



لیفنگ
نگاره‌پردازی

بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



طراحی و ساخت سیستم ثابتیت کننده نوارهای تداخلی تمام نگاشتی توسط کنترل بازخوردی بر پایه دوربین مداربسته

ناصر پرتوی شبستری^۱, عیسی احمدعلیدخت^۱, حمید قائمی بافقی^۲, محسن روزبهانی^۱, و حبیب مجیدی ذوالبین^۲

^۱پژوهشکده لیزر و اپتیک، تهران، ایران

^۲گروه فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله ثابتیت نوارهای تداخلی تمام نگاشتی 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 $\lambda/24$ (در طول موج ضبط ۴۴۲ nm) شده و کیفیت توری تمام نگاشتی 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 Shabestari¹, Isa A.Alidokht¹, Hamid Ghaemi bafghi², Mohsen Ruzbehani¹ and

Habib Madjidi zolbin²

¹Laser & Optics Research School, Tehran, Iran

²Department 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 $\lambda/24$ (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

درايافتی توسيط دوربين، به واسطه کارت رابط به ريانه منتقل می شود سپس ميزان جابه جايی نوارهای تداخلی از طریق بررسی فریم های متواالی دوربین [۷] توسيط ريانه در محیط نرم افزار MATLAB محاسبه و سیگنال کنترلی PID، توسيط ريانه و مدارات الکترونیکی برای حرکت پیزو ارسال می شود.

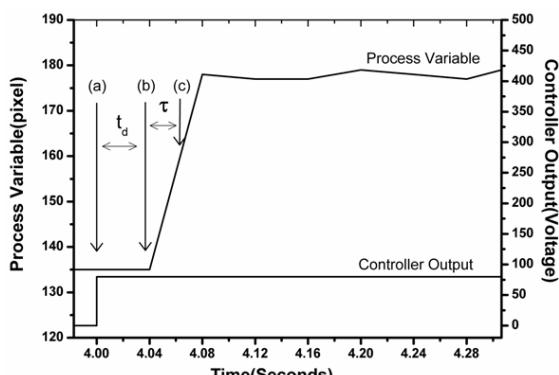
۳- تئوري

PID از حروف اول سه مولفه: متناسب (Proportional)، انتگرال (Integral) و دیفرانسیل (Differential) گرفته شده است. اگر سیگنال خطای محاسبه شده را $e(t)$ در نظر بگیریم، سیگنال کنترلی که توسيط PID به پیزو الکترونیک 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 اين رابطه متناسب با سیگنال خطای، جمله دوم متناسب با خطاهای باقیمانده و جمع شده از قسمتهای قبل و جمله سوم که از روی شبیه خطای نسبت به زمان به دست می آيد، رفتار سیستم را پیشگویی کرده و پایداری سیستم را بهبود می بخشد. k_p بهره تناسب، T_i زمان انتگرال و T_d زمان دیفرانسیل گیری می باشد.

البته در سیستم های 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 شده اند.



شکل ۲: پاسخ زمانی سیستم کنترل به سیگنال اعمال شده. در این نمودار t_d تاخیر بین لحظه اعمال اعمال ولتاژ به سیستم کنترل و لحظه شروع به حرکت نوارهای تداخلی است و τ مدت زمانی است که طول می کشد تا جابه جایی نوارهای تداخلی به $63/63$ بیشینه خود برسد.

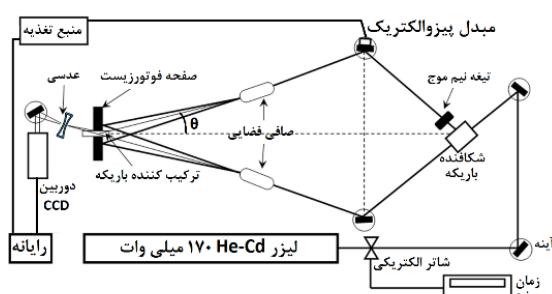
۱- مقدمه

هنگام ضبط توری های پراش تمام نگاشتی در اندازه بزرگ، شدت نور در روی صفحه ضباط تمام نگاشتی خیلی ضعیف و زمان نوردهی خیلی طولانی می شود. اما عوامل مزاحمی از قبیل ارتعاشات محیطی، جریان هوا و تغییر دمای اطراف، باعث می شود اختلاف فاز بین امواج مرجع و شیئی تغییر یافته و نوارهای تداخلی به صورت کاتورهای جابه جا شوند. که این باعث کاهش کنتراست می شود. برای ساخت یک توری تمام نگاشتی کارآمد، باید جابه جایی نوارهای تداخلی به کمتر از $\lambda/8$ محدود شود. در طی نوردهی طولانی مدت، معمولاً میز اپتیکی چندین طول موج جابه جا می شود. بنابراین باید ملاحظات خاصی در نظر گرفته شود تا جابه جایی نوارهای تداخلی محدود شود. برای این منظور روشهای غیر فعال [۱] و فعال [۲-۶] توسعه یافته اند.

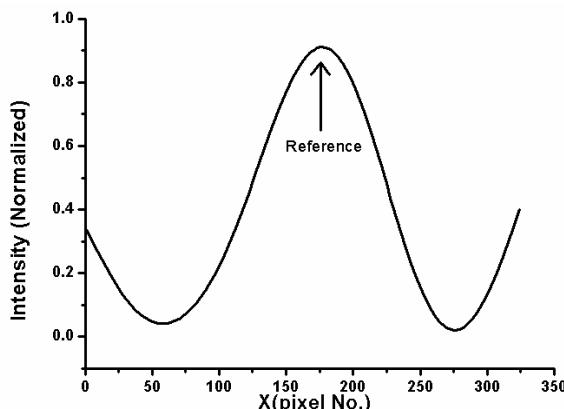
در این پروژه ما از روش فعال در یک چیدمان اپتیکی تمام نگاشتی استفاده کردیم که از یک آینه پیزو الکترونیک در ترکیب بازخوری استفاده می کند. تداخل سنج شامل یک سیستم کنترل درجه است که اجازه نظارت بر پایداری کلی چیدمان را می دهد. سیگنال خطایی که از این طریق به دست می آید برای کنترل آینه پیزو الکترونیک در سیستم کنترل PID مورد استفاده قرار می گیرد.

۲- چیدمان

چیدمان به کار رفته برای ثبت نوارهای تداخلی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این چیدمان در مسیر یکی از باریکه ها، مبدل پیزو الکترونیک قرار گرفته است. در بالای سایه های پشت صفحه تمام نگاری، یک ترکیب کننده باریکه (آینه نیم شفاف) قرار گرفته تا نوارهای تداخلی لازم را برای دوربین ایجاد کند. این نوارها توسط عدسی مقعر باز و به دوربین منتقل می شود. اطلاعات توزیع شدت نور



شکل ۱: چیدمان به کار رفته برای ثبت نوارهای تداخلی.



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 می‌دهیم 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.

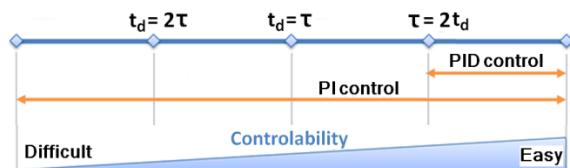
۴- نتایج آزمایش

با رعایت تمام ملاحظات جهت حذف ارتعاشات محیطی در آزمایشگاه، ارتعاشات سیستم بدون کنترل بازخوردی $\frac{1}{3}$ بوده است (شکل ۵).

این در شرایطی بوده است که آزمایشگاه در زیر زمین، کف زیر میز اپتیکی ضد ارتعاش، سیستم تهويه 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 $\frac{1}{14}$ برسانیم (شکل ۶). روش کار به این صورت بود که ابتدا نمودار میزان جابجایی نسبت به ولتاژ اعمالی به پیزوالکترویک به دست آمده و سپس از روی شبی این نمودار، ولتاژ مناسب برای میزان جابجایی نسبت به مرتعش بدست آمد.

در آزمایش فعلی با به دست آوردن مقادیر بهینه برای



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 $5/5$ بزرگ‌تر شود، فقط از دو مولفه P و I استفاده شده و مولفه D حذف می‌شود (شکل ۳) [۸]. نسبت τ/t_d در سیستم ما تقریباً 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 + (1/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 نویسه‌های آن می‌باشد. چون فرکانس نویسه‌ها 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 نگهداشیم 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 خطای برنامه معرفی می‌شود. در این کد برنامه dt مدت زمان اجرای برنامه در یک حلقه و output کمیت فرستاده شده به راهانداز پیزوالکترویک می‌باشد.

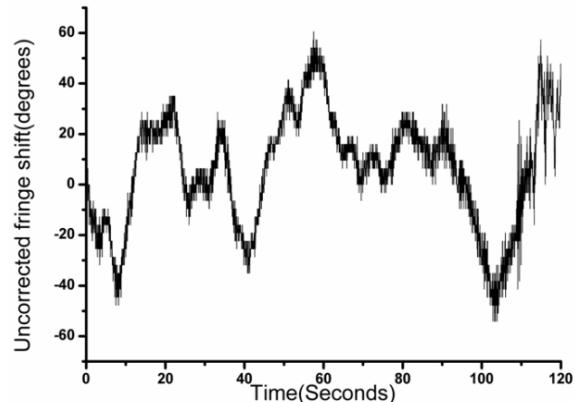
۵- نتیجه‌گیری

شكل‌های 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 کیم. این رویه ابتدا بدون استفاده از سیستم کنترل PI و از روی شب منحنی میزان جابه‌جایی نوارهای تداخلی بر حسب ولتاژ اعمال شده انجام شد که توانستیم ارتعاشات را به کمتر از $\lambda/24$ برسانیم و سپس با استفاده از سیستم کنترل PI و یافتن پارامترهای بهینه، نتیجه را بهبود بخشیده و جابه‌جایی نوارهای تداخلی را به کمتر از $\lambda/24$ رساندیم.

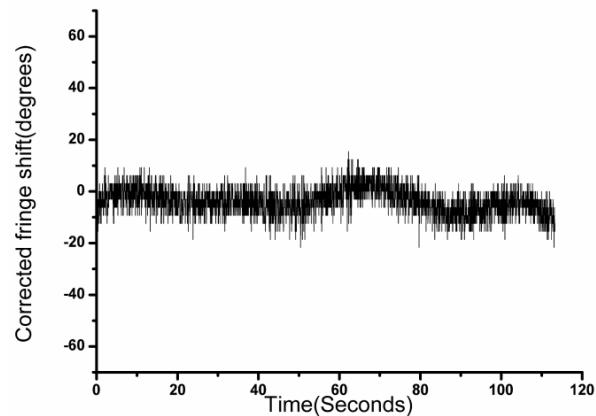
مراجع

- [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.excalibreengineering.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).
- [7] پرتوی شبستری، ناصر و همکاران “طراحی و ساخت سیستم تثبیت کننده نوارهای تداخلی، جهت ساخت توری پراش تمام‌گاشتی” کنفرانس فیزیک ایران، (۱۳۹۲) ۱۲۹۸–۱۳۰۱.
- [8] Jacques F. Smuts “Process Control for Practitioners,” OptiControls. Inc. (2011).

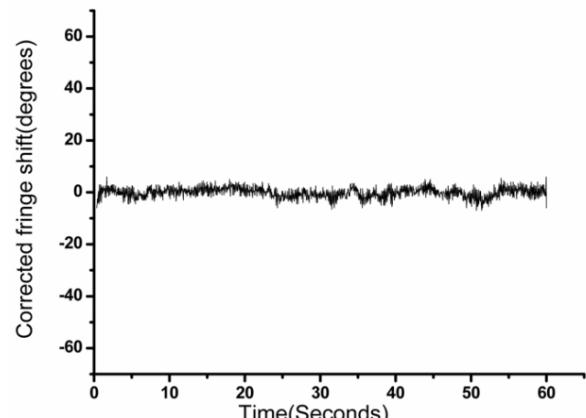
پارامترهای k_p و T_i در سیستم کنترلی PI و اعمال آنها روی سیستم، توانستیم خطای حاصل از ارتعاشات را به کمتر از $\lambda/24$ برسانیم (شکل ۷).



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



شکل ۶: جابه‌جایی نوارهای تداخلی بر حسب درجه، پس از اصلاح توسط سیستم کنترل بازخوردی بدون اعمال کنترل PI.



شکل ۷: جابه‌جایی نوارهای تداخلی بر حسب درجه، پس از اصلاح توسط سیستم کنترل بازخوردی و اعمال کنترل PI.