



ردیابی چشمه متحرک مبتنی بر سیستم بینایی ماشین: بهبود تشخیص با بهره‌گیری از همبستگی داده‌ها

هادی اردینی^{*}، امیرمحمد بیگزاده، مجتبی عسکری

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

*Email: hardini@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۸/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰

چکیده

ادغام داده‌ها بین حسگرهای مختلف می‌تواند موجب استخراج اطلاعات با دقت و با کیفیت بالاتر گردد و بهبود تشخیص تهدیدهای هسته‌ای را به همراه داشته باشد. در این تحقیق، ردیابی چشمه متحرک با استفاده از تلفیق داده‌های سیستم آشکارساز پرتوی و دوربین نظارتی مورد مطالعه قرار گرفت است. بدین منظور الگوریتمی جهت تلفیق و ایجاد همبستگی بین تصاویر دریافتی توسط دوربین و شمارش آشکارساز طراحی شده است تا مسیر حرکت جسمی که بیش‌ترین همبستگی را با اطلاعات شمارش ثبت شده پرتوی توسط سیستم آشکارسازی را دارد به عنوان چشمه متحرک انتخاب نماید. جهت انجام این آزمایش از سه ربات متحرک استفاده شده است که بر روی یکی از این ربات‌ها چشمه پرتوزا به عنوان عامل آلوده به ماده رادیواکتیو قرار گرفته است. با استخراج مسیر حرکت ربات‌ها با کمک تصاویر دوربین و تلفیق آن با اطلاعات شمارش ثبت شده در آشکارساز، الگوریتم مورد نظر توانست در مدت زمان کوتاهی ربات حامل چشمه رادیواکتیو را شناسایی کند. در این تحقیق سرعت تشخیص چشمه متحرک و صحت تشخیص در زمان‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. با افزایش زمان داده‌برداری از ۵ ثانیه به ۱۲۵ ثانیه درصد موفقیت الگوریتم در موقعیت‌یابی چشمه رادیواکتیو متحرک از ۴۲٫۷ درصد به ۹۸٫۳ درصد افزایش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد که با تجهیز دوربین‌های شهری با آشکارسازهای هسته‌ای می‌توان شبکه‌ای سنسوری ایجاد نمود که یک منطقه و یا شهر را بی‌وقفه پایش و کنترل نمود.

کلیدواژه‌ها: تلفیق داده‌ها، بینایی ماشین، چشمه متحرک، همبستگی داده‌ها، مواد رادیواکتیو خارج از کنترل

Tracking a moving source based on a computer vision system: Improving detection using data correlation

H. Ardiny*, A.M. Beigzadeh, M. Askari

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P. O. Box 11365-3486, Tehran - Iran

Research Article

Received 23.10.2021, Accepted 30.1.2022

Abstract

Data fusion between different sensors can improve the detection of nuclear threats by extracting more reliable and effective information. In this study, tracking a moving radioactive hotspot source using a combination of a radioactive detector (NaI) and a surveillance camera is addressed. For this purpose, three mobile robots were used, and a radioactive source was placed on one of these robots. An algorithm was developed to correlate the radioactive and camera data, so the robot with the highest correlation was selected as the moving source quickly. By increasing the acquisition time from 5 to 125 seconds, the algorithm's success rate in detecting the moving radioactive source increases from 42.7% to 98.3%. In addition, the moving source's detection speed and the detection's precision over different times were studied. The results have presented a model that can be scaled up by equipping surveillance cameras with radioactive detectors to provide a network, and this network can continuously monitor and control a vast area or even a city to detect and track suspicious items.

Keywords: Data fusion, Computer vision, Moving source, Correlation, Radioactive material out of regulatory control



۱. مقدمه

در کنار گسترش جهانی و رشد روزافزون فن‌آوری‌های هسته‌ای تهدیدهای بالقوه مواد پرتوی با منشأ تروریسم، سهل‌انگاری در به‌کارگیری و جابه‌جایی آن‌ها و موارد از این دست می‌تواند خطرات جدی برای جوامع بشری ایجاد نماید. از این‌رو توسعه سیستم‌های آشکارسازی و ردیابی چشمه‌های رادیواکتیو برای ارتقای امنیت جوامع و جلوگیری از اشاعه تروریسم مورد توجه جدی قرار گرفته است. جابه‌جایی و حمل‌ونقل چشمه‌های رادیواکتیو، پسمانداری مناسب، از کاراندازی و بازسازی تأسیسات هسته‌ای از جمله عوامل نشت و آلودگی پرتوی محیط هستند. بهره‌گیری از سیستم‌های پایش^۱ مبتنی بر فن‌آوری‌های نوین از قبیل هوش مصنوعی و بینایی ماشین امری اجتناب‌ناپذیر است که می‌تواند در ارتقا امنیت و سلامت جامعه نقش مهمی را ایفا نماید.

هدف این تحقیق بهبود روش‌های آشکارسازی و استخراج اطلاعات یقینی و کیفی جهت کشف و ردیابی مواد رادیواکتیو خارج از کنترل است. با قرار دادن یک آشکارساز پرتوهای یون‌ساز (مانند شمارش‌گر پرتو گاما) در کنار یک دوربین نظارتی شهری امکان رصد و پایش دقیق منطقه فراهم خواهد شد. در این تحقیق ادغام داده‌های سیستم آشکارساز پرتوی و دوربین شهری با هدف استخراج اطلاعات دقیق و بهبود کشف تهدیدهای هسته‌ای صورت گرفته است. داده‌های دوربین توسط الگوریتم‌های بینایی ماشین مورد پردازش قرار گرفته و در نهایت ویژگی‌های مختلف شی را اندازه‌گیری می‌کند تا شی (یا هر عنصر دیگری) را به عنوان یک شی برچسب گذاری شده، شناسایی نماید. با ذخیره تاریخچه حرکت اشیای شناسایی شده در فریم‌های مختلف تصویر دوربین و برقراری ارتباط آن با اطلاعات شمارش پرتو گاما برحسب زمان، می‌توان شی آلوده را در میان اشیای متحرک و ساکن دیگر شناسایی نمود. در این تحقیق به عنوان نمونه از یک نود^۲ دوربین و آشکارساز جهت اثبات امکان‌پذیر بودن کشف و تعقیب مواد رادیواکتیو استفاده شده است. با ارزان‌سازی آشکارساز، منبع تغذیه و ماژول‌های ارتباطی، امکان توسعه گسترده و پوشش نواحی بزرگ نظیر یک شهر فراهم خواهد شد. با افزایش تعداد نودهای تشخیصی و ایجاد یک شبکه به هم پیوسته می‌توان به صورت هوشمند منطقه‌ای وسیع را تحت نظر گرفت و کاراکترهای آلوده را شناسایی و ردیابی نمود.

۲. کارهای صورت گرفته در دنیا

از کاربردهای سیستم بینایی ماشین، بهبود درک تصویر با هدف امکان رؤیت آن‌ها با چشم انسان یا تحلیل داده‌های تصویر برای اهداف سنجش و اندازه‌گیری است. تصمیم‌های اتخاذ شده از اطلاعات در سیستم‌های بینایی ماشین، وابسته به کیفیت داده‌های اکتساب شده است [۱، ۲]. امروزه به سبب استفاده از پردازش‌گرهای قوی با قیمت مناسب و پیشرفت در حس‌گرها و دوربین‌ها، هزینه به‌کارگیری سیستم‌های بینایی ماشین در صنایع رو به کاهش است. بهره‌گیری از سیستم‌های بینایی ماشین یک جایگزین بسیار مناسب، حیاتی و مقرون‌به‌صرفه به جای انسان در خط تولید صنایع، کارخانه‌ها، بازرسی، آزمون‌های غیرمخرب و کنترل کیفی محصولات است. به طور مثال می‌توان به تجزیه و تحلیل قطعات الکترونیکی، شناسایی امضاء، تشخیص نوری نویسه‌ها، تشخیص دست خط، تشخیص اشیاء، الگوشناسی، بازرسی مواد، بازرسی ارز، تجزیه و تحلیل تصاویر پزشکی، حوزه‌های امنیتی و دفاعی و حوزه‌های استراتژیک اشاره نمود. فرایند کلی بینایی ماشین شامل برنامه‌ریزی جزئیاتی الزامات موجود در پروژه و سپس ارایه راه‌حل است. در زمان اجرا، این فرایند با تصویربرداری شروع شده و به دنبال آن تجزیه و تحلیل خودکار تصاویر و استخراج اطلاعات مورد نیاز است [۳-۷]. سیستم‌های بینایی ماشین در بخش‌های مختلف صنعت هسته‌ای از قبیل تصویربرداری پزشکی هسته‌ای با هدف پردازش تصاویر و بهبود کیفیت آن‌ها، بازرسی غیرمخرب در تأسیسات هسته‌ای و رآکتورهای هسته‌ای [۸] جهت تشخیص خوردگی و ترک‌ها در لوله‌ها [۹] و نیز استفاده از سیستم‌های بینایی ماشین در یافتن چشمه‌های رادیواکتیو در قالب ربات‌های زمینی و پرنده مورد استفاده قرار گرفته است. در کار مارتوری و همکارانش از یک نمونه ربات با دوربین استفاده شده است. در این کار راهکاری برای تسهیل و بهبود عملیات تخریب و جمع‌آوری در یک رآکتور هسته‌ای با استفاده از کنترل دید رباتیک ارایه شده است [۱۰]. در کار دیگر توسط بندسون و همکارانش، ایده ترکیب استفاده از سیستم بینایی ماشین با سیستم‌های آشکارسازی پرتوی گاما با مساحت‌های بزرگ برای بهبود حساسیت که هدف آن مقابله با تهدیدات و موقعیت‌یابی سریع آن‌ها در مکان‌های پر ازدحام (مترو، فرودگاه‌ها و برج‌ها) بود توسعه یافت. در این کار با استفاده از یک آرایه ۱ مترمربعی از ۱۰۰ آشکارساز NaI(Tl) اولین تصاویر ماسک- رمزگذاری شده به دست آمد. علاوه بر این، از دو دوربین فیلم‌برداری به

1. Monitoring
2. Node



می‌تواند نظارت و آشکارسازی پرتوی را به‌طور هم‌زمان انجام دهد [۱۴]. طبقه‌بندی چشمه‌های یون‌ساز در مأموریت‌های فضایی با بهره‌گیری از بینایی ماشین توسط ویلالتا و همکارانش انجام شد. در این کار رویکردی مبتنی بر بینایی ماشین برای آشکارسازی و تفکیک خودکار تابش‌های یون‌ساز در مأموریت‌های فضایی شرح داده شده است؛ که در این کار رد تابش‌های یون‌ساز با استفاده از نیمه‌رساناهای هیبریدی سیستم آشکارسازی مدیپیکس اندازه‌گیری شد [۱۵].

در برخی از کاربردها نیز می‌توان به استفاده از بینایی ماشین در بازرسی غیرمخرب تأسیسات هسته‌ای و محیط‌هایی با آهنگ تابشی بالا پرداخت. سیستم‌هایی در قالب بازوهای مکترونیک و نیز ربات‌های گشت زن، اسکنرهای لیزری مبتنی بر بینایی ماشین در بازرسی خوردگی محفظه‌های نگهداری پسماندهای هسته‌ای با هدف کاهش ورود کارکنان به محیط‌های تابشی بالا وجود دارد که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد [۱۶]. در یک کار تجربی با بهره‌گیری از بینایی ماشین راه حل مناسبی برای بازرسی لوله‌های تحت‌فشار و تنش در صنعت هسته‌ای توسط ستولین ارایه گردیده است، در این کار با تلفیق الگوریتم‌های بینایی ماشین، داده‌برداری و پردازش تصویر به بازرسی بدنه داخلی لوله‌های تحت‌فشار و دمای بالا و نیز درجه اکسیداسیون آن‌ها پرداخته شده است [۱۷]. در کار دیگر یک سیستم بینایی ماشین جدید برای تست مواد، قطعات راکتورهای هسته‌ای، آسیب‌هایی مانند تورم و نقص ناشی از پرتوگیری طراحی شده است. این سیستم می‌تواند توسعه اجزای راکتورهای هسته‌ای پیشرفته را تسریع کند [۱۸].

بازرسی قرص‌های سوخت هسته‌ای با استفاده از بینایی ماشین و شبکه‌های عصبی توسط کالی انجام شد. سوخت هسته‌ای باید پیش از استفاده در راکتور، از کیفیت بالایی برخوردار باشد. تولیدکنندگان قرص‌های سوخت هسته‌ای در حال حاضر از روش بازرسی دستی برای تأیید کیفیت سوخت هسته‌ای قبل از قرار دادن ساچمه‌های سوخت در میله‌های سوخت زیرکونیمی و گردآوری آن‌ها استفاده می‌کنند. در کار کالی امکان‌سنجی استفاده از روش بینایی ماشین و شبکه‌های عصبی برای انجام امور بازرسی قرص‌های سوخت که پیش از این توسط انسان انجام می‌شد، با انگیزه بهبود در دقت، سرعت، هزینه، کاهش دز پرتو دریافتی کارکنان و ارایه آمار عیوب موجود در قرص‌های سوخت به تولیدکننده مورد بررسی قرار گرفت [۱۹].

صورت استریو^۱ برای ایجاد یک نقشه سه‌بعدی از یک آشکارساز آرایه استفاده شده است و تصویر نهایی برای تشخیص و ردیابی تک‌تک اشیاء در میدان دید تصویر به دست آمد [۱۱]. طبقه‌بندی مواد پسماند با بهره‌گیری از سیستم بینایی ماشین توسط شکات و همکارانش انجام شد [۱۲]. پاک‌سازی ساختمان‌های اضافی و غیرعملیاتی در سایت‌های هسته‌ای شامل آلودگی‌زدایی مواد پسماند هسته‌ای و تخریب زیرساخت‌های فیزیکی است. مشکل چالش‌برانگیز که در حال حاضر صنعت هسته‌ای در طول این فرایند با آن روبه‌رو است، تفکیک مواد پسماند بر اساس ماهیت و میزان رادیواکتیویته آن‌ها است که ممکن است تهدیدی جدی برای محیط‌زیست باشد. به‌منظور خودکارسازی این فرایند به‌جای طبقه‌بندی دستی، می‌توان از سیستم رباتیکی همراه با سیستم‌های بینایی قوی و سریع برای طبقه‌بندی بصری جهت تفکیک مواد زائد هسته‌ای بهره برد، که در کار شکات و همکارانش یک راه‌حل جدید با ترکیب یک سیستم بینایی ماشین برای شناسایی مستقل مواد پسماند نیروگاه‌های هسته‌ای از کار افتاده ارایه شد [۱۲]. در تحقیقی دیگر واسکونس و همکارش ربات متحرک برای آشکارسازی تابش گاما با قابلیت کنترل از راه دور و سیستم به بینایی ماشین توسط طراحی و ساخته شد. این ربات توانست برای تست الگوریتم‌های نظارت و پایش رادیولوژیکی پرتودهی چشمه‌های رادیواکتیو استفاده شود. این ربات شامل یک کنترل از راه دور با برد ۱ کیلومتر، یک سیستم بینایی FPV^۲ و یک رابط کاربری ماشین انسانی^۳ است که در نرم‌افزار LabView توسعه یافته است. این سیستم قابلیت نمایش پارامترهای از قبیل آهنگ تابش با واحد شمارش بر ثانیه، داده‌های موقعیت جغرافیایی ربات با GPS^۴، زوایای جهت خودرو، تاریخ، زمان، تصویر هوایی را دارد [۱۳]. آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای بر مبنای بهره‌گیری از دوربین CMOS^۵ و بینایی ماشین توسط ژانگفا و همکارانش انجام شده است. در کار آن‌ها ابتدا لنز دوربین CMOS پوشانده شد و پرتودهی یک چشمه تکنسیم-۹۹ اندازه‌گیری شد؛ و در گام بعدی پوشش روی لنز دوربین برداشته شد که در این حالت دوربین در حال ضبط تصاویر محیط اطراف بود. در نهایت با به‌کارگیری الگوریتم‌های توسعه داده شده، نتایج تأیید نمود که این دوربین

1. Stereo
2. First-Person View
3. Human-Machine Interface
4. Global Positioning System
5. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor



تحقیقی مشابه، یک دوربین عمقی^۴ و آشکارساز هسته‌ای جهت ساخت یک نقشه سه‌بعدی استفاده شده است تا بتوان به صورت مؤثر منطقه خطر را بررسی نمود [۲۵]. در تحقیق دیگری، با تلفیق اطلاعات موقعیت و دوربین گاما چشمه‌های آلوده کشف و مکان‌یابی شد [۲۶].

چشمه‌های گاما کاربردهای زیادی دارند، به عنوان مثال در رادیوترابی، تصویربرداری صنعتی و پزشکی و غیره. احتمال دزدیده شدن، گم شدن یا جابه‌جایی آن‌ها وجود دارد. اگر این چشمه‌ها فعالیت بالایی داشته باشند، ممکن است باعث آسیب تابشی به افراد مجاور به چشمه و محیط گردد. بنابراین، یکی از مهم‌ترین مباحث مربوط به حفاظت و ایمنی در برابر اشعه آشکارسازی یا تعیین موقعیت چشمه‌های رادیواکتیو است [۲۷]. در صنعت هسته‌ای و برنامه‌های کاربردی مرتبط، مسأله چشمه‌های اشعه گاما که از موقعیت اصلی خود خارج شده‌اند و یا گم شده‌اند به عنوان یک نگرانی اساسی قلمداد می‌شود. یک چشمه گامای مفقود شده، بسته به انرژی و میزان فعالیت آن، می‌تواند برای تکنسین‌ها و هم‌چنین محیط عمومی خطر جدی باشد. تاکنون، چندین حادثه و آسیب دیدگی ناشی از چشمه‌های گامای مفقود شده در بایگانی جان استون گزارش شده است که به عنوان نمونه حوادث گویانیا^۵ در سال ۱۹۸۷، گیلان ۱۹۹۶، اکوادور ۲۰۰۹ که بر اثر چشمه‌های گامای مفقود شده ایجاد شده است را می‌توان نام برد [۲۸]. اهمیت کشف به موقع مخاطرات هسته‌ای و اشیاء و افراد آلوده به ماده رادیواکتیو امری ضروری در مسایل مربوط به امنیت هسته‌ای است و با توجه به نقش سیستم‌های بینایی ماشین در تشخیص این موارد و گسترش روز به روز بهره‌گیری از این سامانه‌ها در جهان، در این مطالعه قصد داریم با بهره‌گیری از سیستم بینایی ماشین و تلفیق داده‌ها به ردیابی چشمه‌های رادیواکتیو متحرک پردازیم؛ که یکی از کاربردهای امنیتی بینایی ماشین در صنعت هسته‌ای است. در هر یک از مدل‌سازی‌ها و کارهای تجربی اشاره شده فوق، الگوریتم‌ها و نیز چیدمان‌های تجربی با هدف یافتن چشمه‌های مفقود شده انجام شده است. نکته کلیدی در کارهای نزدیک به موضوع این تحقیق، این است که از طریق تلفیق اطلاعات آشکارساز هسته‌ای و سیستم‌های تصویربرداری سه‌بعدی (لیدار، دوربین عمقی) می‌توان بین مکان چشمه متحرک و شمارش پرتو یک همبستگی ایجاد نمود تا بتوان چشمه مفقود شده را کشف نمود. در این کار یک روش تجربی به همراه ارایه الگوریتم برای پیدا نمودن شی آلوده به مواد رادیواکتیو گاما با تلفیق اطلاعات دوربین‌های معمولی شهری و

یک نمونه دیگر استفاده از سیستم بینایی ماشین مرکب از ۴۰ دوربین مداربسته در صنعت هسته‌ای است که تصاویر آن توسط یک سیستم هوش مصنوعی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد این سیستم مشخص می‌کند که آیا کارکنان از کلاه ایمنی با سپر محافظ، دستکش ایمنی، لباس کار و کفش ایمنی استفاده کرده‌اند [۲۰]. با توجه به موارد ذکر شده در استفاده چشم‌گیر از سیستم‌های بینایی ماشین در بازرسی و کنترل صنایع هسته‌ای، لذا توسعه این سامانه‌ها و الگوریتم‌های حاکم بر آن‌ها در داخل کشور در جهت حفظ ایمنی تأسیسات هسته‌ای ضروری به نظر می‌رسد [۲۱]. در تحقیقاتی که در حوزه تلفیق اطلاعات صورت گرفته است می‌توان به تحقیقی اشاره کرد که در آن اطلاعات بین دوربین تصویربرداری و آشکارساز تلفیق شده است [۲۲] به محض عبور یک خودرو سیستم تصویربرداری آن را شناسایی می‌کند و در صورت آلوده بودن آن به مواد رادیواکتیو، اطلاعات آن ثبت می‌شود. تلفیق اطلاعات بین دوربین تصویربرداری و آشکارساز کامپتون^۱ نیز در تحقیق دیگر بررسی شده است [۲۳]. سیستم کامپتون جهت شناسایی چشمه‌های ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما تلفیق آن با تصاویر امکان شناسایی چشمه‌های متحرک را به روش جبران‌ساز حرکتی از طریق دوربین را فراهم نموده است. هم‌چنین مؤلفین نتایج را با استفاده شبکه‌ای از دوربین‌ها و آشکارساز کامپتون برای خودروهای متحرک در جاده‌ای اعتبارسنجی نموده‌اند. در بسیاری از مناطق پویا (مانند فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های مترو) جابه‌جایی افراد، کانترینرها می‌تواند شناسایی و مکان‌یابی مواد رادیواکتیو با چالش جدی مواجه نماید، چرا که هم مواد رادیواکتیو امکان حرکت دارند و حضور جمعیت نیز پتانسیل خطر را افزایش داده است. یک راه‌حل برای این موضوع، ترکیب لیدار^۲ و دو آشکارساز بوده است که با تلفیق اطلاعات آن‌ها و برقراری همبستگی بین آن‌ها با اطمینان بالا قادر به تشخیص چشمه در این نوع محیط‌ها بوده است، لیدار یکی از فن‌آوری‌های سنجش از راه دور است که با تاباندن لیزر به هدف و تجزیه و تحلیل نور بازتاب‌شده، فاصله را اندازه می‌گیرد. هم‌چنین مؤلفین در تحقیقات قبلی خود از تلفیق لیدار، دوربین کینکت^۳ (دوربین مخصوص سنجش حرکت و مکان اشیاء) و آشکارساز و با کمک همبستگی اطلاعات بین آن‌ها، توانسته‌اند موقعیت چشمه را تخمین بزنند [۲۴]. در

4. RGB-D Camera

5. Goiânia

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 44 (2), Serial Number 103, 2023, P 67-77

1. Compton

2. Lidar

3. Kinect Camera



میزان شمارش در آشکارساز با فاصله از آشکارساز رابطه معکوس دارد، ضریب همبستگی برای چشمه پرتوی انتظار می‌رود که به منفی یک نزدیک‌تر باشد. اگر جسم متحرک حاوی چشمه نباشد، این مقدار به صفر نزدیک‌تر است. فاصله از آشکارساز با پردازش اطلاعات دوربین و شمار پرتو نیز توسط آشکارساز صورت می‌گیرد.

سیستم تست که در شکل ۱ نشان داده شده است، از یک دوربین مدار بسته ۴ مگاپیکسلی با برد دید در شب ۵۰ متر مدل IPC-HDBW۲۴۳۱RP-ZS، در کنار یک آشکارساز یدور سدیم ۲ اینچ تشکیل شده است که با تلفیق خروجی این دو سامانه، چشمه را می‌توان پیدا نمود. پرتوهای گاما پس از برخورد با آشکارساز، توسط یک مدار الکترونیکی تقویت می‌گردند و در قالب یک رشته ده بیتی با پروتکل RS-۲۳۲ به کامپیوتر ارسال می‌گردد. پنجره انرژی بسته شده برای آشکارساز بین بازه ۱۵۰۰-۲۰۰ کیلو الکترون ولت می‌باشد. برای تست الگوریتم ارایه شده، سه ربات متحرک که بر روی هر یک از آنها برگه‌ای با رنگ‌های قرمز، مشکی و آبی قرار داده شده است، به کار گرفته شده است.

ربات‌های مورد استفاده از نوع ربات آموزشی [۲۹] مدل Thymio با قابلیت برنامه‌ریزی می‌باشند. تصویری از ربات در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. تصویری از آشکارساز و دوربین در محیط واقعی.



شکل ۲. تصویری از ربات مدل Thymio مورد استفاده در آزمایش.

آشکارساز شمارنده پرتوگاما طراحی و پیاده‌سازی شده است. آشکارسازهای شمارنده پرتوگاما (نظیر گایگر مولر و آشکارساز سوسوزن) معمولاً از دسته آشکارسازهای هسته‌ای با قیمت مناسب هستند که با الحاق به دوربین‌های معمول شهری امکان مانیتورینگ و استخراج اطلاعات هویتی و مکانی چشمه رادیواکتیو متحرک را با کمک تلفیق اطلاعات فراهم می‌نماید. طبق بهترین تحقیقات انجام شده، استفاده هم‌زمان از دوربین معمولی و آشکارساز شمارنده، جهت شناسایی و مکان‌یابی کاراکتر آلوده به مواد رادیواکتیو متحرک با نگاه توسعه در شبکه‌های سنسوری برای اولین بار انجام می‌گیرد. با افزایش نوده‌های آشکارساز و دوربین امکان کشف و ردیابی اشیا موجود در منطقه بزرگی نظیر یک شهر وجود دارد تا امنیت و نظارت پرتوی در سطح وسیع‌تر پیاده‌سازی شود.

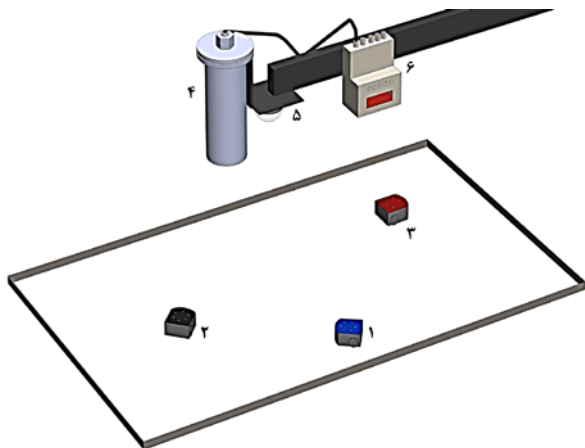
۳. روش کار

هدف در این مقاله، تشخیص چشمه پرتوزا در بین اجسام متحرک است. در این کار با تلفیق داده‌های حاصل از دوربین و شمارش در آشکارساز، جسمی که دارای چشمه پرتوزا است تشخیص داده می‌شود. مبنای عملکرد سیستم ارایه شده بر اساس ضریب همبستگی است. ضریب همبستگی یک پارامتر آماری که رابطه و وابسته بودن دو متغیر کمی با یکدیگر را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی شدت رابطه و هم‌چنین نوع رابطه را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱- تا ۱ است. اگر ضریب همبستگی دو متغیر با هم مثبت باشد، بدین معنی است که در فضایی که آزمایش انجام شده، افزایش یک متغیر با افزایش متغیر دیگر و نیز کاهش آن با کاهش متغیر دیگر همراه است و اگر منفی باشد عکس این قضیه حاکم است. در صورت عدم وجود رابطه این ضریب برابر صفر می‌شود و نشان‌دهنده این است که دو پارامتر از یک‌دیگر مستقل هستند. همبستگی بین دو متغیر تصادفی X و Y به صورت زیر تعریف می‌شود:

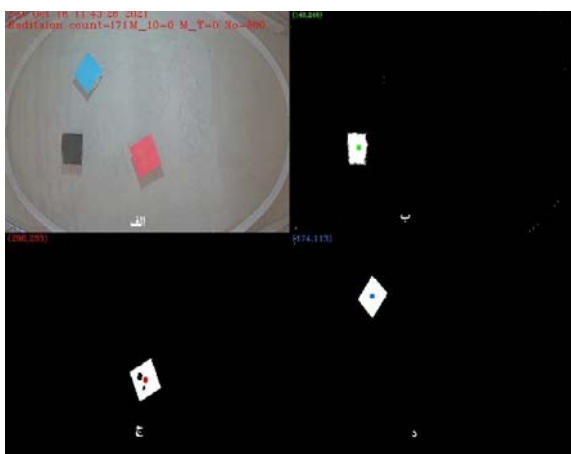
$$corr(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

که در آن $corr$ ضریب همبستگی، cov کوواریانس و σ انحراف معیار داده‌ها می‌باشد. از آن‌جا که شمارش پرتو با مجذور فاصله نسبت عکس دارد و با استخراج اطلاعات مکانی چشمه این رابطه برقرار می‌گردد. دو متغیر مورد نیاز برای کشف و ردیابی چشمه پرتوی، فاصله از آشکارساز و شمارش پرتو گاما می‌باشد. لذا الگوریتم ارایه شده بر اساس میزان شمارش در آشکارساز و فاصله جسم متحرک از آشکارساز عمل می‌کند. با توجه به آن که





شکل ۳. چیدمان اندازه‌گیری مورد استفاده، ۱، ۲ و ۳ ربات‌ها، ۴ آشکارساز، ۵ دوربین، ۶ بخش داده‌برداری.



شکل ۴. خروجی الگوریتم‌های پردازش تصویر (الف) تصویر اصلی در محیط واقعی (ب) تشخیص رنگ مشکی و فیلتر سایر رنگ‌ها (ج) تشخیص رنگ قرمز و فیلتر سایر رنگ‌ها (د) تشخیص رنگ آبی و فیلتر سایر رنگ‌ها.

حین انجام آزمایش مراحل زیر دنبال می‌گردد:

۱. با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر، محل برگه‌های رنگی در دو بعد مشخص می‌شود و هر رنگ جداگانه تشخیص و جدا می‌شود.
۲. فاصله مرکز هر رنگ تشخیصی تا مرکز آشکارساز محاسبه می‌شود.
۳. شمارش پرتو ثبت می‌گردد.
۴. با به دست آوردن ضریب همبستگی کم‌ترین مقدار به عنوان چشمه در نظر گرفته می‌شود.

۴. نتایج تجربی

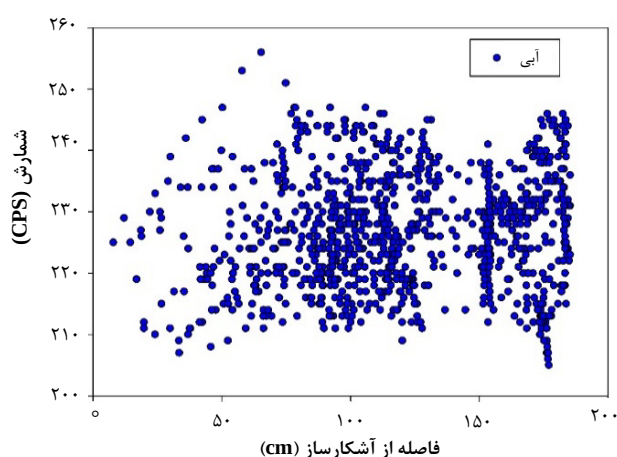
در شکل ۵ تا ۷ مسیر حرکت ربات‌ها در دو بعد نشان داده شده است. مسیر حرکت ربات‌ها به صورت تصادفی می‌باشد و آشکارساز در مرکز مختصات این حرکت قرار داده شده است. نتایج حاصل از ۱۰۰۰ ثانیه حرکت ربات که به‌طور هم‌زمان با ثبت موقعیت هر کدام از ربات‌ها میزان پرتوهای وارد شده به آشکارساز نیز ثبت شده‌اند.

موارد استفاده از چشمه‌های رادیواکتیو در صنعت به ویژه چشمه‌های گاما از روز به روز در حال گسترش است. دو نمونه از آن‌ها چشمه کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ است. کبالت-۶۰ (^{60}Co) یک ایزوتوپ رادیواکتیو مصنوعی از کبالت با نیمه‌عمر ۵,۲۷۱۳ سال است [۳۰]. به طور مصنوعی در رآکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. تولید صنعتی به طریق فعال‌سازی نوترونی نمونه‌های ایزوتوپی متشکل از کبالت مونوایزوتوپی و تک‌هسته‌ای ۵۹ بستگی دارد. مقادیر قابل‌اندازه‌گیری نیز به عنوان محصول جانبی عملیات معمولی نیروگاه هسته‌ای تولید می‌شوند و ممکن است در صورت بروز نشتی از رآکتورها در فضای خارج نیز شناسایی شوند. مواردی از استفاده اصلی چشمه کبالت-۶۰ از قبیل: استریل کردن تجهیزات پزشکی، چشمه اصلی برای دستگاه‌های پرتودرمانی پزشکی، دستگاه‌های تله‌تراپی برای درمان سرطان، چشمه‌های سیستم‌های رادیوگرافی صنعتی، چشمه‌های دستگاه‌های سطح‌سنجی و ضخامت‌سنجی، چشمه اصلی برای عقیق‌سازی آفات و حشرات، به عنوان چشم اصلی برای تابش‌دهی مواد غذایی و تابش‌دهی خون مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی می‌تواند به صورت بمب‌های کشیف برای آلوده کردن مساحت بزرگی از مناطق مورد استفاده قرار بگیرد و اگر بر اساس ریزش‌های هسته‌ای ایجاد شده باشد در یک منطقه، آن منطقه غیرقابل سکونت می‌شود. با توجه به کاربردهای گسترده و مخاطراتی که ممکن است در صورت عدم محافظت مناسب از این ماده ایجاد شود لذا برای ایجاد یک سناریو در شناسایی چشمه متحرک یک چشمه کبالت-۶۰ با فعالیت ۴/۹ میکروکوری بر روی ربات قرمز رنگ قرار داده شده است [۳۱].

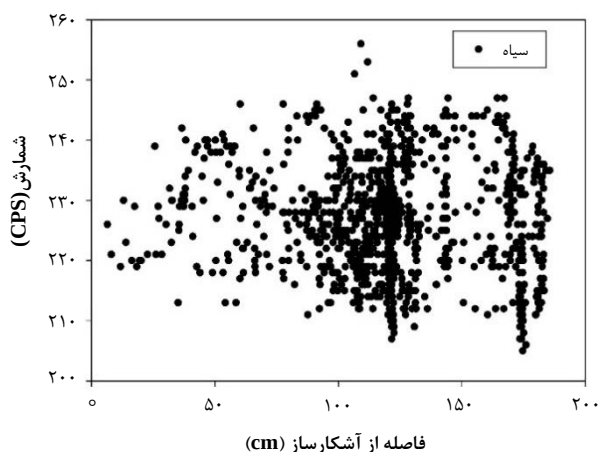
چیدمان اندازه‌گیری در شکل ۳ نشان داده است. دوربین و آشکارساز در ارتفاع ۱ متری از سطح زمین قرار داده شده است. در آزمایش از برگه کاغذ به رنگ‌های مشکی، آبی و قرمز استفاده شده است. جهت جدا کردن رنگ مرکز فاصله آشکارساز از مرکز صفحات از الگوریتم‌های پردازش تصویر و اعمال فیلترهای مناسب نوشته‌شده با زبان C++ بهره گرفته شد. الگوریتم پردازش تصویر استفاده شده بر اساس فیلتر کانال رنگ عمل می‌کند؛ ابتدا تصویر گرفته شده در RGB را به فضای HSV منتقل می‌گردد و با فیلتر کردن پارامترهای رنگ (hue, saturation, value) اهداف از هم متمایز می‌شوند. در شکل ۴ (ب، ج، د) سه هدف با رنگ‌های متفاوت متمایز شده و با رنگ سفید و مابقی رنگ‌ها به رنگ مشکی تغییر یافتند. حرکت ربات‌ها در محیط به صورت تصادفی می‌باشد.



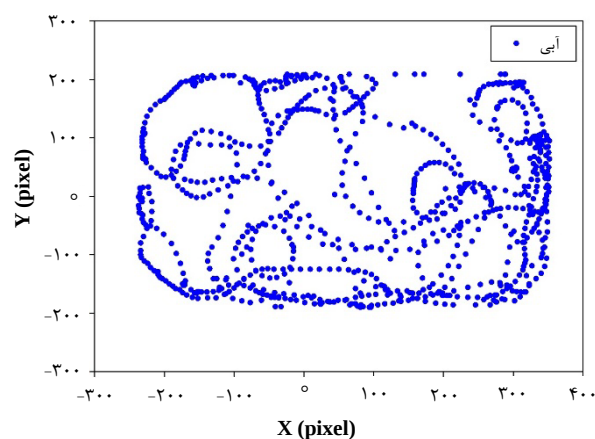
همان‌طور که در شکل‌های ۸ الی ۱۰ مشخص شده است، از نظر کیفی برای ۱۰۰۰ ثانیه داده‌برداری می‌توان استنباط نمود چشمه در ربات قرمز رنگ قرار گرفته است زیرا با توجه به نتایج یک رابطه خطی معکوس بین میزان شمارش در آشکارساز و فاصله جسم از آشکارساز وجود دارد. برای بررسی کمی این موضوع ۱۰۰ سری داده ۲۰۰ ثانیه‌ای به صورت تصادفی از بین ۱۰۰۰ ثانیه داده‌برداری انتخاب شده است و میزان ضریب همبستگی برای هر ۱۰۰ حالت در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



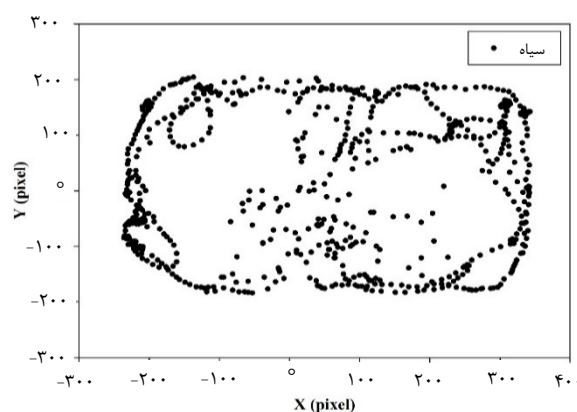
شکل ۸. میزان شمارش در آشکارساز در وضعیت‌های مختلف قرارگیری ربات آبی.



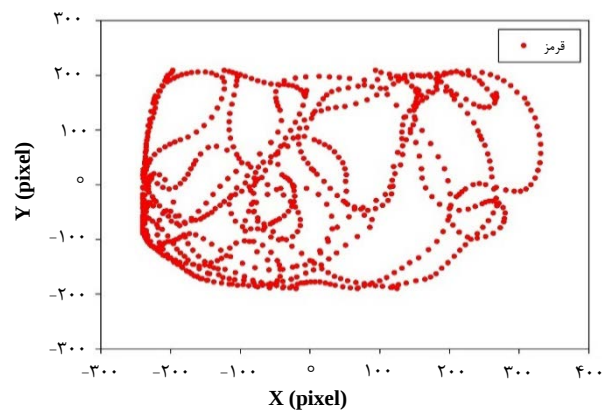
شکل ۹. میزان شمارش در آشکارساز در وضعیت‌های مختلف قرارگیری ربات مشکی.



شکل ۵. مسیر حرکت ربات آبی در دو بعد.



شکل ۶. مسیر حرکت ربات مشکی در دو بعد.



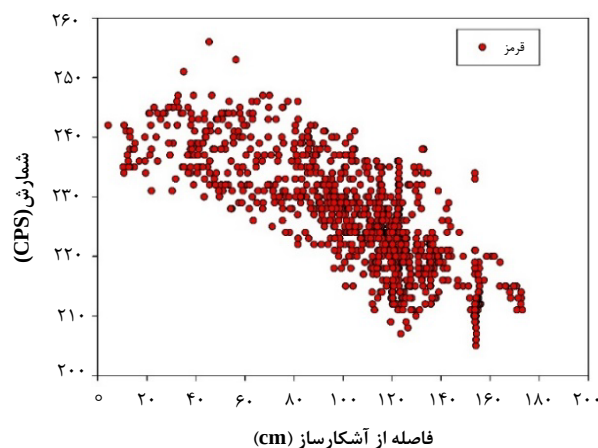
شکل ۷. مسیر حرکت ربات قرمز در دو بعد.

حرکت ربات‌ها به صورت تصادفی است و هر ۱۰ ثانیه به صورت تصادفی تغییر سرعت و جهت می‌دهند. ربات‌ها مجهز به حسگرهای تشخیص مانع هستند و پس از رسیدن به دیواره‌ها، مسیر حرکت‌شان به‌طور خودکار تغییر می‌دادند که این امر باعث شد که ربات‌ها به‌طور پیوسته مسیر حرکت خود را بدون توقف در بازه زمانی ۱۰۰۰ ثانیه طی کنند.

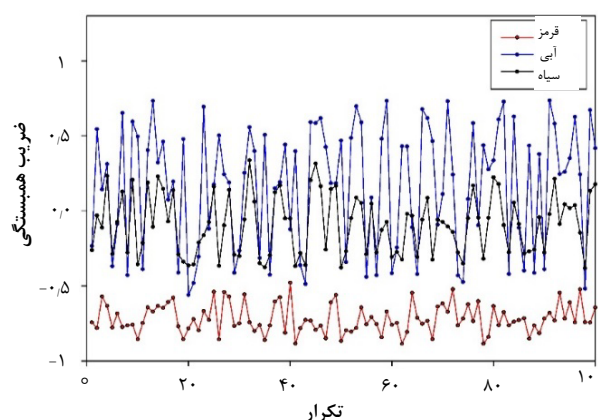


آزمایش نشان‌دهنده احتمال و اثربخشی برنامه‌ریزی مسیر^۱ در محیط پرتوی بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات بود [۳۲]. الگوریتم PSO یک الگوریتم جستجوی جمعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان الگوبرداری شده است. در ابتدا این الگوریتم به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز هم‌زمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آن‌ها و تغییر شکل بهینه دسته به کار گرفته شد. ویلکرسون نیز در آزمایش‌های خود جهت موقعیت‌یابی و پایش هوایی حضور چشمه رادیواکتیو از یک رهیافت بیزی در تحلیل داده‌های شمارش ثبت شده در آشکارساز استفاده کرد. استنباط بیزی یک روش مهم در علم آمار و همچنین دارای کاربردهای بسیار زیادی در علوم مهندسی، پزشکی است، روش‌های بیزی برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و معنی و مفهوم بخشیدن به میزان زیادی از اطلاعات در دسترس، امری ضروری هستند. ویلکرسون در نتیجه روش خود اعلام کرد که رهیافت بیزی یک روش بهتر نسبت به سایر الگوریتم‌ها در کشف چشمه‌های رادیواکتیو با سطح فعالیت کم به ویژه با استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین است [۳۳]. در این تحقیق همان‌گونه که قبل از این بیان شد از روش ریاضی مبتنی بر بررسی همبستگی داده‌های موقعیت اجسام متحرک و شمارش ثبت شده در آشکارساز استفاده شده که در جدول ۲ و شکل ۱۲ نتایج مربوط به درصد موفقیت به ازای زمان‌های متفاوت داده‌برداری آمده است.

برای بررسی حداقل زمان لازم برای تشخیص جسم متحرک دارای چشمه، نتایج برای زمان‌های داده‌برداری مختلف به همراه درصد موفقیت تشخیص به دست آورده شد. با افزایش زمان تعداد داده‌های ثبت شده مکانی و شمارش بیشتر می‌گردد و الگوریتم همبستگی داده‌ها با دقت بالاتری می‌تواند ارتباط منطقی بین این دو دسته داده را برای سه کاراکتر متحرک به دست بیاورد و موقعیت مکانی چشمه متحرک را با دقت بالاتر ارزیابی کند. نتایج الگوریتم مبتنی بر همبستگی داده‌های مکانی-شمارش در این کار نشان داد که برای زمان داده‌برداری ۵ الی ۱۲۵ ثانیه درصد موفقیت الگوریتم نوشته‌شده در موقعیت‌یابی چشمه رادیواکتیو متحرک از ۴۲٫۷ درصد به ۹۸٫۳ درصد افزایش می‌یابد. بعد از حدود ۱۰۰ ثانیه داده‌برداری الگوریتم ارایه شده قابلیت تشخیص چشمه با موفقیت بالای ۹۰ درصد را دارا می‌باشد. استفاده هم‌زمان از چند آشکارساز و چند دوربین در موقعیت‌های مختلف می‌تواند درصد موفقیت تشخیص چشمه متحرک را نیز بالاتر ببرد.



شکل ۱۰. میزان شمارش در آشکارساز در وضعیت‌های مختلف قرارگیری ربات قرمز.



شکل ۱۱. ضریب همبستگی به ازای انتخاب ۲۰۰ ثانیه داده.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، میزان ضریب همبستگی برای تمام موارد برای ربات قرمز رنگ که چشمه در زیر آن قرار داده است کم‌تر می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده آن است ربات قرمز حاوی چشمه است. شکل ۱۱ همچنین نشان می‌دهد که ضریب همبستگی بین متغیرهای مکان و شمارش به عدد منفی یک نزدیک می‌گردد. با توجه به آن‌که میزان شمارش در آشکارساز با فاصله از آشکارساز رابطه معکوس دارد، انتظار می‌رود که ضریب همبستگی برای چشمه پرتوی به ۱- نزدیک‌تر باشد و نتیجه شکل ۱۰ نیز مؤید کاهش شمارش ثبت شده در آشکارساز با افزایش فاصله چشمه متحرک از آشکارساز و در نتیجه نزدیک شدن ضریب همبستگی به مقدار ۱- است. در تحقیقاتی که پیرامون کشف چشمه‌های رادیواکتیو و نیز تصویرسازی از محیط‌های رادیواکتیو انجام شده است (جدول ۱) از الگوریتم‌ها و روش‌های ریاضی گوناگونی استفاده شده است که هر کدام از این الگوریتم‌ها با توجه به شرایط پرتوی و نیز هدف مورد نظر می‌تواند متفاوت باشد. به‌طور مثال در کار لیو، دز و فاصله به عنوان عوامل تصمیم‌گیری بودند. نتایج



جدول ۱. اطلاعات مربوط به پژوهش‌های مشابه صورت گرفته

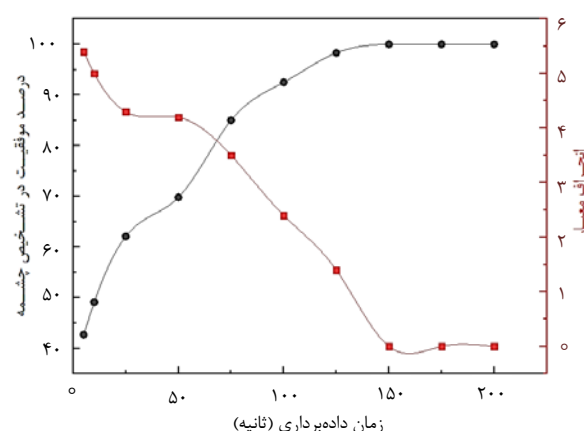
تحقیق صورت گرفته	ابزار مورد استفاده	الگوریتم مورد استفاده	نتیجه حاصل
ادغام داده‌ها برای یک سیستم تشخیص رادیولوژیکی به روش بینایی ماشین: عملکرد الگوریتم کالیراسیون [۲۳].	دو آشکارساز سوسوزن مایع EJ-۳۰۹ حساس به نوترون و گاما، دوربین کینکت، لیدار	همبستگی	با به کارگیری فیلترهایی برای تقویت سیگنال به نویز حداقل ۸۰ درصد از اندازه‌گیری‌ها برای حالت آمار شمارش کم‌تر (با استفاده از داده‌های دو آشکارساز) موقعیت چشمه را به درستی شناسایی کردند.
ادغام داده‌ها برای یک سیستم تشخیص رادیولوژیکی به کمک بینایی: روش‌های همبستگی برای ردیابی تک چشمه [۲۴].	منبع Cf-۲۵۲ را در یک کوله‌پشتی یک فرد در یک اتاق با حضور ۴ نفر، لیدار، ۵ آشکارساز سوسوزن مایع EJ-۳۰۹	همبستگی	نتایج اولیه اثربخشی ترکیب بینایی ماشین سه‌بعدی در سیستم‌های تشخیص رادیولوژیکی را با دقت ۸۰ درصد نشان می‌دهد.
تشخیص چشمه‌های رادیواکتیو در شهری با استفاده از تجمع بیزی داده‌های طیف‌سنج‌های متحرک [۲۴]. با هدف طیف‌نگاری گاما	طیف‌نگار مجهز به یدور سدیم ۴ در ۱۶ اینچ به همراه سیستم ارسال داده‌ها	تجمع بیزی	تجمع بیزی داده‌ها می‌تواند تشخیص چشمه‌های رادیواکتیو را بهبود بخشد و هم‌چنین به تعیین ویژگی‌های آن‌ها مانند مکان، شدت و نوع چشمه کمک کند.
ادغام داده‌های تلفیقی: تصویربرداری حجمی پرتو گاما در زمان واقعی [۲۵].	پلتفرم تصویربرداری کامپتون متشکل از دو آشکارساز ژرمانیم با خلوص بالا حساس به موقعیت سه‌بعدی	ردیابی و بازسازی در زمان واقعی	این کار بر روی یک رویکرد خاص مبتنی بر تصویربرداری کامپتون تمرکز می‌کند که به‌ویژه برای جستجوی چشمه و برنامه‌های نقشه‌برداری پرتو گاما به دلیل میدان دید گسترده ذاتی و حساسیت در طیف وسیعی در انرژی‌های پرتو گاما مناسب است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در کنار بهره‌وری از فن‌آوری هسته‌ای در صنایع مختلف، شرایط اضطراری ناشی از نشت پرتوهای رادیواکتیو می‌تواند در مواردی هم‌چون حمل‌ونقل، مفقودی چشمه‌های رادیواکتیو، سرقت آن‌ها با اهداف تروریستی رخ دهد که این‌گونه مسایل اغلب ماهیتی جهانی و امنیتی دارند و پیامدهای منفی درازمدتی در پی خواهند داشت. با توجه به این موضوع سامانه‌های نظارت پرتوی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که دخالت افراد را به حداقل رسانده و با دقت بالا و سرعت مناسب مکان‌ها، افراد و اشیای آلوده به مواد رادیواکتیو را به ویژه در اماکن پر ازدحام مانند مترو، فرودگاه و خیابان‌ها تشخیص دهند. یکی از موارد در بهره‌وری مؤثر و ایجاد دقت مطلوب در سامانه‌های پایش پرتوی تجهیز آن‌ها با سیستم‌ها و الگوریتم‌های مبتنی بر بینایی ماشین است. در این مطالعه سیستمی متشکل از یک دوربین و یک آشکارساز سوسوزن جهت تشخیص موقعیت یک چشمه متحرک راه‌اندازی شد و از سه ربات به عنوان عناصر متحرک که چشمه رادیواکتیو بر روی یکی از آن‌ها مستقر بود، استفاده شد. ربات‌ها به صورت تصادفی و خودکار در فضای دوبعدی حرکت داشتند. اطلاعات تصویر سه ربات توسط دوربین و میزان شمارش در آشکارساز برای مدت ۱۰۰۰ ثانیه با گام زمانی ۱ ثانیه ثبت شدند. برای تحلیل داده‌های تصویری و شمارش به ترتیب از الگوریتم‌های

جدول ۲. نتایج مربوط به درصد موفقیت به ازای زمان‌های متفاوت داده‌برداری

زمان داده‌برداری	درصد موفقیت در تشخیص چشمه	انحراف معیار
۵	۴۲٫۷	۵٫۴
۱۰	۴۹٫۱	۵
۲۵	۶۲٫۱	۴٫۳
۵۰	۶۹٫۸	۴٫۲
۷۵	۸۵	۳٫۵
۱۰۰	۹۲٫۵	۲٫۴
۱۲۵	۹۸٫۳	۱٫۴
۱۵۰	۱۰۰	۰
۱۷۵	۱۰۰	۰
۲۰۰	۱۰۰	۰



شکل ۱۲. نمودارهای مربوط به درصد موفقیت و انحراف معیار به ازای زمان‌های متفاوت داده‌برداری.



11. A.R. Benson, et al., *The gamma-ray imaging framewor*, **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, **60**, 528 (2013).
12. A. Shaukat, et al., *Visual classification of waste material for nuclear decommissioning*, **Rob. Auton. Sys.**, **75**, 365 (2016).
13. R.M. Vázquez, E. Gutiérrez, In: *International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, (IEEE, Cuernavaca, Mexico), 175-180 (2018).
14. Y. Zhangfa, et al., *Nuclear radiation detection based on uncovered CMOS camera under dynamic scene*, **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.**, A, **11**, 956 (2020).
15. R. Vilalta, et al., In: *International Joint Conference on Artificial Intelligence, Workshop on AI in Space: Intelligence Beyond Planet Earth*, (Acta Futura, Netherlands), 111-119 (2012).
16. Par-systems-supports-development-smart-robots-next-generation-nuclear-reactors-southern-research-under-department-energy-grant, <https://www.par.com>.
17. R. Seulin, et al., In: *International Society for Optics and Photonics*, (SPIE, California), 128-136 (2004).
18. *Augmented reality for testing nuclear components*, <https://www.eurekalert.org/news-releases/929421>.
19. M.L.R. Kelly, *Nuclear fuel pellet inspection using machine vision and artificial neural networks*, **University of Missouri—Rolla**, (1995).
20. M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle, *Image processing, analysis, and machine vision*, (Cengage Learning, 2014).
21. *Using Machine Vision*, <https://www.proquest.com>.
22. B.E. Cazalas, *Defending Cities Against Nuclear Terrorism: Analysis of A Radiation Detector Network for Ground Based Traffic*, **Homel. Secur. Aff**, **14**, 1 (2018).
23. K. Stadnikia, et al., *Data fusion for a vision-aided radiological detection system: Correlation methods for single source tracking*, **Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.**, **954**, 161913 (2020).
24. K. Stadnikia, et al., *Data fusion for a vision-aided radiological detection system: Calibration algorithm performance*, **Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.**, **890**, 8 (2018).
25. N. Van Thai, L.C. Chen, In: *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics Mechatronics*, (IEEE, Australia), 1404-1409 (2013).
26. H. Ardiny, S. Witwicki, F. Mondada, *Autonomous exploration for radioactive hotspots localization taking account of sensor limitations*, **Sensors**, **19**, 292 (2019).
27. A.F. Alwars, A. Farzanehpour, F. Rahmani, *Conceptual design of an orphan gamma source finder*, **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.**, **922**, 235 (2019).
28. A.F. Alwars, A. Farzanehpour, Faezeh Rahmani, *A feasibility study of gamma ray source finder development for multiple sources scenario based on a Monte Carlo simulation*, **Sci. Rep.**, **11**, 1 (2021).

توسعه داده شده با زبان C++ و الگوریتم مبتنی بر همبستگی داده‌ها در MATALB استفاده شد. بهره‌گیری از الگوریتم مبتنی بر همبستگی بین داده‌های مکانی- شمارش در تشخیص چشمه رادیواکتیو متحرک موفقیت‌آمیز بود. نتایج درصد موفقیت ۹۰ درصد را در تشخیص کاراکتر آلوده به چشمه رادیواکتیو در زمان داده‌برداری ۱۰۰ بار نشان داد. در کارهای آتی می‌توان سیستم‌های متشکل از چند دوربین و آشکارساز و نیز الگوریتم-های متفاوت را جهت پیدا نمودن چشمه‌های رادیواکتیو در شرایط مختلف عملیاتی به کار گرفت.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله مراتب تشکر را از گروه دستگاه‌وری و همکاران این گروه که امکانات لازم جهت آزمایش فراهم نمودند، داریم.

مراجع

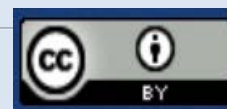
1. E.R. Davies, *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*, (Academic Press, London, 2012).
2. C. Steger, M. Ulrich, C. Wiedemann, *Machine vision algorithms and applications*, (John Wiley & Sons, New York, 2018).
3. C.Y. Huang, J.H. Hong, E. Huang, *Developing a machine vision inspection system for electronics failure analysis*, **IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.**, **9**, 1912 (2019).
4. K.D. Joshi, V. Chauhan, B. Surgenor, June, in: *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*, (CSME, Canada), 26-29 (2016).
5. M. Payal, et al, In: *AI and IoT-Based Intelligent Automation in Robotics Robotics*, Edited by A.K. Dubey, A. Kumar, S.K. Rakesh, N. Gayathri, D. Prasenjit, 109-128 (Wiley, 2021).
6. Y. Shen, W. Zhu, *Medical image processing using a machine vision-based approach*, **IJSIP**, **6**, 139 (2013).
7. R. Jain, R. Kasturi, B.G. Schunck, *Machine vision*, (McGraw-hill, New York, 1995).
8. B.L. Luk, et al., *Walking and climbing service robots for safety inspection of nuclear reactor pressure vessels*, **Meas. Control.**, **39**, 43 (2006).
9. S.J. Schmugge, et al., In: *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*, (IEEE, USA), 1-7 (2016).
10. N. Marturi, et al., In: *International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications*, (IEEE, India), 1-8 (2016).



29. F. Mondada, et al., *Bringing Robotics to Formal Education: The Thymio Open-Source Hardware Robot*, *IEEE Robot. Autom. Mag.*, **24**, 77 (2017).
30. K. Eckerman, Endo, *Nuclear decay data for dosimetric calculations*, *Annals of the ICRP*, **38**, 7 (2008).
31. Liu, Yong-kuo, et al., *Path-planning research in radioactive environment based on particle swarm algorithm*, *Progress in Nuclear Energy*, **74**, 184 (2014).
32. D. Li, et al., *Experiment on gamma-ray generation and application*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.*, 1 (2004).
33. R.B. Wilkerson, M.S. thesis, *The university of Tennessee, Knoxville*, (2016).
34. P. Tandon, et al., *Detection of radioactive sources in urban scenes using Bayesian Aggregation of data from mobile spectrometers*, *Inf. Syst.*, **57**, 195 (2016).
35. R. Barnowski, et al., *Scene data fusion: Real-time standoff volumetric gamma-ray imaging*, *Nucl. Instrum.*, 65 (2015).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

هادی اردینی، امیرمحمد بیگزاده، مجتبی عسکری (۱۴۰۲)، ردیابی چشمه متحرک مبتنی بر سیستم بینایی ماشین: بهبود تشخیص با بهره‌گیری از همبستگی داده‌ها، ۱۰۳، ۶۷-۷۷

DOI: 10.24200/NST.2023.1365

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1365.html