

نقشه‌برداری مسیر و کشف چشمه‌های رادیواکتیو متحرک خارج از کنترل با توسعه الگوریتم‌های مبتنی بر بینایی ماشین و مدل مونت کارلو

امیر محمد بیگزاده^{۱*}، هادی اردینی^۲

^۱استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

abeigzadeh@aeoi.org.ir

^۲استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

hardini@aeoi.org.ir

(دریافت: بهمن ۱۴۰۲، تصویب: مهر ۱۴۰۴)

چکیده

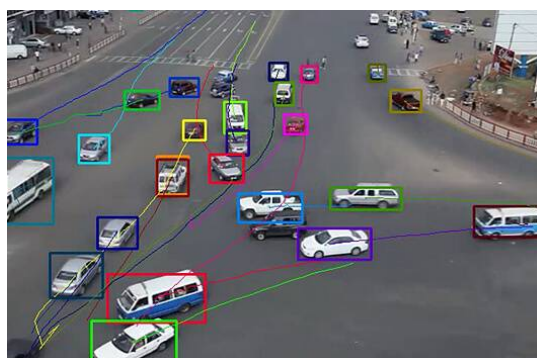
با پیشرفت سریع فناوری هسته‌ای و گسترش آن در سطح جهانی، تهدیداتی ناشی از مواد رادیواکتیو به‌ویژه در زمینه تروریسم و سهل‌انگاری در جابه‌جایی آنها ظهور کرده است که می‌تواند مخاطرات جدی برای انسان‌ها و محیط‌زیست ایجاد کند؛ لذا، توسعه سامانه‌های کارآمد برای شناسایی و ردیابی منابع رادیواکتیو به‌عنوان یک نیاز ضروری احساس می‌شود. مقاله حاضر، رویکردی نوین برای شناسایی نقشه‌برداری مواد پرتوزا را با استفاده از الگوریتم‌های بینایی ماشین ارائه می‌دهد. هدف اصلی این تحقیق، افزایش دقت و کارایی شناسایی چشمه‌های رادیواکتیو در محیط‌های پیچیده و متغیر است. در مرحله ابتدایی، الگوریتمی بر اساس حرکت ربات‌های چرخ‌دار طراحی شد که شامل ملاحظات چگونگی حرکت تصادفی، حسگر عدم برخورد و تغییر جهت در نزدیکی ربات‌های دیگر بود. سپس، در یک صفحه دوبعدی، ده ربات با ویژگی‌های مشخص مدل‌سازی شد و حرکات آنها بر اساس ضبط حرکت در ۱۲۰ ثانیه با ۲۵ فریم بر ثانیه ثبت گردید. در گام بعدی، الگوریتم مبتنی بر روش بینایی ماشین با استفاده از معادلات ردیابی KLT، مسیر حرکت ربات‌ها را شناسایی کرد. همچنین، سناریوی پرتویی با معرفی یک چشمه رادیواکتیو بر روی یکی از ربات‌ها طراحی و ۳۰۰۰ کد مونت کارلو برای شبیه‌سازی آن به‌کاررفته است. در نهایت، با استفاده از الگوریتم‌های همبستگی، امکان شناسایی ربات آلوده به ماده رادیواکتیو در میان سایر ربات‌ها بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی قابلیت بالایی در مکان‌یابی منابع رادیواکتیو دارند و می‌توان از این الگوریتم‌ها برای مدل‌سازی سناریوهای مختلف در محیط‌های شبیه‌سازی استفاده کرد. این امر به کاهش پرتوگیری غیرضروری افراد کمک می‌کند و توانمندی‌های دستگاه‌های تشخیص تشعشع را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: نقشه‌برداری پرتوی، ردیابی چشمه رادیواکتیو، بینایی ماشین، تروریسم هسته‌ای، سناریوی پرتوی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

با رشد سریع فناوری هسته‌ای و گسترش جهانی آن، تهدیدات احتمالی ناشی از مواد رادیواکتیو 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 رادیواکتیو 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 رادیواکتیو 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 گمرکات است [۱]. 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 گذرگاه کامیون در سال، فعال‌ترین دروازه سیاره زمین است [۳]. داده‌های جمع‌آوری شده توسط آشکارسازهای رادیواکتیو نامرئی را می‌توان با سایر تجهیزات بازرسی غیرقابل نفوذ 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.



شکل ۱- نمونه‌هایی از صحنه‌های دوربین‌های نظارتی درحالی‌که الگوریتم‌های بینایی ماشین^۱ چندین شیء مشابه را ردیابی می‌کنند: (۴)

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 را برای یافتن مواد خارج از کنترل نظارتی^۲ برای افزایش قابلیت پایش سامانه‌های مبتنی بر بینایی ماشین متشکل از دوربین‌های نظارتی و آشکارسازهای رادیواکتیو سودمند باشد.

این تحقیق داده‌های آشکارسازهای رادیواکتیو را که معمولاً سامانه‌های تشخیص کم‌هزینه (مانند گایگر مولر و...) هستند و دوربین‌های شهری 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، همان‌اشیا را برچسب‌گذاری کند و سپس آن‌ها را محلی‌سازی و ردیابی کند. از روش Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) برای ردیابی اشیا شناسایی شده و برچسب‌گذاری شده استفاده شد. روش KLT یک روش بینایی ماشین محبوب و قدرتمند است که می‌تواند به استخراج اطلاعات معنی‌دار از تصاویر و ردیابی اشیا با دقت 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 رادیواکتیو برای یافتن یک هدف آلوده اعمال می‌کنند.

این تحقیق در یک بستری به ابعاد یک اتاق مدل شده است. با مقرون به‌صرفه‌تر 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 دهد. سپس، با جفت‌شدن با داده‌های ثبت شده از طریق آشکارسازها، می‌توان هدف یا اهداف آلوده را در میان چندین شیء متحرک شناسایی کرد.

۲- کارهای مرتبط

در اموری مانند بازرسی، کنترل کیفیت و آزمایش‌های غیرمخرب، سامانه‌های بینایی ماشین یک جایگزین مقرون‌به‌صرفه 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]، [۷]. آن‌ها می‌توانند خوردگی و ترک در خطوط لوله را تشخیص دهند و ایمنی کلی را افزایش دهند [۸]. مطالعات تحقیقاتی متعددی در زمینه تلفیق داده‌ها انجام شده است. یک مطالعه به بررسی ادغام داده‌ها بین تصویر گرفته شده توسط دوربین و تعداد ثبت شده در آشکارساز می‌پردازد [۹]. در این مطالعه، سیستم تصویربرداری خودروهای عبوری را شناسایی کرده و در صورت آلوده بودن آن‌ها به مواد رادیواکتیو، اطلاعات آن‌ها را ثبت می‌کند. برای اجرای بینایی ماشین، الزامات پروژه باید به دقت برنامه‌ریزی شود و راه‌حل مناسب ارائه شود [۱۰-۱۴]. در صنعت هسته‌ای، سامانه‌های بینایی ماشین برای تصویربرداری پزشکی هسته‌ای برای بهبود کیفیت تصویر و در بازرسی راکتورها استفاده می‌شوند [۱۵].

در یک مطالعه جداگانه توسط باندسترا^۱ و همکاران، مفهوم ادغام یک سیستم بینایی ماشین با یک سیستم آشکارسازی پرتوی گاما با ابعاد بزرگ برای افزایش 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 یک مترمربعی متشکل از ۱۰۰ آشکارساز سوسوزن یدور سدیم برای به دست آوردن اولین تصاویر رمزگذاری شده با ماسک استفاده کردند. علاوه بر این، از دو دوربین فیلم‌برداری استریو برای تولید یک نقشه سه‌بعدی از آشکارساز آرایه‌ای استفاده شد که منجر به تصویر نهایی برای تشخیص و ردیابی اشیا منفرد در میدان دید تصویر می‌شود [۱۶]. تحقیقات انجام شده توسط هانسون و همکاران از یک نمونه اولیه ربات مجهز به دوربین یکپارچه از Cognex استفاده کرد. هدف محققان ارائه راه‌حلی بود که از کنترل بینایی رباتیک برای بهبود عملیات در یک راکتور

هسته‌ای بهره می‌برد [۱۷]. مطالعه دیگری [۱۸] به بررسی ادغام بین دوربین تصویربرداری و آشکارساز کامپتون^۲ نیز می‌پردازد. سیستم کامپتون برای شناسایی چشمه رادیواکتیو بدون حرکت و ساکن استفاده می‌شود. با این حال، با ترکیب تصاویر، شناسایی چشمه‌های خارج از کنترل متحرک از طریق روش جبران‌کننده حرکت دوربین امکان‌پذیر شده است. شناسایی و مکان‌یابی مواد رادیواکتیو در مناطق پویا مانند ایستگاه‌های مترو و فرودگاه‌ها به دلیل جابه‌جایی افراد و محموله‌ها می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. تحرک بالقوه این مواد، همراه با حضور افراد، خطر عدم شناسایی را افزایش می‌دهد. سامانه‌های بینایی ماشین همچنین در شناسایی چشمه‌های رادیواکتیو با استفاده از انواع مختلف روبات‌ها مؤثر بوده‌اند [۱۹]. مطالعه توسط استوس^۳ و همکاران یک مدل بی‌بی‌زی را نشان می‌دهد که از داده‌های شبکه‌ای از آشکارسازهای پرتوها برای ردیابی حرکت یک چشمه رادیواکتیو استفاده می‌کند. با ترکیب محدودیت‌های دامنه خاص، مانند مکان جاده، دقت تخمین مکان با کاهش عدم قطعیت افزایش می‌یابد، علی‌رغم عدم تغییر قابل توجهی در تناسب داده‌های شمارش گاما [۲۰]. هوو و همکاران استراتژی به نام ACA را معرفی کردند که از یک شبکه عصبی کانولوشن^۴ 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 منبع با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MC) 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 [۲۱]. توسعه یک بستر آزمایشی برای یک شبکه چند حسگر که قادر به شناسایی و مکان‌یابی چشمه‌های رادیواکتیو در محیط‌های شهری و همچنین روش‌های نوآورانه برای ردیابی بلادرنگ چشمه‌های پرتوی در کل شهر است، توسط کوپر و همکاران انجام شد [۲۲]. این مطالعه به موضوع شناسایی چشمه‌های رادیواکتیو خارج از کنترل که می‌تواند خطرات قابل توجهی برای ایمنی عمومی و محیط‌زیست ایجاد کند می‌پردازد، نوآوری این مطالعه در ترکیب تکنیک‌های بینایی ماشین و مدل‌سازی مونت کارلو

^۳ Osthus

^۴ Convolutional Neural Network (CNN)

^۱ Bandstra

^۲ Compton

برای شناسایی و ردیابی چشمه‌های رادیواکتیو برای بررسی سناریوهای پرتوی قبل از راه‌اندازی سامانه‌های واقعی مختلف نهفته است. این رویکرد یک روش منحصربه‌فرد و بالقوه مؤثر برای نظارت و کنترل این چشمه‌ها در مقایسه با روش‌های مرسوم ارائه می‌دهد.

۳- مدل‌سازی

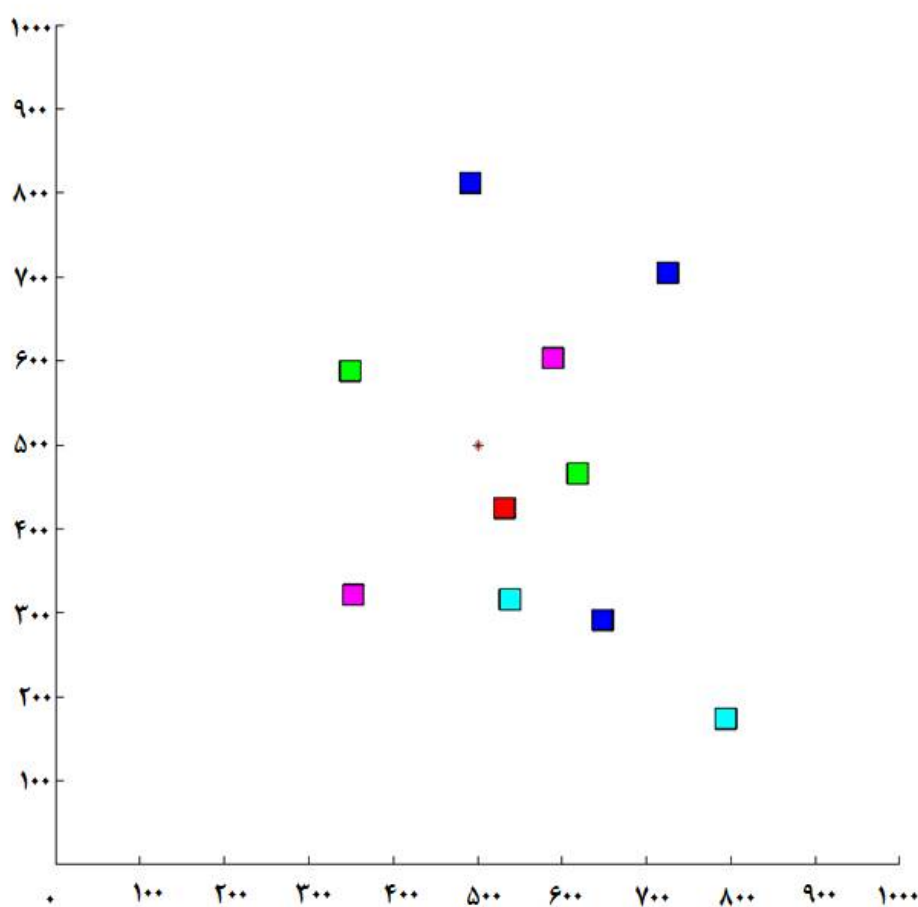
۳-۱- الگوریتم حرکت پیوسته اشیای متحرک

برای ایجاد یک سناریوی پرتوی که اشیای متحرک در آن حضور دارند. این الگوریتم مربع‌های متحرک با رنگ‌های مختلف را با الگوی حرکتی مبتنی بر ربات‌های تیمیو را ایجاد می‌کند و فایل ویدئوی آن را ارائه می‌دهد. در این مرحله موقعیت و سرعت اولیه مربع‌ها مقداردهی اولیه می‌شود، موقعیت آن‌ها در طول زمان به‌روز می‌شود، با

تعریف معادلات در الگوریتم، از برخورد مربع‌ها با یکدیگر جلوگیری به عمل می‌آید و در مرز تصویر، زمانی که اشیای متحرک به لبه تصویر رسیدند دوباره در حرکتی پیوسته مسیر خورد را تغییر می‌دهند و در کادر قرار می‌گیرند. تمام الگوهای حرکتی در این الگوریتم از حرکت واقعی ربات‌های کوچک تیمیو الگوبرداری شده است که نمونه‌ای از آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- تصویری از یک ربات تیمیو



شکل ۳- تصویری از یک فریم محیط مدل شده که ۱۰ شیء متحرک در آن در حال حرکت هستند

تیمو^۱ یک ربات آموزشی متن باز است. این ربات دارای حسگرهای مجاورتی مادون قرمز است که به آن اجازه تشخیص اشیای اطرافش را می دهد و از برخورد به آنها جلوگیری کند. همچنین دارای حسگرهای زمینی است که می تواند خطوط را تشخیص دهد و به تیمو امکان می دهد مسیرهای خاص را دنبال کند یا در چالش های ره گیری خط شرکت کند.

۳-۲- شبیه سازی سناریوی پرتوی

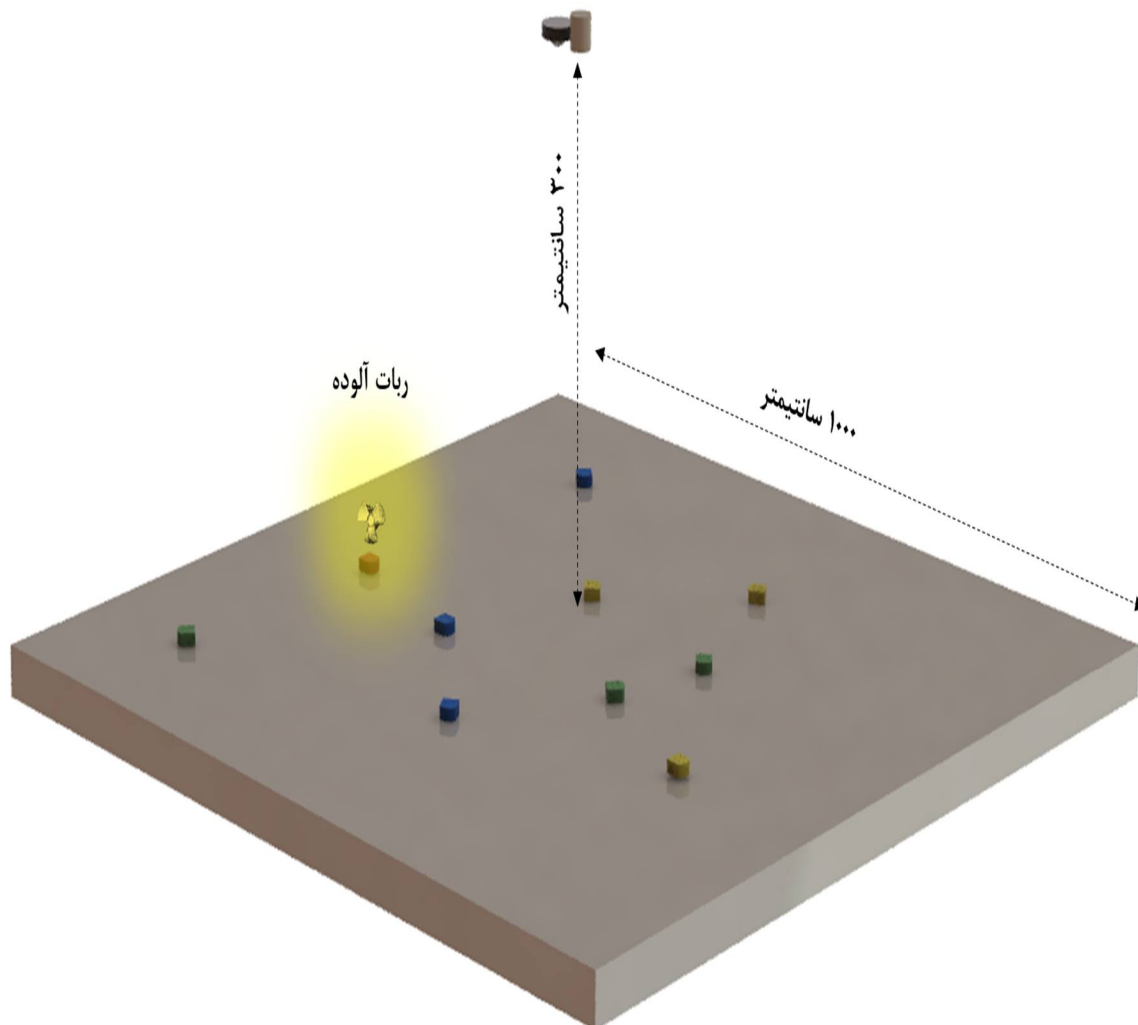
کد: برای مدل سازی از کد مونت کارلوی MCNPX استفاده شد. این کد یک کد کامپیوتری پرکاربرد برای شبیه سازی انتقال ذراتی مانند نوترون، فوتون و الکترون از طریق مواد است.

این ابزار قدرتمندی برای محققان و مهندسين شاغل در زمینه های مهندسی هسته ای، حفاظت در برابر پرتوها، فیزیک پزشکی و سایر رشته های مرتبط است [۲۳].

برای این منظور ۳۰۰۰ برنامه برای موقعیت های مختلف با گام پیوسته ربات قرمز در میان دیگر اشیای متحرک مدل سازی شد.

رادیوایزوتوپ: در این شبیه سازی از چشمه گاما زای بسیار پرکاربرد صنعتی و پزشکی کبالت-۶۰ استفاده شد. چشمه کبالت-۶۰ ایزوتوپ رادیواکتیو با نیمه عمر حدود ۲۷/۵ سال است. عمدتاً در کاربردهای صنعتی و درمان های پزشکی استفاده می شود. کبالت-۶۰ تابش های گاما گسیل می کند که آن را برای اهداف مختلف ارزشمند می کند.

آشکارساز سوسوزن / دوربین چشم ماهی

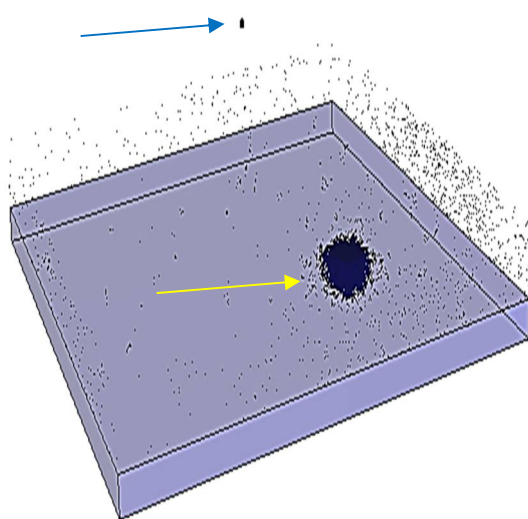


شکل ۴- نمایی جانبی از هندسه در فضای مدل سازی

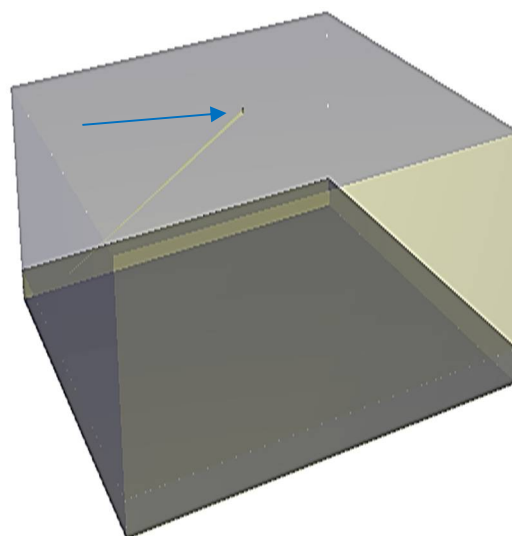
از نظر انرژی، کبالت-۶۰ پرتوهای گاما را با حداکثر انرژی ۱/۳۳ مگاولت گسیل می‌کند. این تابش پرنرژی به آن اجازه نفوذ در مواد را می‌دهد و در پرتونگاری صنعتی برای بازرسی جوش‌ها، تشخیص عیوب سازه‌های فلزی و انجام کنترل کیفیت در فرایندهای تولید استفاده می‌شود. کبالت-۶۰ با قرار دادن کبالت-۵۹ پایدار در معرض تشعشعات نوترونی در یک راکتور هسته‌ای تولید می‌شود. کبالت-۵۹ یک نوترون را جذب می‌کند و تحت فرایندی به نام جذب نوترون قرار می‌گیرد و به کبالت-۶۰ تبدیل می‌شود. این روش تولید، عرضه ثابت کبالت-۶۰ را برای کاربردهای مختلف تضمین می‌کند. کاربردهای کبالت-۶۰ متنوع است. در پزشکی، برای درمان سرطان، به ویژه در پرتودرمانی استفاده می‌شود. می‌توان از آن برای هدف قرار دادن و از بین بردن سلول‌های سرطانی استفاده کرد. در صنعت، کبالت-۶۰ برای استریل کردن تجهیزات پزشکی، نگهداری مواد غذایی و تشخیص نشت در خطوط لوله استفاده می‌شود. همچنین، در تحقیق و توسعه برای مطالعات مختلف علمی استفاده می‌شود. با توجه به احتمال سرقت یا مفقود شدن، کبالت ۶۰ به دلیل ماهیت رادیواکتیو آن یک ماده بسیار تنظیم شده و کنترل شده است. تدابیر امنیتی شدیدی برای جلوگیری از دسترسی غیرمجاز و اطمینان از مدیریت ایمن آن وجود دارد. خطر سرقت یا مفقود شدن با روش‌های مناسب نگهداری، حمل و نقل و دفع به

حداقل می‌رسد. مقامات و نهادهای نظارتی برای جلوگیری از هرگونه سوءاستفاده یا حوادث احتمالی، استفاده و استفاده از کبالت-۶۰ را از نزدیک نظارت می‌کنند.

آشکارساز: در مدل‌سازی از آشکارساز یدور سدیم آلاییده با تالیوم استفاده شد. NaI (TI) مخفف سدیم یدید آلاییده با تالیوم است. این کریستال در آشکارسازی پرتوهای گاما و اشعه ایکس بسیار کارآمد است. آرایش با تالیوم به بهبود خواص سوسوزنی کریستال کمک می‌کند و باعث می‌شود در هنگام اندرکنش با پرتوهای یون‌ساز، نور در ناحیه مرئی گسیل کند. آن‌ها می‌توانند در زمینه‌های مختلفی مانند پزشکی هسته‌ای، نظارت بر محیط‌زیست و حتی در کاربردهای امنیتی استفاده شوند. توانایی آن‌ها در اندازه‌گیری دقیق سطوح پرتوی، آن‌ها را به ابزارهای ضروری در تشخیص مواد رادیواکتیو و تضمین ایمنی تبدیل می‌کند. هنگامی که یک پرتوگاما یا اشعه ایکس وارد کریستال می‌شود، با اتم‌های سدیم و ید اندرکنش می‌کند و باعث گسیل نور سوسوزن می‌شود. سپس این نور توسط یک لوله تقویت‌کننده نوری یا نوع دیگری از حسگر نور به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. شدت سیگنال الکتریکی با انرژی تابش فرودی مطابقت دارد و امکان تعیین مشخصات چشمه را فراهم می‌کند. در این مطالعه ساینز آشکارساز ۳ اینچ در نظر گرفته شد.

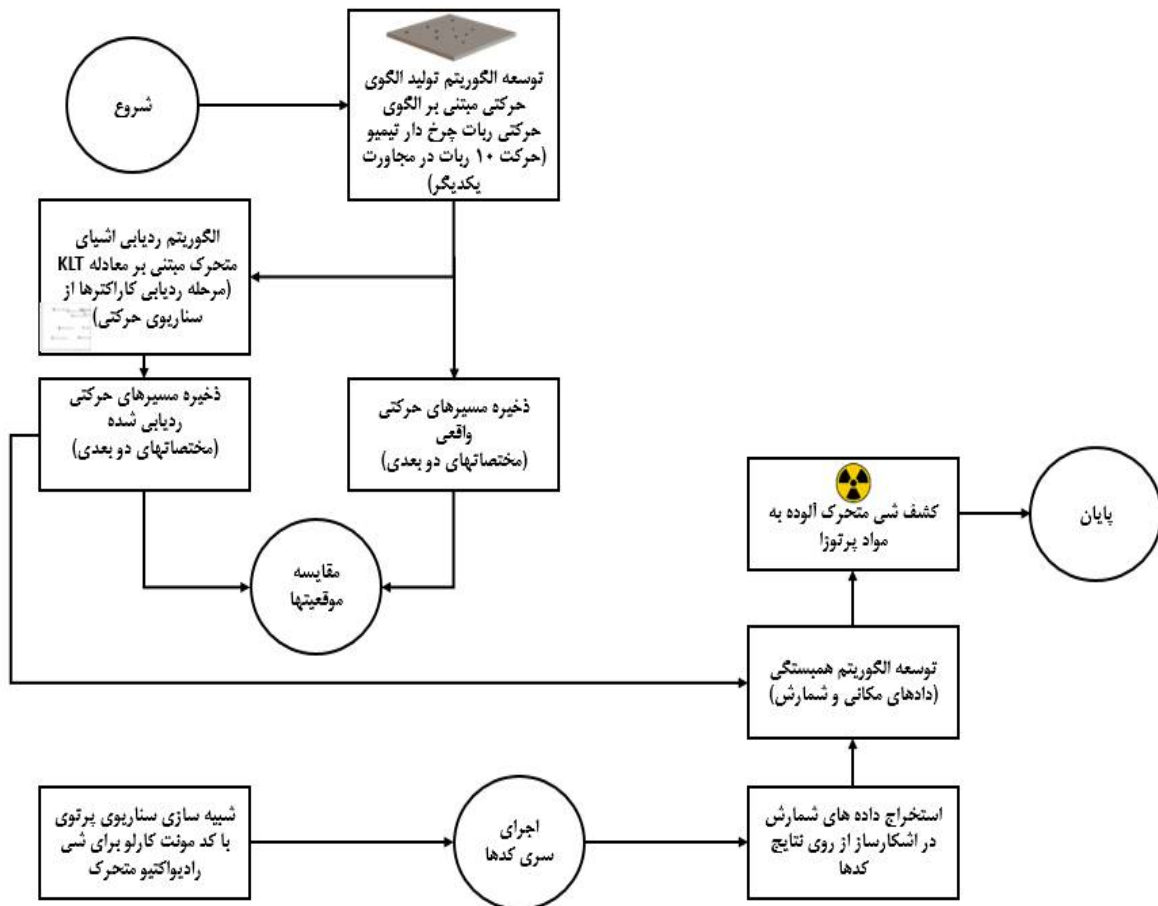


ب



الف

شکل ۵- فضای آزمایش (الف) اتاق به ابعاد ۱۰×۱۰×۳ مترمکعب، (ب) نقطه داغ ۱ (بردار زرد) محل چشمه و پخش ذرات در فضای اطراف و آشکارساز (بردار آبی)



شکل ۶- فلوچارت الگوریتم نقشه برداری از مسیر حرکت و کشف ماده رادیواکتیو خارج از کنترل

۳-۳- الگوریتم ردیابی اشیای هم شکل

۳-۳-۱- الگوریتم مبتنی بر روش KLT

یکی از مزایای کلیدی روش KLT توانایی آن در سازگاری با تغییرات داده‌های تصویر در طول زمان است. این روش می‌تواند اشیاء را حتی در صورت حرکت یا تغییر شکل، با به‌روزرسانی بردارهای ویژه و مقادیر ویژه با جمع‌آوری داده‌های جدید، ردیابی کند. یکی دیگر از مزایای روش KLT توانایی آن در مدیریت 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. [۵]، [۲۴].

معادله KLT برای ردیابی اجسام متحرک استفاده می‌شود. این یک الگوریتم پیچیده است که سرعت، جهت و شتاب یک جسم را برای پیش‌بینی موقعیت آینده آن در نظر می‌گیرد. این فرمول معمولاً در زمینه‌هایی مانند فیزیک، مهندسی و علوم کامپیوتر برای ردیابی حرکت وسایل نقلیه،

پرتابه‌ها و سایر اجسام استفاده می‌شود. این فرمول موقعیت اولیه جسم، سرعت آن و زمان سپری شده را برای پیش‌بینی موقعیت آینده آن در نظر می‌گیرد. همچنین هر گونه تغییر در شتاب یا جهت را فاکتور می‌کند تا پیش‌بینی دقیق‌تری از مسیر حرکت جسم ارائه دهد.

فرمول KLT برای کاربردهای مختلف مانند توسعه سیستم‌های رادار و سونار، وسایل نقلیه خودران و رباتیک ضروری است. این امکان ردیابی دقیق اجسام متحرک را فراهم می‌کند و به تصمیم‌گیری آگاهانه بر اساس مسیر پیش‌بینی‌شده آنها کمک می‌کند.

در حالی که این فرمول ممکن است پیچیده باشد و برای درک و پیاده‌سازی به دانش ریاضی پیشرفته نیاز داشته باشد، اما ابزار ارزشمندی برای ردیابی و پیش‌بینی حرکت اجسام در زمینه‌های مختلف است. دقت و قابلیت اطمینان آن، آن را جزء ضروری بسیاری از سیستم‌ها و فناوری‌های ردیابی می‌کند.

در اینجا معادلات اصلی حاکم به صورت زیر هستند:

*محاسبه گرادیان تصویر:

گرادیان های تصویر را در جهت های x و y با استفاده از عملگر Sobel یا هر روش دیگر محاسبه گرادیان محاسبه می شوند.

*انتخاب پنجره (لکه):

یک پنجره کوچک (لکه) در اطراف نقطه ویژگی در قاب فعلی انتخاب می شود. ذ این پنجره با W نشان داده می شود.

*معادله لوکاس - کاناد:

برای هر پیکسل (x, y) در داخل پنجره W، شیب مکانی و زمانی را محاسبه می شود:

$$I_x = \frac{\partial I}{\partial y} \quad (\text{شیب مکانی در جهت } y)$$

$$I_t = \frac{\partial I}{\partial t} \quad (\text{شیب زمانی})$$

*پنجره محلی در اطراف نقطه ویژگی:

یک پنجره محلی در اطراف نقطه ویژگی در قاب قبلی تعریف می گردد که با P مشخص شده است. هدف تخمین جابه جایی (dx, dy) نقطه مشخصه بین فریم های متوالی است.

*بهینه سازی جریان نوری:

برای تخمین جابه جایی (dx, dy) از معادله لوکاس - کاناد استفاده می شود. معادله محدودیت جریان نوری به شکل زیر به دست می آید:

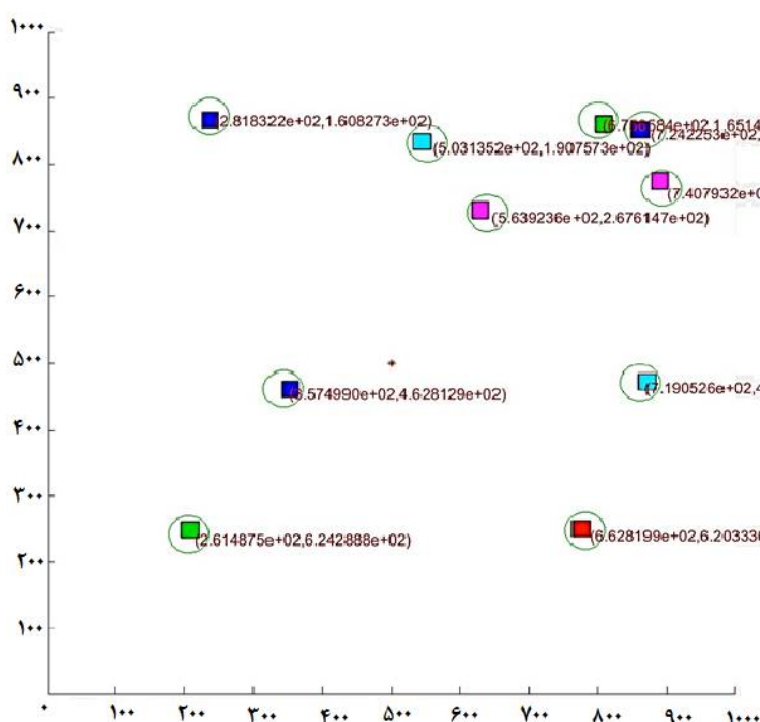
$$\begin{bmatrix} \sum I_x^2 & \sum I_x I_y \\ \sum I_x I_y & \sum I_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum I_x I_t \\ \sum I_y I_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

برای بدست آوردن مقادیر بهینه (dx, dy) این سیستم معادله خطی را حل کنید.

*به روز رسانی ردیابی:

موقعیت نقطه مشخصه را در قاب فعلی با استفاده از جابه جایی تخمینی (dx, dy) و مختصات نقطه ویژگی قبلی ردیابی می شود.

معادله لوکاس - کاناد اساساً بردار سرعت V را با به حداقل رساندن خطا بین تغییر شدت تصویر مشاهده شده ($\nabla I(x, y)$) و تغییر شدت تصویر پیش بینی شده ($\nabla I_t(x, y)$) حل می کند. با حل این معادله برای هر پیکسل یا مجموعه ای از پیکسل های انتخاب شده در یک دنباله تصویر، می توان جریان نوری را تخمین زد که اطلاعات ارزشمندی در مورد حرکت و الگوهای حرکت اجسام درون دنباله ارائه می دهد.



شکل ۷- ردیابی اشیا و تعیین نقشه حرکتی آنها

معادله لوکاس - کاناد کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف، از جمله ردیابی اشیاء، تثبیت کننده ویدئو و تحلیل حرکت پیدا کرده است. سادگی و کارایی آن، آن را به گزینه‌ای محبوب برای کارهای تخمین جریان نوری تبدیل کرده است.

۳-۴- الگوریتم مبتنی بر معادلات همبستگی

اثربخشی آشکارسازی و کشف چشمه رادیواکتیو با روش آنالیز مبتنی بر همبستگی بین مسیرهای اشیاء و شمارش گامای ثبت شده در آشکارساز شده 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، درحالی‌که ۱- یا ۱ یک همبستگی کامل و حالت ایدئال را نشان می‌دهد.

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

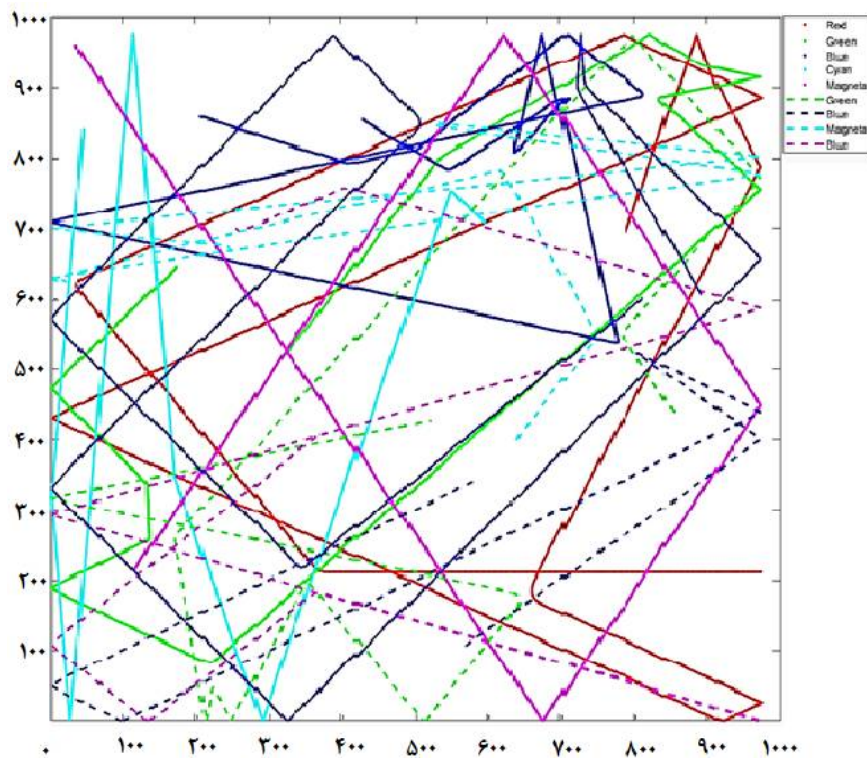
که σ انحراف استاندارد داده‌ها است. انتظار می‌رود که با افزایش فاصله بین آشکارساز و جسم آلوده به ماده رادیواکتیو

متحرک، شمارش کاهش یابد و در نتیجه ضریب همبستگی نزدیک به ۱- باشد. برای به دست آوردن ضرایب همبستگی برای هر شیء، الگوریتم ضریب در ثانیه را تا ۱۲۰ ثانیه محاسبه می‌کند.

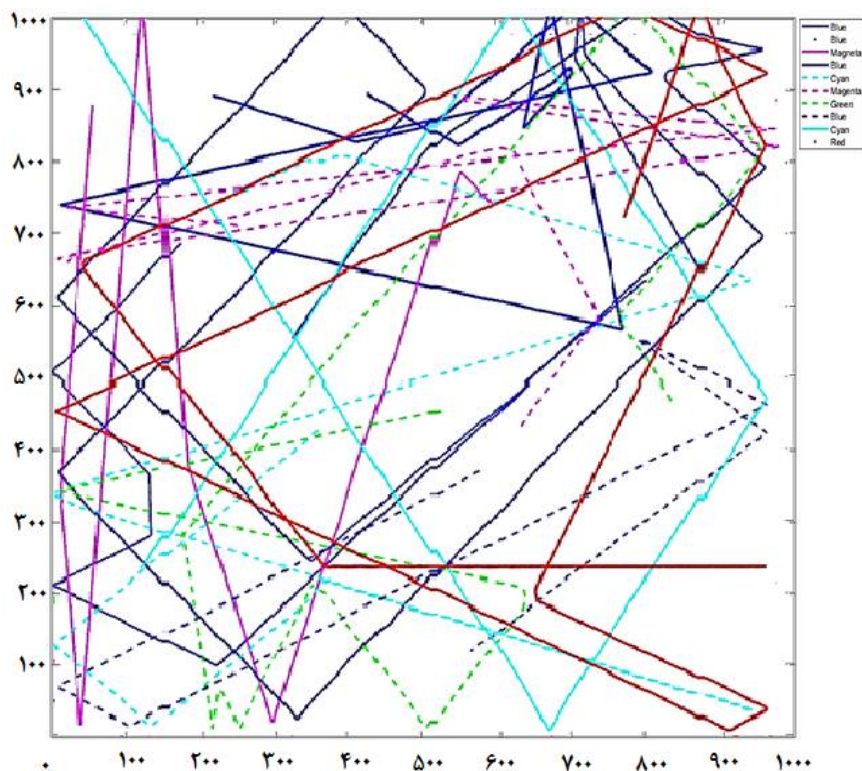
۴- نتایج

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 آن‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. برای هر کاراکتر نمودار مسیر حرکت آن مطابق با همان رنگ کاراکتر نشان داده شده است. نتایج مربوط به الگوریتم ردیابی برای تعیین موقعیت کاراکترها در هر زمان، در شکل ۹ نشان داده شده است.

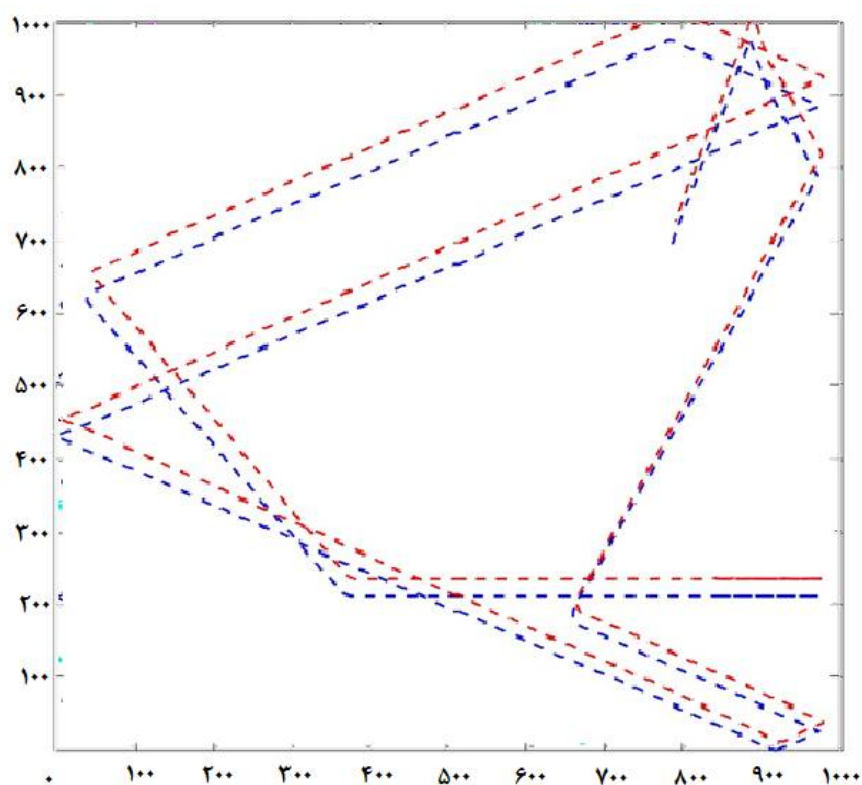
در شکل ۱۰ مقایسه بین مسیر حرکت اصلی کاراکتر قرمز رنگ و مسیر ردیابی شده آن توسط الگوریتم مبتنی بر روش KLT نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل ۱۰ نشان می‌دهد الگوریتم توانسته است با دقت خوبی هدف را ردیابی کند.



شکل ۶. مسیر واقعی ایجاد شده برای ربات‌ها با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی حرکت تیمیو در صفحه به ابعاد ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ سانتیمتر مربع



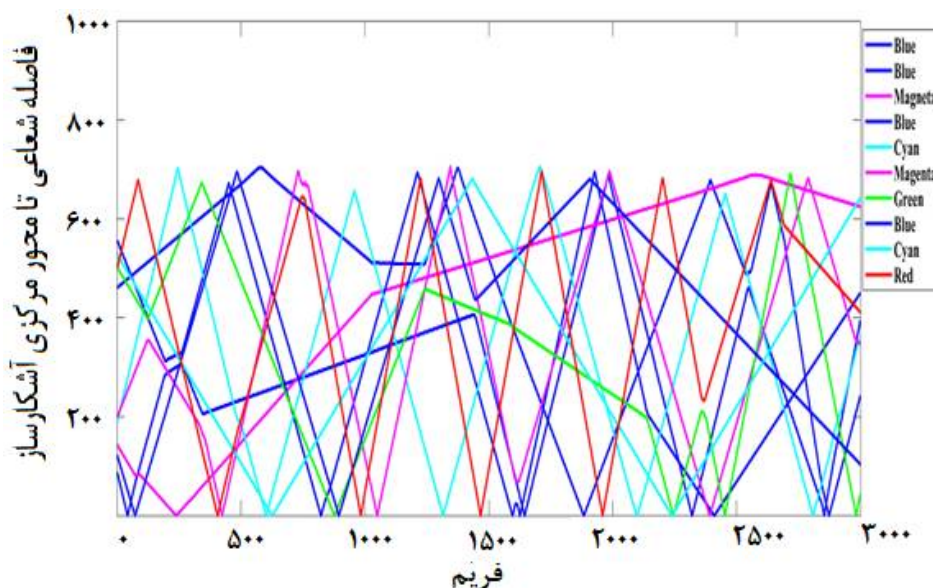
شکل ۷. مسیر ردیابی شده اشیا با استفاده از روش KLT در صفحه به ابعاد ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ سانتیمتر مربع



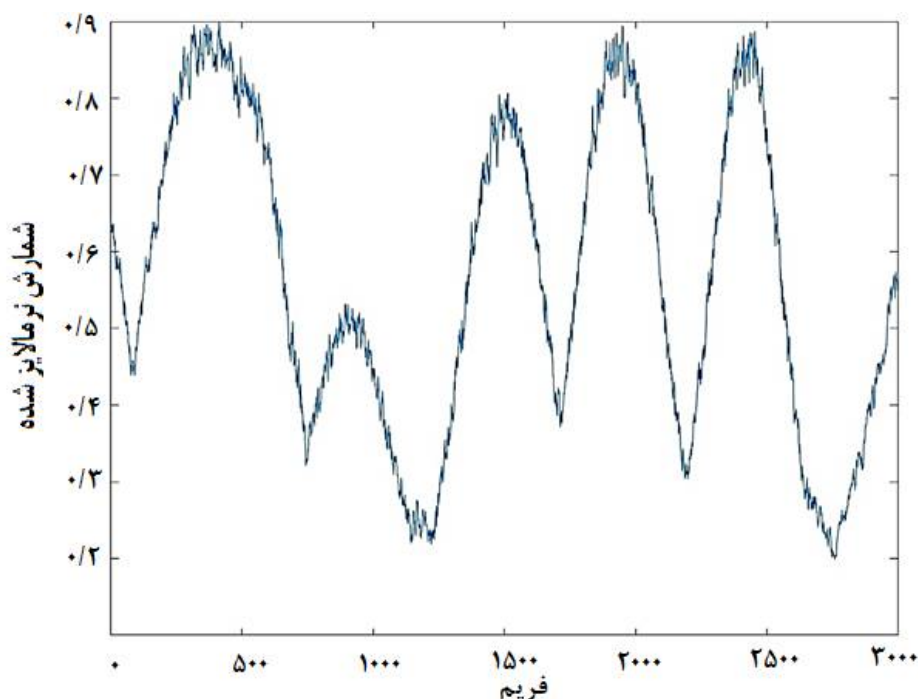
شکل ۸. مقایسه مسیر واقعی و ردیابی شده برای کاراکتر آلوده به ماده رادیواکتیو (نمودار قرمز: مسیر ردیابی شده توسط الگوریتم، نمودار آبی: مسیر اصلی)

در شکل ۱۱ فاصله هر کدام از کاراکترها از محور عمودی آشکارساز 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 قرار گرفته‌اند. در شکل ۱۲ تغییرات آهنگ

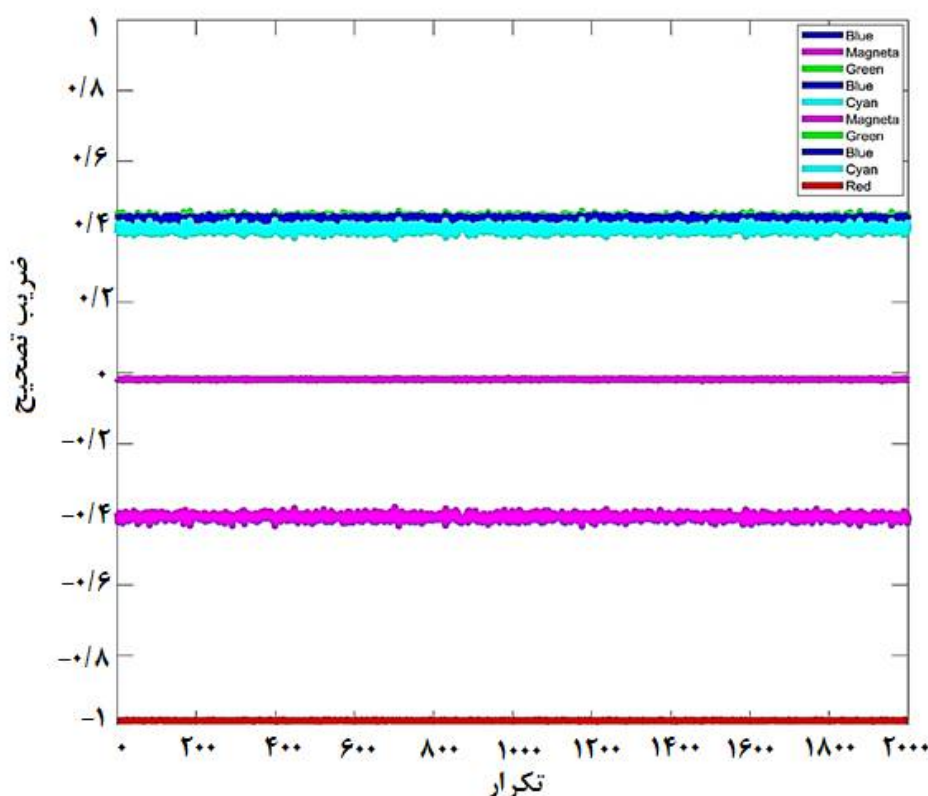
شمارش ثبت شده در آشکارساز بر حسب زمان نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که کاراکتر آلوده در زمان حدود ۱۲۵۰ و ۲۷۵۰ ثانیه در دورترین موقعیت خود نسبت به آشکارساز قرار گرفته است لذا کمترین میزان شمارش ثبت شده است.



شکل ۹. فاصله شعاعی کاراکترها در هر زمان از محور مرکزی آشکارساز



شکل ۱۰. تغییرات شمارش ثبت شده در واحد زمان در آشکارساز



شکل ۱۱. روند تغییرات ضریب همبستگی برای ۱۰ کاراکتر

در شکل ۱۳ روند تغییرات ضریب همبستگی برای ۱۰ کاراکتر نشان داده شده است. از نمودارهای نشان داده شده در ۱۲ می‌توان استنباط نمود که شیء آلوده کاراکتر قرمز رنگ دمی باشد که ضریب همبستگی آن مقداری در نزدیک به عدد ۱- را نشان می‌دهد. در نهایت نتایج مربوط به کشف شیء آلوده در میان اهداف متحرک مشابه با استفاده از رابطه همبستگی داده‌های مکانی و شمارش پرتوی به صورت زیر در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

تشخیص و پایش آلودگی رادیولوژیکی یک جنبه حیاتی برای تضمین امنیت عمومی و حفاظت از محیط‌زیست است. این مطالعه یک رویکرد تئوری محور جدید برای شناسایی آلودگی رادیولوژیکی در میان اجسام متحرک با شکل‌های یکسان با استفاده از همجوشی داده‌ها و روش‌های بینایی ماشین پیشنهاد می‌کند. الگوریتم پیشنهادی دقت بالایی را در تشخیص هدف آلوده در یک بستر آزمایشی کوچک نشان داد و راه‌حلی امیدوارکننده برای بهبود نظارت پرتوی و اقدامات واکنش اضطراری ارائه کرد. ده کاراکتر مشابه که الگوی حرکتی

آن‌ها از ربات‌های کوچک تیمیو الهام گرفته 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 یکی از کاراکترهای شبه ربات، چشمه رادیواکتیو گاما زای کبالت-۶۰ قرار داده شد تا اثر حرکت یک شیء رادیواکتیو در میان سایر اشیای متحرک بررسی شود. کاراکترهای مشابه به طور تصادفی در یک اتاق مدل‌سازی شده به ابعاد ۱۰۰ مترمربع حرکت می‌کردند. کل زمان حرکت تصادفی این کاراکترها ۱۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. با استفاده از الگوریتم ردیابی اشیای متحرک مسیر حرکت آن‌ها محاسبه و با مقدار اصلی مقایسه گردید که با دقت بالایی تطابق داشتند. در گام نهایی با استفاده از الگوریتم مبتنی بر معادله ریاضی همبستگی شیء 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 به‌منظور تعریف سناریوهای پرتوی بدون نیاز به پرتوگیری

طراحی و مدل‌سازی‌های اولیه به کار ببرند. تحقیقات آینده می‌تواند ادغام این الگوریتم‌ها را با سایر فناوری‌ها مانند هوش مصنوعی برای بهبود دقت و حتی قابلیت‌های تشخیص پیشرفته‌تر بررسی کند.

ناشی از پرتوهای یون‌ساز مورد استفاده داد. سامانه‌هایی که با ادغام دوربین‌های نظارتی و سامانه‌های تشخیص رادیولوژیکی، می‌توانند بر پایش پرتوی مؤثر باشند و منجر به ایمنی عمومی و حفاظت از محیط‌زیست شوند می‌توانند از این الگوریتم‌ها در

مراجع

- [۱] H. Al Hamrashdi, S. D. Monk, and D. Cheneler, "Passive Gamma-Ray and Neutron Imaging Systems for National Security and Nuclear Non-Proliferation in Controlled and Uncontrolled Detection Areas: Review of Past and Current Status," *Sensors*, vol. 19, no. 11. 2019. doi: 10.3390/s19112638.
- [۲] C. Fernandez, "These are the top 10 busiest airports in the world—5 of them are in the U.S." Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.cnbc.com/2023/04/10/world-busiest-airports-airports-council-international-ranking.html>
- [۳] P. Andreas, "A tale of two borders: The US-Canada and US-Mexico lines after 9--11," in *The Rebordering of North America*, Routledge, 2014, pp. 1–23.
- [۴] J. S. Bisht, "Github." Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/jitendrasb24/Car-Detection-OpenCV>
- [۵] J. Shi and Tomasi, "Good features to track," in *1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994, pp. 593–600. doi: 10.1109/CVPR.1994.323794.
- [۶] E. R. Davies, *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*. Academic Press, 2012.
- [۷] C. Steger, M. Ulrich, and C. Wiedemann, *Machine vision algorithms and applications*. John Wiley & Sons, 2018.
- [۸] S. J. Schmugge *et al.*, "Detection of cracks in nuclear power plant using spatial-temporal grouping of local patches," in *2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2016, pp. 1–7. doi: 10.1109/WACV.2016.7477601.
- [۹] E. Cazalas, "Defending cities against nuclear terrorism: Analysis of a radiation detector network for ground based traffic," *Homel. Secur. Aff.*, vol. 14, 2018.
- [۱۰] C.-Y. Huang, J.-H. Hong, and E. Huang, "Developing a Machine Vision Inspection System for Electronics Failure Analysis," *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 9, no. 9, pp. 1912–1925, 2019, doi: 10.1109/TCPMT.2019.2924482.
- [۱۱] K. D. Joshi, V. D. Chauhan, and B. W. Surgenor, "Real time recognition and counting of Indian currency coins using machine vision: a preliminary analysis," in *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress (CSME)*, 2016, pp. 26–29.
- [۱۲] A. K. Dubey, A. Kumar, S. R. Kumar, N. Gayathri, and P. Das, *AI and IoT-based Intelligent Automation in Robotics*. John Wiley & Sons, 2021.
- [۱۳] Y. Shen and W. Zhu, "Medical image processing using a machine vision-based approach," *Int. J. signal Process. Image Process. Pattern Recognit.*, vol. 6, no. 3, pp. 139–146, 2013.
- [۱۴] R. Jain, R. Kasturi, B. G. Schunck, and others, *Machine vision*, vol. 5. McGraw-hill New York, 1995.
- [۱۵] B. L. Luk, A. A. Collie, D. S. Cooke, and S. Chen, "Walking and Climbing Service Robots for Safety Inspection of Nuclear Reactor Pressure Vessels," *Meas. Control*, vol. 39, no. 2, pp. 43–47, Mar. 2006, doi: 10.1177/002029400603900201.
- [۱۶] A. R. Benson *et al.*, "The Gamma-Ray Imaging Framework," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 60, no. 2, pp. 528–532, 2013, doi: 10.1109/TNS.2013.2245342.
- [۱۷] N. Marturi *et al.*, "Towards advanced robotic manipulation for nuclear decommissioning: A pilot study on tele-operation and autonomy," in *2016 International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian*

- Applications (RAHA)*, 2016, pp. 1–8. doi: 10.1109/RAHA.2016.7931866.
- [۱۸] K. Stadnikia, K. Henderson, S. Koppal, and A. Enqvist, “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.*, vol. 954, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.nima.2019.02.040.
- [۱۹] H. Ardiny, A. Beigzadeh, and H. Mahani, “MCNPX simulation and experimental validation of an unmanned aerial radiological system (UARS) for rapid qualitative identification of weak hotspots,” *J. Environ. Radioact.*, vol. 258, p. 107105, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107105>.
- [۲۰] D. Osthus *et al.*, “Tracking the location of a road-constrained radioactive source with a network of detectors,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 1039, p. 166992, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.nima.2022.166992.
- [۲۱] J. Huo, X. Hu, J. Wang, and L. Hu, “ACA: Automatic search strategy for radioactive source,” *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 55, no. 8, pp. 3030–3038, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.05.017>.
- [۲۲] R. J. Cooper *et al.*, “Networked Sensing for Radiation Detection, Localization, and Tracking,” *arXiv Prepr. arXiv2307.13811*, 2023.
- [۲۳] L. S. Waters *et al.*, “The MCNPX Monte Carlo Radiation Transport Code,” in *AIP Conference Proceedings*, AIP, 2007, pp. 81–90. doi: 10.1063/1.2720459.
- [۲۴] B. D. Lucas and T. Kanade, “An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision,” in *IJCAI’81: 7th international joint conference on Artificial intelligence*, Vancouver, Canada, Aug. 1981, pp. 674–679. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-03697340>