تصویربرداری فوویایی با پویش طیفی

فرهنگ جواهریان، بیژن رشیدیان

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده برق

چکیده – در تصویربرداری فوویایی، ابیراهی هندسی تنها در یک نقطه‌ی دید جبرانسازی می‌شود. این نقطه‌ی دید را میتوان با تغییر فازِ یک عنصر مدولاتور فاز کریستال مایع، تغییر داد و بدون نیاز به لنز پیچیده و گرانقیمت، زوایای دید بزرگی را به صورت پویا پوشش داد. مدولاتورهای فاز کریستال مایع بخاطر محدودیتهای فن‌آوری تنها در بازه‌ی کوچکی از طول موج قادر به تامین فاز مورد نیاز هستند و به این خاطر تصویرگرهای فوویایی تک رنگ و کم نور هستند. در این مقاله روشی به نام پویش طیفی *Spectral Scanning (SS)* پیشنهاد شده است. در این روش، سه رنگ در بازه‌ی مرئی در طول طیف مورد نظر انتخاب شده، برای هر کدام از رنگها جبرانسازی جداگانه انجام و بصورت متوالی در مدولاتور فاز اعمال می‌شود. براساس اثر تیزکنندگیِ تصویر با کنتراست بالا، تصویر مرکبِ حاصل هنوز تفکیک خوبی دارد و به این ترتیب امکان پیاده سازی تصویرگر فوویایی در زوایای بزرگ به صورت چندرنگی و همه رنگی با مقدار قابل قبولی افت کیفیت نسبت به سیستم تک رنگ، فراهم می‌گردد. در نمونه‌ی تحلیل شده در این مقاله، زاویه‌ی فوویا تا ۱۰ برابر زاویه‌ی دید لنز اولیه بدست آمد. بهره‌ی روشنایی نسبت به سیستم فوویایی تک رنگ حدود ۱۵ برابر است.

کلید واژه- تصویربرداری فوویایی، طراحی لنز زاویه‌ی پهن، اثر تیزکنندگی تصویر، مدولاتور نوری مکانی کریستال مایع، جبران ابیراهی

Spectral scanning foveated imaging

Farhang Javaherian, Bizhan Rashidian

Sharif University of Technology, Department of Electrical Enginering

Abstract- In foveated imaging method, geometrical aberrations are corrected in just one point of view called fovea. The fovea can be dynamically changed by changing the phase of a liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM). These devices suffer from technological problems that limit their range of change capability. This limitation, renders the foveated imaging systems that use such devices, single wavelength and thus having a low illumination. In this paper, a technique named Spectral Scanning (SS) is proposed. In the SS method, aberration compensation is performed sequentially for each of three colors that span a wide band. Based on the sharpening effect, the combined image shows a rather good resolvability in the whole band. Foveated imager implemented by this technique can be used to image multi-chromatically and pan-chromatically large field angles with an acceptably little loss in the contrast as compared with traditional single wavelength systems. In fact, the design example showcased in this paper is shown to extend field of view up to 10 times of that of the original lens and illumination gain is about 15-fold as compared with the single wavelength foveated imager.

Keywords: foveated imaging, wide angle lens design, sharpening effect, liquid crystal spatial light modulator, aberration compensation

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- صورت مساله

در طراحی لنز، تلاش می‌شود تا با جبران سازی ابیراهی هندسی در طول موجهای مورد نظر، کیفیت مطلوب تصویربرداری در حداکثر اندازه‌ی روزنه و حداکثر زاویه‌ی دید تامین گردد. روزنه‌ی بزرگتر به معنای تصویر روشنتر و سیگنال به نویز بالاتر است. لنز با زاویه‌ی دید بزرگتر هم سطح بزرگتری در فضای شیء را پوشش می‌دهد. برای این منظور صرف بودجه‌ی طراحی گزافی لازم است که به نوبه‌ی خود هزینه‌ی طرح و مشکلات پیاده سازی را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال در لنزها با کیفیت متوسط و عالی در صنعت عکاسی، ۱۰ تا ۲۰ سطح اپتیکی و اغلب بیش از ۳ نوع شیشه استفاده می‌شود.

در روش تصویربرداری فوویایی [۱،۲]، به جای جبرانسازی ابیراهی در تمام زایه‌ی دید، با الهام گرفتن از نحوه‌ی عملکرد چشم انسان، ابیراهی برای یک نقطه‌ی مشخص جبران می‌شود. در شبکیه‌ی چشم، چگالی اعصاب حسگر در مرکز دید و در ناحیه ای موسوم به فوویا fovea بسیار بالاتر از محیط پیرامون آن است و در نتیجه کیفیت تصویر تنها در مرکز دید تامین میشود. به این خاطر است که چشم برای رصد کردن هدف مورد نظر در چشمخانه چرخش میکند. البته ناحیه‌ی فوویا در روش تصویربرداری فوویایی این تفاوت را با چشم دارد که کیفیت مطلوب با تطبیق اپتیکی حاصل میشود و نه مانند شبکیه با نمونه برداری غیریکنواخت.

تصویربرداری فوویایی با یک عنصر تغییردهنده‌ی فاز در مردمک یک لنز تصویرساز معمولی پیاده سازی شده است. عنصر تغییردهنده‌ی فاز معمولا از نوع مدولاتور نوری مکانی کریستال مایع Liquid Crystal Spatial Light modulator (LC-SLM) است. در این روش میتوان زوایای دید بسیار بزرگی را با یک لنز ساده و ارزانقیمت تصویر کرد. برای این کار، در نقطه‌ی دید مورد نظر، ضرایب ابیراهی لنز اولیه استخراج شده و صفحه‌ی فاز معادل آن با توجه به تعداد پیکسل‌های مدولاتور فاز بازسازی میشود. فاز مورد نظر در هر پیکسل بصورت الکترونیکی به مدولاتور منتقل شده و با اعمال آن، ابیراهی هندسی در تئوری به صورت کامل جبران میگردد.

یک ضعف مهم در این سیستم‌ها که بکارگیری عملی آنها را محدود ساخته، محدودیت عملی مدولاتور فاز کریستال مایع است. این ادوات، بازه‌ی تنظیم فاز محدودی دارند و پیاده سازی صفحه‌ی فاز باید به صورت پیمانه‌ی طول موج modulo-λ انجام شود. در نتیجه جبرانسازی تنها برای یک طول موج مشخص قابل پیاده سازی است و بازدهی طیفی با فاصله گرفتن از این طول موج به سرعت افت میکند. به این خاطر، سیستم های تصویربرداری فوویایی بصورت تک طول موج پیاده می‌شوند و روشنایی تصویر پایینی دارند. در این مقاله، روشی با نام پویش طیفی Spectral Scanning (SS) پیشنهاد میشود تا تصویربرداری فوویایی و تغییر پویای نقطه‌ی دید تا زوایای بزرگ در یک طیف وسیع فرکانس از جمله در تصویربرداری تمام رنگی (پانکروماتیک) امکانپذیر گردد. در بده بستان trade-off طراحی، مقداری افت عملکرد نسبت به سیستم تک طول موج بصورت کاهش کنتراست در ازای روشناییِ خیلی بیشتر مبادله میگردد.

۲- روش پویش طیفی در تصویربرداری فوویایی

۱-۲- معرفی لنز نمونه

برای معرفی و تشریح عملکرد سیستم، یک لنز نمونه با طراحی بسیار ساده و ارزانقیمت انتخاب شده است. لنز انتخاب شده با نام تجاری ADP-25.4-75A یک لنز آکرومات دو شیشه ای از کاتالوگ شرکت Archer Optics [۳] است. این لنز با روزنه‌ی f/4 برای تصویربرداری از هدف بینهایت استفاده شده است.

در فاصله‌ی ۱ سانتیمتر در پشت لنز، یک مدولاتور فاز با ۵۱۲×۵۱۲ پیکسل قرار داده شده است. پیکسل‌ها مربعی به ضلع ۳۱٫۶ میکرون هستند. هر چقدر پیکسل‌ها کوچکتر باشند، جبرانسازی فاز دقیقتر انجام می‌شود، اما در عوض اثر تفرق بیشتر ظاهر می‌شود [۲]. مقادیر انتخاب شده بهترین سازش ممکن میان این دو الزام متقابل را امکانپذیر می‌سازد. در شکل ۱ نقشه‌ی لنز نمایش داده شده است.

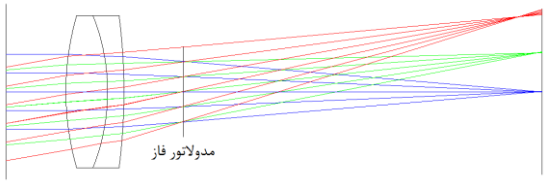
در شکل ۲، دیاگرامِ Modulation Transfer Function (MTF) لنز اولیه (بدون تنظیم فاز) نسبت به زاویه رسم شده است. از آنجا که در کاربردهای مورد نظر ما، جهت مرجحی برای تفکیک پذیری مد نظر نیست، در این مقاله

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

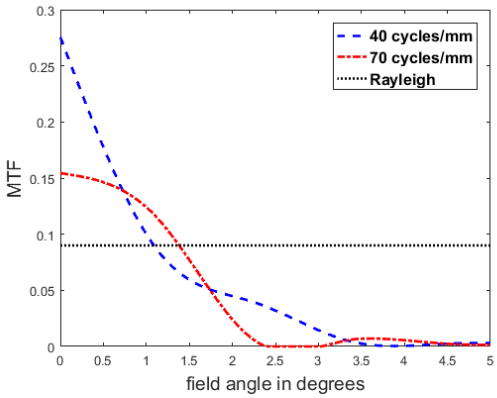
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

MTF به معنای حداقل دو مقدار آن در راستای مماسی tangential و پره چرخی sagittal لحاظ شده است. سه طول موج آبی، سبز و قرمز خطوط طیفی F، d و c هلیوم به ترتیب ۴۸۶,۱، ۵۸۴,۶ و ۶۵۶,۳ نانومتر انتخاب شده و MTF چندطیفی با وزن دهی مساوی از مقادیر MTF در هر کدام از این طول موجها ساخته می‌شود.

در این مقاله از نرم افزار تحلیل اپتیکی ZEMAX استفاده شده است.



شکل ۱: نقشه‌ی لنز آکرومات با مدولاتور فاز



شکل ۲: نمودار MTF چندطیفی لنز اولیه در دو فرکانس مکانی ۴۰ و ۷۰ سیکل بر میلیمتر

اگر برای تفکیک پذیری، معیار رایلی Rayleigh criterion معادل MTF برابر ۰,۰۹ را بپذیریم، از شکل ۲ ملاحظه میشود که حداکثر زاویه‌ی قابل تفکیک با لنز اولیه بسیار کوچک و بین ۱ تا ۱,۵ درجه است. بخاطر طراحی بسیار ساده‌ی لنز البته انتظاری هم جز این نمی‌رود.

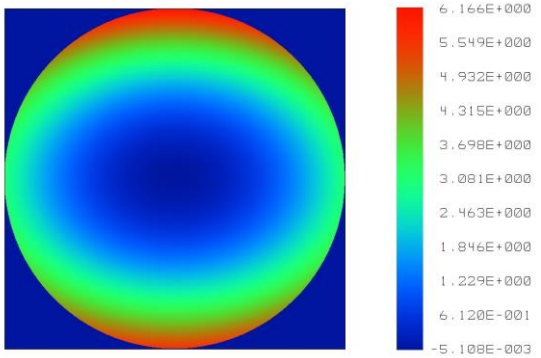
۲-۲- اثر تیزکنندگی

وقتی یک تصویر با کنتراست (مدولاسیون) بالا با تعدادی تصویر با کنتراست پایین بصورت میانگین گیری ترکیب می‌شود، کنتراست تصویر مرکب، ابتدا سریع و بعد به کندی افت می‌کند. برای مثال اگر یک تصویر با کنتراست ۱۰۰ درصد در یک فرکانس مکانی مشخص، با ۹ تصویر با کنتراست صفر ترکیب شود، کنتراست تصویر مرکب هنوز ۱۰ درصد و بالاتر از حد تفکیک پذیری رایلی خواهد بود. این پدیده اثر تیزکنندگی sharpening effect تصویر با کیفیت بر روی تصاویر کم کیفیت نامیده می‌شود [۴].

۳-۲- پویش طیفی

گفته شد که ادوات مدولاتور فاز کریستال مایع تنها در یک طول موج، جبران سازی ابیراهی را به طور موثر انجام می‌دهند. در روش پویش طیفی که نخستین بار در این مقاله مطرح می‌شود، فاز مربوط به جبرانسازی در هر کدام از طول موجهای چند طیفی بصورت متوالی به مدولاتور فاز اعمال میشود و در طول موج مورد نظر یک تصویر با کنتراست بالا تشکیل میشود. این پویش طیفی بصورت متناوب تکرار میشود و لذا در هر دوره‌ی تناوبِ پویش طیفی، یک تصویر با کنتراست (و در نتیجه تفکیک) بالا با تعدادی تصویر با کنتراست پایین ترکیب میشود و از اثر تیزکنندگی انتظار داریم که تفکیک در تصویر مرکبِ حاصل هنوز قابل قبول باشد.

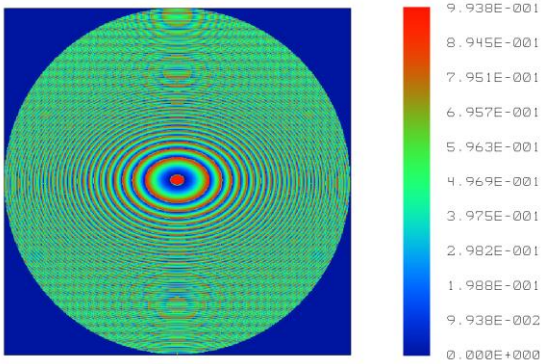
به عنوان مثال اگر برای لنز نمونه، ابیراهی در زاویه‌ی دید ۱۰ درجه و برای طول موج آبی محاسبه گردد، صفحه‌ی فازی که میتواند این ابیراهی را جبران کند، مشابه شکل ۳ خواهد بود. ملاحظه میشود که دامنه‌ی تغییرات فاز تا ۶ طول موج هم می‌رسد و با توجه به محدودیت مدولاتور فاز، برای پیاده سازی باید به صفحه‌ی فاز شکل ۴ که همان تابع فاز به پیمانه‌ی یک طول موج است، تبدیل گردد. با اعمال این تابع فاز، نمودار MTF برای هر کدام از سه رنگ، در شکل ۵ رسم شده است.



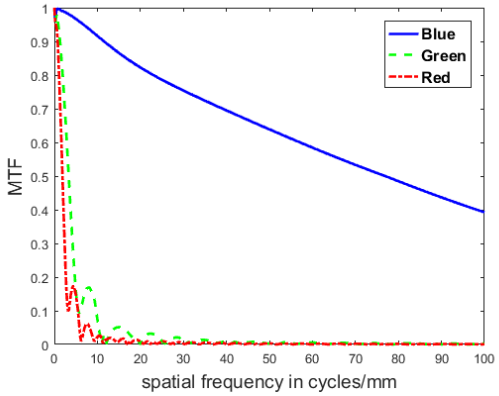
شکل ۳: صفحه‌ی فاز جبران کننده‌ی ابیراهی لنز نمونه برای زاویه‌ی ۱۰ درجه و طول موج آبی. فاز برحسب یک طول موج معادل 2π رادیان بیان شده است.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]



شکل ۴: صفحه‌ی فاز جبران کننده‌ی ابیراهی لنز نمونه برای زاویه‌ی ۱۰ درجه و طول موج آبی به پیمانه‌ی یک طول موج. فاز برحسب یک طول موج معادل 2π رادیان بیان شده است.



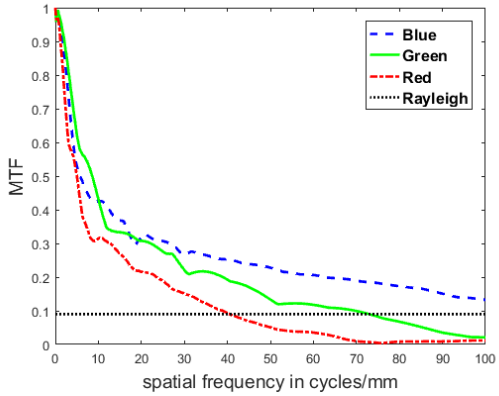
شکل ۵: نمودار MTF برای سه رنگ، وقتی که جبرانسازی زاویه‌ی ۱۰ درجه تنها برای رنگ آبی انجام شده است.

جبرانسازی تنها برای رنگ آبی انجام شده است. در روش پویش طیفی به همین ترتیب، صفحه‌ی فاز جبرانگر رنگ سبز و رنگ قرمز هم آماده شده و به توالی در مدولاتور اعمال می‌شود. اگر در زمان نورگیریِ exposure یک عکس، هر سه فاز با زمان استقرار مساوی اعمال گردند، سنسور الکترواپتیک سه عکس را که هر کدام در یکی از طول موجها تفکیک خوبی دارند با هم ترکیب می‌کند.

۴-۲- نتیجه

نمودار MTF موثر تصویر در خروجی سنسور که از میانگین گیری روی MTF سیستم جبران شده برای هر کدام از رنگها حاصل شده برای لنز نمونه و زاویه‌ی دید ۱۰ درجه، در شکل ۶ رسم شده است.

ملاحظه می‌شود که اگر حداقل کنتراست برای سه رنگ را در نظر بگیریم، رنگ قرمز با معیار رایلی تا فرکانس مکانی ۴۰ سیکل بر میلیمتر قابل تفکیک است و اگر چنانکه مرسوم است، میانگین سه رنگ را مد نظر قرار دهیم، تفکیک تا فرکانس ۷۰ سیکل بر میلیمتر انجام می‌شود. علت اینکه جبرانسازیِ رنگ آبی بهتر از سبز و جبرانسازیِ رنگ سبز بهتر از قرمز انجام شده، تفرق ناشی از پیکسل‌ها در مدولاتور فاز است که با طول موج نسبت مستقیم دارد.



شکل ۶: نمودار MTF موثر در روش پویش طیفی برای لنز آکرومات نمونه و زاویه‌ی ۱۰ درجه.

در مقایسه‌ی عملکرد لنز پویش طیفی در شکل ۶ با لنز اولیه در شکل ۲ مشاهده می‌شود که زاویه‌ی دیدی تا ۱۰ برابر لنز اولیه تصویر شده است. ضمنا در مقایسه‌ی سیستم پویش طیفی با سیستم تصویربرداری فوویایی که همین گسترش زاویه‌ی دید را اما برای یک تک طول موج تامین می‌کند، باید گفت که در روش پویش طیفی، در ازای مقداری افت در کنتراست، حدود ۱۵ برابر روشنایی تصویر افزایش یافته است.

۳- نتیجه گیری

روش پویش طیفی، امکان پیاده سازی تصویرگر فوویایی را در یک باند وسیع فراهم می‌سازد. نسبت به سیستم تک طول موج مقداری افت کنتراست با چندین برابر روشنایی بیشتر و سیگنال به نویز بالاتر معاوضه می‌گردد.

مراجع

[1] T. Martinez, D. V. Wick, and S. R. Restaino, "Foveated, wide field-of-view imaging system using liquid crystal spatial light modulator", Opt. Express **8**, 555-560 (2001)

[2] G. Curatu "Analysis and design of wide angle foveated systems", PhD Dissertation, University of Central Florida (2009)

[3] Archer OpTxPerfectLens Brochure 2013, available online at http://archeroptx.com/images/ArcherOpTx-2013Brochure-130116lo.pdf

[4] F. Javaherian, and B. Rashidian, "Foveated scanning: dynamic monodimensional enlargement of resolved field of view in lenses of scanner systems", App. Opt. **55**, 7314-7323 (2016)

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]