

طراحی مفهومی سامانه تشخیص/ردیابی هوشمند مواد رادیواکتیو خارج از کنترل در حوادث پرتوی پر ازدحام: ادغام داده‌های بینایی ماشین و سامانه چند آشکارسازی

امیرمحمد بیگزاده^{۱*}، هادی اردینی^۲، محسن محرابی^۳

۱ و ۲-۳- استادیار پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۳۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1403.15.2.5.4>

چکیده

فناوری هسته‌ای در سراسر جهان به سرعت در حال پیشرفت است، اما وجود مواد رادیواکتیو خطرات قابل توجهی برای جامعه و محیط زیست به همراه دارد. این خطرات با تهدیدهایی مانند تروریسم، سوءاستفاده و حمل و نقل غیرقانونی این مواد تشدید می‌شود. در نتیجه، نیاز مبرم به تقویت سیستم‌های شناسایی و ردیابی مواد رادیواکتیو برای تقویت امنیت و جلوگیری از اقدامات تروریستی احتمالی وجود دارد. این مطالعه یک رویکرد جدید برای نقشه برداری و تشخیص پرتو از طریق توسعه الگوریتم‌های بینایی ماشین و مدل‌سازی سیستم تشخیص چندگانه معرفی می‌کند. هدف بهبود کارایی و دقت شناسایی و مکان‌یابی چشمه‌های رادیواکتیو کنترل نشده در محیط‌های پیچیده با استفاده از تکنیک‌های بینایی ماشین معاصر است. روش ردیابی پیشنهادی بر اساس الگوریتم ردیابی پیشرفته KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) است. این سیستم هم‌زمان با ردیابی مسیرهای حرکت اجسام و ثبت داده‌های پرتو از آشکارساز، تصاویر متحرک را در زمان واقعی ضبط و پردازش می‌کند. با ادغام داده‌های مکانی با داده‌های پرتوی، این سیستم می‌تواند چشمه‌های رادیواکتیو کنترل نشده را از سایر اجسام متحرک به دقت متمایز کند. ترکیب این الگوریتم‌های پیشرفته در سیستم‌های تشخیص پرتوی موجود، این پتانسیل را دارد که خطرات مرتبط با حوادث پرتوی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: چشمه‌های پرتو، پردازش تصویر، بینایی ماشین، مونت کارلو، ردیابی، حادثه پرتوی، آشکارسازی، تابش هسته‌ای

Conceptual Design of Intelligent Detection/Tracking System of Out-of-Control Radioactive Material in Crowded Radiation Incidents: Integration of Machine Vision Data and Multi-Detector System

A. M. Beigzadeh^{۱*}, H. Ardiny, M. Mehrabi

Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

(Received: 2024/05/20, Revised: 2024/07/01, Accepted: 2024/08/10, Published: 2024/08/22)

Abstract

Nuclear technology is advancing rapidly worldwide, but the presence of radioactive materials poses significant risks to society and the environment. These risks are exacerbated by threats such as terrorism, mishandling, and the illegal transportation of these substances. Consequently, there is an urgent need to enhance detection and tracking systems for radioactive materials to strengthen security and prevent potential terrorist acts. This study introduces a novel approach to radiation mapping and detection through the development of machine vision algorithms and multi-detection system modeling. The goal is to improve the efficiency and accuracy of identifying and locating uncontrolled radioactive sources in complex environments using contemporary machine vision techniques. The proposed tracking method is based on the KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) algorithm. The system captures and processes moving images in real time while tracking object movement paths and recording radiation data from the detector. By integrating spatial data with radiation data, the system can accurately differentiate uncontrolled radioactive sources from other moving objects. Incorporating these advanced algorithms into existing radiation detection systems has the potential to significantly mitigate the risks associated with radiation incidents.

Keywords: Radioactive sources, Image processing, Machine vision, Monte Carlo, Tracking, Radiation event, Detection, Nuclear radiation.

*Corresponding Author E-mail: beigzadeh_am@yahoo.com

۱. مقدمه

داده‌های جمع‌آوری شده توسط آشکارسازهای رادیواکتیو مخفی را می‌توان با سایر تجهیزات بازرسی مانند دوربین‌ها ترکیب کرد تا تشخیص امنیت هسته‌ای را در مرزها، مکان‌های تجاری و سایر مکان‌های شلوغ افزایش دهد و از قاچاق غیرقانونی مواد رادیواکتیو جلوگیری کند. هدف از این تحقیق توسعه الگوریتم‌های مستقلی است که بتواند به طور مداوم در محیط‌های پرخطر، از جمله سایت‌های هسته‌ای و حتی مناطق شهری مانند مرزها برای یافتن مواد خارج از کنترل نظارتی^۱ برای افزایش قابلیت پایش سامانه‌های مبتنی بر بینایی ماشین^۲ متشکل از دوربین‌های نظارتی و آشکارسازهای رادیواکتیو سودمند باشد. تصویر نشان داده شده در شکل (۱) یک نماگر^۳ از یک سیستم نظارت تصویری با ویژگی‌های ردیابی خودکار است که چندین شی و فرد را شناسایی و ردیابی می‌کند. این سامانه‌ها به طور کلی متشکل از یک دوربین نظارت شهری می‌باشند که با الگوریتم‌های پردازش تصویر و ردیابی اشیا مجهز شده‌اند. کادرهای با اعداد روی تصویر قرار گرفته‌اند که هر کدام یک شناسه ردیابی منحصر به فرد برای هر شی یا شخص را نشان می‌دهند.



شکل ۱. ردیابی کاراکترها در سناریوی پرتوی پر ازدحام [۱]

این تحقیق داده‌های آشکارسازهای رادیواکتیو را که معمولاً سامانه‌های آشکارسازی کم‌هزینه (مانند گایگر مولر و سوسون‌ها...) هستند و دوربین‌های تصویربرداری را برای استخراج اطلاعات دقیق‌تر و بهبود قابلیت‌های تشخیص تهدید هسته‌ای یکپارچه می‌کند. الگوریتم بینایی ماشین داده‌های حرکتی را پردازش می‌کند تا ویژگی‌های شیء (افراد/وسایل نقلیه/اقلام) را استخراج کند، همان اشیا را برچسب‌گذاری کند و سپس آن‌ها را محلی‌سازی و ردیابی

با رشد سریع فناوری هسته‌ای و گسترش جهانی آن، تهدیدات احتمالی ناشی از مواد پرتوزا ناشی از تروریسم، سهل‌انگاری در استفاده و جابه‌جایی آن‌ها و سایر سناریوهای مشابه می‌تواند خطرات جدی برای جوامع بشری ایجاد کند. در نتیجه، نیاز قابل توجهی به توسعه سامانه‌های تشخیص و ردیابی چشمه‌های پرتوزا برای افزایش امنیت و جلوگیری از فعالیت‌های تروریستی وجود دارد. در حالی که حرکت افراد، وسایل نقلیه و کالاها در سراسر مرزها برای انسان ضروری است، شناسایی و جلوگیری از قاچاق غیرمجاز مواد پرتوزا برای افزایش ایمنی و امنیت در جوامع ضروری است. از سوی دیگر، فرایند انتخاب ممکن است با محدودیت در سامانه‌های بازرسی فعال به دلیل ملاحظات ایمنی، به‌ویژه هنگام غربالگری عابران پیاده یا خطوط مسافر، مانع شود، در حالی که زمان‌بندی یک عامل حیاتی در مناطق کنترل‌شده مانند فرودگاه‌ها و گمرک است [۱]. در یک حادثه پرتوی، وظیفه یافتن چشمه رادیواکتیو می‌تواند کاری فوق‌العاده چالش‌برانگیز و پیچیده باشد. این دشواری زمانی تشدید می‌شود که شخصیت‌های متحرک وارد معادله می‌شوند و عنصر غیرقابل پیش‌بینی و خطا را به یک موقعیت پیچیده اضافه می‌کند. سناریویی که در آن یک چشمه رادیواکتیو در یک محیط پر ازدحام مملو از اشیا متحرک که در جهات مختلف در حال حرکت هستند پنهان شده است. وظیفه تعیین دقیق چشمه رادیواکتیو مشابه یافتن سوزن در انبار کاه است. حضور شخصیت‌های متحرک لایه‌ای از پویایی و هرج‌ومرج را ایجاد می‌کند که می‌تواند به راحتی هر فعالیتی برای ردیابی چشمه رادیواکتیو را مشکل کند. این کاراکترها ممکن است به طور نامنظم حرکت کنند، موقعیت خود را تغییر دهند و با محیط اطراف خود به صورت غیرقابل پیش‌بینی تعامل داشته باشند. در نتیجه، همگرایی یک سناریوی رادیواکتیو با حضور شخصیت‌های متحرک در یک محیط شلوغ، مانع بزرگی برای شناسایی موفقیت‌آمیز و مکان‌یابی چشمه رادیواکتیو است. پیچیدگی‌های ذاتی در چنین سناریویی اهمیت برنامه‌ریزی دقیق، استقرار استراتژیک سامانه‌ها و ارتباط مؤثر بین اعضای عناصر درگیر در فرایند آشکارسازی و کاهش پرتوگیری را برجسته می‌کند. به عنوان مثال، میانگین روزانه تعداد افراد در فرودگاه بین‌المللی هارتسفیلد - جکسون آتلانتا بیش از ۲۵۰۰۰۰ مسافر در روز است [۲]. مرز ایالات متحده و مکزیک با بیش از ۳۰۰ میلیون نفر، ۹۰ میلیون وسیله نقلیه و ۴ میلیون تردد کامیون در سال، فعال‌ترین مرز سیاره زمین است [۳].

¹ Material Out of Regulatory Control (MORC)

² Machin Vision

³ Screen Shot

کنترل بینایی ربائیک برای بهبود عملیات در یک راکتور هسته‌ای بهره می‌برد. در یک مطالعه جداگانه توسط بانداسترا^۳ و همکاران، مفهوم ادغام یک سیستم بینایی ماشین با یک سیستم آشکارسازی پرتوی گاما با مساحت بزرگ برای بهبود حساسیت و مقابله با تهدیدات با مکان‌یابی سریع آن‌ها در مکان‌های شلوغ مانند مترو، فرودگاه‌ها و برج‌ها توسعه داده شد. در این پروژه، محققان از یک آرایه به مساحت 1 m^2 متشکل از ۱۰۰ آشکارساز NaI (TI) برای به دست آوردن اولین تصاویر رمزگذاری شده استفاده کردند. علاوه بر این، از دو دوربین فیلم‌برداری استریو برای تولید یک نقشه سه‌بعدی از آشکارساز آرایه استفاده شد که منجر به تصویر نهایی برای تشخیص و ردیابی اشیا منفرد در میدان دید تصویر می‌شود [۱۷]. هوو و همکاران [۱۸] استراتژی به نام الگوریتم ACA^۴ را معرفی کردند که از یک شبکه عصبی کانولوشن^۵ برای تقریب موقعیت یک چشمه رادیواکتیو و یک الگوریتم A* برای ترسیم مسیر استفاده می‌کند. منطقه جستجو به عنوان یک نقشه شبکه اشغال به تصویر کشیده شده است و توزیع دوز تابش چشمه پرتوزا با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۶ به دست آمده است. هنگامی که کاوشگر به منطقه جستجو می‌رسد، مدل شبکه مکان چشمه را پیش‌بینی می‌کند و الگوریتم A* مسیر جستجو را ایجاد می‌کند. جستجو به صورت مکرر ادامه می‌یابد تا زمانی که چشمه‌ها پیدا شوند. توسعه یک بستر آزمایشی برای یک شبکه چند حسگر که قادر به شناسایی و مکان‌یابی چشمه‌های پرتوزا در محیط‌های شهری و همچنین روش‌های نوآورانه برای ردیابی بلادرنگ چشمه‌های پرتوی در کل شهر است، توسط کوپر و همکاران انجام شد [۱۹]. مطالعه توسط استوس و همکاران [۲۰] یک مدل بی‌زی^۷ را نشان می‌دهد که از داده‌های به دست آمده توسط شبکه‌ای از آشکارسازهای پرتو برای ردیابی حرکت یک چشمه پرتوزا استفاده می‌کند. مطالعات متعددی در زمینه تلفیق داده‌ها انجام شده است. یک مطالعه قابل توجه به بررسی ادغام داده‌ها بین تصویر گرفته شده توسط دوربین و شمارش ثبت شده در آشکارساز می‌پردازد [۲۱]. در این مطالعه، سیستم تصویربرداری خودروهای عبوری را شناسایی کرده و در صورت آلوده بودن آن‌ها به مواد پرتوزا، اطلاعات آن‌ها را ثبت می‌کند. مطالعه دیگری [۲۲] به بررسی تلفیق بین دوربین تصویربرداری و آشکارساز کامپتون^۸ نیز می‌پردازد. سیستم کامپتون برای شناسایی چشمه‌های پرتوزا ثابت استفاده می‌شود. با این حال،

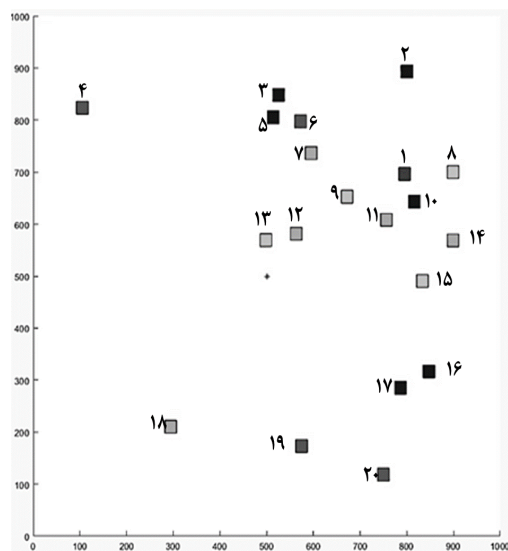
کند. از روش کاناد - لوکاس - توماسی^۱ برای ردیابی اشیا شناسایی شده و برجسب‌گذاری شده استفاده شد. روش KLT یک روش بینایی ماشین محبوب و قدرتمند است که می‌تواند به استخراج اطلاعات معنی‌دار از تصاویر و ردیابی اشیا بادقت بالا کمک کند. این یک الگوریتم ریاضی است که ویژگی‌های آماری یک تصویر را تجزیه و تحلیل می‌کند و مهم‌ترین ویژگی‌ها یا الگوهای موجود در آن را شناسایی می‌کند. روش KLT با تبدیل داده‌های تصویر به مجموعه جدیدی از مختصات کار می‌کند که مهم‌ترین ویژگی‌ها با بزرگ‌ترین مقادیر نشان داده می‌شوند. این تبدیل با محاسبه بردارهای ویژه و مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس تصویر به دست می‌آید [۵]. از روش ردیابی اشیا و محاسبه ضریب همبستگی بین موقعیت اشیا و داده‌های هسته‌ای برای یافتن یک هدف آلوده استفاده می‌کنند. این تحقیق در بستری به ابعاد یک اتاق مدل شده است. با مقرون به صرفه‌تر کردن آشکارساز و ماژول‌های انتقال داده، امکان گسترش پوشش به مناطق بزرگ‌تر مانند شهرها فراهم می‌شود. الگوریتم بینایی ماشین می‌تواند اشیا را بر اساس ویژگی‌های آن‌ها قابل ردیابی و تشخیص کند. سپس، با جفت شدن با داده‌های ثبت شده از طریق آشکارسازها، می‌توان هدف یا اهداف آلوده را در میان چندین شیء متحرک شناسایی کرد. در اموری مانند بازرسی، کنترل کیفیت و آزمایش‌های غیرمخرب، سامانه‌های بینایی ماشین یک جایگزین مقرون به صرفه برای نیروی انسانی هستند. تشخیص امضا و دست خط، تشخیص اشیا و الگو، بازرسی ارز و مواد، تجزیه و تحلیل تصویر پزشکی و امنیت و دفاع تنها چند کاربرد این سامانه‌ها هستند. تصمیمات اتخاذ شده توسط سامانه‌های بینایی ماشین به شدت تحت تأثیر کیفیت داده‌های به دست آمده است [۶ و ۷]. برای اجرای بینایی ماشین، الزامات پروژه باید به دقت برنامه‌ریزی شود و راه‌حل مناسب ارائه شود [۸-۱۲] در صنعت هسته‌ای، سامانه‌های بینایی ماشین برای بهبود کیفیت تصویر در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای و بازرسی راکتورها استفاده می‌شوند [۱۳]. آن‌ها می‌توانند خوردگی و ترک در خطوط لوله را تشخیص دهند و ایمنی کلی را افزایش دهند [۱۴]. سامانه‌های بینایی ماشین همچنین در شناسایی چشمه‌های پرتوزا با استفاده از انواع مختلف روبات‌ها مؤثر بوده‌اند [۱۵]. هانسون و همکاران [۱۶] از یک نمونه اولیه ربات مجهز به دوربین هوشمند ساخت شرکت آمریکایی کوگنس^۲ استفاده کردند. هدف محققان ارائه راه‌حلی بود که از

³ Bandstra⁴ Automatic SourCe Search StrAtegy (ACA)⁵ Convolutional Neural Network (CNN)⁶ Monte Carlo (MC)⁷ Bayesian⁸ Compton¹ Kanade-Lucas-Tomasi (KLT)² Cognex

ادامه خواهند داد. قید دیگر مرز تصویر با همان دیواره‌ها هستند. در مرز تصویر زمانی که اشیای متحرک به لبه تصویر رسیدند دوباره در حرکتی پیوسته مسیر خودشان را تغییر می‌دهند و در کادر قرار می‌گیرند. تمام الگوهای حرکتی در این الگوریتم از حرکت واقعی ربات‌های چرخ‌دار کوچک تیمیو در کنار یکدیگر الگوبرداری شده است که نمونه‌ای از آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویری از ربات‌های تیمیو در حال حرکت در کنار یکدیگر [۲۴].



شکل ۳. تصویری از یک فریم محیط مدل شده که ۲۰ شیء متحرک در آن در حال حرکت هستند.

۲-۲. شبیه‌سازی سناریوی پرتوی با کد مونت کارلو

۲-۲-۱. کد

برای مدل‌سازی سناریوی پرتوی از کد مونت کارلوی MCNPX استفاده شد [۲۳]. برای این منظور ۳۰۰۰ برنامه برای موقعیت‌های مختلفی که ربات‌ها به صورت با حرکت پیوسته برای ربات شماره ۱ نشان داده شده در شکل (۳) در میان دیگر اشیای متحرک نوشته شد.

با ترکیب تصاویر، شناسایی منابع متحرک از طریق روش جبران‌کننده حرکت دوربین امکان‌پذیر شده است. شناسایی و مکان‌یابی مواد پرتوزا در مناطق پویا مانند ایستگاه‌های مترو و فرودگاه‌ها به دلیل جابه‌جایی افراد و محموله‌ها می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. حرکت بالقوه این مواد، همراه با حضور افراد، خطر عدم شناسایی را افزایش می‌دهد.

۲. روش تحقیق

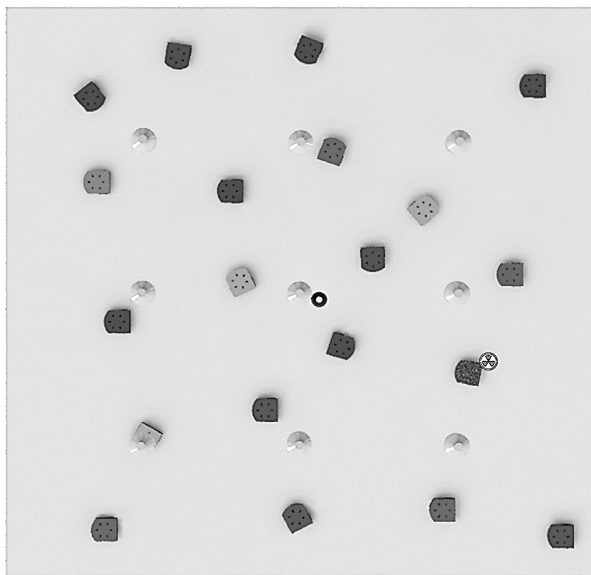
در این مقاله از دو ابزار نرم‌افزاری مختلف کد MCNPX برای تعریف سناریوی پرتوی و کد متلب^۱ برای شبیه‌سازی حرکتی اشیاء، پردازش تصویر، ردیابی و ثبت موقعیت مکانی استفاده شد. MCNPX یک کد ترابرد N ذره‌ای مونت کارلو است که به طور گسترده برای شبیه‌سازی ترابرد ذرات در هندسه‌ها و مواد پیچیده استفاده می‌شود [۲۳]. این کد از مدل‌ها و الگوریتم‌های فیزیک پیشرفته برای پیش‌بینی دقیق رفتار فوتون‌ها، نوترون‌ها و سایر ذرات در مواد و محیط‌های مختلف استفاده می‌کند. در مطالعه حاضر از MCNPX برای سناریوی پرتوی ایجاد شده در اثر جابه‌جاشدن چشمه‌های پرتوزا از موقعیت اصلی‌شان استفاده شد. از نرم‌افزار متلب نیز برای پردازش تصویر و حل معادلات ردیابی و تحلیل داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌های MCNPX و آنالیز داده‌ها و ردیابی و کشف چشمه‌های پرتوزا استفاده شد.

۲-۱. شبیه‌سازی محیط با اشیای متحرک با الهام از حرکت ربات تیمیو^۲

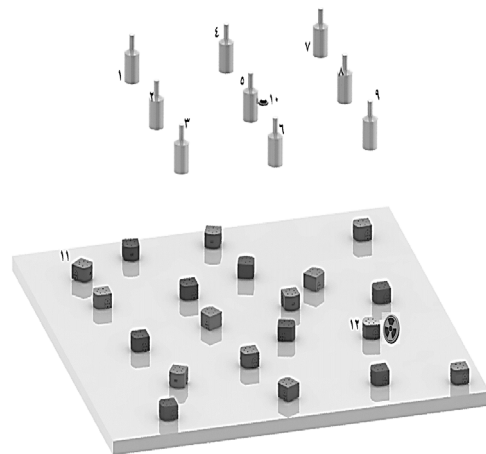
در این مرحله الگوریتم یک محیط پویا با حضور ۲۰ شیء هم‌شکل متحرک توسعه داده شد. این الگوریتم شبیه‌سازی مربع‌های متحرک با رنگ‌های مختلف را در قالب گرافیکی تولید می‌کند، یک فایل ویدیویی در یک مدت زمان مشخص از حرکت این کاراکترها در یک صفحه دو بعدی ایجاد شده و در نهایت ذخیره می‌شود. در این مرحله موقعیت و سرعت مربع‌ها مقداردهی اولیه می‌شود، موقعیت آن‌ها در طول زمان به روز می‌شود، با تعریف معادلات و قیدها در الگوریتم از برخورد مربع‌ها با یکدیگر جلوگیری به عمل می‌آید که این قیود حرکتی معادل رفتاری است که ربات‌های تیمیو در حین رسیدن به مانع و یکدیگر با کمک حسگرهای مادون قرمز که بر روی آن‌ها نصب است از خود نشان می‌دهند تا در مسیر حرکت هم‌دیگر ایجاد اختلال نکنند. به طور مثال اگر دو ربات که مسیر حرکت آن‌ها در خلاف جهت یکدیگر باشد حین حرکت در فضای آزمایش به یکدیگر برسند و دارای سرعت برابر باشند، پس از برخورد هر دو متوقف خواهند شد ولی با حضور حسگرهای تشخیص مانع هر دوی آن‌ها پس از رسیدن به یکدیگر تغییر جهت داده و به حرکت

^۱ MATRIX LAB

^۲ Thymio



ب



الف

شکل ۴. طرح سه بعدی از هندسه مدل سازی شده (الف) ۱ تا ۹ آشکارسازها، ۱۰ دوربین چشم ماهی، ۱۱-ربات، ۱۲-ربات دارای علامت رادیواکتیو- ربات شماره ۱ (حامل ماده رادیواکتیو) (ب) نمایی بالایی از هندسه مدل سازی شده

سوسوزن ۵ اینچی یدور سدیم و لامپ تقویت کننده نوری ۲ اینچی که به آن متصل شده است. در این مطالعه اندازه آشکارساز ۵ اینچ در نظر گرفته شد.

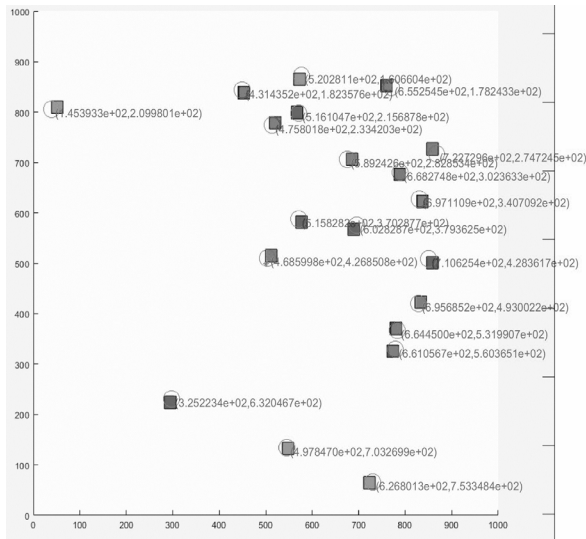


شکل ۴. تصویری از آشکارساز شبیه سازی شده [۲۵]

تصویری از گسیل ذرات در فضای مونت کارلو نشان داده شده است. شکل (۶) گسیل ذرات از چشمه سزیوم-۱۳۷ را نشان می دهد در این شکل محل چشمه و محل آشکارساز با بردار نشان داده شده است صفحه نشان دهنده اتاق به ابعاد $10 \times 10 \times 10 m^3$ است.

در این شبیه سازی از چشمه گاماای سزیوم-۱۳۷ که در صنعت و پزشکی بسیار پر کاربرد هستند، استفاده شد. سزیوم-۱۳۷ یک رادیوایزوتوپ مصنوعی با نیمه عمر تقریبی ۳۰ سال، کاربردهای مختلفی در صنعت، پزشکی و تحقیقات پیدا کرده است. پرتوهای گامای گسیل شده از سزیوم-۱۳۷ دارای انرژی ۶۶۷ کیلو الکترون ولت هستند که آن ها را برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله پرتونگاری صنعتی، تصویربرداری پزشکی و پرتودرمانی مناسب می کند. در زمینه پرتونگاری صنعتی، سزیوم-۱۳۷ در بازرسی جوش، خطوط لوله و اجزای سازه ای استفاده می شود. در مدل سازی سناریوی پرتوی در کد MCNPX از آشکارساز یدور سدیم آلیایده با تالیوم (TI) NaI استفاده شد. این کریستال در آشکارسازی پرتوهای گاما و ایکس بسیار کارآمد است. آلیایش با تالیوم به بهبود خواص سوسوزنی کریستال کمک می کند و باعث می شود در هنگام اندرکنش با پرتوهای یون ساز، نور در ناحیه مرئی گسیل کند. این آشکارسازها می توانند در زمینه های مختلفی مانند پزشکی هسته ای، نظارت بر محیط زیست و کاربردهای امنیتی استفاده شوند. هنگامی که یک پرتوگاما یا ایکس وارد کریستال می شود، با اتم های سدیم و ید اندرکنش می کند و باعث گسیل نور سوسوزن می شود. سپس این نور توسط یک لوله تقویت کننده نوری یا نوع دیگری از حس گر نور به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود. شدت سیگنال الکتریکی با انرژی تابش فرودی تناسب دارد و امکان تعیین مشخصات چشمه را فراهم می کند. در شکل (۵) تصویری از آشکارسازی که در مدل از آن استفاده شده است نشان داده شده است. این آشکارساز متشکل از دو بخش است:

کارآمد مقادیر زیاد داده است. سودمندی این ابزار در توانایی آن در تجزیه و تحلیل تصاویر و ویدئوهای پیچیده است، مانند مواردی که در تصویربرداری پزشکی یا برنامه‌های نظارتی استفاده می‌شود [۶ و ۲۷].

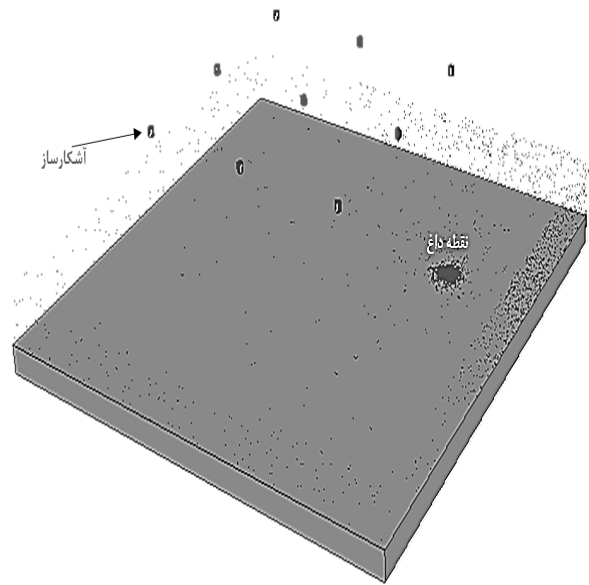


شکل ۶. ردیابی اشیاء و تعیین نقشه حرکتی آن‌ها

معادله KLT بر اساس این فرض است که تغییرات روشنایی بین دو فریم متوالی تقریباً در یک همسایگی کوچک از پیکسل‌ها ثابت است. این فرض امکان تخمین سرعت اجسام در یک دنباله تصویر را فراهم می‌کند. معادله از بسط سری تیلور گرفته شده و به صورت زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$\sum (\nabla I(x,y) \nabla I(x,y)T) V = -\sum (\nabla I(x,y) * \nabla t(x,y)) \quad (1)$$

که $\nabla I(x,y)$ گرادیان شدت تصویر را در پیکسل (x,y) نشان می‌دهد، $\nabla t(x,y)$ گرادیان مشتق زمانی شدت تصویر است و V بردار سرعتی است که قرار است تخمین زده شود. معادله لوکاس - کانااد اساساً بردار سرعت V را با به حداقل رساندن خطا بین تغییر شدت تصویر مشاهده شده $(\nabla I(x,y))$ و تغییر شدت تصویر پیش‌بینی شده $\nabla t(x,y)$ حل می‌کند. با حل این معادله برای هر پیکسل یا مجموعه‌ای از پیکسل‌های انتخاب شده در یک دنباله تصویر، می‌توان جریان نوری را تخمین زد که اطلاعات ارزشمندی در مورد حرکت و الگوهای حرکت اجسام درون دنباله ارائه می‌دهد. معادله لوکاس - کانااد کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف، از جمله ردیابی اشیاء، تثبیت‌کننده ویدئو و تحلیل حرکت پیدا کرده است. سادگی و کارایی آن، آن را به گزینه‌ای محبوب برای کارهای تخمین جریان نوری تبدیل کرده است.



شکل ۵. تصویری از گسیل ذرات در فضای شبیه‌سازی شده اتاق به ابعاد $10 \times 10 \times 10 m^3$

۲-۲-۲. الگوریتم ردیابی اشیای هم‌شکل

روش KLT بر این اصل استوار است که مهم‌ترین اطلاعات در یک تصویر را می‌توان با مجموعه کوچک‌تری از ویژگی‌ها یا الگوها نشان داد که آن‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های ریاضی استخراج کرد [۲۶]. این روش به ویژه برای ردیابی اشیاء در فیلم‌های ویدئویی مفید است، زیرا می‌تواند حرکت و تغییرات موقعیت یک شی را در طول زمان شناسایی کند. پیش‌پردازش داده‌های تصویر برای حذف نویز و افزایش کنتراست، محاسبه ماتریس کوواریانس و محاسبه بردارهای ویژه و مقادیر ویژه ماتریس برخی از مراحل در روش KLT هستند. سپس از این مقادیر برای تبدیل داده‌های تصویر به مجموعه جدیدی از مختصات استفاده می‌شود که مهم‌ترین ویژگی‌ها با بزرگ‌ترین مقادیر نشان داده می‌شوند.

شکل (۷) عملکرد الگوریتم مبتنی بر روش KLT در ردیابی اشیاء و تعیین نقشه حرکتی آن‌ها را نشان می‌دهد. برای این منظور فایل ویدیویی تولید شده به عنوان ورودی به این الگوریتم داده می‌شود. در ابتدا الگوریتم فریم اول این فایل ویدیویی را دریافت و مکان هر یک از مربع‌ها که معادل با یک ربات تیمی هستند را تشخیص می‌دهد و یک دایره بر روی هر کدام از آن‌ها قرار می‌دهد. الگوریتم موقعیت مکانی دوبعدی اولیه نیز بر روی هر یک از کاراکترها را نشان می‌دهد. با حرکت کاراکترها، دایره محاط بر روی هر کدام از آن‌ها نیز بر همراه با آن‌ها جابجا می‌گردد و موقعیت‌های جدیدی که کاراکترها در آن به مسیر خود ادامه داده‌اند ثبت و ذخیره می‌گردد تا در نهایت مسیر و نقشه حرکتی تمامی آن‌ها به دست آید. یکی دیگر از مزایای روش KLT توانایی آن در مدیریت

ویدئویی مرحله اول و ثبت داده‌های مکانی ردیابی شده نسبت به هر آشکارساز؛ مقایسه موقعیت‌های مکانی اصلی و موقعیت‌های مکانی ردیابی شده با الگوریتم مبتنی بر روش KLT؛ بهره‌گیری از موقعیت مکانی کاراکتر شماره ۱ در طراحی سناریوی پرتوی با کد مونت کارلو؛ که موقعیت‌های مکانی این ربات حامل ماده پرتوزا به عنوان ورودی به کد مونت کارلو داده شده است؛ استخراج خروجی کد مونت کارلو به صورت شمارش ثبت شده در آشکارساز به ازای هر موقعیت؛ و در نهایت بهره‌گیری از روش ریاضی مبتنی بر تلفیق داده‌های شمارش و داده‌های موقعیت مکانی برای مکان‌یابی چشمه‌های پرتوزای متحرک در میان سایر اجسام را نشان می‌دهد. الگوریتم با یک فایل ویدئویی تولید شده به عنوان ورودی تغذیه می‌شود. در ابتدا، الگوریتم فریم اول ویدئو را پردازش می‌کند و موقعیت مربع‌های مجزا را که نشان‌دهنده روبات‌های تیمیو هستند شناسایی می‌کند و دایره‌هایی را در اطراف آن‌ها قرار می‌دهد. علاوه بر این، الگوریتم مکان‌های دو بعدی اولیه را برای هر کاراکتر ایجاد می‌کند. متعاقباً، با حرکت کاراکترها، دایره‌هایی که آن‌ها را ردیابی می‌کنند، بر روی آن‌ها قفل شده و حرکت می‌کنند و مختصات به‌روز شده آن‌ها را ضبط و ذخیره می‌کنند تا یک مسیر جامع و نقشه حرکت برای همه کاراکترهای متحرک دخیل در سناریو ایجاد کنند.

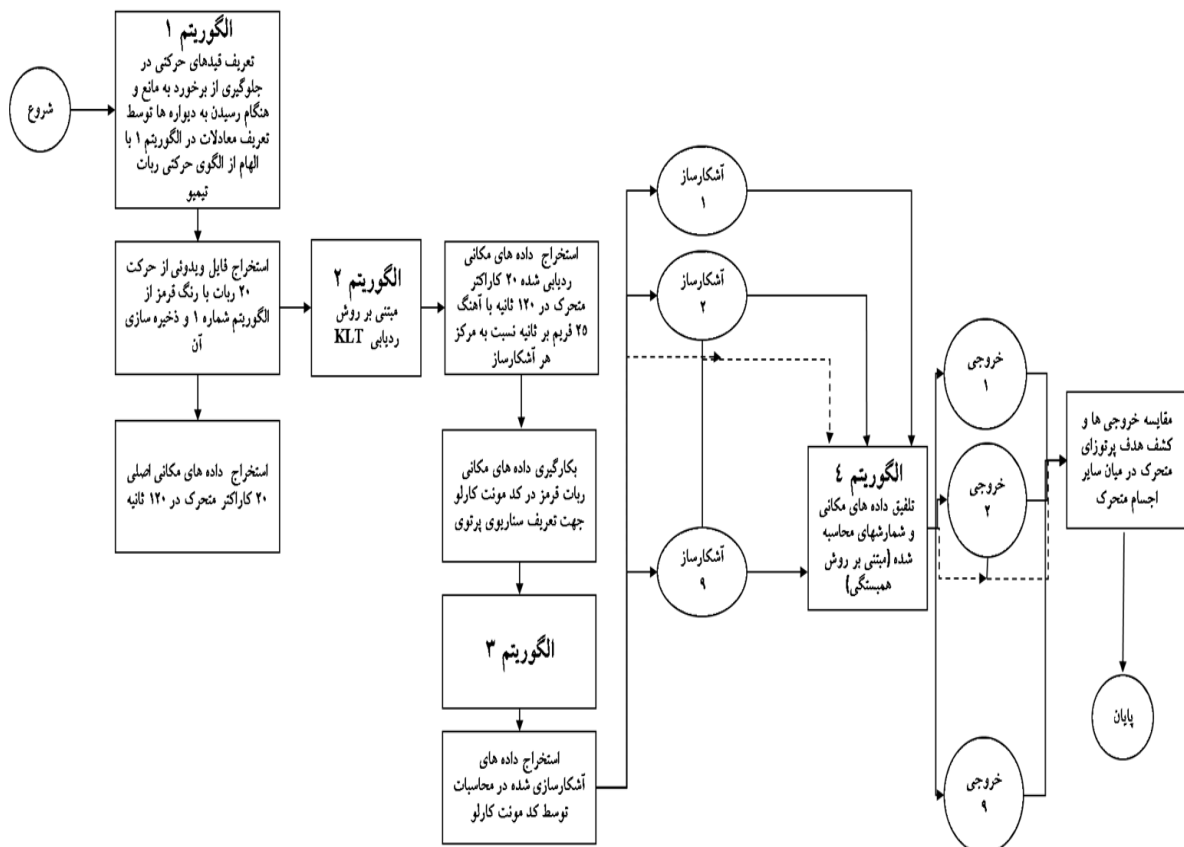
۲-۳. الگوریتم مبتنی بر معادلات همبستگی

اثر بخشی آشکارسازی و کشف با روش آنالیز مبتنی بر همبستگی بین مسیرهای اشیا و شمارش گامای ثبت شده در آشکارساز تعیین می‌شود. ضریب همبستگی که از ۱- تا ۱ متغیر است، میزان همبستگی بین دو متغیر را نشان می‌دهد. مقدار صفر نشان‌دهنده عدم ارتباط بین متغیرها است، در حالی که ۱- یا ۱ یک همبستگی کامل و حالت ایدئال را نشان می‌دهد.

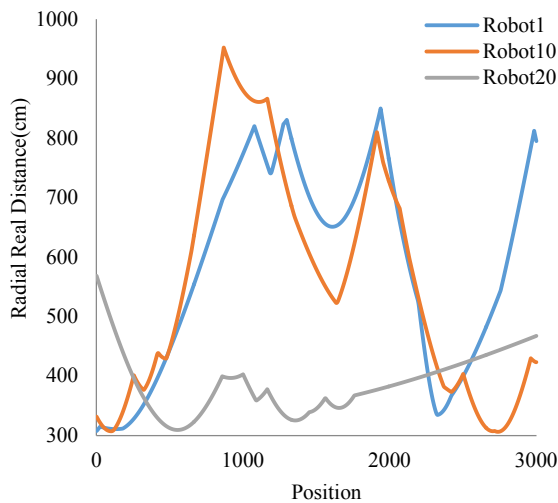
$$\text{correlation}(X,Y) = \frac{\text{covariance}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (2)$$

که σ انحراف استاندارد داده‌ها است. انتظار می‌رود که با افزایش فاصله بین آشکارساز و جسم آلوده به ماده رادیواکتیو متحرک، شمارش کاهش یابد و در نتیجه ضریب همبستگی نزدیک به ۱- باشد. برای به‌دست‌آوردن ضرایب همبستگی برای هر شی، الگوریتم ضریب در ثانیه را تا ۱۲۰ S محاسبه می‌کند.

در شکل (۸) فلوجارت گام‌های مربوط به تشکیل فایل ویدئویی حرکت ۲۰ ربات هم‌شکل با الگوبرداری از معادلات حرکت ربات‌های تیمیو در یک محیط و ثبت داده‌های مکانی اصلی آن‌ها؛ ردیابی مکان کاراکترها توسط الگوریتم ثانویه از روی محتوای



شکل ۷. فلوجارت تشکیل مدل حرکت ربات‌ها تا کشف و مکان‌یابی چشمه پرتوزا متحرک



شکل ۱۱. فاصله شعاعی کاراکترها از محور مرکزی آشکارساز شماره ۹

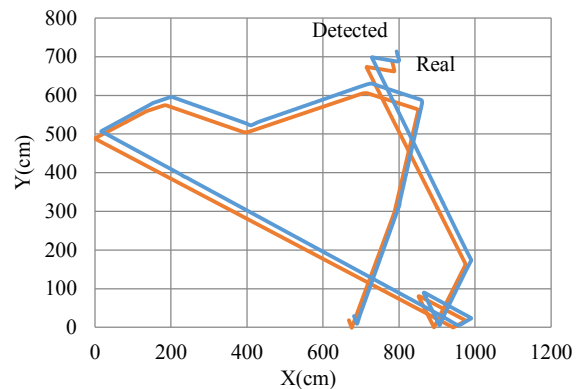
برای محاسبه این تغییرات شعاعی برای ربات‌های مختلف از موقعیت مکانی ردیابی شده آن‌ها توسط الگوریتم استفاده می‌گردد. بدیهی است که این مقادیر متفاوت باشند به این سبب که ربات‌ها در صفحه دارای حرکت تصادفی هستند. در نهایت فاصله مستقیم اشیا از آشکارسازها از رابطه ۳ محاسبه می‌شود که در آن $Distance_{Robot_n, Detector_k}$ فاصله مستقیم هر ربات تا آشکارساز n ، x_{Robot_n} و y_{Robot_n} موقعیت هر ربات n در صفحه دو بعدی و $z_{Detector_k}$ که همواره مقدار ثابت، فاصله آشکارساز تا سطح صفحه حرکت است. نتایج مربوط به کشف شیء آلوده در میان اهداف متحرک مشابه با استفاده از رابطه همبستگی داده‌های مکانی و شمارش پرتوی در آشکارسازها در نمودارهای شکل (۱۲) نشان داده شده است.

در شکل (۱۲) روند تغییرات ضریب همبستگی برای ۲۰ کاراکتر نشان داده شده است. از نمودارهای نشان داده شده در ۱۲ می‌توان استنباط نمود که شیء آلوده کاراکتر شماره ۱ می‌باشد و نتایج مربوط به هر آشکارساز در جدول (۱) لیست شده است. در جدول (۱) شماره آشکارساز، شماره تشخیص داده شده، شماره شی و صحت تشخیص آورده شده است. از میان ۹ بار همبستگی ایجاد شده برای ۹ آشکارساز برای ۲۰ ربات، نتیجه همبستگی نشان می‌دهد که ربات شماره یک، ۵ بار به عنوان شی آلوده توسط ۵ آشکارساز تشخیص داده شده است و سایر همبستگی برای ۴ آشکارساز دیگر ربات‌هایی با شماره‌های دیگر را تشخیص داده است. یعنی نتیجه می‌شود که در سناریوهای پرتوی پر ازدحام بهره‌گیری از سامانه‌های چند آشکارسازی و روش همبستگی میان داده‌های مکانی و شمارش می‌تواند با احتمال بالاتری شی آلوده به ماده پرتوزا را تشخیص داد.

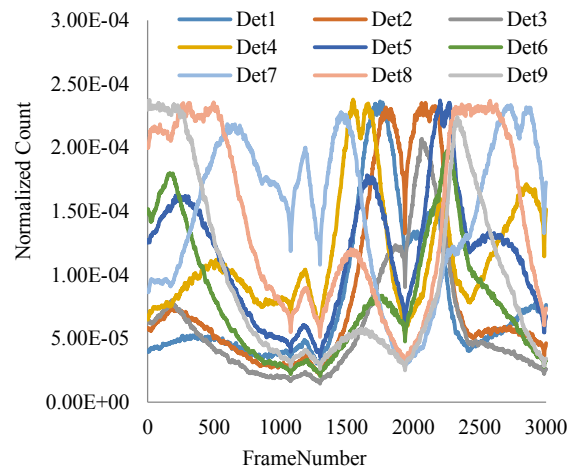
$$Distance_{Robot_n, Detector_k} = \sqrt{(x_{Robot_n} - x_{Detector_k})^2 + (y_{Robot_n} - y_{Detector_k})^2} + z_{Detector_k}^2 \quad (3)$$

۳. نتایج و بحث

پس از حرکت کاراکترها در مسیر دوبعدی به صورت کاملاً تصادفی، موقعیت دوبعدی آن‌ها پس از دو دقیقه ثبت گردید. نمودارهای مربوط به مسیر حرکت ربات (ربات شماره ۱) در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج مربوط به الگوریتم ردیابی نشان داد که این روش توانسته است با دقت حدود ۵ درصد هدف را ردیابی کند. در شکل (۱۰) تغییرات آهنگ شمارش ثبت شده در آشکارساز بر حسب زمان نشان داده شده است.

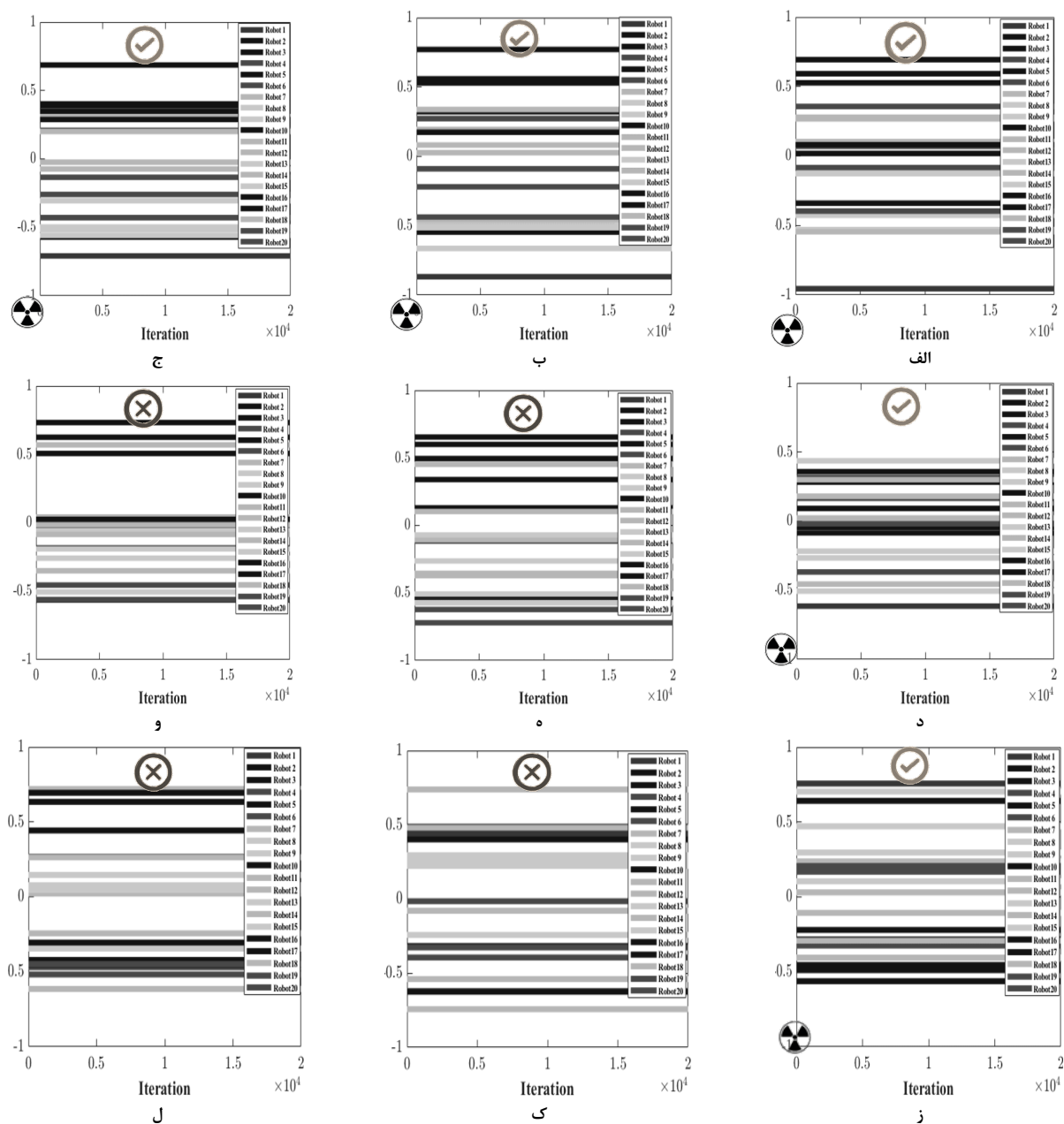


شکل ۹. مسیر واقعی ایجاد شده برای ربات‌ها با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی حرکت تیمیو نمودار کم رنگ مسیر واقعی حرکت ربات ۱ نمودار پر رنگ مسیری که روش ردیابی تخمین زده است.



شکل ۱۰. تغییرات شمارش ثبت شده در واحد زمان در آشکارساز، روندی که در آشکارسازها ثبت شده‌اند.

در شکل (۱۱) فاصله سه ربات شماره ۱، ۱۰ و ۲۰ از محور عمودی یکی از آشکارسازها (آشکارساز شماره ۱) در صفحه دو بعدی بر حسب زمان نشان داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهد که کاراکترها در چه زمانی در کمترین و در چه زمانی در بیشترین فاصله از آشکارساز ۱ قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۲. روند تغییرات ضریب همبستگی برای ۲۰ کاراکتر (الف تا ل برای آشکارسازهای شماره ۱ تا ۹)، علاقت صحیح نشان‌دهنده تشخیص درست (ربات شماره ۱) و علامت ضربدر نشان‌دهنده تشخیص نادرست

۵. نتیجه‌گیری

تشخیص و پایش آلودگی رادیولوژیکی یک جنبه حیاتی برای تضمین امنیت عمومی و حفاظت از محیط‌زیست و افراد است. این مطالعه یک رویکرد تئوری محور جدید برای شناسایی آلودگی پرتوی در میان اجسام متحرک با شکل‌های یکسان، رنگ‌های مختلف و تعداد زیاد با استفاده از همجوشی داده‌ها و روش‌های بینایی ماشین پیشنهاد می‌کند. الگوریتم پیشنهادی دقت بالایی را در تشخیص هدف آلوده در یک بستر آزمایشی نشان داد و راه‌حلی امیدوارکننده برای بهبود نظارت پرتوی و اقدامات واکنش اضطراری ارائه کرد. در کار قبلی انجام شده یک سناریوی پرتوی

جدول ۱. تشخیص کاراکتر آلوده به ماده پرتوزا از دید هر آشکارساز

شماره آشکارساز	شماره تشخیص‌داده‌شده	صحت تشخیص
۱	ربات ۱	صحیح
۲	ربات ۱	صحیح
۳	ربات ۱	صحیح
۴	ربات ۱	صحیح
۵	ربات ۱۹	نادرست
۶	ربات ۳	نادرست
۷	ربات ۱	صحیح
۸	ربات ۱۴	نادرست
۹	ربات ۱۱	نادرست

۶. مراجع‌ها

1. Al Hamrashdi, H.; Monk, S. D.; Cheneler, D. "Passive Gamma-Ray and Neutron Imaging Systems for National Security and Nuclear Non-Proliferation in Controlled and Uncontrolled Detection Areas: Rev. Past Current Status"; *Sensors* 2019, 19, 11. doi:10.3390/s19112638.
 2. Fernandez, C. "These are the Top 10 Busiest Airports in the World- 5 of them are in the U.S."; CNBC, Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.cnn.com/2023/04/10/world-busiest-airports-airports-council-international-ranking.html>. doi: 10.1016/j.jup.2018.09.002
 3. Andreas, P. "A Tale of Two Borders: The US-Canada and US-Mexico Lines After 9--11"; *The Rebordering of North America*, Routledge, 2014, 1-23.
 4. "Why choose Ultralytics YOLO for object tracking." Accessed: [Date Accessed]. [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/modes/track/#why-choose-ultralytics-yolo-for-object-tracking>.
 5. Shi, J.; Tomasi, G. "Good Features to Track"; *IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, 1994, 593-600. doi: 10.1109/CVPR.1994.323794.
 6. Davies, E. R. *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*; Academic Press, 2012.
 7. Steger, C.; Ulrich, M.; Wiedemann, C. *Machine vision algorithms and applications*; John Wiley & Sons, 2018.
 8. Huang, C.-Y.; Hong, J.-H.; Huang, E. "Developing a Machine Vision Inspection System for Electronics Failure Analysis"; *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.* 2019, 9, 1912-1925. doi: 10.1109/TCPMT.2019.2924482.
 9. Joshi, K.; Chauhan, V.; Surgenor, B. "Real-time Recognition and Counting of Indian Currency Coins Using Machine Vision: A Preliminary Analysis"; *The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress* 2016, 26-29. doi: 10.13140/RG.2.1.3726.7444.
 10. Dubey, A. K.; Kumar, A.; Kumar, S. R.; Gayathri, N.; Das, P. "AI and IoT-based Intelligent Automation in Robotics"; John Wiley & Sons, 2021.
 11. Shen, Y.; Zhu, W. "Medical image processing using a machine vision-based approach"; *Int. J. Signal Process. Image Process. Pattern Recognit.* 2013, 6, 139-146.
 12. Jain, R.; Kasturi, R.; Schunck, B. G. "Machine Vision"; Vol. 5; McGraw-Hill, New York, 1995.
 13. Luk, B. L.; Collie, A. A.; Cooke, D. S.; Chen, S. "Walking and Climbing Service Robots for Safety Inspection of Nuclear Reactor Pressure Vessels"; *Meas. Control* 2006, 39, 43-47. [https://doi: 10.1177/002029400603900201](https://doi.org/10.1177/002029400603900201).
 14. Schmutz, S. J.; Rice, L.; Nguyen, N. R.; Lindberg, J.; Grizzi, R.; Joffe, C.; Shin, M. C. "Detection of Cracks in Nuclear Power Plant Using Spatial-Temporal Grouping of Local Patches"; *IEEE Winter conference on Application of Computer Vision*, 2016, 1-7. doi: 10.1109/WACV.2016.7477601.
 15. Ardiny, H.; Beigzadeh, A.; Mahani, H. "MCNPX Simulation and Experimental Validation of an Unmanned Aerial Radiological System (UARS) for Rapid Qualitative Identification of Weak Hotspots"; *J. Environ. Radioact.* 2023, 258, 107105. doi: 10.1016/j.jenvrad.2022.107105.
- متشکل از ۱۰ کاراکتر متحرک در نظر گرفته شد. در این سناریو یکی از کاراکترها به‌عنوان جسم آلوده به ماده پرتوزا در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری میزان تابش گسیل شده در محیط توسط جسم آلوده تنها از یک آشکارساز استفاده گردید و در نهایت با استفاده از همجوشی داده‌های مختصات مکانی هر یک از آنها و نیز شمارش ثبت شده در تک آشکارساز، ضریب همبستگی محاسبه گردید و جسم آلوده متحرک در میان سایر اجسام متحرک شناسایی گردید. تشخیص ماده رادیواکتیو با به‌کارگیری روش همبستگی زمانی که تعداد کاراکترها بیشتر می‌گردد و با استفاده از یک آشکارساز پیچیده می‌شود؛ لذا در این مطالعه سامانه‌ای متشکل از ۹ آشکارساز پیشنهاد می‌گردد که احتمال کشف ماده رادیواکتیو متحرک در سناریوهای پیچیده‌تر و شلوغ‌تر افزایش می‌یابد [۲۸]. تعداد بیست کاراکتر مشابه که الگوی حرکتی آن‌ها از ربات‌های کوچک تیمیو الهام‌گرفته شده بود توسط الگوریتم توسعه داده شده با نرم‌افزار متلب مدل‌سازی شدند. در ادامه برای ایجاد سناریوی پرتوی از کد مونت کارلوی MCNPX استفاده شد؛ و بر روی یک کاراکتر شبه ربات، چشمه پرتوزا گامازای سزیوم-۱۳۷ قرار داده شد تا اثر حرکت شیء رادیواکتیو در میان سایر اشیای متحرک بررسی شود. کاراکترهای مشابه به طور تصادفی در یک اتاق مدل‌سازی شده به ابعاد 100 m^2 حرکت می‌کردند. کل زمان حرکت تصادفی این کاراکترها ۱۲۰ s در نظر گرفته شد. با استفاده از الگوریتم ردیابی اشیای متحرک مسیر حرکت آن‌ها شناسایی و با مقدار اصلی مقایسه گردید که با دقت حدود ۵ درصد تطابق داشتند. در گام نهایی با استفاده از الگوریتم مبتنی بر معادله ریاضی همبستگی داده‌های مکانی و شمارش اشیای متحرک آلوده در میان اجسام متحرک شناسایی گردید. الگوریتم‌های نوشته شده در این مطالعه قابلیت خود را در طراحی و مدل‌سازی سناریوهای پرتوی مختلف و نیز کشف و مکان‌یابی چشمه‌های مفقود متحرک در میان اشیای دیگر را نشان داد. نتایج مؤید تطبیق‌پذیری و پتانسیل الگوریتم‌های توسعه داده شده در این مطالعه بود که می‌توان آن‌ها را قبل از اقدام عملی و آزمایش‌های تجربی به منظور تعریف سناریوهای پرتوی، از طریق نظارت از دور بدون ورود مستقیم مورد استفاده داد. سامانه‌هایی که با تلفیق دوربین‌های نظارتی و سامانه‌های آشکارسازی پرتوی با انواع آشکارسازها، می‌توانند بر پایش پرتوی مؤثر باشند و منجر به ایمنی عمومی و حفاظت از محیط‌زیست شوند می‌توانند از این الگوریتم‌ها در طراحی و مدل‌سازی‌های اولیه به کار ببرند. تحقیقات آینده می‌تواند تلفیق این الگوریتم‌ها و مدل‌ها را با سایر فناوری‌ها مانند هوش مصنوعی برای بهبود دقت و حتی قابلیت‌های تشخیص پیشرفته‌تر و ارائه روش‌های دیگر بررسی کند [۲۹-۳۲].

24. Vitanza, A.; Rossetti, P.; Mondada, F.; Trianni, V. "Robot Swarms as an Educational Tool: The Thymio's Way"; *Int. J. Adv. Robotic Syst.* 2019, 16, 1729881418825186. doi: 10.1177/172988141882518
25. "Diameter 5 inch x 5 inch NAITL Scintillation Detector Energy Resolution $\approx 8.0662\text{keV}$." Accessed: [Date Accessed]. [Online]. Available: <https://www.ost-photonics.com/product/diameter-5-inch-x-5-inch-naitl-scintillation-detector-energy-resolution-%E2%89%A48-0662keV/>.
26. Tomasi, C.; Kanade, T. "Detection and Tracking of Point Features"; *Int. J. Comput. Vis.* 1991, 9, 137–154.
27. Lucas, B. D.; Kanade, T. "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision"; *IJCAI'81.* 1981, 674–679. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-03697340>.
28. Beigzadeh, A. M.; Ardini, Hadi. "Tracking and Detection of Moving Radioactive Sources: A Modeling Approach Based on Machine Vision Algorithms, Image Processing and Scintillation Detection Systems"; *Quarterly J. Optoelectronic (in Persian)*. doi: 10.30473/jphys.2024.70551.1184.
29. Zahiri, M.; Shirini, K.; Samadi Qaraveren, S. "Network Traffic Analysis with Machine Learning for Faster Detection of Distributed Service Interruption Attack"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 1403, 14, 273-282 (in Persian). dor: 20.1001.1.26762935.1402.14.4.6.2
30. Asadi Ghanbari A. R., Sadati Nejad, S. A. "Modeling the Optimal Routing of Autonomous Micro-Birds Using Fuzzy Inference Systems and Evolutionary Algorithms"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 1403, 14, 153-163. (in Persian). dor: 20.1001.1.26762935.1402.14.3.2.6
31. Amirzadeh, M.; Hosseini Moradi, S. A.; Ghobadi, N. "Real-Time Detection of Steerable Birds from the Distance of Multi-Rotor Wings Using Optimized Yolov5 Algorithm"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 1402, 14, 11-22. (in Persian). dor: 20.1001.1.26762935.1402.14.1.2.2
32. Farajollahi, A.; Rostami, M.; Parvin, H.; Nazarpour, B.; Lak, M. "Face Detection and Identification in Drones with Deep Learning"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 1401, 13, 155-167. (in Persian). dor: 20.1001.1.26762935.1401.13.3.2.9
16. Marturi, N.; Rastegarpanah, A.; Takahashi, C.; Adjigble, M.; Stolkin, R.; Zurek, S.; Kopicki, M.; Talha, M.; Kuo, J. A.; Bekiroglu, Y. "Towards Advanced Robotic Manipulation for Nuclear Decommissioning: A Pilot Study on Teleoperation and Autonomy"; *Int. Conf. Robotic and Automation for Humanitarian Applications* 2016, 1–8. doi: 10.1109/RAHA.2016.7931866.
17. Benson, A.R.; Bandstra, M.S.; Chivers, D.H.; Aucott, T.; Augarten, B.; Bates, C.; Midvidy, A.; Pavlovsky, R.; Siegrist, J.; Vetter, K.; Yee, B. "The Gamma-Ray Imaging Framework"; *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2013, 60, 528–532. doi: 10.1109/TNS.2013.2245342.
18. Huo, J.; Hu, X.; Wang, J.; Hu, L. "ACA: Automatic Search Strategy for Radioactive Source"; *Nucl. Eng. Technol.* 2023, 55, 3030–3038. doi: 10.1016/j.net.2023.05.017.
19. Cooper, R. J.; Abgrall, N.; Aversano, G.; Bandstra, M. S.; Hellfeld, D.; Joshi, T. H.; Negut, V.; Quiter, B. J.; Rofors, E.; Salathe, M.; Vetter, K. "Networked Sensing for Radiation Detection, Localization, and Tracking"; *arXiv Prepr. arXiv2307.13811*, 2023. doi: 1088/1742-6596/2586/1/012125
20. Osthus, D.; Mendoza, P.; Lalor, P.; Casleton, E.; Archer, D.; Ghawaly, J.; Garishvili, I.; Rowe, A. J.; Stewart, I. R.; Willis, M. "Tracking the Location of a Road-Constrained Radioactive Source with a Network of Detectors"; *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 2022, 1039, 166992. doi: 10.1016/j.nima.2022.166992.
21. Cazalas, E. "Defending Cities Against Nuclear Terrorism: Analysis of a Radiation Detector Network for Ground-Based Traffic"; *Homel. Secur. Aff.* 2018, 14.
22. Stadnikia, K.; Henderson, K.; Koppal, S.; Enqvist, A. "Data Fusion for a Vision-Aided Radiological Detection System: Correlation Methods for Single Source Tracking"; *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* 2020, 954, 1–8. doi: 10.1016/j.nima.2019.02.040.
23. Waters, L. S.; McKinney, G. W.; Durkee, J. W.; Fensin, M. L.; Hendricks, J. S.; James, M. R.; Johns, R. C.; Pelowitz, D. B. "The MCNPX Monte Carlo Radiation Transport Code"; *AIP Conference Proceedings*, 2007, 81–90. doi: 10.1063/1.2720459.