بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

بررسی و مقایسه دو روش تداخل سنجی جابجایی فاز و تبدیل فوریه در اندازه‌گیری مورفولوژی سطوح

سیاوش باقری، محمدرضا جعفر فرد و محمدحسین مهدیه

دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله، دو روش تداخل‌سنجی برای اندازه‌گیری مورفولوژی سطح مورد بررسی قرار داده شده است. نمونه شبیه‌سازی در نظر گرفته‌شده برای این مطالعه، یک توری پراش ۶۰۰ خط در میلی‌متر بود. طرح تداخلی برای این نمونه شبیه‌سازی شد و روش‌های تبدیل فوریه و جابجایی فاز برای استخراج نمایه سطح نمونه از این طرح تداخلی بکار گرفته شد. کدهای مربوط به هرکدام از روش‌ها در نرم‌افزار متلب نوشته شد و سپس با استفاده از پردازش تصویر عددی، نمایه سطح به‌دست‌آمده از هر یک از روش‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار داده شد. نتایج نشان می‌دهد که در سیستم‌های ایده‌آل با نوفه بسیار کم، مقدار خطای اندازه‌گیری مورفولوژی در روش جابجایی فاز نسبت به روش تبدیل فوریه کمتر است. همچنین نشان داده می‌شود که حساسیت روش تبدیل فوریه به تغییرات نوفه نسبت به روش جابجایی فاز کمتر است و این روش برای سیستم‌های با نوفه زیاد نسبت به روش جابجایی فاز ارجحیت دارد.

کلید واژه- نمایه سنجی سطوح، نقشه سطح، تداخل‌سنجی جابجایی فاز، تداخل سنجی تبدیل فوریه

An Investigation on Surface Morphology Measurement Based on Fourier Transform and Phase Shifting Method

Bagherie, Siavash; Jafarfard, Mohammad Reza; Mahdieh Mohammad Hossein

Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, two interferometric methods for surface morphology measurement has been investigated. The simulated sample considered for this study was a diffraction grating with 600 lines per millimeter. A simulated interference pattern for this sample was created and Fourier transform and phase shifting methods have been utilized for the extracting surface profile from that of interference pattern. The code for each method has been written in MATLAB and by using numerical image processing, the obtained surface profile for each method was analyzed. The results demonstrate that in the ideal systems with low percentage of noise the morphological error in phase shifting method is less than Fourier transform method. However, sensitivity of Fourier transform to noise variation is less than phase shifting method and it is recommended to use this method for the noisy systems.

Keywords: 3-D surface profiling, map of surface, phase shifting interferometry, Fourier transform interferometry

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

در صنعت، برای سرعت بخشیدن به توسعه تولید و اطمینان از کیفیت محصول، نیاز به اندازه‌گیری دقیق نمایه سطوح وجود دارد. نمایه سنجی سه‌بعدی سطح با کاربردهایی در زمینه‌های مدرن مانند نانوتکنولوژی، بیوتکنولوژی و اپتوالکترونیک برای صنایع تولیدی با فنّاوری بالا بسیار مهم است. روش‌های مختلف میکروسکوپی، مکانیکی و اپتیکی برای اندازه‌گیری سطوح پیشنهادشده است. از بین این روش‌ها، روش‌های اپتیکی به دلیل مزیت‌هایی مانند غیر تماسی بودن، دقت و سرعت زیاد و ارزان بودن موردتوجه بسیاری از محققان قرارگرفته است. تداخل‌سنجی، تکنیک ماره، اسکن لیزری و فتوگرامتری[۱] ازجمله روش‌های متداول نمایه سنجی اپتیکی می‌باشد[۴-۱].

در این مقاله از روش تداخل‌سنجی که در بین روش‌های اپتیکی سریع‌تر می‌باشد برای نمایه سنجی سه‌بعدی سطح مورد بررسی قرار می گیرد. برای معرفی مزیت‌ها و معایب روش‌های تداخل سنجی، دو روش مهم جابجایی فاز و روش تبدیل فوریه، به‌وسیله شبیه‌سازی عددی موردبررسی و مقایسه قرار می‌دهیم.

۲- مبانی نظری

در روش تداخل سنجی نور فرودی به دو قسمت تقسیم می‌شود که یکی از آن‌ها بر روی نمونه فرود می‌آید و دیگری بدون تماس با نمونه به‌صورت نور مرجع وارد دوربین می‌شود. طرح تداخلی بر روی حسگر دوربین تشکیل می‌شود. اختلاف‌فاز مرجع و نمونه با استفاده از پردازش تصویر طرح تداخلی به دست می‌آید. اختلاف‌فاز، ناشی از تغییرات ارتفاع می‌باشد[۵]. تداخل بین دو موج با طول‌موج یکسان توزیع شدت زیر را نتیجه می‌دهد:

$$I(x,y) = a(x,y)[1+b(x,y)\cos(\phi(x,y))] \qquad (۱)$$

که $a(x,y)$ شدت پس‌زمینه، $b(x,y)$ نمایانی(مرئیت) فریز و $\phi(x,y)$ اختلاف‌فاز بین دو موج است. برای استخراج $\phi(x,y)$ روش‌های مختلفی ازجمله جابجایی فازی، تبدیل فوریه وجود دارد که در ادامه به معرفی این روش‌ها می‌پردازیم.

۲-۱- نمایه سنجی جابجایی فازی

تداخل‌سنج جابجایی فاز بیش از سه دهه است که برای اندازه‌گیری‌های دقیق اپتیکی مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این روش برای بازسازی جبهه موج حداقل به سه طرح تداخلی ضبط‌شده با فازهای متفاوت نیاز است. با تغییر فاز، شدت در خروجی تداخل‌سنج به‌وسیله رابطه زیر داده می‌شود:

$$I(x,y) = a(x,y)[1+b(x,y)\cos(\phi(x,y)+\delta_n)] \qquad (۲)$$

که δ_n جابجایی فاز است.

الگوریتم‌های متعددی برای استخراج $\phi(x,y)$ از معادله (۲) پیشنهادشده است که ما الگوریتم چهار پله‌ای را برای این کار انتخاب کرده‌ایم. در این الگوریتم جابجایی فاز به‌اندازه $\frac{\pi}{2}$ است.

$$\begin{aligned} I_1(x,y) &= a(x,y)[1+b(x,y)\cos(\phi(x,y))] \\ I_2(x,y) &= a(x,y)[1+b(x,y)\cos(\phi(x,y)+\pi/2)] \\ I_3(x,y) &= a(x,y)[1+b(x,y)\cos(\phi(x,y)+\pi)] \\ I_4(x,y) &= a(x,y)[1+b(x,y)\cos(\phi(x,y)+3\pi/2)] \end{aligned} \qquad (۳)$$

با حل این چهار معادله فاز جبهه موج به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\phi(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4}\right) \qquad (۴)$$

و نمایه سطح $h(x,y) = \frac{4\pi}{\lambda}\phi(x,y)$ خواهد بود[۶].

۲-۲- نمایه سنجی تبدیل فوریه

نمایه سنجی تبدیل فوریه یکی از روش‌های اندازه‌گیری سه‌بعدی رایج اپتیکی است که فقط به یک طرح تداخلی برای به‌دست آوردن سطح نمونه نیاز دارد. یک الگوی تداخلی (فریز) سینوسی می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$g(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi f_0(x+y) + \varphi(x,y)] \qquad (۵)$$

[۱] Photogrammetry

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

که $\varphi(x,y)$ فاز شامل اطلاعات شکل، $a(x,y)$ شدت (نور) پس‌زمینه، $b(x,y)$ دامنه تابع کسینوسی و f_0 فرکانس حامل است.

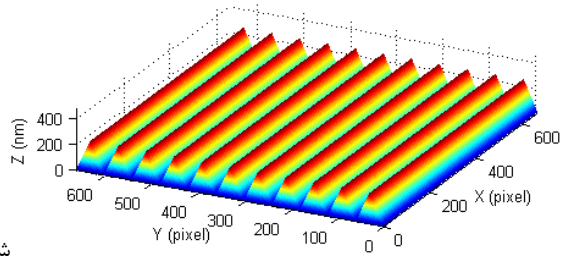
با اعمال فرمول اویلر به فرمول (۵) و سپس با گرفتن تبدیل فوریه دوبعدی از رابطه حاصله به دست می‌آوریم:

$$G(f_x,f_y)=A(f_x,f_y)+C(f_x-f_0,f_y-f_0)+C^*(f_x+f_0,f_y+f_0) \quad (۶)$$

سه جمله‌ی رابطه (۶) در حوزه فرکانس فضایی از هم جدا شده‌اند. یک فیلتر مناسب برای جدا کردن $C(f_x-f_0,f_y-f_0)$ اعمال می‌شود سپس با لگاریتم گرفتن از تبدیل فوریه معکوس $C(f_x-f_0,f_y-f_0)$ فاز $\varphi(x,y)$ به دست می‌آید[۷].

۳- نتایج

نمونه موردبررسی در این مقاله یک توری پراش ۶۰۰ خط در میلی‌متر است که ۱۱ خط از آن مانند شکل (۱) مورد بررسی قرار داده شده است.

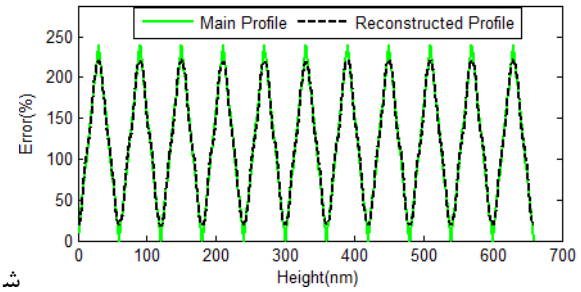


شکل (۱) توری پراش ۶۰۰ خط در میلی‌متر طراحی‌شده

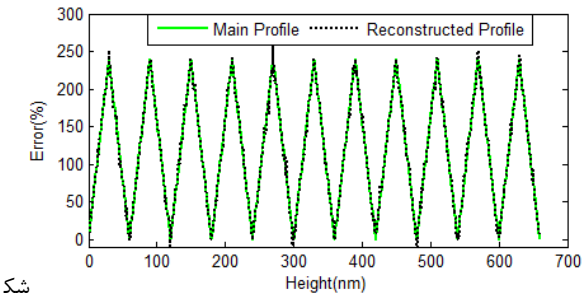
نمایه سطح با دو روش تبدیل فوریه و جابجایی فاز بازسازی‌شده است. برای تعیین حساسیت هرکدام از روش‌ها به نوفه، مقداری نوفه تصادفی با توزیع پواسون به شدت تداخلی I اضافه‌شده است. شکل (۲) نمایه بازسازی‌شده به روش تبدیل فوریه را در مقایسه با نمایه اصلی سطح نشان می‌دهد که با نسبت سیگنال به نوفه (SNR[۱]) ۲۰ به‌دست‌آمده است.

همان‌طور که از شکل (۲) دیده می‌شود تبدیل فوریه نقاط بسیار تیز را به‌خوبی نمی‌تواند بازسازی کند ولی در بقیه نقاط خطای اندکی دارد. همچنین در شکل (۳) همین نمایه با روش جابجایی فاز بازسازی‌شده است.

با تغییر ارتفاع ناهمواری‌های سطح، مقدار خطا نیز تغییر می‌کند که این تغییرات در شکل (۴) برای دو



شکل (۲) نمایه بازسازی‌شده با تبدیل فوریه(رنگ مشکی) و نمایه اصلی(رنگ سبز)



شکل (۳) نمایه بازسازی‌شده با جابجایی فاز (رنگ مشکی) و نمایه اصلی(رنگ سبز)

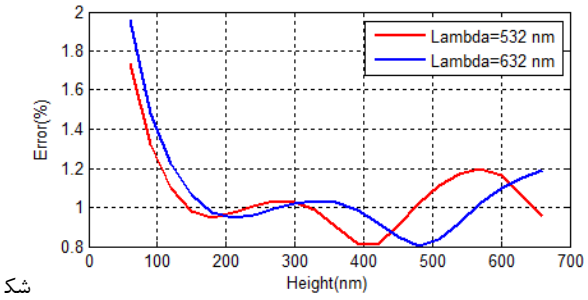
طول‌موج ۵۳۲ nm و ۶۳۲nm به ازای مقدار ثابت سیگنال به نوفه با روش تبدیل فوریه نشان داده‌شده است.

همچنین این تغییرات برای روش جابجایی فاز در شکل (۵) آورده شده است. با مقایسه شکل (۴) و شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که برای نمونه‌هایی با ناهمواری‌های کمتر از ۱۰۰nm خطای روش تبدیل فوریه نسبت به روش جابجایی فاز کمتر است و همچنین با افزایش ارتفاع ناهمواری‌ها خطای روش جابجایی فاز کاهش می‌یابد درحالی‌که در روش تبدیل فوریه با افزایش ارتفاع ناهمواری‌ها، خطا حالت نوسانی دارد و در یک نقطه خطا به مینیمم مقدار خود می‌رسد.

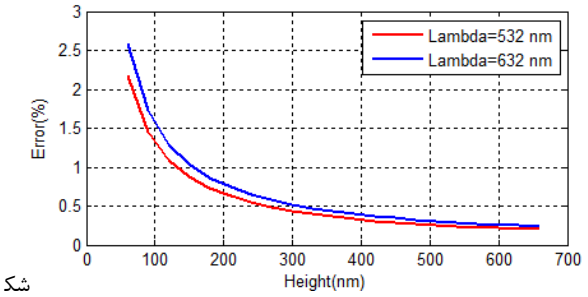
[۱] Signal to Noise Ratio

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

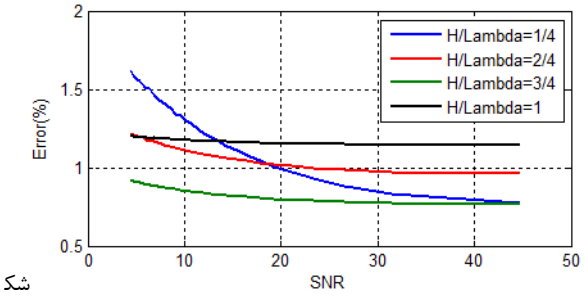


شکل (۴) تغییرات خطا برحسب ارتفاع ناهمواری‌ها با روش تبدیل فوریه

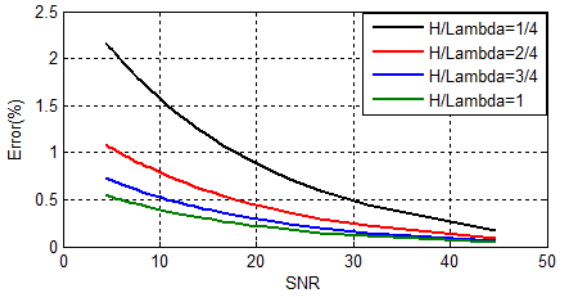


شکل (۵) تغییرات خطا برحسب ارتفاع ناهمواری‌ها با روش جابجایی فاز

همچنین تغییرات خطا برحسب SNR برای چهار ارتفاع مختلف با طول‌موج ۶۳۲nm برای روش تبدیل فوریه و جابجایی فاز به ترتیب در شکل (۶) و (۷) آورده شده است. با مقایسه دو شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌شود که در محدوده سیگنال به نوفه کم، خطای اندازه‌گیری مورفولوژی در روش فوریه نسبت به روش جابه‌جایی فاز کمتر است که می‌توان نتیجه گرفت که روش تبدیل فوریه به تغییرات نوفه نسبت به جابجایی فاز کمتر حساس است و در محیط‌های با نوفه زیاد توصیه می‌شود از روش فوریه استفاده شود.



شکل (۶) تغییرات خطا برحسب SNR با روش تبدیل فوریه



شکل (۷) تغییرات خطا برحسب SNR با روش جابجایی فاز

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، دو روش مهم نمایه سنجی سطوح با نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و موردبررسی قرارگرفته است. میزان خطا برای دو روش تبدیل فوریه و جابجایی فاز به ازای نوفه‌های مختلف محاسبه‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار خطای اندازه‌گیری نمایه سطوح در روش جابه‌جایی فاز در سیستم‌های ایده‌آل با نوفه بسیار کم نسبت به روش تبدیل فوریه کمتر است. همچنین نشان داده شد که تغییرات مقدار خطا به تغییرات نوفه در روش تبدیل فوریه با شیب بسیار کم است و این روش برای سیستم‌های با نوفه زیاد توصیه می‌شود.

مراجع

[1] Chen, F., G.M. Brown, and M. Song, *Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods.* Optical Engineering, 2000. 39(1): p. 10-22.

[2] Choi, Y.-B. and S.-W. Kim, *Phase-shifting grating projection moiré topography.* Optical Engineering ,1998. **37**(3): p. 1005-1010.

[3] Keferstein, C.P. and M. Marxer, *Testing bench for laser triangulation sensors.* Sensor Review, 1998. 18(3): p. 183-187.

[4] Wang, L.-S. and S. Krishnaswamy, *Shape measurement using additive-subtractive phase shifting speckle interferometry.* Measurement Science and Technology, 1996. **7**(12): p. 1748.

[5] Sirohi, R., *Optical methods of measurement: wholefield techniques*. 2009: CRC Press.

[6] Malacara, D., *Optical shop testing*. Vol. 59. 2007: John Wiley & Sons.

[7] Su, X. and W. Chen ,*Fourier transform profilometry:a review.* Optics and lasers in Engineering, 2001. 35(5): p. 263-284.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]