

آشکارسازی اهداف متحرک کوچک در تصویر مادون قرمز با استفاده از نگاشت شناختی فازی

رویا عظیمی^۱، سید محمدرضا موسوی میرکلائی^۲، مهدی نصیری^۳

M_Mosavi@iust.ac.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

آشکارسازی اهداف متحرک کوچک در سامانه‌های دفاعی و نظامی بسیار مهم است. برای این منظور، استفاده از تصاویر مادون قرمز بر تصاویر مرئی ارجحیت دارد. چرا که در شرایطی مانند ناوبری انواع شناورها که در فضای دود، مه و گرد و غبار در دریا صورت می‌گیرد، تصاویر مرئی با هشدارهای کاذب فراوانی همراه هستند که عمل آشکارسازی هدف کوچک را بسیار دشوار می‌کنند. تاکنون روش‌های مختلفی برای آشکارسازی اهداف کوچک مادون قرمز و کاهش هشدارهای کاذب ارائه شده‌اند. در این مقاله ابتدا تصویر با استفاده از عملیات Top-Hat، که یک روش مبتنی بر پردازش ریخت‌شناسی است، بهبود داده می‌شود. سپس مسئله تشخیص هدف کوچک مادون قرمز، به عنوان یک مسئله تشخیص الگوی دوکلاسه در نظر گرفته می‌شود و از نگاشت شناختی فازی به منظور دسته‌بندی استفاده می‌گردد. نگاشت شناختی فازی یک روش هوشمند ساده، اما قدرتمند است که به منظور مدل‌سازی و تحلیل اطلاعات به کار می‌رود. این اولین بار است که از نگاشت شناختی فازی برای آشکارسازی اهداف کوچک مادون قرمز استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد روش نگاشت شناختی فازی توانسته است با دقت خوبی نسبت به سایر روش‌های شناسایی الگو عمل آشکارسازی را انجام دهد.

واژگان کلیدی: اهداف کوچک، بهینه‌سازی گروهی ذرات، تصویر مادون قرمز، دسته‌بندی، نگاشت شناختی فازی، یادگیری ماشین.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۳/۲۷

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای پیرامون آشکارسازی اهداف کوچک صورت گرفته است، چرا که در زمینه‌های بسیاری از قبیل شناسایی اهداف نظامی، هشدار اولیه و هدایت کاربرد دارد. به منظور آشکارسازی اهداف، ابتدا باید از منطقه حاوی هدف تصاویری تهیه شده و سپس اهداف متحرک موجود در تصویر آشکارسازی شوند. در این میان، عملکرد آشکارسازی اهداف نقطه‌ای بر مبنای تصاویر مرئی، تحت تأثیر شرایط مختلف از قبیل روشنایی، گرد و غبار، نویز، تشعشعات، تباین^۱ کم، فاصله، مشخصات هدف، حرکت هدف، نسبت سیگنال به نویز کم، ابعاد کوچک هدف در تصویر (در حد چند پیکسل)، تداخل پس‌زمینه، عدم اطلاعات ساختاری هدف و غیره، کارایی خود را از دست می‌دهد. از این‌رو، در کاربردهایی از قبیل ناوبری انواع شناورها که در فضای دود، مه و گرد و غبار در دریا صورت می‌گیرد و قابلیت کنترل روشنایی وجود ندارد، استفاده از تصاویر مادون قرمز (IR^۲) نسبت به تصاویر مرئی برتری دارد. تصاویر IR از اختلاف انرژی شعاعی IR طبیعی (تباین IR یا اختلاف دما) بین هدف و پس‌زمینه ایجاد می‌شوند. به طور کلی، در تصاویر IR به دلیل عواملی از قبیل منابع تشعشع هدف و پس‌زمینه، مشخصات انتقال اتمسفری، اختلافات اتمسفری و محدودیت‌های حسگرهای IR، نسبت سیگنال به نویز بسیار کم است [۱]. همچنین از آنجا که هدف از حسگر و سامانه تصویربرداری مادون قرمز دور است، تعداد پیکسل کمی را در تصویر اشغال می‌کند [۲-۴]. بنابراین اهداف اغلب تحت تأثیر نویز و کلاترهای بی‌قاعده پس‌زمینه قرار می‌گیرند و این امر، عمل آشکارسازی و ردیابی اهداف کوچک کم‌نور را چالش برانگیز می‌کند.

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های متعددی برای تمیزدادن هدف کوچک از کلاتر پیشنهاد شده‌اند. این الگوریتم‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد که عبارت‌اند: از روش‌های مبتنی بر فیلتر کردن تصویر و روش‌های مبتنی

بر یادگیری ماشین. در دسته اول با استفاده از فیلتر، پس زمینه تخمین زده می‌شود. سپس با تفریق پس‌زمینه از تصویر ورودی، هدف استخراج می‌گردد. از جمله این فیلترها می‌توان فیلتر دو بعدی حداقل میانگین مجذور (TDLMS^۳) [۵و۶]، فیلتر بالاگذر [۷]، فیلتر باترورث تطبیقی [۸]، فیلترهای max-mean، max-median [۹]، فیلتر همبستگی درجه دوم [۱۰]، فیلتر دوسویه^۴ [۱۱]، فیلتر وجه مکعب [۱۲]، فیلتر ریخت شناسانه [۱۳] و فیلتر Top-Hat [۱۴و۱۵] را نام برد. روش مبتنی بر سیستم بصری انسان (HVS^۵) نیز با بهره‌گیری از فیلترهای مختلف، تباین هدف و پس‌زمینه را افزایش می‌دهد. از جمله این فیلترها می‌توان لاپلاسیان گلوین (LoG^۶) [۱۶]، تفاضل گلوین‌ها (DoG^۷) [۱۷و۱۸]، تباین محلی (LCM^۸) [۱۹]، طیف فاز تبدیل فوریه (PFT^۹) [۲۰] و تفاضل گابور (DoGb^{۱۰}) [۲۱] را نام برد. در مرجع [۲۲]، روش جدیدی بر مبنای سیستم بصری انسان و ادغام نقشه‌های برجسته حاصل از DoG، LCM و PFT برای تشخیص با قابلیت اطمینان بالا معرفی شده است. همچنین نویسندگان در مرجع [۲۳] روشی بر مبنای سیستم بصری انسان با استفاده از تبدیل کسینوسی گسسته ارائه نمودند. علاوه بر آن مدل رگرسیون غیرپارامتریک مبتنی بر هسته^{۱۱} [۲۴]، تبدیل موجک^{۱۲} [۲۵]، روش مبتنی بر آنتروپی^{۱۳} [۲۶و۲۷]، روش نگاشت تصادفی چندمقیاسی [۲۸]، روش مبتنی بر نمایش تنک^{۱۴} [۲۹] و روش مبتنی بر گرادبان محلی [۳۰] از جمله روش‌های پیشنهادی در سال‌های اخیر هستند.

روش‌های مبتنی بر فیلتر، معمولاً اهداف نقطه‌ای را به عنوان یک سیگنال با فرکانس بالا در نظر می‌گیرند. بنابراین عبور سیگنال‌های فرکانس بالا و یا تضعیف سیگنال‌های فرکانس پایین، منجر به آشکارسازی اهداف نقطه‌ای تصویر می‌گردد. با این حال، از آنجا که نویز تصویر نیز سیگنال فرکانس بالا است، این روش‌ها به اشتباه نویز را به عنوان هدف تشخیص می‌دهند که نتیجه آن افزایش نرخ هشدار کاذب^{۱۵} می‌باشد.

⁹ Phase Spectrum of Fourier Transform

¹⁰ Difference of Gabor

¹¹ Kernel-based Nonparametric Regression Model

¹² Wavelet

¹³ Entropy

¹⁴ Sparse Representation

¹⁵ False Alarm Rate

¹ Contrast

² Infrared

³ Two-Dimensional Least Mean Square

⁴ Bilateral

⁵ Human Vision System

⁶ Laplacian of Gaussian

⁷ Difference of Gaussians

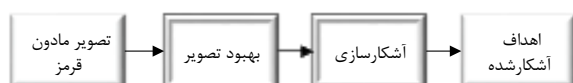
⁸ Local Contrast Measure

پیشنهادی توانسته دقت آشکارسازی اهداف کوچک را نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر شناساسایی الگو به طور مطلوبی افزایش دهد.

ادامه مقاله در سه بخش ارائه شده است. در بخش دوم، روش پیشنهادی مقاله بیان و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم نتیجه و مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و روش‌های مشابه ارائه می‌شود و سرانجام در قسمت چهارم مقاله، نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

۲- روش پیشنهادی

شکل (۱) روند کلی روش پیشنهادی مقاله را نشان می‌دهد. در این طرح پیشنهادی، آشکارسازی هدف در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول با استفاده از عملگرهای ریخت‌شناسی تصویر بهبود می‌یابد. در مرحله دوم با به‌کارگیری دسته‌بندی‌کننده FCM، اهداف استخراج می‌گردند. در ادامه هر کدام از مراحل شرح داده می‌شوند.



شکل (۱) روند کلی طرح پیشنهادی.

۲-۱- بهبود تصویر

یکی از مهم‌ترین روش‌ها در بهبود تصاویر مادون قرمز، پردازش ریخت‌شناسی می‌باشد. در این روش، ابتدا یک عنصر ساختاری انتخاب می‌شود. سپس عنصر ساختاری به صورت یک نقاب روی تصویر اصلی حرکت می‌کند و پردازش‌های ریخت‌شناسی را تحت کنترل قرار می‌دهد. از این‌رو، انتخاب عنصر ساختاری مناسب اغلب مهم‌ترین بخش پردازش ریخت‌شناسی است.

اتساع^۳ و سایش^۴، دو عملگر پایه‌ای ریخت‌شناسی هستند که سایر عملگرهای ریخت‌شناسی اغلب از ترکیب آن‌ها ایجاد می‌شوند. عملگر اتساع، اشیاء را در یک تصویر رشد داده و ضخیم می‌کند و عملگر سایش باعث کوچک یا نازک شدن نواحی در یک تصویر می‌شود. اگر $I(x,y)$ یک تصویر سیاه و سفید دو بعدی و $B(s,t)$ یک عنصر ساختاری باشد، آن‌گاه عملیات اتساع و سایش به صورت روابط (۱) و (۲) قابل پیاده‌سازی می‌باشند.

به همین دلیل در سال‌های اخیر، با توسعه نظریه شناسایی الگو روش‌های جدیدی برای این هدف ابداع شد. به این ترتیب که مسئله آشکارسازی هدف کوچک مادون قرمز، به عنوان یک مسئله شناسایی الگوی دوکلاسه در نظر گرفته می‌شود و توسط یادگیری ماشین حل می‌گردد. از جمله روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین که برای این منظور به کار گرفته شده‌اند، می‌توان به روش‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM)^۱ [۳۱ و ۳۲]، بیزین و آداپوست [۳۲] اشاره نمود.

در روش SVM بردارهای ورودی به یک فضای چندبعدی نگاشت می‌شوند. در این فضای جدید، دسته‌بندی بردارها، کار آتر و مناسب‌تر صورت می‌گیرد. سپس یک ابرصفحه ساخته می‌شود که بردارهای ورودی را با حداکثر فاصله ممکن از هم جدا می‌کند. روش بیزین برای دسته‌بندی بر اساس احتمال وقوع مشاهدات تصمیم‌گیری می‌نماید. در روش آداپوست با ترکیب چند دسته‌بندی‌کننده ضعیف، یک دسته‌بندی‌کننده قوی به دست می‌آید. دسته‌بندی‌کننده ضعیف دسته‌بندی‌کننده‌ای است که فقط کمی از حالت تصادفی بهتر عمل کند و می‌تواند یک حد آستانه باشد که فقط در بخشی از فضای داده، دسته‌بندی درستی ارائه می‌دهد. در این روش‌های سنتی اگر تعداد نمونه‌های آموزشی کافی نباشد، عمل شناسایی نمی‌تواند به خوبی صورت گیرد. از این رو در مقاله حاضر آشکارسازی هدف کوچک مادون قرمز با استفاده از روش نگاشت شناختی فازی صورت گرفته است. این روش با توجه به دانش ادراکی که به مدل اضافه می‌کند، در شرایط یکسان می‌تواند با دقت بیشتری عمل دسته‌بندی و نتیجتاً آشکارسازی را انجام دهد. نوآوری این مقاله در استفاده از FCM به منظور آشکارسازی هدف کوچک مادون قرمز می‌باشد. همچنین در این مقاله در کنار ویژگی‌های مبتنی بر ناحیه و ویژگی‌های مبتنی بر روشنایی، از تابع گابور برای استخراج ویژگی استفاده شده است. علاوه بر آن از روش تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)^۲ به عنوان یک روش انتخاب ویژگی استفاده شد. روش FCM به تنهایی محدودیت‌هایی دارد که کاربرد آن را محدود می‌کند. لذا در ادامه از روش بهینه‌سازی گروهی ذرات برای آموزش شبکه استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد روش

³ Dilation

⁴ Erosion

¹ Support Vector Machine

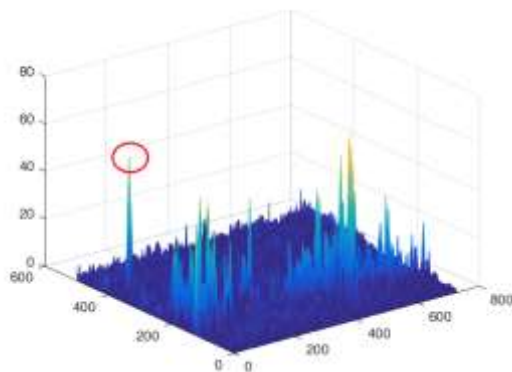
² Principal Component Analysis



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۲) بهبود هدف توسط تبدیل Top-Hat (الف) تصویر اصلی مادون قرمز حاوی هدف، (ب) خروجی بهبود یافته با استفاده از تبدیل Top-Hat و (ج) نمودار سه بعدی شدت تصویر بهبود یافته.

در شکل (۲-الف) تصویر اصلی مادون قرمز حاوی یک هدف در حال پرواز نشان داده شده است. همچنین این شکل حاوی کلاتر پس زمینه می باشد که باعث پیچیده شدن پس زمینه شده است. در شکل (۲-ب) تبدیل Top-Hat برای بهبود تصویر و فرونشاندن کلاتر پس زمینه استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود این فیلتر توانسته تا حد بالایی کلاتر و نویز پس زمینه را فرونشاند و هدف را

$$(I \oplus B)(x, y) = \max \{I(x-s, y-t) + B(s, t)\} \quad (1)$$

$$(I \ominus B)(x, y) = \min \{I(x+s, y+t) - B(s, t)\} \quad (2)$$

بر اساس این عملگرهای پایه ای، دو عملگر باز کردن^۱ و بستن^۲ تعریف می شوند. روابط (۳) و (۴) به ترتیب تعریف عملگر باز کردن و بستن را ارائه می دهند.

$$I \circ B = (I \ominus B) \oplus B \quad (3)$$

$$I \bullet B = (I \oplus B) \ominus B \quad (4)$$

عملگر باز کردن معمولاً باعث هموار شدن محیط نواحی، شکسته شدن باریک‌های نازک و حذف پیش‌آمدگی‌ها می شود. به عبارت دیگر عملگر باز کردن، مناطق کوچک روشن در تصویر را هموار می کند.

عملگر بستن نیز باعث هموار شدن بخش‌هایی از محیط ناحیه می شود، اما برخلاف عملگر باز کردن معمولاً شکستگی‌های باریک را در هم آمیخته، حفره‌های کوچک را حذف و فواصل موجود در محیط اشیاء را پر می کند.

از آنجا که یکی از مسائل اصلی و مهم در بهبود اهداف در تصاویر مادون قرمز، برجسته تر نمودن تباین بین نواحی تاریک و روشن تصویر است، عملیات Top-Hat روشی کارآمد در این زمینه محسوب می شود. عملیات ریخت‌شناسی Top-Hat، یک عمل فیلترینگ فرکانس بالا با عملکرد خوب است که شامل دو تبدیل Top-Hat سفید^۳ (WTH) و Top-Hat سیاه^۴ (BTH) می باشد. مبنای این دو تبدیل دو عمل باز و بسته کردن تصویر است و به صورت زیر معرفی می گردند [۳۳]:

$$WTH(x, y) = I(x, y) - I \circ B(x, y) \quad (5)$$

$$BTH(x, y) = I \bullet B(x, y) - I(x, y) \quad (6)$$

از آنجا که عملیات باز کردن عموماً برای هموارسازی نواحی روشن تصویر مورد استفاده قرار می گیرد، عملیات WTH می تواند نواحی روشن تصویر را استخراج نماید. به طور مشابه، از آنجا که عملیات بستن برای هموارسازی نواحی تاریک تصویر مورد استفاده قرار می گیرد، عملیات BTH بر روی تصویر مادون قرمز می تواند نواحی تاریک تصویر را استخراج کند [۳۴]. بنابراین با اضافه نمودن نواحی روشن و سپس تفریق نمودن نواحی تاریک از تصویر مادون قرمز، می توان تصویر ورودی را بهبود داد.

$$I_{EN} = I_{in} + I_{WTH} - I_{BTH} \quad (7)$$

³ White Top-Hat

⁴ Black Top-Hat

¹ Opening

² Closing

۲-۲-۱- استخراج ویژگی

از آنجا که اهداف کوچک مادون قرمز تعداد کمی از پیکسل‌های تصویر را اشغال می‌کنند، استخراج ویژگی‌هایی که شامل اطلاعات مفید باشند، دشوار است. ویژگی‌هایی که در این مقاله در نظر گرفته شده اند شامل انحراف معیار، ranked-fill-ratio، مساحت، ضریب اندازه، تغییرات اندازه چرخشی، انرژی فرکانسی، میانگین فاصله [۳۲] و ویژگی‌های حاصل از اعمال فیلترهای گابور^۱ می‌باشد.

• **انحراف معیار:** ویژگی اول انحراف معیار سطح روشنایی برای ناحیه مورد بررسی مطابق رابطه (۸) می‌باشد.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I(i) - \mu)^2}{N}} \quad (8)$$

که در آن، I شدت روشنایی پیکسل نام است. N تعداد کل پیکسل‌ها و μ میانگین شدت روشنایی می‌باشد.

• **Ranked-fill-ratio:** ویژگی دوم مطابق رابطه (۹)،

نسبت روشنایی تعداد K تا پیکسل درخشان‌تر به روشنایی کل است. اهداف معمولاً مقادیر بالاتری از کلاتر دارند، چرا که اهداف یک نقطه داغ در یک پس‌زمینه سرد هستند.

$$\eta = \frac{\sum_j I(j)}{\sum_i I(i)} \quad (9)$$

• **مساحت:** در این ویژگی، یک منطقه هدف سیاه-سفید با استفاده از روش اوتسو به دست می‌آید. این روش یک حد آستانه انتخاب می‌کند، به طوری که واریانس درون کلاسی پیکسل‌های سیاه-سفید به حداقل برسد. با توجه به تصویر خاکستری $I(i)$ ، منطقه هدف تقسیم‌بندی شده، $R(i)$ نامیده می‌شود. این ویژگی را می‌توان با رابطه (۱۰) بیان کرد.

$$a = \sum_i R(i) \quad (10)$$

• **ضریب اندازه:** ویژگی چهارم، نسبت طول هدف به عرض آن است.

$$S_{ratio} = I_H / I_W \quad (11)$$

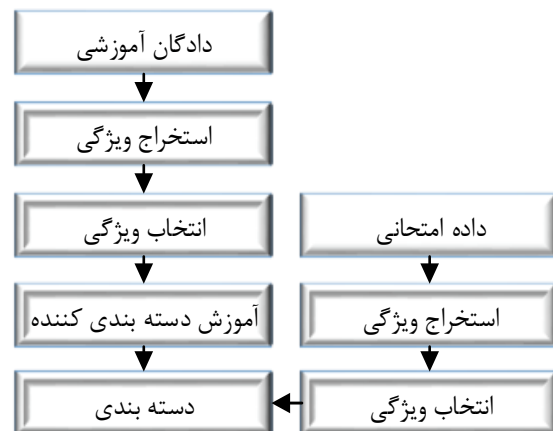
• **تغییرات اندازه چرخشی:** ویژگی پنجم بر اساس مشخصات اندازه چرخشی است. با توجه به تصویر (مطابق شکل ۴-الف)، منطقه هدف با استفاده از روش اوتسو استخراج شده است (مطابق شکل ۴-ب). با چرخش منطقه، مشخصات اندازه هدف (مطابق شکل ۴-ج) تولید می‌شود. بنابراین، مشخصات اندازه چرخشی نشان‌دهنده شکل هدف است. اگر هدف کوچک یک لکه دایره‌ای باشد، مشخصه یکنواخت خواهد بود.

بهبود ببخشد، ولی کلاتر نیز بهبود داده شده است. نمودار سه‌بعدی شدت تصویر بهبودیافته در شکل (۲-ج)، این موضوع را بهتر نمایان می‌کند.

به طور کلی روش‌هایی که تاکنون بر مبنای ریخت‌شناسی و تبدیلات به دست آمده از آن، برای آشکارسازی اهداف کوچک در تصاویر مادون قرمز پیشنهاد شده، نتایج مطلوبی بر روی برخی از مجموعه تصاویر مادون قرمز داشته‌اند، اما چالش اصلی آن‌ها آشکارسازی و بهبود هدف در تصاویر با پس‌زمینه‌های پیچیده می‌باشد. به طوری که یا در این روش‌ها هدف آشکار نمی‌شود، یا اینکه با آشکارسازی هشدارهای کاذب همراه است. از این رو در این طرح پیشنهادی فقط به عنوان پیش‌پردازش استفاده می‌شود و پردازش اصلی توسط دسته‌بندی کننده FCM انجام خواهد شد.

۲-۲-۲- آشکارسازی

در روش پیشنهادی مقاله حاضر، پس از بهبود تصویر، نوبت به آشکارسازی هدف می‌رسد. شکل (۳) بلوک دیاگرام مربوط به این مرحله را نشان می‌دهد. برای این منظور، ابتدا ویژگی‌ها از مجموعه دادگان آموزشی استخراج می‌شوند. سپس ویژگی‌های مناسب برای آموزش دسته‌بندی کننده FCM انتخاب می‌گردند. پس از آموزش، مدل آماده است تا دسته‌بندی دادگان امتحانی را با توجه ویژگی‌های استخراج شده انجام دهد. در ادامه این بخش هر یک از مراحل شرح داده می‌شوند.



شکل (۳) بلوک دیاگرام مرحله آشکارسازی هدف.

¹ Gabor

که در آن، s یک سینوسی مختلط، g یک تابع گاوسی دوبعدی ملقب به پوش و x و y مختصات پیکسل می‌باشند. با توجه به تعاریف فوق تابع گابور را می‌توان به صورت رابطه (۱۶) نمایش داد.

$$\Phi(x, y) = \exp(i(f_x x + f_y y)) \times \exp\left(-\frac{(f^2)(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

که در آن،

$$\begin{aligned} f_x &= f \cos \phi \\ f_y &= f \sin \phi \end{aligned} \quad (17)$$

به طوری که:

$$\phi = \mu \times \frac{\pi}{k}, \quad \mu \in \{0, \dots, k-1\} \quad (18)$$

که در آن، f فرکانس باند گذر است و از رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

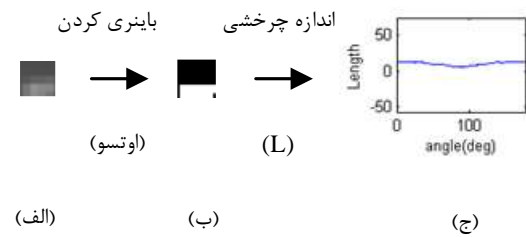
$$f = 2^{(-\gamma+2)/2\pi}, \quad \gamma \in \{0, \dots, n\} \quad (19)$$

در روابط فوق، μ مشخصه جهت و γ مشخصه مقیاس نامیده می‌شوند. با پیاده‌سازی فیلتر گابور در ابعاد و جهت‌های مختلف، فیلترهای گابور ایجاد خواهند شد [۳۵]. در این مقاله، از یک فیلتربانک گابور در ۵ مقیاس و ۶ جهت مختلف استفاده شد. با اعمال هر یک از این فیلترها به تصویر ورودی، ۳۰ تصویر فیلترشده به دست می‌آید. سپس دو پارامتر میانگین و انرژی برای هر یک از این تصاویر محاسبه و به عنوان ویژگی در نظر گرفته شد. به این ترتیب با اعمال فیلتربانک گابور، از هر یک از پنجره‌های محلی حاوی هدف یا کلاتر که قبلاً به عنوان دادگان آموزشی انتخاب شدند، ۶۰ ویژگی به دست آمد. در مرحله بعد، از روش PCA به عنوان یک روش انتخاب ویژگی استفاده خواهیم کرد.

۲-۲-۲- انتخاب ویژگی

در روش پیشنهادی مقاله حاضر، از PCA به منظور انتخاب ویژگی استفاده شده

روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی به منظور کاهش ابعاد استفاده نمودیم و این ۶۰ ویژگی را به ۴ ویژگی رساندیم؛ به این صورت که ۳۰ ویژگی میانگین مربوط به تصاویر فیلترشده را به دو ویژگی و همچنین ۳۰ ویژگی انرژی را به دو ویژگی نگاشت دادیم. بنابراین شبکه FCM ای با ۱۱ مفهوم ورودی خواهیم داشت. شکل (۵) روند استخراج مقادیر مفاهیم ورودی شبکه FCM را نشان می‌دهد.



شکل (۴) تغییرات اندازه چرخشی.

اگر هدف کوچک به شکل مستطیل باشد، مشخصه یک منحنی کسینوسی خواهد شد. می‌توان مشخصه اندازه چرخشی را با استفاده از انحراف معیار منحنی، مطابق رابطه (۱۲) به دست آورد.

$$\sigma_L = \sqrt{\sum_{i=1}^N (L(i) - \mu_L)^2 / N} \quad (12)$$

که در آن، L مشخصه اندازه چرخشی می‌باشد.

• **انرژی فرکانسی:** ششمین ویژگی با گرفتن تبدیل فوریه سریع از مشخصه اندازه چرخشی به دست می‌آید.

$$f_{energy} = \sum_{k=1}^M \frac{|M(k)|^2}{M}; \quad M(k) = FFT(L(i) - \mu_L) \quad (13)$$

• **میانگین فاصله:** اگر یک ناحیه شامل N پیکسل مرکز ناحیه (μ_x, μ_y) باشد، فاصله اقلیدسی متوسط با رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۳۲].

$$d = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(x(i) - \mu_x)^2 + (y(i) - \mu_y)^2}}{N} \quad (14)$$

• **اعمال فیلتر گابور:** فیلترهای گابور فیلترهایی میان گذر هستند که به منظور استخراج ویژگی، بخش بندی و تحلیل بافت، لبه‌یابی، تشخیص عنبیه و غیره استفاده می‌شوند. یک فیلتر گابور را می‌توان یک بخش سینوسی با جهت‌ها و فرکانس‌های مشخصی که با یک پوش گاوسی مدوله شده در نظر گرفت. فیلتر گابور را می‌توان به صورت رابطه (۱۵) نشان داد.

$$h(x, y) = s(x, y) \times g(x, y) \quad (15)$$

ست. اگر داده ورودی $X_{N \times T}$ را داشته باشیم، N تعداد ویژگی‌ها و T تعداد سری‌های زمانی باشد، در روش PCA به دنبال W ای هستیم که:

$$Y_{N \times T} = W_{N \times N}^T \cdot X_{N \times T} \quad (20)$$

به طوری که واریانس Y حداکثر شود؛ یعنی Y حداکثر اطلاعات را در خود دارد [۳۶]. در این مقاله، با توجه به زیاد بودن تعداد ویژگی‌های حاصل از اعمال فیلتربانک گابور، از

مفهوم است. مقدار A_i برای مفهوم C_i با رابطه (۲۱) به دست می آید.

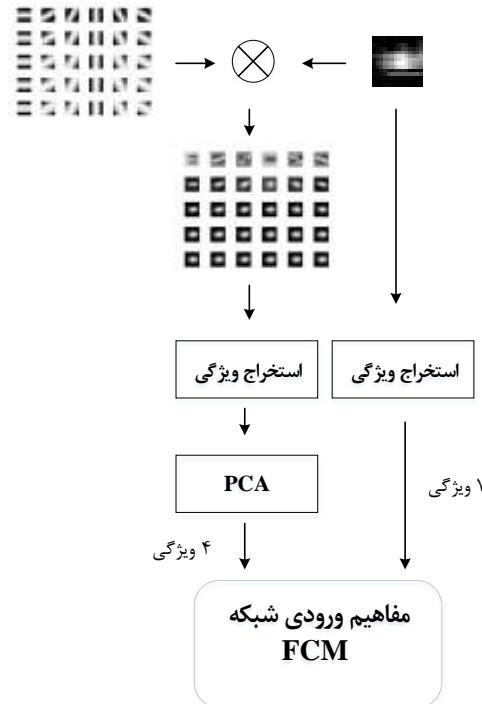
$$A_i^{(k+1)} = f(A_i^{(k)} + \sum_{j=1}^N A_j^{(k)} \cdot e_{ij}) \quad (21)$$

که در آن، $A_i^{(k+1)}$ مقدار C_i در زمان $k+1$ ، $A_j^{(k)}$ مقدار C_j در زمان k و f تابع تبدیل است [۳۹]. در این مقاله از تابع لجستیک به عنوان تابع تبدیل استفاده شده است. جدول (۱) جمع بندی از مفاهیم مورد استفاده در ساخت شبکه FCM ارائه می دهد که در آن منظور از میانگین ۱ و میانگین ۲، همان دو ویژگی میانگین حاصل از نگاشت توسط PCA هستند. به طور مشابه، منظور از انرژی ۱ و انرژی ۲ همان دو ویژگی انرژی حاصل از نگاشت توسط PCA می باشند.

در مرحله بعد باید ماتریس اتصال، که وزن یال های بین مفاهیم را به دست می دهد، محاسبه نمود. برای ساخت شبکه FCM، دو رویکرد وجود دارد که عبارت اند از استفاده از دانش متخصصان (مدل سازی استقرایی) و استفاده از الگوریتم های یادگیری بر اساس دادگان تاریخی^۴ (مدل سازی استنتاجی). در مدل استقرایی ممکن است کارشناسانی که مفاهیم و علیت بین آن ها را تعیین می کنند، با اختصاص وزن های نامناسب بین مفاهیم باعث تحریف مدل شوند. همچنین اگر تعداد مفاهیم زیاد باشد، اختصاص وزن به مفاهیم کار دشواری خواهد بود. لذا در این مقاله رویکرد دوم برای ساخت مدل FCM بکار رفت [۴۰].

جدول (۱) مفاهیم به کار گرفته شده برای ساخت شبکه FCM

مفاهیم	ویژگی
C1	انحراف معیار
C2	Ranked-fill-ratio
C3	مساحت
C4	ضریب اندازه
C5	تغییرات اندازه چرخشی
C6	انرژی فرکانسی
C7	میانگین فاصله
C8	میانگین ۱
C9	میانگین ۲
C10	انرژی ۱
C11	انرژی ۲
C12	مفهوم خروجی (شماره کلاس)



شکل (۵) روند استخراج مقادیر مفاهیم ورودی شبکه FCM در روش پیشنهادی.

۲-۲-۳- نگاشت شناختی فازی

FCM یک روش محاسباتی نرم است که با ترکیب شبکه عصبی و منطق فازی، ابزاری ساده اما قدرتمند برای مدل سازی و تحلیل ارائه می کند. مزیت اصلی این شبکه های منطقی، انعطاف و نیز مدل سازی و نمایش قابل فهم مسائل پیچیده برای افراد غیرمتخصص است. این روش تاکنون در حوزه های مختلفی مانند مهندسی، علوم اجتماعی و سیاسی، کسب و کار، فناوری اطلاعات، پزشکی و محیط زیست مورد استفاده قرار گرفته است. مدل FCM به منظور یکپارچه سازی دانش و تجربه ی در دسترس، بین مفاهیمی^۱ که به ویژگی ها و متغیرها برمی گردد، ارتباط برقرار می کند. هر مفهوم یکی از فاکتورهای کلیدی سیستم مدل شده را نشان می دهد و مقدار A_i دارد. بین مفاهیمها ارتباط علی و معلولی برقرار است و این ارتباط با اتصال آ های وزن دار جهت داری که گره های FCM را به هم وصل می کنند، نمایش داده می شود [۳۷ و ۳۸]. هر اتصال e_{ij} بین دو مفهوم C_i و C_j وزنی در بازه ی $[-1, 1]$ دارد و مثبت یا منفی بودن این مقدار، بیانگر مستقیم یا معکوس بودن ارتباط آن دو

³ Node

⁴ Historical Data

¹ Concept

² Link

• الگوریتم‌های آموزش برای FCM

منظور از آموزش FCM، به دست آوردن ماتریس اتصال گره‌های شبکه می‌باشد. به عبارتی هدف ما از استفاده از الگوریتم‌های آموزشی به دست آوردن وزن‌هایی است که قرار است بین مفاهیم ارتباط برقرار کنند. الگوریتم‌های آموزش FCM به سه دسته تقسیم می‌شوند: الگوریتم‌های مبتنی بر هیبن که ماتریس اتصال را بر اساس دانش متخصصان تولید می‌کنند، الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت که ماتریس اتصال را بر اساس دادگان تاریخی تولید می‌نمایند و الگوریتم‌های ترکیبی که ماتریس اتصال را بر اساس دانش متخصصان و دادگان تاریخی محاسبه می‌کنند. در قسمت بعد یکی از الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت به نام بهینه‌سازی گروهی ذرات را برای آموزش FCM پیشنهاد می‌دهیم.

• الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات برای دسته بندی با استفاده از FCM

بهینه‌سازی گروهی ذرات یک روش محاسباتی مبتنی بر رفتار اجتماعی پرندگان است. در این الگوریتم با در نظر گرفتن جمعیتی از راه‌حل‌های ممکن (کاندید)، راه‌حل بهینه انتخاب می‌شود. به هر کدام از راه‌حل‌ها یک ذره گفته می‌شود. برای توصیف حرکت ذره به سمت راه‌حل بهینه، معادلات مربوط به مکان و سرعت ذره تعریف می‌شوند. برای آموزش FCM با استفاده از PSO، فرض می‌کنیم جمعیتی شامل k ذره داریم. به طوری که مکان هر ذره یک FCM و به عبارتی یک ماتریس وزن است. مقدار اولیه این ذرات، ماتریس‌هایی با مقادیر تصادفی مثبت می‌باشد. سپس با استفاده از دادگان آموزشی و با توجه به رابطه (۲۱)، بهترین ذره (بهترین ماتریس وزن) انتخاب می‌شود تا مکان و سرعت آن به روزرسانی شود. برای به روزرسانی سرعت و مکان ذرات از روابط (۲۲) و (۲۳) استفاده می‌نماییم.

$$v_i^{(t+1)} = w.v_i^t + c_1(p_{best,i}^j(t) - x_i(t)) + c_2(G_{best}^j(t) - x_i(t)) \quad (22)$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \quad (23)$$

در رابطه (۲۲)، پارامتر w وظیفه کنترل همگرایی الگوریتم را دارد و مقدارش در هر تکرار کم می‌شود. $p_{best,i}^j$ در عبارت شناختی، بهترین تجربه شخصی ذره نام در سری

زمانی نام و G_{best}^j در عبارت اجتماعی بهترین تجربه گروهی می‌باشد.

الگوریتم آموزش شبکه FCM که در این مقاله استفاده شد، در شبه‌کد (۱) نشان داده شده است. شبکه FCM به دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است. لازم به ذکر است، یال‌های شبکه که بیانگر روابط علی و معلولی بین مفاهیم هستند، اصولاً با استفاده از خطوط تک جهت‌نمایش داده می‌شوند.

شبه‌کد (۱). الگوریتم آموزش شبکه FCM با PSO.

۱- ورودی شامل T سری زمانی با n مفهوم ورودی (ویژگی) و یک مفهوم خروجی (شماره دسته) می‌باشد. جمعیت اولیه $P(initial) = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ را ایجاد نمایید؛ طوری که p_i یک ماتریس وزن $n \times n$ با درآیه‌های تصادفی و مکان ذره نام باشد.

۲- با روش یکی بیرون^۱ دادگان آموزشی را از داده امتحانی جدا نمایید؛ T-1 داده آموزشی و ۱ داده امتحانی.

برای سری زمانی نام و ذره نام تکرار نمایید:

با استفاده از رابطه (۲۱) به ازای ذره نام مقدار جدید سری زمانی نام را محاسبه نمایید: A_{new}^j

فاصله اقلیدسی بین A_{old}^j و A_{new}^j را محاسبه نمایید.

ذره‌ای که حداقل فاصله اقلیدسی را ایجاد کرده به عنوان برنده انتخاب نمایید: p_{best}

ذره‌ای که در بین تمام برندگان حداقل فاصله اقلیدسی ایجاد کرده را انتخاب نمایید: G_{best}

سرعت ذره برنده را مطابق رابطه (۲۲) به روزرسانی نمایید.

مکان ذره برنده را مطابق رابطه (۲۳) به روزرسانی نمایید.

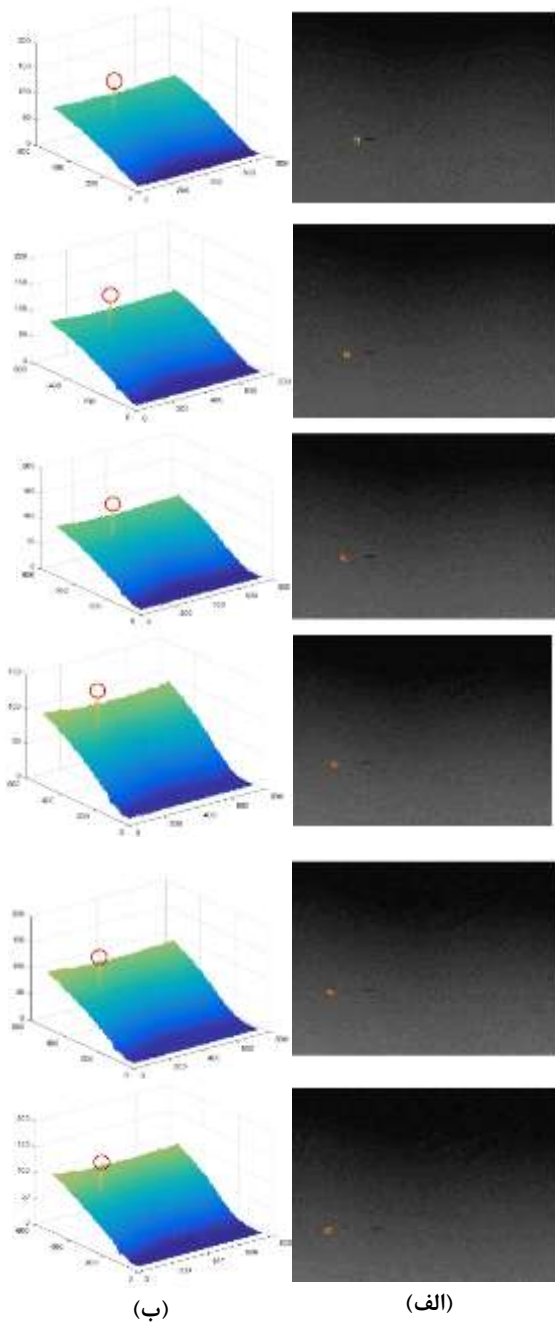
۳- با استفاده از شبکه FCM‌ای که ساخته شد، مقدار مفهوم خروجی را برای T-1 سری زمانی آموزشی محاسبه نمایید.

۴- با مقایسه مقادیر مفهوم خروجی مربوط به دسته‌های یک و دو، یک مقدار آستانه برای آن انتخاب نمایید.

۵- مقدار مفهوم خروجی را برای سری زمانی آزمون محاسبه نمایید و با توجه به مقدار آستانه تعیین کنید که به کدام کلاس تعلق دارد [۴۱].

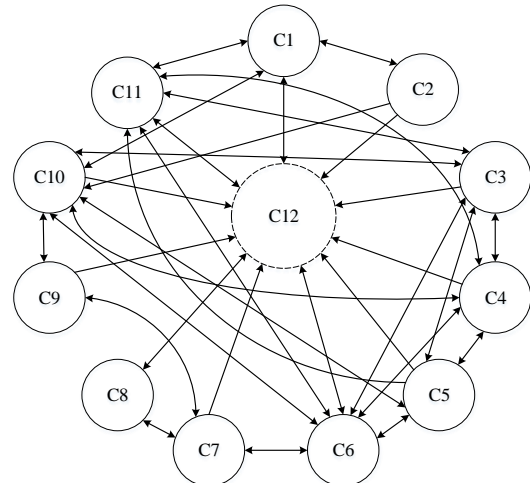
¹ Leave-One-Out

بعد از آموزش شبکه FCM، مدل آماده است تا با جاروب تصویر ورودی، اهداف کوچک را که همان پنجره‌های محلی دسته هدف هستند، آشکار کند. جاروب تصویر با گام ۶ پیکسل صورت گرفته است. در شکل (۸) دنباله تصاویر مادون قرمز مورد استفاده به همراه نتایج استفاده از روش پیشنهادی در آشکارسازی هدف نمایش داده شده است. همچنین نمودار سه بعدی شدت تصاویر مشاهده می‌شود.



(ب)

(الف)

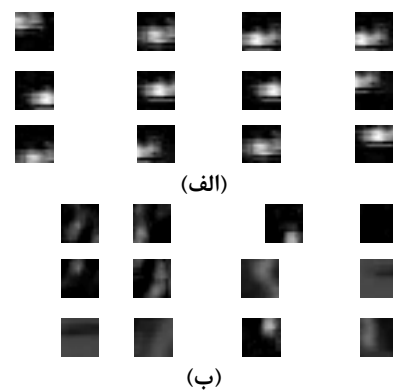


شکل (۶) مدل طراحی شده برای آشکارسازی هدف کوچک مادون قرمز.

در اینجا به منظور ایجاد جلوه بصری مناسب و فهم بهتر روابط، در مواردی که رابطه بین دو مفهوم دوطرفه است، از پیکان‌های دوجبهته برای نمایش استفاده نمودیم.

۳- نتایج آزمایشات و مقایسه

به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی مقاله از ۱۳ دنباله تصاویر مادون قرمز واقعی حاوی هدف کوچک متحرک استفاده شد. برای تهیه پایگاه داده مناسب، از دنباله فوق ۲۰ پنجره محلی حاوی پیکسل‌های هدف و ۳۰ پنجره محلی حاوی پیکسل‌های پس‌زمینه و کلاتر با اندازه 13×13 پیکسل استخراج کردیم. در شکل (۷) تعدادی از پنجره‌های محلی هدف و کلاتر مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل (۷) پنجره‌های محلی هدف و کلاتر مورد استفاده حاوی: (الف) هدف و (ب) کلاتر.

پیشنهادی توانسته در آشکارسازی هدف کوچک موفق عمل کند.

به منظور معتبرسازی روش پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از اعمال سه روش مبتنی بر شناسایی آماری الگو شامل بیزین، ماشین بردار پشتیبان و آدابوست که در مرجع [۳۲] پیشنهاد و استفاده شده‌اند، مقایسه و در جدول (۲) ارائه شده‌است. برای محاسبه دقت آشکارسازی از روش یکی بیرون استفاده نمودیم. در این روش، به تعداد سری‌های زمانی یعنی ۵۰ بار، هر بار یکی از سری‌های زمانی به عنوان نمونه امتحانی و بقیه سری‌ها به عنوان نمونه‌های آموزشی در نظر گرفته شده و عملکرد دسته-بندی کننده برای نمونه امتحانی بررسی می‌شود. در پایان با میانگین‌گیری از این پنجاه مقدار، دقت دسته‌بندی محاسبه می‌گردد.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، روش پیشنهادی توانسته نسبت به سایر روش‌ها دقت تفکیک تصویر هدف و پس‌زمینه را به نحو مطلوبی افزایش دهد.

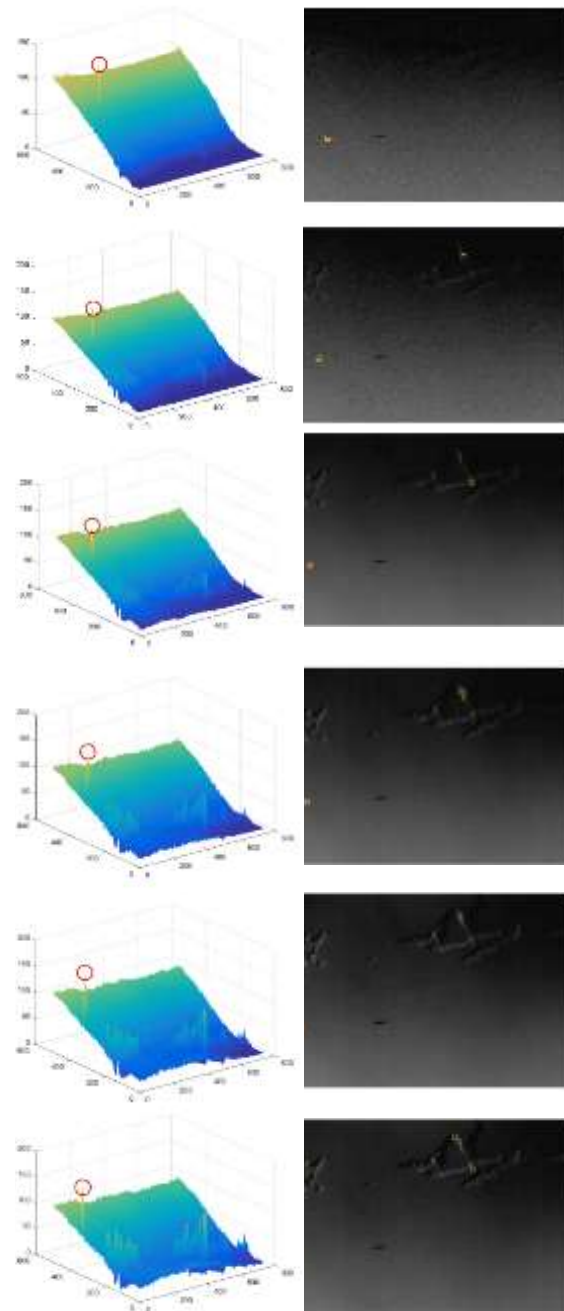
شکل (۹) بین نتیجه به کارگیری روش ارائه شده روی یکی از تصاویر مادون قرمز موجود در پایگاه داده و نتیجه استفاده از روش SVM مقایسه‌ای ارائه می‌دهد.

جدول (۲) مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های مرجع [۳۲].

دقت دسته‌بندی	دسته‌بندی کننده
٪۸۷،۲۷	بیزین
٪۹۲،۷۲	ماشین بردار پشتیبان
٪۸۱،۸۱	آدابوست
٪۹۷،۴۰	نگاشت شناختی فازی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی به منظور آشکارسازی هدف کوچک در تصاویر مادون قرمز بر پایه نگاشت شناختی فازی پیشنهاد شد. در روش پیشنهادی، مسئله تشخیص هدف کوچک مادون قرمز، به عنوان یک مسئله تشخیص الگوی دوکلاسه در نظر گرفته شد. این اولین بار است که از روش نگاشت شناختی فازی به منظور آشکارسازی اهداف کوچک مادون قرمز استفاده شده‌است. در پایان برای ارزیابی روش پیشنهادی، دقت عملکرد آن با سه روش بیزین، آدابوست و SVM مقایسه شد.



(ب)

(الف)

شکل (۸) اعمال روش پیشنهادی روی پایگاه داده: الف) نتایج آشکارسازی اهداف موجود در تصاویر پایگاه داده با استفاده از روش پیشنهادی و ب) نمودار سه‌بعدی شدت تصاویر.

در شکل (۸-الف) مربع‌ها نشان‌دهنده اهداف آشکار شده حاصل از روش پیشنهادی و دایره‌ها مرجع راستی‌آزمایی هستند. در شکل (۸-ب) نیز اهداف با دایره نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دنباله تصاویر مورد استفاده سطح روشنایی و نویز و کلاتر متنوعی دارند و روش

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.24, No.1, pp.34-58, 2002.

[6] Hadhoud, M.M. and Thomas, D.W. "The Two-Dimensional Adaptive LMS (TDLMS) Algorithm," IEEE Transaction Circuits Systems, Vol.35, No.5, pp.485-494, 1988.

[7] Peng, J.X. and Zhou, W.L. "Infrared Background Suppression for Segmenting and Detecting Small Target," Acta Electronica Sinica, Vol.27, No.12, pp.47-51, 1999.

[8] Yang, L., Yang, J., and Yang, K. "Adaptive Detection for Infrared Small Target under Sea-sky Complex Background," Electroninc Letter, Vol.40, No.17, pp.1083-1085, 2004.

[9] Deshpande, S.D., Er, M.H., Venkateswarlu, R., and Chan, P., "Max-Mean and Max-Median Filters for Detection of Small Targets," SPIE Signal and Data Processing of Small Targets, pp.74-83, 1999.

[10] Mahalanobis, A., Muise, R., Stanfill, S., and Nevel, A. "Design and Application of Quadratic Correlation Filters for Target Detection," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.40, No.3, pp.837-850, 2004.

[11] Bae, T. W. "Small Target Detection using Bilateral Filter and Temporal Cross Product in Infrared Image," Infrared Physics, Vol.54, No.5, pp.403-411, 2011.

[12] Wang, G. D., Chen, C. Y., and Shen, X. B. "Facet-Based Infrared Small Target Detection Method," Computers and Electrical Engineering, Vol.41, No.22, pp.1244-1246, 2005.

[13] Zhang, F., Li, C., and Shi, L. "Detecting and Tracking Dim Moving Point Target in IR Image Sequence," Infrared Physics & Technology, Vol.46, No.4, pp.323-328, 2005.

[14] Ye, B. and Peng, J. "Small Target Detection Method based on Morphology Top-hat Operator," Journal of Image and Graphics, Vol. 7, No. 7, pp.638-642, 2002.

[15] Zeng, M. and Li, J. "The Small Target Detection in Infrared Image based on Adaptive Morphological Top-hat Filter," Journal of Shanghai Jiao Tong University, Vol.40, No.1, pp.90-93, 2006.

[16] Shao, X., Fan, H., Lu, G., and Xu, J. "An Improved Infrared Dim and Small Target Detection Algorithm based on the Contrast Mechanism of Human Visual System," Infrared Physics & Technology, Vol.55, No.5, pp.403-408, 2012.

[17] Wang, X., Lv, G., and Xu, L. "Infrared Dim Target Detection based on Visual Attention," Infrared Physics & Technology, Vol.55, No.6, pp.513-521, 2012.

[18] Dong, X., Huang, X., and Zheng, Y. "Infrared Dim and Small Target Detecting and Tracking Method Inspired by Human Visual System," Infrared Physics & Technology, Vol.62, pp.100-109, 2014.

[19] Chen, C. L. P., Li, H., and Wei, Y. "A Local Contrast Method for Small Infrared Target

کشف شده

مرجع راستی آزمایی



(الف)



(ب)

شکل (۹) مقایسه نتایج استفاده از روش: الف) پیشنهادی مقاله و ب) ماشین بردار پشتیبان روی تصویر واقعی.

نتایج روی تعدادی از تصاویر مادون قرمز واقعی نشان داده است که روش پیشنهادی توانسته نسبت به سه روش ذکرشده دقت بیشتر و عملکرد مطلوبتری را به نمایش بگذارد.

۵- مراجع

[1] Chengjun, L., Ying, W., and Zeling, S. "A Small Target Detection Algorithm based on Multi-scale Energy Cross," IEEE Conference on Image and Signal Processing, Vol.2, pp.1191-1196, 2003.

[2] Sun, X., Liu, X., Tang, Z., Long, G. and Yu, Q. "Real-time Visual Enhancement for Infrared Small Dim Targets in Video," Infrared Physics & Technology, Vol.83, pp.217-226, 2017.

[3] Soni, T., Zeidler, J. R., and Ku, W. H. "Performance Evaluation of 2-D Adaptive Prediction Filters for Detection of Small Objects in Image Data," IEEE Transactions on Image Process, Vol.12, pp.383-397, 1997.

[4] Zhang, F., Li, C. F., and Shi, L. "Detecting and Tracking Dim Moving Point Target in IR Image Sequence," Infrared Physical, Vol.46, No.4, pp.323-328, 2005.

[5] Yang, M. H., Kriegman, D. J., and Ahuja, N. "Detecting Faces in Images: a Survey," IEEE

- Analysis and Applications, Vol.17, No.4, pp.883-900, 2014.
- [33] Zeng, M., Li, J., and Peng, Z. "The Design of Top-hat Morphological Filter and Application to Infrared Target Detection," *Infrared Physics & Technology*, Vol.47, No.2, pp.67-76, 2006.
- [34] Bai, X. and Zhou, F. "Infrared Small Target Enhancement and Detection based on Modified Top-Hat Transformations," *Computers and Electrical Engineering*, Vol.21, No.9, pp.1193-1201, 2010.
- [35] Mohsin, S. M., Javed, M. Y., and Anjum, A. "Face Recognition using Bank of Gabor filters," *IEEE Conference on Emerging Technologies ICET'06*, pp.144-150, 2006.
- [36] Song, F., Guo, Z., and Mei, D. "Feature Selection using Principal Component Analysis," *IEEE Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization (ICSEM)*, Vol.1, pp.27-30, 2010.
- [37] Papageorgiou, E. I. "Review Study on Fuzzy Cognitive Maps and Their Applications during the Last Decade," *IEEE Conference on Fuzzy Systems*, 2011.
- [38] Napoles, G., Espinosa, M. L., Grau, I., Vanhoof, K. and Bello, R. "Fuzzy Cognitive Maps Based Models for Pattern Classification: Advances and Challenges," *Soft Computing Based Optimization and Decision Models*, Vol.360, pp.83-98, 2018.
- [39] Papageorgiou, E. I., Spyridonos, P. P., Glotsos, D. Th., Stylios, C. D., Ravazoula, P., Nikiforidis, G.N., and Groumpos, P.P. "Brain Tumor Characterization using the Soft Computing," *Applied Soft Computing*, Vol.8, No.1, pp.820-828, 2008.
- [40] Stach, W., Kurgan, L. A., and Pedrycz, W. "A Divide and Conquer Method for Learning Large Fuzzy Cognitive maps," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.161, No.19, pp.2515-2532, 2010.
- [41] Oikonomou, P. and Papageorgiou, E. I. "Particle Swarm Optimization Approach for Fuzzy Cognitive Maps Applied to Autism Classification," *IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations*, pp.516-526, 2013.
- Detection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.52, No.1, pp.574-581, 2014.
- [20] Guo, C., Ma, Q., and Zhang, L. "Spatio-Temporal Saliency Detection using Phase Spectrum of Quaternion Fourier Transform," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1-8, 2008.
- [21] Han, J., Ma, Y., Huang, J., Mei, X., and Ma, J. "An Infrared Small Target Detecting Algorithm based on Human Visual System," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol.13, No.3, pp.452-456, 2016.
- [22] Nasiri, M., Mosavi, M. R., and Mirzakuchaki, S. "Infrared Dim Small Target Detection with High Reliability using Saliency Map Fusion," *IET Image Processing*, Vol.10, No.7, pp.524-533, 2016.
- [23] Nasiri, M., Mosavi, M. R., and Mirzakuchaki, S. "IR Small Target Detection based on Human Visual Attention using Pulsed Discrete Cosine Transform," *IET Image Processing*, Vol.11, No.6, pp.397-405, 2017.
- [24] Gu, Y. F., Wang, C., Liu, B. X., and Zhang, Y. "A kernel-Based Nonparametric Regression Method for Clutter Removal in Infrared Small-Target Detection Applications," *IEEE Conference on Image and Signal Processing*, Vol.37, pp.469-473, 2010.
- [25] Boccignone, G., Chianese, A., and Picariello, A. "Small Target Detection using Wavelets," *Proceedings of 4th IEEE Conference on Pattern Recognition*, pp.1776-1778, 1998.
- [26] Deng, H., Sun, X., Liu, M., Ye, C., and Zhou, X. "Entropy-based Window Selection for Detecting dim and Small Infrared Targets," *Pattern Recognition*, Vol.61, pp.66-77, 2017.
- [27] Deng, H., Sun, X., Liu, M., Ye, C., and Zhou, X. "Infrared Small-Target Detection using Multiscale Gray Difference Weighted Image Entropy," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.52, No.1, pp.60-72, 2016.
- [28] Qin, H., Han, J., Yan, X., Li, J., Zhou, H., Zong, J., Wang, B., and Zeng, Q. "Multiscale Random Projection based Background Suppression of Infrared Small Target Image," *Infrared Physics & Technology*, Vol.73, pp.255-262, 2015.
- [29] He, Y., Li, M., Zhang, J. and An, Q. "Small Infrared Target Detection based on Low-rank and Sparse Representation," *Infrared Physics & Technology*, Vol.68, pp.98-109, 2015.
- [30] Zhang, H., Zhang, L., Yuan, D., and Chen, H. "Infrared Small Target Detection Based on Local Intensity and Gradient Properties," *Infrared Physics & Technology*, vol. 89, pp. 88-96, 2018.
- [31] Cui, Y. P., Zheng, S., and Liu, Y. C. "SVM-based Infrared Small Target Detection," *Infrared Laser Engineering*, Vol.34, No.6, pp.696-702, 2005.
- [32] Kim, S. "Analysis of Small Infrared Target Features and Learning-based False Detection Removal for Infrared Search and Track," *Pattern*