

Environnement actif pour la reconstruction tridimensionnelle de surfaces métalliques spéculaires par imagerie polarimétrique

Olivier Morel

Thèse dirigée par Patrick Gorria et encadrée par Christophe Stolz

Laboratoire Le2i - UMR CNRS 5158

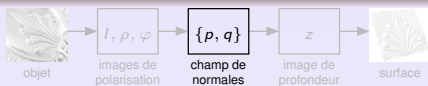


1 Problématique





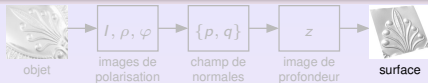
- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique



- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales



- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales
- 4 Des normales à la surface



- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales
- 4 Des normales à la surface
- 5 Application et résultats



- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales
- 4 Des normales à la surface
- 5 Application et résultats
- 6 Conclusion



- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales
- 4 Des normales à la surface
- 5 Application et résultats
- 6 Conclusion



M.C. Escher, *Hand with Reflecting Sphere*, Lithographie, 1935.

L'inspection de surfaces métalliques spéculaires reste une tâche délicate en vision artificielle.



M.C. Escher, *Hand with Reflecting Sphere*, Lithographie, 1935.

L'inspection de surfaces métalliques spéculaires reste une tâche délicate en vision artificielle.

Contraintes

- Inspection active
- Contrôle total de l'éclairage de la scène

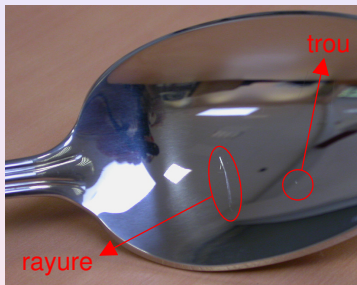
Différents types de défauts

- Défauts d'aspect



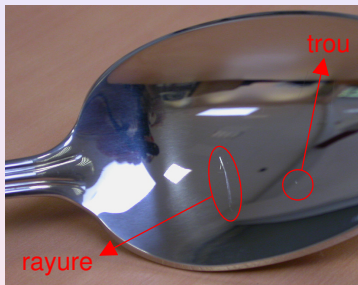
Différents types de défauts

- Défauts d'aspect



Différents types de défauts

- Défauts d'aspect

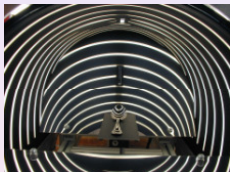


- Défauts de forme



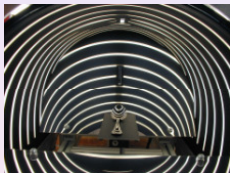
Eclairage dynamique à franges [Seulin, 2002]

- Système d'acquisition :



Eclairage dynamique à franges [Seulin, 2002]

- Système d'acquisition :

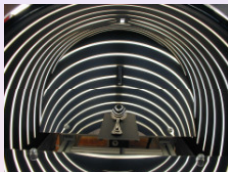


- Image d'aspect :



Eclairage dynamique à franges [Seulin, 2002]

- Système d'acquisition :



- Image d'aspect :



Eclairage dynamique à franges [Seulin, 2002]

Avantage

Efficace pour les défauts d'aspect sur des surfaces lisses.

Inconvénient

Méthode inadaptée pour détecter les défauts au niveau des décors.

Avantage

Efficace pour les défauts d'aspect sur des surfaces lisses.

Inconvénient

Méthode inadaptée pour détecter les défauts au niveau des décors.

- Inspection des décors \Rightarrow information 3D



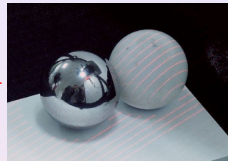
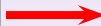
Limites des systèmes d'acquisition 3D

- Systèmes de triangulation :



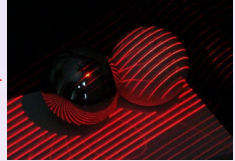
Limites des systèmes d'acquisition 3D

- Systèmes de triangulation :



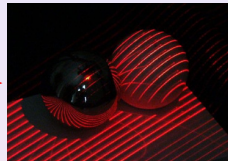
Limites des systèmes d'acquisition 3D

- Systèmes de triangulation :

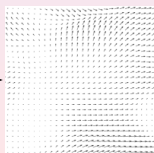
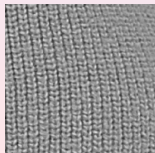


Limites des systèmes d'acquisition 3D

- Systèmes de triangulation :

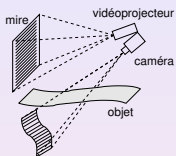


- Reconstruction à partir des ombres, de la texture, ...
(Shape from Shading, Texture, ...)



Extraction d'informations 3D de surfaces spéculaires

- Projection de motifs :



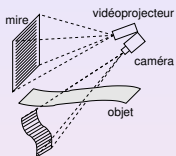
déflexométrie [Surrel, 2004]



étude des déformations
[Savarese & Perona, 2002]

Extraction d'informations 3D de surfaces spéculaires

- Projection de motifs :

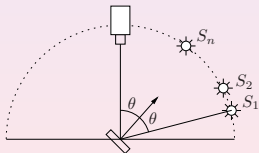


défectométrie [Surrel, 2004]

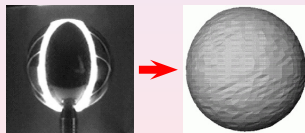


étude des déformations
[Savarese & Perona, 2002]

- Systèmes actifs :

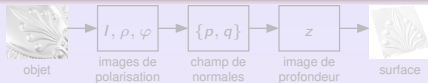


système SHINY
[Sanderson et al., 1988]



éclairages annulaires
[Zheng & Murata, 2000]

Extraction d'informations 3D de surfaces spéculaires



- Reconstruction par imagerie polarimétrique (Shape from Polarization)

Extraction d'informations 3D de surfaces spéculaires

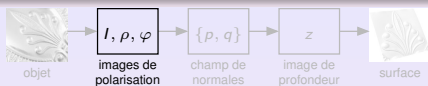


- Reconstruction par imagerie polarimétrique (Shape from Polarization)

Principe

- étude de l'état de polarisation de la lumière réfléchi
- calcul des normales en tout point de la surface de l'objet
- intégration du champ de normales pour obtenir la surface

Extraction d'informations 3D de surfaces spéculaires

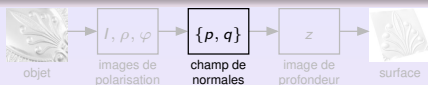


- Reconstruction par imagerie polarimétrique (Shape from Polarization)

Principe

- étude de l'état de polarisation de la lumière réfléchie
- calcul des normales en tout point de la surface de l'objet
- intégration du champ de normales pour obtenir la surface

Extraction d'informations 3D de surfaces spéculaires



- Reconstruction par imagerie polarimétrique (Shape from Polarization)

Principe

- étude de l'état de polarisation de la lumière réfléchie
- **calcul des normales en tout point de la surface de l'objet**
- intégration du champ de normales pour obtenir la surface

Extraction d'informations 3D de surfaces spéculaires



- Reconstruction par imagerie polarimétrique (Shape from Polarization)

Principe

- étude de l'état de polarisation de la lumière réfléchie
- calcul des normales en tout point de la surface de l'objet
- **intégration du champ de normales pour obtenir la surface**



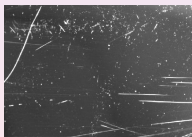
- 1 Problématique
- 2 **Imagerie polarimétrique**
 - Mesure des paramètres de polarisation
 - Montage avec retardateur à cristaux liquides
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales
- 4 Des normales à la surface
- 5 Application et résultats
- 6 Conclusion

- Description de la lumière en vision artificielle :
 - Intensité lumineuse
 - Teinte (longueur d'onde)
 - Etat de polarisation

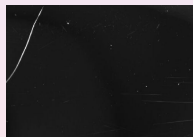
- Description de la lumière en vision artificielle :
 - Intensité lumineuse
 - Teinte (longueur d'onde)
 - **Etat de polarisation**

- Applications :
 - Suppression des réflexions spéculaires

- Description de la lumière en vision artificielle :
 - Intensité lumineuse
 - Teinte (longueur d'onde)
 - Etat de polarisation
- Applications :
 - Suppression des réflexions spéculaires
 - Discrimination entre les poussières et les rayures

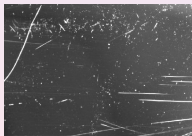


polariseur parallèle

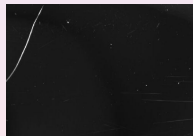


polariseur croisé

- Description de la lumière en vision artificielle :
 - Intensité lumineuse
 - Teinte (longueur d'onde)
 - Etat de polarisation
- Applications :
 - Suppression des réflexions spéculaires
 - Discrimination entre les poussières et les rayures



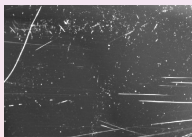
polariseur parallèle



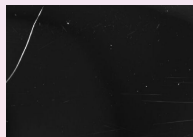
polariseur croisé

- Distinction entre les objets diélectriques et les objets métalliques [Wolff, 1990]

- Description de la lumière en vision artificielle :
 - Intensité lumineuse
 - Teinte (longueur d'onde)
 - Etat de polarisation
- Applications :
 - Suppression des réflexions spéculaires
 - Discrimination entre les poussières et les rayures



polariseur parallèle



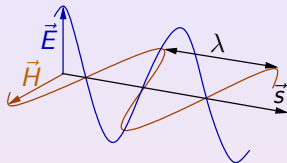
polariseur croisé

- Distinction entre les objets diélectriques et les objets métalliques [Wolff, 1990]
- Reconstruction de surfaces réfléchissantes

Définition de la polarisation

- Modèle des ondes électromagnétiques planes :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i\omega(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{s}}{v})}$$



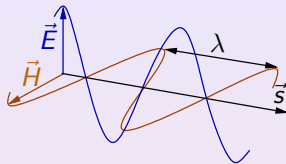
Définition de la polarisation

- Modèle des ondes électromagnétiques planes :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i\omega(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{s}}{v})}$$

$$\begin{cases} E_x = a_1 \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y = a_2 \cos(\tau + \delta_2) \end{cases}$$

avec $\tau = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \vec{r} \cdot \vec{s}$



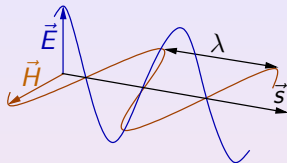
Définition de la polarisation

- Modèle des ondes électromagnétiques planes :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i\omega(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{s}}{v})}$$

$$\begin{cases} E_x = a_1 \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y = a_2 \cos(\tau + \delta_2) \end{cases}$$

avec $\tau = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \vec{r} \cdot \vec{s}$



phase de l'onde : $\delta = \delta_2 - \delta_1$

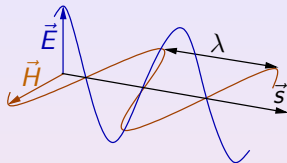
Définition de la polarisation

- Modèle des ondes électromagnétiques planes :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i\omega(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{s}}{v})}$$

$$\begin{cases} E_x = a_1 \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y = a_2 \cos(\tau + \delta_2) \end{cases}$$

avec $\tau = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \vec{r} \cdot \vec{s}$



phase de l'onde : $\delta = \delta_2 - \delta_1$

- Onde non polarisée : phase $\delta(t)$ aléatoire
- Onde polarisée : $\frac{d\delta}{dt} = 0$

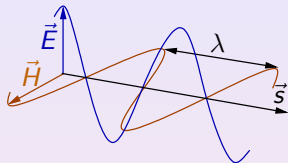
Définition de la polarisation

- Modèle des ondes électromagnétiques planes :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i\omega(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{s}}{v})}$$

$$\begin{cases} E_x = a_1 \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y = a_2 \cos(\tau + \delta_2) \end{cases}$$

avec $\tau = \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \vec{r} \cdot \vec{s}$



phase de l'onde : $\delta = \delta_2 - \delta_1$

- Onde non polarisée : phase $\delta(t)$ aléatoire
- Onde polarisée : $\frac{d\delta}{dt} = 0$
 - 1 polarisation linéaire
 $\delta = m\pi$ avec $m \in \mathbb{Z}$
 - 2 polarisation circulaire
 $\begin{cases} a_1 = a_2 \\ \delta = (2m + 1)\frac{\pi}{2} \end{cases}$ avec $m \in \mathbb{Z}$

Vecteur de Stokes : décrit tout état de polarisation

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1^2 + a_2^2 \\ a_1^2 - a_2^2 \\ 2a_1 a_2 \cos \delta \\ 2a_1 a_2 \sin \delta \end{pmatrix}$$

Vecteur de Stokes : décrit tout état de polarisation

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1^2 + a_2^2 \\ a_1^2 - a_2^2 \\ 2a_1 a_2 \cos \delta \\ 2a_1 a_2 \sin \delta \end{pmatrix}$$

- Intensité totale s_0 :

$$s_0^2 \geq s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$$

Vecteur de Stokes : décrit tout état de polarisation

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1^2 + a_2^2 \\ a_1^2 - a_2^2 \\ 2a_1 a_2 \cos \delta \\ 2a_1 a_2 \sin \delta \end{pmatrix}$$

- Intensité totale s_0 :

$$s_0^2 \geq s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$$

- Degré de polarisation :

$$\rho = \frac{I_{pol}}{I_{tot}} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}$$

Vecteur de Stokes : décrit tout état de polarisation

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1^2 + a_2^2 \\ a_1^2 - a_2^2 \\ 2a_1 a_2 \cos \delta \\ 2a_1 a_2 \sin \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{tot} \\ \rho I_{tot} \cos 2\varphi \\ \rho I_{tot} \sin 2\varphi \cos \delta \\ \rho I_{tot} \sin 2\varphi \sin \delta \end{pmatrix}$$

- Intensité totale s_0 :

$$s_0^2 \geq s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$$

- Degré de polarisation :

$$\rho = \frac{I_{pol}}{I_{tot}} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}$$

- Angle de polarisation :

$$\tan \varphi = \frac{a_2}{a_1}$$

Formalisme de Stokes-Mueller

Matrice de Mueller : décrit les effets de systèmes optiques linéaires (polariseurs, lames retardatrices, surfaces réfléchissantes)

$$\mathbf{s}_{out} = M\mathbf{s}_{in}$$

Formalisme de Stokes-Mueller

Matrice de Mueller : décrit les effets de systèmes optiques linéaires (polariseurs, lames retardatrices, surfaces réfléchissantes)

$$\mathbf{s}_{out} = M\mathbf{s}_{in}$$

Exemple : filtre polariseur orienté selon un angle α

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Polarimètre simple

Mesure des paramètres de polarisation d'une onde **partiellement linéairement polarisée**

$$\mathbf{s}_{in} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ \rho I \cos 2\varphi \\ \rho I \sin 2\varphi \cos \delta \\ \rho I \sin 2\varphi \sin \delta \end{pmatrix}$$

Polarimètre simple

Mesure des paramètres de polarisation d'une onde **partiellement linéairement polarisée**

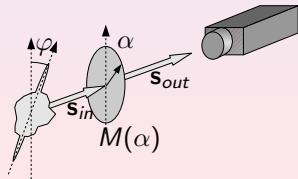
$$\mathbf{s}_{in} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ \rho I \cos 2\varphi \\ \rho I \sin 2\varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

Polarimètre simple

Mesure des paramètres de polarisation d'une onde **partiellement linéairement polarisée**

$$\mathbf{s}_{in} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ \rho I \cos 2\varphi \\ \rho I \sin 2\varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Pas besoin d'un ellipsomètre
- Polariseur tournant devant l'objectif de la caméra

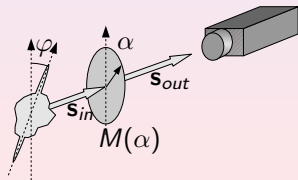


Polarimètre simple

Mesure des paramètres de polarisation d'une onde **partiellement linéairement polarisée**

$$\mathbf{s}_{in} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ \rho I \cos 2\varphi \\ \rho I \sin 2\varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Pas besoin d'un ellipsomètre
- Polariseur tournant devant l'objectif de la caméra



$$\mathbf{s}_{out} = M(\alpha) \cdot \mathbf{s}_{in}$$

⇒ intensité mesurée :

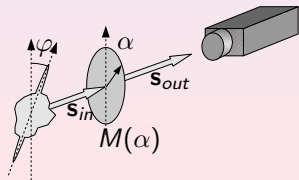
$$I_{out}(\alpha) = \frac{1}{2}(s_0 + s_1 \cos 2\alpha + s_2 \sin 2\alpha)$$

Polarimètre simple

Mesure des paramètres de polarisation d'une onde **partiellement linéairement polarisée**

$$\mathbf{s}_{in} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ \rho I \cos 2\varphi \\ \rho I \sin 2\varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Pas besoin d'un ellipsomètre
- Polariseur tournant devant l'objectif de la caméra



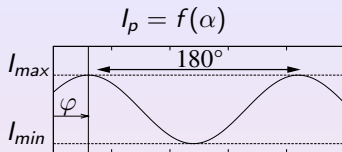
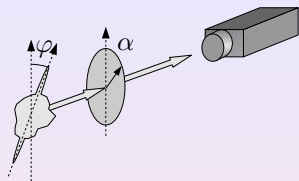
$$\mathbf{s}_{out} = M(\alpha) \cdot \mathbf{s}_{in}$$

⇒ intensité mesurée :

$$I_{out}(\alpha) = \frac{1}{2}(s_0 + s_1 \cos 2\alpha + s_2 \sin 2\alpha)$$

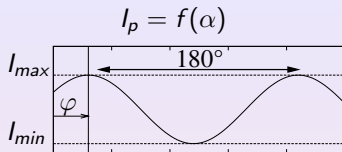
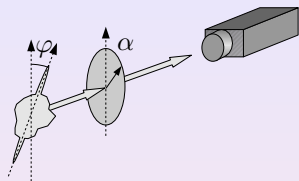
$$I_{out}(\alpha) = \frac{I}{2}(1 + \rho \cdot \cos(2\alpha - 2\varphi))$$

Polarimètre simple



$$I_{out} = \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \cos(2\alpha - 2\varphi) + \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

Polarimètre simple



$$I_{out} = \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \cos(2\alpha - 2\varphi) + \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

Identification des paramètres de polarisation

- Intensité lumineuse : $I = I_{max} + I_{min}$
- Angle de polarisation : φ
- Degré de polarisation : $\rho = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$

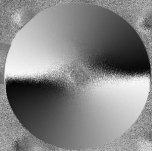
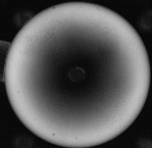
Méthodes de calcul des paramètres

- Hémisphère éclairée avec un dôme d'éclairage diffus et non polarisé.

Angle de polarisation φ			
Degré de polarisation ρ			

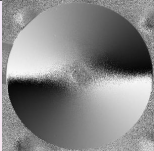
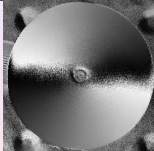
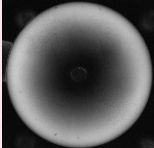
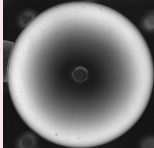
Méthodes de calcul des paramètres

- Hémisphère éclairée avec un dôme d'éclairage diffus et non polarisé.

	Wolff		
Angle de polarisation φ			
Degré de polarisation ρ			

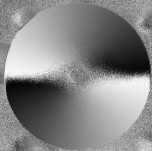
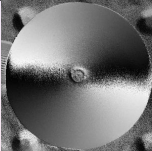
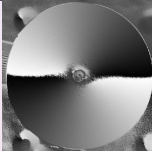
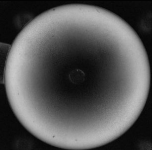
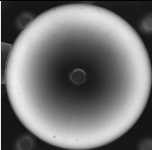
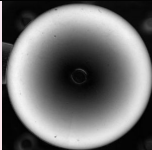
Méthodes de calcul des paramètres

- Hémisphère éclairée avec un dôme d'éclairage diffus et non polarisé.

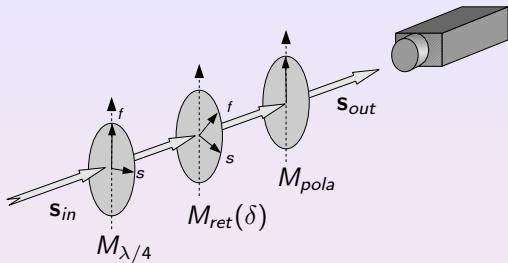
	Wolff	Saito	
Angle de polarisation φ			
Degré de polarisation ρ			

Méthodes de calcul des paramètres

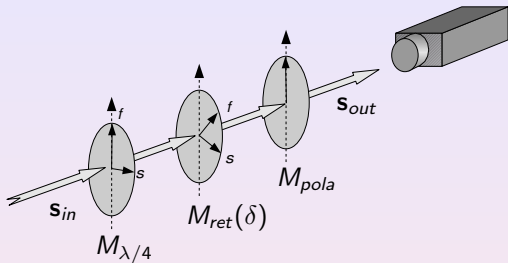
- Hémisphère éclairée avec un dôme d'éclairage diffus et non polarisé.

	Wolff	Saito	LMS
Angle de polarisation φ			
Degré de polarisation ρ			

Montage avec retardateur à cristaux liquides

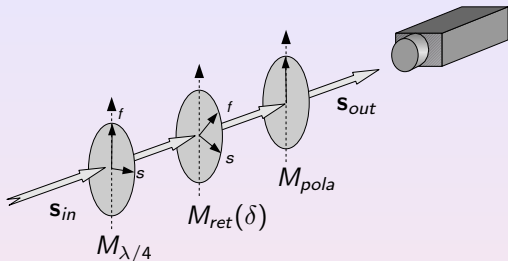


Montage avec retardateur à cristaux liquides



$$\mathbf{s}_{out} = M_{pola} \cdot M_{ret}(\delta) \cdot M_{\lambda/4} \cdot \mathbf{s}_{in}$$

Montage avec retardateur à cristaux liquides

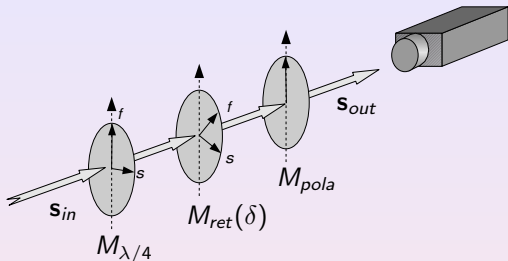


$$\mathbf{s}_{out} = M_{pola} \cdot M_{ret}(\delta) \cdot M_{\lambda/4} \cdot \mathbf{s}_{in}$$

⇒ intensité mesurée :

$$I_{out}(\delta) = \frac{1}{2}(s_0 + s_1 \cos \delta + s_2 \sin \delta) = \frac{1}{2}(1 + \rho \cdot \cos(\delta - 2\varphi))$$

Montage avec retardateur à cristaux liquides

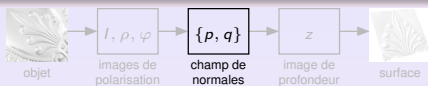


$$\mathbf{s}_{out} = M_{pola} \cdot M_{ret}(\delta) \cdot M_{\lambda/4} \cdot \mathbf{s}_{in}$$

⇒ intensité mesurée :

$$I_{out}(\delta) = \frac{1}{2}(s_0 + s_1 \cos \delta + s_2 \sin \delta) = \frac{1}{2}(1 + \rho \cdot \cos(\delta - 2\varphi))$$

En posant $\delta = 2\alpha$, le montage est équivalent au montage classique.



- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales**
 - Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$
 - Angle de polarisation $\varphi \Rightarrow \phi$
 - Eclairage actif
- 4 Des normales à la surface
- 5 Application et résultats
- 6 Conclusion

Paramètres de polarisation



Informations sur les normales
à la surface

- **Koshikawa** : réflexion d'une onde polarisée circulairement pour obtenir l'orientation de surfaces planes [Koshikawa, 1979]

Paramètres de polarisation



Informations sur les normales
à la surface

- **Koshikawa** : réflexion d'une onde polarisée circulairement pour obtenir l'orientation de surfaces planes [Koshikawa, 1979]
- **Wolff** : réflexion d'une onde non polarisée [Wolff & Boult, 1991]

Principe physique

Après réflexion sur une surface, une onde non polarisée devient partiellement linéairement polarisée.

Paramètres de polarisation



Informations sur les normales
à la surface

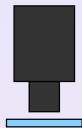
- **Koshikawa** : réflexion d'une onde polarisée circulairement pour obtenir l'orientation de surfaces planes [Koshikawa, 1979]
- **Wolff** : réflexion d'une onde non polarisée [Wolff & Boult, 1991]

Principe physique

Après réflexion sur une surface, une onde non polarisée devient partiellement linéairement polarisée.

- **Miyazaki, Rahmann** : reconstruction de surfaces diélectriques [Miyazaki et al., 2004, Rahmann, 2003]

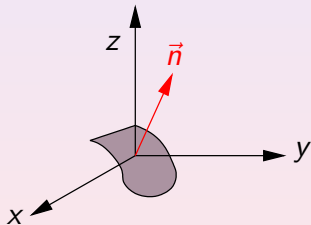
Principe (suite)



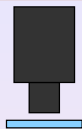
Conditions nécessaires

Éclairage non polarisé

Surface réfléchissante



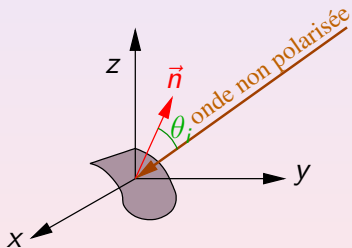
Principe (suite)



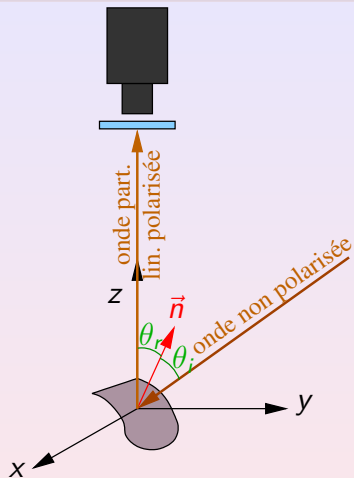
Conditions nécessaires

Éclairage non polarisé

Surface réfléchissante



Principe (suite)

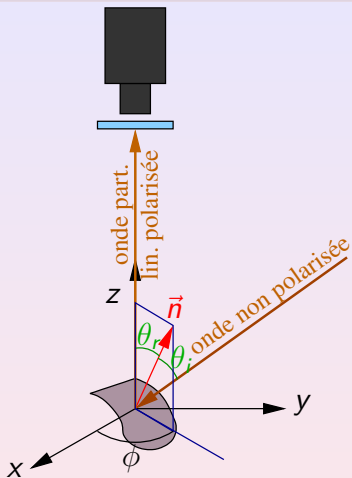


Conditions nécessaires

Éclairage non polarisé

Surface réfléchissante

Principe (suite)

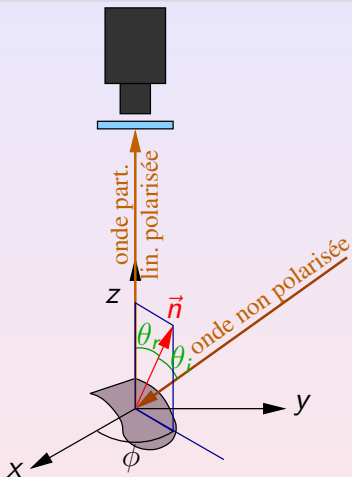


Conditions nécessaires

Éclairage non polarisé

Surface réfléchissante

Principe (suite)



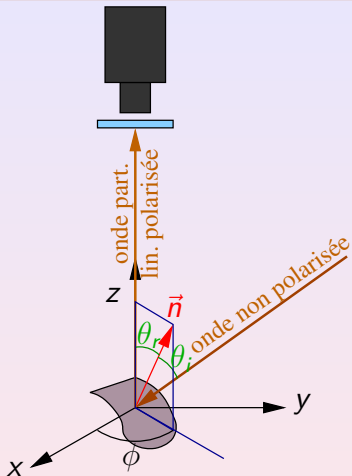
Conditions nécessaires

Éclairage non polarisé

Surface réfléchissante

$$\vec{n} = \begin{vmatrix} p = \tan \theta_r \cos \phi \\ q = \tan \theta_r \sin \phi \\ 1 \end{vmatrix} \Rightarrow (\phi, \theta_r)?$$

Principe (suite)



Conditions nécessaires

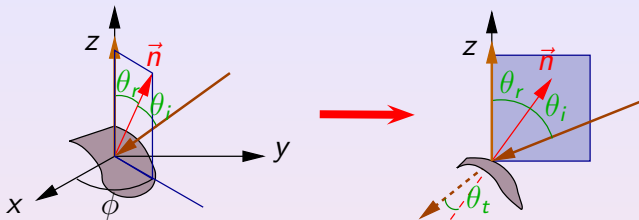
Éclairage non polarisé
Surface réfléchissante

$$\vec{n} = \begin{vmatrix} p = \tan \theta_r \cos \phi \\ q = \tan \theta_r \sin \phi \\ 1 \end{vmatrix} \Rightarrow (\phi, \theta_r)?$$

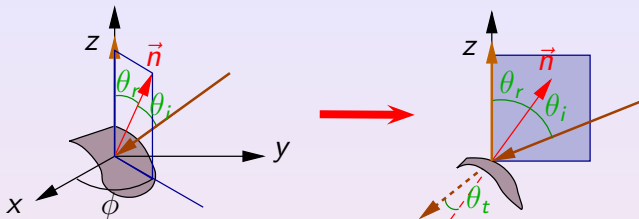
coefficients de Fresnel

- Angle de polarisation : $\varphi \Rightarrow \phi$
- Degré de polarisation : $\rho \Rightarrow \theta_r$

Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$



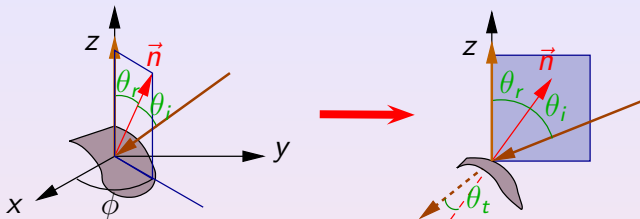
Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$



$$\begin{cases} F_{\perp} = \left| \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right|^2 \\ F_{\parallel} = \left| \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \right|^2 \end{cases}$$

Coefficients de Fresnel

Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$



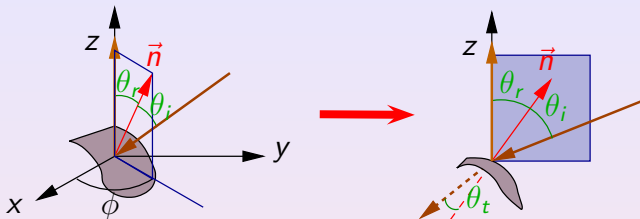
$$\begin{cases} F_{\perp} = \left| \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right|^2 \\ F_{\parallel} = \left| \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \right|^2 \end{cases} \quad \begin{cases} \theta_r = \theta_i = \theta \\ \sin \theta_i = \hat{n} \sin \theta_t \end{cases}$$

Coefficients de Fresnel

Snell-Descartes

$\hat{n} = n(1 + i\kappa)$: indice de réfraction complexe relatif

Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$



$$\begin{cases} F_{\perp} = \left| \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right|^2 \\ F_{\parallel} = \left| \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \right|^2 \end{cases}$$

Coefficients de Fresnel

$$\begin{cases} \theta_r = \theta_i = \theta \\ \sin \theta_i = \hat{n} \sin \theta_t \end{cases}$$

Snell-Descartes

$$\Rightarrow \begin{cases} F_{\perp}(\theta, \hat{n}) \\ F_{\parallel}(\theta, \hat{n}) \end{cases}$$

$\hat{n} = n(1 + i\kappa)$: indice de réfraction complexe relatif

Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$

- $\begin{cases} F_{\perp}(\theta, \hat{n}) \\ F_{\parallel}(\theta, \hat{n}) \end{cases}$
- Expression du degré de polarisation en fonction de θ :

$$\rho = \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{F_{\perp} + F_{\parallel}} = \rho(\theta, \hat{n})$$

Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$

- $\begin{cases} F_{\perp}(\theta, \hat{n}) \\ F_{\parallel}(\theta, \hat{n}) \end{cases}$
- Expression du degré de polarisation en fonction de θ :

$$\rho = \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{F_{\perp} + F_{\parallel}} = \rho(\theta, \hat{n})$$

- Approximation [Born & Wolf, 1999] :

$$|\hat{n}|^2 = n^2(1 + \kappa^2) \gg 1$$

Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$

- $\begin{cases} F_{\perp}(\theta, \hat{n}) \\ F_{\parallel}(\theta, \hat{n}) \end{cases}$
- Expression du degré de polarisation en fonction de θ :

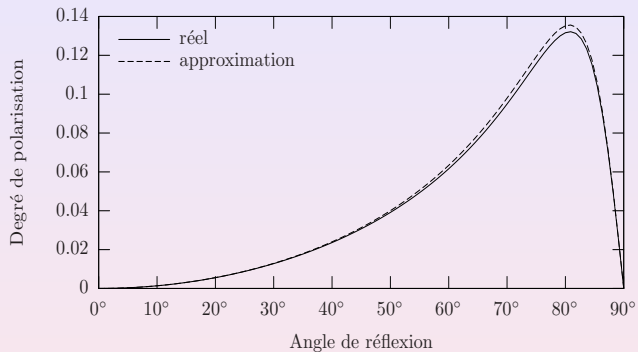
$$\rho = \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{F_{\perp} + F_{\parallel}} = \rho(\theta, \hat{n})$$

- Approximation [Born & Wolf, 1999] :

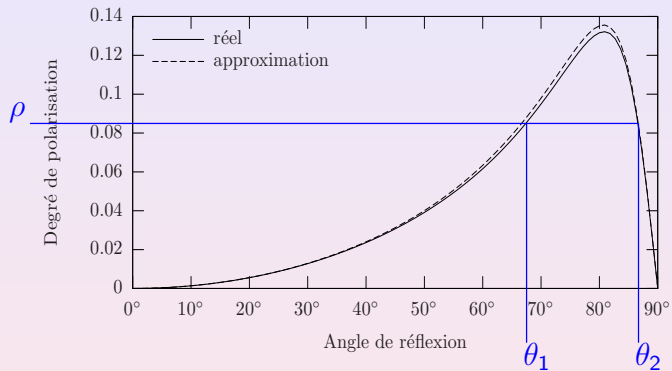
$$|\hat{n}|^2 = n^2(1 + \kappa^2) \gg 1$$

$$\rho(\theta) = \frac{2n \tan \theta \sin \theta}{\tan^2 \theta \sin^2 \theta + |\hat{n}|^2}$$

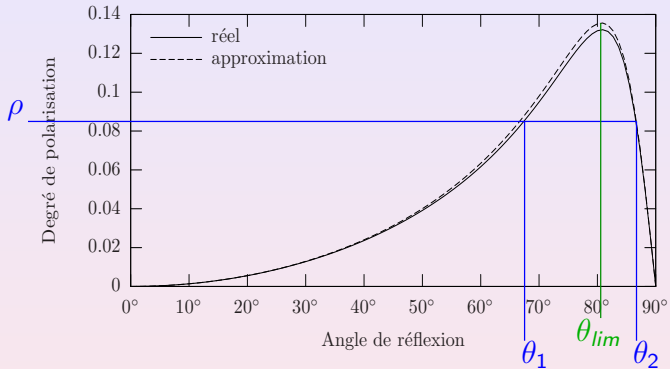
Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$



Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$

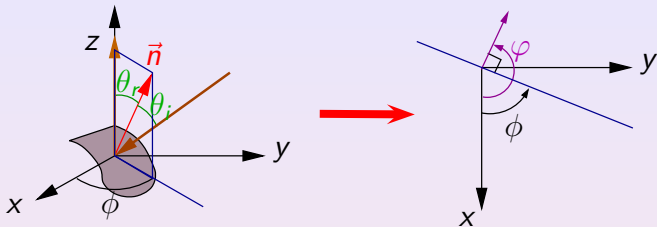


Degré de polarisation $\rho \Rightarrow \theta_r$



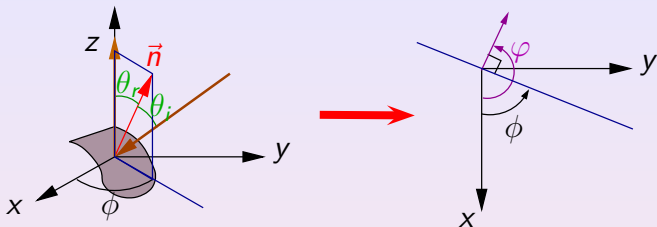
- θ_{lim} : angle d'incidence principal
- $\theta_{lim} \simeq 80^\circ$

Angle de polarisation $\varphi \Rightarrow \phi$



- La lumière réfléchiée est partiellement linéairement polarisée, **orthogonalement** au plan d'incidence

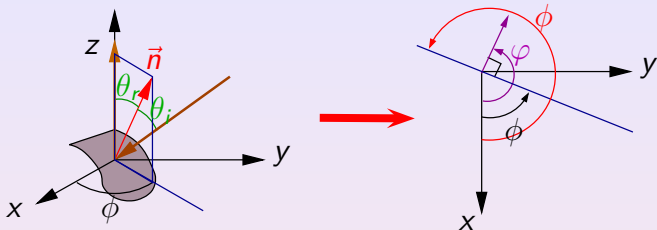
Angle de polarisation $\varphi \Rightarrow \phi$



- La lumière réfléchiée est partiellement linéairement polarisée, **orthogonalement** au plan d'incidence

$$\phi = \varphi \pm \frac{\pi}{2}$$

Angle de polarisation $\varphi \Rightarrow \phi$



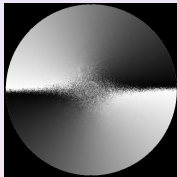
- La lumière réfléchiée est partiellement linéairement polarisée, **orthogonalement** au plan d'incidence

$$\phi = \varphi \pm \frac{\pi}{2}$$

\Rightarrow Ambiguïté sur le calcul de ϕ

Eclairage actif

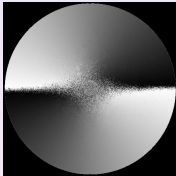
- Cas d'une sphère éclairée par une source lumineuse non polarisée



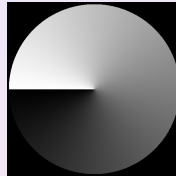
Angle de polarisation φ défini [π]

Eclairage actif

- Cas d'une sphère éclairée par une source lumineuse non polarisée



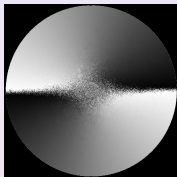
Angle de polarisation φ défini [π]



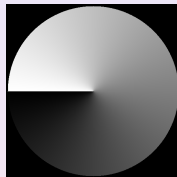
Angle azimutal théorique ϕ défini [2π]

Eclairage actif

- Cas d'une sphère éclairée par une source lumineuse non polarisée



?



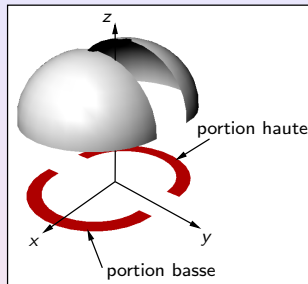
Angle de polarisation φ défini $[\pi]$

Angle azimutal théorique ϕ défini $[2\pi]$

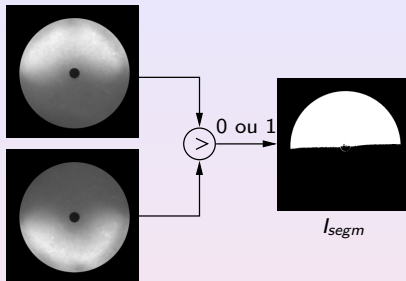
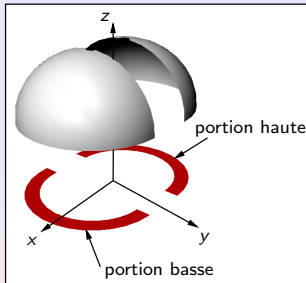
But de l'éclairage actif

Segmenter les points de la surface dont la normale est orientée dans les demi-espaces haut et bas

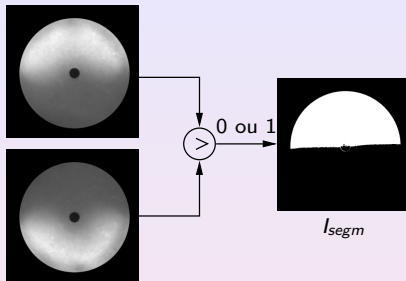
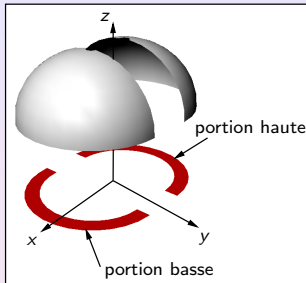
Eclairage actif - segmentation par demi-espaces



Eclairage actif - segmentation par demi-espaces



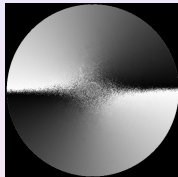
Eclairage actif - segmentation par demi-espaces



$$\begin{aligned}\phi &= \varphi \pm \pi/2 \\ &\Updownarrow \\ \phi &= (\varphi - \pi/2) + \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}\end{aligned}$$

Eclairage actif - segmentation par demi-espaces

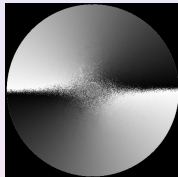
① $\phi = \varphi - \pi/2$



ϕ défini $[\pi]$

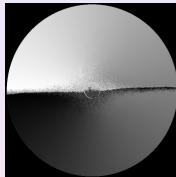
Eclairage actif - segmentation par demi-espaces

① $\phi = \varphi - \pi/2$

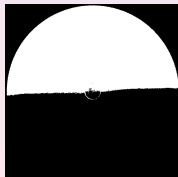


ϕ défini $[\pi]$

② si $I_{segm} = 1$, $\phi = \phi + \pi$



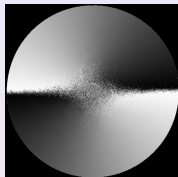
ϕ défini $[2\pi]$



I_{segm}

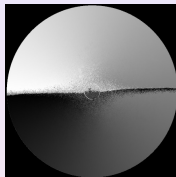
Eclairage actif - segmentation par demi-espaces

① $\phi = \varphi - \pi/2$

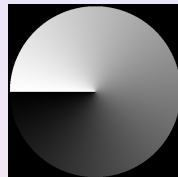
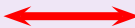


ϕ défini $[\pi]$

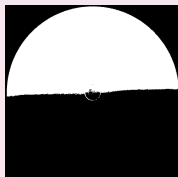
② si $I_{segm} = 1$, $\phi = \phi + \pi$



ϕ défini $[2\pi]$



ϕ théorique

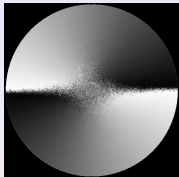


I_{segm}

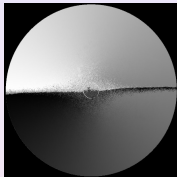
Eclairage actif - segmentation par demi-espaces

1 $\phi = \varphi - \pi/2$

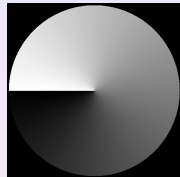
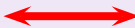
2 si $I_{segm} = 1$, $\phi = \phi + \pi$



ϕ défini $[\pi]$



ϕ défini $[2\pi]$

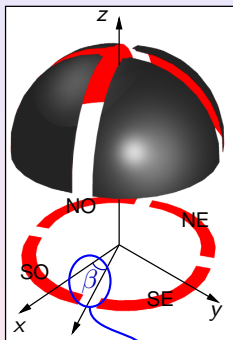


ϕ théorique

Inconvénients

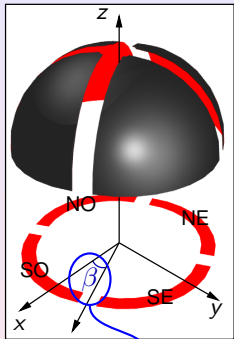
- bruit entre les demi-espaces
- requiert une orientation précise du dôme d'éclairage

Eclairage actif - segmentation par quadrants



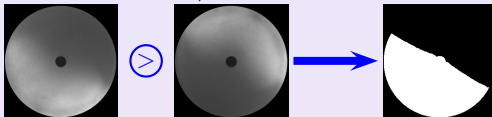
quelconque sur $]0, \pi/2[$

Eclairage actif - segmentation par quadrants

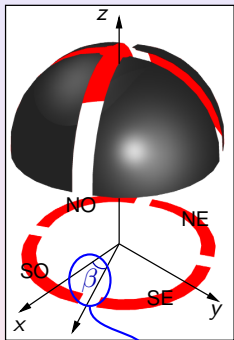


quelconque sur $]0, \pi/2[$

- Segmentation E/O :

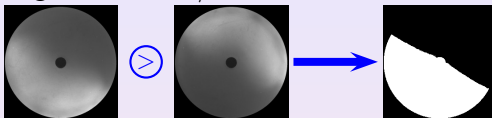


Eclairage actif - segmentation par quadrants

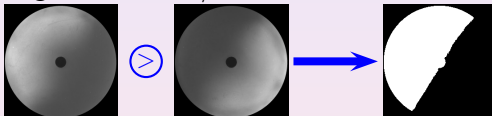


quelconque sur $]0, \pi/2[$

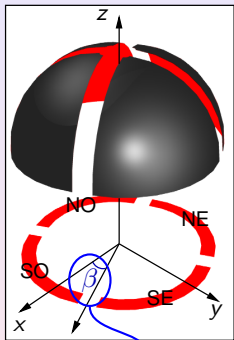
- Segmentation E/O :



- Segmentation N/S :

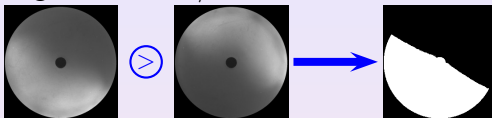


Eclairage actif - segmentation par quadrants



quelconque sur $]0, \pi/2[$

- Segmentation E/O :



- Segmentation N/S :

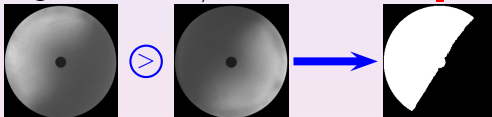
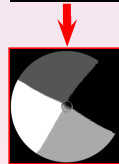
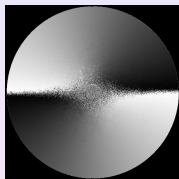


Image segmentée I_{quad} :



Eclairage actif - segmentation par quadrants

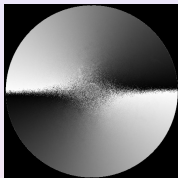
1 $\phi = \varphi - \pi/2$



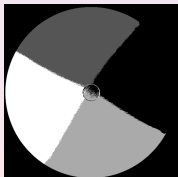
ϕ défini $[\pi]$

Eclairage actif - segmentation par quadrants

1 $\phi = \varphi - \pi/2$



ϕ défini [π]



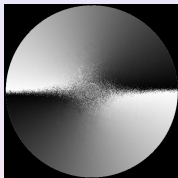
I_{quad}

2 $\phi = \phi + \pi$, si :

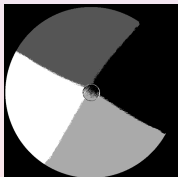
- $I_{quad} = 1$
- $(I_{quad} = 3) \wedge (\phi \geq 0)$
- $(I_{quad} = 0) \wedge (\phi \leq 0)$

Eclairage actif - segmentation par quadrants

1 $\phi = \varphi - \pi/2$



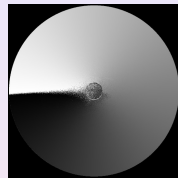
ϕ défini $[\pi]$



I_{quad}

2 $\phi = \phi + \pi$, si :

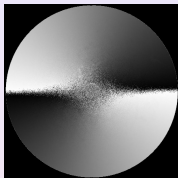
- $I_{quad} = 1$
- $(I_{quad} = 3) \wedge (\phi \geq 0)$
- $(I_{quad} = 0) \wedge (\phi \leq 0)$



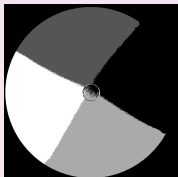
ϕ défini $[2\pi]$

Eclairage actif - segmentation par quadrants

1 $\phi = \varphi - \pi/2$



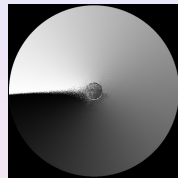
ϕ défini [π]



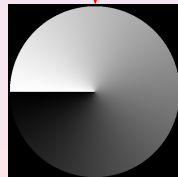
I_{quad}

2 $\phi = \phi + \pi$, si :

- $I_{quad} = 1$
- $(I_{quad} = 3) \wedge (\phi \geq 0)$
- $(I_{quad} = 0) \wedge (\phi \leq 0)$



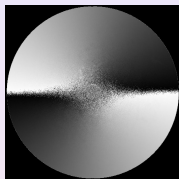
ϕ défini [2π]



ϕ théorique

Eclairage actif - segmentation par quadrants

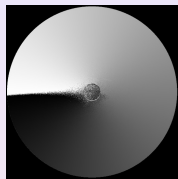
1 $\phi = \varphi - \pi/2$



ϕ défini $[\pi]$

2 $\phi = \phi + \pi$, si :

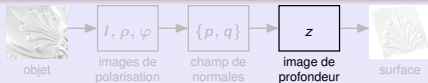
- $I_{quad} = 1$
- $(I_{quad} = 3) \wedge (\phi \geq 0)$
- $(I_{quad} = 0) \wedge (\phi \leq 0)$



ϕ défini $[2\pi]$

Avantages

- suppression du bruit entre les demi-espaces
- orientation quelconque du dôme d'éclairage



- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales
- 4 Des normales à la surface**
 - Méthodes locales
 - Méthodes reposant sur la relaxation
 - Méthodes globales
- 5 Application et résultats
- 6 Conclusion

Contraintes

- Surface lisse, décrite par une fonction continue f , de classe C^2
- La hauteur z en tout point s'écrit :

$$f : U \rightarrow \mathbb{R}$$

$$(x, y) \mapsto z = f(x, y)$$

Contraintes

- Surface lisse, décrite par une fonction continue f , de classe C^2
- La hauteur z en tout point s'écrit :

$$f : U \rightarrow \mathbb{R}$$

$$(x, y) \mapsto z = f(x, y)$$

Expression de la normale \vec{n} en tout point (x, y, z) de la surface :

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} p = \tan \theta \cos \phi \\ q = \tan \theta \sin \phi \\ 1 \end{pmatrix}$$

Contraintes

- Surface lisse, décrite par une fonction continue f , de classe C^2
- La hauteur z en tout point s'écrit :

$$f : U \rightarrow \mathbb{R}$$

$$(x, y) \mapsto z = f(x, y)$$

Expression de la normale \vec{n} en tout point (x, y, z) de la surface :

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} p = \tan \theta \cos \phi \\ q = \tan \theta \sin \phi \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ -\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Contraintes

- Surface lisse, décrite par une fonction continue f , de classe C^2
- La hauteur z en tout point s'écrit :

$$f : U \rightarrow \mathbb{R}$$

$$(x, y) \mapsto z = f(x, y)$$

Expression de la normale \vec{n} en tout point (x, y, z) de la surface :

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} p = \tan \theta \cos \phi \\ q = \tan \theta \sin \phi \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ -\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \\ 1 \end{pmatrix}$$

⇒ Surface obtenue à une constante près

Principe

Intégration suivant différents chemins appartenant à la surface.

Principe

Intégration suivant différents chemins appartenant à la surface.

- Méthode des rectangles :

$$z_{i,j} = \frac{z_{i-1,j} + z_{i,j-1}}{2} - \epsilon \frac{p_{i-1,j} + q_{i,j-1}}{2}$$

- Méthodes des trapèzes :

$$z_{i,j} = \frac{z_{i-1,j} + z_{i,j-1}}{2} - \epsilon \frac{p_{i,j} + p_{i-1,j} + q_{i,j} + q_{i,j-1}}{4}$$

Principe

Intégration suivant différents chemins appartenant à la surface.

- Méthode des rectangles :

$$z_{i,j} = \frac{z_{i-1,j} + z_{i,j-1}}{2} - \epsilon \frac{p_{i-1,j} + q_{i,j-1}}{2}$$

- Méthodes des trapèzes :

$$z_{i,j} = \frac{z_{i-1,j} + z_{i,j-1}}{2} - \epsilon \frac{p_{i,j} + p_{i-1,j} + q_{i,j} + q_{i,j-1}}{4}$$

pas de l'échantillonnage

Principe

Intégration suivant différents chemins appartenant à la surface.

- Méthode des rectangles :

$$z_{i,j} = \frac{z_{i-1,j} + z_{i,j-1}}{2} - \epsilon \frac{p_{i-1,j} + q_{i,j-1}}{2}$$

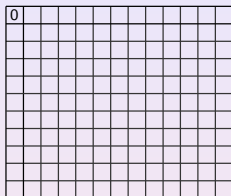
- Méthodes des trapèzes :

$$z_{i,j} = \frac{z_{i-1,j} + z_{i,j-1}}{2} - \epsilon \frac{p_{i,j} + p_{i-1,j} + q_{i,j} + q_{i,j-1}}{4}$$

Initialisation du pixel $z_{0,0}$

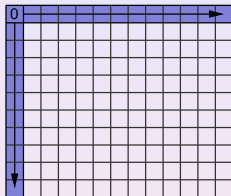
Méthodes locales - différentes techniques

Ben Slimane



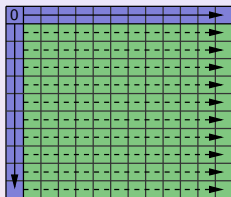
Méthodes locales - différentes techniques

Ben Slimane



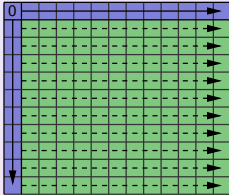
Méthodes locales - différentes techniques

Ben Slimane

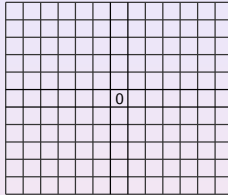


Méthodes locales - différentes techniques

Ben Slimane

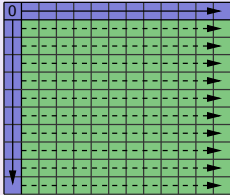


Coleman-Jain

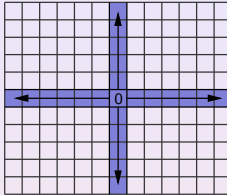


Méthodes locales - différentes techniques

Ben Slimane

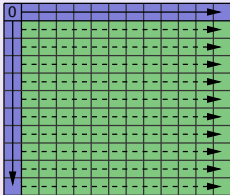


Coleman-Jain

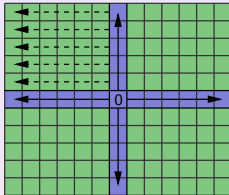


Méthodes locales - différentes techniques

Ben Slimane

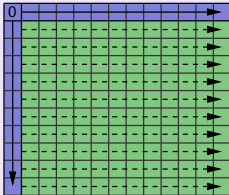


Coleman-Jain

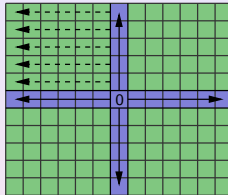


Méthodes locales - différentes techniques

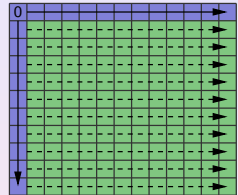
Ben Slimane



Coleman-Jain

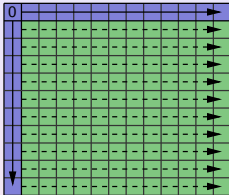


Rodehorst

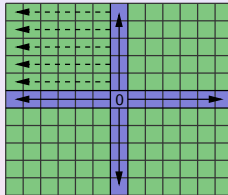


Méthodes locales - différentes techniques

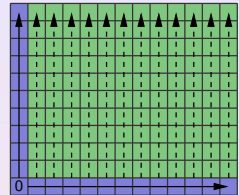
Ben Slimane



Coleman-Jain

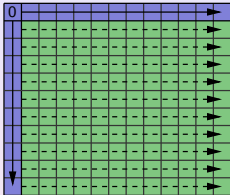


Rodehorst

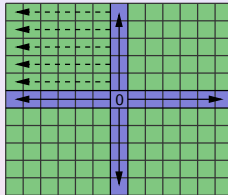


Méthodes locales - différentes techniques

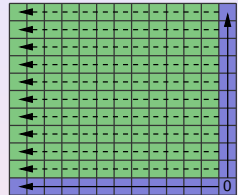
Ben Slimane



Coleman-Jain

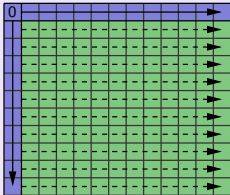


Rodehorst

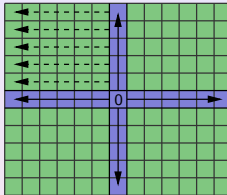


Méthodes locales - différentes techniques

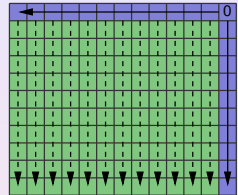
Ben Slimane



Coleman-Jain

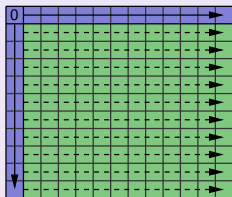


Rodehorst

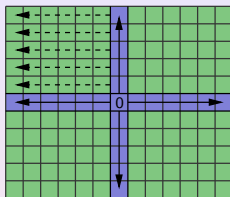


Méthodes locales - différentes techniques

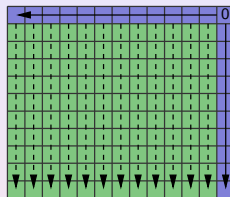
Ben Slimane



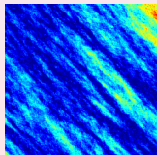
Coleman-Jain



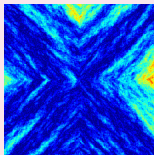
Rodehorst



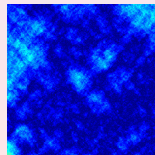
Erreur de reconstruction d'un champ de gradient bruité issu d'une surface d'équation $z = 0$:



$EQM = 0.0477$



$EQM = 0.0444$



$EQM = 0.0273$



Principe

Intégration de la surface par minimisation de fonctionnelle :

$$W = \int \int \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right) - p \right)^2 + \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right) - q \right)^2 dx dy$$

Principe

Intégration de la surface par minimisation de fonctionnelle :

$$W = \int \int \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right) - p \right)^2 + \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right) - q \right)^2 dx dy$$

- Développées par les techniques de "Shape from Shading"
[Ikeuchi, 1983, Horn & Brooks, 1986]

Principe

Intégration de la surface par minimisation de fonctionnelle :

$$W = \int \int \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right) - p \right)^2 + \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right) - q \right)^2 dx dy$$

- Développées par les techniques de "Shape from Shading"
[Ikeuchi, 1983, Horn & Brooks, 1986]
- Schéma itératif de la forme :

$$f(x, y)^{n+1} = \bar{f}(x, y)^n - \rho \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} \right)$$

Principe

Intégration de la surface par minimisation de fonctionnelle :

$$W = \int \int \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right) - p \right)^2 + \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right) - q \right)^2 dx dy$$

- Développées par les techniques de "Shape from Shading"
[Ikeuchi, 1983, Horn & Brooks, 1986]
- Schéma itératif de la forme :

$$f(x, y)^{n+1} = \bar{f}(x, y)^n - \rho \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} \right)$$

moyenne locale de la surface

constante

- Jacobi

$$z_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{4} \left(z_{i-1,j}^n + z_{i+1,j}^n + z_{i,j-1}^n + z_{i,j+1}^n \right) - \frac{\epsilon}{4} (p_{i+1,j} - p_{i,j} + q_{i,j+1} - q_{i,j})$$

- Jacobi

$$z_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{4} \left(z_{i-1,j}^n + z_{i+1,j}^n + z_{i,j-1}^n + z_{i,j+1}^n \right)$$

moyenne locale de la surface

$$- \frac{\epsilon}{4} (p_{i+1,j} - p_{i,j} + q_{i,j+1} - q_{i,j})$$

constante

Différentes techniques

- Jacobi
- Gauss-Seidel

$$z_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{4} \left(z_{i-1,j}^{n+1} + z_{i+1,j}^n + z_{i,j-1}^{n+1} + z_{i,j+1}^n \right) - \frac{\epsilon}{4} (p_{i+1,j} - p_{i,j} + q_{i,j+1} - q_{i,j})$$

⇒ moyenne effectuée sur les données les plus récentes

Différentes techniques

- Jacobi
- Gauss-Seidel
- SOR

$$z_{i,j}^{n+1} = (1 - \omega)z_{i,j}^n + \frac{\omega}{4} \left(z_{i-1,j}^{n+1} + z_{i+1,j}^n + z_{i,j-1}^{n+1} + z_{i,j+1}^n \right) - \frac{\omega \epsilon}{4} (p_{i+1,j} - p_{i,j} + q_{i,j+1} - q_{i,j})$$

ajout d'un paramètre de "over relaxation" : $1 < \omega < 2$

Différentes techniques

- Jacobi
- Gauss-Seidel
- SOR
- Généralisation sur un plus grand voisinage

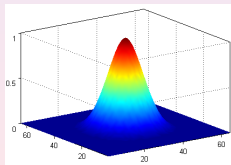
$$z_{i,j}^{n+1} = (1 - \omega)z_{i,j}^n + \frac{\omega}{S} H \ast z_{i,j}^n - \frac{\omega a \epsilon}{2S} (p_{i+1,j} - p_{i,j} + q_{i,j+1} - q_{i,j})$$

→ filtre moyeneur symétrique

Différentes techniques

- Jacobi
- Gauss-Seidel
- SOR
- Généralisation sur un plus grand voisinage

Exemple de reconstruction :



$EQM < 0.001$

méthode	voisinage	nb itérations	temps (s)
Jacobi	4	6475	11.64
	8	3374	3.67
Gauss-Seidel	4	890	1.01
	8	592	0.87
SOR	4	43	0.047
	8	42	0.045

- [Kovesi, 2003]

Principe

Corrélation entre les gradients d'un signal et les gradients de fonctions de bases \Leftrightarrow corrélation directe entre le signal et les fonctions de bases

- [Kovesi, 2003]

Principe

Corrélation entre les gradients d'un signal et les gradients de fonctions de bases \Leftrightarrow corrélation directe entre le signal et les fonctions de bases

- méthode robuste au bruit
- **reconstruction à un facteur d'échelle près**

- [Kovesi, 2003]

Principe

Corrélation entre les gradients d'un signal et les gradients de fonctions de bases \Leftrightarrow corrélation directe entre le signal et les fonctions de bases

- méthode robuste au bruit
- **reconstruction à un facteur d'échelle près**
- [Karaçali & Snyder, 2003]

Principe

Projection des gradients de la surface sur un espace des champs de gradients.

- [Kovesi, 2003]

Principe

Corrélation entre les gradients d'un signal et les gradients de fonctions de bases \Leftrightarrow corrélation directe entre le signal et les fonctions de bases

- méthode robuste au bruit
- **reconstruction à un facteur d'échelle près**
- [Karaçali & Snyder, 2003]

Principe

Projection des gradients de la surface sur un espace des champs de gradients.

- méthode lourde
- reconstruction par blocs

Principe

Minimisation de fonctionnelle :

$$W = \int \int \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right) - p \right)^2 + \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right) - q \right)^2 dx dy$$

Principe

Minimisation de fonctionnelle :

$$W = \int \int \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right) - p \right)^2 + \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right) - q \right)^2 dx dy$$

Transformée de Fourier [Frankot & Chellappa, 1988] :

$$\tilde{f}(u, v) = \frac{-ju\tilde{p}^* - jv\tilde{q}^*}{u^2 + v^2}$$

Principe

Minimisation de fonctionnelle :

$$W = \int \int \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \right) - p \right)^2 + \left(\left(-\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right) - q \right)^2 dx dy$$

Transformée de Fourier [Frankot & Chellappa, 1988] :

$$\tilde{f}(u, v) = \frac{-ju\tilde{p}^* - jv\tilde{q}^*}{u^2 + v^2}$$

- perte de l'information de la valeur moyenne des gradients :
 $\tilde{p}(0, 0) = \bar{p}$ et $\tilde{q}(0, 0) = \bar{q}$
- reconstruction des surfaces dont la pente moyenne est nulle

Méthodes globales - transformée de Fourier

$$\begin{cases} p(x, y) = p_0(x, y) + \bar{p} \\ q(x, y) = q_0(x, y) + \bar{q} \end{cases}$$

gradients d'un plan

gradients d'une surface à pente moyenne nulle

Méthodes globales - transformée de Fourier

$$\begin{cases} p(x, y) = p_0(x, y) + \bar{p} \\ q(x, y) = q_0(x, y) + \bar{q} \end{cases}$$

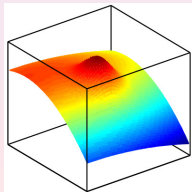
gradients d'un plan

gradients d'une surface à pente moyenne nulle

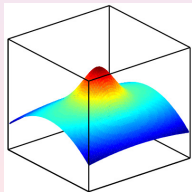
Linéarité de l'intégration :

$$\Rightarrow f(x, y) = f_0(x, y) + g(x, y)$$

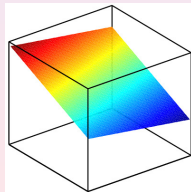
$$\text{où } g(x, y) = x\bar{p} + y\bar{q}$$



f



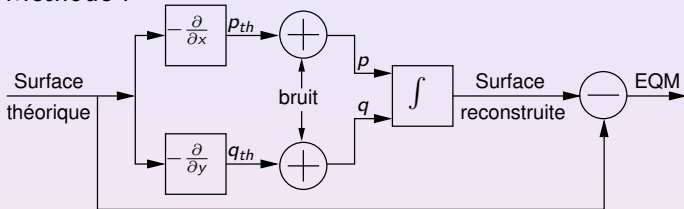
f_0



g

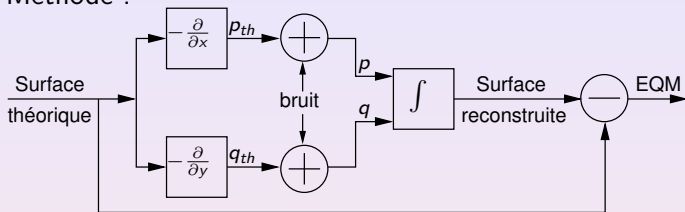
Comparaisons

- Méthode :

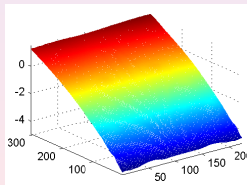
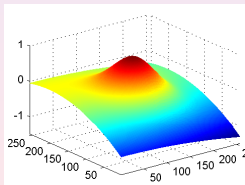
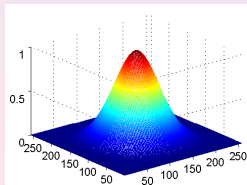


Comparaisons

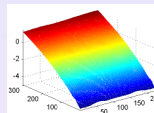
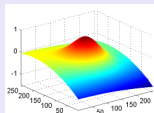
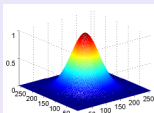
- Méthode :



- Surfaces :

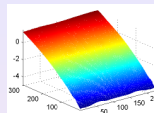
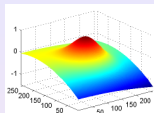
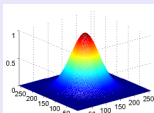


Comparaisons



	kpix/s	EQM	EQM	EQM
Coleman-Jain	410	0.1402	0.1016	0.0886
Rodehorst	82.1	0.0494	0.0535	0.1145
Gauss-Seidel 8V	0.1	0.0188	surface initiale requis	
SOR 8V	8.3	0.0162		
Frankot-Chellappa	145	0.0219	0.0193	0.0287
Karaçali-Snyder	20.8	0.0737	0.0909	0.1250

Comparaisons

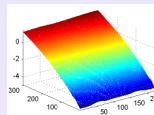
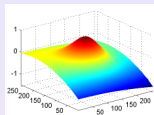
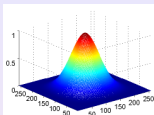


	kpix/s	EQM	EQM	EQM
Coleman-Jain	410	0.1402	0.1016	0.0886
Rodehorst	82.1	0.0494	0.0535	0.1145
Gauss-Seidel 8V	0.1	0.0188	surface initiale requis	
SOR 8V	8.3	0.0162		
Frankot-Chellappa	145	0.0219	0.0193	0.0287
Karaçali-Snyder	20.8	0.0737	0.0909	0.1250

- Méthodes locales

- rapides
- sensibles au bruit

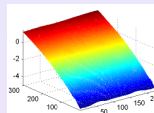
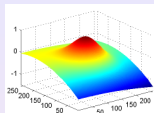
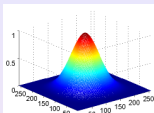
Comparaisons



	kpix/s	EQM	EQM	EQM
Coleman-Jain	410	0.1402	0.1016	0.0886
Rodehorst	82.1	0.0494	0.0535	0.1145
Gauss-Seidel 8V	0.1	0.0188	surface initiale requis	
SOR 8V	8.3	0.0162		
Frankot-Chellappa	145	0.0219	0.0193	0.0287
Karaçali-Snyder	20.8	0.0737	0.0909	0.1250

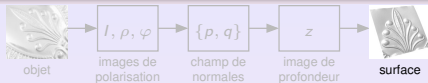
- Méthodes reposant sur la relaxation
 - très lentes
 - inadaptées aux surfaces à pente moyenne non-nulle

Comparaisons



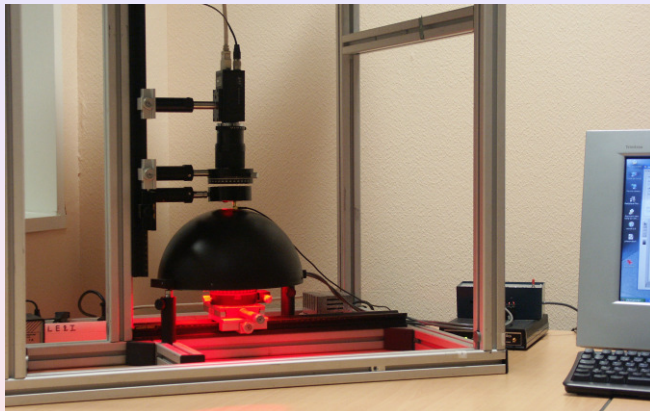
	kpix/s	EQM	EQM	EQM
Coleman-Jain	410	0.1402	0.1016	0.0886
Rodehorst	82.1	0.0494	0.0535	0.1145
Gauss-Seidel 8V	0.1	0.0188	surface initiale requis	
SOR 8V	8.3	0.0162		
Frankot-Chellappa	145	0.0219	0.0193	0.0287
Karaçali-Snyder	20.8	0.0737	0.0909	0.1250

- Méthode globale de Frankot-Chellappa
 - reconstruction rapide
 - robuste au bruit

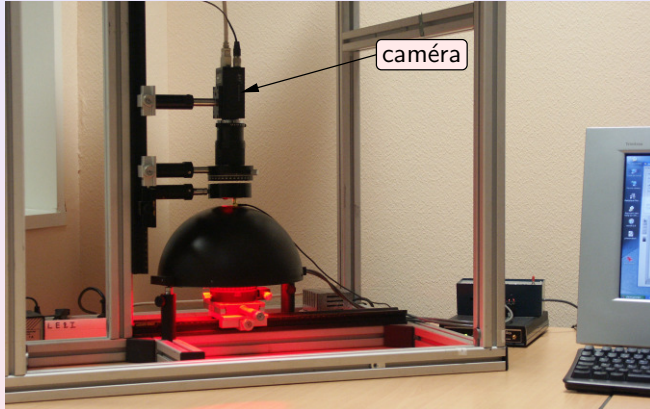


- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales
- 4 Des normales à la surface
- 5 **Application et résultats**
 - Prototypage de reconstruction
 - Evaluation des performances du système
 - Application à l'inspection de surfaces
- 6 Conclusion

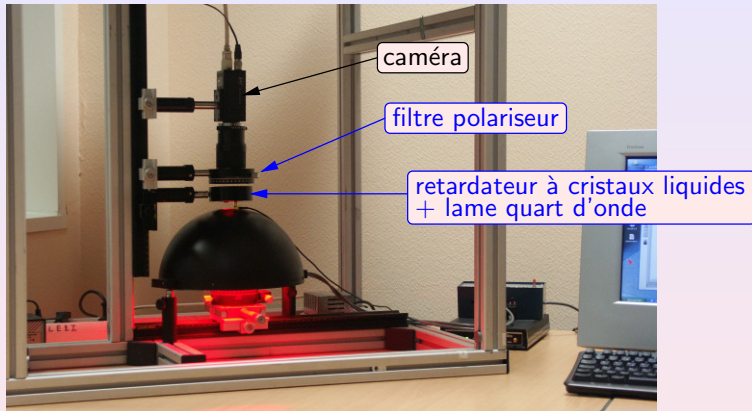
Prototype de reconstruction



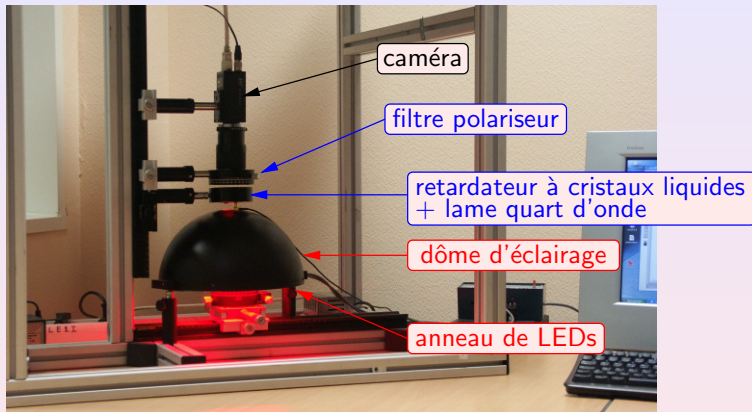
Prototype de reconstruction



Prototype de reconstruction



Prototype de reconstruction



Interface utilisateur

pol3D

Fichier Aide

Menu Acquisition Paramètres

Répertoire de travail
e:\Manips

milliseconds to wait
200

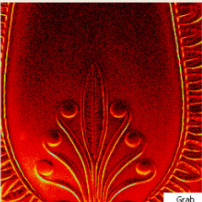

Indice Décalage (*)
2 +3,5 i -37

Dx-Dy Résolution maillage (%)
0,02 25

Etalonnage du LCD

0	-40	1,29	662
0	-30	1,35	441
	-20	1,41	441
	-10	1,48	441
	0	1,52	662
	10	1,59	662

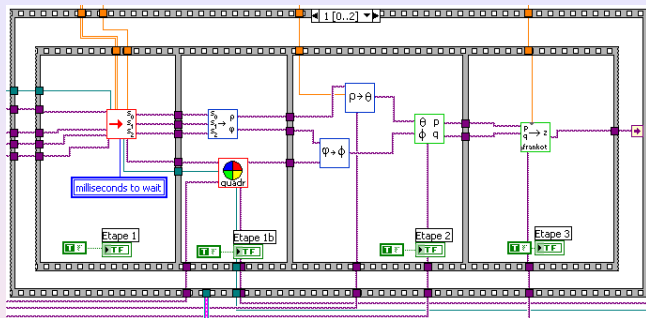
ouvrir nouveau sauvegarder



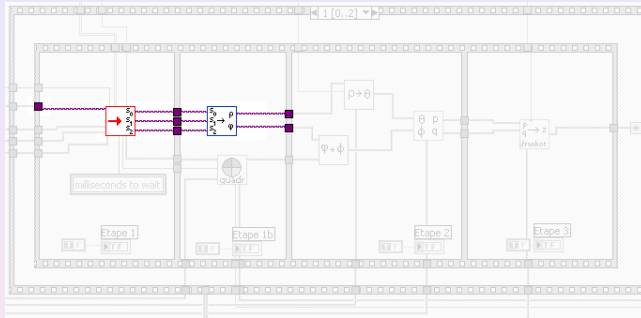
- Grab
- Seuil
- Intensité
- ✓ Degré de polarisation
- Angle de polarisation
- p
- q
- Image de profondeur

1024x1024 1/4 Float: image 0.04 (0,0)

Logiciel Labview



Logiciel Labview

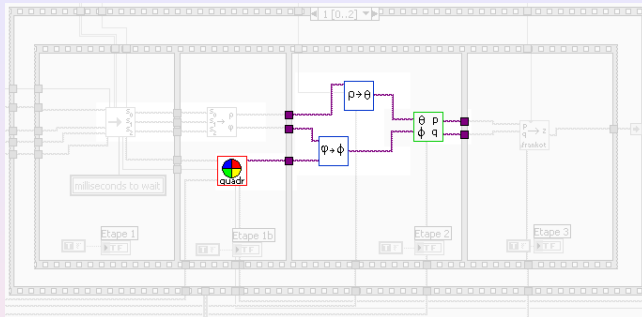


ρ

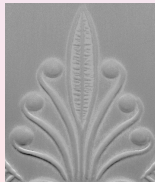


φ

- Durée :
 - 3.6s

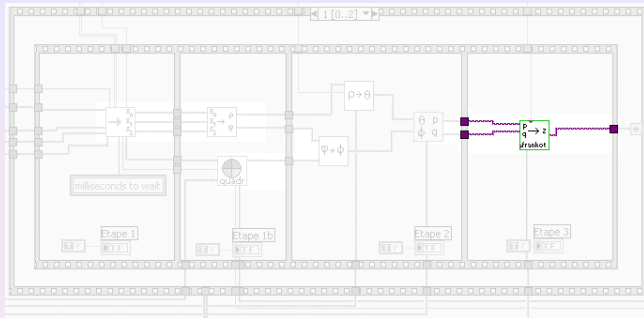


p



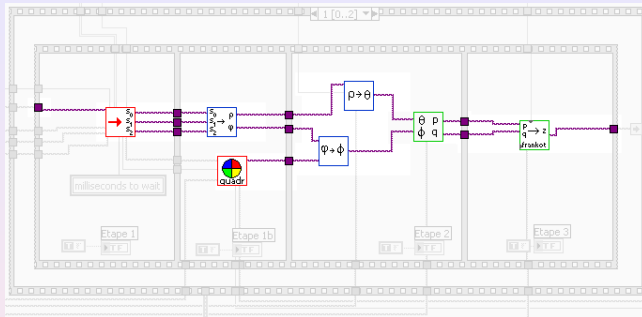
q

- Durée :
 - 3.6s
 - 2.4s + 0.5s



Z

- Durée :
 - 3.6s
 - 2.4s + 0.5s
 - 1.2s



Z

- Durée :
 - 3.6s
 - 2.4s + 0.5s
 - 1.2s
- ⇒ 7.7s

Courbe d'étalonnage

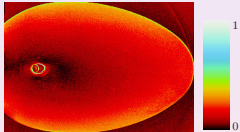
La relation entre le degré de polarisation ρ et l'angle zénithal θ dépend de l'indice de réfraction du matériau :

- indice de réfraction connu
- utilisation d'une courbe d'étalonnage

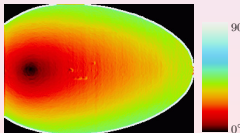
Courbe d'étalonnage

La relation entre le degré de polarisation ρ et l'angle zénithal θ dépend de l'indice de réfraction du matériau :

- indice de réfraction connu
- utilisation d'une courbe d'étalonnage



degré de polarisation ρ

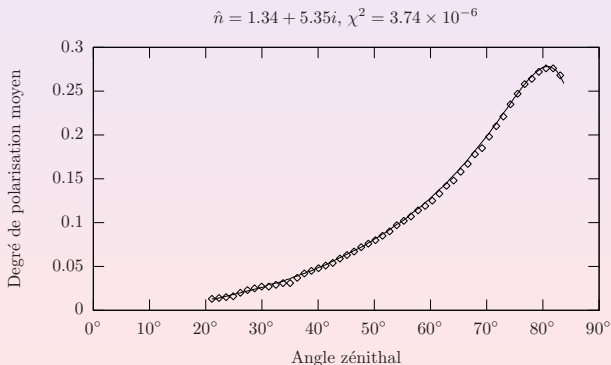
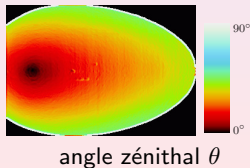
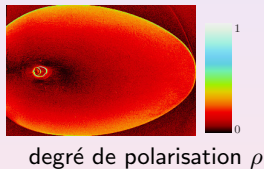


angle zénithal θ

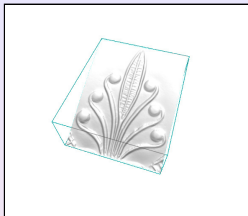
Courbe d'étalonnage

La relation entre le degré de polarisation ρ et l'angle zénithal θ dépend de l'indice de réfraction du matériau :

- indice de réfraction connu
- utilisation d'une courbe d'étalonnage

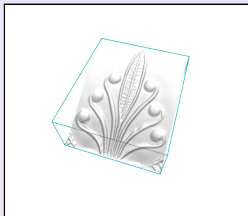


Comparaison qualitative

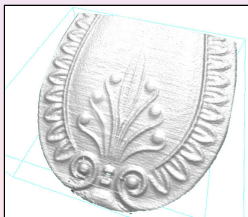


Système polarimétrique

Comparaison qualitative

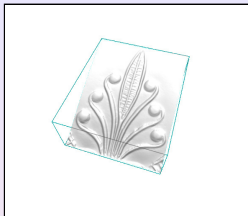


Système polarimétrique

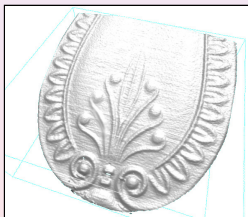


Scanner Replica

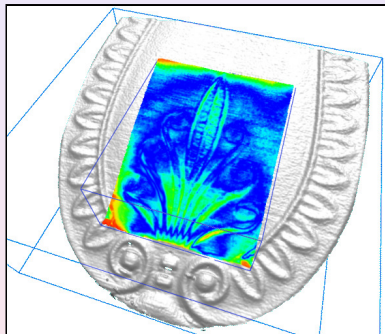
Comparaison qualitative



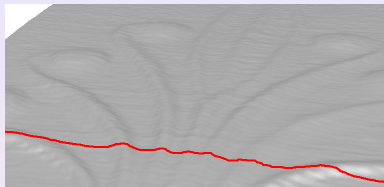
Système polarimétrique



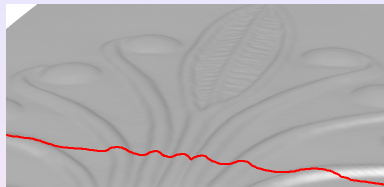
Scanner Replica



Comparaison qualitative - profil

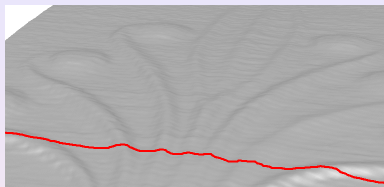


Scanner Replica

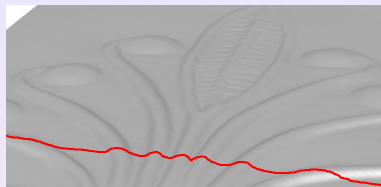


Système polarimétrique

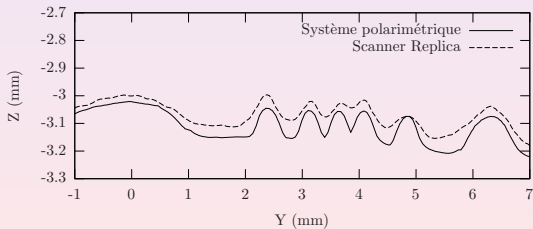
Comparaison qualitative - profil



Scanner Replica



Système polarimétrique



But

- évaluer la qualité d'acquisition du champ de normales
- comparer les résultats à ceux provenant d'autres systèmes

But

- évaluer la qualité d'acquisition du champ de normales
- comparer les résultats à ceux provenant d'autres systèmes

⇒ Utilisation de billes calibrées :



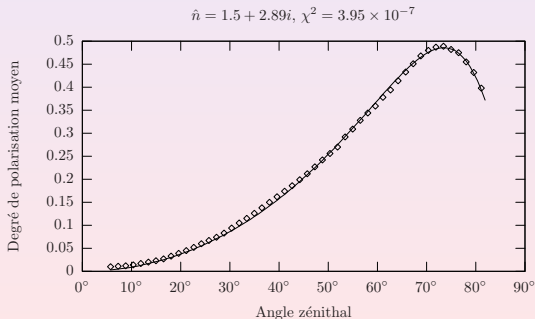
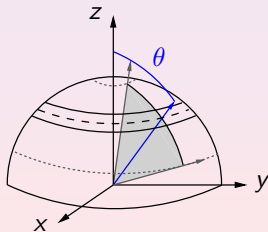
- la sphère présente l'ensemble de toutes les normales possibles d'une surface cartésienne
- caractéristiques géométriques simples

Evaluation quantitative

But

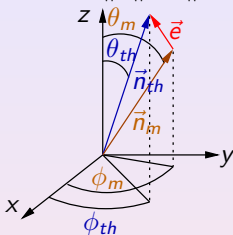
- évaluer la qualité d'acquisition du champ de normales
- comparer les résultats à ceux provenant d'autres systèmes

⇒ Utilisation de billes calibrées :



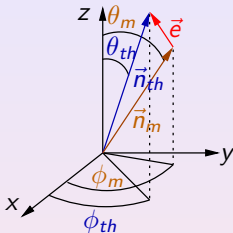
Comparaison du calcul des normales

- Erreur calculée : $\|\vec{e}\| = \|\vec{n}_{th} - \vec{n}_m\|$

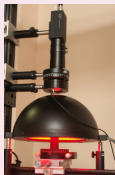


Comparaison du calcul des normales

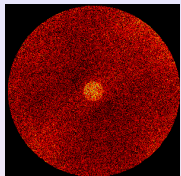
- Erreur calculée : $\|\vec{e}\| = \|\vec{n}_{th} - \vec{n}_m\|$



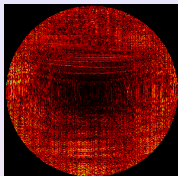
- Comparaison avec les scanners Replica et Minolta :



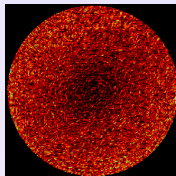
Images de la norme de l'erreur



Prototype



Replica

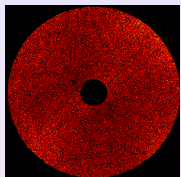


Minolta

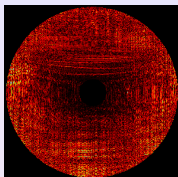


$\ \vec{e}\ $	0.0644	0.0614	0.0790
θ	0.0258	0.0398	0.0471
ϕ	0.3020	0.1713	0.3286

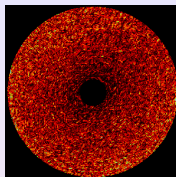
Images de la norme de l'erreur



Prototype



Replica



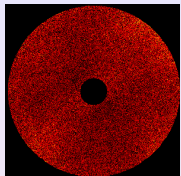
Minolta



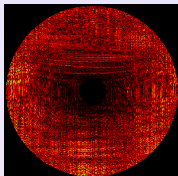
$\ \vec{e}\ $	0.0572	0.0620	0.0765
θ	0.0239	0.0401	0.0455
ϕ	0.2359	0.1388	0.2554

- Bons résultats concernant la norme de l'erreur

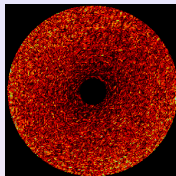
Images de la norme de l'erreur



Prototype



Replica



Minolta



$\ \vec{e}\ $	0.0572	0.0620	0.0765
θ	0.0239	0.0401	0.0455
ϕ	0.2359	0.1388	0.2554

- Bons résultats concernant la norme de l'erreur
- Erreur concernant l'angle ϕ élevée :
 - ϕ est défini modulo $[2\pi]$
 - l'incertitude concernant ϕ augmente lorsque $\theta \rightarrow 0$

Défauts de forme

- Objet de référence :



- Objet défectueux :



Défauts de forme

- Objet de référence :



- Objet défectueux :



Défauts de forme

- Objet de référence :



- Objet défectueux :



Défauts de forme

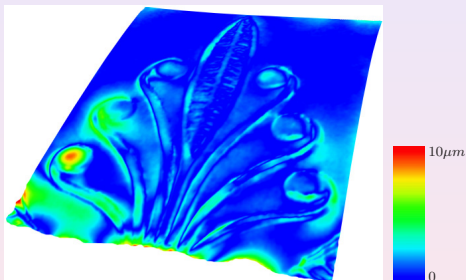
- Objet de référence :

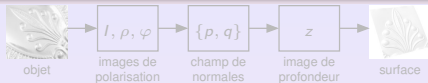


- Objet défectueux :

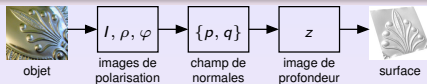


- Carte de déviation :

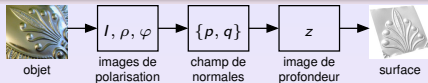




- 1 Problématique
- 2 Imagerie polarimétrique
- 3 Des paramètres de polarisation aux normales
- 4 Des normales à la surface
- 5 Application et résultats
- 6 Conclusion



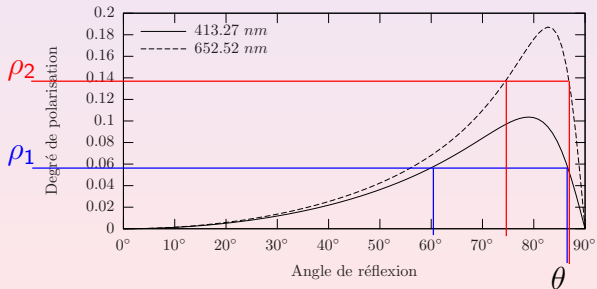
- Extension de la technique de reconstruction par imagerie polarimétrique aux **surfaces métalliques spéculaires**
- **Eclairage actif** pour lever l'ambiguïté concernant la détermination des normales à la surface
- **Prototype automatique** de reconstruction 3D par imagerie polarimétrique



- Extension de la technique de reconstruction par imagerie polarimétrique aux **surfaces métalliques spéculaires**
- **Eclairage actif** pour lever l'ambiguïté concernant la détermination des normales à la surface
- **Prototype automatique** de reconstruction 3D par imagerie polarimétrique
- Publications :
 - 1 revue internationale
 - 3 conférences internationales
 - 2 conférences nationales
 - 1 brevet déposé






- Mesure de l'état de polarisation suivant plusieurs longueurs d'ondes :

- Mesure de l'état de polarisation suivant plusieurs longueurs d'ondes :
 - Suppression de l'ambiguïté sur l'angle zénithal θ



- Mesure de l'état de polarisation suivant plusieurs longueurs d'ondes :
 - Suppression de l'ambiguïté sur l'angle zénithal θ
 - Reconstruction de surfaces avec de fortes pentes

- Mesure de l'état de polarisation suivant plusieurs longueurs d'ondes :
 - Suppression de l'ambiguïté sur l'angle zénithal θ
 - Reconstruction de surfaces avec de fortes pentes
- Etude de l'influence des inter-réflexions :
 - Mesure des 4 paramètres de Stokes
 - Segmentation du lieu des inter-réflexions

-  Born, M. & Wolf, E. (1999).
Principles Of Optics.
Cambridge, 7 edition.
-  Frankot, R. & Chellappa, R. (1988).
A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms.
IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 10(4), 439–451.
-  Horn, B. & Brooks, M. (1986).
The variational approach to shape from shading.
Computer Vision Graphics and Image Processing, 33(2), 174–208.
-  Ikeuchi, K. (1983).
Constructing a depth map from images.
In *MIT AI Memo*.
-  Karaçali, B. & Snyder, W. (2003).

Reconstructing discontinuous surfaces from a given gradient field using partial integrability.

Computer Vision and Image Understanding, 92(1), 78–111.



Koshikawa, K. (1979).

A polarimetric approach to shape understanding.

In *International Joint Conference on Artificial Intelligent* (pp. 493–495). Tokyo, Japan.



Kovesi, P. (2003).

Shapelets Correlated with Surface Normals Produce Surfaces.

Technical report, School of Computer Science & Software Engineering.



Miyazaki, D., Kagesawa, M., & Ikeuchi, K. (2004).

Transparent surface modeling from a pair of polarization images.

IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(1), 73–82.



Rahmann, S. (2003).

Reconstruction of quadrics from two polarization views.
In *Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (IbPRIA03)*, Springer, LNCS 2652, Mallorca, Spain (pp. 810–820).



Sanderson, A., Weiss, L., & Nayar, S. (1988).

Structured highlight inspection of specular surfaces.
IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 10(1), 44–55.



Savarese, S. & Perona, P. (2002).

Local analysis for 3d reconstruction of specular surfaces: part ii.
In *European Conference on Computer Vision* (pp. 759–774).
Copenhagen, Denmark.



Seulin, R. (2002).

Conception et optimisation par simulation d'un système de vision artificielle pour l'inspection de surfaces parfaitement spéculaires.

PhD thesis, Université de Bourgogne.



Surrel, Y. (2004).

Contrôle de défauts de forme par déflectométrie : diverses applications industrielles.

In Colloque Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie (CMOI) (pp. 271–275).



Wolff, L. B. (1990).

Polarization-based material classification from specular reflection.

IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12(11), 1059–1071.



Wolff, L. B. & Boulton, T. E. (1991).

Constraining object features using a polarization reflectance model.

IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13(7), 635–657.



Zheng, J. & Murata, A. (2000).

Acquiring a complete 3d model from specular motion under the illumination of circular-shaped light sources.

IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(8), 913–920.