

Calcul de translation et rotation par la transformation de Fourier

Estimation of Translation and Rotation by Fourier Transform

par Baptiste MARCEL*, Maurice BRIOT**, Rafael MURRIETA**

* INP ENSEEIHT GTTSI
2, rue Charles Camichel
BP 7122 31071 Toulouse cedex 7 France
E-mail :marcel@en7.enseeiht.fr
** LAAS du CNRS
7, avenue du Colonel Roche
31077 Toulouse Cedex 4

résumé et mots clés

Dans l'idée de compléter les capteurs mécaniques de mouvement par des techniques à base de vision, nous analysons le déplacement d'une image pour en déduire les paramètres de rotation de la caméra. L'approche choisie est celle de la transformation de Fourier dont on utilise les propriétés d'invariance par rotation et de déphasage par translation. L'application, réduite pour cette étude aux rotations de caméra, peut s'étendre à tous les domaines liés au recalage d'images.

Recalage d'image en translation et rotation, Détermination de déplacement d'image, Transformation de Fourier, Robotique mobile.

abstract and key words

In the research area of vision-aided motion sensors, the rotation parameters can be computed from the motion in the picture. The properties of translation and rotation in the frequency domain of the Fourier transform are used here. This study is restricted to rigid-body transformations, but other application domains, such as matching of rigidly misaligned images, also exist.

Image rotation and translation compensation, Movement estimation, Fourier transform, Mobile robotics, Image processing.

1. introduction

Les recherches sur les robots autonomes permettent aujourd'hui d'envisager leur utilisation dans toutes sortes de cas, notamment sur les sites inaccessibles ou dangereux (centrales nucléaires, fonds sous-marins, autres planètes. . .) ou pour l'automatisation de tâches industrielles.

Dans le cas de robots d'exploration planétaire ou de robots de service, prévus pour se déplacer en environnement extérieur sur un sol cahoteux, l'appareillage de vision subira des mouvements erratiques qui perturberont les repères du robot dans sa vision. Un exemple de robot d'exploration planétaire est présenté figure 1. En étudiant les transformations que subit l'image au cours du temps, on peut reconstituer le mouvement de rotation de la caméra

dans l'espace. Ceci permettrait de compléter les informations des capteurs mécaniques adaptés surtout aux mesures de déplacement sur sol plan. Nous obtiendrons ainsi un système de vision qui participe au repérage spatial.

La méthode présentée ici suppose que les mouvements de la caméra se traduisent par des mouvements plans de l'image du type *déplacement*, c'est-à-dire composition de translation et rotation. Nous présentons dans la partie 2 les raisons et contraintes de cette hypothèse.

Pour déterminer le déplacement qui lie deux images successives, on peut utiliser l'opération de recalage. Ce que l'œil humain peut faire facilement avec deux images sur du papier calque peut être automatisé en utilisant diverses opérations classiques de traitement d'image (transformation de Fourier, rotations. . .). Cependant, pour les translations, étant donné que l'image est

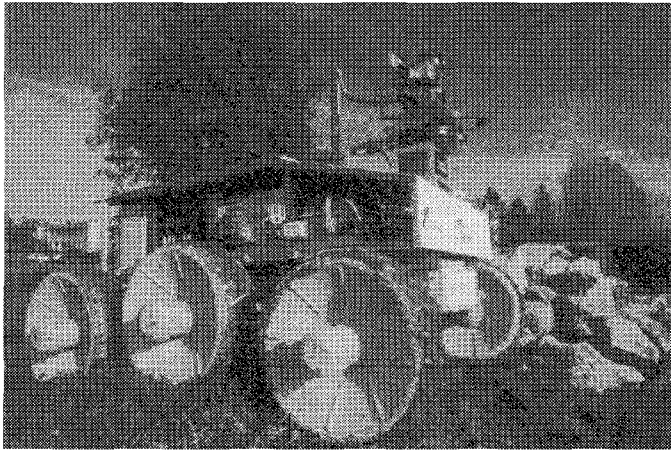


Figure 1. – Robot Adam MMS, Framatome et LAAS.

limitée dans l'espace, le recalage ne sera possible que si la surface d'image commune est suffisamment importante. Le système de recalage d'image est limité dans l'amplitude des translations qu'il peut déterminer, et donc dans l'amplitude des mouvements de caméra qui les génèrent (quantifiés au § 5.2.1).

D'autres applications qui englobent toutes sortes de domaines peuvent nécessiter le traitement automatique du recalage d'image : construction incrémentale de l'environnement (en robotique mobile, recalage de deux représentations de l'environnement), recouplement de photographies aériennes, stabilisation d'image lors de prises de vue dans de mauvaises conditions ou encore suivi visuel de l'évolution d'un processus lent (prises de vues espacées dans le temps, avec des cadrages différents).

Le recalage d'image a fait l'objet de nombreuses études. Des méthodes mécaniques ont été mises au point, pour les caméscopes grand public entre autres, mais des méthodes purement logicielles ont aussi été développées. [14], [6] et [7] proposent des méthodes statistiques basées sur le calcul du déplacement du centre de gravité et du changement d'orientation des moments de l'image. [4] propose une méthode par flux optique qui détermine les six paramètres de déplacement de la caméra. Dans deux approches différentes, [15] et [12] proposent une méthode de détection de mouvement plan par la méthode de corrélation de phase (méthode détaillée plus loin) sur les descripteurs de Fourier (transformation de Fourier appliquée à une fonction linéaire de type code de Freeman décrivant le contour d'un objet). Dans [11], Messner et Szu proposent une technique de recalage d'image en rotation en utilisant dans une première étape un passage en coordonnées logarithmiques et polaires (interprétant la rotation et le changement d'échelle comme une translation) puis la transformation de Fourier suivant une méthode assez proche de celle du spectre circulaire croisé présentée dans cet article.

Le décalage d'un signal dans le temps entraîne un déphasage de sa transformée de Fourier. Dans [8], Kuglin et Hines utilisent cette propriété de la transformation de Fourier (valable aussi en deux dimensions) pour effectuer le recalage d'image en translation pour

des photographies aériennes; les auteurs y présentent d'un point de vue mathématique les performances de cette méthode appelée *corrélation de phase* (*phase correlation* en anglais). Dans [2], De Castro et Morandi étendent la méthode dans le cas de rotations, mais par une technique de recherche d'angle par balayage pas à pas, trop coûteuse en temps de calcul pour une exploitation en temps réel. [3] reprend et commente ces travaux. Le principal avantage de la corrélation de phase est sa robustesse vis-à-vis du bruit.

La méthode proposée dans cet article est, comme nous allons le voir, une synthèse de celles de Messner-Szu et Kuglin-Hines. L'objectif est de calculer les rotations de la caméra à partir des transformations que subit l'image dans le temps. Ceci est réalisé en deux étapes. La première étape s'inspire de la méthode de Messner-Szu [11] en calculant la rotation sur une image où l'on fait abstraction de la translation (on étudie le module de la transformée de Fourier); la seconde s'inspire de la méthode de De Castro-Morandi [2] en utilisant la connaissance de la rotation pour déterminer la translation. Les détails de cette nouvelle méthode et de son étude sont présentés dans [10].

Les hypothèses de départ sont exposées dans la partie 2; la partie 3 présente la méthode connue de recalage en translation par la transformation de Fourier; la partie 4 présente l'extension de la méthode au mouvement composé de translation et rotation. Un certain nombre d'aménagements de la méthode liés à son application et l'étude des distorsions seront exposés dans la partie 5. Dans la partie 6, nous détaillons un exemple de calcul de déplacement. Nous présentons un ensemble de résultats pour divers types d'image dans la partie 7.

2. hypothèses

La méthode proposée a été développée dans le cadre de la robotique mobile, pour calculer les mouvements de caméra à partir des mouvements d'image. La méthode repose sur le principe que les mouvements de caméra en trois dimensions se retrouvent dans l'image sous forme de déplacements isométriques. Pour ceci, nous faisons certaines hypothèses sur la scène observée.

Si l'on considère que les objets de la scène sont situés à l'infini, comme dans le cas d'un paysage en général, les mouvements de translation de la caméra n'entraîneront pas de décalage de l'image, et seuls les mouvements de rotation de caméra affecteront l'image. Les travaux présentés dans cette étude concernent des mouvements de caméra effectués uniquement avec des rotations.

La rotation autour de l'axe optique (roulis) induira une rotation de l'image autour de son centre optique, les rotations autour des autres axes (vertical : lacet et transversal : tangage) induiront des translations de l'image dans les directions complémentaires (respectivement horizontale et verticale).

Nous appelons *déplacement* une composition de translation et rotation. Pour calculer les mouvements de rotation, on étudie les

déplacements de l'image, décomposables en deux translations (ou *décalages*) et une rotation axée sur le centre de l'image.

Les distorsions projectives et optiques déforment les images, mais nous avons pu établir (§ 5.1.2) qu'elles étaient sans conséquence sur la méthode pour les ouvertures de champ et les focales que nous utilisons.

3. calcul du décalage par transformation de Fourier

- translation pure : corrélation de phase

Cette méthode utilise les propriétés de la transformation de Fourier pour calculer le déplacement d'image. Il ne s'agit pas de mesurer directement le déplacement de l'image, mais de chercher dans la transformée de Fourier de l'image les traces du déplacement et d'en calculer les paramètres.

La transformation de Fourier que l'on utilise pour modéliser le problème est la transformation de Fourier continue à deux dimensions. Les images, tout comme les spectres, sont *a priori* complexes, considérées comme des fonctions de \mathbb{R}^2 dans \mathbb{C} .

3.1. principe de la méthode

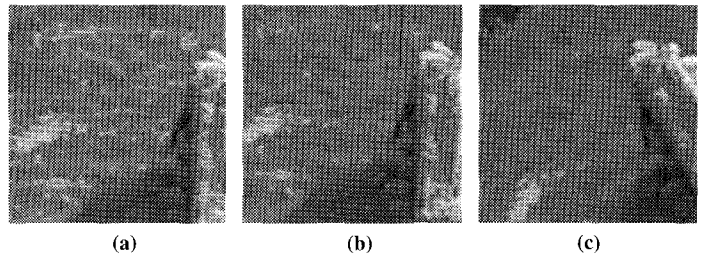
La transformation de Fourier conserve les rotations, et transforme une translation en un déphasage fréquentiel. Pour calculer la translation entre deux images, il suffit d'observer le déphasage entre les deux transformées. Ce déphasage devrait être celui d'une onde monochromatique, où le vecteur d'onde représente le vecteur de la translation. Les figures 2 et 3 représentent les images utilisées pour illustrer la méthode. La figure 4 représente la transformée de Fourier de l'image initiale (en amplitude) et l'onde monochromatique du déphasage.

3.2. mise en équation

Nous notons (x, y) ou $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ un point de l'espace du signal et (f_x, f_y) , $\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix}$ ou encore f_{xy} un point de l'espace des fréquences. Par la suite, nous calculerons la transformée de Fourier du spectre et nous noterons ff_x, ff_y et ff_{xy} les coordonnées et points du nouvel espace et ainsi de suite ($fff_{xy} \dots$). Nous notons par une apostrophe (') l'opération de transposition (M' est la matrice transposée de la matrice M).

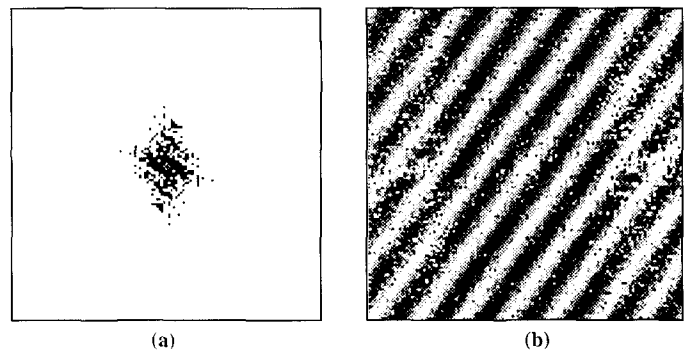


Figure 2. – Image utilisée pour l'illustration de la méthode. On en extrait trois sous-images avec des déplacements différents (figure 3).



Repère orthogonal direct (avec axe x horizontal vers la droite), origine du repère au centre de la figure, largeur et hauteur de l'image : 1 ui (unité d'image), résolution 128×128 pixels.

Figure 3. – a) Image initiale, b) Image décalée et c) Image déplacée. Déplacements par transformations géométriques sans défauts obtenus par logiciel à partir de la figure 2. En pixels, de 3a à 3b : translation de vecteur $(-7, 5)$; de 3a à 3c : translation de vecteur $(-10, -15)$, puis rotation d'angle 0,5 rad autour du centre de l'image.



Repère orthogonal direct (avec axe f_x horizontal vers la droite), origine du repère au centre de la figure, largeur et hauteur de l'image : 128 ui^{-1} de -64 ui^{-1} à 63 ui^{-1} , résolution 128×128 pixels.

Figure 4. – a) Amplitude de la transformée de Fourier de l'image initiale et b) onde monochromatique du déphasage.

Soit \mathcal{F} l'opérateur de Fourier. Soient $g_0(x, y)$ (resp. g_1) une image et $G_0(f_x, f_y)$ (resp. G_1) sa transformée. Soient t le vecteur de translation de coordonnées u et v , et t° l'opérateur de translation correspondant; nous posons g_1 image de g_0 par cette translation.

Nous pouvons formuler tout ceci de la manière suivante : $G_0(f_x, f_y)$ transformée de Fourier en deux dimensions de $g_0(x, y)$ (par définition) :

$$\mathcal{F}[g_0(x, y)] = G_0(f_x, f_y); \tag{1}$$

translation de vecteur $t = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ et définition de g_1 :

$$g_1(x, y) = t^\circ g_0(x, y) = g_0(x - u, y - v); \tag{2}$$

transformée G_1 de l'image décalée g_1 :

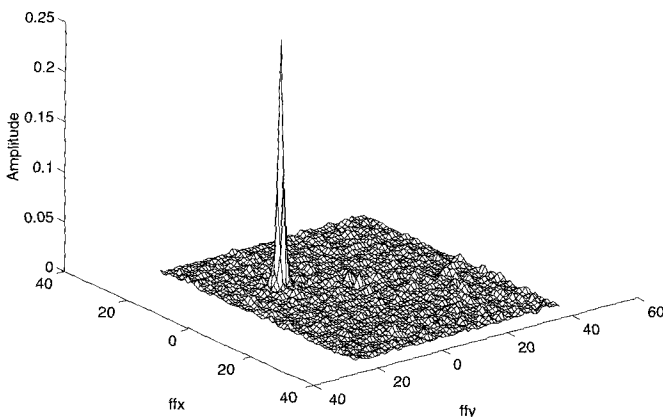
$$\begin{aligned} G_1(f_x, f_y) &= \mathcal{F}[g_0(x - u, y - v)] \\ &= e^{-2i\pi(u f_x + v f_y)} G_0(f_x, f_y). \end{aligned} \tag{3}$$

Soit $\Psi(f_x, f_y)$ le rapport des spectres (appelé *spectre croisé*, *cross-power spectrum* en anglais) de g_0 et g_1 : $\Psi = \frac{G_1}{G_0}$. Le calcul de Ψ donne la formule suivante :

$$\Psi(f_x, f_y) = \frac{G_1(f_x, f_y)}{G_0(f_x, f_y)} = e^{-2i\pi(u f_x + v f_y)}. \tag{4}$$

Le calcul du spectre croisé Ψ donne donc une onde monochromatique (représentée figure 4b). Cette onde est une fonction exponentielle complexe du plan ne comportant qu'un seul vecteur d'onde qui correspond au vecteur de translation $-t = (-u, -v)$. Une fois Ψ obtenu, on peut déterminer son vecteur d'onde en calculant sa transformée de Fourier qui est un signal de Dirac au point $-t = (-u, -v)$. La figure 5 représente ce pic de Dirac.

Transformée du spectre croisé



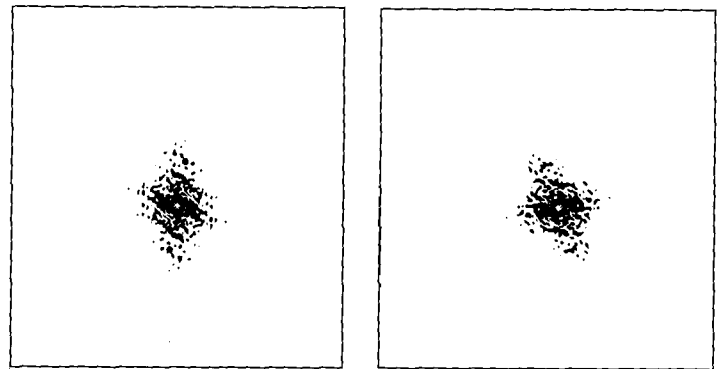
Unité pour ff_x et ff_y : pixel.

Figure 5. – Pic de Dirac correspondant à la translation.

4. extension à la rotation par le spectre circulaire

4.1. principe de la méthode

Nous avons vu que, lorsque le déplacement qui lie deux images est une translation, les spectres des images ne sont liés que par un déphasage pur. Les modules des spectres sont donc identiques. La transformation qui consiste à prendre le module d'un spectre de Fourier est invariante en translation. Si on applique cette transformation à deux images g_0 et g_1 liées par un déplacement combinant translation et rotation (par exemple les images des figures 3a et 3c), on isole la rotation comme le montre la figure 6 qui représente les modules des spectres G_0 et G_1 . En exprimant ce module de spectre sous forme polaire, on exprime cette rotation sous forme de translation comme le montre la figure 7. On peut par la suite calculer cette translation par la méthode suivie précédemment et obtenir l'angle de rotation. Cette méthode était utilisée dans [11] pour le calcul de rotations centrées sans translation.



Repère orthogonal direct (avec axe f_x horizontal vers la droite), origine du repère au centre de la figure, largeur et hauteur de l'image : 512 ui^{-1} de -256 ui^{-1} à 255 ui^{-1} , résolution $512 \times 512 \text{ pixels}$.

Figure 6. – Spectres de Fourier des images respectives a) de la figure 3a et b) de la figure 3c. Alors que les images étaient liées par un déplacement (translation et rotation), les spectres ne sont plus liés que par une rotation.

4.2. mise en équation

4.2.1. équation d'un déplacement

Soit D° le déplacement qui lie g_0 et g_1 ; on le décompose respectivement en une rotation R° puis en une translation t° .

Notons R_ι° et t_ι° la décomposition inverse de D° (l'indice ι est la lettre grecque *iota*). D (en coordonnées homogènes), R , R_ι et t_ι sont les matrices correspondant à ces déplacements (ainsi que t défini précédemment). Nous avons par définition :

$$\begin{aligned} g_1(x, y) &= [D^\circ(g_0)](x, y) \\ D^\circ &= t^\circ \circ R^\circ = R_\iota^\circ \circ t_\iota^\circ. \end{aligned} \quad (5)$$

Nous avons pour les matrices D , R et t les propriétés suivantes :

$$D = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$R_\iota = R, t_\iota = R^{-1}t. \quad (7)$$

Nous définissons u_ι et v_ι tels que : $t_\iota = \begin{pmatrix} u_\iota \\ v_\iota \end{pmatrix}$.

Par la suite, l'expression $G(f_{xy})$ sera couramment utilisée pour désigner $G(f_x, f_y)$.

Nous appelons ϕ la fonction $\phi(f_x, f_y) = u_\iota f_x + v_\iota f_y$. En nous aidant de la formule de l'équation 3, nous obtenons l'expression de G_1 en fonction de G_0 et des matrices de déplacement :

$$\begin{aligned} G_1(f_x, f_y) &= \mathcal{F}[(D^\circ(g_0))(x, y)] \\ &= \mathcal{F}[(R_\iota^\circ(t_\iota^\circ(g_0)))(x, y)] \\ &= R_\iota^\circ \left(e^{-2i\pi\phi(f_x, f_y)} G_0 \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \right) \\ &= e^{-2i\pi\phi} \left(R_\iota^{-1} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \right) G_0 \left(R_\iota^{-1} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Nous explicitons ϕ :

$$\begin{aligned} \phi(f_x, f_y) &= u_\iota f_x + v_\iota f_y \\ &= t_\iota' \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \\ &= t' R \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

L'expression $\phi(R^{-1}f_{xy})$ se simplifie :

$$\begin{aligned} \phi(R^{-1}f_{xy}) &= t' R \cdot R^{-1} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \\ &= t' f_{xy}. \end{aligned} \quad (10)$$

Reprenons le calcul de G_1 à partir de l'équation 8 en se rappelant que $R_\iota = R$ (équation 7) :

$$\begin{aligned} G_1(f_{xy}) &= e^{-2i\pi\phi(R^{-1}f_{xy})} G_0(R^{-1}f_{xy}) \\ &= e^{2i\pi(-t'f_{xy})} G_0(R^{-1}f_{xy}). \end{aligned} \quad (11)$$

Ce résultat est l'expression d'un déplacement transformé par Fourier.

4.2.2. spectre circulaire et spectre circulaire croisé

4.2.2.1. spectre croisé

Si l'on calcule le spectre croisé de ce déplacement, nous trouvons une formule non simplifiable (contrairement à celle de l'équation 4) :

$$\Psi(f_{xy}) = \frac{G_1(f_{xy})}{G_0(f_{xy})} = e^{2i\pi(-t'f_{xy})} \frac{G_0(R^{-1}f_{xy})}{G_0(f_{xy})}. \quad (12)$$

4.2.2.2. conversion coordonnées cartésiennes/polaires

Nous notons (θ, ρ) ou $\begin{pmatrix} \theta \\ \rho \end{pmatrix}$ un point de l'espace du signal représenté en coordonnées polaires. Soient g_{rec} et g_{pol} les formes cartésienne (appelées aussi coordonnées *rectangulaires*) et polaire de g ; soient R_ϕ° l'opérateur de rotation centrale d'angle ϕ en coordonnées cartésiennes et $t_{pol\phi}^\circ$ l'opérateur de translation le long de l'axe θ , en coordonnées polaires, de vecteur $t_{pol\phi} = (\phi, 0)$; soient Pol et Rec les opérateurs de passage en coordonnées polaires et en coordonnées cartésiennes (*Rec* pour *rectangulaires*).

Si

$$g_{1rec} = R_\phi^\circ g_{0rec}, \quad (13)$$

alors il est évident que

$$g_{1pol} = \text{Pol}(g_{1rec}) = t_{pol\phi}^\circ \text{Pol}(g_{0rec}) = t_{pol\phi}^\circ g_{0pol}. \quad (14)$$

Nous avons une rotation entre g_1 et g_0 exprimée en coordonnées rectangulaires; nous avons désormais une translation entre g_1 et g_0 exprimée en coordonnées polaires. On peut, pour s'en convaincre, comparer les figures 6 et 7. Nous allons appliquer ceci aux spectres de Fourier.

4.2.2.3. calcul du spectre circulaire

Nous appelons *spectre circulaire* la forme polaire du spectre de Fourier. Nous notons (f_θ, f_ρ) , $\begin{pmatrix} f_\theta \\ f_\rho \end{pmatrix}$ ou encore $f_{\theta\rho}$ un point de l'espace des fréquences représenté en coordonnées polaires. Par la suite, nous calculerons la transformée de Fourier (classique) du spectre circulaire, et nous noterons ff_θ , ff_ρ et $ff_{\theta\rho}$ les coordonnées et points du nouvel espace, et ainsi de suite ($fff_{\theta\rho} \dots$). Nous calculons le module des deux spectres G_0 et G_1 . En module, ces spectres G_0 et G_1 sont liés par une rotation à déterminer. Leur passage en coordonnées polaires nous fait passer d'une rotation à une translation.

Nous prenons le module des expressions des équations 1 et 3; soient $\mathcal{G}_0 = |\mathcal{F}[g_0]|$ et $\mathcal{G}_1 = |\mathcal{F}[g_1]|$.

Nous avons

- pour g_0 :

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_0(f_{xy}) &= |\mathcal{F}[g_0(x, y)]| \\ &= |G_0(f_{xy})| \end{aligned} \quad (15)$$

Translation et rotation par la transformation de Fourier

- pour g_1 :

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_1(f_{xy}) &= |\mathcal{F}[g_1(x, y)]| \\ &= |G_0(R^{-1}f_{xy})| \\ &= R^o(\mathcal{G}_0(f_{xy})). \end{aligned} \quad (16)$$

Nous prenons ensuite la forme polaire de ces expressions. Nous avons

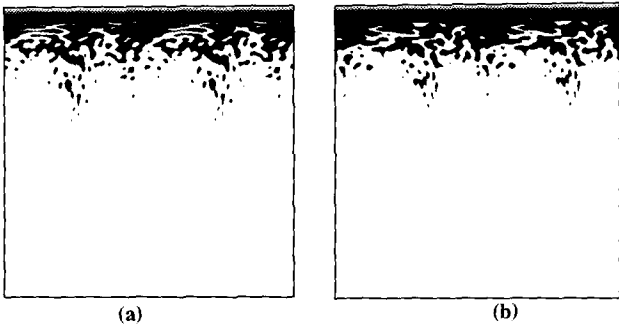
- pour g_0 :

$$\mathcal{G}_{pol_0}(f_{\theta\rho}) = \text{Pol}[\mathcal{G}_{rec_0}(f_{xy})] \quad (17)$$

- pour g_1 :

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{pol_1}(f_{\theta\rho}) &= \text{Pol}[\mathcal{G}_{rec_1}(f_{xy})] \\ &= \text{Pol}[R^o(\mathcal{G}_{rec_0}(f_{xy}))] \\ &= t_{pol_\phi}^o \mathcal{G}_{pol_0}(f_{\theta\rho}). \end{aligned} \quad (18)$$

$\mathcal{G}_{pol_0}(f_{\theta\rho})$ et $\mathcal{G}_{pol_1}(f_{\theta\rho})$ sont les modules des spectres circulaires des images g_0 et g_1 . Comme nous nous y attendions, nous trouvons que $\mathcal{G}_{pol_0}(f_{\theta\rho})$ et $\mathcal{G}_{pol_1}(f_{\theta\rho})$ sont liés par une translation dont on peut calculer le vecteur. On peut observer cette translation sur la figure 7.



Repère orthogonal, avec axe f_θ horizontal vers la droite et axe f_ρ vertical vers le bas, origine du repère en haut à gauche de l'image, largeur de l'image : 2π rad de 0 à 2π rad et hauteur de l'image : 256 ui^{-1} de 0 à 255 ui^{-1} , résolution $512 \times 512 \text{ pixels}$.

Figure 7. – Formes polaires des spectres de Fourier respectifs a) de la figure 6a et b) de la figure 6b. La rotation de la figure 6 se retrouve sous la forme d'une translation.

4.2.2.4. calcul du spectre circulaire croisé

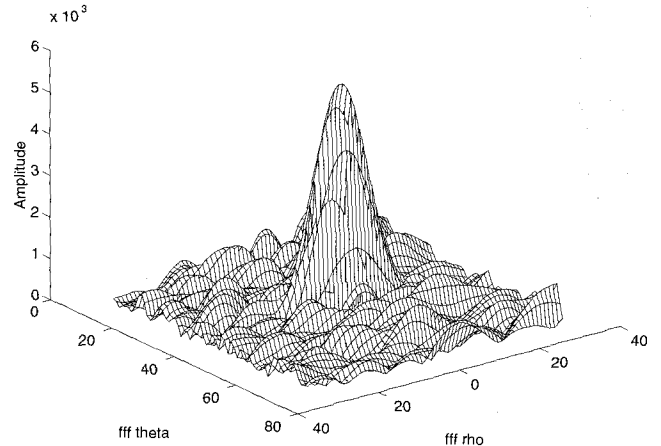
Nous appelons *spectre circulaire croisé* le spectre croisé des modules du spectre circulaire (considérés alors comme des images).

Nous calculons le spectre croisé $\psi_{pol}(ff_{\theta\rho})$ de $\mathcal{G}_{pol_0}(f_{\theta\rho})$ et $\mathcal{G}_{pol_1}(f_{\theta\rho})$, et trouvons une formule similaire à celle de l'équation 4 :

$$\begin{aligned} \psi_{pol}(ff_{\theta\rho}) &= \frac{\mathcal{F}[\mathcal{G}_{pol_1}(f_{\theta\rho})]}{\mathcal{F}[\mathcal{G}_{pol_0}(f_{\theta\rho})]} \\ &= e^{2t\pi(-t_{pol_\phi}'ff_{\theta\rho})} \frac{\mathcal{F}[\mathcal{G}_{pol_0}](ff_{\theta\rho})}{\mathcal{F}[\mathcal{G}_{pol_0}](ff_{\theta\rho})} \\ &= e^{2t\pi(-t_{pol_\phi}'ff_{\theta\rho})}. \end{aligned} \quad (19)$$

Le vecteur d'onde du spectre ψ_{pol} donnera la translation $-t_{pol_\phi}$ et donc l'angle ϕ de la rotation entre les images. La figure 8 montre le pic de Dirac correspondant à l'onde ψ_{pol} .

Transformée de Fourier du spectre circulaire croisé



Unité pour fff_θ et fff_ρ : *pixel*.

Figure 8. – Pic de Dirac du spectre de l'onde ψ_{pol} , correspondant à la translation de la figure 7 dont ψ_{pol} est le spectre croisé. La coordonnée correspondant au déplacement selon ρ (vertical sur la figure 7) est nulle. L'autre coordonnée correspond à l'angle de la rotation des figures 6 et 3. Le pic recherché se détache moins bien que celui de la figure 5 car le traitement de la rotation apporte du bruit supplémentaire (évoqué au § 5.1.1).

4.3. utilisation de l'angle calculé pour le recalage

Nous allons utiliser cet angle ϕ pour recalibrer en rotation les images et leur nouveau spectre croisé et ainsi résoudre l'équation 12. Il ne restera alors que la translation qui sera déterminée immédiatement.

Pour cela, nous appliquons une rotation centrale d'angle ϕ au spectre de l'image déplacée (figure 4a) et nous calculons le spectre croisé modifié Ψ_ϕ selon les formules suivantes :

- spectre non modifié (voir équation 12);

- spectre modifié :

$$\Psi_\phi(f_{xy}) = \frac{G_1(f_{xy})}{R_\phi^o(G_0(f_{xy}))} = e^{2t\pi(-t'f_{xy})} \frac{G_0(R^{-1}f_{xy})}{G_0(R_\phi^{-1}f_{xy})}. \quad (20)$$

Puisque ϕ est l'angle de la rotation entre g_0 et g_1 , alors $R = R_\phi$ et les formules se simplifient sous la forme d'une onde pure :

$$\Psi_\phi(f_{xy}) = e^{2t\pi(-t'f_{xy})}. \quad (21)$$

Une fois cette onde pure obtenue, son vecteur d'onde est, au signe près, le vecteur de translation.

5. application

5.1. aménagements de la méthode

Lors de la mise en œuvre, divers problèmes se sont posés et ont pu être résolus. Cette section expose les modifications que l'on doit apporter à la forme théorique de la méthode pour l'appliquer.

5.1.1. diminution du bruit sur le signal final

Le principal problème que l'on rencontre lorsque l'on veut mettre en œuvre cette méthode est le problème du bruit numérique. Nous avons vu que la méthode employée calcule l'onde monochromatique d'une translation (ou d'une rotation) puis calcule son vecteur d'onde par la transformation de Fourier. La transformée de Fourier d'une onde monochromatique est un signal de Dirac dont les coordonnées sont celles du vecteur d'onde. Dans la pratique, nous utilisons une transformation de Fourier discrète, et ce signal de Dirac est représenté par un pic de forte amplitude émergeant d'un bruit de fond (théoriquement, le bruit de fond est nul, et l'amplitude du pic égale la surface de l'image). Si le bruit est très important, l'amplitude du pic n'est pas significative par rapport à l'amplitude du bruit de fond, le pic n'est pas discernable et la méthode échoue. Nous présentons ici les principales causes de bruit et les solutions pour les éliminer (ou les atténuer).

Lorsque l'on décale une image, les éléments qui sont au bord du champ de vision disparaissent et de nouvelles formes apparaissent au côté opposé. Ces effets de bord dus au cadrage font que la translation n'est pas mathématiquement parfaite. Par voie de conséquence, les transformées de Fourier ne seront pas purement déphasées entre elles, et un signal parasite va se joindre à l'onde monochromatique issue de la translation et le bruit de fond autour du pic de Dirac évoqué plus haut va augmenter. Le rapport signal-sur-bruit est directement lié au pourcentage d'image commune (le bruit sera d'autant plus important que le décalage est grand). Le même phénomène se produit lors des rotations sur les coins de l'image (effets de coins). Nous utilisons des fenêtres du type de Hanning circulaire pour atténuer l'effet du décalage sur le bruit en pondérant faiblement les bords de l'image, ce qui repousse les limites de la détection (cf. § 5.2.1).

La méthode nécessite un certain nombre de transformations intermédiaires appliquées aux spectres : rotation, passage en coordonnées polaires... Ces opérations nécessitent des interpolations au niveau du maillage de la grille d'échantillonnage. L'interpolation consiste à calculer la valeur d'une fonction du plan (par exemple : image ou spectre) à partir des valeurs connues de cette fonction sur les nœuds d'échantillonnage voisins; nous avons utilisé l'interpolation bi-linéaire. Cette interpolation apporte du bruit sur le spectre croisé puisqu'elle revient à faire une approximation de la fonction du plan. On peut constater l'existence de ce bruit en comparant le pic de la figure 5 (dont l'obtention ne nécessite

pas d'interpolation) à celui de la figure 8 qui est plus émoissé. Avec les algorithmes de transformation de Fourier rapide, nous utilisons la technique de l'ajout de zéros (*zero-padding*) qui est une autre forme d'interpolation permettant de calculer les spectres avec une grille plus fine que la grille sur laquelle le signal d'origine est échantillonné (quatre fois plus fine dans notre cas). De cette façon, nous réduisons l'amplitude entre deux valeurs de nœuds voisins, diminuons l'incertitude sur l'interpolation bi-linéaire et réduisons notablement le bruit sur le spectre croisé. L'ajout de zéro est décrit dans de nombreux ouvrages, dont [5], et consiste à calculer le spectre de Fourier sur un nombre plus élevé d'échantillons, en complétant le signal par des plages de valeur zéro. L'ajout de zéros sur deux dimensions apporte des perturbations dans les directions horizontale et verticale que l'on élimine en utilisant les fenêtres de Hanning circulaires.

Lors du passage en coordonnées polaires, les zones centrales de l'image sont agrandies tandis que les zones périphériques sont contractées. On peut le constater en observant les figures 6 et 7. L'image d'un cercle au centre de l'image en coordonnées cartésiennes est une ligne occupant toute la largeur de l'image en coordonnées polaires. En coordonnées polaires, plus l'on s'approche de l'axe ($\rho = 0$), moins les *pixels* se différencient (puisque les lignes représentent des cercles de plus en plus petits), et moins ils sont susceptibles de porter de l'information sur la rotation. Les points du centre de l'image ne sont donc quasiment pas porteurs d'information sur la rotation. On remarque aussi qu'au delà d'une certaine distance, le signal est faible. Il est donc d'autant plus sujet au bruit et ne porte lui non plus que peu d'information. Lorsque l'on cherchera à lire la rotation, nous ne prendrons, du signal représenté figure 6, qu'une couronne dont nous choisirons les dimensions. Nous expliquons en détail ce procédé par la suite (cf. § 6.1.3). Le calcul du spectre circulaire croisé donnera ensuite le vecteur d'onde $t_{pol\phi} = (\phi, 0)$ ayant une coordonnée nulle et dont on ne cherchera le pic qu'aux alentours de l'axe ($\rho = 0$). L'autre coordonnée, quant à elle, sera *a priori* définie à π près à cause de la symétrie centrale hermitienne du spectre de l'image (l'image originale est réelle). Nous évoquons ce point plus loin (cf. § 5.2.3).

Toutes les méthodes présentées ici pour atténuer le bruit sont encore susceptibles d'être améliorées ce qui permettrait de réduire le bruit sur l'onde monochromatique, de rendre la méthode plus robuste à la fois dans le cas d'images originales bruitées et pour repousser les limites de la part nécessaire d'image commune. Il y a là un champ de recherche pour d'autres études à mener par la suite.

5.1.2. étude des distorsions de l'image

Les sources de distorsion sont de deux types, liées à la transformation projective d'une part, et à l'optique de la caméra d'autre part.

Les distorsions liées à la transformation projective de la scène sur le plan image sont d'autant plus importantes que l'ouverture de

champ de la caméra est grande. Dans le cadre des applications de la robotique mobile, les ouvertures de champs que nous avons utilisées ne dépassaient pas 30° pour la fenêtre d'analyse. Les divers tests menés lors de cette étude ont montré que pour ces ouvertures de champ, ce type de distorsions n'est pas significatif.

Toujours dans les applications de la robotique mobile, la focale des caméras que nous avons utilisées était de 8 mm. Une telle valeur de la focale entraîne des distorsions liées aux déformations géométriques introduites par l'optique de la caméra. La principale d'entre elles est la distorsion radiale de type tonneau.

En considérant le modèle sténopé, la distorsion radiale est définie comme une déformation s'effectuant sur la droite passant par le centre optique de l'image et le point du plan focal considéré. L'erreur relative est proportionnelle au carré de la distance du point image au centre optique de l'image.

Pour quantifier l'influence de la distorsion radiale nous avons calibré la caméra en déterminant ses paramètres intrinsèques et le coefficient de distorsion radiale. Le modèle utilisé est présenté dans [13].

La figure 9 représente deux images de la même scène. L'image de la figure 9a est brute (déformée) tandis que l'image de la figure 9b est corrigée. L'image de la figure 10 est la différence entre ces deux dernières. Nous voyons que la distorsion est plus faible dans la région du centre, qui correspond à notre zone d'analyse.

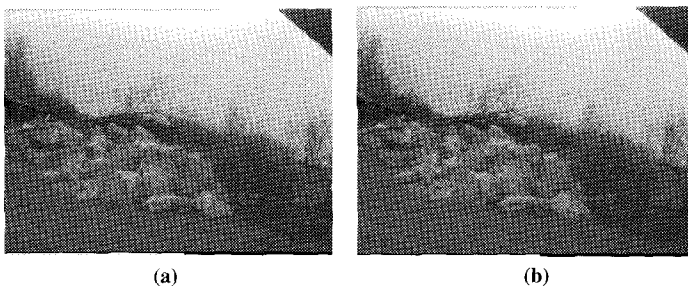


Figure 9. – Image avec distorsion radiale, ouverture de champ horizontale de $43,6^\circ$ et verticale de $33,4^\circ$. a) Image brute, b) Image corrigée.

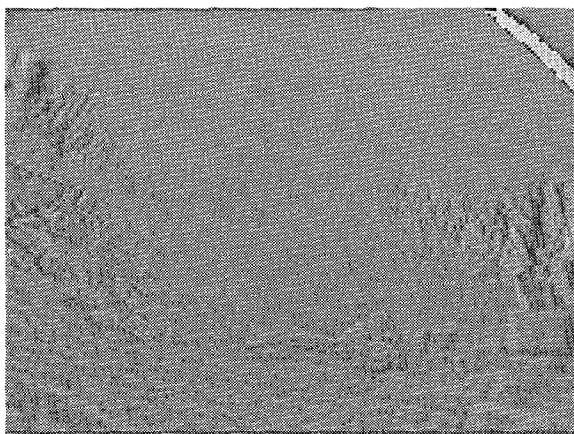


Figure 10. – Image de différence entre l'image déformée et l'image corrigée.

Les multiples essais de calcul du déplacement effectués nous ont permis de constater que les résultats étaient quasiment les mêmes avec ou sans correction. Ceci indique que l'influence de ces distorsions optiques est négligeable. Il n'est donc pas nécessaire de procéder à une correction systématique des images.

5.2. limites de la méthode

Le déplacement limite que la méthode puisse calculer à été quantifié en termes de part d'image commune nécessaire. Pour un déplacement en deçà de cette limite, la méthode fonctionne parfaitement, mais délivre à l'issue des calculs pour la rotation non pas un pic correspondant au vecteur d'onde $-t_{pol\phi}$ (résultat indiqué § 4.2.2) mais trois pics que nous explicitons ci-dessous.

5.2.1. part d'image commune

Comme nous l'avons vu, le succès du calcul du déplacement est conditionné par la détection des pics de rotation et translation. Les essais que nous avons effectués sur la méthode présentée ont permis de déterminer la part minimale d'image commune nécessaire pour réaliser le recalage. Expérimentalement, nous trouvons que cette part est de l'ordre de 55 %.

Cette limite atteint 25 % d'image commune nécessaire avec une translation sans rotation, ce qui amène à dire que le recalage en translation seule est beaucoup plus robuste. Nous verrons aussi dans les exemples de la partie 7 que ce recalage est plus précis.

5.2.2. apparition d'un pic de basse fréquence

A l'issue du calcul du spectre croisé des images corrigées en rotation (dernière étape de la méthode), on calcule la composante en translation du mouvement par la transformation de Fourier (rappel de la section 4.3). Cette dernière transformation de Fourier amène, en plus du pic recherché représentant la translation, un pic important situé sur le point $(0, 0)$ d'amplitude en général supérieure à celle du pic recherché. Ce pic est dû à des composantes continues et de basse fréquence dans le spectre croisé. De nouveaux aménagements devraient permettre dans le futur de l'éliminer (à partir d'un filtrage passe-haut du spectre croisé par exemple).

5.2.3. apparition d'un pic jumeau lié à la symétrie hermitienne

Le signal initial duquel nous prenons la transformée de Fourier pour le calcul du spectre circulaire croisé est réel. La forme polaire du module des spectres croisés a donc une symétrie centrale que l'on peut constater figure 6 et que nous avons évoquée à la fin du § 5.1.1. Ceci se traduit dans la transformée de Fourier du spectre circulaire croisé par la présence de deux pics jumeaux (*twin peaks*) maxima au lieu d'un unique maximum représentant la rotation modulo 2π . Ces deux pics sont d'amplitude égale,

et distants de la moitié de la largeur de l'image (la largeur de l'image représente 2π radians). L'image de la figure 8 étant un agrandissement, on ne voit pas le pic jumeau qui est distant de 256 *pixels*. La conséquence de cette symétrie et de ces pics jumeaux est une indétermination modulo π de l'angle de rotation. Ceci n'est pas un problème pour notre application, où les rotations de caméra ont des amplitudes inférieures à π . Cependant, là encore, de nouveaux aménagements devraient permettre dans le futur de supprimer ce pic jumeau (par exemple par l'ajout d'une composante imaginaire non symétrique dans les images réelles initiales qui empêcherait la symétrie centrale hermitienne des spectres) ou bien de repousser l'indétermination à l'étape ultérieure en calculant le vecteur de translation deux fois pour garder *in fine* le meilleur résultat (l'amplitude du pic servant de critère dans ce cas).

6. présentation des résultats

Nous présentons dans cette section l'application pas à pas de la méthode sur un exemple, ainsi que les résultats obtenus sur différents types d'images. Les images résultats intermédiaires de notre exemple ont été présentées tout au long de l'article pour illustrer les différentes étapes de la méthode.

6.1. analyse pas à pas d'un résultat

Les calculs sont effectués sur une sous-fenêtre située autour du centre optique et de taille 128×128 . C'est cette sous-fenêtre que nous désignons lorsque nous parlerons de l'image.

6.1.1. cas d'une translation seule

Les images de la figure 3 sont extraites de la figure 2 et présentent de 3a à 3b une translation de vecteur $(-7, 5)$. (exprimé en ui^{-1} ; ui est l'unité d'image et égal à la dimension de l'image). On prend la transformée de Fourier pour mesurer le vecteur d'onde de manière précise. Le pic de la figure 4b a pour coordonnées $(7, -5)$ en *pixels*. On peut lire cette valeur sur la figure 4b qui comporte 7 périodes en x et 5 périodes en y . Ces coordonnées $(7, -5)$ sont opposées à celles du vecteur de translation initial. L'amplitude du pic (amplitude absolue) est liée aux traitements intermédiaires. Dans le cas théorique parfait, l'amplitude du pic vaut 1 (avec une transformation de Fourier normalisée). Lorsque l'on s'approche des conditions limites des calculs de translation (trop grande différence entre les images, bruit sur les images sources...), l'amplitude du pic diminue et le niveau de bruit

augmente. Dans notre cas, l'utilisation de fenêtres de Hanning de volume non unitaire et par la suite d'autres filtres destinés à réduire le bruit modifient l'amplitude nominale du pic (ce qui explique les ordres de grandeur différents du pic des figures 5 et 8).

6.1.2. cas général

Pour les calculs avec rotations, les transformations de Fourier sont calculées sur des images étendues de taille 512×512 par ajout de zéros (cf. § 5.1.1). Le déplacement de 3a à 3c (translation de vecteur $(-10, -15)$ puis rotation de 0,5 rad) a le même angle de rotation que celui qui lie la figure 6a et la figure 6b. Lorsque l'on prend leur forme polaire, leur rotation se transforme en translation de vecteur $t_{pol\phi} = (\phi, 0)$ sur la figure 6 avec $\phi = 0,5/2\pi \times 512 \simeq 41$ (en *pixels*, c'est-à-dire 0,0796 *ui*). Le pic de Dirac de la figure 6 a pour coordonnées $(-41, 0)$ (en *pixels*). Lors du calcul du déplacement, on déduit de ces coordonnées que l'angle de rotation vaut $41/512 \times 2\pi \simeq 0,503$ (au lieu de 0,5 rad, c'est-à-dire une erreur de $0,18^\circ$).

Nous utilisons cet angle pour déterminer le vecteur de la composante de translation du déplacement. Une fois l'image 3c corrigée de l'angle calculé, nous mesurons la translation qui la lie avec l'image 3a de la même façon que l'on a résolu la translation en 6.1.1. Les transformations intermédiaires, notamment les changements de repère liés à l'utilisation de la transformation de Fourier rapide et de l'ajout de zéros font que les paramètres de translation ne se lisent pas dans ce cas directement sur les coordonnées du pic de Dirac. Connaissant ces transformations intermédiaires, les formules trigonométriques à appliquer se retrouvent facilement en s'inspirant de l'équation 11. Les transformations intermédiaires que nous avons appliquées, et les formules qui en ont découlé sont détaillées dans [10].

6.1.3. précision de la méthode et choix de la couronne

6.1.3.1. précision de la méthode

La connaissance que l'on peut avoir d'un angle de rotation entre deux images est limitée par la résolution numérique. Pour une image ayant N *pixels* de côté, considérée de rayon $N/2$, l'angle minimal discernable est le diamètre apparent d'un *pixel* du bord vu du centre de l'image, c'est-à-dire l'angle $\alpha_{min} = \arctan(2/N)$. Dans notre cas, $N = 128$, $\alpha_{min} \simeq 0,016$ rad $\simeq 0,89^\circ$. Inversement, 1 *pixel* d'erreur sur la coordonnée θ du pic de Dirac entraîne une erreur de $1/512 \times 2\pi \simeq 0,012$ rad $\simeq 0,70^\circ$, ce qui représente 0,79 *pixel* au bord de l'image et donc une erreur inférieure à α_{min} . Nous voyons que d'une manière générale, les résultats atteignent la limite de précision de la méthode lorsque la position du pic est bonne au *pixel* près.

6.1.3.2. choix de la couronne

Lors du passage d'une image des coordonnées cartésiennes aux coordonnées polaires, le centre a pour image l'axe ($\rho = 0$) dans la nouvelle représentation, et le cercle de rayon r a pour image l'axe ($\rho = r$). Les deux représentations (figure 6 et 7) sont numérisées sur des supports de taille 512×512 . Il s'ensuit que le cercle de rayon r , qui occupe une longueur de $2\pi r$ pixels dans la représentation rectangulaire, a pour image l'axe ($\rho = r$) pour θ de 0 à 2π qui occupe une largeur de 512 pixels. Chaque pixel situé à une distance r du centre de l'image subit lors du passage en représentation polaire un agrandissement de facteur $512/(2\pi r)$. Les points qui ne sont pas déformés sont situés à la distance $512/(2\pi)$ pixels du centre. Cette distance est appelée *rayon de référence*. La dilatation d'un point (proche du centre) a pour effet d'exagérer son importance. Il se trouve que les points au centre du spectre (correspondant aux basses fréquences spatiales) portent peu d'informations utiles au recalage en rotation. La contraction d'un point (loin du centre) entraîne une perte d'information, car un même nombre de pixels va représenter plus de points. Il est donc préférable de négliger les points trop proches du centre comme ceux qui en sont trop éloignés, et de chercher une zone de compromis. Nous avons déjà parlé de cette pratique au § 5.1.1, et nous avons choisi une couronne de rayons 0,1 fois à 1,1 fois le rayon de référence.

7. résultats sur différents types d'images

Un ensemble de tests a été effectué sur des images de différents types.

Différents contextes

- Planétaire;
- Extérieur naturel;
- Extérieur structuré;
- Intérieur.

Nous avons utilisé deux moyens d'acquisition différents : une caméra et un numériseur à plat (utilisé avec des photographies).

Dans le but de montrer la robustesse de la méthode, nous avons réalisé trois types de déplacement d'image : déplacement artificiel obtenu par des opérations géométriques sur les images, déplacement d'une photographie sur la surface d'acquisition du numériseur, déplacement obtenu par le mouvement réel de la caméra.

Les résultats sont présentés dans les tables 1 et 2, classées par type de déplacement. La table 1 indique pour chaque recalage le contexte des images, le moyen d'acquisition et le type de déplacement. La table 2 indique pour chaque décalage les valeurs

des déplacements, les valeurs calculées par notre méthode et l'erreur résultante.

Pour les trois premiers exemples, les valeurs nominales indiquées sont celles utilisées par le logiciel de déplacement. Pour l'image des figures 21 et 22, ce sont les paramètres du déplacement du bras de robot portant la caméra qui ont permis de calculer le déplacement nominal (les autres déplacements de caméra n'ont pas été faits par un robot à déplacement calibré). Pour les images suivantes, c'est le déplacement de points de repère (tels la règle visible sur les images de la figure 19) entre les deux images qui a permis de calculer le déplacement nominal.

Les erreurs sur le calcul de la translation sont toutes inférieures à deux pixels. Pour ce qui concerne les rotations, l'erreur est inférieure à α_{min} ($\simeq 0,89^\circ$, l'angle minimum discernable évoqué au § 6.1.3), sauf dans le cas des figures 26a-26b. Ces images sont obtenues à partir d'un mouvement important du robot, ce qui a entraîné un grand déplacement du point de vue. L'erreur pour ces figures vaut $1,46^\circ$; bien que plus élevée que les autres, cette erreur reste acceptable. L'erreur sur le déplacement des figures 24b-24c est nulle, car la rotation est nulle, et que le recalage en translation seule est plus précis.

Les résultats obtenus sont tout-à-fait satisfaisants pour les trois types de déplacement.

7.1. déplacement par logiciel

Les exemples suivants sont issus de nos travaux sur la navigation de robots mobiles [9] pour l'exploration planétaire du projet IARES (Illustrateur Autonome de Robotique pour Exploration Spatiale). La figure 11 représente une vue du site GEROMS du CNES, essentiellement constitué de cailloux et de rochers (simulation du sol de Mars). Les déplacements des images ont été réalisés par logiciel et ne présentent pas de distorsion.

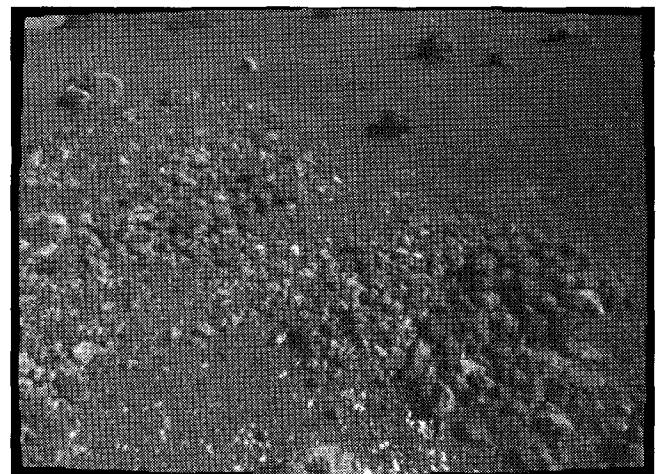


Figure 11. – Image du site GEROMS.

Table 1. – Types d'images traitées.

Image source (n° figure)	Image déplacée (n° figure)	Contexte	Moyen d'acquisition	Type de déplacement
12a	12b	environnement planétaire	caméra	logiciel
14a	14b	environnement planétaire	caméra	logiciel
16a	16b	environnement planétaire	caméra	logiciel
18a	18b	extérieur structuré	numériseur	mouvement image
20a	20b	vue non structurée	numériseur	mouvement image
22a	22b	intérieur	caméra	mouvement caméra
24a	24b	extérieur naturel	caméra	mouvement caméra
24a	24d	extérieur naturel	caméra	mouvement caméra
24b	24c	extérieur naturel	caméra	mouvement caméra
26a	26b	environnement planétaire	caméra	mouvement caméra

Table 2. – Résultats obtenus (sur les images de la table 1).

Image source	Image déplacée	Angle nominal (degrés)	Décalage x nominal (pixels)	Décalage y nominal (pixels)	Angle obtenu (degrés)	Décalage x obtenu (pixels)	Décalage y obtenu (pixels)	Erreur angle (degrés)	Erreur décalage (pixels)
12a	12b	89,95	0,00	20,00	90,00	0,00	19,00	0,05	1,00
14a	14b	44,97	-7,00	-18,00	45,00	-6,72	-18,73	0,03	0,78
16a	16b	57,29	10,00	-15,00	56,95	9,28	-15,89	0,34	1,14
18a	18b	26,25	10,60	10,42	26,02	9,86	10,15	0,23	0,79
20a	20b	-23,87	-30,00	-30,00	-23,20	-28,96	-30,39	0,67	1,11
22a	22b	-10,00	-19,52	-19,47	-9,84	-20,38	-17,75	0,16	1,92
24a	24b	-11,31	33,30	-3,03	-11,25	34,96	-2,97	0,06	1,66
24a	24d	-12,53	9,93	-3,37	-11,95	11,47	-2,81	0,58	1,64
24b	24c	0,00	19,00	-3,00	0,00	19,00	-3,00	0,00	0,00
26a	26b	8,38	-3,95	-12,53	9,84	-4,34	-13,33	1,46	0,89

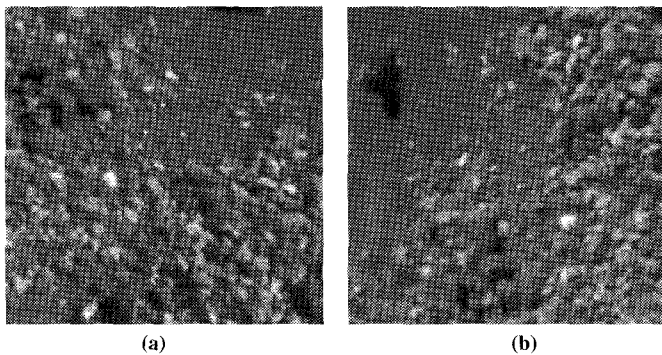


Figure 12. – a) et b). Deux sous-images extraites de la figure 11, déplacement artificiel par logiciel.

7.2. déplacement par mouvement de l'image sur la surface d'acquisition du numériseur

Les images suivantes ont été obtenues en utilisant un numériseur plat et les déplacements ont été réalisés en déplaçant les images sur la surface d'acquisition. Contrairement aux exemples précédents,

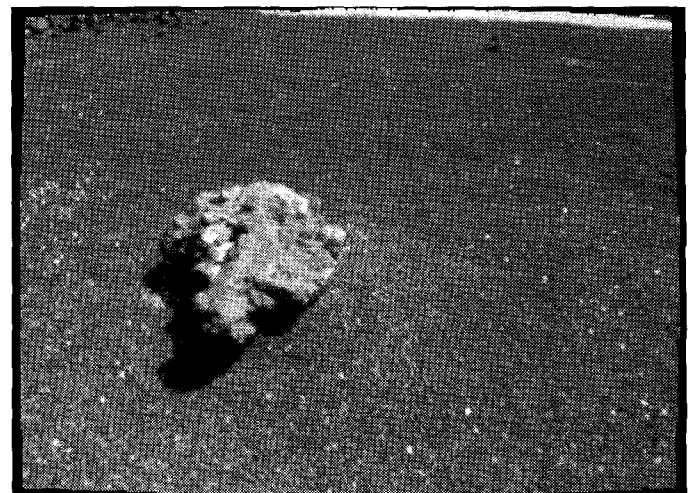


Figure 13. – Rocher.

ces déplacements sont issus d'un processus physique et non pas calculés artificiellement. Cependant, ce processus n'entraîne pas de distorsion.

Les figures 17 et 19 présentent respectivement un environnement structuré et un environnement non structuré.

Translation et rotation par la transformation de Fourier

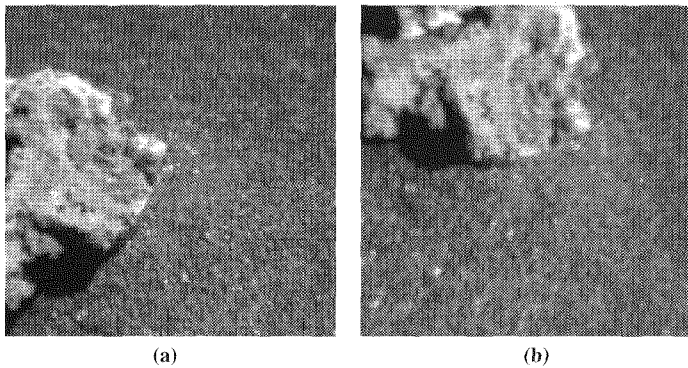


Figure 14. – a) et b). Deux sous-images extraites de la figure 13, déplacement artificiel par logiciel.



Figure 15. – Ombre du robot.

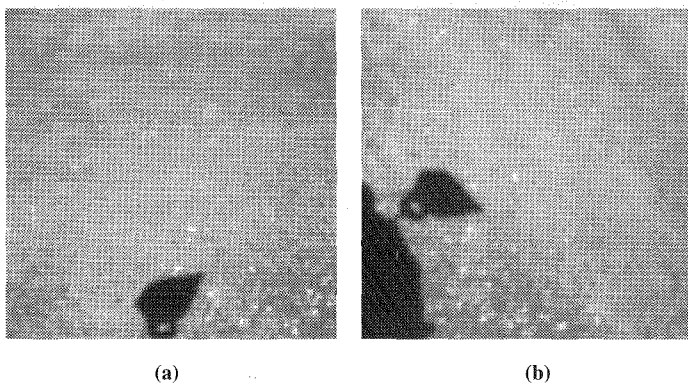


Figure 16. – a) et b). Deux sous-images extraites de la figure 15, déplacement artificiel par logiciel.

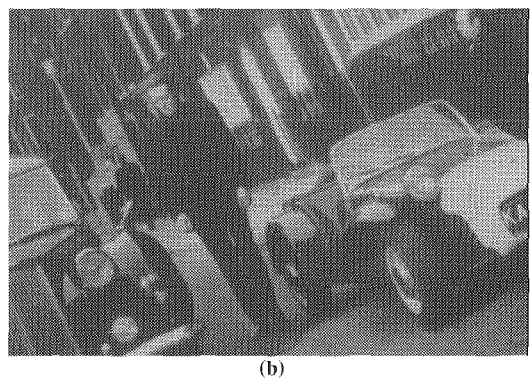
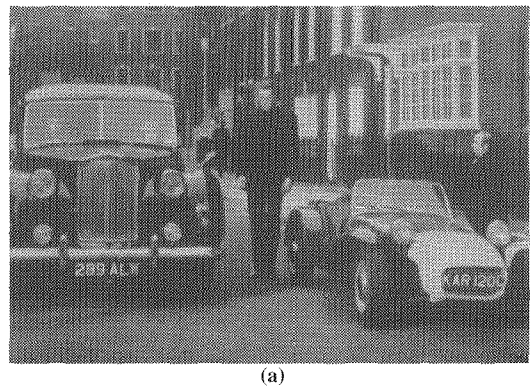


Figure 17. – a) et b). Images d'environnement extérieur structuré. Source : *The Prisoner* de Patrick McGooohan, 1967.

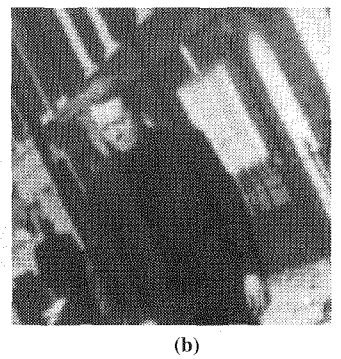
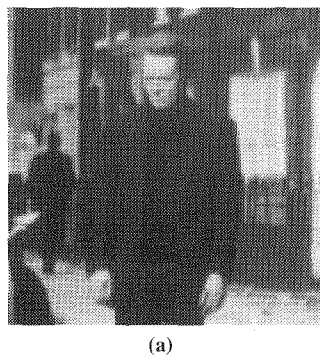


Figure 18. – a) et b). Sous-images extraites de la figure 17.

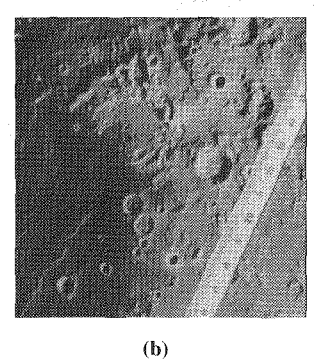
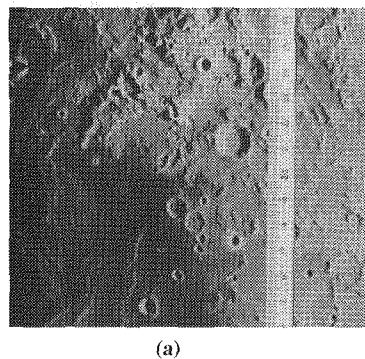


Figure 19. – a) et b). Images d'environnement non structuré. Source : Motomaro Shirao in *Ciel & Espace* n°307, novembre 1995.

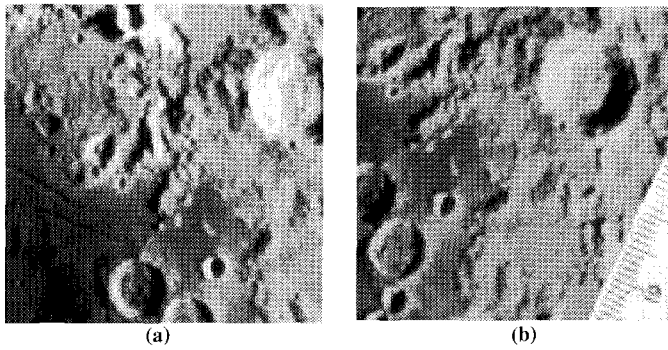


Figure 20. – a) et b). Sous-images extraites de la figure 19.

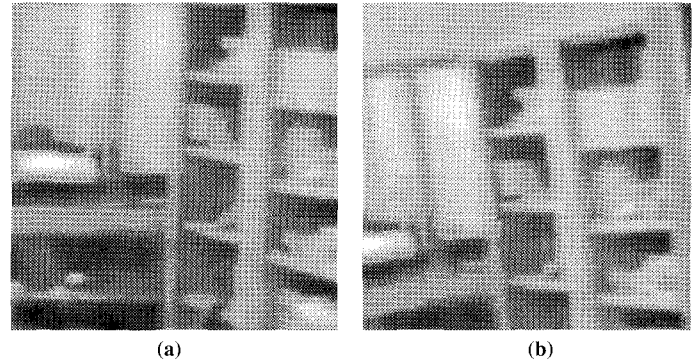


Figure 22. – a) et b). Sous-images extraites de la figure 21.

7.3. déplacement par mouvement de caméra

Les déplacements pour ces images ont été réalisés par mouvement de caméra. Ceci permet de montrer la validité de la méthode pour l'application en robotique mobile.

La figure 21 présente un environnement structuré. Les sous-images avec lesquelles nous avons calculé le déplacement ont été prises centrées sur le centre optique.

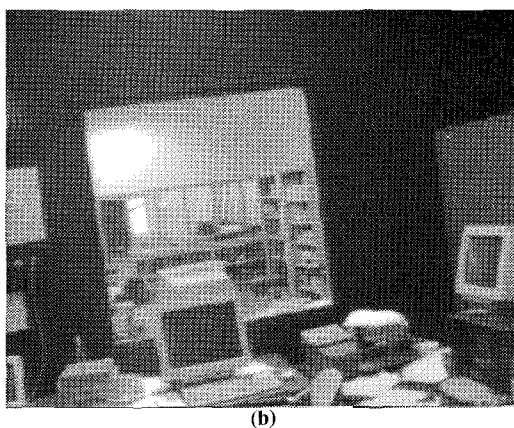
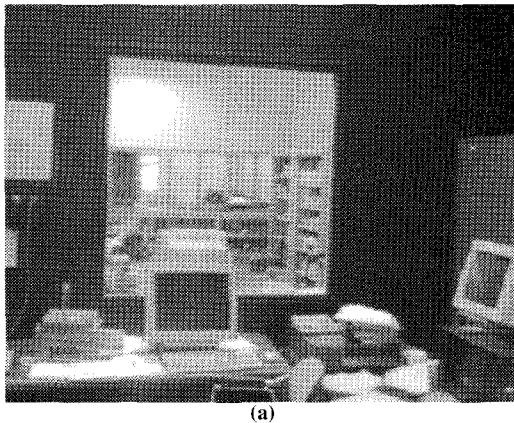


Figure 21. – Image d'environnement intérieur avec distorsion optique corrigée. Images prises dans les laboratoires du CNES.

Les figures 23 et 25 présentent un environnement non structuré. Les images de la figure 23 sont issues d'une caméra animée de mouvements de rotation (principalement axe optique et axe vertical). La modification de la position de la caméra est suffisamment faible pour que le changement de point de vue n'ait pas de conséquence sur les résultats.

Les images de la figure 25 illustrent les problèmes du changement de point de vue dans le cas de la robotique mobile. Pour ce faire, nous avons utilisé deux images prises depuis des points de vue très différents et avons extrait des sous-images telles que la zone commune soit suffisamment importante pour permettre le recalage. Les erreurs sur les résultats, bien qu'un peu plus élevées, restent dans le même ordre de grandeur.

Lors de l'application de notre méthode en robotique mobile, il sera souhaitable de veiller à ce que la fréquence d'acquisition des images soit suffisamment élevée pour ne pas avoir de points de vue trop différents d'une image à l'autre.

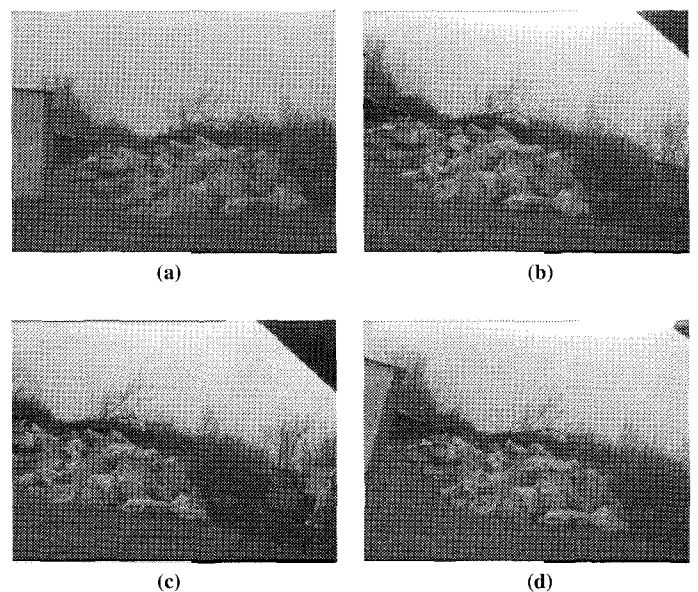


Figure 23. – a), b), c) et d). Images d'environnement extérieur naturel. Images prises au LAAS, distorsion optique non corrigée.

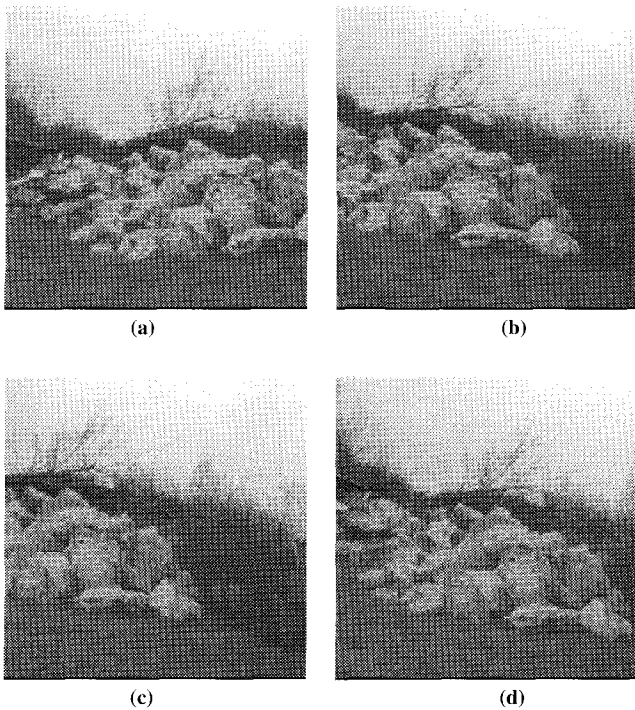


Figure 24. – a), b), c) et d). Sous-images extraites de celles de la figure 23.

8. conclusion

Nous venons de présenter une méthode de recalage d'image en translation et rotation. Les hypothèses de travail ont tout d'abord été posées; puis la méthode qui permet de déterminer les paramètres du déplacement de l'image. Les deux étapes de la méthode sont présentées. La première étape consiste à calculer la rotation présente dans le déplacement en prenant le module de la transformée de Fourier sous forme polaire (où la rotation induit une translation) et en y appliquant le recalage en translation classique par Fourier (corrélation de phase). Ce recalage en translation s'effectue en calculant le vecteur d'onde du déphasage dans le domaine des fréquences. La seconde étape consiste à calculer la translation seule qui reste après avoir recalé les images en rotation en utilisant l'angle calculé à l'étape précédente. Les aménagements nécessaires à l'application de la méthode ont ensuite été décrits, notamment pour éliminer les principales sources de bruit. Un exemple de calcul de mouvement par cette méthode a été détaillé, et des résultats sur divers types d'images ont été présentés.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants. Dans le cadre des hypothèses annoncées, le recalage fonctionne avec une bonne précision. La précision de localisation du pic de Dirac (et des paramètres du mouvement) est inférieure à deux *pixels* pour la translation et à l'angle minimum discernable pour la rotation. L'erreur est nulle pour la translation seule.

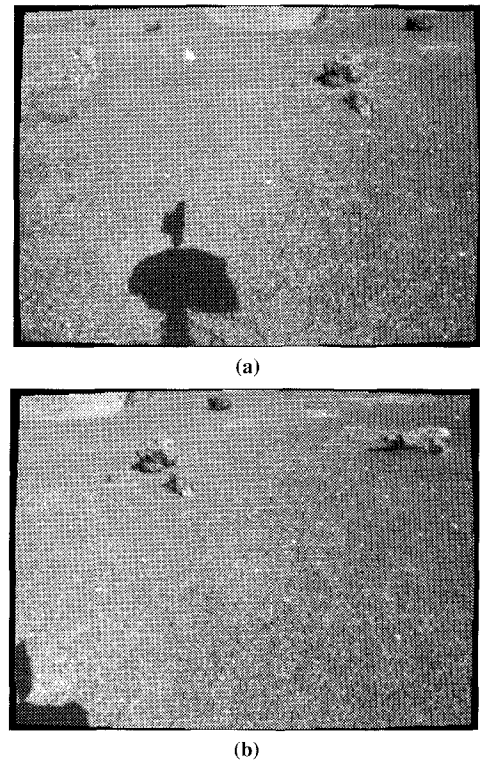


Figure 25. – Image avec déplacement du point de vue par un robot mobile, distorsion optique corrigé.

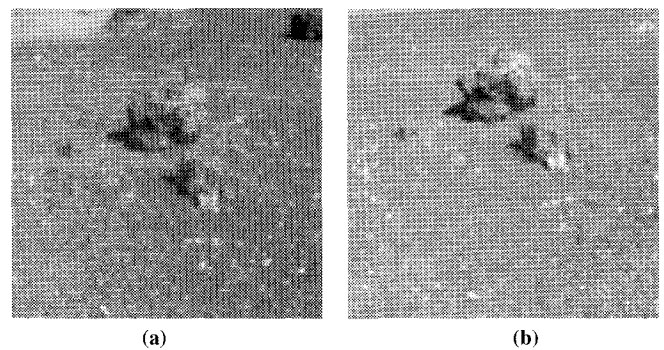


Figure 26. – a) et b). Sous-images extraites de celles de la figure 25.

La technique est très économique en temps de calcul : elle est constituée au total de six transformations de Fourier, deux conversions en coordonnées polaires et une rotation. La méthode par balayage de De Castro-Morandi [2] demandait au moins une transformation de Fourier par itération, avec un pas d'angle de l'ordre du degré au mieux (ce qui nous ramène à plusieurs centaines de transformations de Fourier à moins d'être certain d'avoir un faible angle de rotation). Notre technique peut éventuellement être implémentée en utilisant des boîtiers câblés de transformation de Fourier, et des algorithmes de rotation rapide du type de [1]. Ceci ouvre la voie des traitements en temps réel pour la robotique mobile (quelques images par seconde). Dans un premier temps, une implémentation sur VxWorks est en cours de réalisation en vue d'utiliser cette méthode sur le robot tout-terrain LAMA.

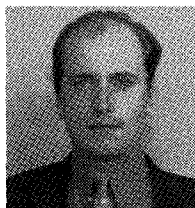
BIBLIOGRAPHIE

- [1] P.-E. Danielsson et M. Hammerin, "Note. High-accuracy rotation of images", *Computer Vision, Graphics and Image Processing, Graphical models and Image processing*, Vol. 54, n°4, juillet 1992, p. 340-344.
- [2] E. De Castro et C. Morandi, "Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms", *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol 9, n°5, 1987, p. 700-703.
- [3] L. Gottesfeld Brown, "A survey of image registration techniques", *ACM Computing surveys*, Vol. 24, n°4, 1992, p. 325-347.
- [4] M. Herrb, "Vision en mouvement pour la robotique mobile", *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier, n°853, Toulouse, février 1990.
- [5] S. M. Kay, *Modern spectral estimation, theory and application*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988, p. 485.
- [6] K.-I. Kanatani, "Camera rotation invariance of image characteristics", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, n°39, 1987, p. 328-352.
- [7] F. El Khali et M. A. Sid-Ahmed, "Machine recognition of optically captured machine printed arabic text", *Pattern recognition*, vol. 23, n°11, 1990, p. 199-217.
- [8] C. D. Kuglin et D. C. Hines, "The Phase Correlation Image Alignment Method", *Proceedings 1975 inter. conf.*, 1975, Cybernetics and Society, p. 163-165.
- [9] S. Lacroix, "Stratégies de perception et de déplacement pour la navigation d'un robot mobile autonome en environnement naturel", *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier, n°2000, Toulouse, avril 1995.
- [10] B. Marcel, "Détermination des mouvements de caméra par le déplacement de l'image", *Rapport d'étude DEA*, Laboratoire LAAS du CNRS et INSA, Toulouse, 1994.
- [11] R. A. Messner et H. H. Szu, "An image processing architecture for real time generation of scale and rotation invariant patterns", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, n°31, 1985, p. 50-66.
- [12] C. Olivier, K. Romeo-Pakker et A. Rabiha, "Un descripteur de formes invariant par rotation et changement d'échelles", *Actes 15^e colloque GRETI*, Juan-les-Pins, 18-21 septembre 1995, p. 677-680.
- [13] J.-J. Orteu, "Application de la vision par ordinateur à l'automatisation de l'abattage dans les mines", *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier, n°1044, Toulouse, novembre 1991.
- [14] T. Peli, "An algorithm for recognition and localization of rotated and scaled objects", *Proc. IEEE*, n°69, 1981, p. 483-485.
- [15] Q. Wang et R. J. Clarke, "Estimation of general 2D motion using Fourier descriptors", *IEEE Proceedings on vision image and signal processing*, vol. 141, n°2, avril 1994, p. 700-703.

Manuscrit reçu le 25 juin 1996.

LES AUTEURS

Baptiste MARCEL



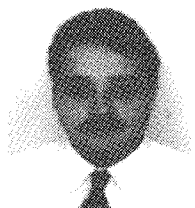
Baptiste Marcel est doctorant au sein du Groupe de Télévision et Traitement du Signal-Image du Laboratoire d'Electronique de l'ENSEEIH (École Nationale Supérieure d'Électrotechnique, Électronique, Informatique et Hydraulique de Toulouse). Il a fait des études en informatique à l'INSA (Institut National des Sciences Appliquées) de Toulouse, et a effectué son stage de DEA au LAAS du CNRS sur le problème du recalage d'image au sein du groupe Robotique et Intelligence Artificielle.

Maurice BRIOT



Maurice Briot est professeur à l'Université Paul Sabatier où il dirige l'IUP Systèmes Intelligents. Il est chercheur au sein du groupe Robotique et Intelligence Artificielle du LAAS du CNRS. Ses principaux axes de recherche (vision artificielle et micro-robotique) concernent la perception de l'environnement des robots mobiles.

Rafaël MURRIETA



Rafael Murrieta est doctorant au sein du groupe Robotique et Intelligence Artificielle du LAAS du CNRS où il a effectué son stage de DEA sur le problème de l'identification de régions dans des images de scènes naturelles. Il a fait ses études à l'ITESM Campus Monterrey (Mexique) et a participé en 1996, dans le cadre de sa thèse, au projet "Autonomous Observer" à l'université de Stanford (Californie). Ses études sont financées par le CONACyT-SFERE et la SEP.