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

طراحی و اجرای روش بسیار دقیق تنظیم هم‌مرکزی و هم‌راستائی عدسی‌ها در یک سامانه‌ی تصویربرداری به منظور بهبود کیفیت تصویر با بازتاب جبهه‌موج کروی از سطوح عدسی‌ها

مسعود مردانی، امید سعادتمند، میثم اشتری، سمیه خلیلی و مهرداد سلطانیان

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده – در این تحقیق روشی بسیار دقیق، به منظور تنظیم هم‌راستائی و هم‌مرکزی عدسی‌ها، در یک سامانه‌ی تصویربرداری ارائه خواهد شد. در این روش از جبهه‌موج کروی خروجی از یک اتوکلیماتور و عدسی کانونی‌کننده به منظور تنظیمات استفاده خواهد شد. با بازتاب جبهه‌ی موج کروی از سطح روئی هر عدسی، هم‌مرکزی و با بازتاب جبهه‌موج کروی از سطح پشتی هر عدسی، هم‌راستائی آن تنظیم خواهد شد. تنظیمات هم‌مرکزی و هم‌راستائی، برای کلیه‌ی عدسی‌های سامانه‌ی تصویربرداری انجام و سامانه با کیفیت بسیار بالا مونتاژ خواهد شد.

کلید واژه- هم‌راستائی، هم‌مرکزی، تابع انتقال مدولاسیون، اتوکلیماتور، عدسی کانونی‌کننده

Designing & performing an accurate method for accurate adjustment of tilt and de-center in lenses in an optical system for quality enhancement

Masoud Mardani[1], Omid Saadatmand[1], Meysam Ashtari[1], Somaye Khalili[1], Mehrdad Soltanian[1]

[1] Malek-e-Ashtar University

Abstract-in this research an accurate method for adjustment of tilt and de-center in an optical system is presented. In this method exit spherical wave-front of and autocollimator and objective is used. De-center and tilt of each lens are adjusted through reflecting spherical wave-front from the front surface and back surface of each lens, respectively. Adjustment of de-center and tilt for all lenses is performed while the performance of system is enhanced considerably.

Keywords: alignment, de-center, modulation transfer function, autocollimator, microscope objective

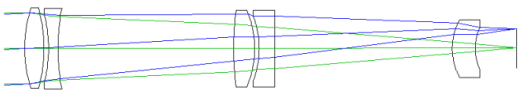
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]

۱- مقدمه

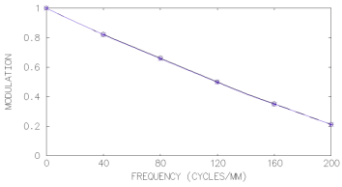
در یک سامانه‌ی تصویربرداری، هم‌محور و هم‌مرکز بودن دقیق عدسی‌ها، در کیفیت تصویر اهمیت فراوان دارد. این اهمیت به‌گونه‌ای است که در یک سامانه‌ی تصویربرداری چنانچه قطعات اپتیکی و مکانیکی، با دقت بالا ساخته شوند اما روشی به منظور انجام تنظیمات هم‌مرکزی و هم‌راستائی، طراحی و اجرا نشود، کیفیت تصویر نامطلوب خواهد بود [1]. در روشی که در مرجع [2] طراحی و اجرا شد، هم‌مرکزی عدسی‌ها با بازتاب جبهه‌موج کروی از سطح بالائی هر عدسی و هم‌راستائی آن‌ها با بازتاب جبهه‌موج تخت از تیغه‌ی متوازی‌السطوح قرار گرفته بر روی مونت مکانیکی هر عدسی تنظیم شد. در روش اجرا شده در مرجع [2] دقت تنظیم هم‌راستائی، بسیار وابسته به دقت مونتاژ هر لنز داخل مونت مکانیکی آن است زیرا آنچه در عمل، هم‌راستا می‌شود محور مکانیکی مونت مکانیکی است و نه محور اپتیکی عدسی. بنابراین هر آن‌چه خطا در انطباق محور اپتیکی عدسی با محور مکانیکی مونت وجود داشته باشد، در هم‌راستائی نیز وارد خواهد شد. در این تحقیق در ابتدا با شبیه‌سازی در نرم‌افزار طراحی اپتیکی OSLO، [3]، تاثیر عدم هم‌مرکزی و عدم هم‌راستائی عدسی‌ها، در تابع انتقال مدولاسیون، MTF، یک سامانه‌ی تصویربرداری، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. سپس روش جدیدی به منظور تنظیم هم‌راستائی عدسی‌ها طراحی و اجرا خواهد شد. در روش جدید با بازتاب جبهه‌موج کروی از سطح بالائی هر عدسی، هم‌مرکزی هر لنز تنظیم خواهد شد و با بازتاب جبهه‌موج کروی از سطح پشتی هر عدسی، هم‌راستائی آن لنز تنظیم خواهد شد. روش طراحی شده، برای یک سامانه‌ی تصویربرداری اجرا و تاثیر آن در افزایش کیفیت تصویر سامانه، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲-شبیه‌سازی تاثیر عدم هم‌مرکزی و عدم هم‌راستائی بر کیفیت تصویر در یک سامانه‌ی تصویربرداری در نرم‌افزار OSLO

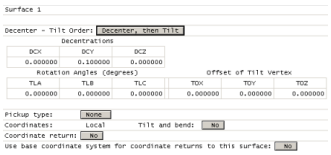
چیدمان اپتیکی عدسی‌ها در سامانه‌ی تصویربرداری مورد نظر، در شکل ۱ دیده می‌شود. در شکل ۲، منحنی MTF سامانه‌ی طراحی شده، منطبق بر منحنی MTF سامانه‌ی محدود به پراش دیده می‌شود. چنانچه در نرم‌افزار، به عنوان مثال عدسی شماره‌ی ۲، مطابق شکل ۳، به میزان DCY=0.1mm در راستای y جابه‌جا شود، الگوی تداخلی و منحنی MTF حاصل به ترتیب مطابق با شکل‌های ۴ و ۵ خواهد شد. از طرف دیگر چنانچه عدسی شماره‌ی ۲، مطابق شکل ۶ به میزان TLA=10arcmin=0.17° نسبت به راستای محور اپتیکی کج شود، الگوی تداخلی و منحنی MTF حاصل به ترتیب مطابق با شکل‌های ۷ و ۸ خواهد شد.



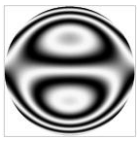
شکل ۱، چیدمان اپتیکی عدسی‌ها در سامانه‌ی تصویر برداری



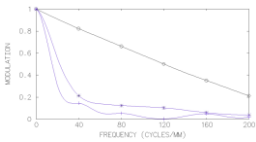
شکل ۲، منحنی MTF سامانه‌ی طراحی شده



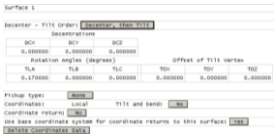
شکل ۳، جابه‌جا کردن عدسی ۲، به میزان DCY=0.1mm



شکل ۴، الگوی تداخلی حاصل از جابه‌جا شدن عدسی ۲، به میزان DCY=0.1mm

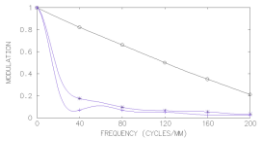


شکل ۵، منحنی MTF، حاصل از جابه‌جا شدن عدسی ۲، به میزان DCY=0.1mm



شکل ۶، کج شدن عدسی ۲، به میزان TLA=10arcmin=0.17°

شکل ۷، الگوی تداخلی، حاصل از کج شدن عدسی ۲، به میزان TLA=10arcmin=0.17°



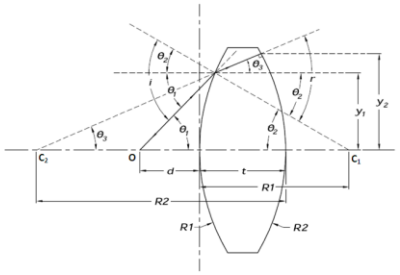
شکل ۸، منحنی MTF، حاصل از کج شدن عدسی ۲، به میزان TLA=10arcmin=0.17°

از شکل‌های ۵ و ۸ دیده می‌شود MTF در نتیجه‌ی جابه‌جائی عدسی و یا کج شدن آن به میزان جزئی، بسیار کاهش خواهد یافت.

۳-تعیین موقعیتی که در آن جبهه‌موج کروی بر سطح پشتی عدسی منطبق می‌شود

به منظور تعیین موقعیتی که در آن موقعیت جبهه‌موج کروی بر سطح پشتی عدسی منطبق می‌شود لازم است ردیابی پرتو صورت پذیرد. در شکل ۹ نقطه‌ی C_1 مرکز انحنای سطح جلوئی، نقطه‌ی C_2 مرکز انحنای سطح پشتی و نقطه‌ی O، نقطه‌ی به فاصله‌ی d، از سطح جلوئی می‌باشد که اگر کانون عدسی کانونی‌کننده در آن نقطه قرار گیرد، جبهه‌موج کروی ساطع شده از آن بر سطح پشتی منطبق خواهد بود.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]



شکل۹: تصویر یک عدسی و ردیابی پرتو در آن به منظور اطباق جبهه‌موج کروی بر سطح پشتی

برای زاویه‌ی تابش i داریم:

$$i = \theta_1 + \theta_2$$

زاویه‌ی شکست r از رابطه‌ی زیر حاصل خواهد شد:

$$r = \theta_3 + \theta_2$$

برای زوایای θ_1 ، θ_2 و θ_3 داریم:

$$\theta_1 = \frac{y_1}{d}, \quad \theta_2 = \frac{y_1}{R_1}, \quad \theta_3 = \frac{y_2}{R_2}$$

برای y_2 داریم:

$$y_2 = \frac{y_1 R_2}{R_2 - t}$$

از رابطه‌ی اسنل داریم:

$$i = nr$$

$$\theta_1 + \theta_2 = n(\theta_2 + \theta_3)$$

با جایگذاری از روابط بالا داریم:

$$\frac{y_1}{d} + \frac{y_1}{R_1} = n\left(\frac{y_1}{R_1} + \frac{y_2}{R_2}\right)$$

$$\frac{y_1}{d} + \frac{y_1}{R_1} = n\left(\frac{y_1}{R_1} + \frac{y_1 R_2}{R_2(R_2 - t)}\right)$$

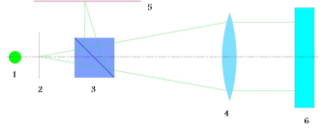
و در نهایت برای فاصله‌ی d داریم:

$$d = \frac{R_1(R_2 - t)}{nR_1 + (n-1)(R_2 - t)}$$

بنابراین چنانچه کانون عدسی کانونی‌کننده به اندازه‌ی فاصله‌ی d از راس سطح جلوئی دور شود، جبهه‌موج کروی ساطع شده از آن، بر سطح پشتی منطبق خواهد شد.

۴-نتایج تجربی

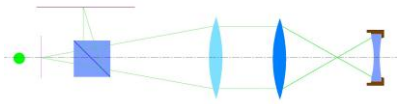
به منظور تنظیم دقیق هم‌مرکزی و هم‌راستائی عدسی‌ها در یک سامانه‌ی تصویربرداری، لازم است از یک اتوکلیماتور، همراه با یک عدسی کانونی‌کننده استفاده شود. نمای شماتیک یک اتوکلیماتور در شکل ۱۰ دیده می‌شود.



شکل ۱۰، خروج نور موازی از اتوکلیماتور

1 منبع نور، 2 رتیکل، 3 باریکه‌شکن، 4 عدسی شیئی، 5 CCD

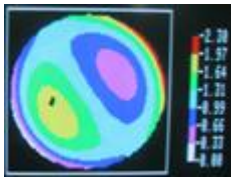
چنانچه یک عدسی کانونی‌کننده در برابر اتوکلیماتور قرار داده شود، مشابه شکل ۱۱، جبهه‌موج تخت به جبهه‌موج کروی تبدیل خواهد شد.



شکل ۱۱، خروج جبهه‌موج کروی از اتوکلیماتور با قرار دادن عدسی شیئی در برابر آن

با جابه‌جا کردن عدسی شیئ در راستای محور اپتیکی و منطبق کردن جبهه‌موج کروی بر سطح بالائی هر عدسی، تصویری از الگوی رتیکل اتوکلیماتور، در کانون آن تشکیل خواهد شد. با جابه‌جا کردن عدسی مورد آزمون در صفحه‌ی عمود بر محور اپتیکی، این تصویر نیز جابه‌جا و به مرکز کانون منتقل و هم‌مرکزی تنظیم خواهد شد. پس از تنظیم هم‌مرکزی، لازم است هم‌راستائی عدسی مورد آزمون نیز تنظیم شود. به این منظور لازم است عدسی کانونی‌کننده در راستای محور اتوکلیماتور به گونه‌ای جابه‌جا شود که جبهه‌موج کروی پس از وارد شدن به عدسی مورد آزمون، بر سطح کروی پشتی آن منطبق و از آن بازتاب شود. با انجام این کار تصویر دیگری از الگوی رتیکل اتوکلیماتور، در کانون آن تشکیل خواهد شد. با تغییر راستای عدسی مورد آزمون، این تصویر نیز جابه‌جا و به مرکز کانون منتقل خواهد شد. لازم است با جابه‌جا کردن عدسی کانونی‌کننده در راستای محور اپتیکی و بازتاب متوالی جبهه‌موج کروی از سطوح بالائی و پشتی، از تنظیم هم‌زمان هم‌مرکزی و هم‌راستائی عدسی اطمینان حاصل شود. تنظیم هم‌مرکزی و هم‌راستائی به روش بالا، برای تمامی عدسی‌های یک سامانه‌ی تصویربرداری انجام و سامانه‌ی تصویربرداری با دقت بسیار بالا مونتاژ خواهد شد. چنانچه هر عدسی با دقت داخل مونت خود مونتاژ شود ولی روش تنظیم هم‌مرکزی و هم‌راستائی بالا اجرا نشود، سامانه‌ی اپتیکی با کیفیت نه چندان مطلوب، مونتاژ خواهد شد که الگوی تداخلی و جبهه‌موج حاصل، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود. در شکل ۱۴ منحنی MTF برای سامانه‌ای که در آن تنظیمات هم‌مرکزی و هم‌راستائی انجام نشده است، با منحنی MTF سامانه‌ی محدود به پراش مقایسه شده است.

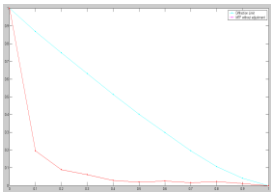
شکل ۱۲ الگوی تداخلی حاصل از آزمون MTF بر روی سامانه قبل از انجام تنظیمات



شکل ۱۳، نمایش تغییر شکل جبهه‌موج در نتیجه‌ی عبور از سامانه. حداکثر ناهمواری‌ها در جبهه‌موج برابر با PV=2.30 می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۲، پارامتر PV که بیانگر بیشینه‌ی ناهمواری‌ها در الگوی

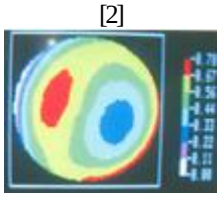
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]



شکل۱۴، منحنی MTF در سامانه قبل از انجام تنظیمات هم‌محوری و هم‌مرکزی

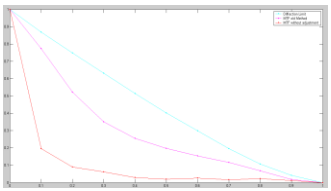
تداخلی حاصل از آزمون MTF می‌باشد، برابر با PV=2.30 و پارامتر RMS که بیانگر انحراف استاندارد ناهمواری‌ها می‌باشد، برابر با RMS=0.39 اندازه‌گیری شده است. در صورتی که هم‌مرکزی و هم‌راستائی در عدسی‌ها به روش پیشنهادی در مرجع [2] اصلاح شود، الگوی تداخلی و ناهمواری جبهه‌موج، در سامانه‌ی تصویربرداری حاصل، در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ دیده می‌شود. در شکل۱۷، منحنی MTF در سامانه‌ای که به روش مرجع [2] تنظیم شده است، با منحنی MTF سامانه، قبل از انجام تنظیمات و منحنی MTF سامانه‌ی محدود به پراش، مقایسه شده است.

شکل۱۵، الگوی تداخلی حاصل از آزمون MTF بر روی سامانه پس از انجام تنظیمات به روش [2]



شکل۱۶، نمایش ناهمواری جبهه‌موج در نتیجه‌ی عبور از سامانه، پس از انجام تنظیمات به روش [2]

حداکثر ناهمواری‌ها برابر با PV=0.78 می‌باشد.

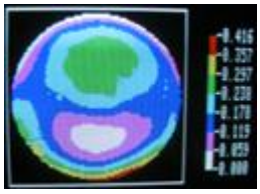


شکل۱۷، مقایسه‌ی نمودار MTF در سامانه‌ای که به روش[2] تنظیم شده است با منحنی MTF سامانه قبل از انجام تنظیمات و منحنی MTF سامانه‌ی محدود به پراش

در صورتی که هم‌مرکزی و هم‌راستائی در عدسی‌ها به روشی که در این مقاله به آن پرداخته شده است تنظیم شود، الگوی تداخلی و ناهمواری جبهه‌موج حاصل، در شکل‌های۱۸ و ۱۹ دیده می‌شود. در شکل ۲۰، منحنی MTF در سامانه‌ای که به روش جدید تنظیم شده است، با منحنی MTF همان سامانه که به روش [2] تنظیم شده است، منحنی MTF سامانه قبل از انجام تنظیمات و منحنی MTF سامانه‌ی محدود به پراش، مقایسه شده است. همانگونه که از این نتایج آزمون دیده می‌شود، در روش جدید نسبت به روش مرجع [2]، پارامتر PV از 0.77 به 0.44 و پارامتر RMS از 0.13 به 0.079 کاهش یافته است. به این ترتیب با اجرای روش جدید، کیفیت تصویر در سامانه‌ی تصویربرداری نسبت به روش مرجع [2]، بیش از ۶۰ درصد افزایش یافته است.

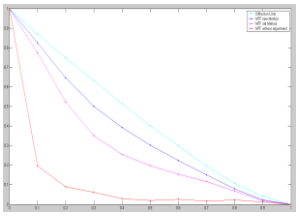
توجه به این نکته ضروریست که در روش جدید، نسبت به روش مرجع [2]، نیازی به طراحی و ساخت فیکسچرهای دقیق مکانیکی، به منظور مونتاژ کردن دقیق هر عدسی داخل مونت نگهدارنده‌ی خود نمی‌باشد.

شکل۱۸، الگوی تداخلی حاصل از آزمون MTF بر روی سامانه پس از انجام تنظیمات به روش جدید



شکل۱۹، نمایش ناهمواری جبهه‌موج در نتیجه‌ی عبور از سامانه، پس از انجام تنظیمات به روش جدید

حداکثر ناهمواری‌ها برابر با PV=0.41 می‌باشد.



شکل۲۰، مقایسه‌ی منحنی MTF در سامانه‌ای که به روش جدید تنظیم شده است، با منحنی MTF همان سامانه که به روش [2] تنظیم شده است، منحنی MTF سامانه قبل از انجام تنظیمات و منحنی MTF سامانه‌ی محدود به پراش

۵-نتیجه‌گیری

در مونتاژ سامانه‌های اپتیکی دقیق، صرفاً مونتاژ عدسی‌ها با دقت از مرتبه‌ی صدم میلیمتر، که در مکانیک دقت بسیار بالائی می‌باشد، تضمین کننده‌ی کیفیت تصویر در سامانه‌ی تصویربرداری نخواهد بود، بلکه به منظور رسیدن به کیفیت تصویر مطلوب، لازم است با استفاده از تجهیزات دقیق اپتیکی، نظیر اتوکلیماتورها، نسبت به انجام تنظیمات دقیق هم‌راستائی و هم‌مرکزی عدسی‌ها و مونتاژ بسیار دقیق سامانه اقدام شود. در این مقاله روشی کسب شده است که با استفاده از آن بدون نیاز به طراحی و ساخت مونت‌ها و فیکسچرهای مکانیکی بسیار دقیق، با بازتاب جبهه‌موج کروی از سطوح هر عدسی، هم‌مرکزی و هم‌راستائی عدسی‌ها تنظیم و سامانه‌ی تصویربرداری با کیفیت تصویر بسیار بالا حاصل خواهد شد.

مراجع

[1] Paul R. Yoder.Jr., *Mounting Optics in Optical Instruments*, SPIE , 2008

[2] مسعود مردانی و همکاران، طراحی و اجرای روش دقیق تنظیم هم‌محوری و هم‌مرکزی عدسی‌ها در یک سامانه‌ی تصویربرداری به منظور بهبود کیفیت تصویر، هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران،

[3] Oslo Optics Software for Layout and Optimization, 2009, Lambda Research Corporation

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-20]