

Approche de la rugosité surfacique par analyse d'image

Sandrine Martinez, Michel Jourlin

Laboratoire Image, Signal et Acoustique - CNRS EP0092
École Supérieure de Chimie, Physique, Electronique de Lyon
43, Boulevard du 11 Novembre 1918 - BP2077
69616 Villeurbanne Cedex

RÉSUMÉ

Pour caractériser le relief des matériaux, les techniques conventionnelles de profilométrie par contact ont été remplacées depuis une dizaine d'années par des instruments permettant d'acquérir le relief, généralement échantillonné, d'une surface. Les critères statistiques normalisés de rugosimétrie pour des profils de surface ne sont donc plus adaptés à la nature tridimensionnelle de l'information de surface.

Nous proposons dans cet article de nouveaux outils d'évaluation des écarts de relief représentés par les images de topographie. Leurs avantages principaux sont : la proximité de leur définition par rapport aux critères de profils, leur facilité d'implémentation et d'utilisation en traitement d'images, et leur capacité à quantifier l'homogénéité de la rugosité des surfaces.

ABSTRACT

In characterization of material surfaces, classical stylus techniques have been replaced for about ten years by new instruments which main specificity is the three-dimensional acquisition of the topography of the sample. Hence, the standardized statistical criteria in measurement of surface roughness on profiles are not fitted any more to three-dimensional nature of the acquired information.

We propose in this paper new evaluation methods of surface roughness adapted to topographical images. The main advantages of these methods are the likeness between their definition and the conventional parameters definition, the facility to create and apply them in image processing, and their capability to qualify and quantify the roughness homogeneity of the surfaces.

1 Introduction

Avant les années 90, les seuls instruments d'exploration du relief des matériaux à une échelle micrométrique étaient les palpeurs mécaniques : ils permettaient d'acquérir des profils de surface sur lesquels étaient quantifiés les écarts de relief (ou rugosité) [1]. Mais ils ont très vite montré leur limite face aux exigences croissantes en matière de qualité. Ils imposaient par exemple l'intervention d'un expert pour choisir les profils les plus représentatifs de la surface, empêchant ainsi toute automatisation, leur pointe rayait fréquemment l'échantillon, modifiant le profil réel, ou encore les aspérités de taille inférieure à la taille de la pointe utilisée étaient négligées lors du balayage. Mais il persistait surtout une incohérence entre la volonté d'étudier des surfaces et les données effectivement étudiées, qui n'étaient que des sous-espaces des surfaces.

Depuis, de nouvelles techniques d'acquisition ont été élaborées pour supprimer ces défauts. On dispose ainsi aujourd'hui de la profilométrie optique [2], de la microscopie à champ proche [2], de la microscopie confocale à disque tournant ou à balayage laser [3]. Toutes permettent d'acquérir la topographie, généralement échantillonnée, d'une surface, avec une résolution allant de quelques nanomètres jusqu'au centimètre, selon la technique utilisée. Une telle acquisition fournit généralement une image dite de topographie, dont les niveaux de gris codent l'altitude de chaque point de la surface.

Or, les paramètres conventionnels de rugosimétrie ont été établis par rapport au palpeur mécanique. Ils sont donc définis pour un espace à deux dimensions ($X-Z$) constitué du profil acquis. Il existe donc aujourd'hui une inadéquation entre ces coefficients normalisés et l'espace tridimensionnel dans lequel s'inscrit l'image de topographie ($X-Y-Z$) et où ils doivent être calculés.

2 Méthodes usuelles de rugosimétrie surfacique

La surface développée : parmi les méthodes courantes visant à quantifier les écarts de topographie à partir d'images à niveaux de gris, une des plus répandue est celle de la surface développée. Elle revient à calculer le rapport entre l'aire de la surface échantillonnée (somme des aires des facettes triangulaires) et l'aire de sa projection sur le plan ($X-Y$). Malheureusement, l'information qu'elle apporte est relativement limitée.

Les paramètres statistiques : ce terme regroupe une grande majorité des coefficients de la norme expérimentale AFNOR E05-015 pour profils [1]. Il s'agit principalement de moments statistiques, chacun décrivant assez bien un aspect de la morphologie du relief. La norme témoignant de leur

importance, on a voulu les adapter aux images de surface dès qu'il a été possible de travailler sur ce nouveau support. La démarche pour cette adaptation est la décomposition de l'espace image à trois dimensions (X-Y-Z) en un ensemble de profils sur lesquels le paramètre choisi est calculé, puis moyenné pour quantifier les écarts sur toute la surface [4][5].

Voici par exemple, le coefficient R_a , écart moyen arithmétique, défini dans la norme AFNOR suivant :

$$R_a = (1/LB) \int_{LB} |Z(x) - Z_f(x)| dx \quad (2.1)$$

Le terme Z_f est le résultat du préfiltrage appliqué au profil et vise à séparer les écarts de rugosité des écarts d'ondulation et/ou de forme. Généralement, ce filtre est un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure f_c dépend de la longueur d'onde des ondulations. La longueur de base LB est alors définie par

$$LB = (5f_c)^{-1} \quad (2.2)$$

Pour une image de $M \times N$ pixels, décomposable en N profils, l'expression (2.1) devient :

$$R_a = (1/M \times N) \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |Z(i,j) - Z_{f_j}(i)| \quad (2.3)$$

Mais cette décomposition nous apparaît insuffisante : traiter une surface comme un ensemble de profils de relief indépendants annule tous les avantages que procurent les nouveaux systèmes d'acquisition sur la connaissance tridimensionnelle du relief.

De plus, la surface étudiée est souvent anisotrope, selon les phénomènes physiques ou chimiques dont elle est l'objet ; la condition d'homogénéité des surfaces garantissant la bonne représentativité des paramètres n'est donc pas toujours vérifiée.

3 Approche par traitement d'image

La nouvelle méthode de caractérisation des écarts de relief que nous proposons ici met à profit des outils simples issus du traitement d'image. Ils répondent en effet à la nécessité de prendre en compte le support bidimensionnel (X-Y) des données traitées (niveaux de gris ou Z).

3.1 Technique d'acquisition employée

Les images topographiques que nous nous proposons d'analyser ici en terme de rugosité sont obtenues par microscopie confocale à disque tournant (ou TSM pour Tandem Scanning Microscope) [3]. La spécificité de cette technique est sa capacité à isoler une ligne de niveau de l'objet. Un tel microscope relève de la microscopie optique conventionnelle. Il possède en outre des sources de lumière et des détecteurs ponctuels créés par les perforations de quelques dizaines de microns de diamètre d'un disque en rotation. Seuls les rayons réfléchis par l'échantillon au niveau du plan focal de l'objectif traversent les détecteurs pour atteindre le capteur (caméra CCD, oeil, ...). En couplant le TSM à un système d'acquisition vidéo et à un ordinateur chargé de traiter toutes les lignes de niveaux

observées pendant un déplacement vertical de l'échantillon, on obtient une reconstruction du relief de la surface (cf. figure 3.1) sous forme d'une image à niveaux de gris, de calibration en X-Y-Z connue. Les niveaux de gris sombres correspondent alors aux "vallées" du relief et les niveaux de gris clairs aux "crêtes".

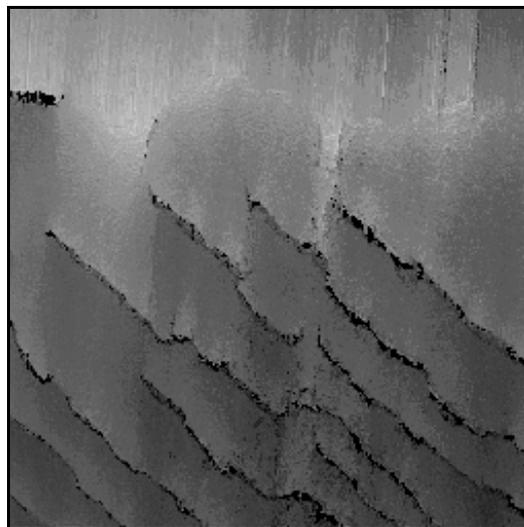


Figure 3.1 : image topographique d'un échantillon métallique après fraiseage.

3.2 Principe général de la méthode

Nous proposons pour chaque descripteur statistique connu, tel que R_a , R_t ou R_q , son opérateur équivalent en trois dimensions sous forme d'un masque de filtrage très simple à créer et à utiliser [6]. La taille et la forme de ce masque délimiteront la région élémentaire choisie, ou voisinage, pour laquelle l'opérateur sera calculé. Quand tous les voisinages sont traités, ce filtrage particulier génère une nouvelle image, que nous appellerons l'image de rugosité, illustrant les écarts de rugosité de régions élémentaires au sein du relief acquis.

En complément de cette représentation spatiale, il est conseillé de calculer la moyenne et l'écart-type du coefficient sur toutes les régions élémentaires. Cela permet d'une part des comparaisons numériques des rugosités de surfaces différentes. D'autre part, un fort écart type indiquera que la surface est relativement anisotrope et que le coefficient moyen calculé est peu représentatif.

A une présentation exhaustive des paramètres statistiques adaptés aux images topographiques, nous préférons exposer le principe simple de cette transposition à l'aide de l'exemple précédent R_a .

Appliquer la notion de filtrage d'ondulation et de forme à une image de topographie se fait relativement simplement : le filtrage passe-bas permettant d'obtenir l'image $Z_f(i,j)$ des écarts d'ondulation est largement connu et utilisé en traitement d'images ; la notion de longueur de base LB peut se traduire en terme de voisinage de base VB dont la taille dépendra, comme LB , de la longueur d'onde des ondulations, et pour lequel une forme homogène de type

circulaire sera conseillée. Soit $Z(i,j)$ le niveau de gris du pixel (i,j) de l'image de topographie et $V(i,j)$ le voisinage de base centré sur ce pixel. On définira alors le nouveau paramètre de rugosité surfacique R'_a au pixel (i,j) par :

$$R'_a(i,j) = (1/n) \sum_{(k,l) \in VB(i,j)} |Z(k,l) - Z_i(k,l)| \quad (3.1)$$

avec n , le nombre de pixel formant le voisinage VB :

$$n = \text{Card} \{ (k,l) \in VB(i,j) \} \quad (3.2)$$

Le calcul de ce paramètre de rugosité surfacique sur tout le relief suivant l'équation 3.1 se traduit par une nouvelle image, l'image de rugosité $\{R'_a(i,j)\}$, dont la figure 3.2 est une illustration.

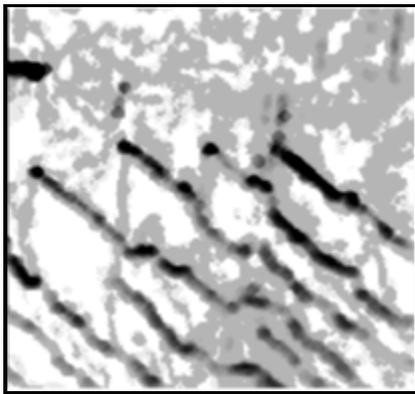


Figure 3.2 : image de rugosité R'_a du relief illustré dans la figure 3.1.

Suivant le même principe que R_a , de nombreux paramètres définis dans la norme AFNOR peuvent être traduits en terme de filtrage d'image topographique et générer les images de rugosité correspondantes.

3.3 Estimation qualitative

Ce type d'image est un bon outil d'appréciation de la rugosité surfacique d'un matériau : il permet, dans une première étape, une estimation visuelle immédiate des écarts de relief. La figure 3.3 donne les résultats d'acquisition d'un métal laminé, placé suivant deux directions perpendiculaires sous le microscope TSM. On y observe notamment les stries dues au laminage.

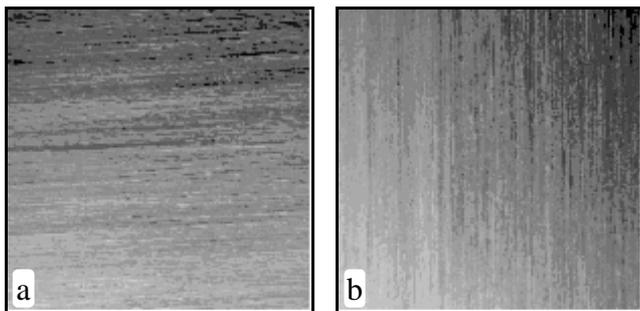


Figure 3.3 : topographies d'un échantillon laminé suivant deux angles d'acquisitions, 0° et 90° .

Leurs images R'_a respectives (dont une seule a été représentée ici) sont très similaires et homogènes. On peut donc déduire de cette simple observation que les écarts de relief sont assez uniformes et faibles.

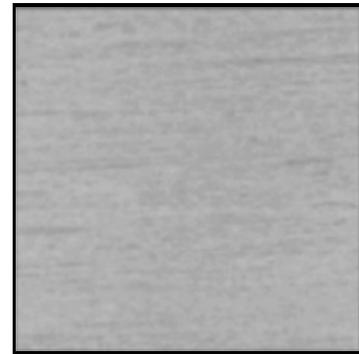


Figure 3.4 : image de rugosité R'_a du relief illustré dans la figure 3.3.a.

Mais l'avantage principal d'une telle représentation réside dans sa nature même. En effet, une image de rugosité peut être modifiée au même titre que toute autre image, par seuillage, rehaussement, changement de palette, etc. pour faire ressortir ou obtenir toute information complémentaire. Par exemple, un simple seuillage binaire permet de sélectionner les zones les plus rugueuses.

3.4 Estimation quantitative

Si une image de rugosité renseigne sur l'ordre de grandeur et la distribution spatiale des écarts de relief, il est aussi nécessaire de les quantifier. Pour cela, nous proposons comme mesure du paramètre étudié, sa moyenne, calculée sur tous les voisinages $VB(i,j)$, accompagnée de son écart-type. Celui-ci est indispensable puisqu'il renseigne sur l'isotropie (ou non) de la surface et la représentativité du résultat numérique obtenu.

Pour estimer la fiabilité de cette nouvelle méthode de quantification, trois paramètres statistiques très courants [6][1], ont été, dans un premier temps, estimés suivant la formule 2.3, sur les lignes de profil prélevées sur les topographies de la figure 3.3.

	Acq. 0°	Acq. 90°	Ecart
R_a (μm)	0.69	1.07	55.54%
R_q (μm)	0.83	1.04	24.71%
R_t (μm)	57.48	69.56	21.02%

Tableau 3.1 : valeur moyenne des paramètres suivant une décomposition par profils.

Les résultats du tableau 3.1 montrent de très forts écarts de mesure selon la direction de prélèvement des profils sur

la surface (perpendiculaires ou parallèles aux stries du laminage).

Les mêmes calculs ont été réalisés avec la méthode proposée dans cet article, à savoir une décomposition du relief en régions élémentaires. Les résultats sont regroupés dans le tableau 3.2.

	Acq. 0°	Acq. 90°	Ecart
R_a (μm)	0.57	0.60	4.95%
R_q (μm)	1.46	1.54	5.20%
R_t (μm)	11.61	12.11	4.28%

Tableau 3.2 : valeur moyenne des paramètres suivant une décomposition par régions.

Les différences de mesure sur le même relief, acquis suivant deux directions perpendiculaires, apparaissent beaucoup plus réduites dans ce dernier cas. La direction des stries de laminage n'a que très peu d'influence sur ces nouveaux paramètres surfaciques.

D'autres études quantitatives ont été menées à partir d'échantillons servant de référence pour les mesures d'états de surface (Etalons de surfaces techniques du Laboratoire Central de l'Armement - maintenant ETCA) . Les résultats confirment tous la meilleure fiabilité des critères lorsque l'approche d'analyse du relief par voisinage est adoptée.

4 Conclusions et perspectives

Ce travail fait appel à des concepts courants de traitement d'images (voisinage, filtrage statistique) pour une approche classique de l'estimation de la rugosité surfacique. Il constitue une première étape d'une étude plus générale visant l'analyse des images de relief à l'aide d'outils de traitement et d'analyse d'images, ainsi que d'outils mathématiques plus fondamentaux. Ainsi peut-on déjà introduire la fractalité à travers le choix de la taille de VB, c'est-à-dire l'échelle d'étude du relief, ou la morphologie mathématique dont certains opérateurs peuvent s'exprimer en terme d'usinage de surface, ou encore la notion de métrique, indispensable lorsque les termes de *mesure* ou d'*écarts* de relief sont évoqués.

5 Références

- [1] Michel A. "Caractérisation et mesure des microgéométries de surface", Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R 1230, pp. 1-20, 1989.
- [2] Poon C. and Bhushan B. "Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler", Wear, vol. 190, pp. 76-88, 1995.

[3] Wilson T. "Confocal Microscopy", Ed. T. Wilson, Academic Press, 1990.

[4] Anamalay R., Kirk T., and Panzera D. "Numerical descriptors for the analysis of wear surfaces using laser scanning confocal microscopy", Wear, vol. 181-183, pp. 771-776, 1995.

[5] Lange D., Jennings H. and Shah S. "Analysis of surface roughness using confocal microscopy", J. Mater. Sci, vol. 28, pp. 3879-3884, 1993.

[6] Martinez S. "Reconstruction 3D par microscopie confocale et application à la mesure de rugosité", Rapport interne CPE-Lyon, 1993.