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

استفاده از یادگیری ماشین برای تشخیص ستاره‌های دوگانه در جو آشفته

جعفر بختیار شوهانی[۱]، مرتضی حاجی محمودزاده[۲]، حمیدرضا فلاح[۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان،
j.bakhtiar@sci.ui.ac.ir

[۲]عضو 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 تقریبا 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 آشفتگی 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 Shohani[1], Morteza Hajimahmoodzadeh[2], Hamidreza Fallah[2]

[1]Department of Physics, University of Isfahan, Iran,
j.bakhtiar@sci.ui.ac.ir
[2]Faculty 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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-01-31]

مقدمه

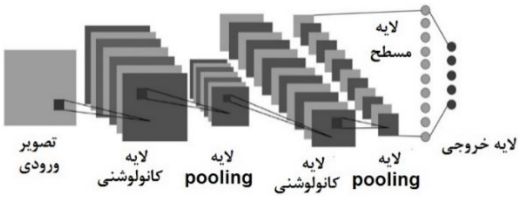
جو زمین به دلیل تلاطمی که دارد باعث افت کیفیت تصاویر گرفته‌شده از روی زمین می‌شود. مدل‌های مختلفی مانند کولموگروف، تاتارسکی و فون کارمن برای بیان تلاطم جو و فرمول بندی آن نیز ارائه شده است[۱]. تلاطم جو به دلیل تغییرات تصادفی دما ایجاد می‌شود. در نتیجه از نظر اپتیکی، باعث ایجاد تغییرات تصادفی در ضریب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

$$(\nabla^2 + k^2 n^2(r))U(r) = 0 \qquad (۱)$$

که در این رابطه، r مختصه‌ی 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 ابیراهی‌هایی بر جبهه‌موج عبوری از جو می‌شود. یکی از راه‌هایی که با استفاده از آن می‌توان جبهه‌موج را تصحیح کرد و در نتیجه، تصاویر بهتری دریافت کرد اپتیک تطبیقی با استفاده از حسگرهای جبهه‌موج است که معروف‌ترین نوع آن، حسگر جبهه‌موج شک-هارتمن است. این روش محدودیت‌های خود را دارد و در سالهای اخیر استفاده از اپتیک تطبیقی بدون حسگر جبهه‌موج نیز مورد توجه بوده است[۳].

ما در این مقاله، روشی بر اساس یادگیری ماشین معرفی کرده‌ایم که بدون نیاز به شناسایی جبهه‌موج مختل‌شده و بدون استفاده از روش‌های مبتنی بر اپتیک تطبیقی به صورت مستقیم قادر به تشخیص ستاره‌های دوگانه باشیم.

در سال‌های اخیر استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در علوم و حوزه‌های مختلف و نیز در زمینه‌های مرتبط با فیزیک نور وسعت زیادی پیدا کرده است[۴]. از نظر گسسته و یا پیوسته بودن خروجی، شبکه‌های عصبی معمولا در دو دسته‌ی کلی جای می‌گیرند: دسته‌بندی (classification) و رگرسیون (regression). برای مثال، استفاده از رگرسیون و پیش‌بینی پارامترها در اپتیک تطبیقی در مقاله‌ای توسط Vorontsov و همکاران انجام شده است[۵]. اما در مقاله‌ی حاضر، استفاده از یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی کانولوشنی برای دسته‌بندی (تشخیص نوع سیستم ستاره‌ای با وجود آشفتگی شدید جو) بررسی شده است. شبکه‌های عصبی کانولوشنی دارای یک پیکربندی کلی به شکل زیر هستند،



شکل ۱: یک شبکه‌ی عصبی عمیق کانولوشنی شامل لایه‌های کانولوشن، pooling ، لایه‌ی مسطح و لایه‌ی خروجی.

در این پیکربندی لایه‌های مختلفی می‌تواند وجود داشته باشد. اما دو لایه‌ی اصلی، لایه‌های کانولوشن و pooling هستند. هدف این دو لایه، استخراج ویژگی‌ها و کاهش اندازه تصاویر است. دلیل نام‌گذاری این نوع شبکه‌ی عصبی به شبکه‌ی کانولوشنی (Convolutional Neural Network) این است که استخراج ویژگی‌ها توسط فرایند کانولوشن انجام می‌شود. کانولوشن به این صورت تعریف می‌شود:

$$(f * g)(x) = \sum_k f(k)g(x-k) \qquad (۲)$$

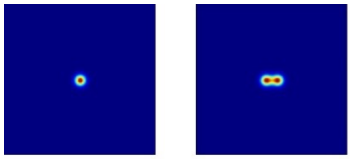
در این رابطه، f تصویر و g فیلتری است که در راستای افقی و عمودی بر روی تصویر حرکت می‌کند.

شبیه‌سازی‌ها

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

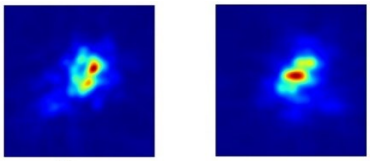
[Downloaded from opsi.ir on 2025-01-31]

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 دوستاره‌ای نزدیک به هم را در حالت ایده‌آل (بدون آشفتگی) در شکل زیر مشاهده می‌کنیم،



شکل ۲: 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،

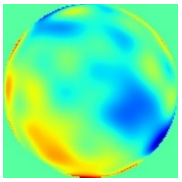


شکل ۳: (الف) توزیع شدت نور عبوری از جو، (الف) ناشی از یک ستاره در کانون تلسکوپ، (ب) ناشی از دو ستاره در کانون تلسکوپ.

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]،

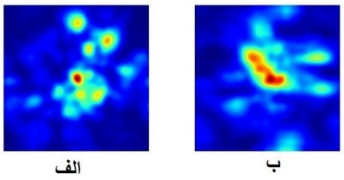
$$W(x,y)=\sum_j c_j Z_j(x,y) \qquad (۳)$$

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،



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

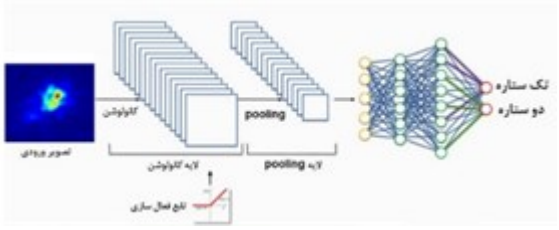
اما برای اینکه فرایند یادگیری به خوبی انجام شود نیاز است که دو نوع تصویر داشته باشیم. برای این کار با اضافه کردن جمله‌ی چهارم بسط زرنیک به ابیراهی موجود اندکی واکانونی به جبهه‌موج اضافه می‌کنیم. این کار در عمل، مشابه با جابجایی صفحه تصویر نسبت به کانون است. در نتیجه اگر طرح شدت در صفحه کانونی برای جبهه‌موج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

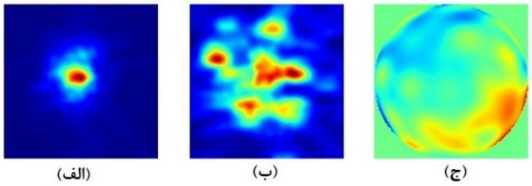


شکل ۶: یک شبکه‌ی عصبی کانولوشنی

[Downloaded from opsi.ir on 2025-01-31]

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 (۷-الف) 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 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).

[Downloaded from opsi.ir on 2025-01-31]