'une image en niveau de gris d'une scène dont il faut obtenir l'altitude de chaque point situé à la surface de l'objet. Comme cela est montré par la figure II.2

L'analyse du relief à partir d'une seule image étant complexe, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sur l'objet, sur la scène ou sur la caméra sont nécessaires.

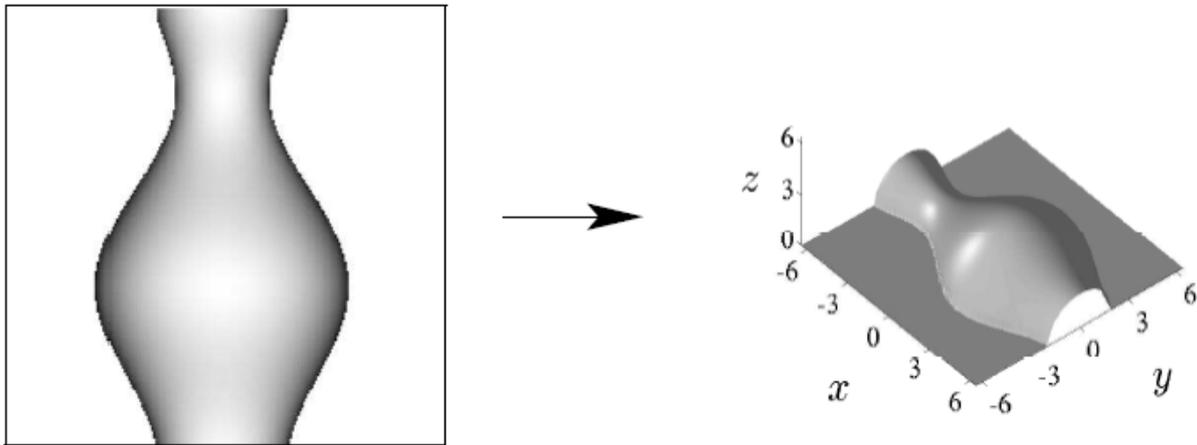


Fig. II.2– exemple de reconstruction du relief à partir d'une seule image en niveau de gris.

II.3. Hypothèses usuelles du shapefromshading

Le problème SFS peut être simplifié grâce à un certain nombre d'hypothèses sur la scène, la source lumineuse et l'appareil photographique, comme cela est rappelé dans [4].

Deux de ces hypothèses concernent la scène :

- Ø **H 1** - La réflectance, qui décrit la manière dont la scène réémet la lumière, est uniforme. Cette hypothèse sous-entend donc, en particulier, que l'albédo (fraction d'énergie lumineuse réémise) est uniforme.
- Ø **H 2** - Le matériau est lambertienne. Une surface est lambertienne si la lumière reflétée est indépendante de la direction de l'observateur, elle dépend de l'angle entre la source lumineuse et la surface (exemple, surface matte : nuage coton...).

Trois autres hypothèses concernent la source lumineuse :

- Ø **H 3** - La source lumineuse est unique et son flux est parallèle et uniforme, donc il peut être décrit, en direction et en densité, par un vecteur \vec{S} .
- Ø **H 4** - Les réflexions multiples sont négligeables.
- Ø **H 5** - L'éclairage est « frontal » c'est-à-dire que $\vec{S} = (0, 0, -S)$. (Le vecteur \vec{S} est parallèle à Cz).

Enfin, quatre hypothèses concernent l'appareil photographique :

- Ø **H 6** - L'image est nette et les aberrations du système optique sont négligeables.
- Ø **H 7** - La réponse du récepteur photosensible est linéaire.
- Ø **H 8** - L'angle de champ α vérifie $\alpha \ll 1$, pour tous les points visibles de la scène (Figure II.1).
- Ø **H 9** - L'effet de perspective est négligeable.

II.4. Formulation Mathématique et mise en équation

Pour la formulation mathématique du Shape from shading nous allons nous intéresser à un cas particulièrement simple auquel on se ramène très souvent : celui d'un éclairage frontal, c'est-à-dire pour lequel la source lumineuse et l'observateur sont confondus (Figure II.3). On note par z la profondeur et par x et y les deux variables d'espace décrivant l'objet. On note par \vec{s} la pente de l'objet au point (x, y) :

$$s = \|\vec{\nabla}z\| = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (20)$$

Avec :

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} \text{ et } q = \frac{\partial z}{\partial y}$$

Les paramètres p et q décrivent le gradient selon l'horizontale et selon la verticale de la surface externe de l'objet au point (x, y) .

La fonction de réflectance bidirectionnelle $R(\vec{E}, \vec{O}, \vec{N})$, fonction de l'angle d'éclairage \vec{E} , de l'angle d'observation \vec{O} et de la normale locale \vec{N} à l'objet, s'écrit, dans le cas d'un éclairage et d'une observation frontaux, sous la forme très simple :

$$R(\vec{E}, \vec{O}, \vec{N}) = R(\vec{N}) = R(s) \quad (21)$$

A ce point, on choisit généralement une loi de réflectance bidirectionnelle particulière, le plus souvent celle d'un matériau parfaitement diffusant (réflexion lambertienne), régie par la formule :

$$R(\vec{N}) = k |\vec{s} \cdot \vec{N}| \quad (22)$$

où k est un scalaire qui prend en compte les propriétés du matériau et de l'optique.

Comme la surface est éclairée de face : $s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$

Et \vec{N} vaut :

$$\vec{N} = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \begin{pmatrix} -p \\ -q \\ 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

La fonction de réflectance s'écrit donc :

$$R(\vec{N}) = \frac{ks}{\sqrt{1+s^2}} \quad (24)$$

Avec : $s^2 = p^2 + q^2$

Cette fonction est maximale lorsque la surface est perpendiculaire à la direction d'éclairage ($p=q=0$). Elle vaut alors $E_{max} = KS$. On peut donc réécrire la fonction d'éclairement comme :

$$R(\vec{N}) = \frac{E_{max}}{\sqrt{1+s^2}} \quad (25)$$

Où :

$$R(p, q) = \frac{E_{max}}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (26)$$

La carte de réflectance $R(p, q)$ nous donne le rayonnement de la scène en fonction du gradient de la surface (p, q) dans un système de coordonnées. Cette fonction est à-priori inconnue, sans sa connaissance, on ne peut pas résoudre l'équation d'irradiance.

Si le niveau de gris de l'image de la surface observée est représentée par la fonction $E(x, y)$, alors la formulation mathématique du problème SFS a comme résultat l'équation d'irradiance :

$$R(\vec{N}) = E(x, y) \quad (27)$$

$$\frac{E_{max}}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} = E(x, y) \quad (28)$$

Comme on peut l'écrire sous la forme :

$$\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 = \left(\frac{E_{max}}{E(x, y)}\right)^2 - 1 \quad (29)$$

Cette équation est appelée équation d'Eikonale. C'est une équation aux dérivées partielles, du premier ordre de dérivation, non linéaire, appelée aussi équation d'Hamilton Jacobi du premier ordre.

La résolution de cette équation dépend essentiellement de :

1. De l'ensemble de fonctions dans lesquelles on cherche la solution.
2. Des conditions aux limites, parmi ces conditions on peut citer :
 - conditions aux limites de type Dirichlet : l'altitude z est connue sur la frontière du domaine de reconstruction.
 - condition aux limites de type Neumann : le gradient d'altitude est connu sur la frontière du domaine de reconstruction.

La difficulté du Shape From Shading consiste tout d'abord à s'assurer de l'existence des solutions de ce problème, puis de leur nombre, enfin de proposer des algorithmes pour les calculer. Malheureusement tous ces problèmes sont aujourd'hui encore mal résolus.

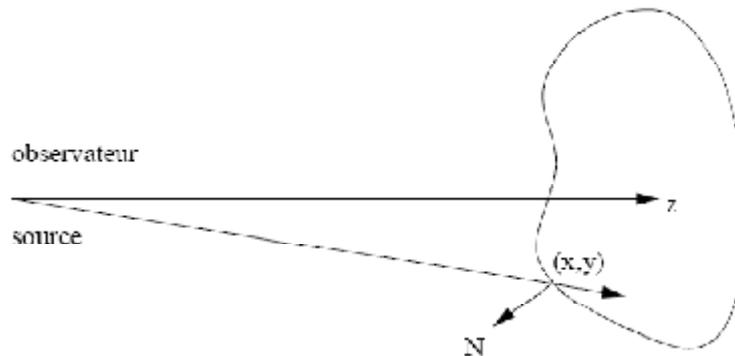


Fig. II. 3- Forme à partir de l'ombrage. Schéma simplifié de mise en équations.

II.5. Méthodes de résolution du problème SFS

Dans deux états de l'art récents [5], [6] les méthodes de résolution du SFS sont regroupées en trois classes : méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles, méthodes de résolution par optimisation et méthodes de résolution par approximation de l'équation de luminance.

II.5.1. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles

La première classe regroupe quelques méthodes classiques de résolution des équations aux dérivées partielles.

II.5.1.1. Lignes caractéristiques et courbes de niveau

La première mention de reconstruction tridimensionnelle utilisant une information photométrique est due à l'astronome Van Diggelen [7]. La résolution du problème a été suggérée par Rindfleisch [8], à l'aide de la méthode des lignes caractéristiques, qui consiste dans le cas d'une image de la Lune à exprimer le relief par une intégrale le long d'un faisceau de lignes droites convergentes. Plus tard, Horn, à qui l'on doit le terme de shapefromshading, a généralisé cette méthode [9]. Le problème inhérent de toutes ces méthodes de résolution de proche en proche est l'accumulation des erreurs. L'exactitude des conditions aux limites est de ce fait cruciale.

Par ailleurs, un certain nombre de problèmes doivent être résolus, comme le croisement des lignes caractéristiques [4] ou la présence de trous dans l'image [9]. Notons que la méthode des lignes caractéristiques a surtout été utilisée à des fins théoriques, pour calculer le nombre de solutions de classe C^2 de l'équation de l'eikonale [10], [11],[12]. Une méthode de résolution équivalente proposée par Kimmel et Bruckstein [32], qui évite les problèmes de topologie (croisement des lignes, trous), consiste à calculer des courbes de niveau.

II.5.1.2. Approximation des solutions de viscosité

La recherche des solutions de viscosité de l'équation de l'eikonale a été effectuée pour la première fois dans [13]. Plusieurs méthodes d'approximation de ces solutions ont été proposées dans le cadre de la résolution du Shape From Shading, utilisant des schémas aux différences finies [13],[14], [15], des schémas semi-lagrangiens [16] ou des chaînes de Markov [17]. Le problème de ces méthodes étant l'unicité de la solution, il est de coutume d'ajouter une information a priori sur la scène, comme par exemple la connaissance de l'altitude en chacun des points singuliers de l'image [14]. En l'absence de connaissance a priori sur la scène, la notion de solution de viscosité maximale, introduite dans [16], [18], permet d'assurer l'unicité de la solution.

II.5.2. Méthodes de résolution par optimisation

La deuxième classe regroupe les méthodes de résolution utilisant le principe général de l'optimisation.

Elles diffèrent par les choix des inconnues, de la fonctionnelle à minimiser et de la méthode d'optimisation.

II.5.2.1. Choix des inconnues

Les inconnues les plus utilisées dans la littérature sont les dérivées partielles p et q de la fonction d'altitude z [19], [20], [21], [22]. Choisir u comme inconnue peut paraître plus naturel [23]. Cependant, il a été montré que ce choix pose des problèmes de convergence [21] et de lenteur [21]. Si l'on suppose que z est de classe C^2 , le fait de choisir (p, q) comme inconnues permet de rajouter comme contrainte l'égalité de Schwartz $\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial q}{\partial x}$. D'autres choix d'inconnues ont été proposés, comme par exemple le triplet (z, p, q) [24],[25], les coordonnées stéréographiques de la

normale [26], [27], qui présentent l'avantage d'être bornées, contrairement à (p,q) , ou encore la normale \vec{n} [28],[29]. A noter que, même si on ne choisit pas z comme inconnue, le calcul de la fonction z reste l'objectif final.

II.5.2.2. Choix d'une fonctionnelle

Une fois que les inconnues du problème ont été choisies, il reste à exprimer le problème du SFS sous la forme d'une fonctionnelle à minimiser, qui est souvent une combinaison de trois termes : attache aux données, intégrabilité et lissage. Une bonne étude des différentes combinaisons possibles est menée dans [20]. Plusieurs propositions [19],[20] ont été faites pour discrétiser ces fonctionnelles. Mis à part dans [22],[29], où l'intégrabilité de la solution est imposée à chaque pas, le problème comporte un ou deux paramètres, qui sont le facteur d'intégrabilité et le facteur de lissage. Dans [23],[24], le terme de lissage est variable, et décroît en même temps que l'erreur, afin de ne pas trop lisser la solution. Dans [21], [25], l'utilisation simultanée de ces deux paramètres permet de rendre le problème bien posé, même en l'absence de condition aux limites [30].

II.5.2.3. Choix d'une méthode d'optimisation

Deux stratégies peuvent être adoptées pour minimiser la fonctionnelle choisie [25] : la première consiste à minimiser directement la fonctionnelle, la seconde à résoudre les équations d'Euler qui lui sont associées. De par sa facilité d'implémentation et sa rapidité, et même si elle peut diverger [35], la deuxième stratégie est la plus souvent utilisée [19],[20],[22],[24],[26]. Deux méthodes de minimisation directe fondées sur l'algorithme du gradient conjugué ont été proposées [23],[25], mais la convergence n'est pas garantie, contrairement à la méthode proposée dans [21], qui utilise un algorithme de descente de gradient classique. L'inconvénient de ce type de méthodes est que, très souvent, le minimum obtenu est un minimum local, ce qui rend l'initialisation primordiale. Afin de pallier ce problème, des algorithmes d'optimisation stochastique ont été utilisés : recuit simulé [31] ou algorithmes génétiques [33].

L'inconvénient de ces méthodes est le temps de calcul qui est exorbitant. Pour éviter cela, il a été proposé d'utiliser des stratégies de multi-résolution [25],[31],[34].

II.5.3. Méthodes de résolution par approximation de l'équation de luminance

Il existe une troisième classe de méthodes de résolution du SFS, qui consistent à utiliser une approximation de l'équation de luminance. Ces méthodes ont été classées dans [5],[6] en deux sous-classes : les méthodes locales et les méthodes linéaires.

II.5.3.1. Méthodes locales

Les méthodes locales consistent à calculer la normale en chaque point de la surface, indépendamment des normales aux points voisins, en supposant que le relief est localement sphérique [36],[37],[38] ou localement cylindrique [39]. Une des conséquences de cette hypothèse est que les normales calculées ne sont généralement pas intégrables. Il en résulte que les reliefs reconstruits sont de qualité moyenne.

II.5.3.2. Méthodes linéaires

Ces méthodes consistent à réaliser une approximation linéaire, globale ou locale, de la fonction de réflectance. L'utilisation d'une approximation globale [40],[41],[42],[43], c'est-à-dire d'une même approximation pour tous les pixels de l'image, ne paraît raisonnable que lorsque la normale est quasi-invariante sur toute la scène. Une approximation locale de la fonction de réflectance est proposée dans [44]. Est souvent utilisée comme méthode de référence [5],[6].

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les différentes équations qui ont mené à la modélisation du problème de shape from shading, cette mise en équation a été donnée dans le cas où la surface est lambertienne et pour une projection orthographique. Le problème SFS est connu comme étant difficile à résoudre, quelques méthodes de résolution ont été citées dans ce chapitre sans toutefois les détailler.

CHAPITRE 3

Tests et interprétation des résultats

Introduction

Dans ce chapitre on se propose de tester une méthode de résolution du problème de reconstruction 3D à partir d'une seule image en niveau de gris.

La méthode testée a été implémentée sous MATLAB version 7.6.0 (R2008a) sur un ordinateur PC doté d'un microprocesseur de type Intel (R) Pentium (R) Dual CPU T2330.

L'évaluation des résultats sera effectuée sur des images de synthèse puis sur des images réelles.

III.1. Application d'une méthode de reconstruction

Parmi les différentes approches de résolution du problème SFS citées dans le chapitre II, et dans le but de parvenir à la reconstruction 3D à partir d'une seule image, notre intérêt est porté sur les méthodes linéaires, on rappelle que ces méthodes sont basées sur la linéarisation de la fonction de réflectance, parmi ces méthodes on peut citer la méthode de Pentland [45] et la méthode de Tsai-et shah. C'est cette dernière que nous allons appliquer sur nos images test.

III.2. Approche linéaire de Tsai et Shah

Pour résoudre le problème SFS Tsai et Shah [44] ont proposés une méthode basée sur la linéarisation de la carte de réflectance. Dans notre étude on s'intéresse uniquement aux surfaces lambertien

La fonction réflectance pour la surface Lambertien est modélisée comme suit :

$$E(x, y) = R(p, q)$$

$$= \frac{1 + pp_s + qq_s}{\sqrt{1+p^2+q^2}\sqrt{1+p_s^2+q_s^2}} \quad (30)$$

$$= \frac{\cos \sigma + p \cos \tau \sin \sigma + q \sin \tau \sin \sigma}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \quad (31)$$

Où $E(x, y)$ est le niveau de gris en pixel (x, y) ,

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}, p_s = \frac{\cos \tau \sin \sigma}{\cos \sigma}, q_s = \frac{\sin \tau \sin \sigma}{\cos \sigma}$$

Où τ est l'angle polaire, σ est l'angle azimutal

L'équation d'irradiance est donnée comme suit

$$E(x, y) = R(p, q) \quad (32)$$

Qui peut être écrite sous forme

$$E(x, y) - R(p, q) = 0 \quad (33)$$

On remplace p et q par leur approximation linéaire en utilisant les différences finies :

$$p = \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = Z(x, y) - Z(x-1, y) \quad (34)$$

$$q = \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = Z(x, y) - Z(x, y-1) \quad (35)$$

$$f(E(x, y), Z(x, y), Z(x-1, y), Z(x, y-1)) = 0$$

$$E(x, y) - R(Z(x, y) - Z(x-1, y), Z(x, y) - Z(x, y-1)) = 0 \quad (36)$$

En utilisant les séries de Taylor pour une carte de profondeur donnée z^{n-1} , on obtient les équations suivantes :

$$0 = f(E(x, y), Z(x, y), Z(x-1, y), Z(x, y-1))$$

$$\approx f(E(x, y), Z^{n-1}(x, y), Z^{n-1}(x-1, y), Z^{n-1}(x, y-1))$$

$$+ [(Z(x, y) - Z^{n-1}(x, y)) \times \frac{\partial}{\partial Z(x, y)} f(E(x, y), Z^{n-1}(x, y), Z^{n-1}(x-1, y), Z^{n-1}(x, y-1))]$$

$$+ [(Z(x-1, y) - Z^{n-1}(x-1, y))$$

$$\times \frac{\partial}{\partial Z(x-1, y)} f(E(x, y), Z^{n-1}(x, y), Z^{n-1}(x-1, y), Z^{n-1}(x, y-1))]$$

$$+ [(Z(x, y-1) - Z^{n-1}(x, y-1)) \times$$

$$\frac{\partial}{\partial Z(x, y-1)} f(E(x, y), Z^{n-1}(x, y), Z^{n-1}(x-1, y), Z^{n-1}(x, y-1)) \quad (37)$$

La valeur initiale $Z^0(x, y)$, est donnée par la formule :

$$Z^n(x, y - 1) = Z^{n-1}(x, y-1) \quad (38)$$

$$Z^n(x - 1, y) = Z^{n-1}(x-1, y) \quad (39)$$

chaque valeur de la carte de profondeur peut être calculée après plusieurs itérations.

L'équation (37) peut être écrite comme suit :

$$\begin{aligned} 0 &= f(Z(x, y)) \\ &\approx f(Z^{n-1}(x, y)) + (Z(x, y) - Z^{n-1}(x, y)) \frac{d}{dZ(x,y)} f(Z^{n-1}(x, y)). \end{aligned} \quad (40)$$

On arrange l'équation (40), on obtient

$$Z^0(x, y) = \text{valeur initiale}$$

$$Z^n(x, y) = Z^{n-1}(x, y) + \frac{-f(Z^{n-1}(x,y))}{\frac{d}{dZ(x,y)}f(Z^{n-1}(x,y))}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (41)$$

Où :

$$\frac{df(Z^{n-1}(x,y))}{dZ(x,y)} = -1 \times \left(\frac{p_s + q_s}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}} - \frac{(p+q)(pp_s + qq_s + 1)}{\sqrt{((p^2 + q^2 + 1)^3) \sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}}} \right). \quad (42)$$

En utilisant la formule (41), on obtient l'approximation de la carte de profondeur $Z(x, y)$.

III.3.Algorithme de Tsai et Shah

L'algorithme de Tsai et Shah peut être décrit comme suit

- Ø Définir les paramètres de la carte de réflectance,
- Ø Mettre la valeur initiale $Z^0(x, y) = 0$,
- Ø Calculer la carte de profondeur $Z^K(x, y)$ en utilisant l'équation (41).

Algorithm:

Input Z_{min} (mindepthvalue), Z_{max} (maxdepthvalue), (x, y, z)(direction of the light source),

$E(x, y)$ (inputimage)

$Z^0 \leftarrow 0$;

$P^0 \leftarrow q^0 \leftarrow 0$; $p \leftarrow q \leftarrow P^0 \leftarrow q^0$;

$D \leftarrow \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $S_x \leftarrow \frac{x}{D}$, $S_y \leftarrow \frac{y}{D}$, $S_z \leftarrow \frac{z}{D}$.

$\sin \gamma \leftarrow \sin(\arccos(lz))$, $\sin \tau \leftarrow \sin(\arctan(\frac{S_y}{S_x}))$, $\cos \tau \leftarrow \cos \arctan(\frac{S_y}{S_x})$.

for $i = 1$ to width (E) do

 for $j = 1$ to height (E) do

$df_z \leftarrow -1 \cdot \{(\cos \tau \tan \gamma + \sin \tau \tan \gamma) / \sqrt{(p^2 + q^2 + 1)(\tan^2 \gamma + 1)}\}$

$-(p + q)(p \cos \tau \tan \gamma + q \sin \tau \tan \gamma + 1) / \sqrt{(p^2 + q^2 + 1)^3(\tan^2 \gamma + 1)}$

$Z(i, j) \leftarrow Z^0(i, j) + -f(Z^0(i, j)) / df_z$

$p \leftarrow Z(i, j) - Z(i, j - 1)$

$q \leftarrow Z(i, j) - Z(i - 1, j)$

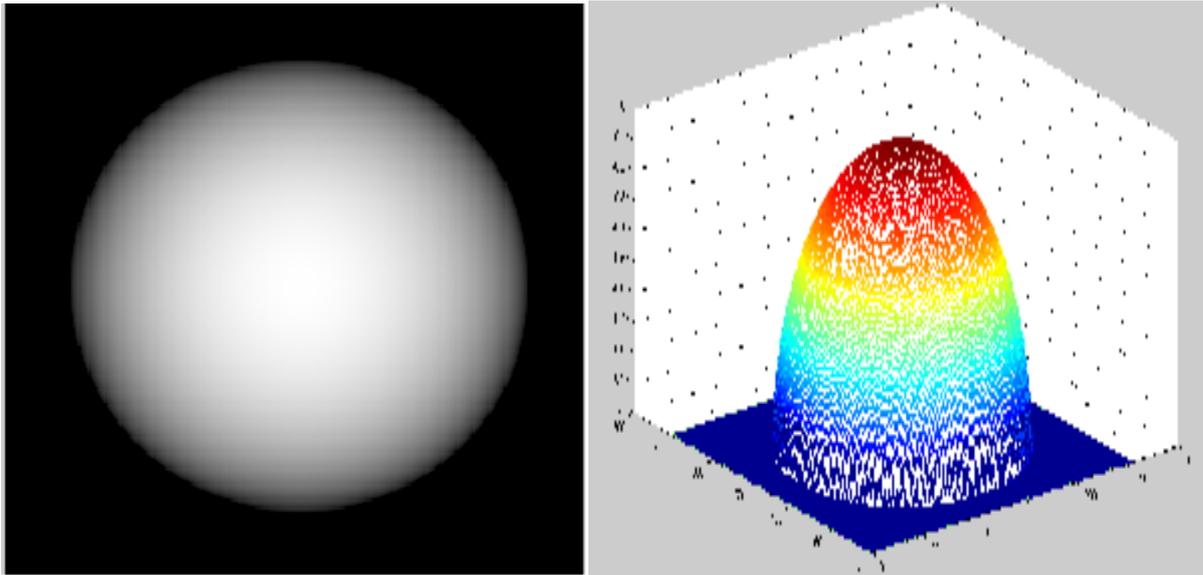
 end do

end do

Normalize ($Z(x, y)$, Z_{max} , Z_{min})

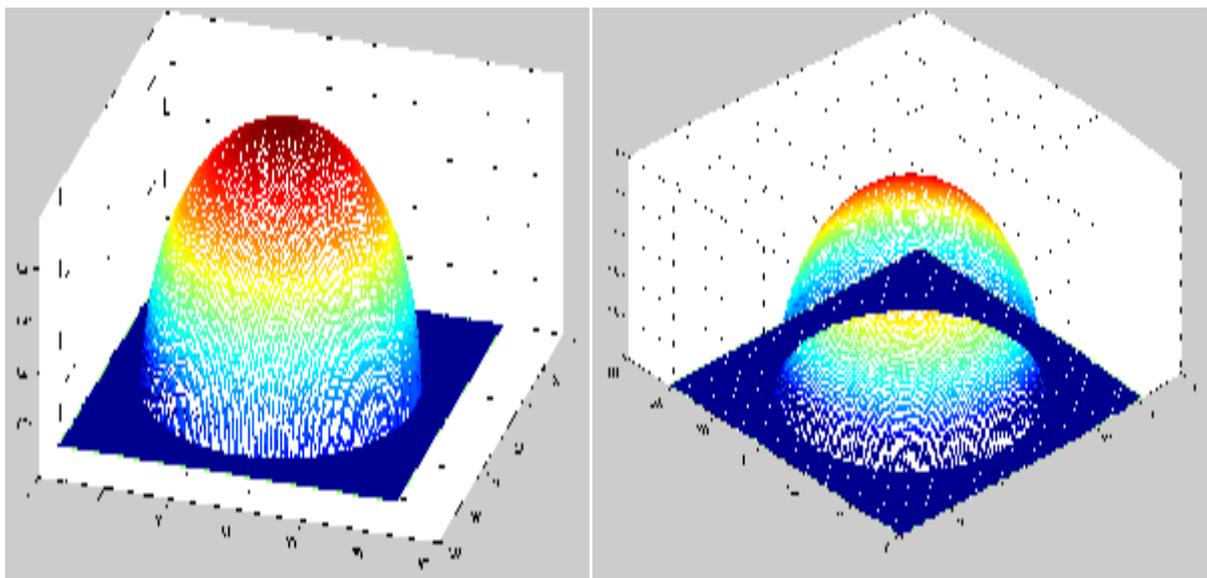
Output $Z(x, y)$

III.4. Tests et résultats Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus après application de la méthode de Tsai et Shah, quatre images de synthèse ont été choisies pour effectuer les tests, ainsi qu'une image réelle.



(a) - image de la sphère

(b)-relief reconstruit

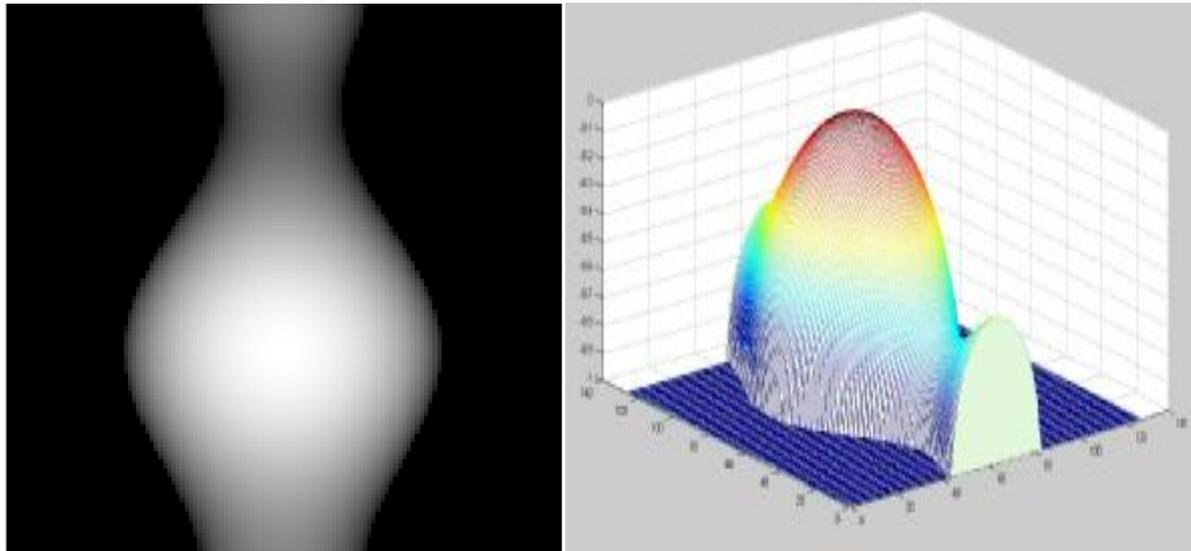


résultat (c)

résultat (d)

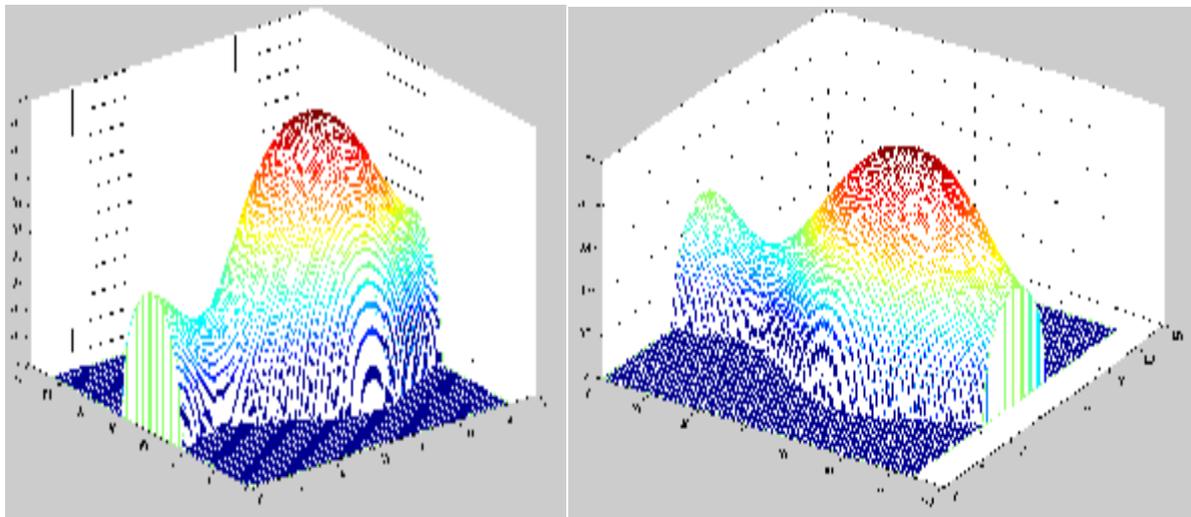
Figure.1

Figure.1: Exemple de relief reconstruit à partir d'image de synthèse de la sphère. (a) image originale avec la source de lumière ($x = 0$, $y = 0$, $z = 1$). (b), (c) et (d) sont les surfaces reconstruites à partir de trois directions différentes.



(a) – image de vase

résultat (b)

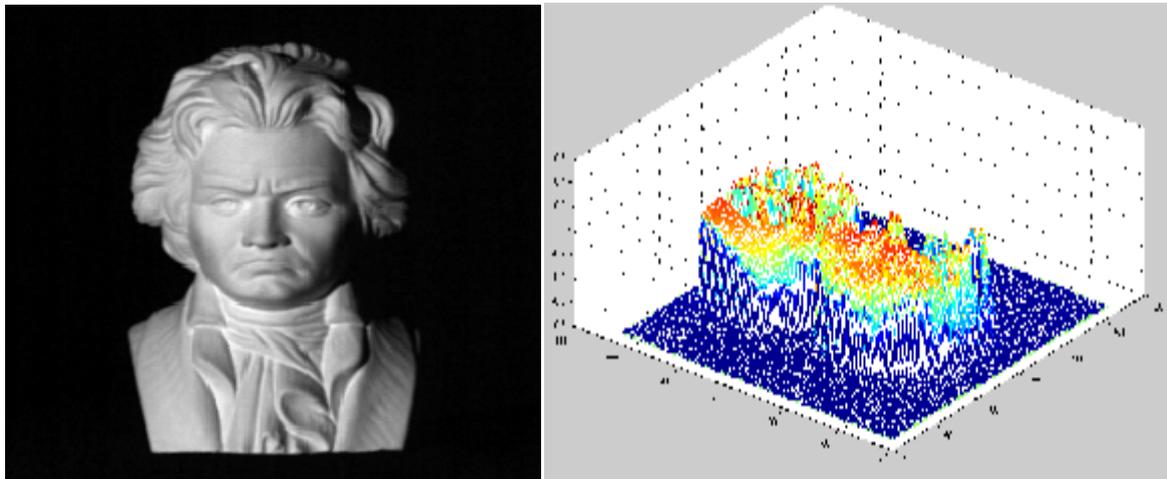


résultat (c)

résultat (d)

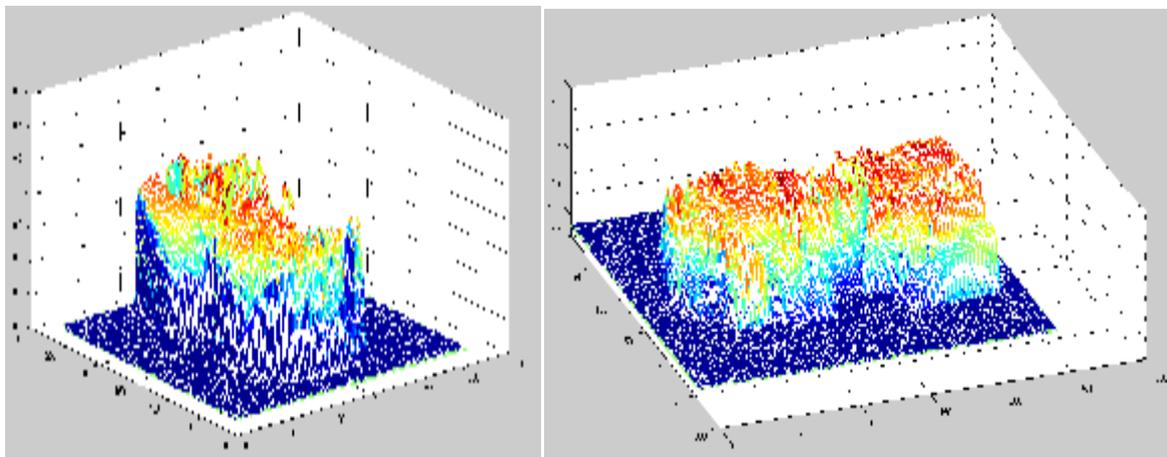
Figure.2

Figure.2 : Exemple de reconstruction de relief à partir des images de synthèses. (a) image de synthèse correspondante (Vase). (a) est l'image d'entrée avec la source de lumière ($x = 0$, $y = 0$, $z = 1$). (b), (c) et (d) sont les surfaces reconstruites à partir de trois directions différentes.



Beethoven (a)- image de synthèse

résultat (b)

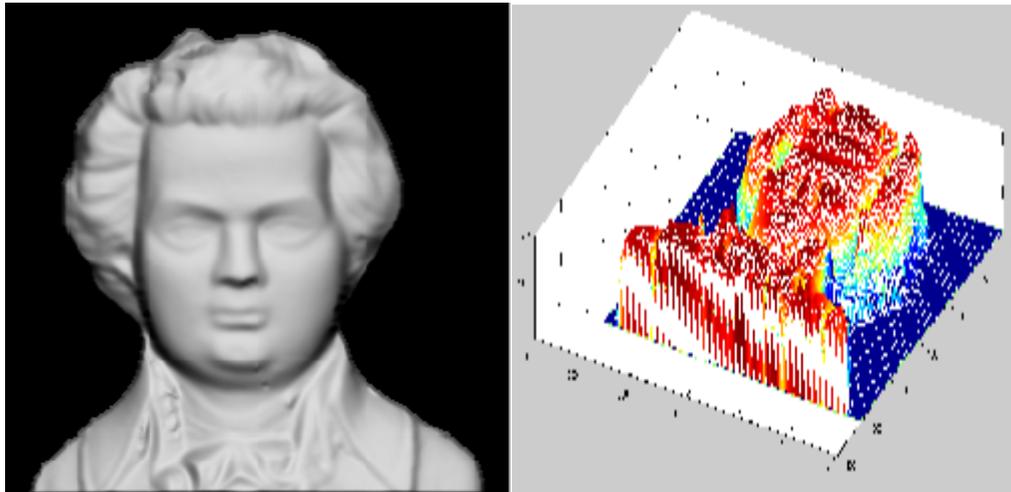


résultat (c)

résultat (d)

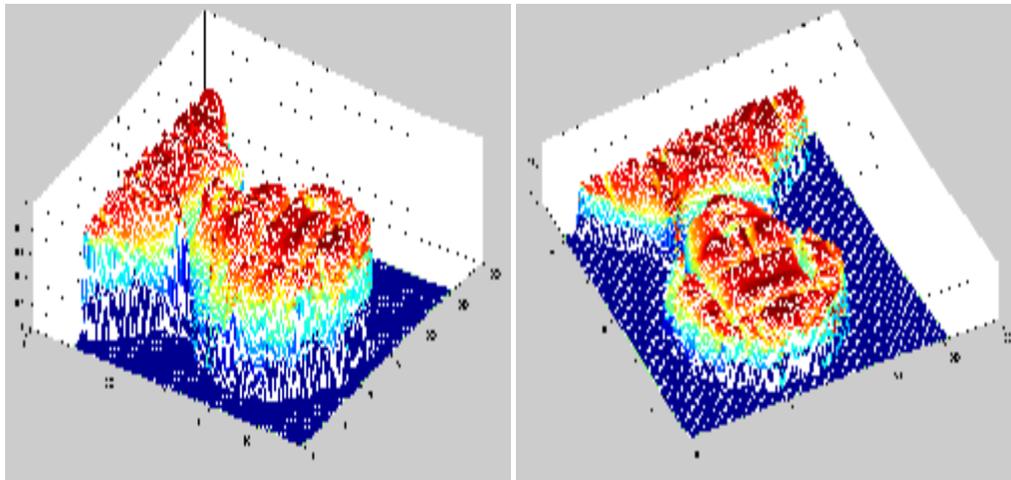
Figure.3

Figure.3: Exemple de reconstruction de relief à partir des images de synthèses. (a) image de buste de Beethoven ($x = 0, y = 0, z = 1$). (b)-relief reconstruit à partir de la méthode de Tsai et Shah, (c) et (d) sont les surfaces reconstruites a partir de trois directions différentes.



(a)- image de buste de Mozart

(b)-relief reconstruit

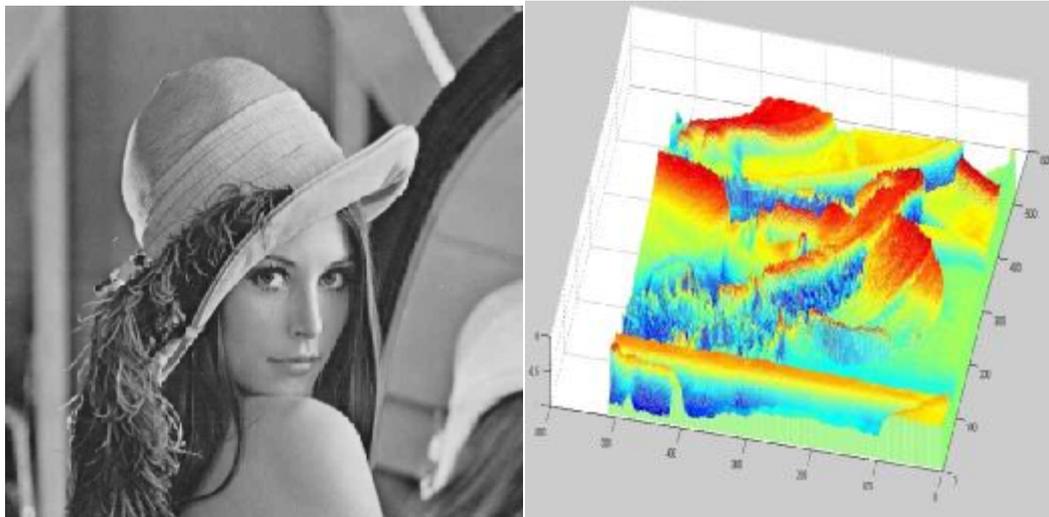


résultat (C)

résultat (d)

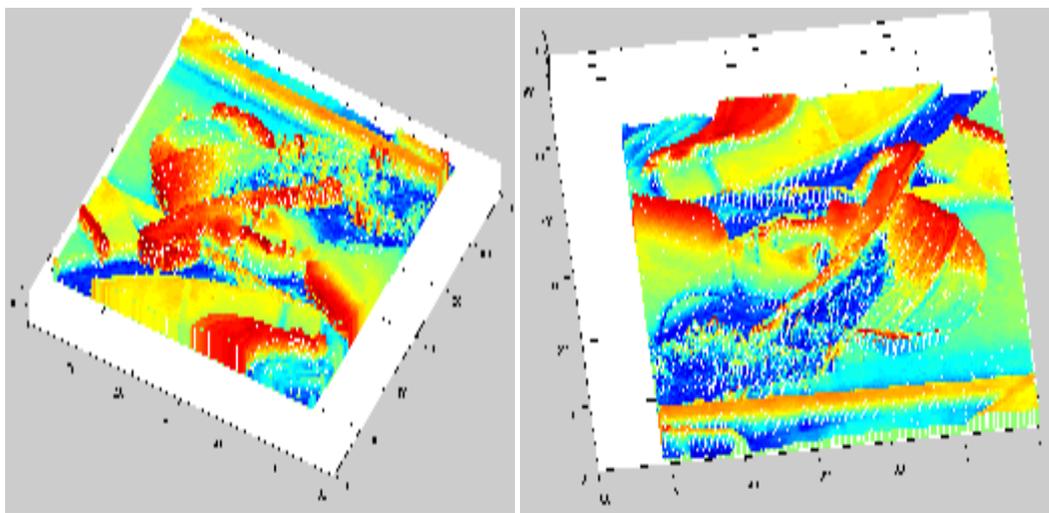
Figure.4

Figure.4: Exemple de reconstruction de relief à partir des images de synthèses. (a) image de buste de Mozart avec la source de lumière ($x = 0, y = 0, z = 1$). (b), (c) et (d) sont les surfaces reconstruites à partir de trois directions différentes.



(a) Image de Lena

(b)-Relief reconstruit à partir de (a)



résultat (c)

résultat (d)

Figure.5

Figure.5: Exemple de reconstruction de relief à partir d'une image réelle. (a) est l'image d'entrée avec la source de lumière ($x = 0, y = 0, z = 1$). (b), (c) et (d) sont les surfaces reconstruites à partir de trois directions différentes.

Le relief reconstruit à partir de l'image de Lena est loin du résultat recherché, on peut remarquer à-priori, à partir du relief reconstruit qu'il s'agit d'un visage, mais sans plus de détails concernant les yeux, le nez et la bouche.

III.5. Conclusion

L'objectif de notre travail est la reconstruction tridimensionnelle des images en niveau de gris.

Les résultats obtenus sur les images de synthèse sont satisfaisant, toutefois les résultats restent insuffisant pour des applications sur des images réelles, ceci s'explique par le fait que les images réelles sont loin de vérifier les hypothèses citées dans le deuxième chapitre.

Face à ces difficultés il y a lieu d'adopter d'autres approches plus rigoureuses, et ainsi la nécessité d'une étude mathématique plus approfondie pour rendre ce problème bien posé.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le domaine du traitement d'image et plus précisément celui de la reconstruction d'image en 3D en utilisant une seule image en niveau de gris.

Parmi les nombreuses méthodes de reconstruction 3D, nous nous sommes intéressés particulièrement à la méthode de Tsai et Shah qui est basé sur un algorithme très simple et rapide pour le calcul de la carte de profondeur.

L'évaluation des résultats effectués montre que cette méthode donne de résultat meilleur sur les images de synthèses que sur les images réelles. Nous avons remarqué que même avec les hypothèses simplificatrices et des images synthétiques vérifiant ces hypothèses, les résultats reste loin du relief estimé.

Référence Bibliographique

Bibliographies

- [1] F. COURTEILLE : Prise en compte du modèle sténopé pour l'extraction du relief en monovision. DEA Informatique de l'Image et du Langage, Responsable : René CAUBET 2002-2003
- [2] NICODEMUS, F.E, Richmond, J.C and Hsia, J!;J, Ginsberg, I.W. and Limperis, T.(1977) "Geometrical Considerations and Nomenclature for reflectance", NBS Monograph 160, National Bureau of standards, U.S. Departement of commerce,October 1977.
- [3] B. K. P. Horn. Shape from Shading: a Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object from One View. PhD thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 'Etats-Unis, novembre 1970.
- [4] P. Daniel. Peut-on extraire le relief d'une seule image ?
Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, janvier 2000.
- [5] J.-D. Durou, M. Falcone et M. Sagona. A Survey of Numerical Methods for Shape from Shading. Rapport de Recherche 2004-2-R, Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, Toulouse, France, janvier 2004.
- [6] R. Zhang, P.-S. Tsai, J. E. Cryer et M. Shah. Shape from Shading: A Survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(8):690 706, Août 1999
- [7] J. Van Diggelen. A Photometric Investigation of the Slopes and Heights of the Ranges of Hills in the Maria of the Moon. Bulletin of the Astronomical Institute of the Netherlands, 11(423):283–290, juillet 1951.
- [8] T. Rindfleisch. Photometric Method for Lunar Topography. Photometric Engineering, 32(2):262–277, mars 1966.
- [9] B. K. P. Horn. Obtaining Shape from Shading Information.
Dans P. H. Winston, éditeur, The Psychology of Computer Vision, Chapitre 4, pages 115–155. McGraw-Hill, 1975.
- [10] M. J. Brooks, W. Chojnacki et R. Kozera. Impossible and Ambiguous

Bibliographies

- Shading Patterns. *International Journal of Computer Vision*, 7(2):119–126, janvier 1992.
- [11] R. Kozera. Uniqueness in Shape from Shading Revisited. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 7(2):123–138, mars 1997.
- [12] J. Oliensis. Uniqueness in Shape from Shading. *International Journal of Computer Vision*, 6(2):75–104, juin 1991.
- [13] E. Rouy et A. Tourin. A Viscosity Solutions Approach to Shape-from-shading. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 29(3):867–884, juin 1992.
- [14] P.-L. Lions, E. Rouy et A. Tourin. Shape-from-Shading, viscosity solutions and edges. *Numerische Mathematik*, 64(3):323–353, mars 1993.
- [15] E. Prados, O. Faugeras et E. Rouy. Shape from Shading and Viscosity Solutions. Dans *Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision (volume II)*, volume 2351 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 790–804, Copenhague, Danemark, mai 2002.
- [16] M. Falcone et M. Sagona. An algorithm for the global solution of the Shape-from- Shading model. Dans *Proceedings of the 9th International Conference on Image Analysis and Processing (volume I)*, volume 1310 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 596–603, Florence, Italie, septembre 1997.
- [17] J. Oliensis et P. Dupuis. A Global Algorithm for Shape from Shading. Dans *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 692–701, Berlin, Allemagne, mai 1993.
- [18] M. Sagona. Numerical methods for degenerate Eikonal type equations and applications. *Tesi di dottorato*, Dipartimento di Matematica dell'Università di Napoli "Federico II", Naples, Italie, novembre 2001.

Bibliographies

- [19] T. M. Strat. A Numerical Method for Shape-From-Shading From a Single Image. Master's thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, États-Unis, 1979.
- [20] B. K. P. Horn et M. J. Brooks. The Variational Approach to Shape From Shading. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 33(2):174–208, février 1986.
- [21] P. Daniel et J.-D. Durou. From Deterministic to Stochastic Methods for Shape From Shading. Dans *Proceedings of the 4th Asian Conference on Computer Vision*, pages 187–192, Taipei, Taiwan, janvier 2000.
- [22] R. T. Frankot et R. Chellappa. A Method for Enforcing Integrability in Shape from Shading Algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(4):439–451, juillet 1988.
- [23] Y. G. Leclerc et A. F. Bobick. The Direct Computation of Height from Shading. Dans *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 552–558, Maui, Hawai, États-Unis, juin 1991.
- [24] B. K. P. Horn. Height and Gradient from Shading. *International Journal of Computer Vision*, 5(1):37–75, août 1990.
- [25] R. Szeliski. Fast Shape from Shading. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding*, 53(2):129–153, mars 1991.
- [26] K. Ikeuchi et B. K. P. Horn. Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries. *Artificial Intelligence*, 17(1–3):141–184, août 1981.
- [27] D. Lee. A Provably Convergent Algorithm for Shape from Shading. Dans *Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop*, pages 489–496, Miami Beach, Floride, États-Unis,

Bibliographies

- Décembre 1985.
- [28] M. J. Brooks et B. K. P. Horn. Shape and Source from Shading. Dans Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence (volume II), pages 932–936, Los Angeles, Californie, États-Unis, août 1985.
- [29] P. L. Worthington et E. R. Hancock. New Constraints on Data-Closeness and Needle Map Consistency for Shape-from-Shading. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(12):1250–1267, décembre 1999.
- [30] A. Cruzil, X. Descombes et J.-D. Durou. A Multiresolution Approach for Shape from Shading Coupling Deterministic and Stochastic Optimization. Rapport de Recherche 2003-19-R, Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, Toulouse, France, septembre 2003.
- [31] A. Cruzil, X. Descombes et J.-D. Durou. A Multiresolution Approach for Shape from Shading Coupling Deterministic and Stochastic Optimization. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25(11):1416–1421, novembre 2003.
- [32] R. Kimmel et A. M. Bruckstein. Tracking Level Sets by Level Sets: A Method for Solving the Shape from Shading Problem. Computer Vision and Image Understanding, 62(1):47–58, juillet 1995.
- [33] H. Saito et N. Tsunashima. Estimation of 3-D Parametric Models from Shading Image Using Genetic Algorithms. Dans Proceedings of the 12th International Conference on Pattern Recognition (volume I), pages 668–670, Jérusalem, Israël, octobre 1994.

Bibliographies

- [34] D. Samaras et D. N. Metaxas. Incorporating Illumination Constraints in Deformable Models. Dans Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 322–329, Santa Barbara, Californie, États-Unis, juin 1998.
- [35] J.-D. Durou et H. Maitre. On Convergence in the Methods of Start and of Smith for Shape from Shading. *International Journal of Computer Vision*, 17(3):273–289, mars 1996.
- [36] A. P. Pentland. Local Shading Analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6(2):170–187, mars 1984.
- [37] C.-H. Lee et A. Rosenfeld. Improved Methods of Estimating Shape from Shading Using the Light Source Coordinate System. *Artificial Intelligence*, 26(2):125–143, mai 1985.
- [38] H. Hayakawa, S. Nishida, Y. Wada et M. Kawato. A Computational Model for Shape Estimation by Integration of Shading and Edge Information. *Neural Networks*, 7(8):1193–1209, octobre 1994.
- [39] R. L. Wildey. Radarclinometry for the Venus Radar Mapper. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(1):41–50, janvier 1986.
- [40] A. P. Pentland. Linear Shape From Shading. *International Journal of Computer Vision*, 4(2):153–162, mars 1990.
- [41] R. Kozera et R. Klette. Finite Difference Based Algorithms for a Linear Shape from Shading. *Machine Graphics and Vision*, 6(2):157–201, 1997.
- [42] G. Ulich. Provably Convergent Methods for the Linear and Nonlinear Shape from Shading Problem. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 9(1):69–82, juillet 1998.

Bibliographies

- [43] R. Kozera et R. Klette. Evaluation of Numerical Solution Schemes for Differential Equations. Dans R. Klette, H. S. Stiehl, M. A. Viergever et K. L. Vincken, éditeurs, Performance Characterization in Computer Vision, volume 17 de Computational Imaging and Vision, pages 153–166. Kluwer Publishing, 1999.
- [44] P.-S. Tsai et M. Shah. Shape from Shading Using Linear Approximation. *Image and Vision Computing*, 12(8):487–498, octobre 1994.
- [45] A. P. Pentland. Linear Shape From Shading. *International Journal of Computer Vision*, 4(2):153–162, mars 1990.