بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی و ساخت سیستم تثبیت کننده نوارهای تداخلی تمام نگاشتی توسط کنترل بازخوردی برپایه دوربین مداربسته

ناصر پرتوی شبستری[۱]، عیسی احمدعلیدخت[۱]، حمید قائمی بافقی[۲]، محسن روزبهانی[۱]، و حبیب مجیدی ذوالبین[۲]

[۱] پژوهشکده لیزر و اپتیک، تهران، ایران
[۲] گروه فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده –در این مقاله تثبیت نوارهای تداخلی تمام‌نگاشتی در طی مرحله ضبط مطرح شده است. هسته اصلی این روش ایجاد یک بازخورد منفی بر پایه دوربین مداربسته است که در پروسه طولانی مدت نوردهی، برای جبران جابه‌جایی کاتوره‌ای نوارهای تداخلی ناشی از ارتعاشات خارجی استفاده می‌شود. روش *PID* استفاده شده تا حرکت آینه پیزوالکتریک کنترل، جابه‌جایی نوارهای تداخلی جبران و نوارهای تداخلی فریز شود. استفاده از این سیستم، باعث می‌شود خطای جابه‌جایی نوارهای تداخلی کمتر از ۲۴/ λ (در طول موج ضبط *nm* ۴۴۲) شده و کیفیت توری تمام‌نگاشتی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یابد.

کلید واژه- نوارهای تداخلی تمام نگاشتی، CCD، پیزوالکتریک، توری تمام نگاشتی، لیتوگرافی تمام نگاشتی

Design and fabrication of a stabilizing holographic fringe system by feedback control based on CCTV camera

Naser Partovi Shabestari[1], Isa A.Alidokht [1], Hamid Ghaemi bafghi[2], Mohsen Ruzbehani[1] and

Habib Madjidi zolbin [2]

[1]Laser & Optics Research School, Tehran, Iran
[2]Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract - In this paper, stabilizing holographic interference fringe in recording step is put forward. Kernel of this method is production of negative feedback based on CCTV camera which is used to compensate random displacement of fringe interference caused by external vibration in long recording time. The proportion-integral-derivative (PID) method is used to control piezoelectric mirror, compensate fringe displacement and freeze holographic interference fringe. Using this system cause displacement of interference fringe error become under λ/24 (at recording wavelength of 442nm) and the quality of the holographic grating can be greatly improved.

Keywords: holographic interference fringe, CCD, Piezoelectric, holographic grating, holographic lithography

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

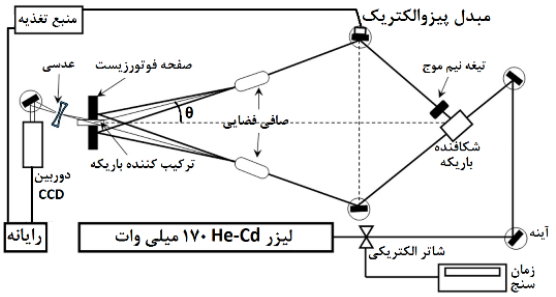
۱- مقدمه

هنگام ضبط توری‌های پراش تمام‌نگاشتی در اندازه بزرگ، شدت نور در روی صفحه ضباط تمام‌نگاشتی خیلی ضعیف و زمان نوردهی خیلی طولانی می‌شود. اما عوامل مزاحمی از قبیل ارتعاشات محیطی، جریان هوا و تغییر دمای اطاق، باعث می‌شود اختلاف فاز بین امواج مرجع و شیئی تغییر یافته و نوارهای تداخلی به صورت کاتوره‌ای جابه‌جا شوند. که این باعث کاهش کنتراست می‌شود. برای ساخت یک توری تمام‌نگاشتی کارآمد، باید جابه‌جایی نوارهای تداخلی به کمتر از λ/۸ محدود شود. در طی نوردهی طولانی مدت، معمولا میز اپتیکی چندین طول موج جابه‌جا می‌شود. بنابراین باید ملاحظات خاصی در نظر گرفته شود تا جابه‌جایی نوارهای تداخلی محدود شود. برای این منظور روشهای غیر فعال[۱] و فعال[۶-۲] توسعه یافته‌اند.

در این پروژه ما از روش فعال در یک چیدمان اپتیکی تمام نگاشتی استفاده کرده‌ایم که از یک آینه پیزوالکتریک در ترکیب بازخوردی استفاده می‌کند. تداخل‌سنج شامل یک سیستم کنترل درجاست که اجازه نظارت بر پایداری کلی چیدمان را می‌دهد. سیگنال خطایی که از این طریق به دست می‌آید برای کنترل آینه پیزوالکتریک در سیستم کنترل PID مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- چیدمان

چیدمان به کار رفته برای تثبیت نوارهای تداخلی در شکل۱ نشان داده شده است. در این چیدمان در مسیر یکی از باریکه‌ها، مبدل پیزوالکتریک قرار گرفته است. در بالای سایه‌ی پشت صفحه تمام‌نگاری، یک ترکیب کننده باریکه (آینه نیم‌شفاف) قرار گرفته تا نوارهای تداخلی لازم را برای دوربین ایجاد کند. این نوارها توسط عدسی مقعر باز و به دوربین منتقل می‌شود. اطلاعات توزیع شدت نور



شکل۱ : چیدمان به کار رفته برای تثبیت نوارهای تداخلی.

دریافتی توسط دوربین، به‌واسطه کارت رابط به رایانه منتقل می‌شود سپس میزان جابه‌جایی نوارهای تداخلی از طریق بررسی فریم‌های متوالی دوربین[۷] توسط رایانه در محیط نرم‌افزار MATLAB محاسبه و سیگنال کنترلی PID، توسط رایانه و مدارات الکترونیکی برای حرکت پیزو ارسال می‌شود.

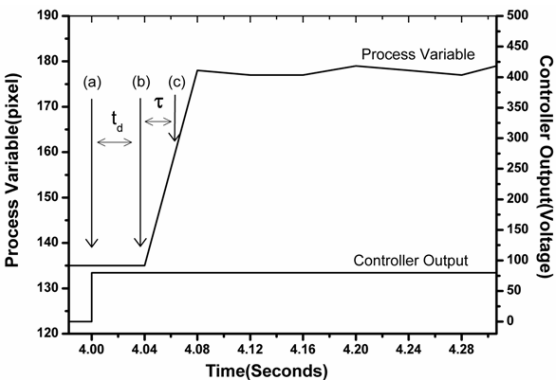
۳- تئوری

PID از حروف اول سه مولفه: متناسب (Proportional)، انتگرالی (Integral) و دیفرانسیلی (Differential) گرفته شده است. اگر سیگنال خطای محاسبه شده را e(t) در نظر بگیریم، سیگنال کنترلی که توسط PID به پیزوالکتریک اعمال می شود به صورت زیر خواهد بود:

$$u(t) = k_p[e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d\frac{d}{dt}e(t)]$$

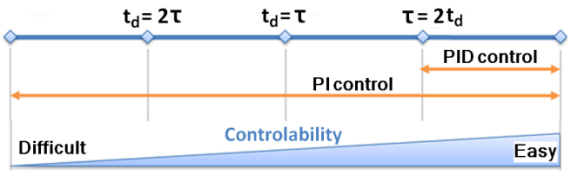
جمله اول این رابطه متناسب با سیگنال خطا، جمله دوم متناسب با خطاهای باقیمانده و جمع شده از قسمتهای قبل و جمله سوم که از روی شیب خطا نسبت به زمان به دست می‌آید، رفتار سیستم را پیشگویی کرده و پایداری سیستم را بهبود می بخشد. k_p بهره تناسب، T_i زمان انتگرال و T_d زمان دیفرانسیل‌گیری می باشد.

البته در سیستم‌های مختلف، با توجه به نسبت بین تاخیر شروع به حرکت نوارهای تداخلی پس از اعمال ولتاژ کنترل(t_d) و زمان لازم برای حرکت نوارهای تداخلی(τ)، ممکن است دو یا سه مولفه از این رابطه مورد استفاده قرار گیرد. این پارامترها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲: پاسخ زمانی سیستم کنترل به سیگنال اعمال شده. در این نمودار t_d تاخیر بین لحظه اعمال ولتاژ به سیستم کنترل و لحظه شروع به حرکت نوارهای تداخلی است و τ مدت زمانی است که طول می‌کشد تا جابه‌جایی نوارهای تداخلی به ۶۳٪ بیشینه خود برسد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]



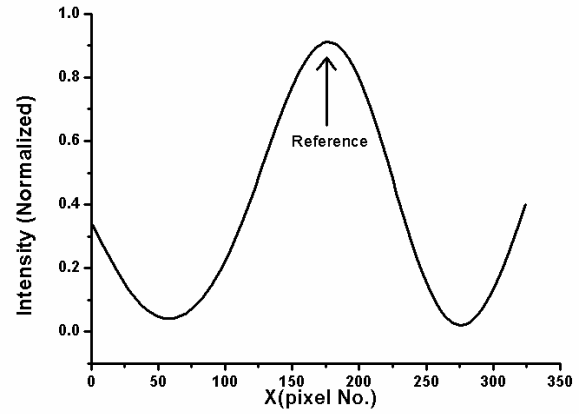
شکل ۳: ارتباط بین نسبت زمانهای تاخیر τ و t_d با نوع سیستم کنترلی مورد استفاده.

هرچه نسبت t_d/τ بزرگتر شود کنترل سیستم مشکل‌تر می‌شود. اگراین نسبت از ۰/۵ بزرگتر شود، فقط از دو مولفه P و I استفاده شده و مولفه D حذف می‌شود (شکل۳)[۸]. نسبت t_d/τ در سیستم ما تقریبا برابر با یک بود (شکل ۲) بنابراین مولفه D را حذف کردیم.

برنامه MATLAB لازم برای اعمال ضرایب k_p و T_i در سیستم کنترل را می‌توان به شکل زیر نوشت:

```
previous_error = 0
integral = 0
 error = setpoint – (measured_value)
 integral = integral + error*dt
 output = Kp*(error + (۱/Ti)*integral )
 previous_error = error
```

این برنامه داخل یک حلقه کلی‌تر قرار می‌گیرد، که شامل گرفتن تصویر از کارت رابط، پردازش تصویر و ارسال کمیت محاسبه شده به راه‌انداز پیزو است. پردازش تصویر، شامل گرفتن فریم از دوربین، انتخاب یک سطر مناسب و حذف نوفه‌های آن می‌باشد. چون فرکانس نوفه-ها خیلی بالاتر از فرکانس اصلی نوارهای تداخلی است، اگر از توزیع شدت تبدیل فوریه گرفته و فرکانس‌های بالا را حذف کرده و تعداد محدودی از فرکانس‌های پایین را نگهداریم و سپس تبدیل فوریه وارون بگیریم، نمودار شدت پالایش می‌شود(شکل ۴). برای فریز کردن نوارهای تداخلی، محل یکی از بیشینه‌های شدت نور به عنوان مرجع اولیه به برنامه معرفی می‌شود. در طول آزمایش محل شدت بیشینه در هر لحظه با مرجع اولیه مقایسه شده و اختلاف آنها به عنوان تابع خطا به برنامه معرفی می‌شود. در این کد برنامه MATLAB، dt مدت زمان اجرای برنامه در یک حلقه و output کمیت فرستاده شده به راه‌انداز پیزوالکتریک می‌باشد.



شکل ۴: نمودار شدت نوارهای تداخلی پس از پالایش.

برای تنظیم ضرایب در سیستم کنترل PI، ابتدا T_i را خیلی بزرگ در نظر می‌گیریم تا جمله انتگرالی حذف شود و k_p در بازه بزرگی تغییر می‌دهیم و با یافتن بازه مناسب، آن را محدودتر می‌کنیم تا بازه و مقدار بهینه را پیدا کنیم. سپس با ثابت نگهداشتن k_p ، T_i را تغییر می-دهیم تا به حالت بهینه برسد. حال با ثابت نگهداشتن T_i دوباره k_p را در بازه خیلی کوچکی تغییر داده و این عمل را آنقدر تکرار می‌کنیم تا حالت بهینه نهایی حاصل شود.

۴- نتایج آزمایش

با رعایت تمام ملاحظات جهت حذف ارتعاشات محیطی در آزمایشگاه، ارتعاشات سیستم بدون کنترل بازخوردی ۳/ λ بوده است (شکل ۵).

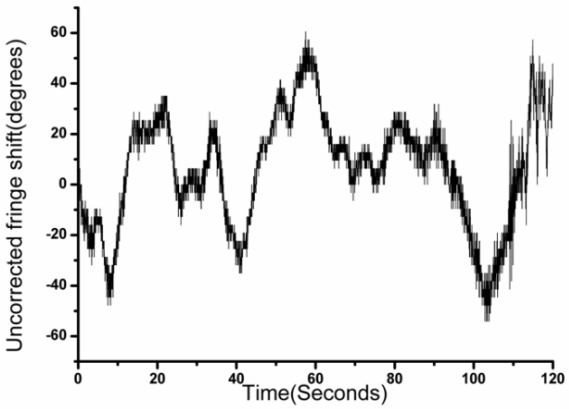
این در شرایطی بوده است که آزمایشگاه در زیر زمین، کف زیر میز اپتیکی ضد ارتعاش، سیستم تهویه هوا خاموش و خروجی فن لیزر توسط لوله به خارج از آزمایشگاه منتقل شده است، اگر این موارد رعایت نمی‌شد ارتعاشات خیلی بیشتر از این می‌شد و انتقال این ارتعاشات به میز اپتیکی باعث می‌شد میزان حرکت نوارهای تداخلی به چند λ برسد.

در آزمایش قبل[۷] بدون اعمال سیستم کنترل PI توانسته بودیم خطای حاصل از ارتعاشات را به کمتر از λ/۱۴ برسانیم (شکل۶). روش کار به این صورت بود که ابتدا نمودار میزان جابجایی نسبت به ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک به‌دست آمده و سپس از روی شیب این نمودار، ولتاژ مناسب برای میزان جابه‌جایی نسبت به مرجع به‌دست آمد.

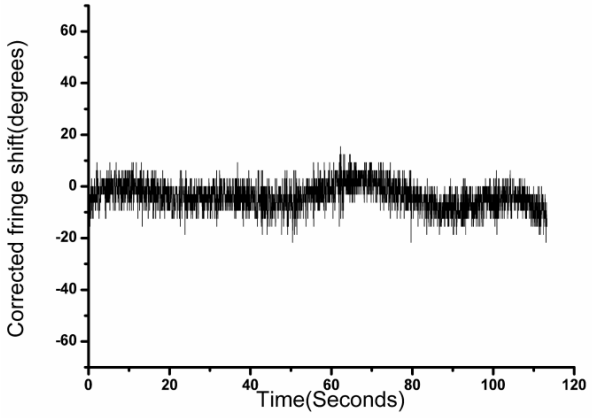
در آزمایش فعلی با به دست آوردن مقادیر بهینه برای

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

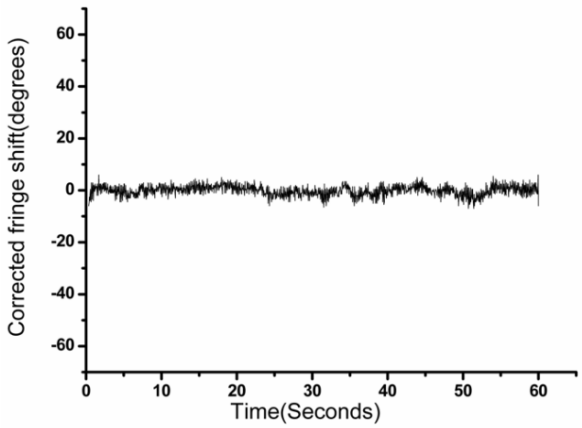
پارامترهای k_p و T_i در سیستم کنترلی PI و اعمال آنها روی سیستم، توانستیم خطای حاصل از ارتعاشات را به کمتر از ۲۴/ λ برسانیم (شکل ۷).



شکل ۵: جابه‌جایی نوارهای تداخلی برحسب درجه، بدون اعمال کنترل بازخوردی.



شکل۶: جابه‌جایی نوارهای تداخلی برجسب درجه، پس از اصلاح توسط سیستم کنترل بازخوردی بدون اعمال کنترل PI.



شکل۷: جابه‌جایی نوارهای تداخلی برجسب درجه، پس از اصلاح توسط سیستم کنترل بازخوردی و اعمال کنترل PI.

۵- نتیجه‌گیری

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهند که با استفاده از یک سیستم بازخورد منفی و دوربین مدار بسته و همچنین با استفاده از سیستم کنترل PI توانستیم نوارهای تداخلی را در محل ضبط توری فریز کنیم. این رویه ابتدا بدون استفاده از سیستم کنترلی PI و از روی شیب منحنی میزان جابه‌جایی نوارهای تداخلی بر حسب ولتاژ اعمال شده انجام شد که توانستیم ارتعاشات را به کمتر از ۱۴/ λ برسانیم و سپس با استفاده از سیستم کنترلی PI و یافتن پارامترهای بهینه، نتیجه را بهبود بخشیده و جابه‌جایی نوارهای تداخلی را به کمتر از ۲۴/ λ رساندیم.

مراجع

[1] **R. Caputo, L. De Sio, A. Veltri, C. P. Umeton, and A. V. Sukhov, *"Observation of two-wave coupling during the formation of POLICRYPS diffraction gratings,"* Opt. Lett. 30, 1840– 1842 (2005).**

[2] **Fringe Locker Inovar Devices, http://www.inovar-inc.com/index.html.**

[3] **Fringe Locker Excalibur Engineering, http://www.excaliburengineering.com.**

[4] **D. B. Neumann and H. W. Rose, *"Improvement of recorded holographic fringes by feedback control,"* Appl. Opt. 6, 1097–1104 (1967).**

[5] **S. E. Moran, R. L. Law, P. N. Craig, and W. M. Goldberg, *"Optically phase-locked electronic speckle pattern interferometer,"* Appl. Opt. 26, 475 –491 (1987).**

[6] **C. Li; X. Chen; J. Wu; J. Ju; Y. Zhu; Z. Hu, "*Research and development of a stabilizing holographic interference fringe system based on linear CCD,*" *Proc. SPIE* 7384, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Advances in Imaging Detectors and Applications, 73840C (August 06, 2009).**

[۷] پرتوی شبستری، ناصر و همکاران *"طراحی و ساخت سیستم تثبیت کننده نوارهای تداخلی، جهت ساخت توری پراش تمام‌نگاشتی"* کنفرانس فیزیک ایران، ۱۳۰۱-۱۲۹۸(۱۳۹۲).

[8] **Jacques F. Smuts *"Process Control for Practitioners,"* OptiControls. Inc. (2011).**

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]