

Mesure de profondeur dans un microscope électronique à balayage par autofocus

Soukalo Dembéle

Département AS2M / Institut FEMTO-ST, UFC, CNRS,
UTBM, ENSMM
24 rue Savary
25000 Besançon - France
soukalo.dembele@femto-st.fr

Nadine Piat

Département AS2M / Institut FEMTO-ST, UFC, CNRS,
UTBM, ENSMM
24 rue Savary
25000 Besançon - France
nadine.piat@femto-st.fr

Résumé — *Dans ce papier nous présentons une méthode d'estimation de la profondeur dans un microscope électronique à balayage (SEM). Elle est basée sur la mise au point automatique par asservissement visuel dont le grand avantage est la rapidité : nous obtenons une vitesse deux fois plus rapide que la méthode traditionnelle par recherche itérative. La résolution de la méthode, déterminée par la profondeur de mise au point du microscope, atteint une dizaine de micromètres. La méthode est validée sur des cibles de différents matériaux dans un SEM à effet thermoionique.*

Mots-clés — *Microscope électronique à balayage, autofocus, profondeur à partir de la netteté, micro-manipulation*

I. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, le microscope électronique à balayage (SEM) a émergé comme un système de vision utile pour la manipulation robotique de micro-objets. Son principal avantage réside dans sa capacité à produire des images avec une résolution élevée (supérieure à 1 nm), une large gamme de grossissements (jusqu'à X2.000.000) et une grande profondeur de champ. Autant il est aisé d'estimer avec précision la position X et Y d'une cible pour réaliser son positionnement en utilisant l'asservissement visuel [1], autant il est difficile d'en faire de même pour la position Z . La raison en est le mode de formation des images qui est de type projection parallèle [2]. Or cette coordonnée est nécessaire pour un positionnement en 3 dimensions.

Pour résoudre le problème certains travaux ont utilisé la méthode stéréoscopique [3] - [5]. Puisque un seul capteur d'imagerie est disponible la plupart d'entre eux ont essayé d'acquérir les images stéréoscopiques en inclinant l'échantillon avec un angle spécifique. Cependant, les défis majeurs sont de déterminer l'angle d'inclinaison avec précision et de trouver les correspondances entre les images acquises bruitées. Une solution alternative à l'inclinaison consiste à utiliser un système de faisceau ionique focalisé (FIB) avec le SEM [4]. Mais l'addition du FIB augmente le coût global du système.

Outre la méthode stéréoscopique, la profondeur peut être estimée à l'aide de l'information de netteté [6] - [8]. L'idée sous-jacente est de trouver l'image nette (avec le maximum de netteté) dans la séquence d'images acquises le long de l'axe « optique ». La profondeur correspond à la position de cette image nette. Cette méthode est habituellement utilisée en microscopie optique où la profondeur de mise au point est faible par rapport celle du SEM pour le même grossissement. Toutefois avec le SEM les tâches de manipulation sont réalisées à des grossissements très élevés, la profondeur de mise au point est alors suffisamment faible pour permettre des mesures de profondeur. En outre, la vitesse de calcul et la simplicité rendent la méthode appropriée pour la manipulation. La seule limitation est la résolution des mesures déterminée par la profondeur de mise au point : elle est estimée à 10 μm . Dans ces travaux, la variance normalisée est utilisée pour estimer la netteté de l'image et la profondeur est calculée en balayant tout l'intervalle de mise au point : méthode itérative [9]. Or pour un SEM avec un grand intervalle de mise au point, calculer la netteté à chaque pas conduit à un processus long.

Dans cet article nous présentons également une méthode de mesure de profondeur dans un SEM utilisant l'information de netteté. Le grand mérite de notre approche par rapport à la littérature (méthode itérative) réside dans sa capacité à calculer la profondeur rapidement : nous obtenons une vitesse deux fois plus élevée que la méthode itérative. L'idée de base de notre méthode est l'autofocus par asservissement visuel où l'image nette est obtenue en maximisant la netteté grâce à la commande du pas de mise au point. Nous commençons d'abord par montrer comment la mise au point de l'instrument peut être contrôlé automatiquement à l'aide l'information de netteté. Nous décrivons ensuite comment ce résultat peut être utilisé pour estimer la profondeur de sous-régions en deux phases de fonctionnement qui améliorent la vitesse de la méthode. Les concepts sont ensuite validés sur des échantillons manipulés à l'intérieur d'un SEM.

II. SYSTEME EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental servant de support aux travaux comprend un SEM à effet thermoionique (à filament de tungstène) de modèle JSM 820 équipé d'une électronique DISS5 et d'un PC de travail distant (Intel Core 2 Duo, processeur 3,16 GHz et 3,25 Go de RAM). Avec ce SEM la distance focale (qui définit la distance de travail W) maximale autorisée est de 50 mm subdivisée en 4000 pas de focalisation (F). DISS5 est responsable de l'envoi des commandes et de la réception des images du SEM. Les images sont analysées dans le PC ainsi que la génération des commandes de mise au point et d'acquisition. Pour toutes les expériences, les images de 512 x 512 pixels proviennent du signal du détecteur d'électrons secondaires.

DISS5 traduit la distance de travail W en pas de focalisation F selon une fonction non linéaire représentée à la figure 1. Elle peut être décrite par le modèle suivant:

$$\text{éq. 1} \quad \left[\begin{array}{l} W=50 \quad \forall F \leq 813 \\ W=1 \quad \forall F \geq 1713 \\ W = \sum_{i=0}^{i=4} a_i F^i \quad \forall 813 < F < 1713 \end{array} \right]$$

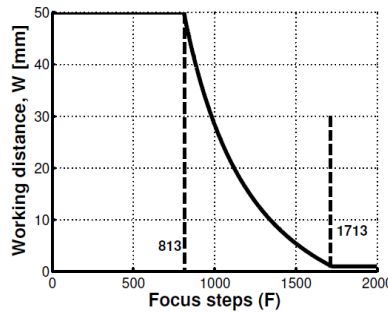


Figure 1. RELATION LIANT DISTANCE DE TRAVAIL ET PAS DE FOCALISATION

III. AUTOFOCUS PAR ASSERVISSEMENT VISUEL

Dans un SEM les images sont formées par balayage de la surface de l'échantillon au moyen d'un faisceau d'électrons focalisé. Pour utiliser les images pour l'estimation de profondeur il est nécessaire d'estimer leur netteté d'abord. Cette information est utilisée pour réaliser la mise au point de l'appareil et ensuite estimer la profondeur.

A. Estimation de la netteté

De nombreux estimateurs de netteté sont disponibles dans la littérature [10] : gradient, variance, ondelettes, ... Appliqués sur les images acquises le long de l'axe « optique », ils sont maximaux pour l'image obtenue lorsque l'échantillon est dans le plan focal. Dans nos travaux précédents [11], nous avons évalué les estimateurs les plus couramment utilisés et établi que la variance normalisée fournissait le meilleur compromis entre vitesse et précision. Soit $I_{M \times N}$ avec M et N la largeur et la hauteur respectivement, une image acquise au pas de focalisation F . Si $i(u, v)$ est l'intensité du pixel à (u, v) et μ l'intensité moyenne, la variance normalisée de $I_{M \times N}$ est donnée par

$$\text{éq. 2} \quad \gamma(F) = S(I_{M \times N}) = \frac{1}{MN\mu} \sum_{u=1}^{u=M} \sum_{v=1}^{v=N} [i(u, v) - \mu]^2$$

La représentation graphique de $\gamma(F)$ est indiquée en pointillés sur la figure 2, dans le cas du JSM 820 avec un échantillon d'or-sur-silicium. Les itérations correspondent aux distances de travail W et donc à F selon l'équation 1. Pour une distance comprise entre 15 et 35 mm la variance est non nulle car les images contiennent des informations, en dehors de cette zone la variance est quasiment nulle car les images sont vides d'informations.

B. Autofocus par asservissement visuel

L'asservissement visuel est un mécanisme de commande en boucle fermée permettant de contrôler n'importe quel système robotique en utilisant les informations de vision. Il consiste en une loi de commande pour réguler à zéro l'erreur entre les informations visuelles mesurées et désirées. Ce concept est utilisé pour développer un algorithme d'autofocus: on cherche à obtenir le maximum de la fonction de netteté (information globale de l'image) en contrôlant les paramètres de focalisation de l'instrument, au lieu de minimiser une fonction erreur.

Dans le SEM, la modification du courant dans la bobine objectif induit la modification du pas de focalisation F (et donc de la distance de focale ou distance de travail W) qui entraîne un changement de la netteté S . Le comportement est descriptible, de manière approchée, par l'équation de récurrence non linéaire du 1er ordre suivante:

$$\text{éq. 3} \quad S_{k+1} + S_k = 2\gamma(F)$$

où S_{k+1} et S_k sont les valeurs future et courante de la netteté, respectivement.

La première tâche (tâche 1) d'un autofocus est d'amener le système suivant dans la zone où les images sont exploitables. Pour ce faire nous considérons un asservissement visuel où la maximisation de la netteté S est retraduite en la minimisation d'une fonction coût $C_1(S)$. Nous avons étudié une fonction quadratique et une fonction exponentielle:

$$\text{éq. 4} \quad C_1(S_k) = \alpha \left(\frac{S_0}{S_k} \right)^2$$

$$\text{éq. 5} \quad C_1(S_k) = \alpha \exp\left(\frac{S_k - S_0}{S_0}\right)$$

où α et S_0 sont respectivement un gain positif pris égal à 300 et la netteté initiale. Les deux fonctions sont représentées à la figure 2 et on peut noter que seule la fonction quadratique convient car elle ne s'annule qu'au point où la netteté est maximale, à l'opposée de la fonction exponentielle qui s'annule bien avant le maximum. Il est à noter par ailleurs qu'avec le SEM utilisé pour avoir un effet le coût doit avoir au moins la valeur 1.

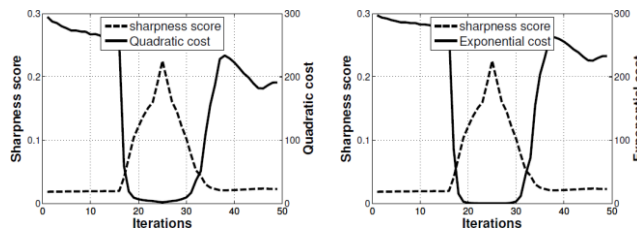


Figure 2. FONCTIONS DE NETTETE ET COUTS (1 ITERATION CORRESPOND A 1 MM)

La commande suivante résout la tâche 1 :

$$\text{éq. 6} \quad F_{k+1} = F_k + \alpha \left(\frac{S_0}{S_k} \right)^2 \text{Sign}(\dot{S}_k)$$

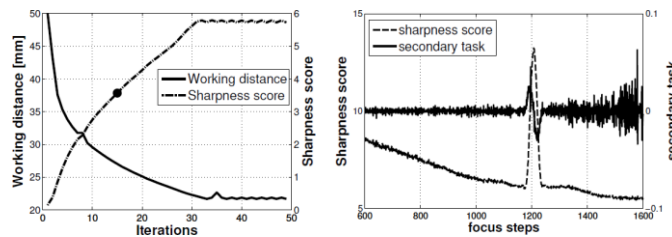
avec F_{k+1} et F_k les valeurs future et courante du pas de focalisation, respectivement.

L'analyse d'une stabilité au sens de Lyapunov montre que le système avec comme état (S,F) présente de faibles oscillations lorsqu'il atteint le maximum (figure 3). Nous proposons d'utiliser l'information de dérivée pour arrêter le processus lorsque le maximum est atteint (tâche 2):

$$\text{éq. 7} \quad C_2(S_k) = \frac{1}{W_k} \left(\frac{S_k - S_{k-1}}{W_k - W_{k-1}} \right)$$

Finalement la loi de commande devient:

$$\text{éq. 8} \quad F_{k+1} = F_k + \alpha \left(\frac{S_0}{S_k} \right)^2 \text{Sign}(\dot{S}_k) + \frac{1}{W_k} \left(\frac{S_k - S_{k-1}}{W_k - W_{k-1}} \right)$$



On notera que la dernière valeur du pas de focalisation détermine la distance de travail et la profondeur de l'échantillon par rapport à la lentille objectif du SEM.

IV. ESTIMATION AUTOMATIQUE DE LA PROFONDEUR

La résolution de la profondeur mesurée dépend essentiellement de la profondeur de focalisation, moins grande est celle-ci meilleure est la résolution.

La profondeur de mise au point s'écrit:

$$\text{éq. 9} \quad D = \frac{2\rho_{image} W}{AM} [\mu m]$$

avec ρ_{image} , A et M la résolution de l'image, l'ouverture du diaphragme et le grandissement, respectivement.

Comme nous disposons d'un SEM avec 4 ouvertures (30 μm , 50 μm , 70 μm et 100 μm) nous avons choisi l'ouverture de 100 μm qui permet de réduire considérablement la profondeur de mise au point. La contre partie de ce choix est la diminution de la résolution des images.

L'estimation de profondeur de la scène est réalisée en deux étapes: initialisation et d'exécution.

La première étape est réalisée une seule fois au début du processus: l'ouverture du diaphragme est changée à 100 μm et le système effectue la mise au point automatique en utilisant l'image totale de la scène (autofocus global). Cette étape rend l'étape d'exécution plus rapide. Soient F_b et F_{b-1} la valeur du pas de focalisation donnant le maximum de netteté et la valeur obtenue à l'itération avant.

Dans la seconde étape (autofocus local) le processus réalise l'autofocus sur la fenêtre d'intérêt choisie en partant du pas de focalisation F_e qui est une fonction de F_b et F_{b-1} . Empiriquement le choix suivant donne de bons résultats:

$$\text{éq. 10} \quad F_e = 3(F_b - F_{b-1})$$

Un exemple de F_e est indiqué par un point sur la figure 3b. Pour augmenter la vitesse d'exécution, la valeur du paramètre α est prise 5 fois celle obtenue à la première étape.

Chaque fois que l'autofocus est réalisé, la dernière valeur de F permet de calculer la profondeur de la cible en utilisant l'équation 1.

V. RESULTATS EXPERIMENTAUX

A. Suivi d'une poutre

La méthode a été utilisée pour suivre le mouvement vertical d'une poutre recouverte d'or montée sur un micromanipulateur (Kleindiek MM3A) (Fig. 4). En dessous du micromanipulateur se trouve une membrane en silicium de 500 x 10 x 20 μm^3 (longueur x épaisseur x hauteur). Dans les tests réalisés, le micromanipulateur doit descendre automatiquement la poutre au niveau de la membrane. La tension d'accélération et le temps de balayage sont respectivement de 5 kV et 180 nanosecondes par pixel. Le grandissement et la profondeur de mise au point ont été respectivement de X1300 et 27.3 μm permettant d'avoir la poutre et la membrane dans une seule image.

1) Phase d'initialisation

L'autofocus global est réalisé avec une valeur α de 200. Les courbes représentées sur la figures 5 illustrent la variation de la netteté des images et des coûts. Sur la figure 5 sont représentées également trois images acquises loin du point de focalisation, proche et au point de focalisation. La méthode est donc capable de trouver le point de focalisation rapidement et de s'y maintenir.



Figure 4.

LE MICROMANIPULATEUR AVEC LA POUTRE

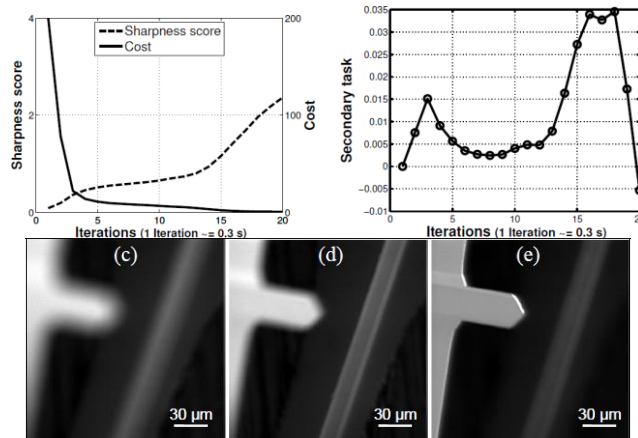


Figure 5. FONCTION COUT ET NETTETE POUR LA TACHE 1 (GAUCHE) ET NETTETE POUR LA TACHE 2 (DROITE), DES IMAGES ILLUSTRANT LA MISE AU POINT (BAS)

La méthode a ensuite été comparée avec la méthode traditionnelle fondée sur une recherche itérative [9]. Dans cette dernière les fenêtres de recherche ont été successivement de 100 pas, 20 pas puis 1 pas de focalisation. Outre la précision, notre méthode a été deux fois plus rapide que la méthode itérative : 20 s contre 45 s.

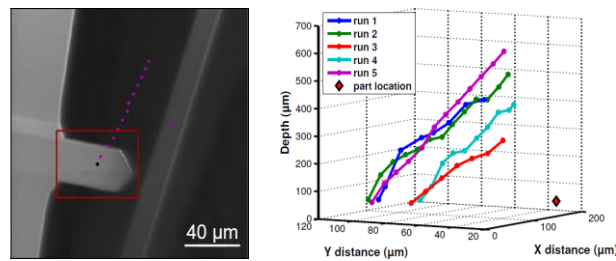


Figure 6. TRAJECTOIRE 2D ET 3D DE LA POUTRE

2) Phase d'exécution:

On commence par définir les ROIs de la membrane et de la poutre en utilisant la mise en correspondance de modèles [12]. On mesure la profondeur de la membrane puis à chaque mouvement de descente du manipulateur on mesure la profondeur de la poutre. On arrête les mouvements lorsque la poutre entre dans la zone de focalisation de la membrane. La figure 6 montre une trajectoire 2D de la poutre et 5 trajectoires 3D de la poutre commençant à 5 points différents. Sur 8 essais l'écart-type des profondeurs a été de 1.2 μm montrant la grande répétabilité de la méthode. A chaque itération le temps de calcul a été de 2.1 s.

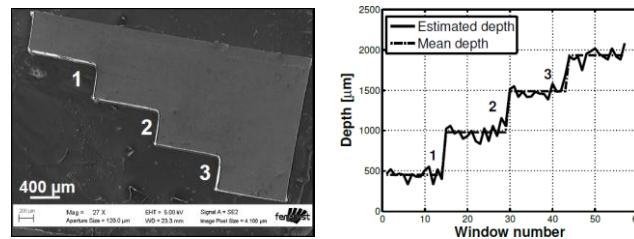


Figure 7. ÉCHANTILLON EN ESCALIER ET SON PROFIL

| Step number | Original (μm) | Obtained (μm) | Error (μm) |
|-------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 | 515.3 | 526.9 | 11.6 |
| 2 | 503.5 | 507.8 | 4.3 |
| 3 | 454.7 | 445.5 | 9.2 |

Tableau 1. LES VALEURS DES PAS D'ESCALIER

B. Évaluation de la résolution

Ce test, pour évaluer la résolution de la méthode, a été réalisée avec un échantillon d'aluminium en escalier de pas connus de dimensions $4 \times 1 \times 2 \text{ mm}^3$ (figure 7). Le grandissement a été fixé à X780, d'où une profondeur de mise au point d'environ $55 \mu\text{m}$. Les images ont été générées en utilisant une tension d'accélération de 5 kV et une vitesse de balayage de 180 nanosecondes par pixel. Une fenêtre d'intérêt (ROI) de $64,7 \times 97,5 \mu\text{m}^2$ a été utilisée. Toute la région de l'échantillon a été balayée en déplaçant cette fenêtre. Les valeurs de profondeur sont mesurées puis leur moyenne calculée. La figure 7 montre les résultats tandis que le tableau II résume les valeurs vraies (mesurées en utilisant un profilomètre à contact) ainsi que les valeurs expérimentales et les erreurs correspondantes pour les trois marches d'escalier données à la figure 7. La valeur moyenne de l'erreur s'élève à $9 \mu\text{m}$ pour le grandissement considéré (X780). Pour un grandissement et une ouverture plus élevée, on peut espérer une meilleure précision.

VI. CONCLUSION

La mesure en temps-réel de la profondeur dans un SEM est un problème difficile du fait de la conjonction de deux phénomènes: le SEM est gouverné par une projection parallèle et sa profondeur de mise au point est grande. Diverses solutions, plus ou moins simples, précises et résolues sont proposées dans la littérature.

Ce document a décrit une solution rapide, répétable et de résolution moyenne. Pour un SEM à 5 kV d'accélération, 180 ns par pixel de vitesse de balayage, $100 \mu\text{m}$ de diaphragme, et un processeur Core 2 Duo, la méthode met environ 2s par pas d'itération, atteint une répétabilité d'environ $1 \mu\text{m}$ pour une résolution de l'ordre de $10 \mu\text{m}$.

La méthode utilise un autofocus par asservissement visuel: le SEM est commandé rapidement vers le point de focalisation en maximisant la netteté des images.

Les performances obtenues sont globalement meilleures que celles que l'on trouve dans la littérature, elles indiquent que le SEM peut être utilisé pour réaliser le positionnement automatique mais grossier (résolution limitée à une dizaine de micromètres) selon l'axe Z malgré la longueur de la profondeur de mise au point et le parallélisme de la projection.

VII. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Labex ACTION (ANR-11-LABEX-01-01) et du projet Equipex ROBOTEX (ANR-10-EQPX-44-01).

Nous remercions Naresh Marturi et l'action Caractérisation du département Mécanique Appliquée.

VIII. REFERENCES

- [1] N. Marturi, B. Tamadazte, S. Dembélé, and N. Piat, "Visual servoing schemes for automatic nanopositioning under scanning electron microscope," in IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2014, pp. 981–986.
- [2] L. Cui and E. Marchand, "Calibration of scanning electron microscope using a multi-images non-linear minimization process," in IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2014, pp. 5191 – 5196.
- [3] Y. L. Zhang, Y. Zhang, C. Ru, B. K. Chen, and Y. Sun, "A load-lock-compatible nanomanipulation system for scanning electron microscope," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 18(1), pp. 230–237, 2013.
- [4] R. Tunnell and S. Fatikow, "3d position detection with an FIB-SEM dual beam system," in Int. Conf. on communications, electrical & computer engineering, 2011, pp. 128–133.
- [5] S. Fatikow, V. Eichhorn, C. Stolle, T. Sievers, and M. Jahnisch, "Development and control of a versatile nanohandling robot cell," Mechatronics, vol. 18(7), pp. 370–380, 2008.
- [6] V. Eichhorn, S. Fatikow, T. Wich, et al., "Depth-detection methods for microgripper based cnt manipulation in a scanning electron microscope," J. Micro-Nano Mechatron., vol. 4(1-2), pp. 27–36, 2008.
- [7] V. Eichhorn, S. Fatikow, T. Wortmann, C. Stolle, et al., "Nanolab: A nanorobotic system for automated pick-and-place handling and characterization of cnts," in IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2009, pp. 1826–1831.
- [8] T. Wich, C. Stolle, T. Luttermann, and S. Fatikow, "Assembly automation on the nanoscale," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 4, no. 4, pp. 391–400, 2011.
- [9] M. Rudnaya, R. Mattheij, and J. Maubach, "Iterative autofocus algorithms for scanning electron microscopy," Microsc. Microanal., vol. 15(S2), pp. 1108–1109, 2009.
- [10] Y. Sun, S. Duthaler, and B. J. Nelson, "Autofocusing algorithm selection in computer microscopy," in IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2005, pp. 70–76.
- [11] N. Marturi, B. Tamadazte, S. Dembélé, and N. Piat, "Visual servoing based approach for efficient autofocus in scanning electron microscope," in IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2013, pp. 2677–2682.
- [12] T. Sievers and S. Fatikow, "Real-time object tracking for the robot-based nanohandling in a scanning electron microscope," Journal of Micromechatronics, vol. 3(3/4), p. 267, 2006.