

Habilitation à diriger des recherches

Quelques contributions à l'analyse et au traitement des images numériques

Frédéric SUR

LORIA UMR 7503

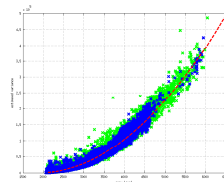
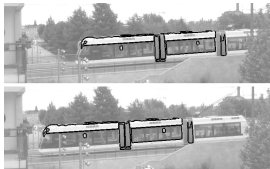
Projet Inria Magrit

16 novembre 2016

Domaines de recherche

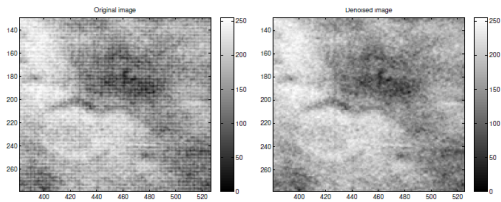
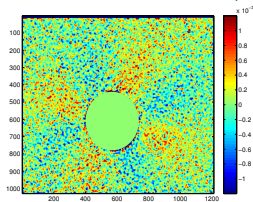
- **Analyse d'images / Vision par ordinateur**

→ *sémantique, reconnaissance, mesure*



- **Traitement d'images**

→ *transformations, filtrage, restauration*



① Calcul de la pose d'une caméra

→ appariement et grands changements de points de vue

② Bruit dans les images numériques

→ estimation des paramètres gouvernant le bruit des capteurs

→ bruit périodique

③ Estimation de champs de déplacement / déformation en mécanique des solides expérimentales

→ analyse mathématique

→ quantification des performances métrologiques

→ restauration

④ Quelques perspectives

① Calcul de la pose d'une caméra

→ appariement et grands changements de points de vue

② Bruit dans les images numériques

→ estimation des paramètres gouvernant le bruit des capteurs

→ bruit périodique

③ Estimation de champs de déplacement / déformation en mécanique des solides expérimentales

→ analyse mathématique

→ quantification des performances métrologiques

→ restauration

④ Quelques perspectives

Où est le crâne ?



Hans Holbein le Jeune, *Les Ambassadeurs*, 1533

Où est le crâne ?



Hans Holbein le Jeune, *Les Ambassadeurs*, 1533

Indice : le tableau était probablement exposé dans un escalier monumental. . .

Les Ambassadeurs et les problèmes d'appariement d'images



Approche historique de l'appariement : descripteurs locaux
« invariants » par similitude ou transformation affine.

- *patches* dans espace-échelle : SIFT [Lowe IJCV 04], Harris / Hessian affine [Mikolajczyk Schmid IJCV 04]. . .
- description de lignes de niveau : MSER [Matas et al. BMVC 02], LLD [Cao Lisani Morel Musé Sur LNM 08] . . .

Les Ambassadeurs et les problèmes d'appariement d'images

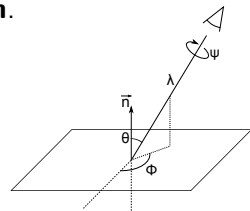


Autre approche : normalisation partielle + **simulation**.

FERNs [Ozuïsal Calonder Lepetit Fua *PAMI* 10]

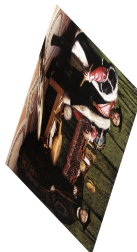
ASIFT [Morel Yu *SIAM JIS* 11] : caméra affine

$$\mathbf{A} = \underbrace{\lambda \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}}_{\text{normalisé (SIFT)}} \underbrace{\begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}}_{\text{simulé}}$$



$$t = 1 / \cos(\theta) \quad (\text{tilt})$$

Les Ambassadeurs et les problèmes d'appariement d'images



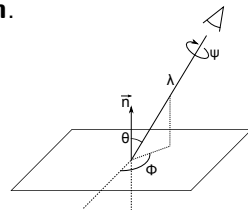
...

Autre approche : normalisation partielle + **simulation**.

FERNs [Ozuïsal Calonder Lepetit Fua *PAMI* 10]

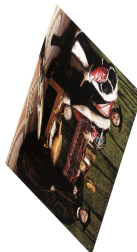
ASIFT [Morel Yu *SIAM JIS* 11] : caméra affine

$$\mathbf{A} = \underbrace{\lambda \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}}_{\text{normalisé (SIFT)}} \underbrace{\begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{simulé}} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$



$$t = 1 / \cos(\theta) \quad (\text{tilt})$$

Les Ambassadeurs et les problèmes d'appariement d'images



...



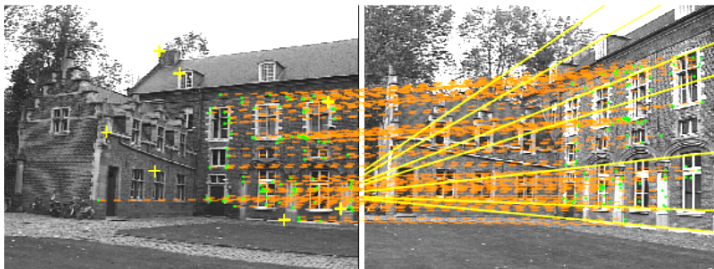
- + : appariement (de points d'intérêt) plus facile
- : complexité algorithmique

Appariement a-contrario et contribution à ASIFT



Source : [Pollefeys et al. *IJCV* 04]

Appariement a-contrario et contribution à ASIFT



Problème : (*appariement au plus proche voisin puis F-RANSAC*)

ASIFT : 94 correspondances

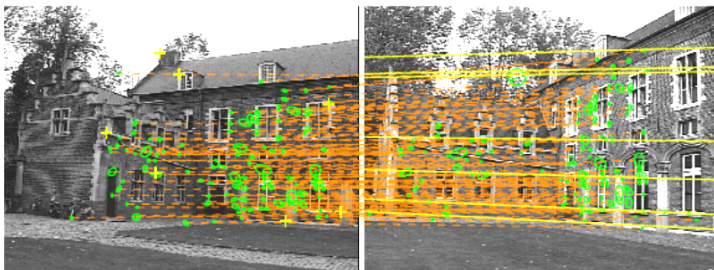
→ géométrie épipolaire mal estimée car fausses correspondances dues aux motifs répétés

SIFT : 0 correspondance

MSER : 5 correspondances

Harris/Hessian affine : 20-30 correspondances (*incorrectes*)

Appariement a-contrario et contribution à ASIFT



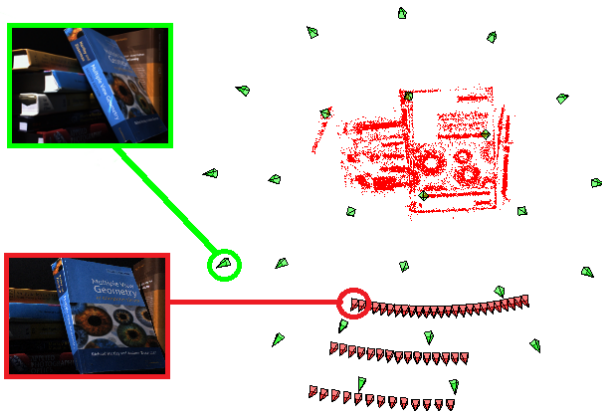
I-ASIFT : 118 correspondances (24% non p.p.v.)

Contributions :

- 1 appariement a-contrario permettant d'aller au delà du p.p.v.
[Sur Noury Berger *SIAM JIS* 13] [Moisan Stival *IJCV* 04]
- 2 Improved-ASIFT : contraintes homographiques entre groupes de correspondances coplanaires [Noury Sur Berger *ISVC* 10]

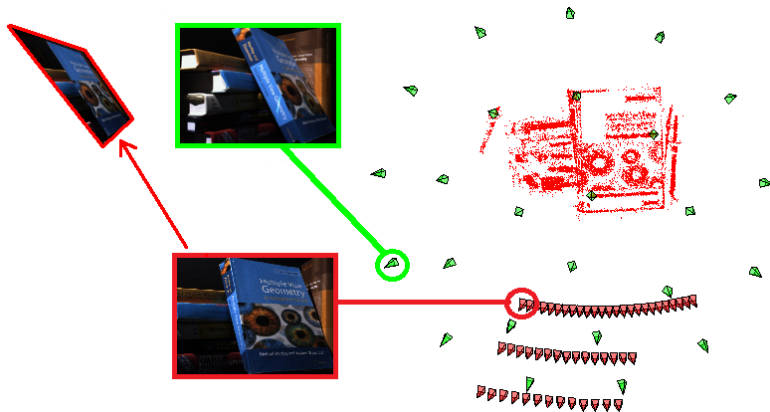
→ Thèse Nicolas Noury (sept. 2006 - oct. 2011)

Problème du calcul de pose



Problème : étant donné un modèle de scène obtenu par SFM, comment calculer la pose d'une caméra *éloignée des vues de construction* ?

Problème du calcul de pose



Motivation : initialisation d'une application de suivi

Exemple typique : *ground-to-aerial registration* [Shan et al. 3DV 14]

→ Thèse Pierre Rolin (oct. 2013 - début 2017)

Thèse Srikrishna Bhat (déc. 2008 - jan. 2013)

Contributions au calcul de pose (1)

- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.

→ comparaison modèle caméra affine / sténopé
(plans transformés par transformation affine / homographie)



[Rolin Berger Sur *ICRA 15*]

Contributions au calcul de pose (2)

- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

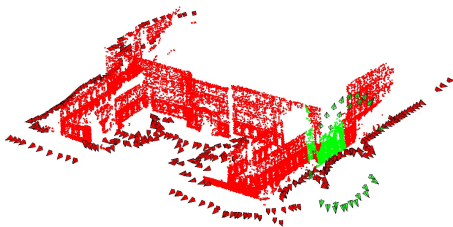
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

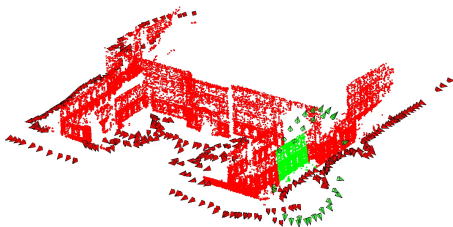
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

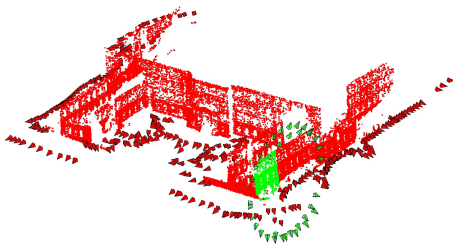
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

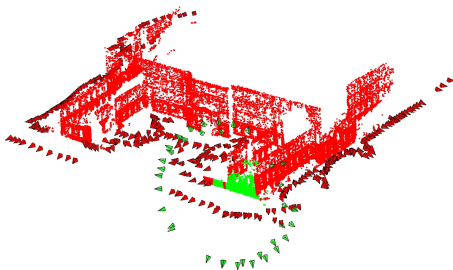
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

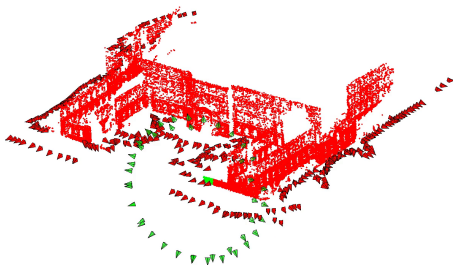
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

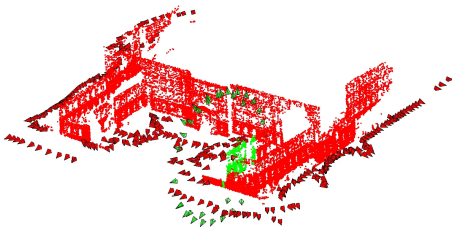
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

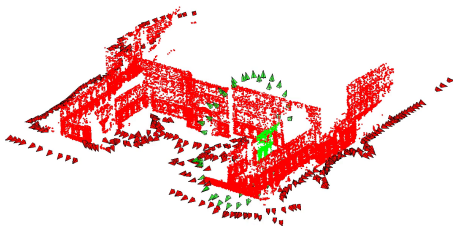
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

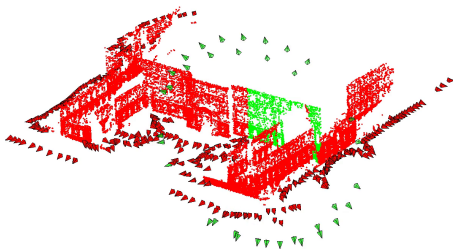
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

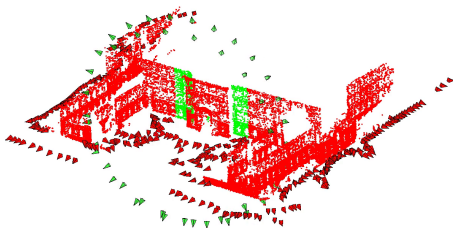
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

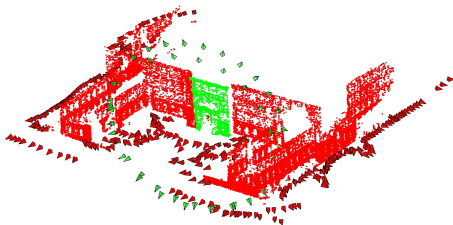
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

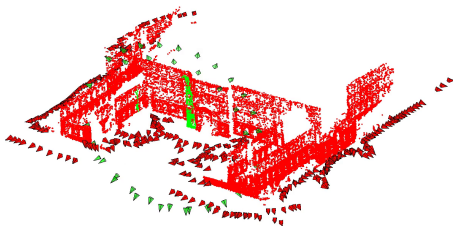
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

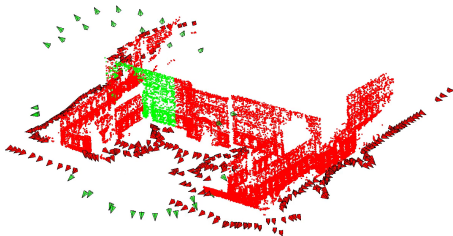
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

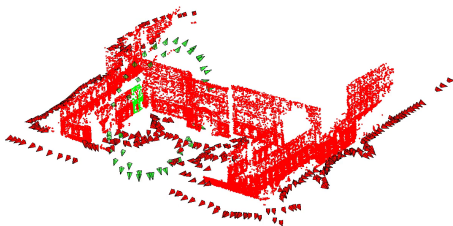
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

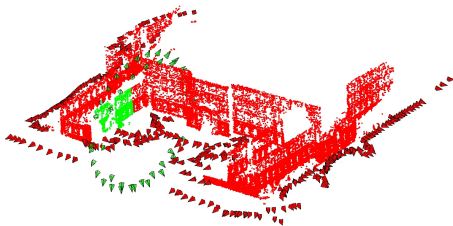
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

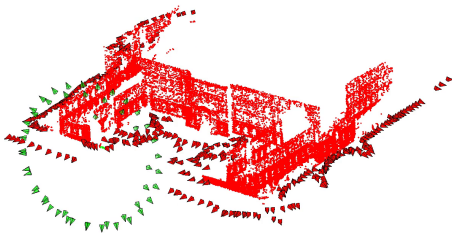
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

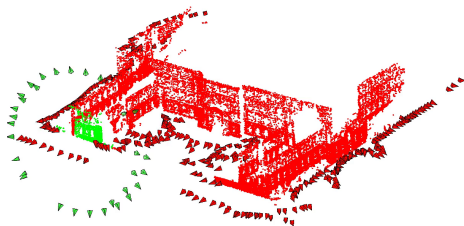
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

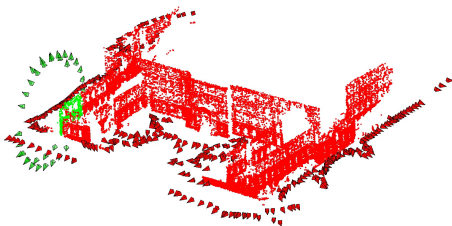
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

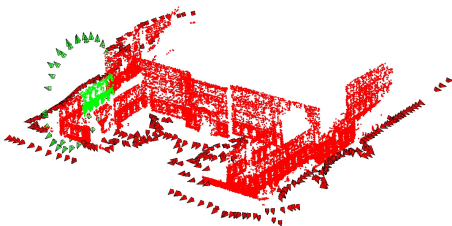
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

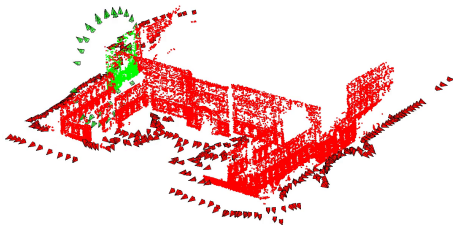
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

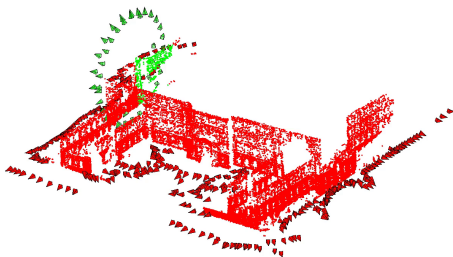
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

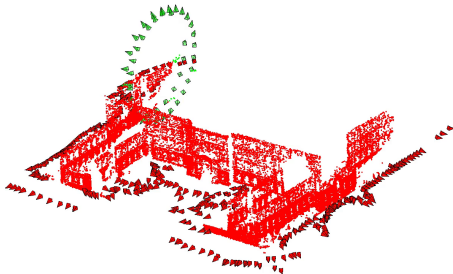
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

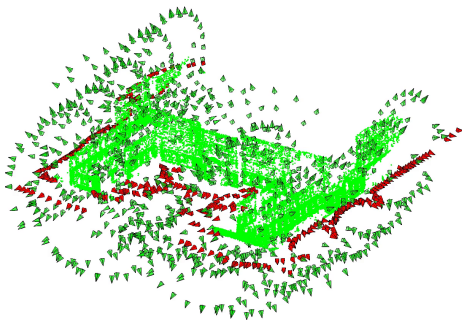
- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC 16*]

Contributions au calcul de pose (2)

- « Enrichissement » des descripteurs des points SFM par **simulation de points de vue non couverts** par les images réelles.
 - positionnement des caméras virtuelles,
 - simulation par morceaux de plans,
 - prise en compte de la visibilité



[Rolin Berger Sur *BMVC* 16]

Contributions au calcul de pose (3)

Problème : le nombre de descripteurs et la proportion de faux appariements augmentent avec simulation.

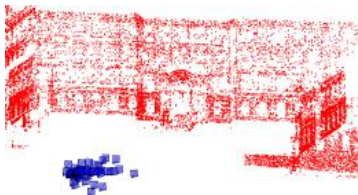
Appariement p.p.v. : 7.6 sec sans simu. / 0.3 M descr.

→ 13.8 sec avec simu. / 1.5 M descr.

→ échantillonnage progressif « à la PROSAC » [Chum Matas CVPR 05]
accélération de la convergence de RANSAC-PnP
(13.8 sec sans simu. → 1.3 sec avec simu.)



Source : Google Street View



→ ici, erreur de reprojection divisée par 2 avec simulation

Plan

① Calcul de la pose d'une caméra

→ appariement et grands changements de points de vue

② Bruit dans les images numériques

→ estimation des paramètres gouvernant le bruit des capteurs

→ bruit périodique

③ Estimation de champs de déplacement / déformation en mécanique des solides expérimentales

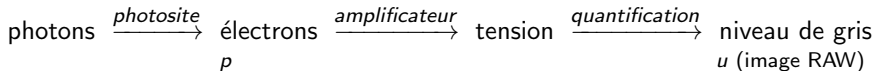
→ analyse mathématique

→ quantification des performances métrologiques

→ restauration

④ Quelques perspectives

Modèle de formation d'image, bruit Poisson-Gauss



Modèle de formation d'image en tout pixel (x, y)

$$u = g \eta_p + \delta$$

- g : gain (paramètre ISO)
- η_p : variable aléatoire de Poisson, i.i.d. (*shot noise*)
- δ : variable aléatoire de Gauss, i.i.d.
 - moyenne μ (décalage constant)
 - écart-type σ (bruit de lecture / quantification)
- η_p et δ indépendantes

[Healey Kondepudy *PAMI* 94]

(pas de *dark current*, non-uniformité, ou saturation [Foi *Signal Proc.* 09])

Relation entre variance et espérance de l'intensité

Calcul élémentaire :

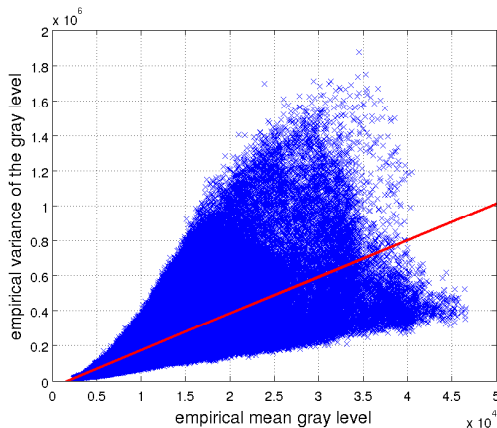
$$\text{Var}(u) = g E(u) + \sigma^2 - g\mu$$

Remarque : dans beaucoup d'applications (e.g. stabilisation de variance, débruitage), seuls g et $\sigma^2 - g\mu$ sont nécessaires.

Méthode : régression linéaire sur échantillons ($E(u)$, $\text{Var}(u)$)

- à partir d'une série d'images [Foi et al. *Sensors* 2007]
 « transfert de photons » [standard EMVA 1288]
- bruit à partir d'une seule image [Foi et al. *TIP* 08] [Boulanger et al. *TMI* 10] [Liu et al. *PAMI* 08] . . .
- stabilisation de variance [Jin et al. *TIP* 14] [Makitalo Foi *TIP* 13] . . .

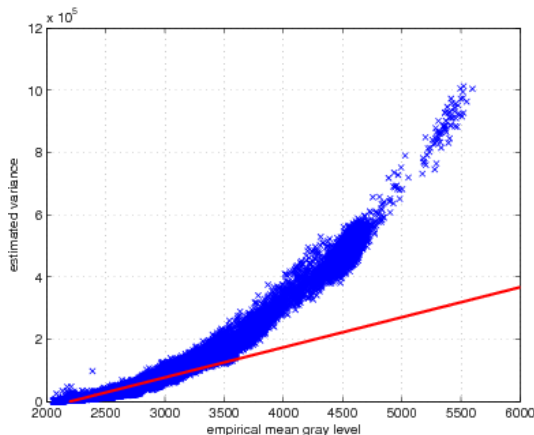
Et à partir d'une série d'images statiques ?



Problème 1 : microvibrations

(dalle béton, mouvement miroir, turbulences atmosphériques...)

Et à partir d'une série d'images statiques ?



Problème 2 : illumination scintillante

(lampe néon ou incandescente, LEDs, aube/crépuscule, variabilité de l'obturateur...)

Extension du modèle Poisson-Gauss

Rappel : $u(x, y) = g \eta_{p(x,y)}(x, y) + \delta(x, y)$ (modèle Poisson-Gauss)

Contribution 1 : modèle Cox-Gauss

Avec fluctuations dues au scintillement de l'illumination (γ_t) et aux micro-vibrations (α_t, β_t) :

$$u(x, y, t) = g \eta_{(1+\gamma_t)p(x+\alpha_t, y+\beta_t)}(x, y) + \delta(x, y)$$

où

- γ_t processus stochastique i.i.d.
($E(\gamma) = 0$, écart-type σ_γ)
- (α_t, β_t) processus stochastique 2D i.i.d.
($E(\alpha) = E(\beta) = 0$, matrice de covariance $\text{Cov}(\alpha, \beta)$)
- γ_t et (α_t, β_t) indépendants.

[Sur Grédiac *SIAM JIS* 2015]

Relation variance / espérance

On calcule :

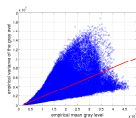
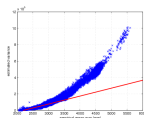
$$\begin{aligned}\text{Var}(u) = & \sigma_\gamma^2 E(u)^2 + (g - 2\mu\sigma_\gamma^2)E(u) + \sigma^2 - g\mu + \sigma_\gamma^2 \mu^2 \\ & + (1 + \sigma_\gamma^2) \nabla E(u)^T \text{Cov}(\alpha, \beta) \nabla E(u)\end{aligned}$$

→ **généralisation** de la relation classique

→ relation **quadratique**
(et plus affine)

→ les vibrations ajoutent un **biais** (positif)
(dépendant de l'orientation par rapport au gradient local)

→ une régression **ne permet pas** d'estimer g et $\sigma^2 - g\mu$



Estimation des paramètres

$$\begin{aligned}\text{Var}(u) = & \sigma_\gamma^2 E(u)^2 + (g - 2\mu\sigma_\gamma^2)E(u) + \sigma^2 - g\mu + \sigma_\gamma^2\mu^2 \\ & + (1 + \sigma_\gamma^2) \nabla E(u)^T \text{Cov}(\alpha, \beta) \nabla E(u)\end{aligned}$$

Contribution 2 : estimation à partir d'une série d'images naturelles

Algorithme d'estimation de *tous* les paramètres du modèle $(g, \mu, \sigma, \sigma_\gamma, \text{Cov}(\alpha, \beta))$ grâce au scintillement.

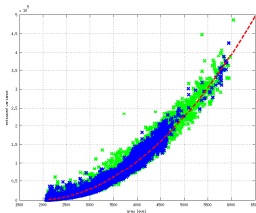
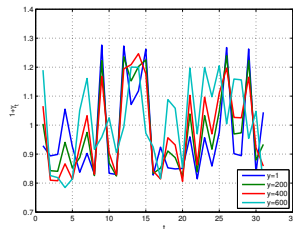
Difficulté : décalage μ constant, inconnu.

En pratique (cas des appareils photo réflex) : *rolling shutter effect*

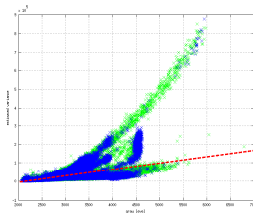
→ code Matlab NESIF

Exemple

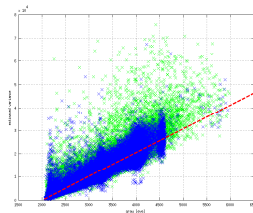
Appareil réflex Canon EOS 6D (ISO 6400, **1/160s**), éclairage tube néon



variance / espérance

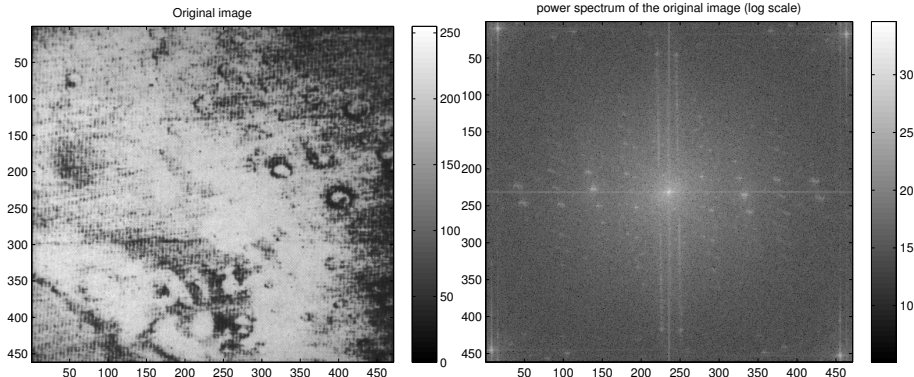


estimation globale



estimation localisée

Le bruit (quasi) périodique



Source : *Mariner 6* [Gonzalez Woods *Digital Image Processing* 08]

Motivation :

- imagerie satellitaire [Rindfleisch et al. *J. Geophysical Research* 71]
- beaux-arts [Heitz et al. *Signal Proc.* 87] [Cornelis et al. *TIP* 16]
- mécanique expérimentale [Grédiac Sur Blaysat *Exp. Tech.* 16]

Détection des contributions spectrales du bruit

Question : Comment détecter *automatiquement* les composantes causées par le bruit (et seulement elles) ?

Postulat : le bruit périodique est la seule texture stationnaire présente dans tout « patch ».

Spectre de puissance moyen et spectre d'amplitude minimum

On considère un ensemble de P patches répartis sur toute l'image (c^P DFT du p -ème patch) :

- $x_{m,n}^{\text{moy}} = \frac{1}{P} \sum_{1 \leq p \leq P} |c_{m,n}^p|^2$ [Cannon Lehar Preston *Applied Optics* 83]
- $x_{m,n}^{\text{min}} = \min_{1 \leq p \leq P} |c_{m,n}^p|$

Propriété attendue : si $x_{m,n}^{\text{moy}}$ ou $x_{m,n}^{\text{min}}$ a une « grande » valeur, la fréquence (m, n) est probablement une composante du bruit.

Détection des contributions spectrales du bruit

Question : Comment détecter *automatiquement* les composantes causées par le bruit (et seulement elles) ?

Postulat : le bruit périodique est la seule texture stationnaire présente dans tout « patch ».

Spectre de puissance moyen et spectre d'amplitude minimum

On considère un ensemble de P patches répartis sur toute l'image (c^p DFT du p -ème patch) :

- $x_{m,n}^{\text{moy}} = \frac{1}{P} \sum_{1 \leq p \leq P} |c_{m,n}^p|^2$ [Cannon Lehar Preston *Applied Optics* 83]
- $x_{m,n}^{\text{min}} = \min_{1 \leq p \leq P} |c_{m,n}^p|$

Propriété attendue : si $x_{m,n}^{\text{moy}}$ ou $x_{m,n}^{\text{min}}$ a une « grande » valeur, la fréquence (m, n) est probablement une composante du bruit.

Contributions

Identification des composantes spectrales du bruit

- dans x^{moy} par détection de déviations à un modèle en $1/f^\alpha$
[Field JOSA 87] → [Sur Grédiac JEI 15]
- dans x^{min} par détection a-contrario
[Desolneux Moisan Morel IJCV 00] → [Sur ICIP 15]

Interpolation de coefficients spectraux

Le débruitage par filtre coupe-bande peut provoquer de l'*aliasing*
→ post-traitement par minimisation de la variation totale :

$$\begin{cases} \tilde{u} = \arg \min_v \text{TV}(v) \\ \text{sous contrainte : } \mathcal{F}(v)|_{\Omega^c} = \mathcal{F}(u)|_{\Omega^c} \end{cases}$$

où Ω est l'ensemble des composantes fréquentielles du bruit dans u .

→ codes Matlab ARPENOS / AC-ARPENOS

Contributions

Identification des composantes spectrales du bruit

- dans x^{moy} par détection de déviations à un modèle en $1/f^\alpha$
[Field JOSA 87] → [Sur Grédiac JEI 15]
- dans x^{min} par détection a-contrario
[Desolneux Moisan Morel IJCV 00] → [Sur ICIP 15]

Interpolation de coefficients spectraux

Le débruitage par filtre coupe-bande peut provoquer de l'*aliasing*

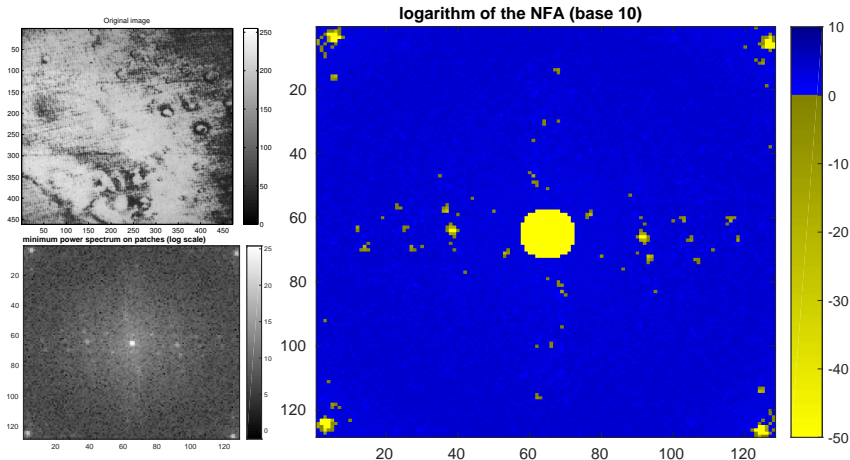
→ post-traitement par minimisation de la variation totale :

$$\begin{cases} \tilde{u} = \arg \min_v \text{TV}(v) \\ \text{sous contrainte : } \mathcal{F}(v)|_{\Omega^c} = \mathcal{F}(u)|_{\Omega^c} \end{cases}$$

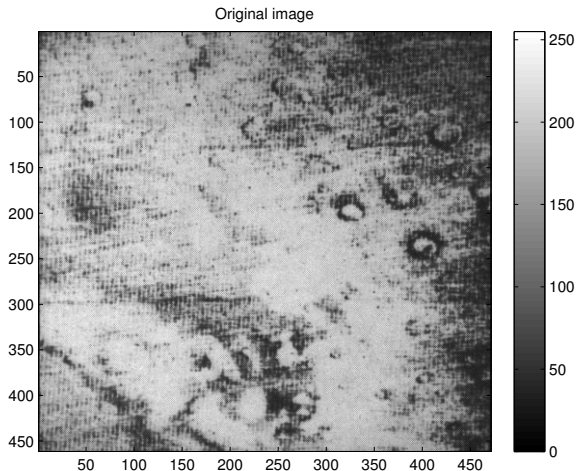
où Ω est l'ensemble des composantes fréquentielles du bruit dans u .

→ codes Matlab ARPENOS / AC-ARPENOS

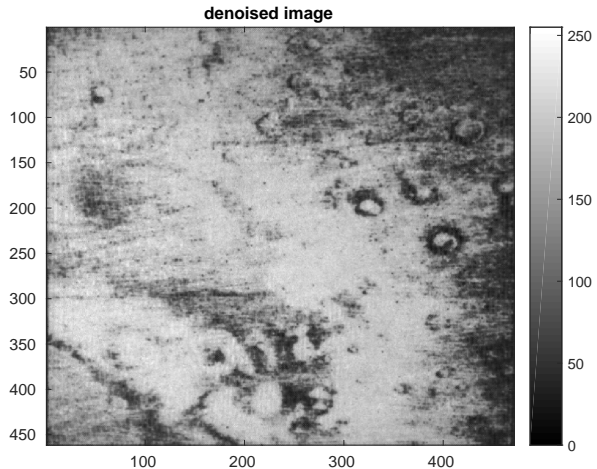
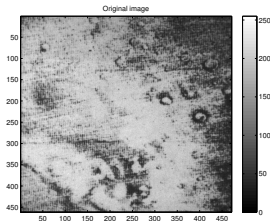
Exemple de détection a-contrario



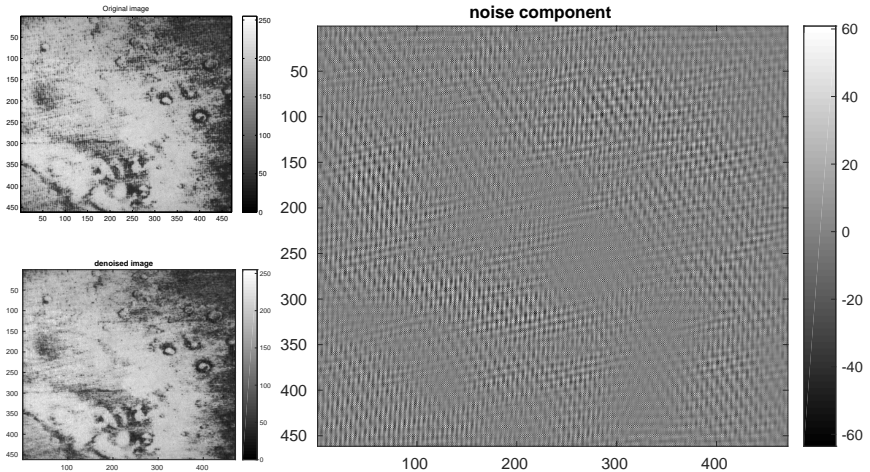
Exemple : Mariner 6



Exemple : Mariner 6



Exemple : Mariner 6



Plan

① Calcul de la pose d'une caméra

→ appariement et grands changements de points de vue

② Bruit dans les images numériques

→ estimation des paramètres gouvernant le bruit des capteurs

→ bruit périodique

③ Estimation de champs de déplacement / déformation en mécanique des solides expérimentales

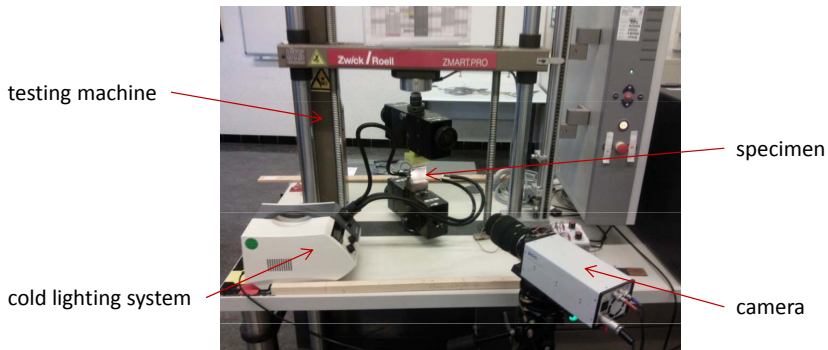
→ analyse mathématique

→ quantification des performances métrologiques

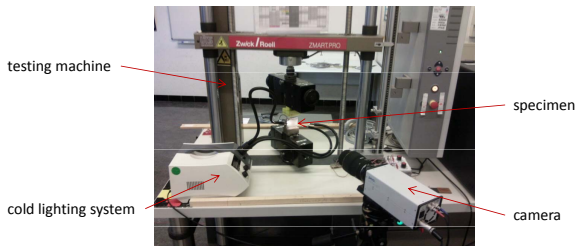
→ restauration

④ Quelques perspectives

Identification de champs de déplacement ou déformation



Identification de champs de déplacement ou déformation



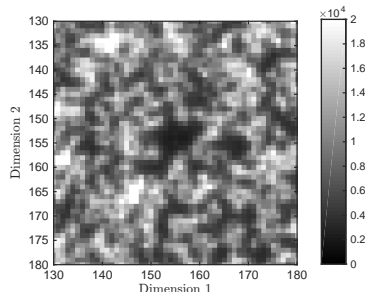
Détail d'un « mouchetis » (*speckle*) :

→ **DIC**

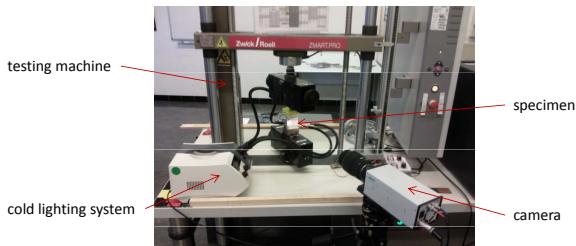
Contribution : rôle de l'interpolation
dans la propagation du bruit
dans les cartes de déplacement

[Blaysat Grédiac Sur *IJNME* 16]

[Blaysat Grédiac Sur *Exp. Mech.* 16]

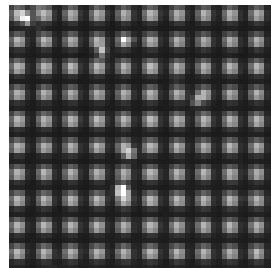


Identification de champs de déplacement ou déformation



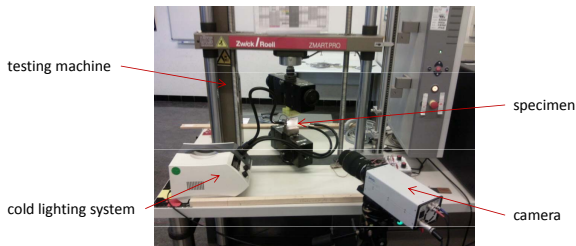
Détail d'une grille :

→ **méthode de grille**



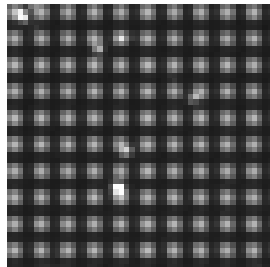
avant déformation

Identification de champs de déplacement ou déformation

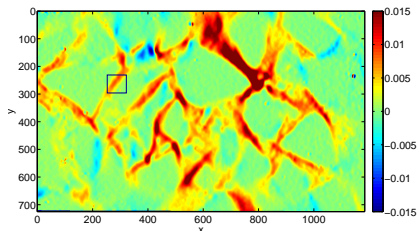


Détail d'une grille :

→ **méthode de grille**



Exemple illustratif



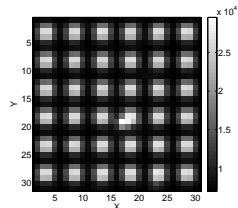
Test de compression d'un échantillon d'asphalte
(granulat + enrobé bitumeux)

Champ de déformation obtenu par la **méthode de grille**.

[Grédiac Toussaint *Strain* 2013]

Modèle d'image de grille

Image 12 bits
 1040×1376 pixels
(Sensicam QE)



Détail d'une grille

Pour une grille horizontale / verticale :

$$s(x, y) = \frac{A(x, y)}{2} \left(2 + \gamma \cdot \ell(2\pi f x + \phi_x(x, y)) + \gamma \cdot \ell(2\pi f y + \phi_y(x, y)) \right)$$

- A : illumination globale du champ ;
- γ : contraste ;
- ℓ : profil des lignes (2π -périodique, amplitude=1, moyenne=0) ;
- f : fréquence de la porteuse (= inverse du pas de grille p)
- $\phi_x(x, y)$ & $\phi_y(x, y)$: modulations de phase

[Badulescu, Grédiac, Mathias *Measurement Science and Technology* 2009)]

Quantités à identifier

- Champ de déplacement $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ à la surface de l'échantillon :

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = -\frac{\rho}{2\pi} (\phi^2(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) - \phi^1(\mathbf{x}))$$

- Composantes du tenseur de déformations linéarisé :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \quad \text{où } i, j \in \{x, y\}$$

→ Identification de \mathbf{u} (puis ϵ) par point fixe de Banach, dès qu'une estimation de ϕ est disponible.

[Grédiac Sur Blaysat *Strain* 16]

→ www.thegridmethod.net (code efficace basé sur **une** FFT 2D)

Analyse mathématique de la méthode de grille

Avec transformée de Fourier à fenêtre w_σ :

$$\mathcal{F}_w(f)(x, y, u, v) = \iint_{\mathbb{R}^2} s(\xi, \eta) w_\sigma(\xi - x, \eta - y) e^{-2i\pi(\xi u + \eta v)} d\xi d\eta$$

$$\begin{cases} \arg(\mathcal{F}_w(f)(x, y, f, 0)) \simeq \arg(d_1) + w_\sigma * \phi_x(x, y) + n_x(x, y) \\ \arg(\mathcal{F}_w(f)(x, y, 0, f)) \simeq \arg(d_1) + w_\sigma * \phi_y(x, y) + n_y(x, y) \end{cases}$$

où n_x, n_y sont des **bruits corrélés** si bruit blanc gaussien dans les images de grille [Sur Grédiac AIMS IPI 14]

Avec **bruit hétéroscédastique** Poisson-Gauss :

transformée d'Anscombe généralisée [Grédiac Sur Strain 14]

et prise en compte des micro-vibrations [Sur Grédiac IEEE SPL 15]

Études des **différentes fenêtres** de la littérature :

→ w_σ = Gaussienne [Sur Grédiac JMIV 16]

raison : concentration espace / fréquence (transformée de Wigner-Ville)

Analyse mathématique de la méthode de grille

Avec transformée de Fourier à fenêtre w_σ :

$$\mathcal{F}_w(f)(x, y, u, v) = \iint_{\mathbb{R}^2} s(\xi, \eta) w_\sigma(\xi - x, \eta - y) e^{-2i\pi(\xi u + \eta v)} d\xi d\eta$$

$$\begin{cases} \arg(\mathcal{F}_w(f)(x, y, f, 0)) \simeq \arg(d_1) + w_\sigma * \phi_x(x, y) + n_x(x, y) \\ \arg(\mathcal{F}_w(f)(x, y, 0, f)) \simeq \arg(d_1) + w_\sigma * \phi_y(x, y) + n_y(x, y) \end{cases}$$

où n_x, n_y sont des **bruits corrélés** si bruit blanc gaussien dans les images de grille [Sur Grédiac *AIMS IPI* 14]

Avec **bruit hétéroscédastique** Poisson-Gauss :

transformée d'Anscombe généralisée [Grédiac Sur *Strain* 14]

et prise en compte des micro-vibrations [Sur Grédiac *IEEE SPL* 15]

Études des **différentes fenêtres** de la littérature :

→ w_σ = Gaussienne [Sur Grédiac *JMIV* 16]

raison : concentration espace / fréquence (transformée de Wigner-Ville)

Analyse mathématique de la méthode de grille

Avec transformée de Fourier à fenêtre w_σ :

$$\mathcal{F}_w(f)(x, y, u, v) = \iint_{\mathbb{R}^2} s(\xi, \eta) w_\sigma(\xi - x, \eta - y) e^{-2i\pi(\xi u + \eta v)} d\xi d\eta$$

$$\begin{cases} \arg(\mathcal{F}_w(f)(x, y, f, 0)) \simeq \arg(d_1) + w_\sigma * \phi_x(x, y) + n_x(x, y) \\ \arg(\mathcal{F}_w(f)(x, y, 0, f)) \simeq \arg(d_1) + w_\sigma * \phi_y(x, y) + n_y(x, y) \end{cases}$$

où n_x, n_y sont des **bruits corrélés** si bruit blanc gaussien dans les images de grille [Sur Grédiac *AIMS IPI* 14]

Avec **bruit hétéroscédastique** Poisson-Gauss :

transformée d'Anscombe généralisée [Grédiac Sur *Strain* 14]

et prise en compte des micro-vibrations [Sur Grédiac *IEEE SPL* 15]

Études des **différentes fenêtres** de la littérature :

→ w_σ = Gaussienne [Sur Grédiac *JMIV* 16]

raison : concentration espace / fréquence (transformée de Wigner-Ville)

Quantification des performances métrologiques

$$\arg(\mathcal{F}_w(f)(x, y, f, 0)) \simeq \arg(d_1) + w_\sigma * \phi_x(x, y) + n_x(x, y)$$

On établit des relations établissant :

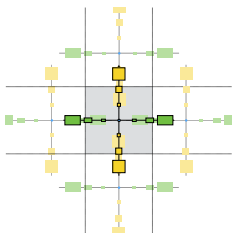
- résolution de mesure
- résolution spatiale
- erreur systématique / biais relatif

→ rôle des paramètres

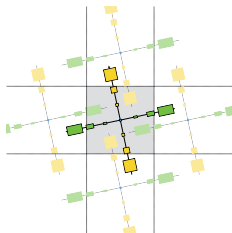
(σ , niveau de bruit, illumination, contraste, profil des lignes. . .)
sur les performances de la méthode de grille.

[Grédiac Sur Blaysat *Strain* 16] [Grédiac Sur *Strain* 14]

Étude du spectre des grilles, phénomène d'*aliasing*



grille alignée

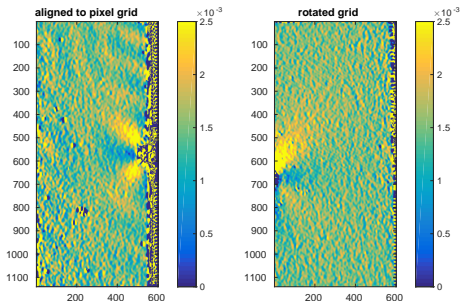


grille tournée

(théorème de la phase stationnaire + théorème d'échantillonnage)

→ en tournant les grilles,
on évite l'*aliasing* dans les
cartes de déplacement /
déformation
(et **non** dans images grille)

[Sur Blaysat Grédiac *OLEN 16*]

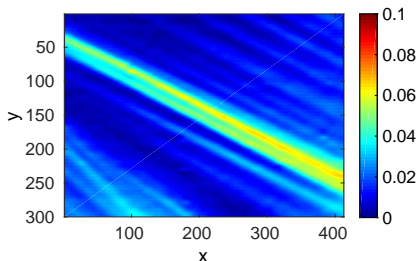


Restauration des champs de déplacement et déformation

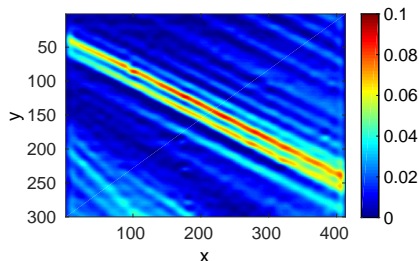
$$\arg(\mathcal{F}_w(f)(x, y, f, 0)) \simeq \arg(d_1) + w_\sigma * \phi_x(x, y) + n_x(x, y)$$

→ restauration par *déconvolution non-aveugle*

Exemple : essai de traction d'un alliage à mémoire de forme



avant déconvolution



après déconvolution

[Delpueyo et al. *Mech. of Materials* 12]

[Grédiac Sur Badulescu Mathias *OLEN* 13]

Plan

① Calcul de la pose d'une caméra

→ appariement et grands changements de points de vue

② Bruit dans les images numériques

→ estimation des paramètres gouvernant le bruit des capteurs

→ bruit périodique

③ Estimation de champs de déplacement / déformation en mécanique des solides expérimentales

→ analyse mathématique

→ quantification des performances métrologiques

→ restauration

④ Quelques perspectives

Axe 1 – Vers une *photomécanique computationnelle*

Originalité des problème de la (photo)mécanique par rapport à l'imagerie computationnelle « classique » :

- objet d'étude : **mesures issues des images**, pas les images elles-mêmes
- recherche de grandeurs certifiées (**métrologie**)
- petites déformations : les mesures émergent à peine du **bruit**

Objectif : modélisation fine de la chaîne de traitement, du capteur aux champs de déformation (puis estimation des paramètres mécaniques) & propagation de l'incertitude.

Exemple : restauration / super-résolution

Restauration / débruitage / super-résolution à partir d'une série d'images (grille ou *speckle*)

Premiers résultats :

- débruitage en présence de vibrations [Sur Grédiac *OLEN* 15]
- déconvolution non-aveugle [Grédiac Sur Badulescu Mathias *OLEN* 13]

Questions :

- images acquises ou champs de déplacement/déformation ?
- illumination stable ?
- micro-vibrations ? (potentiellement bénéfiques ?)
- cas des essais dynamiques ?
- bornes « à la Cramér-Rao » ?
(image sous-jacente déterministe pour grille, aléatoire pour *speckle*)
[Aguerrebere et al. *TSP* 16]

Axe 2 – *Analyse spectrale non-locale* (1)

Question : comment détecter un « bruit » périodique **localisé** ?

→ séparation *cartoon* + *texture*

Exemple : algo. rapide de [Buades Le Morel Vese *TIP* 10] (*local TV*)

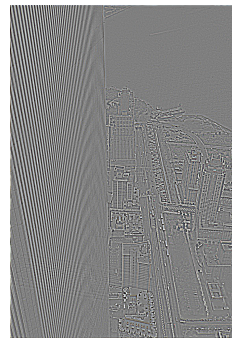
Inconvénient : hautes fréquences dans *texture* [Buades Lisani *JMIV* 16]

Axe 2 – Analyse spectrale non-locale (1)

Question : comment détecter un « bruit » périodique **localisé** ?

→ séparation *cartoon* + *texture*

Exemple : algo. rapide de [Buades Le Morel Vese *TIP* 10] (*local TV*)



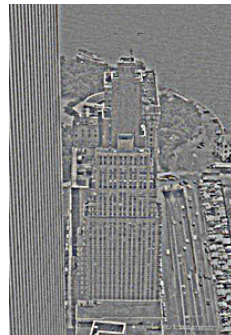
Inconvénient : hautes fréquences dans *texture* [Buades Lisani *JMIV* 16]

Axe 2 – Analyse spectrale non-locale (1)

Question : comment détecter un « bruit » périodique **localisé** ?

→ séparation *cartoon* + *texture*

Exemple : algo. rapide de [Buades Le Morel Vese *TIP 10*] (*local TV*)



Inconvénient : hautes fréquences dans *texture* [Buades Lisani *JMIV 16*]

Axe 2 – *Analyse spectrale non-locale* (2)

Perspective : approche *dual-domain*

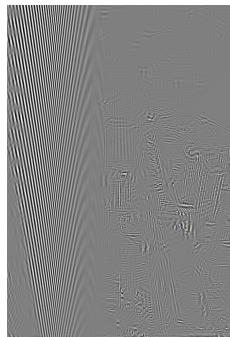
Cf. *dual-domain filtering* et utilisation d'une « image guide »

[Knaus Zwicker *SIAM JIS* 15]

Exemple : (*travail en cours*)

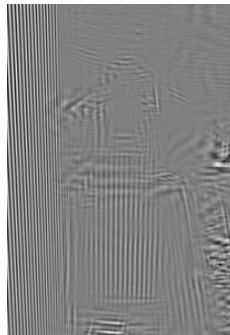
- ① décomposition *cartoon* + *texture* [Buades Le Morel Vese *TIP* 10]
- ② définition fenêtre d'analyse (patch) par filtre bilatéral sur composante *cartoon*
(on ne mélange pas les textures d'objets différents)
- ③ identification de composantes communes à N spectres de puissance de patches, sélectionnés sur la similarité de leur composante *cartoon* (non-localité)

Axe 2 – Analyse spectrale non-locale (2)



Avantage : meilleure localisation des composantes spectrales communes à un ensemble de patches

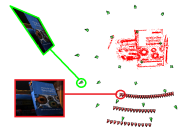
Axe 2 – Analyse spectrale non-locale (2)



Avantage : meilleure localisation des composantes spectrales communes à un ensemble de patches

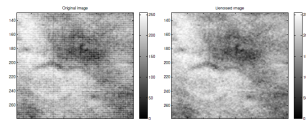
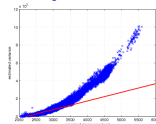
① Calcul de la pose d'une caméra

→ appariement et grands changements de points de vue



② Bruit dans les images numériques

→ estimation des paramètres d'un capteur
→ bruit périodique



③ Estimation de champs de déplacement / déformation en mécanique des solides expérimentales

→ analyse mathématique
→ quantification des performances métrologiques
→ restauration

