

شبیه‌سازی و مقایسه الگوریتم‌های مرکزبایی در حسگر جبهه‌موج شک - هارتمن

مهسا خاکی، ابوالحسن مبشری و حسین ثقفی‌فر

پژوهشکده اپتیک و لیزر - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - شاهین شهر - اصفهان

چکیده - حسگر جبهه موج یکی از مهمترین اجزای هر سیستم اپتیک تطبیقی است. سادگی حسگر شک - هارتمن آن را انتخابی محبوب برای چنین سیستم‌هایی ساخته است. دقت حسگر تا حد زیادی تعیین کننده عملکرد کل سامانه اپتیک تطبیقی است و دقت حسگر وابسته به داشتن یک الگوریتم مرکزبایی خوب و قوی است. در این مقاله چهار روش پرکاربرد مرکزبایی را در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و از نظر دقت با هم مقایسه کرده‌ایم. همچنین برای کاهش نویز، دو روش آستانه‌گذاری و تصحیح گاما را مورد ارزیابی قرار داده‌ایم. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش وزن دهی شده با شدت بهترین عملکرد را دارد و استفاده از روش تصحیح گاما، خطای روش‌های مرکزبایی را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

کلید واژه - اپتیک تطبیقی، الگوریتم‌های مرکزبایی، مرکز ثقل، نسبت سیگنال به نویز، همبستگی

Simulation and comparison of centroiding algorithms for Shack-Hartmann wavefront sensor

Mahsa Khaki, Abolhasan Mobashery, and Hossein Saghaifar

Optics and Laser Research Center- Malek Ashtar University of technology -ShahinShahr - Isfahan

Abstract- The wavefront-sensor is one of the most important components of any Adaptive Optics (AO) system. The simplicity of the Shack-Hartmann sensor has made it a popular choice for such systems. It's accuracy, which largely determines performance of AO systems, depends on having a good and robust centroid algorithm. In this paper we simulate four popular centroiding algorithms in MATLAB software and we compare accuracy of any one to each other. Also we use Thresholding and Gamma correction methods to reduce noise of simulated images and improve performance of the algorithms. Our simulations show that the Intensity Weighted Centroiding has the best performance and using the Gamma correction method, cause to improve performance of methods.

Keywords: Adaptive Optics, Centroiding method, Center of Gravity, Correlation, Signal to noise ratio

۱- مقدمه

حسگر شک-هارتمن شامل آرایه‌ای از میکروعدسی‌ها با ابعاد و فاصله کانونی یکسان است که یک آشکارساز مثل CCD در محل کانون آنها قرار دارد. به دلیل سادگی ساختار و پایداری زیاد آن، متداول‌ترین حسگر سامانه‌های اپتیک تطبیقی، این نوع حسگر است. در حسگر شک-هارتمن جابجایی هر یک از لکه‌های ایجاد شده بر روی CCD نشان دهنده شیب موضعی جبهه موج است. مقدار این جابجایی نسبت به نقطه مرجع تعیین می‌شود. معمولاً نقاط مرجع بر اساس فرود جبهه‌موج تخت بر روی حسگر تعیین می‌شوند. فرآیند تعیین مقدار جابجایی لکه به عنوان "مرکزیابی" شناخته می‌شود. با وجود تعداد زیادی از مطالعات برای روش‌های مرکز یابی [۱] و کاهش نویز [۲]، تاکنون دستورالعمل کلی برای انتخاب بهترین الگوریتم مرکزیابی و بهترین اندازه پیکسل در یک حسگر جبهه موج شک-هارتمن ارائه نشده است. دقت عملکرد یک سامانه اپتیک تطبیقی وابستگی زیادی به دقت آشکارسازی فاز جبهه موج دارد. به دلیل استفاده گسترده از حسگر شک-هارتمن در سامانه‌های اپتیک تطبیقی، افزایش دقت مرکزیابی در این نوع حسگر و شناسایی عوامل محدودکننده آن، اثر زیادی بر کارایی سامانه اپتیک تطبیقی دارد. در این مقاله، دقت مرکزیابی چهار روش پرکاربرد، با استفاده از شبیه سازی در نرم‌افزار متلب با یکدیگر مقایسه شده است. این روش‌ها عبارت اند از: روش مرکز ثقل (COG)^۱، روش مرکزیابی وزن دهی شده با شدت (IWC)^۲، روش مرکز ثقل وزن دار تکرارشونده (IWCOCG)^۳ و روش همبستگی. سپس دو روش کاهش نویز آستانه‌گذاری و روش تصحیح گاما برای بهبود کیفیت تصاویر CCD و افزایش دقت فرآیند مرکزیابی معرفی شده است.

۲- روش‌های مرکزیابی

۲-۱- روش مرکز ثقل

روش مرکز ثقل روشی است که مرکز هندسی یک شی را از طریق میانگین‌گیری به دست می‌آورد [۱]. مرکز ثقل شدت پرتو عبارت است از:

$$(X_S, Y_S) = \left(\frac{\sum_{ij} I_{ij} X_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}}, \frac{\sum_{ij} I_{ij} Y_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه I_{ij} شدت روشنایی پیکسل‌های یک تصویر، X_{ij} و Y_{ij} مختصات محل پیکسل‌های CCD و (X_S, Y_S) مختصات محل مرکز ثقل را نشان می‌دهد.

۲-۲- روش وزن دهی شده با شدت

روش مرکزیابی وزن دهی شده با شدت شبیه روش COG است با این تفاوت که از شدت هر نقطه به عنوان تابع وزن آن استفاده می‌شود:

$$(X_S, Y_S) = \left(\frac{\sum_{ij} I_{ij}^2 X_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}^2}, \frac{\sum_{ij} I_{ij}^2 Y_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}^2} \right) \quad (2)$$

۲-۳- روش مرکز ثقل وزن دار تکرار شونده

این روش مشابه روش IWC است ولی تابع وزن آن حالت کلی‌تری دارد و معمولاً از تابع گاوسی به عنوان تابع وزن استفاده می‌شود:

$$(X_S^n, Y_S^n) = \left(\frac{\sum_{ij} W_{ij}^n I_{ij} X_{ij}}{\sum_{ij} W_{ij}^n I_{ij}}, \frac{\sum_{ij} W_{ij}^n I_{ij} Y_{ij}}{\sum_{ij} W_{ij}^n I_{ij}} \right) \quad (3)$$

$$W_{ij}^n = A0 \times \exp \left[- \left(\frac{(X - X_s^{n-1})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(Y - Y_s^{n-1})^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \quad (4)$$

در این روش ابتدا با استفاده از روش مرکز ثقل یک X_S و Y_S برای تخمین اولیه محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از حلقه تکرار در هر مرحله محل مرکز ثقل اصلاح می‌شود.

۲-۴- روش مرکزیابی بر مبنای تابع همبستگی

در این روش، همبستگی بین تصویر مورد نظر و تصویر ایده‌آل مرجع با استفاده از تبدیل فوریه محاسبه می‌شود [3]. در روش همبستگی موقعیت نقطه بیشینه تابع همبستگی به عنوان موقعیت مرکز لکه تصویر در نظر گرفته می‌شود.

۳- روش‌های کاهش نویز

جهت افزایش دقت فرایند مرکزیابی از دو روش کاهش نویز در شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌کنیم:

۳-۱- روش تصحیح گاما مرتبه ۴

یکی از روش‌های معمول کاهش نویز در پردازش تصویر، روش تصحیح گاما می‌باشد، با استفاده از این روش قدرت تباین تصویر افزایش می‌یابد، در این روش از رابطه I^γ استفاده

۱- Center Of Gravity

2 - Intensity Weighted Centroiding

3 - Iteratively Weighted Center Of Gravity

می‌شود که I شدت تصویر مورد نظر و γ یک عدد مثبت است که در این مقاله عدد چهار می‌باشد.

۳-۲- روش آستانه‌گذاری

این روش برای تصاویری با شدت بالا قابل اعمال است. فرآیند آستانه‌گذاری، وضوح تصویر را با هدف از بین بردن نویز پس زمینه بالا می‌برد. معمولاً مقدار آستانه به صورت درصدی از مقدار ماکزیمم شدت تصویر در نظر گرفته می‌شود.

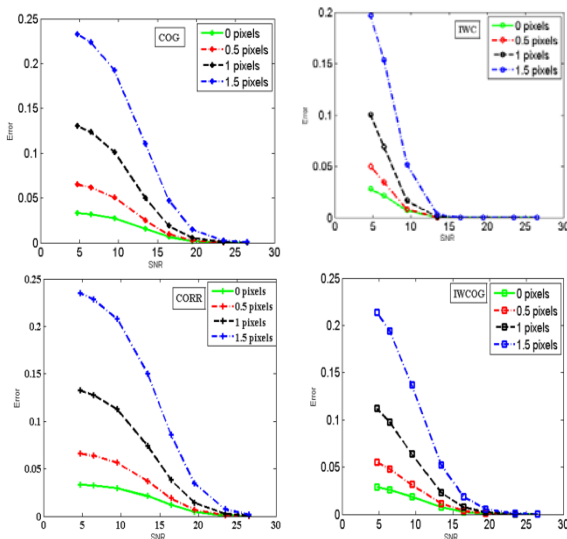
۴- روش شبیه‌سازی و بررسی نتایج

در این مقاله ما یک تابع گاوسی به شکل $P(x,y)$ را به عنوان الگوی تصویر جسم نقطه‌ای در نظر گرفته‌ایم:

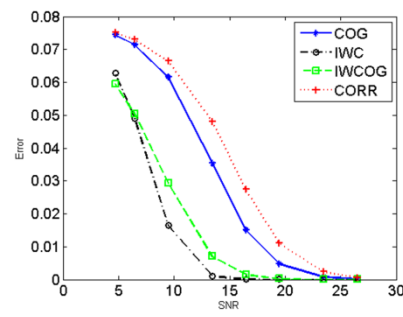
$$P(x,y) = \frac{A}{2\pi\sigma_{spot}^2} \exp\left[-\frac{(X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2}{2\sigma_{spot}^2}\right] \quad (5)$$

که σ پهنای تابع گاوسی در نصف ارتفاع (FWHM) است و X_0 و Y_0 مختصات پیش‌فرض الگوی تصویر می‌باشد. در این شبیه‌سازی ابعاد CCD برابر 15×15 پیکسل در نظر گرفته شده است و تابع گاوسی، ۳ الی ۴ پیکسل تصویر را می‌پوشاند. برای در نظر گرفتن اثر نویز بر دقت الگوریتم‌های مرکزابی، نویزی با تابع توزیع گاوسی را با استفاده از دستور randn به تصاویر اعمال کرده‌ایم. در فرآیند شبیه‌سازی، واریانس و میانگین نویز را تغییر می‌دهیم و نسبت سیگنال به نویز را با استفاده از رابطه $SNR = 10 \log(\text{signal/noise})$ محاسبه می‌کنیم. برای مقایسه نتایج، نمودار خطای مطلق بر حسب SNR رسم شده است. خطای مطلق هر کدام از روش‌های مرکزابی طبق رابطه زیر تعیین شده است:

$$\text{error} = \sqrt{(X_0 - X_S)^2 + (Y_0 - Y_S)^2} \quad (6)$$



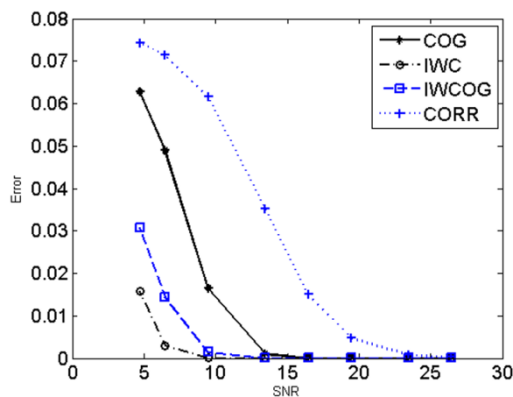
شکل (۲) اثر تغییر موقعیت لکه بر دقت الگوریتم‌های مرکزابی



شکل (۱) تغییرات خطا بر حسب SNR در چهار روش مرکزابی

مسئله دیگری که در این مقاله بررسی شده است، اثر تغییر

شکل (۵) اثر تصحیح گامای مرتبه ۴ بر دقت مرکزبایی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، این روش نسبت به روش آستانه-گذاری بهبود بیشتری را نتیجه می‌دهد و همچنین تأثیر این روش بر دقت IWC و IWCOG بیشتر از سایر روش‌ها است. در مقابل، همبستگی به این روش کاهش نويز حساس نیست.



شکل (۵) نمودار تغییرات خطا بر حسب SNR با اعمال روش کاهش نويز تصحیح گامای مرتبه ۴

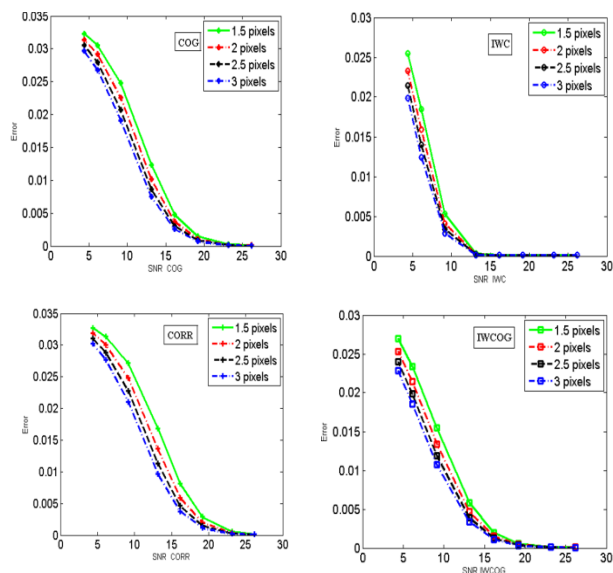
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله چهار روش متداول مرکزبایی در حسگر شک-هارتمن بررسی شده است. روش‌های IWC و IWCOG در حضور نويز دقت بالاتری دارند درحالی که عملکرد هر چهار روش COG, IWCOG, IWC و همبستگی در نويز کم تقریباً یکسان است. با جابجا شدن لکه به سمت لبه‌های زیردهانه حسگر، دقت مرکزبایی برای چهار روش کاهش می‌یابد و افزایش ابعاد لکه باعث افزایش دقت مرکزبایی می‌شود. از بین روش‌های کاهش نويز، روش تصحیح گاما، دقت بالاتری را برای روش‌های IWC, IWCOG و COG فراهم می‌کند.

مراجع

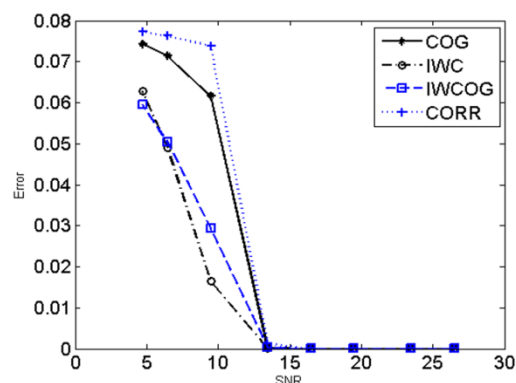
- [1] Akondi vayas, M.B.R.a.B.R.P., Advanced Methods for Improving the Efficiency of Shack Hartmann Wave front sensor, 2012.
- [2] J.Arines and J.Ares, Minimum variance centroid thresholding, opt.lett., 27, pp.497-499, 2002
- [3] Poyoneer L.A., Lafortune K., Awwal A.A.S, 2003, Lawrence liver more National Lab Report (Livermore, CA 94551).

اندازه لکه بر دقت مرکزبایی است. بر اساس منحنی‌های نشان داده شده در شکل (۳) قطر لکه از ۳ پیکسل CCD تا ۶ پیکسل افزایش یافته و دقت مرکزبایی برای این لکه‌ها بررسی شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش اندازه لکه دقت محاسبات مرکزبایی اندکی افزایش می‌یابد زیرا قابلیت تمیز لکه مورد نظر از نويز زیاد می‌شود.



شکل (۳) نمودار اثر تغییر اندازه لکه بر دقت الگوریتم‌های مرکزبایی

تا این مرحله برای رسم منحنی‌ها روشی برای کاهش نويز در نظر گرفته نشده بود. با اعمال روش‌های کاهش نويز انتظار می‌رود که دقت مرکزبایی افزایش یابد. در شکل (۴) اثر آستانه‌گذاری برای حذف نويز نشان داده شده است. آستانه در نظر گرفته شده برابر ۱۰ درصد حداکثر شدت تصویر است. برای SNRهای بالاتر از ۱۵ اثر آستانه‌گذاری به بهبود قابل توجه دقت مرکزبایی منجر می‌شود.



شکل (۴) نمودار تغییرات خطا بر حسب SNR با اعمال روش کاهش نويز آستانه-گذاری برابر با ۱۰ درصد حداکثر شدت