



Semnan University



Type of Article (e.g. Research Article)

Tracking and Exploring out-of-Control Radioactive Materials in Crowded Scenarios based on the Overlaying of Machine Vision System Images-Radiation Counting Map (Fast and Efficient Method)

Amir Mohammad Beigzadeh^{a,*} , Hadi Ardiny^b 

^a Department Name of Organization, Name of Faculty, University, City, Country (first author's affiliation)

^b Department Name of Organization, Name of Faculty, University, City, Country (second author's affiliation)

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:

Machin vision;
Nuclear threats;
Radiation map;
Object Tracking;
Monte carlo;
Radioactive source;

ABSTRACT

The rapid expansion of nuclear technology on a global scale has heightened concerns regarding the significant risks posed by radioactive materials to both human societies and the environment. In environments characterized by high levels of traffic and congestion, the effective detection and tracking of out-of-control radioactive materials are paramount to ensuring the safety and security of individuals and communities. This study introduces an innovative and efficient method that integrates machine vision system images with radiation-counting maps to precisely identify and explore radioactive materials in densely populated scenarios. Leveraging advanced machine vision technology alongside the capabilities of multi-radiation detectors, this methodology facilitates accurate detection and enables timely responses to potential threats. By aligning image overlay techniques with thorough ray count map analysis, a robust system is established for monitoring and investigating instances of out-of-control radioactive materials. These findings exhibit promising outcomes for enhancing safety protocols in intricate environments, particularly emphasizing the importance of radiation monitoring and the swift identification of out-of-control radioactive materials to safeguard public health and the environment.

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: email of corresponding author

How to cite this article:

نوع مقاله (به عنوان مثال مقاله پژوهشی)

ردیابی و کشف مواد رادیواکتیو خارج از کنترل در سناریوهای پر ازدحام مبتنی بر همپوشانی تصاویر سامانه بینایی ماشین-نقشه شمارش پرتوی (روش سریع و کارآمد)

امیرمحمد بیگزاده^{۱*}، هادی اردینی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ...	گسترش سریع فناوری هسته‌ای در مقیاس جهانی نگرانی‌ها را در مورد خطرات قابل توجه مواد رادیواکتیو برای جوامع انسانی و محیط‌زیست افزایش داده است. در محیط‌هایی که با سطوح بالای ترافیک و ازدحام مشخص می‌شوند، شناسایی و ردیابی مؤثر مواد رادیواکتیو خارج از کنترل برای تضمین ایمنی و امنیت افراد و جوامع بسیار مهم است. این مطالعه یک روش نوآورانه و کارآمد را معرفی می‌کند که تصاویر سیستم بینایی ماشین را با نقشه‌های شمارش پرتوی برای شناسایی و کشف دقیق مواد رادیواکتیو در سناریوهای پرجمعیت ادغام می‌کند. این روش با بهره‌گیری از فناوری پیشرفته بینایی ماشین در کنار قابلیت‌های آشکارسازهای پرتوی، تشخیص دقیق را تسهیل می‌کند و پاسخ به موقع به تهدیدات بالقوه را ممکن می‌سازد. با برهم‌نهی تصاویر با نقشه شمارش پرتو، یک سیستم قوی برای نظارت و بازرسی مواد رادیواکتیو خارج از کنترل ایجاد می‌شود. این یافته‌ها نتایج امیدوارکننده‌ای را برای افزایش پروتکل‌های ایمنی در محیط‌های پیچیده نشان می‌دهند، به ویژه بر اهمیت نظارت بر تشعشع و شناسایی سریع مواد رادیواکتیو خارج از کنترل برای حفاظت از سلامت عمومی و محیط‌زیست تأکید می‌کنند.
بازنگری مقاله: ...	
پذیرش مقاله: ...	
واژگان کلیدی:	
بینایی ماشین،	
تهدیدات هسته‌ای،	
نقشه پرتوی،	
ردیابی اشیاء،	
مونت کارلو،	
چشمه رادیواکتیو،	

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه^۱

می‌دهند [11]]. تولید انرژی هسته‌ای به مواد رادیواکتیو با فعالیت پرتوی بالا برای تولید برق کارآمد و پایدار متکی است و به تقاضای جهانی انرژی کمک می‌کند [12]]. علاوه بر این، بخش‌های صنعتی از چشمه‌های رادیواکتیو برای فرآیندهای کنترل کیفیت، تجزیه و تحلیل مواد و تحقیقات علمی استفاده می‌کنند که تطبیق‌پذیری و اهمیت این مواد را در جامعه مدرن نشان می‌دهد. با این حال، علیرغم مزایای

استفاده از مواد رادیواکتیو طیف وسیعی از کاربردهای مفید در صنایع مختلف از جمله پزشکی، کشاورزی، پرتونگاری صنعتی و تحقیقات را در بر می‌گیرد. در پزشکی، ایزوتوپ‌های رادیواکتیو معمولاً برای تصویربرداری تشخیصی و درمان سرطان استفاده می‌شوند و تکنیک‌های غیرتهاجمی برای تشخیص و مبارزه با بیماری‌ها ارائه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: @...@.

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

رادیواکتیو، اطلاعات ارزشمندی را برای شناسایی رادیونوکلئیدهای خاص و ارزیابی خطرات بالقوه مرتبط با پرتوگیری ارائه می‌کنند [118]]. با گسترش صنعت هسته‌ای و استفاده گسترده از مواد و چشمه‌های پرتوزا در بخش‌های مختلف، نیاز به سیستم‌های آشکارسازی هسته‌ای قوی و پیشرفته به طور فزاینده‌ای اهمیت یافته است. چشم‌انداز در حال تحول فناوری هسته‌ای و تکثیر مواد رادیواکتیو خطرات بالقوه مرتبط با دسترسی غیرمجاز، سوء استفاده و قاچاق غیرقانونی این مواد را افزایش داده است [119]]. به این ترتیب، نیاز مبرمی به روزرسانی و تجهیز مداوم سیستم‌های آشکارسازی هسته‌ای با فناوری‌های پیشرفته برای مقابله مؤثر با تهدیدات نوظهور و افزایش اقدامات امنیت هسته‌ای وجود دارد [110]]. توسعه فن‌آوری‌های تشخیص قدرتمندتر و حساس‌تر، مانند آشکارسازهای پرتوی نسل جدید نسل بعدی، سیستم‌های تصویربرداری پیشرفته، و تجزیه و تحلیل هوشمند داده‌ها، برای همگام شدن با ماهیت در حال تکامل تهدیدات هسته‌ای ضروری است. این سیستم‌های تشخیص مدرن قابلیت‌های پیشرفته‌تری را برای تشخیص و شناسایی مواد رادیواکتیو، تمایز بین چشمه‌های پرتوزای طبیعی و مصنوعی و ارائه بینش داده‌های بلادرنگ به تصمیم‌گیرندگان و تیم‌های پاسخ ارائه می‌دهند [111]].

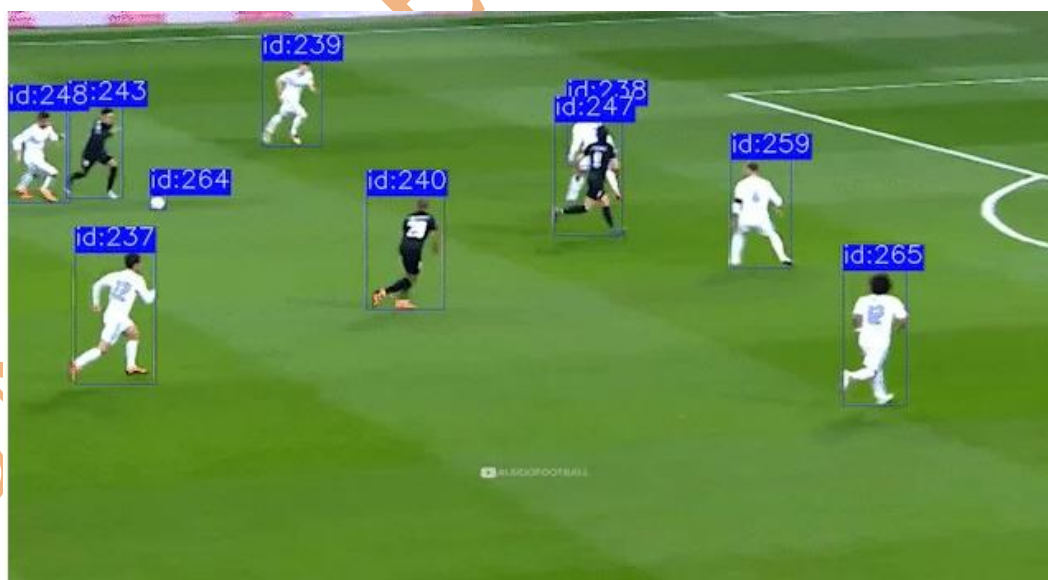
ادغام یک سیستم آشکارسازی هسته‌ای با فناوری‌های جدید برای افزایش قابلیت‌های آن، بهبود دقت و امکان تشخیص کارآمدتر و مؤثرتر مواد رادیواکتیو ضروری است [112]]. یکی از این فناوری‌ها که می‌تواند سیستم‌های تشخیص هسته‌ای را به طور قابل توجهی ارتقا دهد، سامانه‌های بینایی ماشین است. سیستم‌های بینایی ماشین از دوربین‌ها، حسگرها و الگوریتم‌های پردازش تصویر برای بازرسی و تحلیل بصری اشیاء یا محیط‌ها در زمان واقعی استفاده می‌کنند [113]]. هنگامی که برای امنیت هسته‌ای به کار می‌رود، سیستم‌های بینایی ماشین می‌توانند ابزار ارزشمندی را در مقابله با تهدیدات بالقوه، ناهنجاری‌ها یا فعالیت‌های مشکوک مربوط به مواد رادیواکتیو ارائه دهند. با گنجاندن سیستم‌های بینایی ماشین در سیستم‌های آشکارسازی هسته‌ای، کارکنان می‌توانند از قابلیت‌های تصویربرداری پیشرفته‌ای بهره‌مند شوند که امکان شناسایی چشمه رادیواکتیو پنهان، نظارت بر سطوح تابش در محیط‌های شلوغ، و ردیابی مواد رادیواکتیو در سناریوهای پیچیده را ممکن می‌سازد [114]]. سیستم‌های بینایی

متعدد مواد رادیواکتیو، استفاده نادرست یا مفقود شدن آن‌ها می‌تواند خطرات جدی برای جامعه و محیط‌زیست ایجاد کند [113]]. پرتوگیری تصادفی از پرتوهای یون‌ساز می‌تواند منجر به خطرات حاد و مزمن برای سلامتی شود، از سوختگی ناشی از پرتوگیری و بیماری گرفته تا افزایش بروز سرطان [114]]. علاوه بر این، اگر مواد رادیواکتیو گم یا به سرقت برده شوند، می‌توانند به طور بالقوه برای اهداف مخربی مانند تروریسم هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرند که منجر به عواقب مخربی برای سلامت و ایمنی عمومی می‌شود [115]]. اهمیت سامانه‌های آشکارسازی قوی و پیشرفته برای مواد رادیواکتیو خارج از کنترل را نمی‌توان در کاهش خطرات مرتبط با حضور غیرمجاز آن‌ها و مدیریت حوادث پرتوی نادیده گرفت [116]].

سامانه‌های آشکارسازی پرتوی با شناسایی و نظارت بر حضور پرتوهای یون‌ساز در محیط، نقش مهمی در حفظ سلامت و ایمنی عمومی ایفا می‌کنند [117]]. این دستگاه‌ها از فناوری‌ها و روش‌های پیشرفته برای آشکارسازی، اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل سطوح پرتوی استفاده می‌کنند و پاسخ به موقع به تهدیدات احتمالی را ممکن می‌سازند و از رعایت مقررات ایمنی اطمینان می‌دهند. یکی از انواع رایج سامانه‌های آشکارسازی پرتوی، شمارنده گایگر-مولر است که با اندازه‌گیری پالس‌های الکتریکی تولید شده در هنگام اندرکنش پرتو با محفظه پر از گاز دستگاه، پرتوهای یون‌ساز را تشخیص می‌دهد. شمارشگرهای گایگر مولر به طور گسترده برای بررسی پرتوها، دزیمتری کارکنان، و نظارت بر سطوح پرتوی در تأسیسات هسته‌ای و مقررات محیطی استفاده می‌شود. یکی دیگر از فناوری‌های کلیدی در دستگاه‌های آشکارسازی پرتوی، آشکارسازهای سوسوزن هستند که از مواد سوسوزن برای تبدیل تابش ورودی به پالس‌های نوری استفاده می‌کنند. این آشکارسازها به انواع مختلف تابش حساس هستند و به دلیل حساسیت و دقت بالا در تشخیص سطوح پایین پرتوی معمولاً در تصویربرداری پزشکی، نظارت بر محیط‌زیست و کاربردهای امنیت هسته‌ای استفاده می‌شوند. علاوه بر این، دستگاه‌های تشخیص پرتوی مدرن اغلب دارای قابلیت‌های طیف‌سنجی مانند طیف‌سنجی گاما هستند که می‌توانند بین انواع مختلف ایزوتوپ‌های رادیواکتیو بر اساس سطوح انرژی مشخصه‌شان تمایز قائل شوند. آشکارسازهای طیف‌سنجی با تجزیه و تحلیل طیف پرتو گاما گسیلی از چشمه‌های

تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده و مکانیسم‌های پاسخ تطبیقی را امکان‌پذیر می‌کنند و به کارکنان امنیتی اجازه می‌دهند تا تهدیدات امنیت هسته‌ای را با سرعت و دقت به طور فعال شناسایی کرده و به آن‌ها پاسخ دهند. با استفاده از فناوری‌های جدید در توسعه و یکپارچه‌سازی سیستم‌های تشخیص هسته‌ای، ذینفعان می‌توانند به طور مؤثر اقدامات امنیتی هسته‌ای را تقویت کنند، خطرات مرتبط با مواد رادیواکتیو را کاهش دهند و ایمنی و امنیت کلی را در صنایع و محیط‌های مختلف افزایش دهند. پذیرش فناوری‌های پیشرفته نه تنها قابلیت‌های سیستم‌های تشخیص هسته‌ای را بهبود می‌بخشد، بلکه رویکردی فعال‌تر و جامع‌تر به امنیت هسته‌ای، محافظت در برابر تهدیدات احتمالی و تضمین حفاظت از افراد، جوامع و محیط‌زیست را ممکن می‌سازد [116]. تصویر نشان داده شده در شکل ۱ یک نماگرفت از یک سیستم نظارت تصویری با ویژگی‌های ردیابی خودکار است که چندین شیء و فرد را شناسایی و ردیابی می‌کند. این سامانه‌ها به طور کلی متشکل از یک دوربین نظارتی می‌باشند که به الگوریتم‌های پردازش تصویر و ردیابی اشیا مجهز شده‌اند. کادرهای هم‌شکل با درج اعداد روی تصویر قرار گرفته‌اند که هر کدام، یک شناسه ردیابی منحصر به فرد برای هر شیء یا شخص را نشان می‌دهند.

ماشین‌های همچنین می‌توانند غربالگری سریع افراد، وسایل نقلیه و محموله‌ها را از نظر آلودگی رادیواکتیو تسهیل کنند و در نتیجه اقدامات امنیتی را در گذرگاه‌های مرزی، بندر، فرودگاه‌ها و سایر نقاط زیرساختی حیاتی افزایش دهند. علاوه بر این، ادغام الگوریتم‌های تحلیل پیچیده در سیستم‌های تشخیص هسته‌ای می‌تواند قابلیت‌های تشخیص و فرآیندهای تصمیم‌گیری آن‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. این الگوریتم‌ها می‌توانند مقادیر زیادی از داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط آشکارسازهای پرتوی متعدد، دستگاه‌های طیف‌سنجی و سایر حسگرها را پردازش کنند و سیستم را قادر می‌سازند الگوها، روندها و ناهنجاری‌هایی را که نشان‌دهنده تهدیدات بالقوه امنیت هسته‌ای هستند، شناسایی کند. الگوریتم‌های تحلیل همچنین می‌توانند به، طبقه‌بندی مواد رادیواکتیو و پیش‌بینی خطرات بالقوه بر اساس داده‌های تاریخی و مدل‌سازی پیش‌بینی کمک کنند [115]. علاوه بر سیستم‌های بینایی ماشین و الگوریتم‌های تحلیل، ادغام سایر فناوری‌های پیشرفته مانند هوش مصنوعی، یادگیری عمیق و محاسبات ابری، می‌تواند عملکرد آشکارسازی مواد رادیواکتیو و مواد هسته‌ای را افزایش دهد. این فناوری‌ها تجزیه و تحلیل داده‌های بلادرنگ،



شکل ۱- نمونه‌هایی از صحنه‌های دوربین‌ها در حالی که الگوریتم‌های بینایی ماشین چندین کاراکتر مشابه را ردیابی می‌کنند [117].

برای طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله امنیت هسته‌ای،

در صنعت هسته‌ای، بینایی ماشین پتانسیل قابل توجهی

را در یک محیط شلوغ، تقلید از رفتارهای مشاهده شده در سناریوهای دنیای واقعی، بر عهده خواهد داشت.

۲- استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر روش بینایی ماشین برای استخراج داده‌های مکانی و مقایسه آن با داده‌های واقعی مسیر حرکت. الگوریتم‌های بینایی ماشین برای استخراج داده‌های مکانی از سناریوی پویا ایجاد شده در مرحله قبل استفاده خواهند شد؛ که شامل استفاده از تکنیک‌هایی مانند روش ردیابی Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) برای ردیابی حرکت شخصیت‌ها و اختصاص شماره‌های شناسایی منحصر به فرد به هر کاراکتر برای اهداف ردیابی باشد. سپس داده‌های مکانی استخراج شده با داده‌های مسیر حرکت واقعی مقایسه می‌شود تا دقت و اثربخشی رویکرد ردیابی مبتنی بر بینایی ماشین را تحلیل کند [۱۲۲].

۳- تعریف سناریوی پرتوی با مدل‌سازی با کدهای ترابرد پرتوی است. در این مرحله مدل‌سازی محیط‌هایی که در آن ماده رادیواکتیو حضور دارد با استفاده از کدهای ترابرد پرتوی تعریف می‌شود. این فرآیند شامل توسعه کد، استخراج داده‌ها از سناریوی پرتوی شبیه‌سازی شده، شمارش پرتوهای گسیل شده از ماده رادیواکتیو و دسته‌بندی آن‌ها بر اساس ویژگی‌هایشان است. هدف ایجاد یک شبیه‌سازی حادثه پرتوی واقعی است که می‌تواند برای اهداف مختلف مربوط به آشکارسازی و پایش پرتوی تجزیه و تحلیل و مطالعه شود.

۴- در این مرحله الگوریتم‌هایی برای ایجاد همپوشانی نقشه شمارش پرتوی و تصاویر به دست آمده از ردیابی با روش بینایی ماشین توسعه می‌یابد و کاراکترهای مؤثر در ایجاد بخش‌های بیشینه در نقشه پرتوی شناسایی می‌شوند.

۵- اتخاذ تصمیم نهایی و شناسایی منبع رادیواکتیو خارج از کنترل: مرحله نهایی شامل تصمیم‌گیری آگاهانه بر اساس داده‌های یکپارچه از ردیابی و شبیه‌سازی پرتوی مبتنی بر بینایی ماشین است. با استفاده از اطلاعات ترکیبی از ردیابی مکانی و نقشه پرتوی و اشتراک‌گیری میان نتایج از چند تصویر همپوشانی شده، شیء آلوده به ماده پرتوزا، شماره و موقعیت تشخیص داده می‌شود. روش معرفی شده یک فرآیند ساده و سریع برای شناسایی مواد رادیواکتیو خارج از کنترل در مکان‌های پویا و پر ازدحام پیشنهاد می‌کند.

ایمنی و کارایی عملیاتی دارد. بینایی ماشین را می‌توان به روش‌های زیر در بخش هسته‌ای مورد استفاده قرار داد [۱۱۸]:

➤ امنیت هسته‌ای: سیستم‌های بینایی ماشین را می‌توان برای بازرسی و نظارت بصری تأسیسات هسته‌ای، امنیت محیطی و مناطق حساس به منظور شناسایی دسترسی‌های غیرمجاز، نفوذها یا فعالیت‌های مشکوک مستقر کرد [۱۱۹].

➤ نظارت پرتوی: فناوری بینایی ماشین می‌تواند سیستم‌های تشخیص پرتوی را با ارائه تصاویر نسبت به مناطقی که مواد رادیواکتیو در آنجا نگهداری یا ذخیره می‌شوند، تکمیل کند و نظارت و تجزیه و تحلیل در زمان واقعی چشمه‌های پرتوزا و آلودگی بالقوه را تسهیل کند.

➤ مدیریت پسماند رادیواکتیو: بینایی ماشین می‌تواند در شناسایی، دسته‌بندی و جایجایی پسمان رادیواکتیو، حصول اطمینان از طبقه‌بندی مناسب، مدیریت و دفع مطابق با الزامات قانونی کمک کند [۱۲۰].

➤ بازرسی از راه دور: سیستم‌های بینایی ماشین می‌توانند بازرسی بصری از راه دور تأسیسات، تجهیزات و زیرساخت‌های هسته‌ای را فعال کنند و نیاز به مداخله دستی در محیط‌های بالقوه خطرناک و ریسک پرتوگیری کارکنان را کاهش دهند [۱۲۱].

هدف در این مطالعه ارائه راهکار بهینه و کارآمد برای کشف ماده رادیواکتیو متحرک و خارج از کنترل در سناریوی پرتوی پر ازدحام است. این مطالعه از چندین بخش تشکیل شده است.

۱- تعریف الگوریتم ایجاد یک سناریوی پویای پر ازدحام که در آن کاراکترهای مشابه به طور تصادفی در کنار یکدیگر حرکت می‌کنند. در این بخش از مطالعه، الگوریتمی برای شبیه‌سازی یک سناریوی پویا طراحی می‌شود که در آن شخصیت‌ها (نماینده موجودات یا اشیاء) الگوهای حرکتی الهام‌گرفته از ربات‌های چرخ‌دار را نشان می‌دهند. این الگوریتم وظیفه ایجاد حرکات تصادفی برای این شخصیت‌ها

این روش بر سناریوهای شلوغ که لایه‌ای از پیچیدگی بالایی دارند و نیاز به روش‌های تشخیص قوی در محیط‌های شلوغ و پرجمعیت دارند را برطرف می‌کند. به طور کلی، نوآوری در این مطالعه در ترکیب نوآورانه بینایی ماشین، شمارش پرتوی، تمرکز بر سناریوهای شلوغ و تأکید بر روش‌های سریع و کارآمد برای ردیابی و کاوش مواد رادیواکتیو خارج از کنترل نهفته است.

۲- پیشینه پژوهش

در صنایعی مانند بازرسی، کنترل کیفیت و آزمایش‌های غیر مخرب، سیستم‌های بینایی ماشین جایگزینی مقرون‌به‌صرفه برای نیروی انسانی ارائه می‌دهند. این سیستم‌ها برای طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله تشخیص امضا و دست خط، تشخیص اشیا و الگو، بازرسی ارز و مواد، تجزیه و تحلیل تصویر پزشکی و امنیت و دفاع استفاده می‌شوند. کارایی و دقت تصمیمات اتخاذ شده توسط سیستم‌های بینایی ماشین به شدت به کیفیت داده‌هایی که دریافت می‌کنند وابسته است [۲۳ و ۱۲۴]. برای اجرای بینایی ماشین، الزامات پروژه باید به دقت برنامه‌ریزی شود و راه‌حل مناسب ارائه شود [۲۹-۱۲۵]. در صنعت هسته‌ای، سامانه‌های بینایی ماشین برای بهبود کیفیت تصویر در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای و بازرسی رآکتورها استفاده می‌شوند [۱۳۰]. آن‌ها می‌توانند خوردگی و ترک در خطوط لوله را تشخیص دهند و ایمنی کلی را افزایش دهند [۱۳۱]. سامانه‌های بینایی ماشین همچنین در شناسایی چشمه‌های پرتوزا با استفاده از انواع مختلف ربات‌ها مؤثر بوده‌اند [۱۳۲]. هانسون و همکاران از یک نمونه اولیه ربات مجهز به دوربین هوشمند ساخت شرکت آمریکایی Cognex استفاده کردند. هدف محققان ارائه راه‌حلی بود که از کنترل بینایی رباتیک برای بهبود عملیات در یک رآکتور هسته‌ای بهره می‌برد [۱۳۳]. در یک مطالعه جداگانه توسط بانداسترا^۲ و همکاران، مفهوم ادغام یک سیستم بینایی ماشین با یک سیستم آشکارسازی پرتوی گاما با ابعاد 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 یک مترمربعی متشکل از ۱۰۰

آشکارساز یدور سدیم 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 [۱۳۴]. هوو و همکاران استراتژی به نام ACA را معرفی کردند که از یک شبکه عصبی کانولوشن^۳ برای تقریب موقعیت یک چشمه رادیواکتیو و یک الگوریتم A*^۴ 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^۵ به دست آمده است. هنگامی که کاوشگر به منطقه جستجو می‌رسد، مدل شبکه مکان چشمه را پیش‌بینی می‌کند و الگوریتم A*^۴ مسیر جستجو را ایجاد می‌کند. جستجو به صورت مکرر ادامه می‌یابد تا زمانی که چشمه‌ها پیدا شوند [۳۵]. 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. [۱۳۶]. مطالعه توسط استوس^۵ و همکاران یک مدل بیزی را نشان می‌دهد که از داده‌های به دست آمده توسط شبکه‌ای از آشکارسازهای پرتو برای ردیابی حرکت یک چشمه پرتوزا استفاده می‌کند [۱۳۷]. 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 در این مطالعه، سیستم تصویربرداری خودروهای عبوری را شناسایی کرده و در صورت آلوده بودن آن‌ها به مواد پرتوزا، اطلاعات آن‌ها را ثبت می‌کند. [۱۳۸].

۳- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نرم‌افزار MATLAB و کد مونت کارلو MCNPX برای توسعه همه الگوریتم‌ها و مدل‌سازی محیط و تجزیه و تحلیل آن‌ها استفاده شد. استفاده از این ابزارها امکان یک رویکرد جامع را برای توسعه الگوریتم، شبیه‌سازی و ارزیابی در مطالعه فراهم کرد. در اینجا نقش هر یک از ابزارها در تحقیق توضیح داده شده است. MATLAB به عنوان

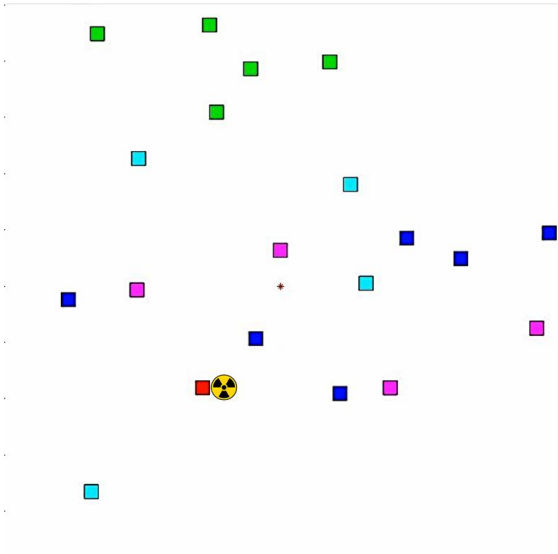
² Bandstra

³ Convolutional neural network (CNN)

⁴ Monte Carlo (MC)

⁵ Osthus

شکل ۲- تصویری از مبنای جمعی ربات‌های تیمیو [1۳۹]].
تصویر خروجی الگوریتم در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- تصویری از سناریوی دینامیک پر ازدحام

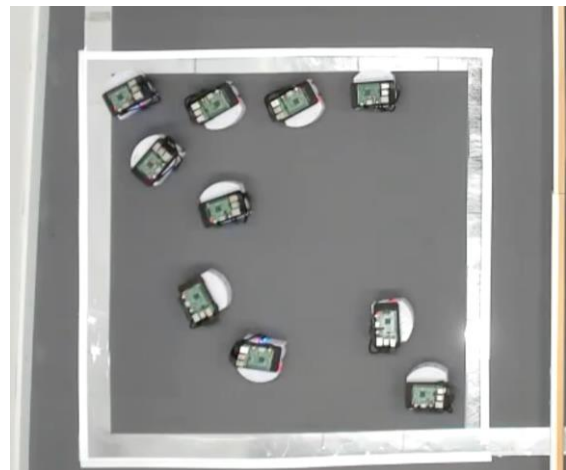
۲-۳- الگوریتم ردیابی اشیای هم‌شکل

همان‌گونه که بیان گردید در این مطالعه برای ردیابی اشیای هم‌شکل از روش بینایی ماشین مبتنی بر الگوریتم کاناد-لوکاس-توماسی استفاده شد. 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 [1۴۰]. این روش به ویژه برای ردیابی اشیای در فیلم‌های ویدئویی مفید است، زیرا می‌تواند حرکت و تغییرات موقعیت یک شیء 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. یکی از مزایای کلیدی روش KLT توانایی آن در سازگاری با تغییرات داده‌های تصویر در طول زمان است. این روش می‌تواند اشیای را حتی در صورت حرکت یا تغییر شکل، با به‌روزرسانی بردارهای ویژه و مقادیر ویژه با جمع‌آوری داده‌های جدید، ردیابی کند. در این الگوریتم برای هر جسم متحرک یک شماره شناسایی در نظر گرفته شد که این شماره شناسایی برای مکان‌یابی هر شیء دخیل در سناریو در هر زمان بسیار

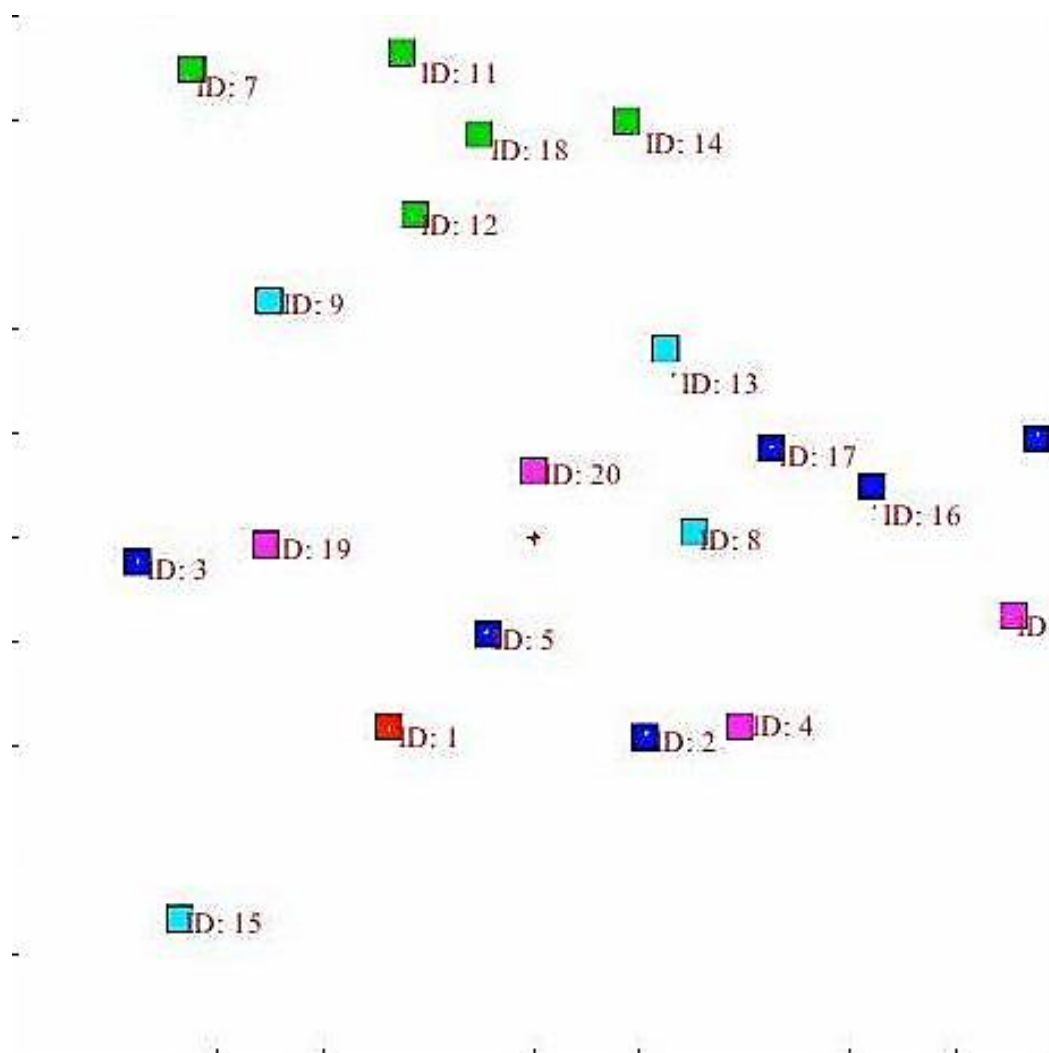
محیط برنامه‌نویسی اولیه برای توسعه الگوریتم، پردازش داده‌ها و تجسم عمل کرد. توابع و جعبه‌ابزارهای مختلف موجود در MATLAB برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های ردیابی، پردازش داده‌های به دست آمده از سیستم‌های بینایی ماشین و تجزیه و تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. تطبیق پذیری متلب در محاسبات عددی، پردازش تصویر و اجرای الگوریتم در ایجاد و آزمایش الگوریتم‌هایی برای ردیابی و تجزیه و تحلیل مواد رادیواکتیو در سناریوهای شلوغ بسیار مؤثر بود. کد MCNPX مونت کارلو برای شبیه‌سازی انتقال ذرات پرتوی و مدل‌سازی اندرکنش آن‌ها با محیط استفاده شد. با اجرای شبیه‌سازی‌های مونت کارلو با استفاده از MCNPX، می‌توان سناریوهای واقعی از انتشار پرتوی را تولید کنند، آهنگ دوز را محاسبه نمود و رفتار مواد رادیواکتیو را در محیط‌های پویا را ارزیابی کرد.

۳-۱- الگوریتم سناریوی دینامیک پر ازدحام

در این مرحله، یک الگوریتم ایجاد محیط پویا برای جابجایی حرکت ۲۰ جسم با شکل یکسان توسعه داده شد. این الگوریتم یک شبیه‌سازی نمایشی از مربع‌های متحرک در رنگ‌های مختلف ایجاد می‌کند که پس از یک بازه زمانی خاص رفتار و حرکت آن‌ها در کنار یکدیگر به صورت یک فایل ویدئویی ذخیره می‌شود. موقعیت‌ها و سرعت‌های مربع‌ها مقداردهی اولیه می‌شوند و به طور مداوم در طول شبیه‌سازی به روز می‌شوند. با اجرای معادلات و محدودیت‌ها در الگوریتم، از برخورد بین مربع‌ها جلوگیری می‌شود و رفتار آن‌ها رفتار ربات‌های تیمیو در هنگام برخورد با موانع و تقابل با یکدیگر را منعکس می‌کند. به روشی مشابه، مربع‌ها از طریق حسگرهای مادون قرمز با یکدیگر تعامل دارند تا از اختلال در حرکات یکدیگر جلوگیری کنند. تصویری از حرکت این ربات‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.



مفید است. لذا برای ۲۰ کاراکتر کدهای شناسایی ۱ تا ۲۰ به صورت ID:1 تا ID:20 تعریف گردید.



شکل ۴ - اختصاص شماره شناسایی به هر کاراکتر جهت ردیابی

شناسایی قفل شده بر روی هر کدام از آن‌ها نیز بر همراه با آن‌ها جابجا می‌گردد و مختصات‌های دو بعدی 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.

۳-۳- شبیه‌سازی سناریوی پرتوی با کد

مونت کارلو

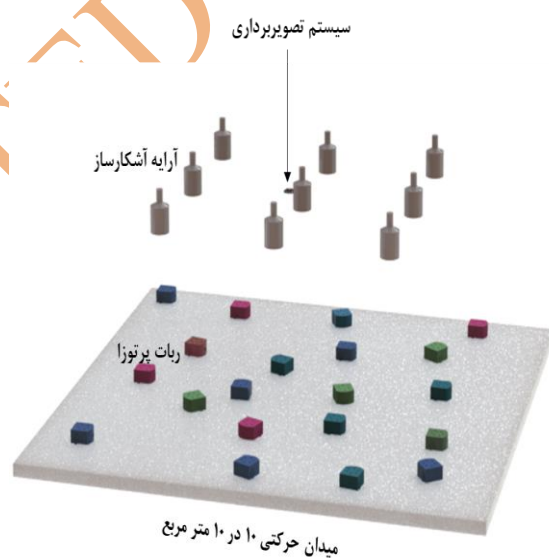
شکل ۴ عملکرد الگوریتم مبتنی بر روش KLT در ردیابی اشیا و تعیین نقشه حرکتی آن‌ها را نشان می‌دهد. برای این منظور فایل ویدیویی تولید شده به عنوان ورودی به این الگوریتم داده می‌شود. در ابتدا الگوریتم فریم اول این فایل ویدیویی را دریافت و مختصات مکانی هر یک از مربع‌ها که معادل با یک ربات تیمیو هستند را تشخیص می‌دهد و یک شماره شناسایی بر روی هر کدام از آن‌ها قرار می‌دهد. الگوریتم موقعیت مکانی دو بعدی اولیه نیز بر روی هر یک از کاراکترها را نشان می‌دهد. با حرکت کاراکترها، شماره

می‌شود، قابل توجه است. انرژی گسیلی توسط کبالت-۶۰ عمدتاً به شکل پرتوهای گامای پراثری است که دو انرژی فوتون گامای اصلی تقریباً $1/17$ مگا ولت و $1/33$ مگا ولت دارند. این انرژی به کبالت-۶۰ اجازه می‌دهد تا به طور مؤثر در مواد نفوذ کند و آن را برای درمان‌های پزشکی ارزشمند می‌کند. در زمینه‌های صنعتی، تابش گامای کبالت-۶۰ در پرتونگاری برای بازرسی جوش‌ها و یکپارچگی ساختاری در مواد مختلف استفاده می‌شود. توانایی آن در ارائه یک چشمه رادیواکتیو ثابت و کنترل شده، همراه با نیمه عمر نسبتاً قابل کنترل آن $5/27$ سال، کبالت-۶۰ را به گزینه‌ای قابل اعتماد برای بسیاری از کاربردهایی که نیاز به سپارش و نفوذ دقیق انرژی دارند تبدیل می‌کند. با این حال، بکارگیری این چشمه پرکاربردن به اقدامات ایمنی سخت‌گیرانه در جهت کاهش پرتوگیری نیاز دارد.

برای مدل‌سازی سناریوی پرتوی از کد مونت‌کارلوی MCNPX استفاده شد [۴۱]. برای این منظور 3000 برنامه برای موقعیت‌های مختلفی که ربات‌ها به صورت حرکت پیوسته برای ربات قرمز رنگ نشان داده شده در شکل ۴ در میان دیگر اشیای متحرک نوشته شد. ربات قرمز با شماره شناسایی ۱ به عنوان ربات آلوده به ماده پرتوزا فرض شد. لذا سناریوی پرتوی برای آن تعریف گردید. برای آشکارسازی پرتوهای گسیل شده از این ربات در طی مسیر حرکتش از ۹ آشکارساز سوسوزن یدور سدیم با ابعاد 5 اینچ در موقعیت‌های منظم در هندسه استفاده شد. طرحی از هندسه در شکل ۵ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی از چشمه پرتوزای کبالت-۶۰ استفاده شد. کبالت-۶۰ به دلیل استفاده از آن در تولید پرتوهای گاما که در کاربردهای مختلف، عمدتاً در زمینه‌های پزشکی و صنعتی، استفاده



ب



الف

شکل ۵- طرح سه‌بعدی از هندسه مدل‌سازی شده (الف) نمای وجهی، (ب) نمای بالایی

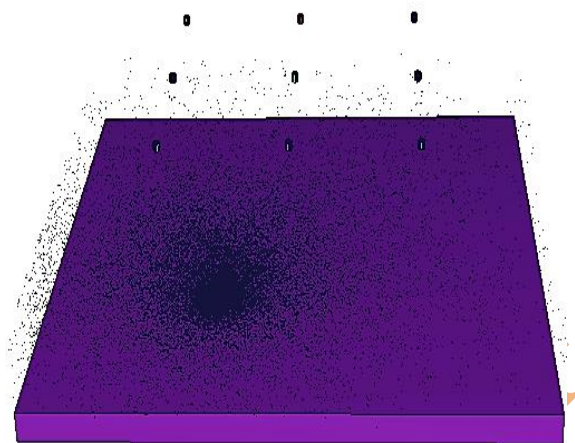
نمایشی از خروجی کد پرتوی نیز در شکل ۶ نشان داده شده است که گسیل ذرات از چشمه را نمایش می‌دهد.

این ناحیه از ۹ آشکارساز سوسوزن استفاده شد. آشکارسازها به گونه‌ای چیده شدند که یک ساختار ۳ در ۳ را تشکیل دهند و فاصله آشکارسازهای هر ردیف با یکدیگر یکسان باشد. از این رو ناحیه پوشش هر آشکارساز یکسان و به مساحت $\frac{10}{3} \times \frac{10}{3}$ مترمربع است که طرحی از ناحیه بندی در شکل ۷ نشان داده شده است.

۳-۴- الگوریتم همپوشانی تصاویر نقشه پرتوی و

تصاویر ردیابی اشیا

در این بخش از الگوریتم همپوشانی تصاویر نقشه پرتوی و تصاویر ردیابی کاراکترها استفاده شد. در شکل ۸ فلوچارت 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 ویدئویی مرحله اول و ثبت داده‌های مکانی ردیابی شده؛ مقایسه موقعیت‌های مکانی اصلی و موقعیت‌های مکانی ردیابی شده با الگوریتم مبتنی بر روش KLT؛ بهره‌گیری از موقعیت مکانی کاراکتر قرمز در طراحی سناریوی پرتوی با کد مونت کارلو؛ استخراج خروجی کد مونت کارلو به صورت شمارش ثبت شده در آشکارسازها به ازای هر موقعیت؛ و در نهایت بهره‌گیری از روش برهم‌نهی تصاویر مکانی-نقشه پرتوی شمارش و داده‌های موقعیت مکانی برای مکان‌یابی چشمه‌های پرتوهای متحرک در میان سایر اجسام را نشان می‌دهد.

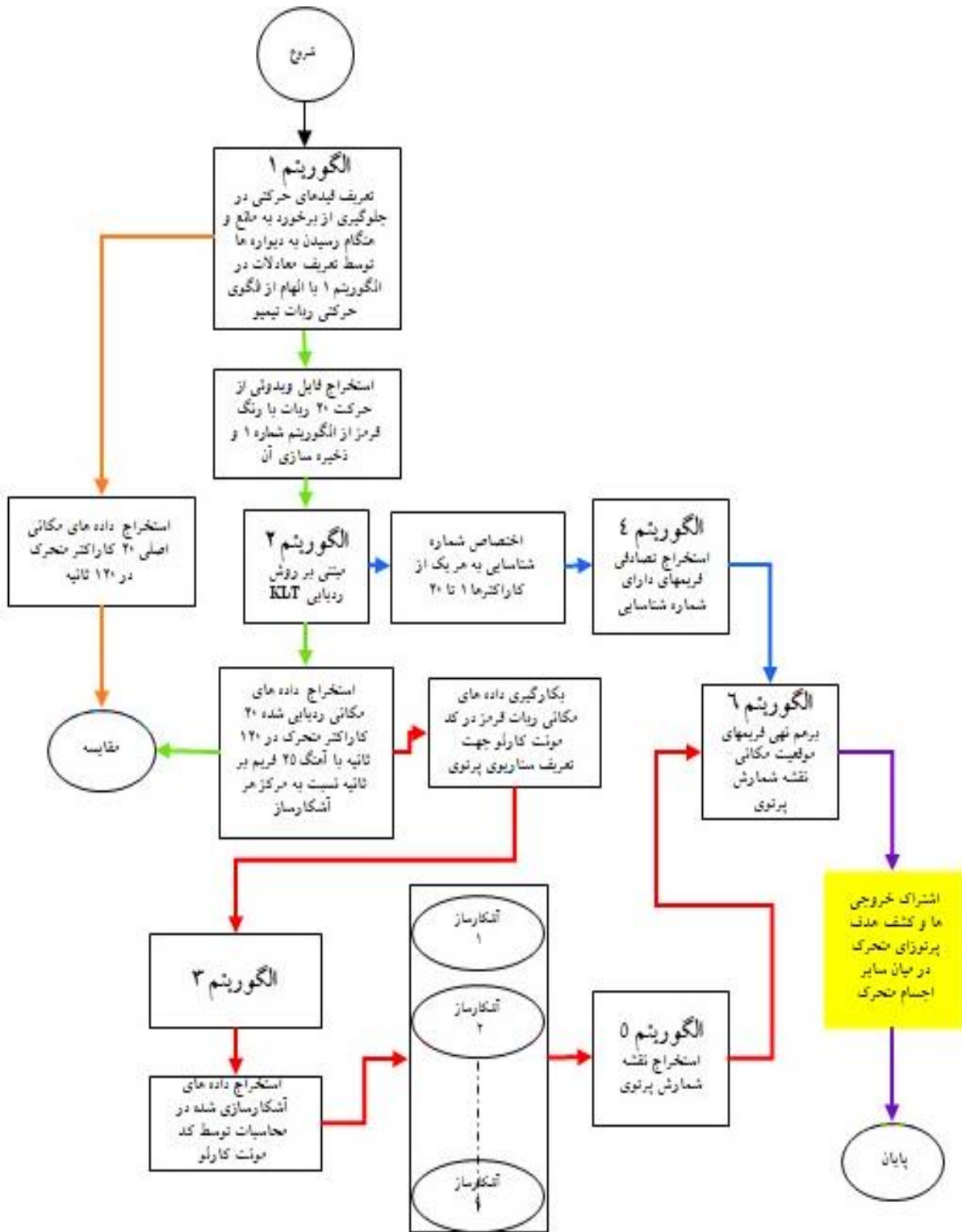


شکل ۶- تصویری از گسیل ذرات در فضای شبیه‌سازی شده اتاق به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ مترمکعب

• ناحیه ۳	• ناحیه ۲	• ناحیه ۱
• ناحیه ۶	• ناحیه ۵	• ناحیه ۴
• ناحیه ۹	• ناحیه ۸	• ناحیه ۷

شکل ۷- نحوه ناحیه بندی محیط آزمون

مساحت مورد نظر جهت ردیابی و کشف ماده پرتوزا به ابعاد 10 در 10 مترمربع در نظر گرفته شده است. برای پایش



شکل ۸- تصویری از گسیل ذرات در فضای شبیه سازی شده اتاق به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ مترمکعب

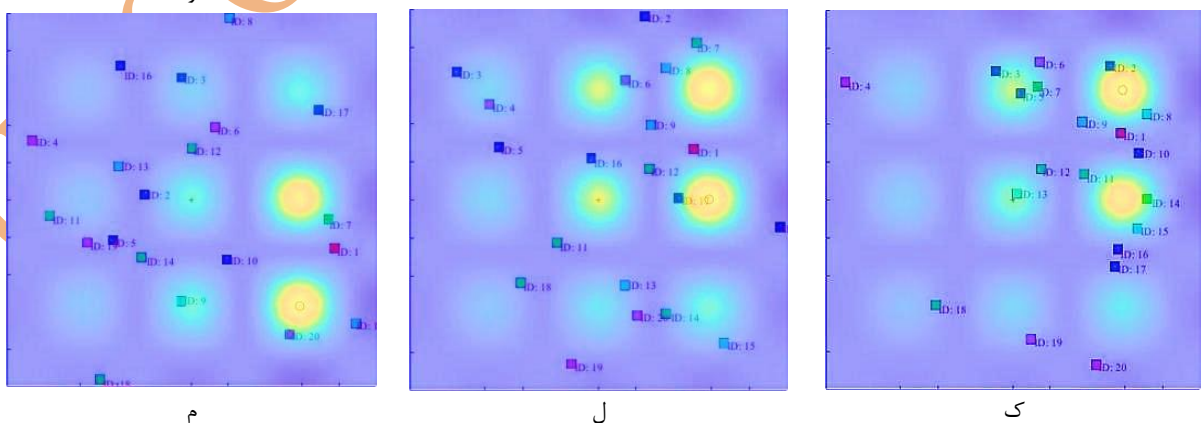
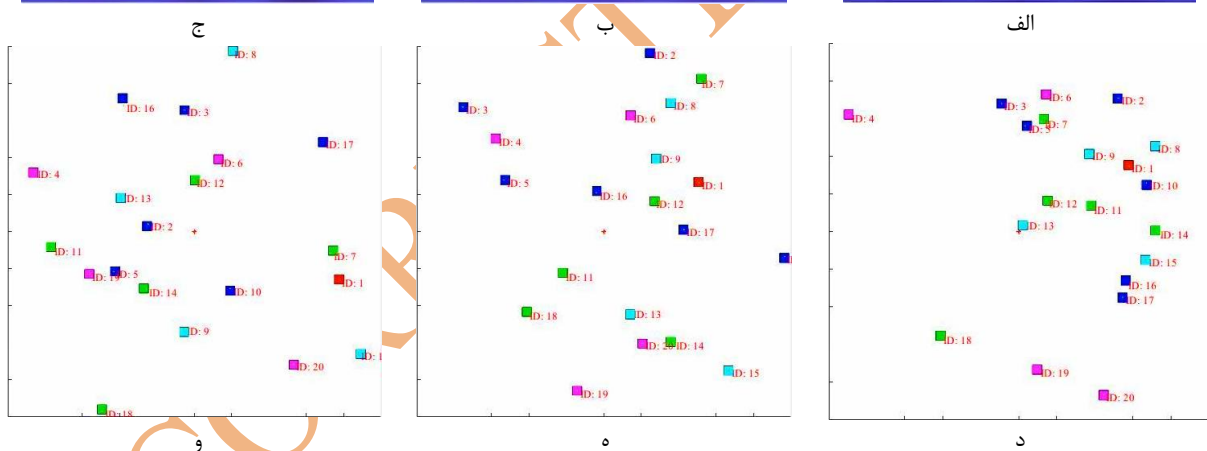
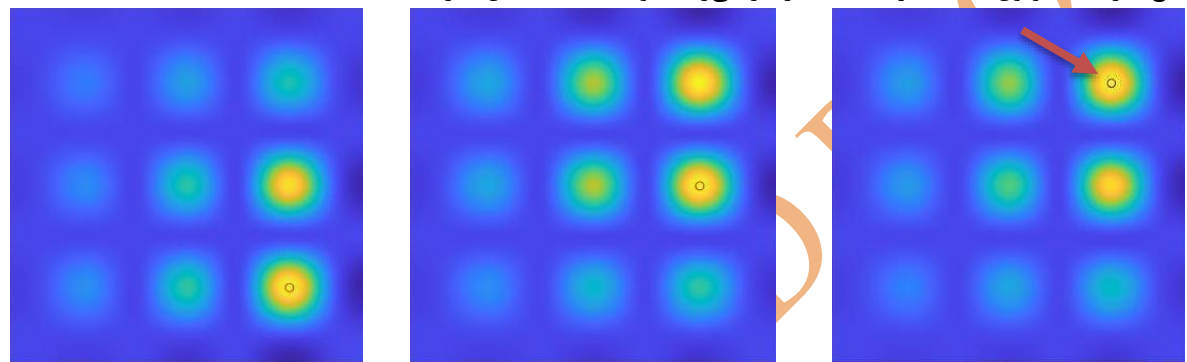
۴- نتایج

از ادغام نتایج مربوط به نقشه شمارش پرتوی و تصاویر مربوط به فریمهای موقعیت مکانی هر یک از کاراکترها موقعیت شیء آلوده به ماده پرتوزا کشف گردید و شماره شناسایی مربوط به آن مشخص گردید. نتایج مربوط به

همپوشانی تصاویر نقشه پرتوی و موقعیت مکانی اشیا در شکل ۹ نشان داده شده است. از ۳۰۰۰ فریم مربوط به حرکت جمعی رباتها در کنار یکدیگر سه فریم به صورت دلخواه انتخاب گردید. در این سه فریم دایره کوچک مستقر در مرکز یکی از نواحی ۱ تا ۹ قرار دارد مشاهده می شود

در نتیجه قرائت‌ها کمتر می‌شود. برعکس، زمانی که چشمه رادیواکتیو به آشکارساز نزدیک‌تر می‌شود، شدت پرتوی ثبت شده افزایش می‌یابد. ذرات یا فوتون‌های بیشتری به آشکارساز می‌رسند که منجر به ثبت شمارش بیشتر می‌شود. این تغییر در شدت می‌تواند به اندازه‌گیری فاصله تا منبع یا ارزیابی سطح فعالیت آن کمک کند. میزان بیشینه شمارش ثبت شده در هر آشکارساز نسبت به سایر آشکارسازها بدین معنی است شیء آلوده به ماده پرتوزا نزدیک به آشکارسازی است که بیشینه را ثبت کرده و در همان ناحیه‌ای قرار دارد که مقدار بیشینه ثبت شده است (شکل ۷ را ببینید).

(بردار قرمز). این دایره کوچک نشان‌دهنده بیشینه مقداری است که در آشکارساز در میان سایر آشکارسازها ثبت شده است یا به عبارت دیگر یکی از این در فریم اول میزان شمارش در آشکارساز ناحیه ۱، در فریم ب شمارش در آشکارساز مستقر در ناحیه ۴ و در نهایت در فریم ج آشکارساز مستقر در ناحیه ۷ بیشینه شمارش را ثبت نموده است. هنگامی که چشمه رادیواکتیو از آشکارساز دور می‌شود، شدت پرتوی ثبت شده کاهش می‌یابد. این به دلیل قانون مربع معکوس است که بیان می‌کند که شدت تابش با مجذور فاصله از چشمه کاهش می‌یابد. با دورتر شدن منبع، ذرات یا فوتون‌های کمتری به آشکارساز می‌رسند و



شکل ۹: ادغام تصاویر نقشه شمارش - موقعیت مکانی

مربوط به ناحیه ۷ کاراکترهای ۱، ۲۰ و ۱۵ ممکن است آلوده باشند. پس از بررسی شماره شناسایی‌های مشکوک می‌توان از طریق اشتراک شماره‌ای که میان نواحی ۱، ۴ و ۷ وجود دارد مشخص کرد که کاراکتر آلوده به ماده پرتوزا دارای شماره شناسایی ۱ است که در تمان نواحی با شمارش بیشینه حضور دارد.

پس از روی هم قرار دادن تصاویر شکل ۹ الف تا ج بر روی تصاویر شکل ۹ ه) و ز) نتایج مربوط در تصاویر شکل ۹ ک، ل و م نشان داده شده است. در مرحله اول کاراکترهایی با شماره شناسایی ۱، ۲، ۸، ۹ و ۱۰ مشکوک به آلودگی هستند و در تصویر بعدی مربوط به ناحیه ۴ کاراکترهایی با شماره شناسایی ۱، ۱۲، ۱۷ و ۱۰ مشکوک بوده و در تصویر نهایی

جدول ۱- تشخیص گام به گام ماده پرتوزا با توجه به بیشینه شدت پرتوی ثبت شده در آشکارسازهای نوحی ۹ گانه

شماره‌های فعال در ناحیه مورد نظر	اشتراک	شماره‌های فعال در ناحیه مورد نظر	اشتراک	شماره‌های فعال در ناحیه مورد نظر	اشتراک	شماره‌های فعال در ناحیه مورد نظر	اشتراک	شماره‌های فعال در ناحیه مورد نظر	اشتراک
ID:1	∩	ID:1	∩	ID:1	∩	ID:8	∩	ID:8	∩
ID:20		ID:10		ID:2					
ID:15		ID:12		ID:1					
		ID:17		ID:9					
				ID:8					

تسریع می‌سازد. علاوه بر این، با ساده‌سازی فرآیند شناسایی و ردیابی مواد رادیواکتیو خارج از کنترل در سناریوهای شلوغ نسبت به روش‌هایی که در آن‌ها از آشکارسازهای ایستا، متحرک و سامانه‌های تک یا چند آشکارسازی که الگوریتم ردیابی و کشف مواد رادیواکتیو در آن‌ها مبتنی بر روش‌های ریاضی و به طور غالب الگوریتم‌های همبستگی داده است و مستلزم گذر زمان بیشتر در پایش جهت ایجاد یک رابطه منطقی است سریع‌تر و کارآمدتر است... این رویکرد دارای پتانسیل خوبی برای افزایش قابلیت‌های واکنش اضطراری، به حداقل رساندن خطرات بالقوه برای سلامت انسان و محیط‌زیست و ارتقای ایمنی عمومی در خطرات بالا است. هم‌افزایی بین فناوری بینایی ماشین و نقشه پرتوی راه‌حلی مناسب برای رویارویی با چالش‌های ناشی از حضور مواد رادیواکتیو در فضاها را پر از دحام را ارائه می‌دهد و بر اهمیت استفاده از روش‌های پیشرفته برای مدیریت مؤثر و کاهش خطرات مرتبط تأکید می‌کند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

ادغام تصاویر سیستم بینایی ماشین با نقشه‌های شمارش پرتوی نشان‌دهنده یک رویکرد پیشرفته و بسیار مؤثر برای وظیفه حیاتی ردیابی و کاوش مواد رادیواکتیو خارج از کنترل در سناریوهای شلوغ است. این روش نوآورانه از قدرت فناوری پیشرفته برای ارائه ابزاری سریع، کارآمد و قابل‌اعتماد برای شناسایی، مکان‌یابی و مدیریت مواد رادیواکتیو در محیط‌های چالش‌برانگیز استفاده می‌کند. استفاده از این روش سریع و کارآمد نه تنها اثربخشی کلی نظارت و کنترل پرتوی را افزایش می‌دهد، بلکه پروتکل‌های ایمنی و امنیتی مرتبط با جابجایی مواد رادیواکتیو در محیط‌های پر ازدحام و پویا را نیز به طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. ادغام تصاویر بینایی ماشین و داده‌های شمارش پرتوی، فرآیندهای تصمیم‌گیری سریع را تسهیل می‌کند و مداخله پیشگیرانه و استراتژی‌های مهار در صورت تهدیدات مربوط به مواد رادیواکتیو را ممکن ساخته و عملیات را

- [1] Lowenthal, Gerhart, and Peter Airey. Practical applications of radioactivity and nuclear radiations. Cambridge university press, 2001.
- [2] Adamantiades, Achilles, and Ioannis Kessides. "Nuclear power for sustainable development: current status and future prospects." *Energy Policy* 37, no. 12 (2009): 5149-5166.
- [3] Eisenbud, Merrill, and Thomas F. Gesell. *Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources: from natural, industrial and military sources*. Elsevier, 1997.
- [4] Cember, Herman. "Introduction to health physics." (1969): xi+-422.
- [5] Alhassani, Nasser Ali Mohamed. "Terrorism and the Threat of Insecure Radioactive Material." (2017).
- [6] Johns, Russell E., and Mark Schanfein. "Nuclear Material Accounting and Control." In *Nuclear Safeguards, Security, and Nonproliferation*, pp. 157-229. Butterworth-Heinemann, 2019.
- [7] Ahmad, Muhammad Ikmal, Mohd Hafizi Ab. Rahim, Rosdiadee Nordin, Faizal Mohamed, Asma Abu-Samah, and Nor Fadzilah Abdullah. "Ionizing radiation monitoring technology at the verge of internet of things." *Sensors* 21, no. 22 (2021): 7629.
- [8] Knoll, Glenn F. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [9] EURO, POL. "Combating illicit trafficking in nuclear and other radioactive material." *IAEA Nuclear Security* 6 (2007): 3-12.
- [10] Onderco, Michal, and Madeline Zutt. "Emerging technology and nuclear security: What does the wisdom of the crowd tell us?." *Contemporary Security Policy* 42, no. 3 (2021): 286-311.
- [11] Seco, Joao, Ben Clasio, and Mike Partridge. "Review on the characteristics of radiation detectors for dosimetry and imaging." *Physics in Medicine & Biology* 59, no. 20 (2014): R303.
- [12] Vetter, Kai. "Multi-sensor radiation detection, imaging, and fusion." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 805 (2016): 127-134.
- [13] Golnabi, Hossein, and A. Asadpour. "Design and application of industrial machine vision systems." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23, no. 6 (2007): 630-637.
- [14] Bandstra, Mark S., Tim Aucott, Daniel H. Chivers, James Siegrist, and Kai Vetter. "The machine vision radiation detection system." In *2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, pp. 326-330. IEEE, 2011.
- [15] Morgan, Dane, Ghanshyam Pilania, Adrien Couet, Blas P. Uberuaga, Cheng Sun, and Ju Li. "Machine learning in nuclear materials research." *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 26, no. 2 (2022): 100975.
- [16] Wang, Shaohui, Ya Hou, Xuanhao Li, Xianli Meng, Yi Zhang, and Xiaobo Wang. "Practical implementation of artificial intelligence-based deep learning and cloud computing on the application of traditional medicine and western medicine in the diagnosis and treatment of rheumatoid arthritis." *Frontiers in pharmacology* 12 (2021): 765435.
- [17] <https://learnopencv.com/understanding-multiple-object-tracking-using-deepsort>
- [18] Tang, Chenwei, Caiyang Yu, Yi Gao, Jianming Chen, Jiaming Yang, Jiuling Lang, Chuan Liu, Ling Zhong, Zhenan He, and Jiancheng Lv. "Deep learning in nuclear industry: A survey." *Big Data Mining and Analytics* 5, no. 2 (2022): 140-160.
- [19] Doyle, James. *Nuclear safeguards, security and nonproliferation: achieving security with technology and policy*. Elsevier, 2011.
- [20] Chierici, Andrea, Salvatore Angelo Cancemi, Ernst Niederleithinger, and Rosa Lo Frano. "Enhanced radioactive waste drum monitoring: A sensorized LoRa-based network for identification and integrity assessment." *Nuclear Engineering and Design* 424 (2024): 113231.
- [21] Skilton, Robert Mark. "Autonomous visual inspection for generic defect detection in nuclear fusion facilities." PhD diss., University of Surrey, 2023.
- [22] Bian, Jiang. "Video trajectory analysis." PhD diss., 2019.
- [23] Davies, E. Roy. *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*. Academic Press, 2012.
- [24] Steger, Carsten, Markus Ulrich, and Christian Wiedemann. *Machine vision algorithms and applications*. John Wiley & Sons, 2018.
- [25] Huang, Chien-Yi, Jyun-Hong Hong, and Eric Huang. "Developing a machine vision inspection system for electronics failure analysis." *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 9, no. 9 (2019): 1912-1925.
- [26] Joshi, Keyur D., Vedang D. Chauhan, and Brian 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)*, pp. 26-29. 2016.

- [27] Dubey, Ashutosh Kumar, Abhishek Kumar, S. Rakesh Kumar, N. Gayathri, and Prasenjit Das, eds. *AI and IoT-based intelligent automation in robotics*. John Wiley & Sons, 2021.
- [28] Shen, Ying, and Weihua Zhu. "Medical image processing using a machine vision-based approach." *International journal of signal processing, Image processing and Pattern Recognition* 6, no. 3 (2013): 139-146.
- [29] Kosiba, David A., and Rangachar Kasturi. "Machine vision." In *Microelectronics*, pp. 19-1. CRC Press, 2018.
- [30] Luk, B. L., A. A. Collie, D. S. Cooke, and S. Chen. "Walking and climbing service robots for safety inspection of nuclear reactor pressure vessels." *Measurement and control* 39, no. 2 (2006): 43-47.
- [31] Schmutge, Stephen J., Lance Rice, N. Rich Nguyen, John Lindberg, Robert Grizzi, Chris Joffe, and Min C. Shin. "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)*, pp. 1-7. IEEE, 2016.
- [32] Ardiny, Hadi, Amirmohammad Beigzadeh, and Hojjat Mahani. "MCNPX simulation and experimental validation of an unmanned aerial radiological system (UARS) for rapid qualitative identification of weak hotspots." *Journal of Environmental Radioactivity* 258 (2023): 107105.
- [33] Marturi, Naresh, Alireza Rastegarpanah, Chie Takahashi, Maxime Adjigble, Rustam Stolkin, Sebastian Zurek, Marek Kopicki, Mohammed Talha, Jeffrey A. Kuo, and Yasemin Bekiroglu. "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)*, pp. 1-8. IEEE, 2016.
- [34] Benson, Austin R., Mark S. Bandstra, Daniel H. Chivers, Timothy Aucott, Ben Augarten, Cameron Bates, Adam Midvidy et al. "The gamma-ray imaging framework." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 60, no. 2 (2013): 528-532.
- [35] Huo, Jianwen, Xulin Hu, Junling Wang, and Li Hu. "ACA: Automatic search strategy for radioactive source." *Nuclear Engineering and Technology* 55, no. 8 (2023): 3030-3038.
- [36] Cooper, R. J., N. Abgrall, G. Aversano, M. S. Bandstra, D. Hellfeld, T. H. Joshi, V. Negut et al. "Networked sensing for radiation detection, localization, and tracking." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2586, no. 1, p. 012125. IOP Publishing, 2023.
- [37] Osthus, Dave, Paul Mendoza, Peter Lalor, Emily Casleton, Dan Archer, James Ghawaly, Irakli Garishvili, Andrew J. Rowe, Ian R. Stewart, and Michael Willis. "Tracking the location of a road-constrained radioactive source with a network of detectors." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1039 (2022): 166992.
- [38] Cazalas, Edward. "Defending cities against nuclear terrorism: Analysis of a radiation detector network for ground based traffic." *Homeland Security Affairs* 14 (2018).
- [39] <https://gitlab.itl.uni-luebeck.de/minimize-surprise/basic-swarm-behaviors-thymio/-/forks>
- [40] Tomasi, Carlo, and Takeo Kanade. "Detection and tracking of point." *Int J Comput Vis* 9, no. 137-154 (1991): 3.
- [41] Waters, Laurie S., Gregg W. McKinney, Joe W. Durkee, Michael L. Fensin, John S. Hendricks, Michael R. James, Russell C. Johns, and Denise B. Pelowitz. "The MCNPX Monte Carlo radiation transport code." In *AIP conference Proceedings*, vol. 896, no. 1, pp. 81-90. American Institute of Physics, 2007.