



کنفرانس
مکانیکی
و فتو

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



بررسی پدیده Defocusing در اندازه‌گیری توابع انتقال مدولاسیون (MTF) دوربین (PSF) مبتنی بر اندازه‌گیری تابع پخشیدگی نقطه‌ای CCD

امیر حسین شهربازی^۱، خسرو معدنی پور^{۲,۳}، عطا... کوهیان محمدآبادی^۱ و احسان پازوکی^۴

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران

^۲آزمایشگاه اندازه گیری اپتیکی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

^۳پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

^۴دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده – در این مقاله به بررسی کیفیت دوربین *CCD* و نقش تاری تصویر (*Defocusing*) در آن به کمک محاسبه تابع انتقال مدولاسیون پرداختیم. برای محاسبه تابع انتقال، تابع پخشیدگی نقطه‌ای اندازه‌گیری شده است. در آزمایش تجربی از پرتوی گستردگی *LED* سفید گرم به عنوان منبع ناهمدوس مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت تاثیر جابجایی لنز دوربین *CCD* بر تحول تابع انتقال مدولاسیون و فرکанс قطع آن بررسی گشت.

کلید واژه – تاری تصویر، تابع انتقال مدولاسیون، دوربین *CCD*، تابع پخشیدگی نقطه‌ای، فرکанс قطع.

Investigating the Defocusing Phenomenon in CCD MTF Measurement Based On PSF Technique

Amir Hossein Shahbazi¹, Khosrow Madani Pour^{2,3}, Ataollah Koohian Mohammad Abadi¹ and Ehsan Pazouki⁴

¹ Faculty of Physics, University of Tehran

²Optical Measurement Laboratory, Amirkabir University of Technology
³Optics, Laser & Photonic Research Group, Amirkabir University of Technology
⁴Faculty of Computer Engineering, Amirkabir University of Technology

Abstract- In this paper we tried to investigate the Defocusing role in CCD modulation transfer function measurement. To calculating the MTF, point spread function was measured. In experiment, we used a 3W LED with warm white spectra as the broadband source. Finally the effect of the lens relocation on CCD MTF and its cut-off frequencies studied.

Keywords: Defocusing, Modulation Transfer Function, CCD, Point Spread Function, Cut-off Frequency.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری تابع انتقال مدولاسیون، محاسبه تابع پخشیدگی نقطه^۴ یا پاسخ ضربه^۵ می‌باشد که این روش به خاطر سادگی در نحوه اندازه‌گیری، محاسبات و تحلیل نتایج نسبت به دیگر روش‌ها مانند اندازه‌گیری به کمک پدیده تالبوت^[۶]، ماره موازی^[۷] و پخشیدگی لبه^[۸] برتری دارد. تابع پخشیدگی نقطه پاسخ سامانه تصویربرداری به یک منبع (جسم) نقطه‌ای است. اندازه تبدیل فوریه پاسخ ضربه، تابع انتقال مدولاسیون را نتیجه می‌دهد. هرچه بخش اپتیکی سامانه تصویربرداری دقیق‌تر تنظیم گردد، تصویر به نقطه نزدیک‌تر و سطح زیر تابع انتقال بزرگ‌تر خواهد شد^[۹].

با جابجایی عدسی از فاصله کانونی، شکل تصویر از حالت نقطه‌ای به یک لکه دایره‌ای تغییر می‌یابد و هرچه عدسی از فاصله کانونی فاصله بگیرد (حال چه به جسم نزدیک شود و فاصله تا جسم کمتر از f باشد و چه از جسم دور شود و فاصله تا جسم بیشتر از f گردد)، ابعاد بزرگ‌تر و به این ترتیب تبدیل فوریه آن متمرکز و سطح زیر نمودار MTF (چه افقی و چه عمودی) کاهش می‌یابد. یه این ترتیب با بررسی مساحت زیر نمودار MTF و فرکانس قطع آن می‌توان محل نقطه کانونی را به دقت بدست آورد.

۳- اندازه‌گیری تجربی

سامانه تصویربرداری مورد آزمایش یک CCD ساخت شرکت IMPERX مدل IPX-VGA120LMCN با ابعاد $5.87\text{mm} \times 4.71\text{mm}$ به همراه یک لنز سه‌گانه با مجموع فاصله کانونی 40mm و گشودگی^۶ (قطر) 12.7mm انتخاب شد. مشخصات دوربین در جدول(۱) آمده است. سیستم نوردهی مورد استفاده در اندازه‌گیری‌ها نیز از یک دیود نورانی 3W با نور سفید گرم، سه عدسی به همراه یک Pin Hole با قطر حفره $100\mu\text{m}$ و یک دیافراگم برای تغییر قطر باریکه تشکیل شده است. طیف منبع نوری سفید به کمک طیفسنج فیبری مدل HR4000 ساخت شرکت Ocean Optics گرفته شد که در شکل (۱) آمده است.

⁴Point Spread Function (PSF)

⁵Impulse Response

⁶Aperture

۱- مقدمه

امروزه کاربرد CCD‌ها در علم، صنعت و به طور خلاصه در زندگی روزمره غیر قابل انکار است. این ابزار ارزشمند معمولاً به همراه یک سیستم اپتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های اپتیکی و الکترونیکی مورد استفاده در تصویربرداری آرمانی نیستند، به همین دلیل میزان کیفیت تصاویر ثبت شده و همچنین عوامل موثر در بهبود آن اهمیتی بالا دارد. یکی از روش‌های بیان کیفیت سیستم‌های الکترو-اپتیک، بررسی شکل انتقال اپتیکی و تحولات میان جسم و تصویر ثبت شده از آن است. در این بین کیفیت و سهولت در اندازه‌گیری تحولات اپتیکی جایگاه ویژه‌ای دارد. در این مقاله سعی شده روشهای کارآمد و همچنین ساده برای بررسی کیفیت سامانه CCD و سیستم اپتیکی آن ارائه و Defocusing به عنوان یک پدیده رایج در تصویربرداری مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مبانی نظری

تابع انتقال اپتیکی^۱ نماینده تحولات در یک سیستم اپتیکی مبتنی بر جسم و تصویر است. این تابعیت نحوه تغییر در تصویر را به ازای فرکانس‌های فضایی مختلف بیان می‌کند. رابطه بین جسم و تصویر آن در قالب معادله(۱) بیان می‌شود^[۱۰]:

$$I(v, \mu) = OTF(v, \mu) * O(v, \mu) \quad (1)$$

در این معادله $I(v, \mu)$ و $O(v, \mu)$ به ترتیب تبدیل فوریه تصویر و جسم هستند (که $i(x, y)$ و $o(x, y)$ تابعیت مکانی دارند). تابع انتقال اپتیکی را می‌توان به دو بخش انتقال مدولاسیون^۲ و انتقال فاز^۳ تقسیم کرد:

$$OTF(v, \mu) = MTF(v, \mu) * e^{i * PTF(v, \mu)} \quad (2)$$

تابع انتقال مدولاسیون معمولاً به شکل یک نمودار با محور عمودی MTF نرمالیزه شده (با بیشینه واحد) و محور افقی فرکانس (عکس فاصله یا تعداد پیکسل در واحد طول) بیان می‌شود. هرچه این تابع در فرکانس‌های مختلف مقادیر بیشتری داشته باشد، کیفیت مجموعه تصویربرداری بیشتر است.

¹Optical Transfer Function (OTF)

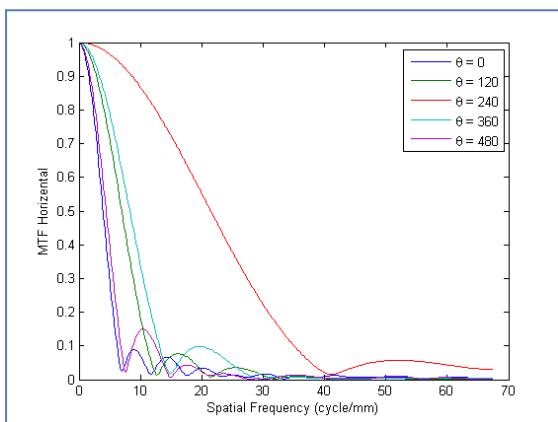
²Modulation Transfer Function (MTF)

³Phase Transfer Function (PTF)

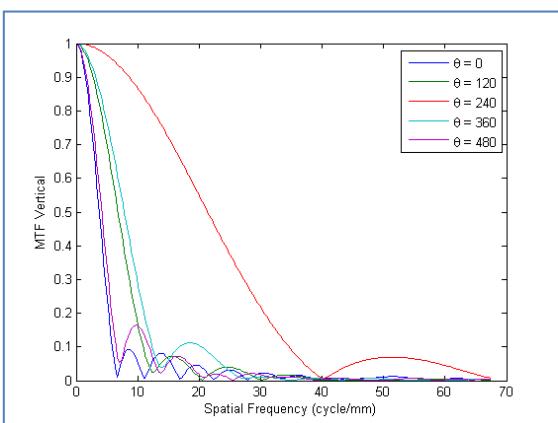
برای جلوگیری از تاثیر لنگی بین چرخشها، جابجا کننده در یک جهت پیچانده شد. هر وضعیت با یک زاویه نمایش داده شده که از حالت اولیه ($\theta = 0^\circ$) تا حالتنهایی ($\theta = 480^\circ$) اندازه گیری صورت گرفته و در هر مرحله ۵ تصویر ثبت و در کد Matlab پردازش شده است.

۳-۳- پردازش تصاویر

به کمک پردازش تصویر با نرم افزار Matlab ابتدا بین ۵ تصویر ثبت شده در هر وضعیت، میانگین محاسبه، سپس از هر تصویر تبدیل فوریه گسته گرفته و مقدار مطلق آن به عنوان MTF گزارش شد. در شکل (۵) MTF کل سیستم در هر وضعیت و به شکل دو بعدی (افقی و عمودی) دیده می شود. بعد از محاسبه MTF سیستم، مقادیر افقی و عمودی از بیشینه (مرکز نمودار) تا کمینه آن رسم شد. شکل های (۲) و (۳) تمامی نمودارهای افقی و عمودی را یکجا نشان می دهند.



شکل ۲: نمودار MTF افقی برای پنج وضعیت اندازه گیری به ازای فرکانس های فضایی مختلف.



شکل ۳: نمودار MTF عمودی برای پنج وضعیت اندازه گیری به ازای فرکانس های فضایی مختلف



شکل ۱: طیف شدتی LED استفاده شده به عنوان منبع نور در محدوده مرئی.

مقدار	ویژگی
7.4 μm	سایز پیکسل
640 pixel	تعداد پیکسل در هر سطر
480 pixel	تعداد پیکسل در هر ستون
120 frame/sec.	حداکثر نرخ فریم بر ثانیه
12 bit	کیفیت هر پیکسل
1/100000 to 1/100 sec.	سرعت شاتر

جدول ۱: مشخصات دوربین .JPX-VGA120LMCN

۱-۳- چینش آزمایش

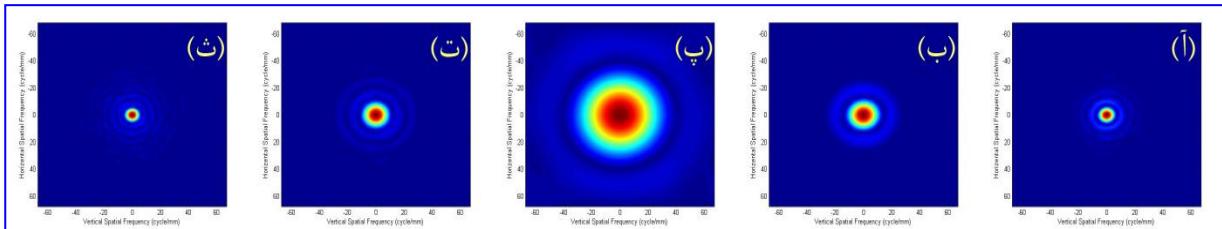
چینش موازی ساز بر پایه تکنیک 4f انتخاب و میزان واگرایی آن زیر یک ثانیه (یک میلی متر افزایش قطر در پنج متر) اندازه گیری شده است [۶]. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود، در این روش از دو لنز دوگانه همگرا استفاده شده که فاصله عدسی اول از منبع نور f_1 ، فاصله عدسی دوم از f_2 Pin Hole و فاصله بین دو عدسی $f_1 + f_2$ قرار داده شده است. عدسی دیگری با فاصله کانونی f_3 در همین فاصله از Pin Hole قرار داده شده تا نور نهایی، موازی شود. بین دو عنصر اخیر از یک گشودگی متغیر برای تعیین اندازه لکه‌ی نور قرار گرفته که به همراه فیلتر شدتی در شدت لکه کانونی CCD موثر است.

۲-۳- جمع آوری داده‌ها

بعد از موازی سازی پرتوی نور سفید، پدیده Defocusing در پنج وضعیت بررسی شد. نور LED سفید بوسیله منبع تغذیه‌ی دارای کنترل ولتاژ طوری تنظیم شد که در هیج کدام از مراحل شاهد اشباع پیکسل ها نباشیم. با جابجایی ۱20° جابجا کننده لنز که هر گام پیچ آن یک میلی‌متر است، فواصل ۰.۳۳mm جاروب شد (شکل ۴-ج). از بین پنج وضعیت مورد بررسی، حالت سوم بهترین فوکوس و حالات اول و پنجم بدترین فوکوس را داشتند.



شکل ۵: چینش موازی ساز به همراه دوربین (لنز و CCD)-(آ)، (ب) گشودگی اولیه، (پ) لنزهای ۴f، (ت) گشودگی پرتوی خروجی، (ج) عدسی موازی کننده خروجی، (ج) فیلتر شدتی ND Filter و لنز قابل جابجایی.



شکل ۶: MTF دو بعدی در - (آ) وضعیت اول $\theta = 0^\circ$ ، (ب) وضعیت دوم $\theta = 120^\circ$ ، (پ) وضعیت سوم $\theta = 240^\circ$ ، (ت) وضعیت چهارم $\theta = 360^\circ$. (ه) وضعیت پنجم $\theta = 480^\circ$ (رمز بیشینه، آبی کمینه).

سپاسگزاری

در پایان از زحمت‌کشان پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی امیرکبیر که این گروه تحقیقاتی را یاری نمودند، کمال تشکر را داریم.

مراجع

- [1] Boreman, Glenn D., *Modulation Transfer Function in Optical & Electro-Optical Systems*, p. 9, SPIE Press, 2001.
- [۲] نجفی، معدنی پور، غلام زاده، *اندازه‌گیری آرایه CCD با استفاده از پدیده تالبوت*، هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک، تبریز- ایران، ۱۳۹۰.
- [۳] غلام زاده، معدنی پور، نجفی، *اندازه‌گیریتابع انتقال اپتیکی (OTF) دوربین CCD با استفاده از تکنیک ماره موازی*، هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک، تبریز- ایران، ۱۳۹۰.
- [۴] نجفی، معدنی پور، بابایی، کاوش تهرانی، *اندازه‌گیریتابع انتقال مدولاسیون آرایه CCD با استفاده از لبه کج و تکنیک فرا تفکیک*، هفدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک، کرمان- ایران، ۱۳۸۹.
- [5] Lipson, A., *Optical Physics*, 4th Ed., P.103, Cambridge University Press, 2010.
- [6] Pedrotti, Frank L., *Introduction to Optics*, 2nd Ed., P. 530, Prentice-Hall International Inc., 1993.

۴- نتیجه‌گیری

همانطور که در شکل‌های (۲) و (۳) مشخص است، فرکانس قطع در حالت $\theta = 240^\circ$ که با رنگ قرمز مشخص شده، بیشترین مقدار خود را دارد (حدود 41 cycle/mm) و بقیه حالات به صورت دو به دو فرکانس قطع مشابهی دارند (برای وضعیت دوم و چهارم حدود 12 cycle/mm و برای وضعیت اول و پنجم حدود 7 cycle/mm). به این ترتیب انتظار می‌رود که با فوکوس بهتر در یک سیستم اپتیکی بتوان فرکانس قطع MTF را بیشینه نمود. تکنیک محاسبه MTF منحصر به منبع نور موازی نیست بلکه می‌تواند در مورد دو تصویر تقریباً همزمان و با فوکوس متفاوت، مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب مساحت زیر منحنی MTF (که با فرکانس قطع رابطه مستقیم دارد) نشان دهنده معیاری از کیفیت ثبت تصاویر می‌باشد. این نکته نیز قابل توجه است که فرکانس قطع با ضریب ابراهی حاصل از Defocusing رابطه مستقیم دارد و می‌توان معیاری از آن را ارائه داد. این ضریب در مراجع مختلفی به طور تئوریک بررسی و شبیه سازی شده است.