مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۲-۱

ردیابی چندهدفی چندسنسوری غیرمتمرکز و همکارانه با اندازه‌گیری غیرهمزمان سمت

علیرضا جلالی‌پور[۱]، ریحانه کاردهی مقدم[۲]

[۱] گروه برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران jalalipoor@gmail.com

[۲] دانشیار، گروه برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران، rkardehi.moghaddam@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱ ویرایش : ۱۳۹۸/۱۱/۰۲ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰

چکیده: ردیابی هدف فقط با اندازه‌گیری زاویه سمت، یک مسئله چالش‌برانگیز با کاربردهای فراوان در حوزه‌های نظامی و تجاری می‌باشد. در ردیابی سمت به تنهایی بصورت چندهدفی چندسنسوری توزیع شده، سنسورها از یکدیگر فاصله داشته اما با استفاده از تجهیزات مخابراتی با هم تبادل داده می‌نمایند. این سیستم، علاوه بر مزایای عمومی سیستم‌های توزیع شده، شامل این ویژگی کاربردی است که در صورت وجود فاصله مناسب بین سنسورها، حالت اهداف رویت‌پذیر بوده و انجام مانور توسط حسگرها ضرورت نخواهد داشت. با توجه به اهمیت و کاربرد این مسئله، در این مقاله برای اولین بار ردیابی سمت به تنهایی چندهدفی چندسنسوری با معماری غیرمتمرکز و با اندازه‌گیری‌های ناهمزمان ارائه شده است. در این تحقیق، با کمک گرفتن از ایده اندازه‌گیری مرکب و با لحاظ نمودن زمان اندازه‌گیری‌ها در محاسبات، ضمن غلبه بر ناهمزمانی اندازه‌گیری‌ها، اثرات غیرخطی در معادله اندازه‌گیری حذف شده است. همچنین از فیلترینگ مبتنی بر استراتژی پخش به منظور بهره‌برداری از اطلاعات عامل‌های سنسوری همسایه جهت بهبود تخمین‌ها استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که سیستم طراحی شده، می‌تواند به خوبی اهداف را تشخیص داده و با دقت قابل قبولی ردیابی نماید.

کلمات کلیدی: ردیابی هدف با اندازه‌گیری سمت به تنهایی، سیستم‌های چندعامله، سیستم‌های غیرمتمرکز، کنترل همکارانه، فیلترهای مبتنی بر استراتژی‌های پخش.

Decentralized and Cooperative Multi-Sensor Multi-Target Tracking With Asynchronous Bearing Measurements

Alireza Jalalipoor, Reihane Kardehi Moghaddam

Abstract: Bearings only tracking is a challenging issue with many applications in military and commercial areas. In distributed multi-sensor multi-target bearings only tracking, sensors are far from each other, but are exchanging data using telecommunication equipment. In addition to the general benefits of distributed systems, this tracking system has another important advantage: if the sensors are sufficiently spaced apart, the target state is observable and the maneuver is not necessary by sensors. In this work, Multi-sensor multi-target bearings only tracking with decentralized architecture and asynchronous measurements is newly proposed. In this study, with the help of the idea of composite measurements and taking into account the time of measurements in the calculations, while overcoming the asynchronous of the measurements, the nonlinear effects in the measurement equation are also eliminated. Also, diffusive filtering is used to exploit the information of neighboring sensor agents to improve the estimates. The simulations show that the system designed in this research can well detect targets and track them with acceptable accuracy.

Keywords: Bearings-only Tracking, Multi-Agent Systems, Decentralized Systems, Cooperative Control, Diffusive Filters.

نویسنده عهده دار مکاتبات: ریحانه کاردهی مقدم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

۱- مقدمه

تحلیل حرکت هدف صرفاً با اندازه‌گیری زاویه سمت هدف که به ردیابی سمت به تنهایی[1] معروف شده است، یکی از مسائل کلاسیک در حوزه ردیابی است که از سال ۱۹۴۷ توسط استنسفیلد [۱] آغاز شده و هنوز، هم از نظر تئوری و هم از نظر عملی، مورد توجه محققین می‌باشد. از کاربردهای نظامی این مسئله چالش‌برانگیز می‌توان به ردیابی هدف در زیر آب با استفاده از سونار غیرفعال[2] و از کاربردهای غیرنظامی آن به ردیابی هواپیماها در مراقبت هوایی اشاره نمود [۵-۲].

در مسائل ردیابی سمت به تنهایی، معادله اندازه‌گیری در دستگاه مختصات کارتزین تابعی غیرخطی از موقعیت هدف است، لذا با یک مسئله فیلترینگ غیرخطی روبرو هستیم [۶]. در صورت ثابت بودن سنسور، فقط با اندازه‌گیری سمت هدف نمی‌توان مکان آن را تعیین نمود زیرا متغیرهای حالت هدف هنگامی رویت‌پذیر می‌شوند که سکوی حامل سنسور، متحرک بوده و میزان مانور آن از مانور هدف بیشتر باشد [۷]. تحقیقات در این زمینه هنوز هم ادامه دارد. به عنوان مثال، مرجع [۸] از بین رویکردهای موجود، رویکرد بیشترین شباهت[3] را برای حل این مسئله پیشنهاد کرده است. همچنین مرجع [۹] به طراحی مانور بهینه مشاهده‌گر پرداخته است.

در ردیابی چندهدفی چندسنسوری، اندازه‌گیری‌های چندین سنسور طوری با یکدیگر ترکیب می‌شوند که خط‌سیر[4] اهداف ردیابی شده نسبت به حالت یک سنسوری، بطور قابل توجهی بهتر خواهند بود [۱۰]. با توسعه شبکه‌های حسگر بیسیم، سیستم‌های ردیابی چندهدفی چندسنسوری توزیع شده مورد توجه محققین قرار گرفته است. در ردیابی سمت به تنهایی چندهدفی چندسنسوری توزیع شده، سنسورها از هم فاصله داشته اما ارتباط داده‌ای با یکدیگر دارند. این سیستم‌ها علاوه بر مزایای کلی سیستم‌های توزیع شده، دارای این ویژگی کاربردی می‌باشند که اگر سنسورها به نحو مناسبی از یکدیگر فاصله داشته باشند، نیاز به انجام مانور توسط سکوهای سنسوری برطرف می‌گردد [۲].

برای سیستم‌های ردیابی توزیع شده، از معماری‌های متمرکز[5]، غیرمتمرکز[6] و ترکیبی[7] استفاده می‌شود. در ساختار متمرکز، داده‌های تمام سنسورها برای پردازش به یک مرکز تلفیق داده[8] سراسری ارسال می‌شوند. در معماری غیرمتمرکز، هر سکو داده‌های دریافتی از سنسورهای محلی خودش را پردازش نموده و با سکوهای مجاور نیز تبادل اطلاعات می‌نماید. معماری ترکیبی یا سلسله مراتبی، تلفیقی از ساختارهای متمرکز و غیرمتمرکز می‌باشد. اگرچه از نظر بهینه بودن، معماری متمرکز نسبت به معماری غیرمتمرکز دارای برتری می‌باشد، اما به زیرساخت‌های قوی‌تری برای جمع‌آوری اطلاعات و پردازش آنها در مرکز تلفیق داده سراسری نیاز دارد. لذا در بسیاری از کاربردها، معماری غیرمتمرکز ترجیح داده می‌شود.

اغلب مقالات ارائه شده در حوزه ردیابی سمت به تنهایی توزیع شده، از ساختارهای متمرکز یا سلسله مراتبی استفاده نموده‌اند و به معماری غیرمتمرکز کمتر پرداخته شده است.

بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه تخمین توزیع شده، فرض همزمانی اندازه‌گیری‌ها را در نظر می‌گیرند. اما در واقعیت با توجه به عملکرد مستقل سنسورها، تاخیر انتقال داده، احتمال از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی هنگام انتقال و ... فرض همزمانی داده‌ها صحیح نخواهد بود. تعداد معدودی از مقالات ارائه شده در زمینه ردیابی سمت به تنهایی توزیع شده، ناهمزمانی اندازه‌گیری‌ها را در نظر گرفته‌اند. در مرجع [۱۱] حل مسئله ردیابی چندهدفی چندسنسوری با اندازه‌گیری سمت به تنهایی ناهمزمان با معماری متمرکز مورد توجه قرار گرفته و یک الگوریتم بازگشتی ارائه شده است. در مرجع [۱۲] نیز یک الگوریتم متمرکز برای اندازه‌گیری‌های غیرهمزمان سنسورهای سمت به تنهایی ارائه شده است.

استراتژی‌های مختلفی از جمله استراتژی‌های افزایشی[9]، اجماع[10] و پخش[11] برای همکاری عامل‌ها و نحوه تبادل اطلاعات در شبکه پیشنهاد شده است [۱۳]. در مرجع [۱۴] تلاش گردیده است که حجم اطلاعات موردنیاز جهت تبادل بین گره‌ها کاهش یابد. یکی از راهکارهای مورد استفاده، تبادل اطلاعات با گره‌های انتخاب شده بصورت تصادفی بجای انتشار سراسری در شبکه است. عموماً از استراتژی اجماع برای پیاده‌سازی رفتار هماهنگ و همکارانه در سیستم‌های شبکه‌ای استفاده می‌شود. مرجع [۱۵] به بررسی و تحلیل الگوریتم‌های اجماع در سیستم‌های چندعامله پرداخته است. در سال‌های اخیر، فیلترهای توزیع شده مبتنی بر اجماع مورد توجه قرار گرفته است. مرجع [۱۶] از فیلتر کالمن نمونه‌بردار مبتنی بر اجماع میانگین برای حل مسئله ردیابی سمت به تنهایی در فضای سه بعدی استفاده نموده است. در فیلترهای توزیع شده مبتنی بر اجماع، لازم است که بین دو اندازه‌گیری متوالی، مرحله اجماع به همگرایی برسد؛ اما در سیستم‌های بزرگ و گسترده به دلایلی مانند تاخیر شبکه و اتصالات متناوب ممکن است این کار قابل انجام نباشد [۱۷]. مرجع [۳] از فیلتر ذره‌ای توزیع شده برای حل مسئله ردیابی سمت به تنهایی استفاده نموده و تلاش کرده است که سربار ناشی از تکرارهای لازم برای همگرایی الگوریتم اجماع کاهش داده شود. مرجع [۱۸] با مقایسه استراتژی‌های همکاری برای تخمین توزیع شده، نشان داده است که الگوریتم‌های پخش عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های اجماع دارند. در مرجع [۱۷] یک چارچوب برای تخمین غیرخطی چندسنسوری توزیع شده با استفاده از فیلتر ذره‌ای مبتنی بر استراتژی پخش ارائه شده است.

دو پیکربندی کاربردی برای حل مسائل تخمین چندسنسوری وجود دارد. در پیکربندی اول، اندازه‌گیری‌های تمام سنسورها مستقیماً در فرایند

[1] Bearings-Only Tracking
[2] Passive
[3] Maximum Likelihood (ML)
[4] Track
[5] Centralized Architecture
[6] Decentralized Architecture
[7] Hybrid Architecture
[8] Data Fusion Centre
[9] Incremental Strategy
[10] Consensus Strategy
[11] Diffusion Strategy

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

فیلترینگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پیکربندی دوم، ابتدا تمام اندازه‌گیری‌ها از یک زمان مشخص، با یکدیگر ترکیب شده و یک اندازه‌گیری کامل‌تر را می‌سازند که به آن اندازه‌گیری مرکب[1] گفته می‌شود [۱۹]. مرجع [۲۰]، روابط مناسبی جهت محاسبه اندازه‌گیری مرکب برای مسئله ردیابی سمت به تنهایی با ساختار متمرکز و اندازه‌گیری‌های همزمان ارائه نموده است. در مرجع [۲۱] دو روش برای تشکیل اندازه‌گیری مرکب در سیستم ردیابی سمت به تنهایی متمرکز با سنسورهای ثابت و مشاهدات ناهمزمان ارائه شده است. مرجع [۱۹] روش اول ارائه شده در مرجع [۲۱] را تکمیل نموده است.

در این تحقیق، ردیابی اهداف با استفاده از تعدادی عامل سنسوری هوشمند که فقط قادر به اندازه‌گیری سمت اهداف می‌باشند، مدنظر قرار گرفته است. اگرچه در تحقیقات منتشر شده ابعاد مختلف این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است اما هیچکدام از آنها به حل مسئله ردیابی سمت به تنهایی بصورت چندهدفی چندسنسوری با معماری غیرمتمرکز و اندازه‌گیری‌های ناهمزمان که در این مقاله ارائه گردیده است، نپرداخته‌اند.

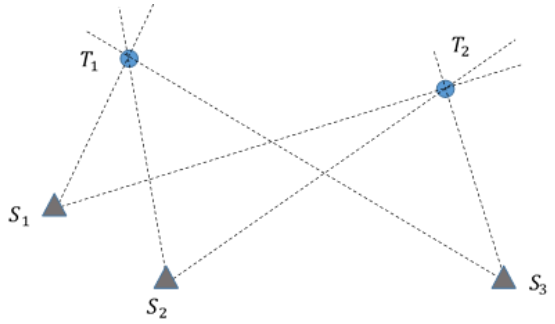
در این پژوهش، پس از وابسته‌سازی داده[2]، ایده اندازه‌گیری مرکب ارائه شده توسط مرجع [۱۹]، با انجام برخی اصلاحات لازم، برای سیستم غیرمتمرکز موردنظر در این تحقیق بکارگیری شده است. در فرایند مدیریت خط‌سیر اهداف، از ایده انتخاب مناسب‌ترین هدف از بین یک مجموعه اهداف فرضی، برای راه‌اندازی خط‌سیرهای جدید استفاده شده است. بکارگیری روش اندازه‌گیری مرکب موجب خطی شدن معادله اندازه‌گیری می‌شود، لذا از فیلتر کالمن توزیع شده مبتنی بر استراتژی پخش برای تخمین حالت اهداف استفاده شده است. مانور حرکتی عامل‌ها نیز به نحوی تعیین می‌گردد که ضمن حفظ اتصال شبکه و تعقیب اهداف، سرعت و کیفیت ردیابی بهبود یابد.

در ادامه، ابتدا مسئله موردنظر تشریح گردیده و روش اجرای تحقیق به تفصیل شرح داده می‌شود. بعد از آن، نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی‌های انجام شده، ارائه گردیده و مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتها نیز ضمن ارائه نتیجه‌گیری، پیشنهاداتی جهت ادامه تحقیق مطرح می‌گردد.

۲- تشریح مسئله موردنظر

۲–۱ سیستم مورد مطالعه

در این تحقیق، طراحی یک سیستم توزیع شده برای ردیابی اهداف متحرک بدون مانور در فضای دو بعدی با استفاده از تعدادی عامل متحرک خودمختار (مانند ربات یا پهپاد[3]) مدنظر قرار گرفته است. این عامل‌ها که فقط قادر به اندازه‌گیری سمت اهداف می‌باشند، بطور مستقل محیط را پایش نموده و بصورت محلی اندازه‌گیری‌ها را پردازش می‌نمایند. هر عامل با عامل‌های همسایه خود ارتباط دارد، لذا با تشکیل یک شبکه سنسوری توزیع شده، چارچوب مناسبی برای تخمین غیرمتمرکز و همکارانه، بدون نیاز به مرکز تلفیق داده فراهم می‌شود. با توجه به عملکرد مستقل عامل‌ها، اندازه‌گیری‌ها ناهمزمان می‌باشند. هدف از حل این مسئله، تخمین سینماتیک (موقعیت و سرعت) اهداف می‌باشد. در شکل ۱ یک سناریوی نمونه که شامل سه عامل سنسوری و دو هدف می‌باشد، مشاهده می‌گردد.



شکل ۱: یک سناریوی نمونه ردیابی سمت به تنهایی توزیع شده

۲–۲ فرضیات مسئله

در مسئله موردنظر، فرض شده است که هر عامل می‌تواند با استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی[4] یا سیستم ناوبری اینرسی[5]، موقعیت و سرعت خود را بطور دقیق تعیین نماید. اما اندازه‌گیری سمت اهداف دارای خطا می‌باشد که بصورت نویز سفید گوسی با میانگین صفر و انحراف معیار حداکثر ۵ درجه در نظر گرفته شده است. اهداف، بدون مانور بوده اما عامل‌ها با حداکثر نرخ چرخش ۲ درجه بر ثانیه می‌توانند مانور داشته باشند. حداکثر سرعت اهداف و عامل‌ها ۳۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. برای هر عامل، دید ۳۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. حداکثر فاصله قابل اندازه‌گیری توسط پارامتری به نام برد اندازه‌گیری تعیین می‌گردد. حداکثر فاصله ممکن جهت ارتباط با عامل‌های اطراف به مقداری تحت عنوان برد ارتباطی محدود شده است. با توجه به محدودیت پهنای باند ارتباطی در دنیای واقعی، باید حداقل داده‌ها بین عامل‌ها رد و بدل شود. همچنین کاهش حجم محاسبات محلی موردنیاز در هر عامل مدنظر قرار می‌گیرد تا استفاده از الگوریتم‌های طراحی شده در کاربردهای واقعی امکان‌پذیر گردد.

۳- روش انجام تحقیق

۳–۱ مدل محیط

محیط سیستم، فضایی دوبعدی دربرگیرنده تمام موجودیت‌ها شامل سنسورها و اهداف می‌باشد. مشخصات تمام موجودیت‌ها از جمله مشخصات مکانی و حرکتی آنها در مدل محیط ثبت گردیده و در زمان شبیه‌سازی سیستم، بطور مداوم بروز رسانی می‌شود. دو کارکرد اصلی برای مدل محیط در نظر گرفته شده است. کارکرد اول، مدل‌سازی فرایند

[1] Composite Measurement
[2] Data Association
[3] Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
[4] Global Positioning System (GPS)
[5] Inertial Navigation System (INS)

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

اندازه‌گیری سمت اهداف موجود در محیط نسبت به عامل‌ها و با توجه به برد اندازه‌گیری آنها می‌باشد. کارکرد دوم محیط، ایفای نقش رسانه انتقال اطلاعات بیسیم بین عامل‌ها می‌باشد. محیط از دیدگاه انتقال سیگنال مخابراتی، ایده‌آل و بدون نویز در نظر گرفته شده و احتمال خرابی بسته‌های داده صفر است اما برد ارتباطی محدود می‌باشد. هنگامی که یک عامل، اطلاعات خود را در محیط منتشر می‌کند، این اطلاعات توسط محیط به عامل‌هایی که قادر به تبادل داده با عامل مذکور باشند انتقال داده می‌شود.

۳–۲ مدل اهداف

اهداف بصورت اشیاء متحرک ساده با حرکت مستقیم الخط یکنواخت در دستگاه مختصات کارتزین مدل‌سازی می‌شوند. بردار موقعیت آنها در زمان شبیه‌سازی سیستم، بطور مداوم و در هر پیمایش یا گام زمانی بروز رسانی می‌شود.

۳ – ۳ مدل عامل‌ها

عامل‌های سنسوری، موجودیتهای هوشمندی هستند که با حسگرهای خود، اهداف موجود در محیط را تشخیص داده و الگوریتم‌های محاسباتی موردنیاز را اجرا می‌کنند. در زمان شبیه‌سازی سیستم، بردار موقعیت و بردار سرعت عامل‌ها نیز بطور مداوم و در هر گام زمانی بروز رسانی می‌شود. همچنین برنامه عامل که وظیفه تامین هوشمندی را بر عهده دارد، در هر پیمایش شبیه‌سازی اجرا می‌شود. بخش اصلی حل مسئله در این تحقیق، طراحی ساختار کارکردی برنامه عامل‌ها و الگوریتم‌های محاسباتی آنها می‌باشد. فلوچارت کلی برنامه عامل در شکل ۲ آورده شده است.

اولین مرحله در برنامه عامل، شناسایی و تعیین عامل‌های همسایه است. اطلاعات دریافتی از عامل‌های همسایه، برای مدت زمان معینی در حافظه عامل نگهداری شده و سپس از حافظه حذف می‌شوند. به منظور تعیین عامل‌های همسایه، شماره عامل‌هایی که اطلاعات دریافتی از آنها در حافظه موجود می‌باشد، استخراج می‌گردد.

موقعیت عامل i ام و هدف j ام در دستگاه مختصات کارتزین دو بعدی در شکل ۳ نشان داده شده است. موقعیت عامل در لحظه t_k معلوم فرض می‌شود:

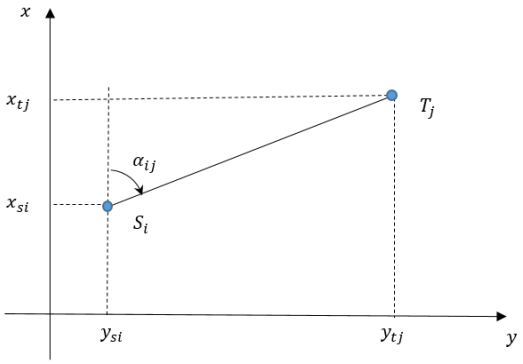
$$S_i(t_k) = \begin{bmatrix} x_{si}(t_k) \\ y_{si}(t_k) \end{bmatrix} \quad (۱)$$

موقعیت هدف j ام در لحظه t_k بصورت زیر نشان داده می‌شود:

$$T_j(t_k) = \begin{bmatrix} x_{tj}(t_k) \\ y_{tj}(t_k) \end{bmatrix} \quad (۲)$$



شکل ۲: فلوچارت کلی برنامه عامل‌های سنسوری



شکل ۳: هندسه مسئله ردیابی سمت به تنهایی در دستگاه مختصات کارتزین

مدل اندازه‌گیری بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$z_{ij}(t_k) = h\left(T_j(t_k), S_i(t_k)\right) + w_{ij}(t_k) \quad (۳)$$

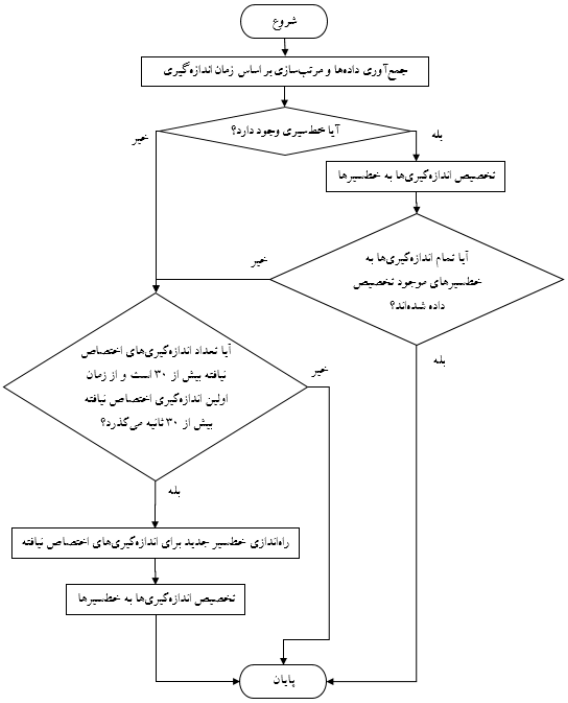
که $z_{ij}(t_k)$ اندازه‌گیری سمت هدف j ام توسط عامل i ام در t_k است و $w_{ij}(t_k)$ نویز اندازه‌گیری سنسور i ام برای هدف j ام در t_k می‌باشد. نویز اندازه‌گیری سنسور i ام، دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس R_i در نظر گرفته شده است. همچنین:

$$h\left(T_j(t_k), S_i(t_k)\right) = \alpha_{ij}(t_k) = \tan^{-1}\left(\frac{y_{tj}(t_k) - y_{si}(t_k)}{x_{tj}(t_k) - x_{si}(t_k)}\right) \quad (۴)$$

فلوچارت فرایند وابسته‌سازی اندازه‌گیری‌ها به خط‌سیرهای موجود در شکل ۴ آورده شده است. در این تحقیق، روش نزدیک‌ترین همسایه برای وابسته‌سازی داده، انتخاب شده و توسط الگوریتم تخصیص منابع مانکرس[1] پیاده‌سازی شده است.

[1] Munkres Algorithm

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]



شکل ۴: فلوچارت فرایند وابسته‌سازی داده

هزینه تخصیص اندازه‌گیری i ام به هدف j ام بصورت زیر تعریف شده است:

$$cost_{ij} = K_1\left(1 - e^{K_2(\gamma_{ij})^2}\right) \quad (۵)$$

که K_1 و K_2 ضرایب ثابت می‌باشند. همچنین:

$$\gamma_{ij} = \hat{\alpha}_{tj} - \alpha_{zi} \quad (۶)$$

که α_{zi} زاویه سمت اندازه‌گیری شده و $\hat{\alpha}_{tj}$ مقدار تخمین زده شده برای زاویه سمت هدف در زمان اندازه‌گیری α_{zi} است.

برای راه‌اندازی خط‌سیر جدید، ابتدا تعدادی هدف موقت با پارامترهای تصادفی به عنوان نامزد برای خط‌سیر جدید تولید می‌شوند. فاصله این اهداف نسبت به محل اندازه‌گیری، نمونه‌هایی تصادفی از توزیع یکنواخت در برد اندازه‌گیری سنسور می‌باشند. زاویه سمت این اهداف، نمونه‌های تصادفی از توزیع گوسی حول مقدار اندازه‌گیری شده با انحراف معیار سنسور مربوطه انتخاب می‌شوند. کورس اهداف نیز نمونه‌هایی تصادفی از توزیع یکنواخت در بازه صفر تا ۳۶۰ درجه می‌باشند.

در مرحله بعدی، میزان انطباق هر کدام از اهداف موقت با تمام اندازه‌گیری‌های اختصاص نیافته تعیین می‌گردد. تابع انطباق بصورت زیر تعریف شده است:

$$Congruity_{nm} = K_1\left(1 - e^{K_2(\zeta_{nm})^2}\right) \quad (۷)$$

که n اندیس هدف موقت موردنظر، m اندیس اندازه‌گیری، K_1 و K_2 ضرایب ثابت می‌باشند. همچنین:

$$\zeta_{nm} = \hat{\alpha}_{tn} - \alpha_{zm} \quad (۸)$$

که α_{zm} زاویه سمت اندازه‌گیری شده و $\hat{\alpha}_{tn}$ مقدار تخمین زده شده برای سمت هدف در زمان اندازه‌گیری α_{zm} است.

هدف موقتی که بیشترین انطباق را با اندازه‌گیری‌ها داشته باشد، انتخاب شده و یک تخمین گر برای آن راه‌اندازی می‌شود. در پیمایش‌های بعدی شبیه‌سازی، برای این هدف نیز فرایند فیلترینگ و تخمین حالت انجام خواهد شد.

سه وضعیت مختلف برای اهداف تخمین زده شده، تعریف شده است: در حال بررسی[1]، ردیابی شده[2] و گم شده[3]. وضعیت اهداف جدید، در حال بررسی در نظر گرفته می‌شود. پس از گذشت مدت زمان معینی از شروع فیلترینگ، وضعیت هدف به ردیابی شده تغییر می‌یابد. اگر به اندازه مدت زمان معین دیگری، از آخرین اندازه‌گیری اختصاص یافته به یک هدف با وضعیت ردیابی شده بگذرد، وضعیت آن به گم شده تغییر خواهد یافت. در این صورت، اندازه‌گیری پیش‌بینی شده بر مبنای تخمین بردار حالت هدف، به جای اندازه‌گیری سنسور مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر مدت زیادی از آخرین اندازه‌گیری تخصیص داده شده به یک هدف با هر وضعیتی بگذرد، آن هدف از لیست اهداف تخمین زده شده حذف خواهد شد.

پس از وابسته‌سازی داده، اندازه‌گیری‌های مربوط به هر هدف مشخص شده است، لذا برای هر هدف یک اندازه‌گیری مرکب محاسبه می‌گردد. موقعیت عامل در t_k بصورت زیر می‌باشد:

$$S(t_k) = \begin{bmatrix} x_s(t_k) \\ y_s(t_k) \end{bmatrix} \quad (۹)$$

بردار حالت هدف در t_k بصورت زیر است:

$$X(t_k) = \begin{bmatrix} x(t_k) \\ y(t_k) \\ \dot{x}(t_k) \\ \dot{y}(t_k) \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

اندازه‌گیری سنسور در لحظه t_k بصورت زیر می‌باشد:

$$z(t_k) = h\big(X(t_k), S(t_k)\big) + w(t_k) \quad (۱۱)$$

که $w(t_k)$ نویز اندازه‌گیری سنسور در لحظه t_k می‌باشد و دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس R_k در نظر گرفته می‌شود. در هر زمان، با توجه به منبع اندازه‌گیری، از واریانس سنسور مربوطه استفاده خواهد شد. همچنین:

$$h\big(X(t_k), S(t_k)\big) = \alpha(t_k) = tan^{-1}\left(\frac{y(t_k) - y_s(t_k)}{x(t_k) - x_s(t_k)}\right) \quad (۱۲)$$

تعداد کل اندازه‌گیری‌ها M در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری مرکب، تخمین بردار حالت هدف در لحظه مشخصی مانند t_f یعنی $\hat{X}(t_f)$ می‌باشد که برای محاسبه آن، از روش تخمین حداکثر شباهت استفاده شده است. تابع چگالی احتمال مجموعه تمام اندازه‌گیری‌ها (Z) به شرط $X(t_f)$، به عنوان تابع درستنمایی در نظر گرفته می‌شود:

$$\Lambda\big[X(t_f); \mathrm{Z}\big] \triangleq p\big[\mathrm{Z} \mid X(t_f)\big] = \prod_k p\big[\mathrm{z}(t_k) \mid X(t_f)\big] \quad (۱۳)$$

[1] Query
[2] Track
[3] Lost

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

بنابراین تخمین حداکثر شباهت برابر خواهد بود با:

$$\hat{X}_{ML} = \underset{X(t_f)}{\operatorname{argmax}}\, \Lambda[X(t_f); \mathrm{Z}] = \underset{X(t_f)}{\operatorname{argmin}}\, \lambda[X(t_f); \mathrm{Z}] \quad (۱۴)$$

که $\lambda(X)$، تابع درستنمایی لگاریتمی منفی می‌باشد:

$$\lambda(X) = -\ln \Lambda(X) \quad (۱۵)$$

با توجه به فرض گوسی بودن سیستم، داریم:

$$\lambda(X) = \frac{1}{2} \times \sum_k \Big[z(t_k) - h\big(X(t_k), S(t_k)\big)\Big]^T (R_k)^{-1} \Big[z(t_k) - h\big(X(t_k), S(t_k)\big)\Big] \quad (۱۶)$$

ماتریس F بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(t_k, t_f) \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & (t_k - t_f) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (t_k - t_f) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

می‌توان نوشت:

$$X(t_k) = F(t_k, t_f)\, X(t_f) \quad (۱۸)$$

بردار اندازه‌گیری انباشته شده، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{Z} \triangleq \begin{bmatrix} z(t_1) \\ z(t_2) \\ \vdots \\ z(t_M) \end{bmatrix} \quad (۱۹)$$

می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} h(X(t_1), S(t_1)) \\ h(X(t_2), S(t_2)) \\ \vdots \\ h(X(t_M), S(t_M)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h\left(F(t_1, t_f)\, X(t_f), S(t_1)\right) \\ h\left(F(t_2, t_f)\, X(t_f), S(t_2)\right) \\ \vdots \\ h\left(F(t_M, t_f)\, X(t_f), S(t_M)\right) \end{bmatrix} \quad (۲۰)$$

بردار اندازه‌گیری انباشته پیش‌بینی شده برای $\hat{X}(t_f)$ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{h}\left(\hat{X}(t_f)\right) \triangleq \begin{bmatrix} h\left(F(t_1, t_f)\, \hat{X}(t_f), S(t_1)\right) \\ h\left(F(t_2, t_f)\, \hat{X}(t_f), S(t_2)\right) \\ \vdots \\ h\left(F(t_M, t_f)\, \hat{X}(t_f), S(t_M)\right) \end{bmatrix} \quad (۲۱)$$

در صورت خطی‌سازی تابع h حول $\hat{X}(t_f)$ خواهیم داشت:

$$\alpha_k \triangleq \alpha(t_k) = h\left(F(t_k, t_f)\, \hat{X}(t_f), S(t_k)\right) = H_k\, \hat{X}(t_f) \quad (۲۲)$$

که H_k ژاکوبین تابع h می‌باشد:

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial y} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial \dot{y}} \end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

ماتریس H بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$H \triangleq \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_M \end{bmatrix} \quad (۲۴)$$

ماتریس R به فرم زیر تعریف می‌گردد:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_M \end{bmatrix} \quad (۲۵)$$

برای بیشینه کردن تابع درستنمایی از الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی استفاده می‌شود و تخمین فعلی بردار حالت هدف، به عنوان مقدار اولیه در نظر گرفته می‌شود. بعد از تکرار j ام، تخمین حالت هدف (اندازه‌گیری مرکب) بصورت زیر خواهد بود:

$$\hat{X}^{j+1} = \hat{X}^j + [(H^j)^T R^{-1} H^j]^{-1} (H^j)^T R^{-1} \big[\mathrm{Z} - \bar{h}(\hat{X}^j)\big] \quad (۲۶)$$

برای خطی‌سازی تابع h حول $\hat{X}(t_f)$ و محاسبه H_k، باید مشتقات α_k نسبت به $x(t_f)$، $y(t_f)$، $\dot{x}(t_f)$ و $\dot{y}(t_f)$ محاسبه شوند. داریم:

$$\alpha_k = tan^{-1}\left(\frac{y(t_f) + (t_k - t_f)\, \dot{y}(t_f) - y_s(t_k)}{x(t_f) + (t_k - t_f)\, \dot{x}(t_f) - x_s(t_k)}\right) \quad (۲۷)$$

تعریف می‌شود:

$$\Delta x_s \triangleq x(t_f) + (t_k - t_f)\, \dot{x}(t_f) - x_s(t_k) \quad (۲۸)$$

و:

$$\Delta y_s \triangleq y(t_f) + (t_k - t_f)\, \dot{y}(t_f) - y_s(t_k) \quad (۲۹)$$

بنابراین:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial x} = \frac{-\Delta y_s}{{\Delta x_s}^2 + {\Delta y_s}^2} \quad (۳۰)$$

به روش مشابه:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial y} = \frac{\Delta x_s}{{\Delta x_s}^2 + {\Delta y_s}^2} \quad (۳۱)$$

همچنین:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial \dot{x}} = \frac{-\Delta y_s}{{\Delta x_s}^2 + {\Delta y_s}^2}(t_k - t_f) = (t_k - t_f)\frac{\partial \alpha_k}{\partial x} \quad (۳۲)$$

و:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial \dot{y}} = \frac{\Delta x_s}{{\Delta x_s}^2 + {\Delta y_s}^2}(t_k - t_f) = (t_k - t_f)\frac{\partial \alpha_k}{\partial y} \quad (۳۳)$$

کران پایین کرامر رائو[1] که حداقل خطای تخمین قابل دستیابی توسط یک تخمین‌گر بدون بایاس را تعیین می‌کند بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$E\left[(X - \hat{X})(X - \hat{X})^T\right] \geq J^{-1} \quad (۳۴)$$

که J ماتریس اطلاعات فیشر[2] می‌باشد:

$$J \triangleq E[(\nabla_x \ln \Lambda(X))(\nabla_x \ln \Lambda(X))^T] \mid_{X = X_{true}} \quad (۳۵)$$

می‌توان نوشت:

$$J = E\left[\left(\nabla_x \lambda(X)\right)\left(\nabla_x \lambda(X)\right)^T\right] \Big|_{X = X_{true}} \quad (۳۶)$$

همچنین:

$$\nabla_x \lambda(X) = \sum_{i=1}^{M} {H_i}^T {R_i}^{-1} \left[z(t_i) - h\left(F(t_i, t_f)\, X(t_f), S(t_i)\right)\right] \quad (۳۷)$$

در نتیجه:

$$J = \sum_{i=1}^{M} {H_i}^T {R_i}^{-1} H_i \Big|_{X = X_{true}} = H^T {R_i}^{-1} H \Big|_{X = X_{true}} \quad (۳۸)$$

چون مقدار واقعی X در دسترس نمی‌باشد، از تخمین آن برای محاسبه ماتریس اطلاعات فیشر و کران پایین کرامر رائو استفاده می‌شود. با توجه

[1] Cramer-Rao Lower Bound (CRLB)

[2] Fisher Information Matrix (FIM)

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

به نتایج مناسب تخمین‌گر حداکثر شباهت، از کران پایین کرامر رائو به عنوان کواریانس نویز اندازه‌گیری مرکب استفاده شده است.

با توجه به خطی شدن معادله اندازه‌گیری به دلیل استفاده از ایده اندازه‌گیری مرکب و خطی بودن معادله حالت سیستم به دلیل بدون مانور بودن اهداف، از فیلتر کالمن مبتنی بر استراتژی پخش برای تخمین حالت سیستم استفاده شده است. به این منظور، خط‌سیرهای موجود با خط‌سیرهای تخمین زده شده توسط عامل‌های همسایه مقایسه شده و اطلاعات تمام خط‌سیرهای مشابه در فرایند فیلترینگ بکارگیری می‌شود. معیار شباهت بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$S_{ij} = \left(X_i - X_j\right)^T \left(P_i + P_j\right)^{-1} \left(X_i - X_j\right) \quad (۳۹)$$

که X_i تخمین بردار حالت هدف توسط عامل i ام و X_j تخمین حالت هدف توسط عامل j ام است. همچنین P_i کواریانس تخمین X_i و P_j کواریانس تخمین X_j می‌باشد.

ماتریس‌های F و G بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad G \triangleq \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (۴۰)$$

که Δt فاصله زمانی می‌باشد. معادله حالت سیستم را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$X(k+1) = F\,X(k) + G\,\mathrm{v}(k) \quad (۴۱)$$

که $\mathrm{v}(k)$، نویز فرایند می‌باشد. ماتریس H بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$H \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۴۲)$$

در این صورت، معادله اندازه‌گیری بصورت زیر خواهد بود:

$$z(k) = H\,X(k) + w(k) \quad (۴۳)$$

که $w(k)$ نویز اندازه‌گیری می‌باشد.

فلوچارت فرایند فیلترینگ مبتنی بر استراتژی پخش در شکل ۵ آورده شده است. ابتدا مقدار پیش‌بینی شده بردار حالت هدف و ماتریس کواریانس آن محاسبه می‌گردد:

$$\hat{X}_{k|k-1} = F\,\hat{X}_{k-1|k-1} + G\,\mathrm{v}(k) \quad (۴۴)$$

$$P_{k|k-1} = F\,P_{k-1|k-1}F^T + G\,\mathrm{Q}G^T \quad (۴۵)$$

که Q کواریانس نویز فرایند است. در گام بعدی، تخمین بردار حالت، با توجه به اندازه‌گیری انجام شده توسط عامل موردنظر و همچنین اندازه‌گیری‌های دریافتی از مجموعه عامل‌های همسایه $(\mathcal{N}_k)$، مطابق با روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$S = R_{\ell,k} + HP_{k|k-1}H^T \quad (۴۶)$$

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + P_{k|k-1}H^T S^{-1}\left[z_{\ell,k} - H\hat{X}_{k|k-1}\right] \quad (۴۷)$$

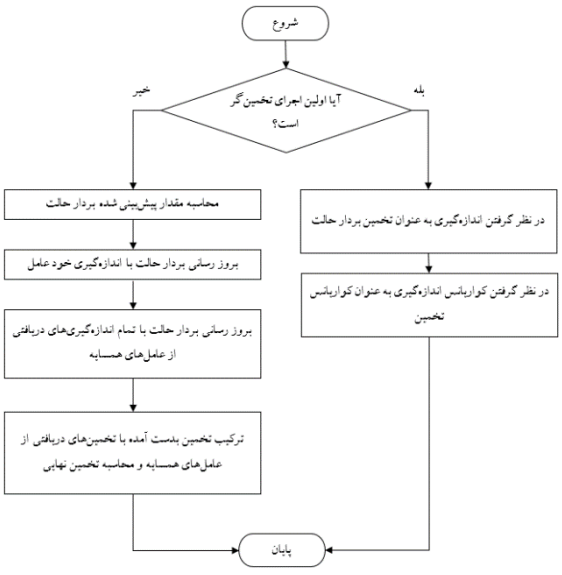
$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - P_{k|k-1}H^T S^{-1} H P_{k|k-1} \quad (۴۸)$$

که $z_{\ell,k}$ مقدار اندازه‌گیری شده توسط عامل همسایه ℓ ام $(\ell \in \mathcal{N}_k)$ در لحظه k و $R_{\ell,k}$ کواریانس نویز اندازه‌گیری عامل ℓ ام در لحظه k می‌باشد. در آخرین گام نیز تخمین محاسبه شده برای بردار حالت با مقادیر تخمین زده شده توسط عامل‌های همسایه ترکیب شده و تخمین نهایی بردار حالت به همراه کواریانس آن مطابق با روابط ذیل محاسبه می‌گردد:

$$\hat{X}_{k|k} = \sum_{\ell \in \mathcal{N}_k} a_{\ell k}\hat{X}_{\ell,k|k} \quad (۴۹)$$

$$P_{k|k} = \left(\sum_{\ell \in \mathcal{N}_k} a_{\ell k}\left(P_{\ell,k|k}\right)^{-1}\right)^{-1} \quad (۵۰)$$

که $\hat{X}_{\ell,k|k}$ تخمین بردار حالت برای هدف موردنظر توسط عامل ℓ ام و $P_{\ell,k|k}$ کواریانس تخمین آن می‌باشد.



شکل ۵: فلوچارت فرایند فیلترینگ مبتنی بر استراتژی پخش

با توجه به پیچیدگی سیستم، احتمال ایجاد خط‌سیرهای اشتباه یا تکراری در فرایند ردیابی اهداف وجود دارد. خط‌سیرهای اشتباه، پس از مدتی به دلیل عدم تخصیص اندازه‌گیری به آنها حذف خواهند شد. اما ممکن است خط‌سیرهای تکراری باقی بمانند. بنابراین لازم است بعد از فیلترینگ، وجود اهداف یکسان مورد بررسی قرار گیرد. در صورت وجود خط‌سیرهای مشابه، خط‌سیری که عدم قطعیت بیشتری دارد حذف می‌شود. برای تعیین میزان عدم قطعیت یک خط‌سیر، از کواریانس تخمین بردار حالت آن استفاده شده است:

$$Uncertainty = (P_{11} + P_{22}) \times (P_{33} + P_{44}) \quad (۵۱)$$

که P_{11} کواریانس $\hat{x}$، P_{22} کواریانس $\hat{y}$، P_{33} کواریانس $\hat{x}$ و P_{44} کواریانس $\hat{y}$ می‌باشد.

به منظور به اشتراک‌گذاری اطلاعات، هر عامل با استفاده از زیرساخت شبکه، اندازه‌گیری‌های خود را به همراه اهداف ردیابی شده به عامل‌های مجاور ارسال می‌نماید. در ساختار عامل حافظه‌ای برای نگهداری وضعیت آن در نظر گرفته شده است. پس از تکمیل فرایندها، وضعیت فعلی برای استفاده در اجراهای بعدی، ذخیره می‌شود.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

جهت‌گیری عامل به سمت موقعیت مطلوب به نحوی تعیین می‌گردد که ضمن حفظ اتصال شبکه، دقت و سرعت همگرایی الگوریتم ردیابی، بهبود یافته و تا حد امکان، اهداف ردیابی شده از حوزه اندازه‌گیری سنسور خارج نشوند. به این منظور، سه الگوریتم بهینه‌سازی بطور مستقل اجرا شده و نتایج بدست آمده با هم ترکیب می‌شوند. اندازه سرعت عامل هنگام مانور، ثابت فرض می‌شود. متغیر کنترلی مورد استفاده برای بهینه‌سازی مانور، زاویه کورس عامل می‌باشد.

الگوریتم بهینه‌سازی اول، کورس عامل را طوری محاسبه می‌کند که عامل موردنظر حداکثر فاصله را از عامل‌های همسایه داشته باشد. این موضوع موجب افزایش رویت‌پذیری حالت اهداف و بهبود دقت تخمین‌ها می‌شود. تابع هزینه در این الگوریتم، بصورت زیر تعیین شده است:

$$cost = -\sum_i R_{n_i} \quad (۵۲)$$

که R_{n_i} فاصله عامل همسایه i ام از عامل موردنظر می‌باشد. در الگوریتم بهینه‌سازی دوم، کورس عامل طوری محاسبه می‌شود که فاصله عامل از اهداف حداقل شود. این موضوع ضمن افزایش رویت‌پذیری حالت اهداف و دقت ردیابی، احتمال خارج شدن اهداف از برد اندازه‌گیری سنسور را کاهش می‌دهد. تابع هزینه این الگوریتم، بصورت زیر است:

$$cost = \sum_j R_{t_j} \quad (۵۳)$$

که R_{t_j} فاصله هدف j ام از عامل موردنظر می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی سوم، تلاش می‌کند جهت حرکت عامل، عمود بر خط دید اهداف باشد که موجب افزایش رویت‌پذیری و بهبود دقت تخمین‌ها می‌گردد. تابع هزینه مربوطه، بصورت زیر است:

$$cost = \sum_j K_1 \left(1 - e^{-K_2\left(\lambda_j - \frac{\pi}{2}\right)^2}\right) \quad (۵۴)$$

که K_1 و K_2 ضرایب ثابت بوده و λ_j سمت حرکت عامل نسبت به هدف j ام می‌باشد که برابر است با:

$$\lambda_j = |B_j - C| \quad (۵۵)$$

که B_j سمت هدف یا همان زاویه خط دید هدف می‌باشد و C کورس عامل موردنظر است.

در هر سه الگوریتم بهینه‌سازی، قیدهای زیر نیز در نظر گرفته شده است:

$$\forall i,\ R_{n_i} \geq R_{n_{min}} \quad (۵۶)$$

که $R_{n_{min}}$ حداقل فاصله عامل موردنظر از عامل همسایه است که برای هر همسایه بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$R_{n_{min}} = 0.05 \times \min\{CR_a, CR_{n_i}\} \quad (۵۷)$$

که CR_a برد ارتباطی عامل موردنظر و CR_{n_i} برد ارتباطی عامل همسایه i ام است.

$$\forall i,\ R_{n_i} \leq R_{n_{max}} \quad (۵۸)$$

که $R_{n_{max}}$ حداکثر فاصله عامل موردنظر از عامل همسایه است و برای هر همسایه بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$R_{n_{max}} = 0.95 \times \min\{CR_a, CR_{n_i}\} \quad (۵۹)$$

همچنین:

$$\forall j,\ R_{t_j} \geq R_{t_{min}} \quad (۶۰)$$

که $R_{t_{min}}$ حداقل فاصله عامل موردنظر تا اهداف است که بصورت زیر تعیین می‌گردد:

$$R_{t_{min}} = 0.05 \times MR_a \quad (۶۱)$$

که MR_a برد اندازه‌گیری عامل موردنظر است. همچنین:

$$\forall j,\ R_{t_j} \leq R_{t_{max}} \quad (۶۲)$$

که $R_{t_{max}}$ حداکثر فاصله عامل موردنظر تا اهداف است که بصورت زیر تعیین می‌گردد:

$$R_{t_{max}} = 0.95 \times MR_a \quad (۶۳)$$

همچنین کمترین و بیشترین مقدار زاویه کورس عامل، با توجه به حداکثر نرخ چرخش عامل و فاصله زمانی تا اجرای بعدی برنامه عامل، محاسبه شده و به الگوریتم‌های بهینه‌سازی اعمال می‌گردد.

پس از اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی، نتایج حاصله ترکیب شده و زاویه کورس نهایی عامل بدست می‌آید:

$$C = \frac{K_{R_n}}{K_{R_n}+K_{R_t}+K_{D_t}} C_{R_n} + \frac{K_{R_t}}{K_{R_n}+K_{R_t}+K_{D_t}} C_{R_t} + \frac{K_{D_t}}{K_{R_n}+K_{R_t}+K_{D_t}} C_{D_t} \quad (۶۴)$$

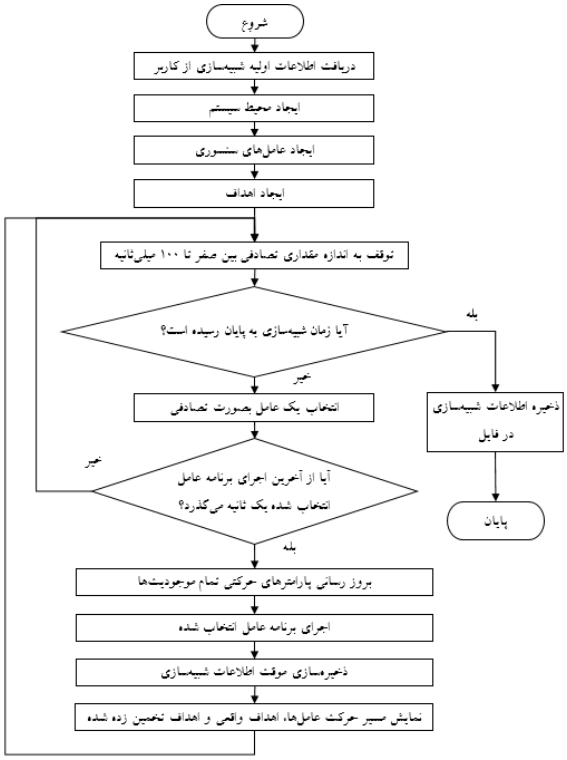
که C_{R_n}، C_{R_t} و C_{D_t} به ترتیب کورس محاسبه شده بر مبنای حداکثرسازی فاصله تا عامل‌های همسایه، کورس محاسبه شده بر مبنای حداقل‌سازی فاصله تا اهداف و کورس محاسبه شده بر مبنای حداکثرسازی تعامد بر خط دید می‌باشند و K_{R_n}، K_{R_t} و K_{D_t} نیز ضرایب مربوطه با همان ترتیب می‌باشند. با مشخص شدن کورس عامل، هنگام بروز رسانی پارامترهای حرکتی، موقعیت و سرعت عامل متناسب با این مقدار محاسبه خواهد گردید.

۳-۴ نحوه شبیه‌سازی سیستم

برای شبیه‌سازی سیستم از نرم‌افزار متلب و تکنیک برنامه‌نویسی شی‌گرا[1] استفاده شده است. به این منظور یک کلاس[2] برای مدل‌سازی اهداف، یک کلاس برای مدل‌سازی عامل‌ها و یک کلاس دیگر برای مدل کردن محیط، طراحی و پیاده‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی سیستم کافی است از هر کلاس به تعداد موردنیاز شیء[3] ایجاد نموده و از هر شیء توابع لازم را اجرا نمود. به منظور ایجاد ناهمزمانی در سیستم، اجرای برنامه عامل‌ها با تاخیرهای تصادفی انجام می‌شود. فلوچارت کلی شبیه‌سازی در شکل ۶ آمده است.

[1] Object-Oriented Programming
[2] Class
[3] Object

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]



شکل ۶: فلوچارت کلی شبیه‌سازی سیستم

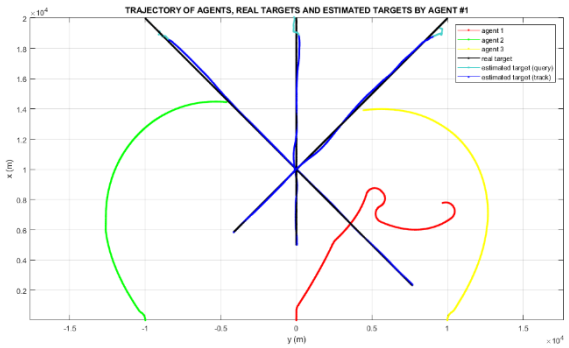
٤- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی نحوه عملکرد سیستم، می‌توان از سناریوهای خاص با اهداف مشخص استفاده نمود. سناریوهای تصادفی نیز می‌تواند حالت‌های پیش‌بینی نشده‌ای را ایجاد نموده و موجب شناسایی نقاط ضعف احتمالی سیستم گردد. برای شبیه‌سازی حالت‌های خاص، یک سناریوی مبنا شامل سه عامل و سه هدف بصورت جدول ۱ تعریف می‌شود. انحراف معیار خطای اندازه‌گیری تمام سنسورها، ۲ درجه است. برای اینکه عامل‌ها محدودیتی از نظر برد اندازه‌گیری و برد ارتباطی نداشته باشند، برای این پارامترها مقادیر بسیار بزرگی در نظر گرفته شده است. زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ثانیه می‌باشد.

جدول ۱: سناریوی مبنا

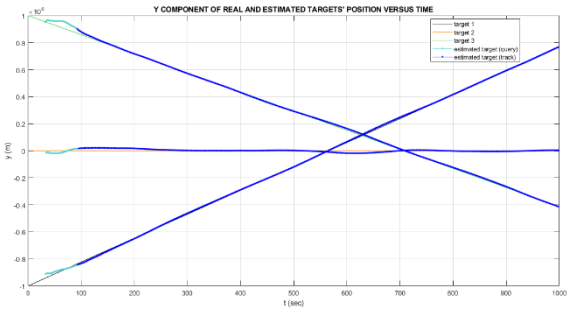
پارامتر / موجودیت		عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳
نام پارامتر	واحد اندازه‌گیری						
موقعیت اولیه در راستای x	متر	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰
موقعیت اولیه در راستای y	متر	۰	-۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	-۱۰۰۰۰	۰	۱۰۰۰۰
سرعت اولیه	متر بر ثانیه	۲۰	۲۰	۲۰	۲۵	۱۵	۲۰
کورس اولیه	درجه	۰	۰	۰	۱۳۵	۱۸۰	۲۲۵

مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۱ در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عامل موردنظر، هم تعداد اهداف را به درستی تشخیص داده و هم حالت آنها را با دقت قابل قبولی تخمین زده است و با اینکه اهداف به یکدیگر نزدیک شده‌اند باز هم تفکیک بین آنها به خوبی انجام شده است.

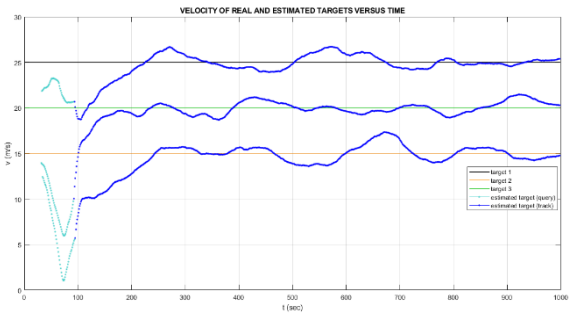


شکل ۷: مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۱

با توجه به تعداد عامل‌ها و اهداف، تعداد متغیرهای حالت بسیار زیاد می‌باشد؛ لذا به عنوان نمونه، مقدار واقعی متغیر y برای هر سه هدف و همچنین مقدار تخمین زده شده آنها توسط عامل ۱ بر حسب زمان، در شکل ۸ نشان داده شده است. می‌توان حالت اهداف در دستگاه مختصات قطبی را نیز مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال، اندازه سرعت اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۱ در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۸: مقدار واقعی و تخمین زده شده متغیر y برای سه هدف توسط عامل ۱

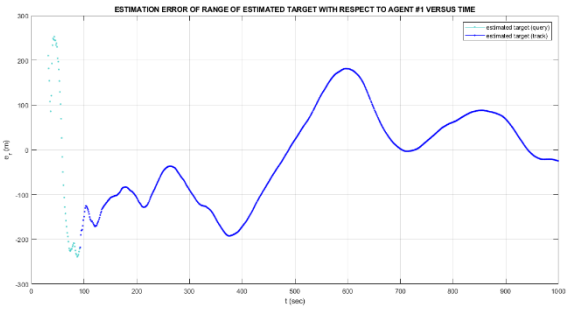


شکل ۹: اندازه سرعت اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۱

به منظور تحلیل دقیق‌تر کارایی سیستم، بهتر است خطای تخمین متغیرهای حالت اهداف بررسی شود. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای حالت

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

اهداف، به عنوان نمونه، خطای تخمین فاصله هدف ۳ توسط عامل ۱ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان به تدریج اندازه خطا کاهش پیدا کرده است. حدود ۶۰۰ ثانیه پس از شروع شبیه‌سازی، به دلیل نزدیکی زیاد هدف ۳ با هدف ۲، خطای تخمین اندکی افزایش یافته اما با گذشت زمان و دور شدن اهداف از یکدیگر، مجدداً خطا کم شده است.



شکل ۱۰: خطای تخمین فاصله هدف ۳ توسط عامل ۱

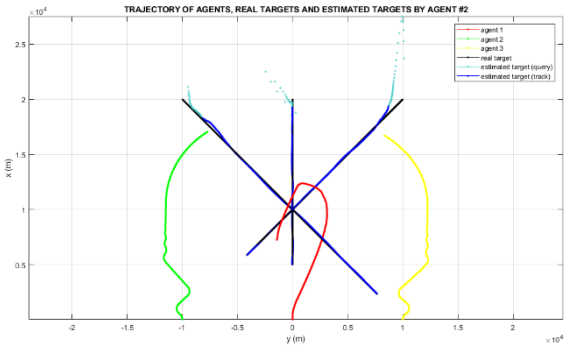
خطای ردیابی تمامی متغیرهای حالت هدف ۳ توسط عامل ۱ در کل مدت زمان ردیابی، در جدول ۲ خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که خطای ردیابی هدف، در حد مناسب و قابل قبول می‌باشد.

بررسی خطای تخمین متغیرهای حالت اهداف توسط عامل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که خط‌سیرهای تخمین زده شده توسط آنها نیز مشابه با عامل ۱ می‌باشد و به منظور عدم بیان مطالب تکراری، از ارائه آنها صرفنظر می‌شود.

جدول ۲: خطای تخمین متغیرهای حالت هدف ۳ توسط عامل ۱

نام متغیر حالت	واحد اندازه‌گیری	میانگین خطای تخمین	انحراف معیار خطای تخمین
موقعیت هدف در راستای محور x	متر	−۳۷/۵	۸۰/۵
موقعیت هدف در راستای محور y	متر	−۳۱/۸	۵۸/۵
سرعت هدف در راستای محور x	متر بر ثانیه	−۰/۳	۱/۲
سرعت هدف در راستای محور y	متر بر ثانیه	−۰/۱	۰/۹
فاصله هدف	متر	−۱۲/۶	۱۰۱
زاویه سمت هدف	درجه	۰/۰۲	۰/۲۶
اندازه سرعت هدف	متر بر ثانیه	۰/۲	۱/۱
زاویه کورس هدف	درجه	−۰/۵	۲/۷

به منظور بررسی محدودیت‌های برد اندازه‌گیری و برد ارتباطی بر عملکرد سیستم، سناریوی مبنا مدنظر قرار گرفته ولی برد اندازه‌گیری و برد ارتباطی تمام عامل‌ها، ۲۵ کیلومتر تعیین می‌گردد. به این ترتیب، در شروع شبیه‌سازی، هر سه عامل می‌توانند با هم تبادل داده داشته باشند. همچنین عامل ۱ می‌تواند هر سه هدف را تشخیص داده و سمت آنها را اندازه‌گیری نماید. اما عامل دوم فقط قادر به تشخیص و اندازه‌گیری سمت اهداف ۱ و ۲ بوده و هدف ۳ در برد اندازه‌گیری آن نمی‌باشد. عامل ۳ نیز فقط قادر به آشکارسازی و اندازه‌گیری سمت اهداف ۲ و ۳ خواهد بود. مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۲ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عامل‌ها، به دلیل محدودیت برد ارتباطی و برای حفظ اتصال شبکه نمی‌توانند زیاد از هم دور شوند و این موضوع اثر منفی بر رویت‌پذیری متغیرهای حالت و دقت تخمین‌ها نسبت به سناریوی مبنا دارد. با وجود محدودیت‌های فوق، خط‌سیرهای تخمین زده شده انطباق خوبی با مسیر حرکت اهداف واقعی دارند.



شکل ۱۱: مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۲

به عنوان نمونه، خطای تخمین متغیرهای حالت هدف ۳ توسط عامل دوم در کل مدت زمان ردیابی، در جدول ۳ آورده شده است. با اینکه هدف بطور مستقیم در برد اندازه‌گیری این سنسور نبوده است، خطای ردیابی در حد مناسب و قابل قبول می‌باشد.

جدول ۳: خطای تخمین متغیرهای حالت هدف ۳ توسط عامل ۲

نام متغیر حالت	واحد اندازه‌گیری	میانگین خطای تخمین	انحراف معیار خطای تخمین
موقعیت هدف در راستای محور x	متر	−۳۰/۶	۸۵/۳
موقعیت هدف در راستای محور y	متر	−۱۶/۵	۳۵/۱
سرعت هدف در راستای محور x	متر بر ثانیه	−۰/۱	۱/۵
سرعت هدف در راستای محور y	متر بر ثانیه	−۰/۱	۰/۴
فاصله هدف	متر	−۳۳/۳	۶۰/۹
زاویه سمت هدف	درجه	۰/۰۳	۰/۱۹
اندازه سرعت هدف	متر بر ثانیه	۰/۱	۱/۰
زاویه کورس هدف	درجه	−۰/۲	۳/۸

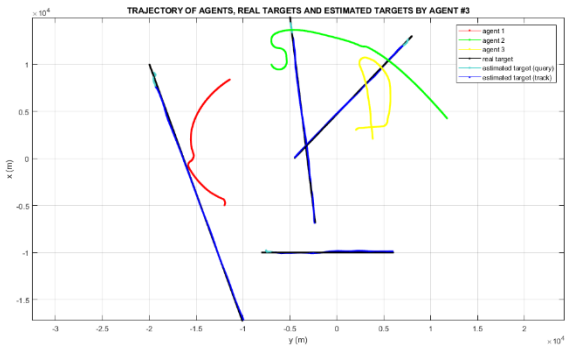
یک سناریوی دیگر شامل سه سنسور و چهار هدف، با پارامترهایی که بصورت تصادفی انتخاب شده و در جدول ۴ آورده شده است، شبیه‌سازی شده و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۴: سناریو با پارامترهایی که بصورت تصادفی انتخاب شده‌اند

پارامتر / موجودیت	نام پارامتر	واحد اندازه‌گیری	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	هدف ۴
موقعیت اولیه در راستای x		متر	−۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۳۰۰۰	−۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰
موقعیت اولیه در راستای y		متر	−۱۲۰۰۰	−۷۰۰۰	۲۰۰۰	−۲۰۰۰۰	۸۰۰۰	−۸۰۰۰	−۵۰۰۰
سرعت اولیه		متر بر ثانیه	۱۷	۲۸	۲۱	۲۹	۱۸	۱۴	۲۲
کورس اولیه		درجه	۲۹	۱۵۴	۴۲	۱۶۰	۲۲۴	۹۰	۱۷۳
انحراف معیار خطای اندازه‌گیری		درجه	۳	۲/۵	۱/۵	–	–	–	–
برد اندازه‌گیری		کیلومتر	۳۵	۳۵	۲۵	–	–	–	–
برد ارتباطی		کیلومتر	۳۰	۲۵	۳۵	–	–	–	–

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده توسط عامل ۳، به عنوان نمونه در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۲: مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۳

همچنین خطای تخمین هدف ۴ توسط عامل ۳ نیز به عنوان نمونه در جدول ۵ آمده است. مشاهده می‌شود که خطای ردیابی در حد مناسب و قابل قبول می‌باشد.

جدول ۵: خطای تخمین متغیرهای حالت هدف ۴ توسط عامل ۳

نام متغیر حالت	واحد اندازه‌گیری	میانگین خطای تخمین	انحراف معیار خطای تخمین
موقعیت هدف در راستای محور x	متر	−۵۶/۲	۵۳/۷
موقعیت هدف در راستای محور y	متر	−۱۳/۲	۵۲/۶
سرعت هدف در راستای محور x	متر بر ثانیه	−۰/۱	۰/۸
سرعت هدف در راستای محور y	متر بر ثانیه	−۰/۰۱	۰/۶
فاصله هدف	متر	۳۰/۹	۷۶/۶
زاویه سمت هدف	درجه	−۰/۱۴	۰/۲۲
اندازه سرعت هدف	متر بر ثانیه	۰/۰۵	۰/۷
زاویه کورس هدف	درجه	۰/۰۸	۱/۷

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این تحقیق، سیستم ردیابی چندهدفی چندسنسوری غیرمتمرکز و همکارانه با اندازه‌گیری غیرهمزمان سمت، در قالب یک سیستم چندعامله، طراحی و پیاده‌سازی شده است. در این سیستم، عامل‌های سنسوری هوشمند نقش محوری و تعیین‌کننده‌ای دارند. هدف اصلی، طراحی و پیاده‌سازی برنامه این عامل‌ها بوده است. به دلیل فرض بدون مانور بودن اهداف، مدل سیستم موردنظر برای تخمین حالت، خطی می‌باشد. استفاده از ایده اندازه‌گیری مرکب نیز موجب خطی شدن مدل اندازه‌گیری شده است. لذا از فیلتر کالمن توزیع شده مبتنی بر استراتژی پخش به منظور ردیابی اهداف استفاده گردیده است. همچنین عامل‌ها تلاش می‌کنند ضمن حفظ اتصال شبکه و تعقیب اهداف، به نحوی مانور نمایند که سرعت و دقت ردیابی افزایش یابد.

شبیه‌سازی‌های متعدد نشان می‌دهند که سیستم موردنظر با وجود محدودیت‌های در نظر گرفته شده، عملکرد و کارایی قابل قبولی داشته و می‌تواند تعداد و حالت اهداف مختلف موجود در منطقه تحت نظارت را با کیفیت و دقت مناسب تخمین بزند. اهدافی که در برد اندازه‌گیری حداقل دو سنسور قرار داشته و این سنسورها به نحو مناسبی از یکدیگر فاصله دارند، با خطای قابل قبولی ردیابی می‌شوند. همچنین در برخی از سناریوها بعضی از اهداف بطور مستقیم در برد اندازه‌گیری یکی از عامل‌ها نبوده اما در لیست اهداف تخمین زده شده توسط این عامل قرار داشتند؛ علت این موضوع، استفاده از اطلاعات دریافتی از عامل‌های همسایه در فرایند تخمین حالت و ردیابی اهداف می‌باشد.

در این تحقیق، به منظور پرهیز از افزایش حجم محاسبات محلی، از الگوریتم‌های ساده با بار پردازشی پایین، استفاده گردیده است. با توجه به امکان استفاده از پردازشگرهای قوی‌تر، می‌توان از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر نیز استفاده نمود. برای وابسته‌سازی داده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه استفاده شده است که ضعف اصلی آن هنگام مواجهه با اهداف نزدیک به هم می‌باشد. با استفاده از روش‌هایی مانند الگوریتم وابسته‌سازی داده احتمالاتی، احتمال اشتباه در تخصیص اندازه‌گیری‌ها به اهداف، کاهش یافته و کارایی سیستم بهبود می‌یابد. همچنین برای بهبود عملکرد فیلتر کالمن مبتنی بر استراتژی پخش، می‌توان محاسبه تخمین نهایی را بصورت تطبیقی انجام داد. اگر چه توزیع سنسورها در محیط، از ضرورت انجام مانور توسط عامل‌ها می‌کاهد اما چگونگی مانور عامل‌ها تاثیر فراوانی بر دقت تخمین‌ها دارد. طراحی مسیر بهینه عامل‌ها نیز می‌تواند به عنوان یک موضوع تحقیقاتی مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، اهداف بدون مانور فرض شده‌اند. می‌توان ردیابی اهداف مانوردار را نیز مدنظر قرار داد که در این صورت با یک مسئله فیلترینگ غیرخطی روبرو خواهیم بود.

مراجع

[1] Stansfield R. G., 1947, “Statistical theory of DF fixing,” J. Inst. Electr. Eng. IIIA Radiocommun., vol. 94, no. 15, pp. 762–770.

[2] Taghavi E., Tharmarasa R., Kirubarajan T. and McDonald M., 2016, “Multisensor-multitarget bearing-only sensor registration,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 52, no. 4, pp. 1654–1666.

[3] Mohammadi A. and Asif A., 2015, “Distributed consensus + Innovation particle filtering for bearing/range tracking with communication constraints,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 63, no. 3, pp. 620–635.

[4] Ferdowsi M. H., Maralani P. J. and Sedigh A. K., 2004, “Design of bearing-only vision-based tracking filters,” Opt. Eng., vol. 43, no. 2, pp. 472–481.

[5] Sadhu S., Mondal S., Srinivasan M. and Ghoshal T. K., 2006, “Sigma point Kalman filter for bearing only tracking,” Signal Processing, vol. 86, no. 12, pp. 3769–3777.

[6] Ristic Branko, Arulampalam Sanjeev and Gordon Neil, Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications. Artech house, 2003.

[7] Sabet M. T., Fathi A. R. and Mohammadi Daniali H. R. , 2016, “Optimal design of the Own Ship

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]

maneuver in the bearing-only target motion analysis problem using a heuristically supervised Extended Kalman Filter," Ocean Eng., vol. 123, pp. 146–153.

[8] Nardone S. and Lindgren A., 1984, "Fundamental properties and performance of conventional bearings-only target motion analysis," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 29, no. 9, pp. 775–787.

[9] Oshman Y. and Davidson P., 1999, "Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 35, no. 3, pp. 892–902.

[10] Chen X., Tharmarasa R. and Kirubarajan T., 2014, "Multitarget Multisensor Tracking," in Academic Press Library in Signal Processing: Volume 2 Communications and Radar Signal Processing, vol. 2, Elsevier Masson SAS, pp. 759–812.

[11] Musicki D., 2008, "Multi-target tracking using multiple passive bearings-only asynchronous sensors," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 44, no. 3, pp. 1151–1160.

[12] Sathyan T. and Sinha A., 2011, "A two-stage assignment-based algorithm for asynchronous multisensor bearings-only tracking," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 47, no. 3, pp. 2153–2168.

[13] Sayed A. H., 2014, "Adaptive networks," Proc. IEEE, vol. 102, no. 4, pp. 460–497.

[14] Dias S. S. and Bruno M. G. S., 2013, "Cooperative Target Tracking Using Decentralized Particle Filtering and RSS Sensors," IEEE Trans. Signal Process., vol. 61, no. 14, pp. 3632–3646.

[15] Olfati-Saber R., Fax J. A. and Murray R. M., 2007, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 215–233.

[16] Zhou Y., Wang D. and Li J., 2014, "Consensus 3-D bearings-only tracking in switching senor networks," Signal Processing, vol. 105, pp. 148–155.

[17] Mohammad A. and Asif A., 2016, "Diffusive particle filtering for distributed multisensor estimation," ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc., vol. 2016–May, no. 504310, pp. 3801–3805.

[18] Tu S. Y. and Sayed A. H., 2012, "Diffusion strategies outperform consensus strategies for distributed estimation over adaptive networks," IEEE Trans. Signal Process., vol. 60, no. 12, pp. 6217–6234.

[19] Klein I. and Bar-Shalom Y., 2016, "Tracking with asynchronous passive multisensor systems," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 52, no. 4, pp. 1769–1776.

[20] Osborne R. W. and Bar-Shalom Y., 2013, "Statistical efficiency of composite position measurements from passive sensors," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 49, no. 4, pp. 2799–2806.

[21] Osborne R. W., 2015, "Fusion of Asynchronous Passive Measurements," J. Adv. Inf. FUSION, vol. 10, no. 2, pp. 199–210.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/joc.14.4.1]