

ORIGINAL ARTICLE

Tracking and Exploring of Moving Radioactive Sources: A Modeling Approach Based on Machine Vision Algorithms, Image Processing and Scintillation Detection Systems

Amirmohammad Beigzadeh^{1*}, Hadi Ardiny²

1 Radiation Application Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran, Iran.

2 Assiatance Professor, Radiation Application Research School, NSTRI, Tehran, Iran.

Correspondence

Amirmohammad Beigzadeh

Email: beigzadeh_am@yahoo.com

How to cite

Beigzadeh, A. Ardiny, H. (2025). Tracking and Exploring of Moving Radioactive Sources: A Modeling Approach Based on Machine Vision Algorithms, Image Processing and Scintillation Detection Systems, Optoelectronic, 7(2), 17-30.

ABSTRACT

Nuclear technology is rapidly expanding worldwide. However, radioactive materials pose a big risk to human societies and the environment. This is due to threats from terrorism, misuse, or unauthorized movement. Thus, we need to improve radioactive source detection and tracking systems. This will boost security and stop terrorist actions. This paper introduces a novel approach for beam mapping and detection by employing machine vision algorithms and modeling nuclear detection systems that incorporate scintillating crystal detectors and photomultiplier tubes. The primary objective is to enhance efficiency and accuracy in identifying and locating out-of-control radioactive sources within complex and dynamic environments through the utilization of modern machine vision techniques. The tracking method employed in this approach is based on the Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) method. The developed system simultaneously acquires and processes moving images to detect the trajectory characteristics of objects, while recording radiation data using the detector. By effectively combining spatial and radiation data with high precision, the out-of-control radioactive source is successfully identified amidst other moving objects.

KEYWORDS

Radioactive Sources, Image Processing, Machine Vision, Monte Carlo, Optical Detectors.

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

ردیابی و کشف چشمه‌های پرتوزای متحرک: یک رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های بینایی ماشین، پردازش تصویر و سامانه‌های آشکارسازی سوسوزن

امیرمحمد بیگزاده^{1*}، هادی اردینی²

چکیده

فناوری هسته‌ای به سرعت در سراسر جهان در حال گسترش است. با این حال، مواد رادیواکتیو خطر بزرگی برای جوامع بشری و محیط زیست است. این به دلیل تهدیدات تروریسم، سوء استفاده یا حمل و نقل غیرمجاز است. بنابراین؛ ما نیاز به بهبود سیستم‌های تشخیص و ردیابی منبع رادیواکتیو داریم. این امر باعث تقویت امنیت و توقف اقدامات تروریستی خواهد شد. در این مقاله، یک رویکرد جدید برای نقشه‌برداری و آشکارسازی پرتوی با توسعه الگوریتم‌هایی بینایی ماشین و مدل‌سازی سامانه‌های آشکارسازی هسته‌ای متشکل از آشکارسازهای کریستالی سوسوزن و لامپ‌های تقویت‌کننده نوری پیشنهاد می‌شود. هدف افزایش کارایی و دقت شناسایی و مکان‌یابی چشمه‌های پرتوزا خارج از کنترل در محیط‌های پیچیده و دینامیک با بهره‌گیری از روش‌های نوین بینایی ماشین است. معادلات روش ردیابی از روش KLT پیروی می‌کند. سامانه مدل شده به طور هم‌زمان تصاویر حرکتی را دریافت و پردازش کرده و مسیر حرکت اجسام را تشخیص می‌دهد و به طور هم‌زمان داده‌های پرتوی در آشکارساز ثبت می‌گردد. در نهایت با تلفیق داده‌های مکانی و داده‌های پرتوی با دقت خوبی چشمه‌های پرتوزا خارج از کنترل در میان سایر اشیای متحرک کشف گردید. ادغام این الگوریتم‌ها در سامانه‌های تشخیص پرتو موجود این ظرفیت را دارد که اقدامات ایمنی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و خطرات مرتبط با حوادث پرتوی را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی

چشمه‌های پرتوزا، پردازش تصویر، بینایی ماشین، مونت کارلو، آشکارسازهای نوری.

1 دکتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.
2 استادیار، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ایران-تهران، ایران.

نویسنده مسئول:

امیرمحمد بیگزاده

رایانامه: beigzadeh_am@yahoo.com

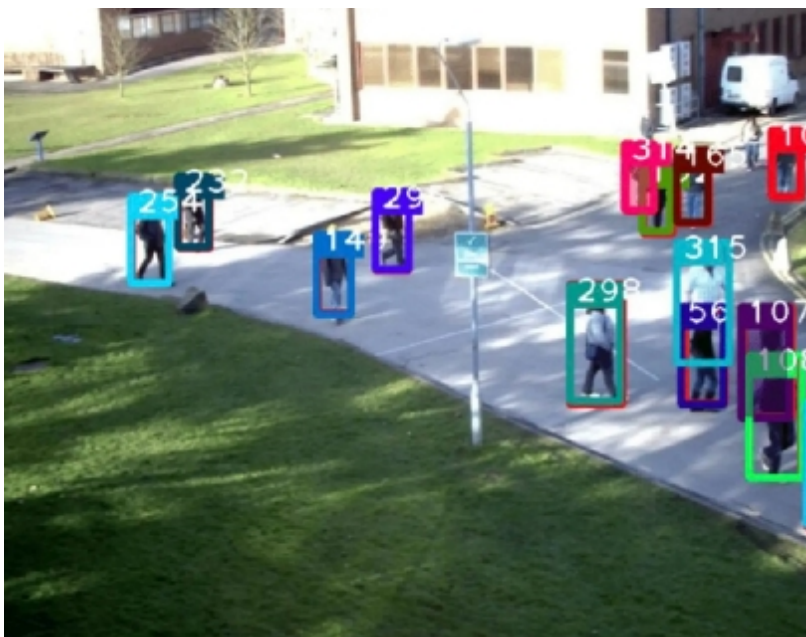
استناد به این مقاله:

امیرمحمد بیگزاده، هادی اردینی (1403). ردیابی و کشف چشمه‌های پرتوزای متحرک: یک رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های بینایی ماشین، پردازش تصویر و سامانه‌های آشکارسازی سوسوزن. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 7(2)، 30-17.

مقدمه

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

با رشد سریع فناوری هسته‌ای و گسترش جهانی آن، تهدیدات احتمالی ناشی از مواد پرتوزا ناشی از تروریسم، سهل‌انگاری در



شکل 1. نمونه‌هایی از صحنه‌های دوربین‌های نظارتی درحالی‌که الگوریتم‌های بینایی ماشین چندین شیء

مشابه را ردیابی می‌کنند: (5)

نظارتی¹ برای افزایش قابلیت پایش سامانه‌های مبتنی بر بینایی ماشین² متشکل از دوربین‌های نظارتی و آشکارسازهای رادیواکتیو سودمند باشد. تصویر نشان داده شده در شکل 1 یک نامگرفت³ 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 نظارت شهری می‌باشند که با الگوریتم‌های پردازش تصویر و ردیابی اشیا مجهز شده‌اند. کادربندی رنگارنگ با اعداد روی تصویر قرار گرفته‌اند که هر کدام یک شناسه ردیابی منحصر به فرد برای هر شیء یا شخص را نشان می‌دهند:

این تحقیق داده‌های آشکارسازهای رادیواکتیو را که معمولاً سامانه‌های آشکارسازی کم‌هزینه (مانند گایگر مولر و سوسوزن‌ها...) 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

استفاده و جابه‌جایی آن‌ها و سایر سناریوهای مشابه می‌تواند خطرات جدی برای جوامع بشری ایجاد کند. در نتیجه، نیاز قابل‌توجهی به توسعه سامانه‌های تشخیص و ردیابی چشمه‌های پرتوزا برای افزایش امنیت و جلوگیری از فعالیت‌های تروریستی وجود دارد. درحالی‌که 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، درحالی‌که زمان‌بندی یک عامل حیاتی در مناطق کنترل‌شده مانند فرودگاه‌ها و گمرکات است [1]. به عنوان مثال، میانگین روزانه تعداد افراد در فرودگاه بین‌المللی هارتسفیلد - جکسون آتلانتا بیش از 250000 مسافر در روز است [2]. مرز ایالات‌متحده و مکزیک با بیش از 300 میلیون نفر، 90 میلیون وسیله نقلیه و 4 میلیون تردد کامیون در سال، فعال‌ترین مرز سیاره زمین است [3]. داده‌های جمع‌آوری‌شده 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

1 material out of regulatory control (MORC)

2 Machin Vision

3 Screen Shot

هوشمند ساخت شرکت آمریکایی Cognex استفاده کردند. هدف محققان ارائه راه‌حلی بود که از کنترل بینایی رباتیک برای بهبود عملیات در یک راکتور هسته‌ای بهره می‌برد [18]. در یک مطالعه جداگانه توسط بانداسترا² 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 یک مترمربعی متشکل از 100 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 [19]. هوو و همکاران استراتژی به نام ACA را معرفی کردند که از یک شبکه عصبی کانولوشن³ 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 کارلو⁴ 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 [23]. 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 بالادرنگ چشمه‌های پرتوی در کل شهر است، توسط کوپر و همکاران انجام شد. [24]. مطالعه توسط استوس⁵ 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 [25]. 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 [26]. 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 [27] به بررسی تلفیق بین دوربین تصویربرداری و

سپس آن‌ها را محلی‌سازی و ردیابی کند. از روش کاناد-لوکاس-توماسی¹ 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 [6]. 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 انجام شده 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 قابل‌ردیابی و تشخیص کند. سپس، با جفت‌شدن 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 [8] [9]. برای اجرای بینایی ماشین، الزامات پروژه باید به دقت برنامه‌ریزی شود و راه‌حل مناسب ارائه شود [10-14]. در صنعت هسته‌ای، سامانه‌های بینایی ماشین برای بهبود کیفیت تصویر در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای و بازرسی راکتورها استفاده می‌شوند [15]. آن‌ها می‌توانند خوردگی و ترک در خطوط لوله را تشخیص دهند و ایمنی کلی را افزایش دهند [16]. سامانه‌های بینایی ماشین همچنین در شناسایی چشمه‌های پرتوزا با استفاده از انواع مختلف روپات‌ها مؤثر بوده‌اند [17]. هانسون و همکاران از یک نمونه اولیه ربات مجهز به دوربین

2 Bandstra

3 Convolutional neural network (CNN)

4 Monte Carlo (MC)

5 Osthus

1 Kanade-Lucas-Tomasi (KLT)

شبیه‌سازی‌های MCNPX و آنالیز داده‌ها و ردیابی و کشف چشمه‌های پرتوزا استفاده شد.

الف) شبیه‌سازی محیط با اشیای متحرک با الهام از حرکت ربات تیمیو³

در این مرحله الگوریتم یک محیط پویا با حضور 10 شی هم شکل 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 مقداره‌ی اولیه می‌شود، موقعیت آن‌ها در طول زمان به‌روز 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

آشکارساز کامپتون¹ نیز می‌پردازد. سیستم کامپتون برای شناسایی چشمه‌های پرتوزا ثابت استفاده می‌شود. با این حال، 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.

مدل‌سازی و تئوری

در این مقاله از دو ابزار نرم‌افزاری مختلف کد MCNPX برای تعریف سناریوی پرتوی [21] و کد متلب² برای شبیه‌سازی حرکتی اشیاء، پردازش تصویر، ردیابی و ثبت موقعیت مکانی استفاده شد. MCNPX یک کد ترابرد N ذره‌ای مونت‌کارلو است که به طور گسترده برای شبیه‌سازی ترابرد ذرات در



شکل 2. تصویری از ربات‌های تیمیو با رنگ‌های مختلف [28].

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 ادامه خواهند داد. قید دیگر مرز تصویر یا همان دیواره‌ها هستند.

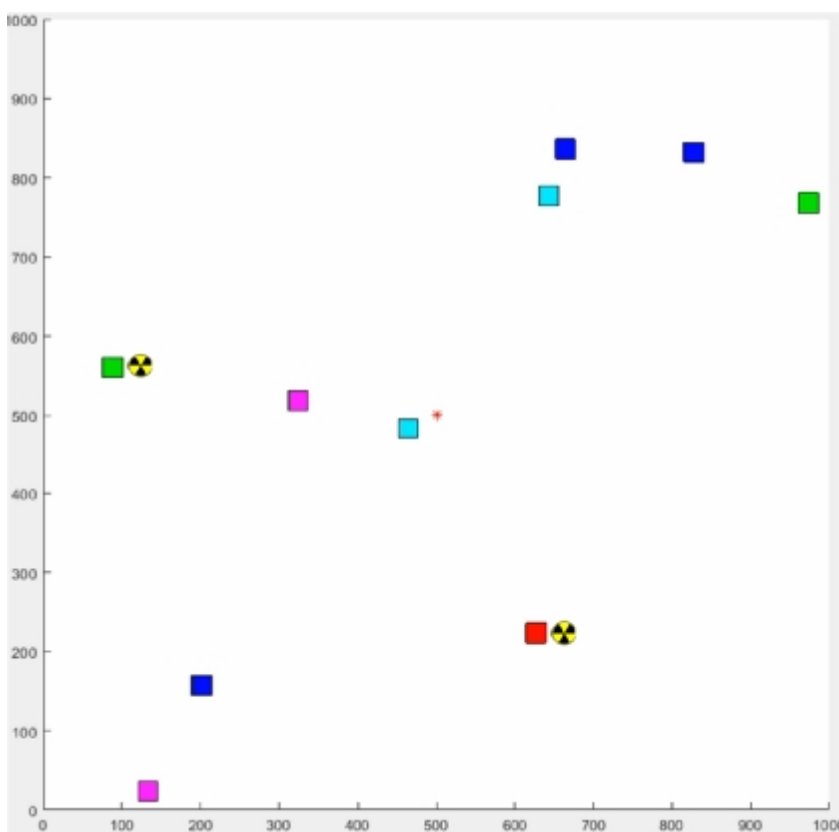
هندسه‌ها و مواد پیچیده استفاده می‌شود [23]. این کد از مدل‌ها و الگوریتم‌های فیزیک پیشرفته برای پیش‌بینی دقیق رفتار فوتون‌ها، نوترون‌ها و سایر ذرات در مواد و محیط‌های مختلف استفاده می‌کند. در مطالعه حاضر از MCNPX برای سناریوی پرتوی ایجاد شده در اثر جابه‌جاشدن چشمه‌های پرتوزا از موقعیت اصلی‌شان استفاده شد. از نرم‌افزار متلب نیز برای پردازش تصویر و حل معادلات ردیابی و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از

Ø سنسورهای مجاورتی: تیمیو دارای شش حسگر مجاورتی مادون قرمز است که در اطراف بدنه خود قرار گرفته‌اند که به آن اجازه می‌دهد موانع را شناسایی کرده و از برخورد جلوگیری کند.

Ø سنسورهای زمینی: در مجموع دارای هفت حسگر زمینی است که می‌تواند شرایط نور محیط را اندازه‌گیری کند، لبه‌ها و انواع مختلف سطوح را

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 الگوبرداری شده است که نمونه‌ای از آن در شکل 2 نشان داده شده است.

ربات تیمیو¹ یک ربات آموزشی همه‌کاره است که برای آموزش مفاهیم برنامه‌نویسی و رباتیک طراحی شده است. طراحی



شکل 3. تصویری از یک فریم از 3000 فریم محیط مدل شده از 10 شیء متحرک که دو عدد از آن‌ها حامل چشمه پرتوزا هستند.

تشخیص دهد.

Ø سنسورهای چرخشی: تیمیو دارای دو سنسور چرخشی است که می‌تواند موقعیت زاویه‌ای و سرعت ربات را اندازه‌گیری کند.

به طور خلاصه، ربات تیمیو یک پلت فرم جذاب و تعاملی برای کاوش در رباتیک و برنامه‌نویسی فراهم می‌کند. شکل 3 تصویری از یک فریم از محیط مدل شده با نرم‌افزار MATLAB است. در این تصویر 10 مربع با رنگ‌های مختلف وجود دارد که معادل با 10 ربات تیمیو می‌باشند، دو مورد به طور دلخواه به عنوان حامل ماده پرتوزا با برجسب پرتوزا نشان داده شده است. در این کد معادلات حرکتی این کاراکترها مشابه با رفتار حرکتی

جمع‌وجور و رنگارنگ آن، به همراه طیف گسترده‌ای از حسگرها و محرک‌ها، آن را به یک سکوی² ایدئال برای یادگیری و آزمایش عملی تبدیل می‌کند. برخی از مشخصات ربات تیمیو به شرح زیر است:

ابعاد: ربات تیمیو تقریباً 11/2 سانتی‌متر قطر و 8 سانتی‌متر ارتفاع دارد. اندازه جمع‌وجور آن امکان جابه‌جایی و مانور آسان را فراهم می‌کند. تیمیو مجهز به حسگرهای مختلفی است که آن را قادر می‌سازد با محیط خود تعامل داشته باشد. که شامل موارد زیر است:

1 Thymio
2 platform

هستند، استفاده شد. چشمه کبالت-60 ایزوتوپ پرتوزا کبالت با نیمه عمر حدود 5/27 سال است. عمدتاً در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود. کبالت-60 تابش‌های گاما گسیل می‌کند که آن را برای اهداف مختلف ارزشمند می‌کند. از نظر انرژی، کبالت-60 پرتوهای گاما با انرژی‌های 1/33 و 1/17 مگا الکترون‌ولت گسیل می‌کند. این تابش پرنانرژی به آن اجازه نفوذ در مواد را می‌دهد و در پرتونگاری صنعتی برای بازرسی جوش‌ها، تشخیص عیوب سازه‌های فلزی، استریل کردن تجهیزات پزشکی، پرتودهی مواد غذایی و تشخیص نشت در خطوط لوله استفاده می‌شود [30]. همچنین در تحقیق و توسعه برای مطالعات مختلف علمی استفاده می‌شود [31]. تدابیر امنیتی شدیدی برای جلوگیری از دسترسی غیرمجاز و اطمینان از مدیریت ایمن آن وجود دارد. خطر سرقت یا مقفودشدن با روش‌های مناسب نگهداری، حمل‌ونقل و دفع به حداقل می‌رسد. مقامات و نهادهای نظارتی برای جلوگیری از هرگونه سوءاستفاده یا حوادث احتمالی رادیوایزوتوپ‌های کبالت-60 را از نزدیک نظارت می‌کنند.

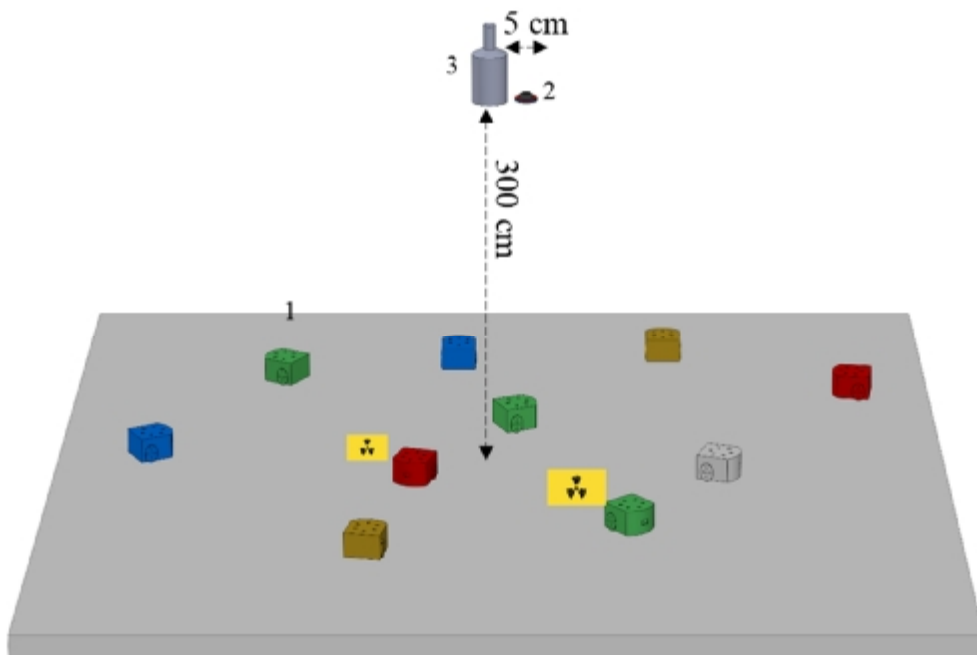
سزیم-137 یک رادیوایزوتوپ مصنوعی با نیمه عمر تقریبی 30 سال، کاربردهای مختلفی در صنعت، پزشکی و تحقیقات پیدا کرده است. پرتوهای گامای گسیل شده از سزیم-137 دارای انرژی 667 کیلو الکترون‌ولت هستند که آنها را برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله پرتونگاری صنعتی، تصویربرداری پزشکی و پرتودرمانی مناسب می‌کند. در زمینه پرتونگاری صنعتی، سزیم-137 در بازرسی جوش، خطوط لوله و اجزای

رباتهای تیمبو از قبیل تغییر مسیر حین رسیدن به مانع و لبه نوشته شده است.

ب) شبیه‌سازی سناریوی پرتوی با کد مونت کارلو

کد: برای مدل‌سازی سناریوی پرتوی از کد مونت کارلوی MCNPX استفاده شد. [29]. برای این منظور 6000 برنامه برای موقعیت‌های مختلفی که رباتها به صورت با حرکت پیوسته برای ربات قرمز و ربات سبز رنگ نشان داده شده در شکل 4 در میان دیگر اشیای متحرک نوشته شد. برای کد نویسی این تعداد برنامه چندین الگوریتم با استفاده از کد متلب توسعه داده شد. زمان در نظر گرفته شده برای اجرای هر برنامه 5 دقیقه در نظر گرفته شد و خطای محاسبات حدود 0/02 درصد بود. این دو رنگ به صورت دلخواه از میان سایر مربعها انتخاب گردیدند. موقعیت مکانی تمامی کاراکترهای رنگی ثبت گردید. در ادامه موقعیت‌های مکانی دو کاراکتر قرمز و سبز نشان داده شده در شکل 3 به عنوان حامل‌های مواد پرتوزا، پیموده بودند در کد مونت کارلو استفاده گردید. در شکل 4 طرح سه بعدی از هندسه مدلسازی شده نشان داده شده است. در کدهای مونت کارلو از تالی F8 برای ثبت تعداد ذرات ثبت شده در سلول آشکارساز استفاده گردید. سایر موارد از قبیل رادیوایزوتوپها و آشکارساز بکار رفته در مدل‌سازی در ادامه توضیح داده شده است.

رادیوایزوتوپ: در این شبیه‌سازی از چشمه‌های گامای کبالت-60 و سزیم-137 که در صنعت و پزشکی بسیار پرکاربرد



شکل 4. طرح سه بعدی از هندسه مدل‌سازی شده 1. رباتها، 2. دوربین چشم ماهی و 3. آشکارساز و لامپ تقویت‌کننده نوری¹

سازه‌ای استفاده می‌شود.

آشکارساز: در مدل‌سازی سناریوی پرتوی در کد MCNPX از آشکارساز یدور سدیم آلیاژ با تالیوم (NaI (TI) استفاده شد. این کریستال در آشکارسازی پرتوهای گاما و 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. این آشکارسازها می‌توانند در زمینه‌های مختلفی مانند پزشکی هسته‌ای، نظارت بر محیط‌زیست و کاربردهای امنیتی استفاده شوند. هنگامی که یک پرتوگاما یا 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



شکل 5. تصویری از آشکارساز شبیه‌سازی شده [32]

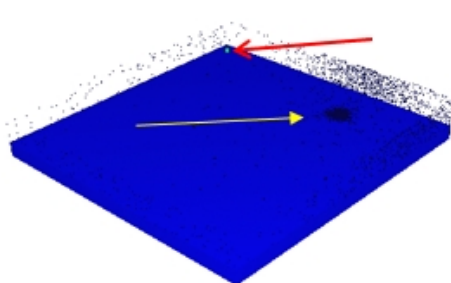
با انرژی تابش فرودی تناسب دارد و امکان تعیین مشخصات

آشکارساز متشکل از دو بخش است: سوسوزن 5 اینچی یدور سدیم و لامپ تقویت‌کننده نوری 2 اینچی که به آن متصل شده است. در این مطالعه اندازه آشکارساز 5 اینچ در نظر گرفته شد. تصویری از گسیل ذرات در فضای مونت کارلو نشان داده شده است. شکل 6 الف گسیل ذرات از چشمه سزیوم-137 را نشان می‌دهد در این شکل محل چشمه با بردار زرد رنگ و محل آشکارساز با بردار قرمز نشان داده شده است صفحه آبی رنگ نشان دهنده اتاق به ابعاد $3 \times 10 \times 10$ مترمکعب است. به همین ترتیب شکل 6 ب گسیل ذرات برای چشمه کبالت-60 را نشان می‌دهد.

ج) الگوریتم ردیابی اشیای هم‌شکل

الگوریتم مبتنی بر روش KLT

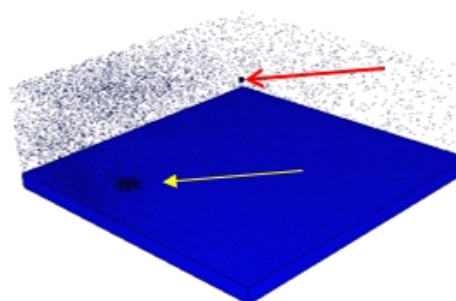
روش KLT بر این اصل استوار است که مهم‌ترین اطلاعات در یک تصویر را می‌توان با مجموعه کوچک‌تری از ویژگی‌ها یا الگوها نشان داد که آنها را می‌توان با استفاده از روش‌های ریاضی استخراج کرد [33]. این روش به ویژه برای ردیابی اشیای در فیلم‌های ویدئویی مفید است، زیرا می‌تواند حرکت و تغییرات موقعیت یک شی را در طول 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. 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



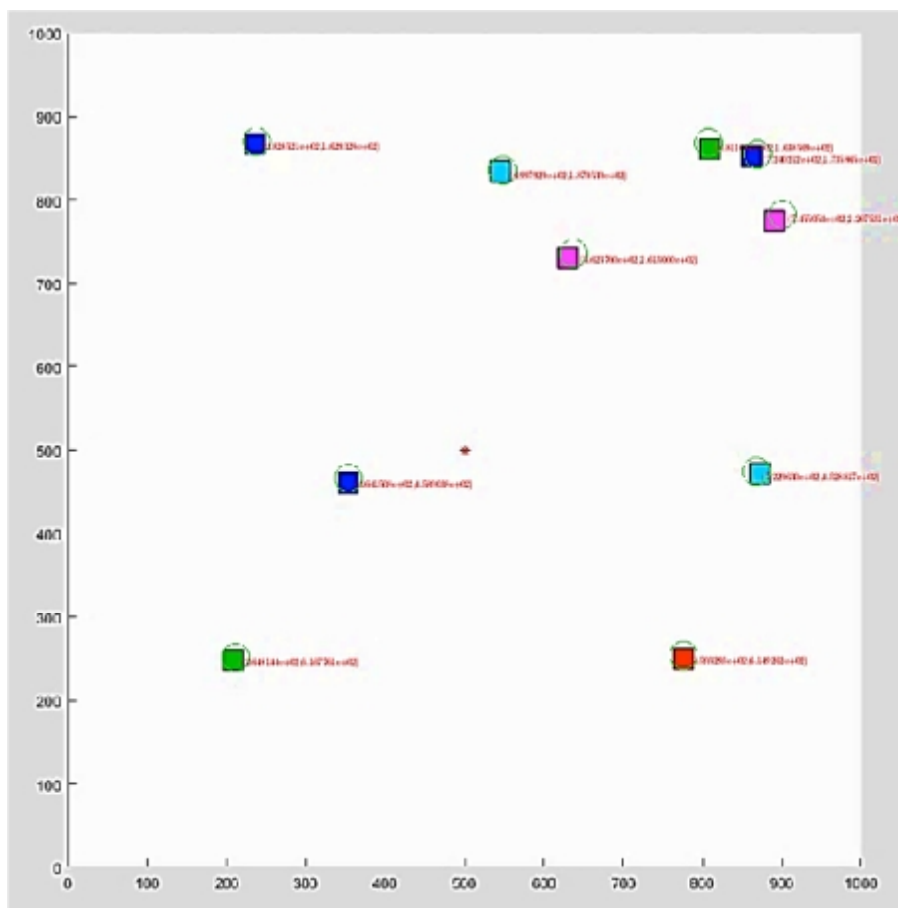
شکل 6. تصویری از گسیل ذرات در فضای شبیه‌سازی شده اتاق به ابعاد $3 \times 10 \times 10$ مترمکعب، نقطه داغ 1 (بردار زرد) ناشی از

چشمه سزیوم 137 و ب) ناشی از چشمه کبالت 60

داده‌های جدید، ردیابی کند.



چشمه را فراهم می‌کند. در شکل تصویری از آشکارسازی که در مدل از آن استفاده شده است نشان داده شده است. این



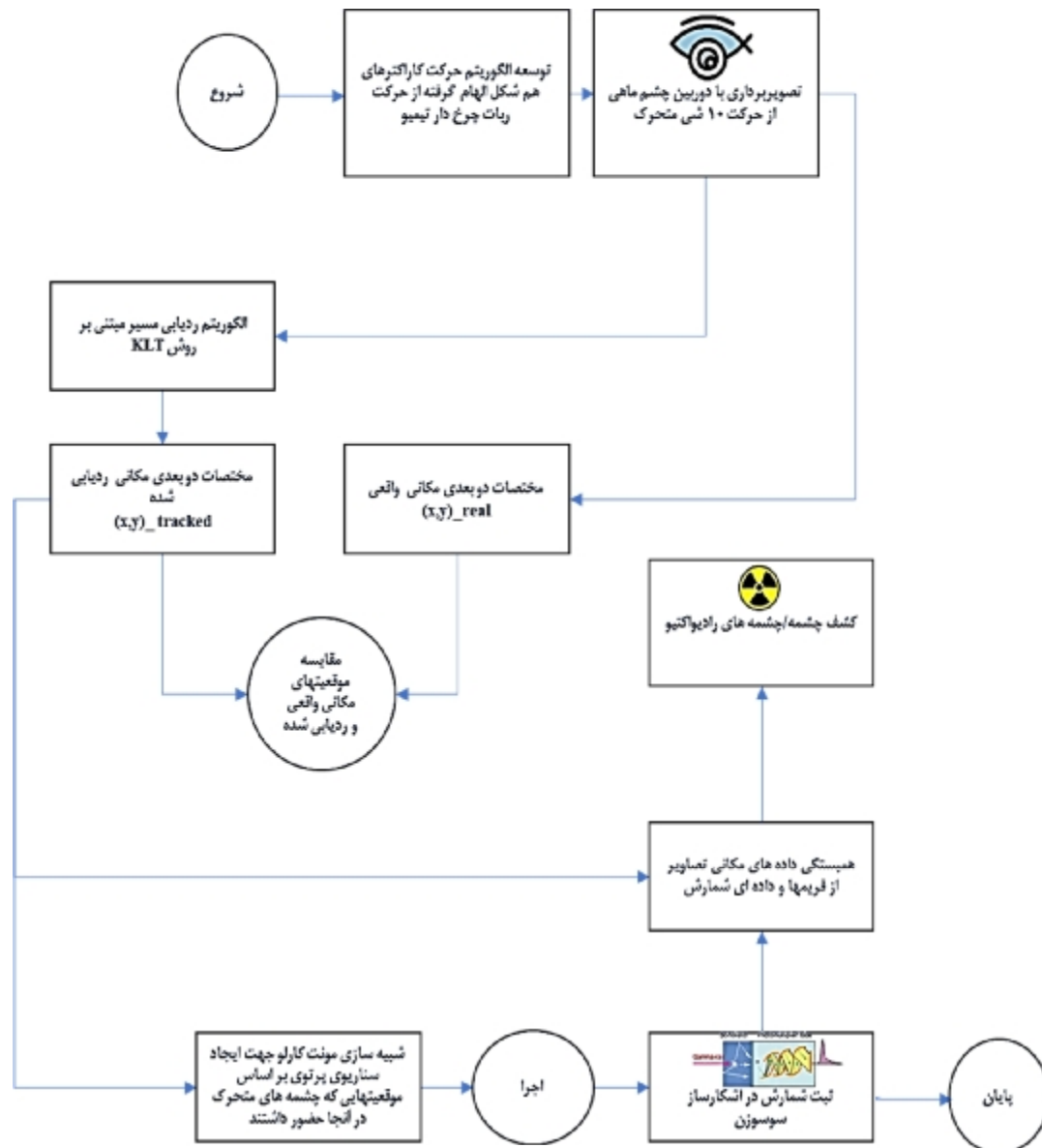
شکل 7. ردیابی اشیاء و تعیین نقشه حرکتی آنها

تصویر را فراهم می‌کند. معادله از بسط سری تیلور گرفته شده و به صورت زیر بیان می‌شود [30]:

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

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-کاناد 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 7 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 تیمیو هستند را تشخیص می‌دهد و یک دایره 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، دایره محاط بر روی هر کدام از آنها نیز بر همراه با آنها جابه‌جا 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 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. [6][34]. 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



شکل 8. فلوجارت تشکیل مدل حرکت ربات‌ها تا کشف و مکان‌یابی چشمه پرتوزا متحرک

برای هر شی، الگوریتم ضریب در ثانیه را تا 120 ثانیه محاسبه می‌کند.

در شکل 8 فلوجارت گام‌های مربوط به تشکیل فایل ویدئویی حرکت 10 ربات هم شکل 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 دو کاراکتر سبز و قرمز در طراحی سناریوی پرتوی با کد مونت کارلو؛ که موقعیت‌های مکانی این دو 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

د) الگوریتم مبتنی بر معادلات همبستگی

اثربخشی آشکارسازی و کشف با روش آنالیز مبتنی بر همبستگی بین مسیرهای اشیا و شمارش گامی ثبت شده در آشکارساز تعیین می‌شود. ضریب همبستگی که از -1 تا 1 متغیر است، میزان همبستگی بین دو متغیر را نشان می‌دهد. مقدار صفر نشان دهنده عدم ارتباط بین متغیرها است، در حالی که -1 یا 1 یک همبستگی کامل و حالت ایده‌آل 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 -1 باشد. برای به دست آوردن ضرایب همبستگی

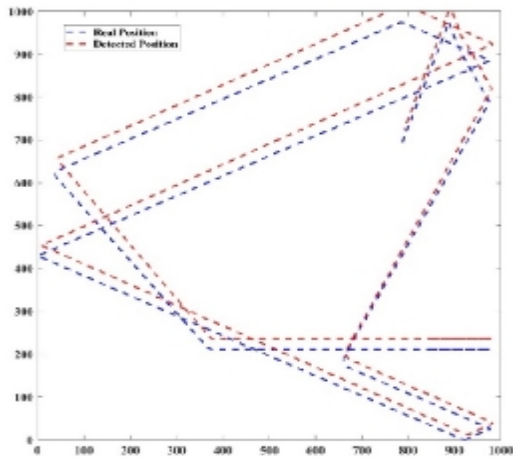
الگوریتم مبتنی بر روش KLT نشان داده شده است. همان گونه که شکل 11 نشان می‌دهد الگوریتم توانسته است با دقت حدود 5 درصد هدف را ردیابی کند.

در شکل 12 تغییرات آهنگ شمارش ثبت شده در آشکارساز بر حسب زمان نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که اثر کاراکترهای آلوده در زمان حدود 56 و 110 روی شمارش آشکارساز کمینه و در زمان 80 بیشینه است و در نزدیکترین موقعیت خود نسبت به آشکارساز قرار گرفته اند لذا بیشترین میزان شمارش ثبت شده است.

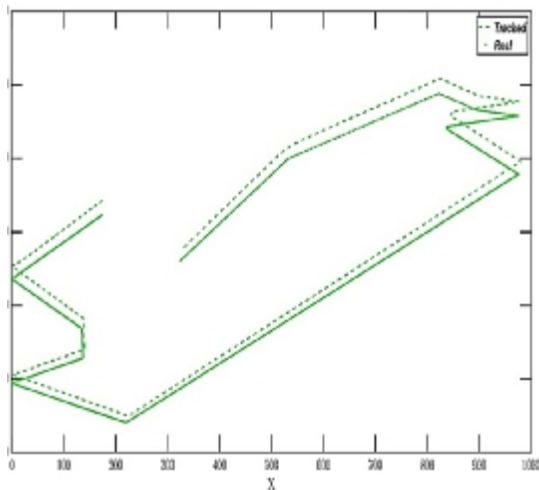
ریاضی مبتنی بر تلفیق داده‌های شمارش و داده‌های موقعیت مکانی برای مکان‌یابی چشمه‌های پرتوزای متحرک در میان سایر اجسام را نشان می‌دهد.

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 9 نشان داده شده است. برای هر کاراکتر نمودار مسیر حرکت آن مطابق با همان رنگ کاراکتر نشان داده شده است.



الف

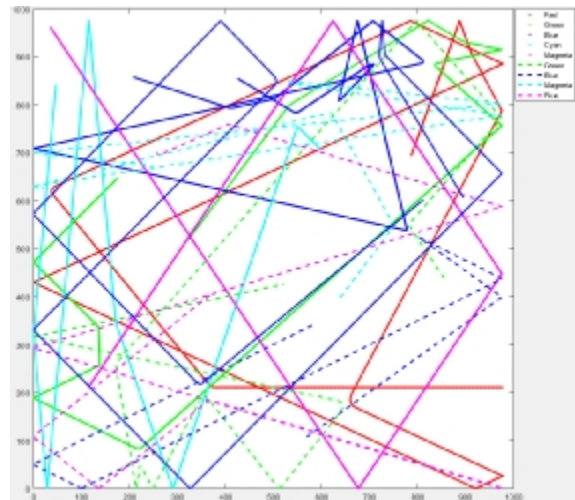


ب

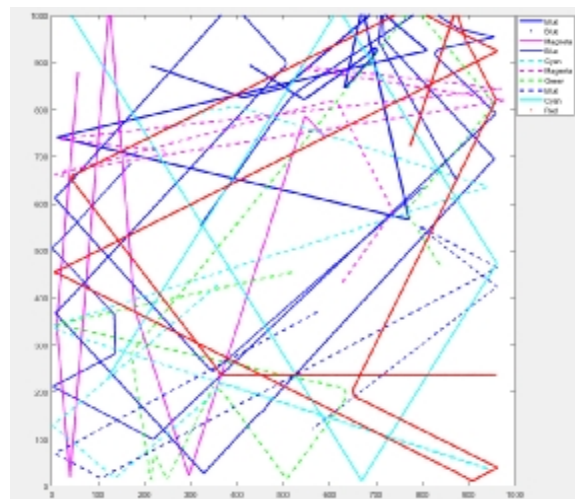
شکل 1. مقایسه مسیر واقعی و ردیابی شده برای کاراکتر آلوده به ماده رادیواکتیو الف) چشمه متحرک کبالت-60 و ب) چشمه متحرک سزیوم-

137

در شکل 12 روند تغییرات ضریب همبستگی برای 10 کاراکتر نشان داده شده است. از نمودارهای نشان داده شده در 12 می‌توان استنباط نمود که شیء آلوده کاراکتر قرمز رنگ و سبز رنگ می‌باشد که ضریب همبستگی آن مقداری در نزدیک به عدد 1- را نشان می‌دهد، این حالت زمانی ایجاد می‌شود که جسم آلوده به ماده پرتوزا در حال دور شدن از آشکارساز باشد.

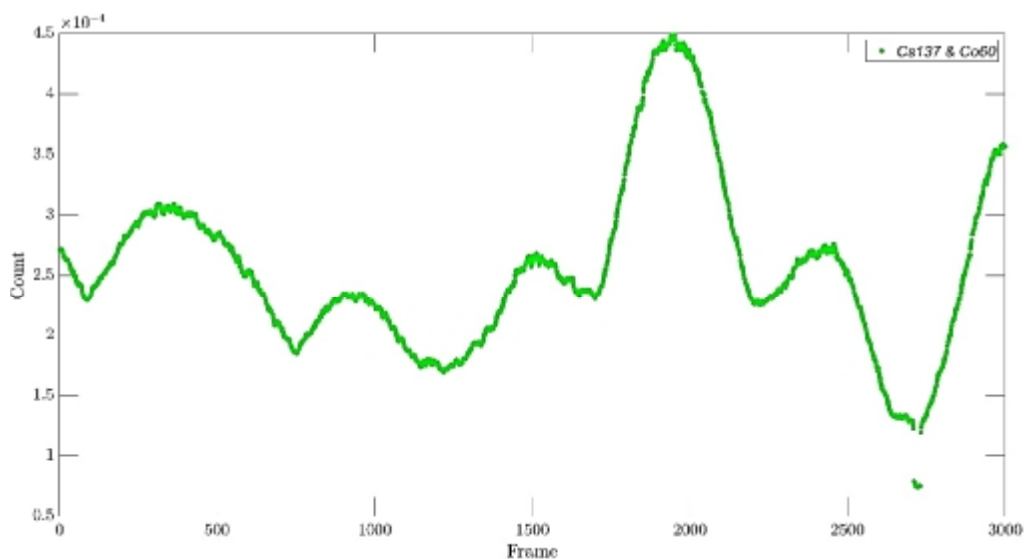


شکل 9. مسیر واقعی ایجاد شده برای ربات‌ها با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی حرکت تیمیو

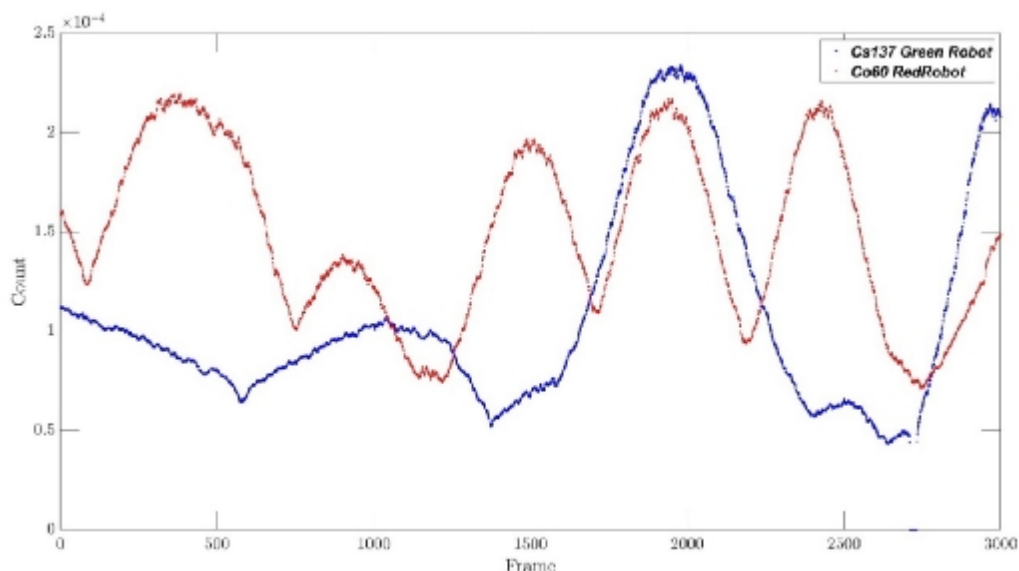


شکل 10. مسیر ردیابی شده اشیا با استفاده از روش KLT

نتایج مربوط به الگوریتم ردیابی برای تعیین موقعیت کاراکترها در هر زمان، در شکل 10 نشان داده شده است. در شکل 11 الف و ب مقایسه بین مسیر حرکت اصلی کاراکترهای قرمز و سبز رنگ و مسیر ردیابی شده آنها توسط



الف



ب

شکل 2. تغییرات شمارش ثبت شده در واحد زمان در آشکارساز، روندی که در آشکارساز ثبت شده است (الف) چشمه سزیوم-137 و کبالت-60 به

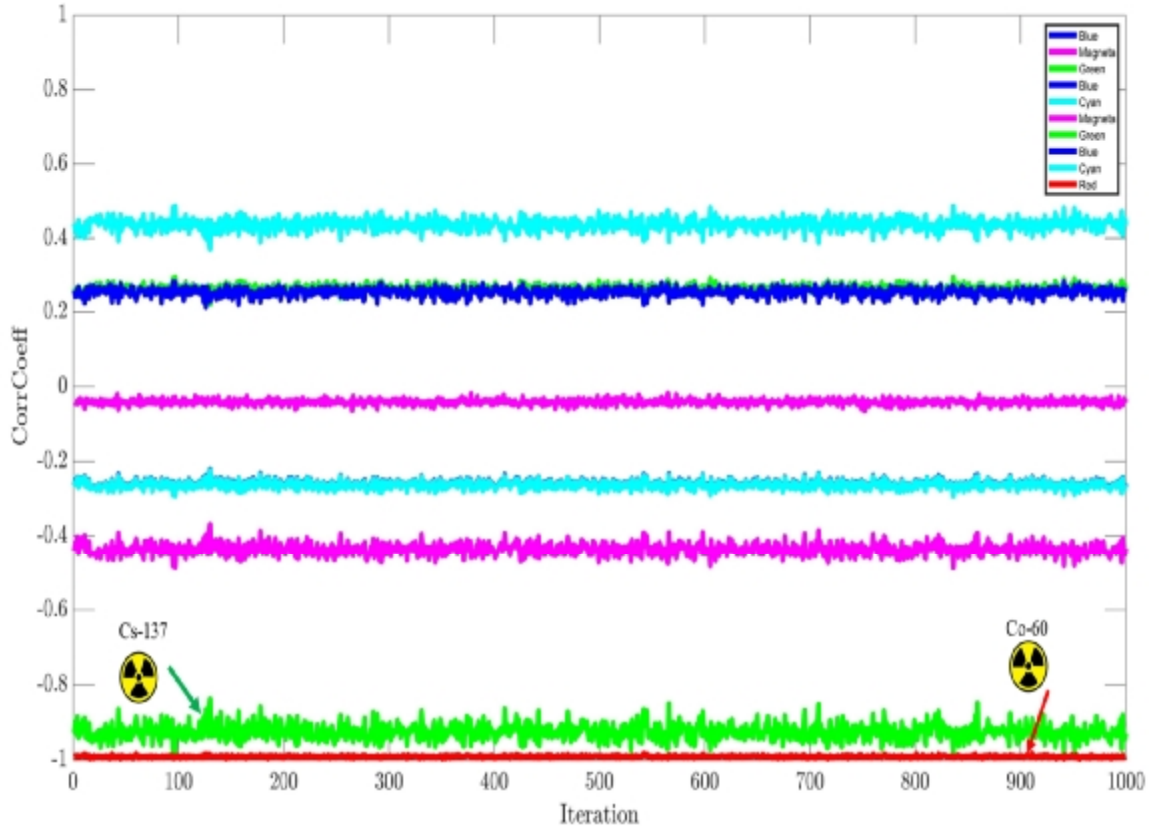
صورت جداگانه (ب) مجموع شمارش به ازای حضور دو چشمه

آلوده در یک بستر آزمایشی کوچک را 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 مونت‌کارلوی MCNPX استفاده شد؛ و بر روی دو کاراکتر شبه ربات، چشمه‌های پرتوزا گامزای سزیوم-137 و کبالت-60 قرار داد شد تا اثر حرکت دو شیء رادیواکتیو در میان سایر اشیای متحرک بررسی شود. کاراکترهای مشابه به طور تصادفی در یک اتاق مدل‌سازی شده

یعنی فاصله بیشینه و شمارش کمینه باشد در اینصورت است که عدد ضریب نزدیک به مقدار 1- می‌گردد.

نتیجه

تشخیص و پایش آلودگی پرتوی 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 اشیای متحرک



شکل 3. روند تغییرات ضریب همبستگی میان موقعیت مکانی کاراکترهای متحرک و میزان شمارش ثبت شده در آشکارساز (محور افقی نرخ داده برداری و محور عمودی عدد ضریب همبستگی)

شده در این مطالعه بود که می‌توان آن‌ها را قبل از اقدام عملی و آزمایش‌های تجربی به منظور تعریف سناریوهای پرتوی بدون نیاز به در معرض قرار گرفتن پرتوهای یون‌ساز مورد استفاده داد. سامانه‌هایی که با تلفیق دوربین‌های نظارتی و سامانه‌های تشخیص پرتوی، 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 را با سایر فناوری‌ها مانند هوش مصنوعی برای بهبود دقت و حتی قابلیت‌های تشخیص پیشرفته‌تر بررسی کند.

به ابعاد 100 مترمربع حرکت می‌کردند. کل زمان حرکت تصادفی این کاراکترها 120 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 حدود 5 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

References

- [1] 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.
- [2] 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>
- [3] 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.

- [4] Muhammad Rizwan Munawar, "Github." Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/RizwanMunawar/yolov7-object-tracking>
- [5] J. S. Bisht, "Github." Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/jitendrasb24/Car-Detection-OpenCV>
- [6] 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.

منابع

- [7] A. Lukežič, T. Vojří, L. Čehovin Zajc, J. Matas, and M. Kristan, "Discriminative Correlation Filter Tracker with Channel and Spatial Reliability," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 126, no. 7, pp. 671–688, 2018, doi: 10.1007/s11263-017-1061-3.
- [8] E. R. Davies, *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*. Academic Press, 2012.
- [9] C. Steger, M. Ulrich, and C. Wiedemann, *Machine vision algorithms and applications*. John Wiley & Sons, 2018.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] R. Jain, R. Kasturi, B. G. Schunck, and others, *Machine vision*, vol. 5. McGraw-hill New York, 1995.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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>.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Z. Yan, Q. Wei, G. Huang, Y. Hu, Z. Zhang, and T. Dai, "Nuclear radiation detection based on uncovered CMOS camera under dynamic scene," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 956, p. 163383, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163383>.
- [21] R. Vilalta, S. Kuchibotla, F. Ocegueda-Hernandez, S. Hoang, and L. Pinsky, "Machine learning for identification of sources of ionizing radiation during space missions," in *International Joint Conference on Artificial Intelligence, Workshop on AI in Space: Intelligence Beyond Planet Earth*, 2011.
- [22] A. Abdelhakim, "Machine learning for localization of radioactive sources via a distributed sensor network," *Soft Comput.*, vol. 27, no. 15, pp. 10493–10508, 2023, doi: 10.1007/s00500-023-08447-8.
- [23] 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>.
- [24] R. J. Cooper *et al.*, "Networked Sensing for Radiation Detection, Localization, and Tracking," *arXiv Prepr. arXiv2307.13811*, 2023.
- [25] 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.
- [26] E. Cazalas, "Defending cities against nuclear terrorism: Analysis of a radiation detector network for ground based traffic," *Homel. Secur. Aff.*, vol. 14, 2018.
- [27] 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.
- [28] <http://robots4schools.ch/robots/thymio/>
- [29] 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.
- [30] E. E. Kulish, , and G. M. Fradkin. "Cobalt-60 and Caesium-137 gamma sources." In *Large radiation sources in industry. Proceedings of a conference on the application of large radiation sources in industry*. V. I. 1960.
- [31] Jarrett, D. Robert. "Isotope (gamma) radiation sources." In *Preservation of food by ionizing radiation*, pp. 137-163. CRC Press, 2018.
- [32] <https://www.ost-photonics.com/product/diameter-5-inch-x-5-inch-na1tl-scintillation-detector-energy-resolution-%E2%89%A48-0662kev/>
- [33] C. Tomasi, Carlo, and T. Kanade. "Detection and tracking of point." *Int J Comput Vis* 9, no. 137-154 (1991): 2.
- [34] 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>
- [35] C. Tomasi and T. Kanade, "Detection and tracking of point," *Int J Comput Vis*, vol. 9, no. 137–154, p. 3, 1991.