



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



استفاده از یادگیری ماشین برای تشخیص ستاره‌های دوگانه در جو آشفته

جعفر بختیار شوهانی^۱، مرتضی حاجی محمودزاده^۲، حمیدرضا فلاح^۲

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان،

j.bakhtiar@sci.ui.ac.ir

^۲عضو هیئت علمی دانشکده فیزیک دانشگاه اصفهان،

M.Hajimahmoodzadeh@sci.ui.ac.ir

hfallah@sci.ui.ac.ir

چکیده - در این مقاله به بررسی تاثیر یادگیری ماشین در شناسایی و تشخیص ستاره‌های دوگانه می‌پردازیم. ابتدا تعداد زیادی تصویر شامل یک و دو ستاره به تعداد تقریباً برابر تولید می‌شود. سپس ابیراهی‌هایی به صورت تصادفی برای ۱۰۰ جمله‌ی اول بسط زرنیک تولید می‌شود و به تصاویر اعمال می‌شود. همچنین یک تلسکوپ با دهانه مشخص شبیه‌سازی شده است. دو نوع طرح شدت، یکی در کانون و دیگری در خارج از کانون به دست می‌آید. سپس یک شبکه‌ی عصبی کانولوشنی پیکربندی و طراحی می‌شود که ورودی‌های آن، تصاویر شبیه‌سازی‌شده‌ی طرح‌های شدت به دست آمده ناشی از آشفته‌گی جو است. پس از یادگیری این شبکه، قادر خواهیم بود که با دقت بسیار بالایی ستاره‌های دوگانه را حتی در شرایط تلاطم جوی بسیار شدید و بدون استفاده از سامانه‌های اپتیک تطبیقی شناسایی کنیم. دقت این نوع تشخیص بیش از ۹۸٪ بوده است.

کلید واژه- ابیراهی، تلاطم جو، ستاره‌های دوگانه، شبکه‌ی عصبی کانولوشنی، یادگیری ماشین

Usage of machine learning to recognize the double star systems in turbulent atmosphere

Jafar Bakhtiar Shohani¹, Morteza Hajimahmoodzadeh², Hamidreza Fallah²

¹Department of Physics, University of Isfahan, Iran,

j.bakhtiar@sci.ui.ac.ir

²Faculty of Physics Department, University of Isfahan,

M.Hajimahmoodzadeh@sci.ui.ac.ir

hfallah@sci.ui.ac.ir

Abstract- In this paper we investigate usage of machine learning in detection and recognition of double stars. To do this, numerous images including one star and double stars are simulated. Then, 100 terms of Zernike expansion with random coefficients are considered as aberrations to impose on the aforementioned images. Also, a telescope with certain aperture is simulated. In this work, two kinds of intensity are used, one is in-focus and the other is out-of-focus of the telescope. After these simulations, a convolutional neural network is configured and designed which its input are simulated intensity patterns. After learning the network, we could recognize double stars at severe turbulence without using adaptive optics with a very high level of accuracy which was more than 98%.

Keywords: Aberration, Turbulent atmosphere, Double stars, Convolutional Neural Network, Machine learning

مقدمه

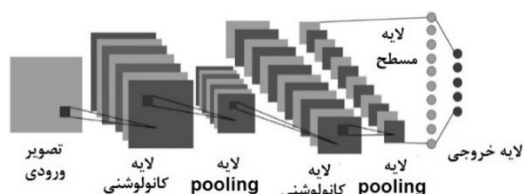
جو زمین به دلیل تلاطمی که دارد باعث افت کیفیت تصاویر گرفته شده از روی زمین می شود. مدل های مختلفی مانند کولموگروف، تاتارسکی و فون کارمن برای بیان تلاطم جو و فرمول بندی آن نیز ارائه شده است [۱]. تلاطم جو به دلیل تغییرات تصادفی دما ایجاد می شود. در نتیجه از نظر اپتیکی، باعث ایجاد تغییرات تصادفی در ضریب شکست هوا می شود. معادله اصلی انتشار نور در محیط های متلاطم نیز از معادله موج به شکل زیر پیروی می کند [۲].

$$(\nabla^2 + k^2 n^2(r))U(r) = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه، r مختصه شعاعی، k عدد موج و n ضریب شکست است که خود تابعی از r است. U نیز میدان الکتریکی یا مغناطیسی نور است. از نظر اپتیکی، این تلاطم باعث سوار شدن ابیراهی هایی بر جبهه موج عبوری از جو می شود. یکی از راه هایی که با استفاده از آن می توان جبهه موج را تصحیح کرد و در نتیجه، تصاویر بهتری دریافت کرد اپتیک تطبیقی با استفاده از حسگرهای جبهه موج است که معروف ترین نوع آن، حسگر جبهه موج شک-هارتمن است. این روش محدودیت های خود را دارد و در سال های اخیر استفاده از اپتیک تطبیقی بدون حسگر جبهه موج نیز مورد توجه بوده است [۳].

ما در این مقاله، روشی بر اساس یادگیری ماشین معرفی کرده ایم که بدون نیاز به شناسایی جبهه موج مختل شده و بدون استفاده از روش های مبتنی بر اپتیک تطبیقی به صورت مستقیم قادر به تشخیص ستاره های دوگانه باشیم. در سال های اخیر استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در علوم و حوزه های مختلف و نیز در زمینه های مرتبط با فیزیک نور وسعت زیادی پیدا کرده است [۴]. از نظر گسسته و یا پیوسته بودن خروجی، شبکه های عصبی معمولاً در دو دسته کلی جای می گیرند: دسته بندی (classification) و رگرسیون (regression). برای مثال،

استفاده از رگرسیون و پیش بینی پارامترها در اپتیک تطبیقی در مقاله ای توسط Vorontsov و همکاران انجام شده است [۵]. اما در مقاله ای حاضر، استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی کانولوشنی برای دسته بندی (تشخیص نوع سیستم ستاره ای با وجود آشفتگی شدید جو) بررسی شده است. شبکه های عصبی کانولوشنی دارای یک پیکربندی کلی به شکل زیر هستند،



شکل ۱: یک شبکه عصبی عمیق کانولوشنی شامل لایه های کانولوشن، pooling، لایه مسطح و لایه خروجی.

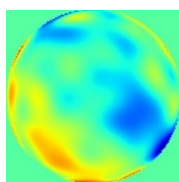
در این پیکربندی لایه های مختلفی می تواند وجود داشته باشد. اما دو لایه اصلی، لایه های کانولوشن و pooling هستند. هدف این دو لایه، استخراج ویژگی ها و کاهش اندازه تصاویر است. دلیل نام گذاری این نوع شبکه عصبی به شبکه کانولوشنی (Convolutional Neural Network) این است که استخراج ویژگی ها توسط فرایند کانولوشن انجام می شود. کانولوشن به این صورت تعریف می شود:

$$(f * g)(x) = \sum_k f(k)g(x-k) \quad (2)$$

در این رابطه، f تصویر و g فیلتری است که در راستای افقی و عمودی بر روی تصویر حرکت می کند.

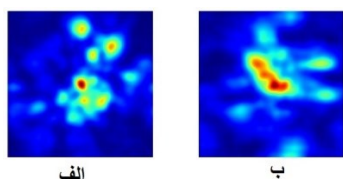
شبیه سازی ها

در این مقاله به بررسی تشخیص ستاره های دوگانه با استفاده از یادگیری ماشین پرداخته ایم. ستاره های دوگانه یک مجموعه دو ستاره ای هستند که از زاویه دید زمین در فاصله بسیار کمی نسبت به یکدیگر قرار دارند. در شرایطی که تلاطم جو شدید باشد، در تصویر ثبت شده قادر به تشخیص دقیق تک ستاره ای یا دو ستاره ای بودن آن بدون استفاده از اپتیک تطبیقی نیستیم. اما بدون بهره گیری از اپتیک تطبیقی و تنها با استفاده از طرح شدت تصاویر گرفته شده



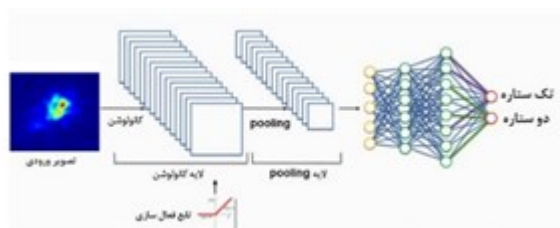
شکل ۴: نمونه‌ی شبیه‌سازی جبهه‌موج آشفته با استفاده از بسط زرنیک

اما برای اینکه فرایند یادگیری به خوبی انجام شود نیاز است که دو نوع تصویر داشته باشیم. برای این کار با اضافه کردن جمله‌ی چهارم بسط زرنیک به ابیراهی موجود اندکی واکانونی به جبهه‌موج اضافه می‌کنیم. این کار در عمل، مشابه با جابجایی صفحه تصویر نسبت به کانون است. در نتیجه اگر طرح شدت در صفحه کانونی برای جبهه‌موج شکل (۴) تصاویر شکل (۳) باشد آنگاه طرح شدت در صفحه واکانونی به شکل زیر در می‌آید:



شکل ۵: نمونه‌ای از یک توزیع شدت مربوط به جبهه شکل (۴) در صفحه خارج از کانون

بنابراین دو نوع تصویر برای هر مجموعه ابیراهی که متشکل از ۱۰۰ جمله‌ی اول بسط زرنیک (بدون در نظر گرفتن جمله‌ی پیستون) است خواهیم داشت. در مرحله‌ی بعد، باید به تعداد بسیار زیادی این شدت‌ها تولید شوند. خروجی‌های شبکه‌ی عصبی نیز برچسب ورودی‌ها (تعداد ستاره) است. بنابراین، شبکه‌ای عصبی طراحی کرده‌ایم که ورودی آن طرح شدت نور عبوری از جو متلاطم و خروجی آن تعداد ستاره‌های مربوط به هر طرح شدت است. شکل زیر این شبکه را نشان می‌دهد.



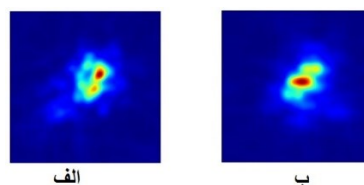
شکل ۶: یک شبکه‌ی عصبی کانولوشنی

از ستاره‌ها و استفاده از یادگیری ماشین نیز می‌توان با دقت بسیار بالایی این تشخیص را انجام داد. ورودی‌ها در اینجا تصاویر شبیه‌سازی‌شده‌ی ستارگان است. یک ستاره و یک سیستم دواستاره‌ای نزدیک به هم را در حالت ایده‌آل (بدون آشفستگی) در شکل زیر مشاهده می‌کنیم،



شکل ۷: شبیه‌سازی تک ستاره و ستاره دوگانه.

اما عبور نور از جو زمین باعث خرابی تصویر می‌شود و تفکیک تک ستاره‌ای یا دو ستاره‌ای را برای ما دشوار می‌کند. شکل زیر نمونه‌ای از تصاویر شبیه‌سازی‌شده در حالت تلاطم شدید جوی است،



شکل ۸: (الف) توزیع شدت نور عبوری از جو، (الف) ناشی از یک ستاره در کانون تلسکوپ، (ب) ناشی از دو ستاره در کانون تلسکوپ.

در شکل بالا تصویر (الف) مربوط به یک ستاره و تصویر (ب) مربوط به دو ستاره است. اما تلاطم شدید جو باعث شده است که در حالت عادی قادر به تشخیص آن نباشیم. برای شبیه‌سازی این طرح‌های شدت باید ابیراهی‌هایی ایجاد شود. بنابراین، ابتدا تعداد زیادی جبهه‌موج آشفته شبیه‌سازی می‌شود که برای این کار از بسط زرنیک استفاده می‌کنیم [۲]،

$$W(x, y) = \sum_j c_j Z_j(x, y) \quad (3)$$

در این رابطه، c ضرایب زرنیک و Z جملات بسط زرنیک هستند. نمونه‌ای از شبیه‌سازی یک جبهه‌موج آشفته در صفحه کانونی تلسکوپ شبیه‌سازی‌شده را در شکل زیر مشاهده می‌کنیم،

به دو ستاره هستند و شبکه‌ی آموزش دیده‌شده نیز این تشخیص را به درستی انجام داده است و برچسب ۲ را برای این دو تصویر به عنوان خروجی داده است. این تشخیص برای حدود ۹۸٪ از داده‌های تست که ۶۰۰ تصویر دوتایی (شدت در کانون و خارج از کانون) بود به درستی توسط شبکه‌ی عصبی آموزش دیده‌شده انجام شد.

نتیجه‌گیری

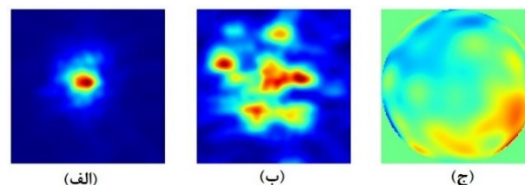
در این مقاله به بررسی استفاده از شبکه‌های عصبی برای تشخیص و کلاس‌بندی تعداد ستاره‌ها در جو آشفته پرداختیم. تولید ستاره‌های تکی و دوگانه، شبیه‌سازی جبهه‌موج آشفته، شبیه‌سازی طرح شدت در کانون و خارج از کانون انجام شد. سپس یک شبکه‌ی عصبی کانولوشنی طراحی شد و فرایند یادگیری آن به خوبی انجام شد. تمام شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله به زبان برنامه نویسی python انجام شده است. در نهایت، شبکه‌ی آموزش دیده‌شده دقت بیش از ۹۸٪ برای این مساله داشت.

مرجع‌ها

- [1] R. E. Good, R. R. Beland, E. A. Murphy, J. H. Brown, E. M. Dewan, *Atmospheric Models Of Optical Turbulence*, Proc. SPIE 0928 (1988).
- [2] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th Ed., Cambridge University Press (1999).
- [3] Q. Hu, J. Wang, J. Antonello, M. Hailstone, M. Wincott, R. Turcotte, D. Gala, M. J. Booth, *A universal framework for microscope sensorless adaptive optics: Generalized aberration representations*, APL Photonics 5.10 (2020).
- [4] S. Zhang, H. Zhou, L. Zhang, *Recent Machine Learning Progress in Image Analysis and Understanding*, Advances in Multimedia, vol. 2018. Article ID 1685890, 2 pages (2018).
- [5] A.M. Vorontsov, M.A. Vorontsov, G.A. Filimonov, E. Polnau, *Atmospheric Turbulence Study with Deep Machine Learning of Intensity Scintillation Patterns*. Applied Sciences 10(22), 8136 (2020).

هدف از این طراحی و پیاده سازی در این مقاله این است که شبکه به نحوی آموزش ببیند که پس از پایان یادگیری، اگر طرح شدت جدیدی (در صفحه کانونی و واکانونی) به آن داده شود بتواند در کمترین زمان ممکن تشخیص دهد که این طرح مربوط به یک تک ستاره است یا دو ستاره. با این کار، برای این مساله نیازی به شناسایی جبهه‌موج و حذف ابیراهی‌ها در اپتیک تطبیقی بدون حسگر نیز نیست و به طور مستقیم و تنها با استفاده از شدت نور در صفحات کانونی و واکانونی می‌توان این تشخیص را انجام داد. بنابراین برای اینگونه مسائل، استفاده از یادگیری ماشین، نزدیک‌ترین حالت ممکن برای دستیابی به پردازش برخط (real-time) است. تعداد نمونه‌ها (مجموعه‌ای از تصاویر شدت شبیه‌سازی‌شده در صفحات کانونی و واکانونی) در این مساله ۳۰۰۰ تصویر بود. همچنین ۲۰ درصد از داده‌های آموزش نیز به عنوان داده‌های صحت‌سنجی (validation) در نظر گرفته شدند. دقت این شبکه پس از پایان فرایند یادگیری بیش از ۹۸٪ بوده است که نشان از قدرت این شبکه برای این نوع تشخیص در این مساله دارد.

برای آزمودن میزان دقت شبکه پس از یادگیری، از داده‌های تست که در فرایند یادگیری دخالتی نداشته‌اند می‌توان استفاده کرد. برای مثال، در شکل زیر توزیع شدت نور در کانون و خارج از کانون و نیز جبهه‌موج متناظر با آنها نشان داده شده است.



شکل ۷: (الف) توزیع شدت در کانون تلسکوپ، (ب) توزیع شدت در خارج از کانون تلسکوپ، (ج) جبهه‌موج آشفته‌ی مربوط به توزیع شدت‌های (الف) و (ب)

در ظاهر شاید با توجه به شکل (الف-۷) که شدت در کانون را نشان می‌دهد به این نتیجه برسیم که این توزیع شدت مربوط به یک ستاره است. اما در واقع این دو تصویر مربوط