

ردیابی دقیق خیرگی چشم در فریم های تصاویر ویدیویی از طریق ترکیب روش فیلترهای ذره‌ای با الگوریتم ژنتیک

سمیرا افصیحی^۱، مربی، مجتبی جعفری^۲، مربی

۱- آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اسلامشهر - اسلامشهر - ایران - samiraa.afsahi@gmail.com

۲- آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اسلامشهر - اسلامشهر - ایران - mjafari1001@gmail.com

چکیده: ردیابی خیرگی چشم پردازشی کلیدی در تعامل‌های انسان-کامپیوتر است. یک رویکرد پایه در این حوزه، پیش‌بینی موقعیت مردمک چشم در فریم‌های متوالی ویدیویی است. فیلتر ذره‌ای، مهم‌ترین روش مبتنی بر رویکرد مذکور، با وجود تضمین سرعت مطلوب دقت کمی در پیش‌بینی موقعیت مردمک دارد. جهت حل این مشکل، در این مقاله از الگوریتم ژنتیک در گام نمونه‌برداری روش فیلتر ذره‌ای استفاده می‌شود. در نتیجه، در هر فریم، تنوع ذرات مورد نیاز برای پیش‌بینی موقعیت مردمک در فرم ویدئویی بعدی حفظ می‌گردد و هم‌زمان، یکنواختی آن‌ها کاهش می‌یابد. جهت ارزیابی کارایی، به ازای جمعیت‌های مختلف ذرات، سرعت و دقت روش پیشنهادی و روش فیلتر ذره‌ای پایه در پیش‌بینی موقعیت مردمک در فریم‌های ویدیویی تصویر چشم محاسبه و باهم مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم پایه فیلتر ذره‌ای، خیرگی چشم را با دقتی بالاتر در زمانی کمتر ردیابی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ردیابی خیرگی چشم، مردمک، فیلتر ذره‌ای، الگوریتم ژنتیک.

Precise Eye Gaze Tracking in Video Frames via Combining Particle Filters Method with Genetic Algorithm

Samira Afsahi¹, Lecturer in Computer, Mojtaba Jafari², Lecturer in Computer

1- Sama Technical and Vocational Training College, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Islamshahr, Iran, Samiraa.afsahi@gmail.com

2- Sama Technical and Vocational Training College, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Islamshahr, Iran, Mjafari1001@gmail.com

Abstract: Gaze tracking is a key process in human-computer interactions. A basic approach in this field is to predict the position of the pupil in sequential video frames. Particle filter, the most important method which is based on aforementioned approach, has a low precision in predicting the pupil position though guaranteeing expected speed. To solve this problem, in this paper, genetic algorithm (GA) is used in the sampling step of the particle filter method. As a result, in each frame, diversity of the particles required for predicting the pupil position in the next video frame is preserved and at the same time the monotony of them is reduced. To evaluate performance, corresponding to different particle populations, speed and precision of the proposed method and the basic particle filter method in predicting pupil positions in video frames of eye were computed and compared. Results show that the proposed method, compared to the basic particle filter method, tracks the gaze more precisely in a lower time.

Keywords: Eye gaze tracking, pupil, particle filter, genetic algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۷

نام نویسنده مسئول: سمیرا افصیحی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - اسلامشهر - میدان نماز - شهرک الهیه - آموزشکده سما اسلامشهر

۱- مقدمه

حرکات چشم انسان نقش مهمی در تعامل روزمره میان افراد و بیان خواسته‌ها، نیازها و حالات عاطفی آن‌ها ایفا می‌کند. از این رو، در چند دهه اخیر ردیابی چشم به سرعت گسترش یافته و به یک عامل بسیار مهم برای پیشرفت تعامل انسان با ماشین تبدیل شده است؛ به طوری که کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف از جمله بهبود زندگی روزمره افراد معلول در تعامل با جامعه [۱]، بازاریابی و تبلیغات اینترنتی برای آگاهی از میزان توجه مصرف‌کنندگان به کیفیت کالاها [۲]، صنعت خودرو با هدف توسعه سیستم‌های راهبری و کمک به راننده [۳]، طراحی دقیق‌تر رابط کاربر برای تعامل بیشتر در بازی‌های رایانه‌ای بر اساس رفتار و حالت‌های کاربر [۴] و ... روز به روز بیشتر و بهتر از قبل دیده می‌شود. فرآیند ردیابی چشم در واقع جستجو و ردیابی چشم انسان در دنباله‌ای از تصاویر ویدئویی است. ردیابی چشم به طور کلی به منظور اندازه‌گیری نقطه خیرگی^۱ چشم یا حرکات چشم نسبت به سر انجام می‌شود. ردیابی خیرگی چشم وسیله‌ای است که با آن می‌توان نقطه خیرگی چشم یا حرکات چشم شخص نسبت به سر او را اندازه‌گیری کرد. اطلاعات به دست آمده از قبیل موقعیت چشم و حرکات آن، الگوی حرکتی چشم را به ما می‌دهد [۵].

تابه حال روش‌های بسیاری برای تشخیص و ردیابی چشم ارائه شده است که به طور کلی بر اساس ویژگی‌های هندسی و فتومتریک چشم‌ها به سه دسته مبتنی بر شکل^۲، مبتنی بر ظاهر^۳، مبتنی بر ویژگی^۴ تقسیم می‌شوند [۶]. روش‌های جایگزین دیگر از ترکیب این روش‌ها، حرکت و پلک زدن چشم‌ها و عملگرهای تقارن برای تشخیص و ردیابی چشم استفاده می‌کنند. هر کدام از این روش‌ها ممکن است در نور مرئی و یا با استفاده از منبع نور مادون قرمز (IR) انجام شوند [۷].

در روش مبتنی بر شکل ابتدا یک مدل کلی چشم بر اساس شکل چشم طراحی می‌شود. سپس تطبیق الگو برای جستجوی چشم‌ها در تصویر انجام می‌شود [۶]. روش‌های مبتنی بر شکل معمولاً از دو بخش تشکیل می‌شوند: مدل هندسی چشم و اندازه‌گیری شباهت. این روش‌ها یا از ویژگی‌های محلی چشم و منطقه چهره و یا از منحنی تراز^۵ ساخته می‌شوند.

در این روش، ابتدا یک مدل چشم طراحی می‌شود. سپس موقعیت چشم طبق یک فرآیند بازگشتی از طریق کمینه‌سازی انرژی به دست می‌آید [۶]. پیدا کردن موقعیت اولیه از الگو بسیار مهم است. هر زمان که شباهت زیادی نسبت به تصویر به وجود آید، سیستم نسبت به تغییرات الگو پایدار می‌شود [۸]. در [۹-۱۱] از روش‌های مبتنی بر شکل برای ردیابی چشم استفاده شده است. در حالی که روش مبتنی بر شکل منطقی و به طور کلی دقیق به نظر می‌رسد، اما چندین محدودیت دارد: (۱) به محاسبات سنگین نیاز دارند. (۲) به تصاویر با تباین بالا نیاز دارند.

(۳) معمولاً به مقاردهی اولیه خوب برای دستیابی به یک مدل موفق نیاز دارند. (۴) هر چند شکل و مرزهای چشم برای الگوسازی مهم هستند در این روش این مناطق، خود توسط الگوسازی مدل می‌شوند [۸]. (۵) این روش ممکن است قادر نباشد تغییرات حالت چهره و انسداد چشم را به خوبی کنترل کند [۷].

روش‌های مبتنی بر ظاهر، چشم‌ها را مستقیماً بر اساس ظاهر فتومتریک‌شان که با توزیع رنگ یا پاسخ‌های فیلترهایی از چشم و اطراف آن تشخیص و ردیابی می‌کنند. این روش‌ها مستقل از شیء واقعی مورد نظر هستند و قادر به مدل‌سازی اشیاء دیگر کنار چشم می‌باشند [۷].

روش‌های مبتنی بر ظاهر به عنوان الگوی تصویر که هر دو اطلاعات شدت و مکان هر پیکسل را حفظ می‌کنند و یا روش‌های کل نگر^۷ که در آن توزیع شدت با نادیده گرفتن اطلاعات مکانی مشخص می‌شود نیز شناخته می‌شوند. روش‌های تصویر مبتنی بر الگو مشکلات ذاتی با مقیاس و تغییرات چرخشی دارند. علاوه بر این در مدل‌های تک الگویی حتی تغییرات موقعیت سر و حرکات چشم شخص می‌تواند تأثیر منفی در نتیجه ردیابی چشم داشته باشد. روش‌های کل نگر از تکنیک‌های آماری برای تجزیه و تحلیل توزیع شدت کل ظاهر شیء استفاده می‌کنند [۷]. در [۱۲-۱۴] از روش‌های مبتنی بر ظاهر برای ردیابی چشم استفاده شده است. روش‌های مبتنی بر ظاهر معمولاً به جمع‌آوری اطلاعات زیادی از چشم افراد مختلف با جهت‌گیری‌های مختلف چهره و تحت شرایط نوری مختلف نیاز دارند. این اطلاعات در یک طبقه‌بندی کننده مانند شبکه عصبی^۸ یا ماشین بردار پشتیبان^۹ استفاده می‌شوند و تشخیص از طریق طبقه‌بندی^{۱۰} به دست می‌آید [۶].

روش‌های مبتنی بر ویژگی، خصوصیت‌های مانند رنگ پوست، توزیع رنگ مناطق چشم و غیره برای تشخیص ویژگی‌های متمایز اطراف چشم استخراج می‌کنند. حلقه دور قرنیه، مردمک (تصاویر مردمک تاریک/روشن) و بازتاب‌های قرنیه ویژگی‌های رایجی برای تشخیص چشم هستند. در مقایسه با روش‌های کل نگر روش‌های مبتنی بر ویژگی، ویژگی‌های محلی چشم و چهره را که نسبت به تغییرات شرایط نوری و نقطه دید حساسیت کمتری دارند شناسایی می‌کنند [۷]. در [۱۵-۱۷]

از روش‌های مبتنی بر ویژگی برای ردیابی چشم استفاده شده است. به طور کلی روش‌های مبتنی بر ویژگی نسبت به تغییرات روشنایی مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند. استفاده از ویژگی‌های آشکار (مثل لبه‌ها) به دلیل تغییر در روشنایی، متمرکز ساختن تصویر و انسداد ممکن است آن‌چنان مقاوم نباشند [۷]. از آنجایی که مردمک معمولاً تاریک‌تر از محیط اطراف است، سطح روشنایی تصویر مردمک یک ویژگی قابل اطمینان برای تشخیص و ردیابی چشم است.

تخمین موقعیت مردمک و به دست آوردن مرکز مردمک یک شرط لازم برای ردیابی خیرگی چشم است [۷]. ردیابی موقعیت مردمک یک عامل بسیار مهم برای پیشرفت تعامل انسان با ماشین، درک حالت‌های

صدری و همکاران از یک دوربین نصب شده روی سر برای تصویربرداری از چشم استفاده کردند. الگوریتم آن‌ها به این صورت می باشد که ابتدا با اعمال آستانه‌گیری روی تصویر چشم و با استفاده از الگوریتم مار، مکان دقیق مردمک در تصویر آشکارسازی می‌شود. سپس مردمک توسط بیضی مدل‌سازی شده و در نهایت، به کمک فیلتر ذره‌ای پارامترهای مدل ارائه شده مانند قطر اصلی و قطر فرعی ردیابی می‌شود. روش آن‌ها به ازای جمعیت‌های مختلف فیلتر ذره‌ای دقت مطلوبی ارائه نمی‌دهد [۲۶]. همچنین در این روش، با افزایش جمعیت فیلتر ذره‌ای دقت افزایش پیدا می‌کند اما زمان انجام محاسبات به سرعت افزایش پیدا کرده و در نتیجه سرعت الگوریتم به سرعت کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این، در روش پیشنهادی آن‌ها در مورد نحوه ارزیابی پارامترهای سرعت و دقت بررسی انجام نشده است [۲۶].

در این مقاله، به منظور بهبود دقت پیش‌بینی موقعیت مردمک در فریم‌های تصاویر ویدیویی، الگوریتم جدیدی ارائه شده است. تصاویر ورودی این الگوریتم با استفاده از یک دوربین قابل نصب روی سر و تابش نور مادون قرمز تصویربرداری شده است. نتیجه استفاده از چنین تصاویری، کاهش تأثیر نور محیط، افزایش کیفیت تصویر و کاهش بار محاسباتی در مرحله پردازش فریم‌های تصویر است. در الگوریتم پیشنهادی، برای پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تر موقعیت مردمک، ویژگی مرکز مردمک در نظر گرفته شده و پیش‌بینی موقعیت مردمک در هر فریم بر اساس یافتن موقعیت مرکز آن انجام شده است. در این الگوریتم نه تنها مرکز مردمک در هر فریم ویدیویی تشخیص داده می‌شود بلکه بر اساس ویژگی مرکز مردمک، موقعیت مردمک در فریم بعد نیز پیش‌بینی می‌شود.

ایده کلیدی پیاده‌سازی شده در الگوریتم استفاده از روش تخمین فیلتر ذره‌ای به همراه الگوریتم ژنتیک برای ردیابی مرکز مردمک چشم است. فیلتر ذره‌ای یک روش تخمین قوی در کاربردهای با حساسیت بالا می‌باشد. این فیلتر با استفاده از مجموعه‌ای از ذرات وزن داده شده مرکز مردمک در فریم بعد را پیش‌بینی می‌کند. انتخاب ذرات وزن داده شده در الگوریتم فیلتر ذره‌ای یک گام بسیار مهم و تعیین‌کننده در دقت موقعیت تخمین زده شده است. لذا، به‌عنوان ایده کلیدی در الگوریتم پیشنهادی، برای بهبود این پیش‌بینی‌ها و نزدیک کردن مرکز مردمک پیش‌بینی شده به مرکز ثقل واقعی مردمک، در مرحله انتخاب ذرات وزن داده شده، از الگوریتم ژنتیک جهت انتخاب ذرات و همچنین تولید نسل جدید از ذرات برای فریم بعدی استفاده می‌شود.

در ادامه در بخش دوم، روش‌های موجود برای ردیابی مردمک چشم معرفی و مرور می‌شوند و سپس الگوریتم پیشنهادی بیان می‌گردد. در بخش سوم مقاله، نحوه پیاده‌سازی و ارزیابی کارایی روش پیشنهادی و مقایسه آن با سایر روش‌ها ارائه شده و در نهایت، در بخش چهارم به جمع‌بندی و معرفی سمت‌وسوی کارهای آتی پرداخته می‌شود.

مؤثر انسان، سیستم‌های نظارت انسان و ایجاد رابط‌های کاربر دقیق می باشد [۲۱-۱۸]. تابه‌حال روش‌های بسیاری برای تشخیص موقعیت و ردیابی مردمک چشم معرفی شده است. در این روش‌ها هدف، تشخیص و پیش‌بینی دقیق موقعیت مردمک می‌باشد. اما دقت روش‌های ارائه شده معمولاً تحت تأثیر عواملی چون کیفیت نامطلوب تصاویر، انسداد چشم، حالات و حرکات سریع مردمک، تأثیر نور محیط، روش‌های محاسباتی جهت تشخیص و تخمین نامناسب کاهش یافته است [۷].

از جمله کارهایی که در سال‌های اخیر ارائه شده است می‌توان به کار کین و همکاران اشاره کرد. آن‌ها روشی بر اساس تبدیل هاف و اطلاعات مسیر گرادیان لبه برای تشخیص مردمک در تصاویر چشم ارائه دادند [۲۲]. روش آن‌ها فقط مرکز مردمک را در هر تصویر چشم تشخیص می‌دهد و تخمین موقعیت مردمک در فریم‌های تصاویر ویدیویی انجام نگرفته است. چرینپونگ و همکاران نیز روشی برای استخراج مردمک در سیستم‌های تجزیه و تحلیل حرکت غیرارادی چشم در بیماران مبتلا به سرگیجه ارائه دادند [۲۳]. در چنین سیستم‌هایی برای تجزیه و تحلیل حرکات غیرارادی چشم تنها موقعیت مردمک در هر تصویر نیاز است بنابراین روش آن‌ها تنها مردمک چشم را در تصاویر گرفته شده از چشم استخراج می‌کند و عمل ردیابی موقعیت مردمک در فریم‌های بعدی انجام نگرفته است. چوی و همکاران روشی برای تشخیص موقعیت مرکز مردمک چشم در دستگاه ردیاب خیرگی چشم ارائه دادند و دقت کار خود را با محاسبه خطای میانگین و واریانس محاسبه کردند [۲۴]. در روش آن‌ها نیز موقعیت مردمک در فریم‌های بعد پیش‌بینی نشده است. همچنین، پارامتر سرعت در روش آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است.

یک رده کلی از روش‌های ردیابی مردمک به‌جای تخمین موقعیت مردمک از پیش‌بینی موقعیت آن در فریم آتی بر اساس فریم فعلی و فریم‌های قبلی استفاده می‌کنند که از جمله این کارها می‌توان به کار لیاقت‌دار و همکاران [۲۵] و صدری و همکاران [۲۶] اشاره نمود. این روش‌ها کارایی بیشتری از لحاظ محاسباتی نسبت به روش‌های تخمین دارند [۲۷، ۲۸].

لیاقت‌دار و همکاران از یک دوربین مادون قرمز ثابت شده جلوی چشم برای تصویربرداری از چشم استفاده کردند. آن‌ها روشی برای ردیابی مردمک در تصاویر ویدیویی مادون قرمز پیشنهاد داده‌اند. آن‌ها برای تشخیص مردمک از روش آستانه‌سازی آتسو همراه با الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. سپس برای مدل‌سازی مردمک، موقعیت و قطر مردمک را با استفاده از تبدیل هاف دایره‌ای تخمین زدند و برای ردیابی مردمک نیز از فیلتر کالمن استفاده کردند. این روش به دلیل اینکه از تبدیل هاف دایره‌ای به همراه فیلتر کالمن برای تخمین موقعیت مردمک استفاده کرده است به محاسبات زیادی نیاز دارد که باعث افزایش زمان پردازش شده و در نتیجه باعث کاهش سرعت الگوریتم می‌شود [۲۹]. همچنین پارامتر زمان در روش آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است [۲۵].

۲- روش پیشنهادی

فیلترسازی یکی از بخش‌های مهم نظریه تخمین محسوب می‌شود که کاربردهای فراوانی در انواع مسائل مهندسی و علوم مختلف مانند مخابرات، اقتصاد، رباتیک، ناوبری و غیره دارد. از دیدگاه تئوری بیزین مسئله تخمین عبارت از تخمین تابع چگالی احتمال حالت پسین^{۱۱} با شرط داشتن مشاهدات تا آن گام است. روش بیزین، تابع چگالی احتمال پسین را به صورت بازگشتی طی دو گام به نام‌های پیش‌بینی و بروز رسانی به صورت زیر تخمین می‌زند [۳۰]:

گام اول: پیش‌بینی، شامل استفاده از مدل فضای حالت برای به دست آوردن تابع چگالی احتمال پیشین در زمان (k) با استفاده از معادله چاپمن-گولموگروف^{۱۲}، به صورت زیر می‌باشد:

$$p(x_k | y_{1:k-1}) = \int p(x_k | x_{k-1}) p(x_{k-1} | y_{1:k-1}) dx_{k-1} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $p(x_k | y_{1:k-1})$ تابع چگالی احتمال پیشین، $p(x_k | x_{k-1})$ تابع چگالی احتمال حالت فعلی سیستم نسبت به حالت پیشین آن، $p(x_{k-1} | y_{1:k-1})$ تابع چگالی احتمال حالت پیشین سیستم نسبت به مشاهدات موجود تا آن زمان می‌باشد.

گام دوم: بروز رسانی، در زمان (k) با در دسترس قرار گرفتن اندازه‌گیری (y_k) ، تابع چگالی احتمال پیشین طبق قانون بیز به روز رسانی می‌شود:

$$p(x_k | y_{1:k}) = \frac{p(y_k | x_k) p(x_k | y_{1:k-1})}{p(y_k | y_{1:k-1})} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $p(x_k | y_{1:k})$ تابع چگالی احتمال پسین، $p(y_k | x_k)$ تابع درست‌نمایی است که چگونگی وابستگی (y) به (x) را بیان می‌کند، $p(x_k | y_{1:k-1})$ تابع چگالی احتمال پیشین و $p(y_k | y_{1:k-1})$ ثابت نرمال سازی در مخرج کسر است که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$p(y_k | y_{1:k-1}) = \int p(y_k | x_k) p(x_k | y_{1:k-1}) dx_k \quad (3)$$

به طور کلی معادلات فضای حالت سیستم پویا به صورت زیر است [۳۰]:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (4)$$

$$z_k = g(x_k) + v_k \quad (5)$$

معادله (۴)، معادله انتقال حالت سیستم و معادله (۵) معادله اندازه‌گیری می‌باشد. (f) و (g) به ترتیب توابع توصیف کننده سیستم و اندازه‌گیری؛ x_k ، u_k و z_k به ترتیب متغیرهای حالت، ورودی کنترلی و اندازه‌گیری سیستم در لحظه (k) می‌باشد. همچنین فرض می‌شود که w_k نویز معادله سیستم و v_k نویز معادله اندازه‌گیری، مستقل از یکدیگر با توزیع گوسی باشند. مسئله تخمین شامل پیدا کردن بهترین تخمین متغیرهای حالت x_k بر اساس همه اندازه‌گیری‌های قابل دسترس $Y_k = \{z_{1k}, u_{1k}\}$ است.

فیلتر کالمن

در صورتی که معادلات سیستم (۴) و اندازه‌گیری (۵) به صورت خطی بوده و نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری دارای ماهیت گوسی با میانگین صفر باشند فیلتر کالمن^{۱۳} بهترین روش پارامتریک برای حل فیلتر بیز می‌باشد. به این سیستم‌ها، سیستم‌های خطی-گوسی^{۱۴} اطلاق می‌شود [۳۰]. مدل فضای حالت سیستم پویا در مدل کالمن به صورت زیر است:

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \quad (6)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (7)$$

F_k ، مدل انتقال حالت سیستم است که به حالت قبلی x_{k-1} اعمال می‌شود. B_k ، مدل ورودی کنترلی است که به بردار کنترل u_k اعمال می‌شود. w_k ، نویز گوسی سیستم با میانگین صفر و واریانس Q است $(N(0, Q_k))$. H_k ، مدل مشاهده است که فضای حالت واقعی را به فضای مشاهده شده نگاشت می‌کند. v_k ، نویز سفید گوسی اندازه‌گیری با میانگین صفر و واریانس R $(N(0, R_k))$ می‌باشد.

حالت فیلتر کالمن با دو متغیر $\hat{x}_{k|k}$ و $P_{k|k}$ بیان می‌شود که $\hat{x}_{k|k}$ تخمین حالت بعدی بر اساس مشاهدات تا زمان (k) و از جمله زمان (k) و $P_{k|k}$ ماتریس کوواریانس خطا است که دقت تخمین را اندازه‌گیری می‌کند.

گام پیش‌بینی و بروز رسانی برای فیلتر کالمن به صورت زیر است:

گام پیش‌بینی: این گام محتمل بر دو محاسبه زیر می‌باشد.

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \quad (8)$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (9)$$

گام بروز رسانی

اندازه‌گیری جدید در معادله

$$\tilde{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (10)$$

استفاده شده و کوواریانس حالت جدید طبق رابطه

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (11)$$

محاسبه می‌شود.

بهره بهینه کالمن نیز از رابطه

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (12)$$

محاسبه می‌گردد. با به روز رسانی حالت تخمینی طبق

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (13)$$

کوواریانس تخمین بروز رسانی شده طبق رابطه

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (14)$$

$$w_{k|k}^i = \frac{1}{c_k} w_{k|k-1}^i p(y_k | x_k^i) \quad (15)$$

که وزن نرمال سازی شده ذرات به صورت زیر حاصل می شود:

$$c_k = \sum_{i=1}^N w_{k|k-1}^i p(y_k | x_k^i) \quad (16)$$

(۲) پیش بینی

تابع چگالی احتمال پسین به صورت زیر تقریب زده می شود:

$$p(x_{1:k} | y_{1:k}) = \sum_{i=1}^N w_{k|k}^i \delta(x_{1:k+1} - x_{1:k+1}^i) \quad (17)$$

(۳) بروز رسانی زمان

پیش بینی ها طبق توزیع پیشنهادی با رابطه زیر تولید می شوند:

$$x_{k+1}^i \sim q(x_{k+1} | x_k^i, y_{k+1}) \quad (18)$$

و وزن های اعتباری بروز رسانی می شوند.

$$w_{k+1|k}^i = w_{k|k}^i \frac{p(x_{k+1}^i | x_k^i)}{q(x_{k+1}^i | x_k^i, y_{k+1})} \quad (19)$$

(۴) نمونه برداری مجدد

ذرات با وزن ناچیز حذف شده و ذرات با وزن بیشتر تکثیر می شوند و به

$$\text{آن ها وزن } \frac{1}{N} \text{ اختصاص داده می شود، } \{x_k^j, w_k^j = \frac{1}{N}\}$$

(۵) بررسی شرط پایان الگوریتم

در نهایت شرط پایان الگوریتم بررسی می شود، اگر y_k آخرین مشاهده نباشد الگوریتم به گام اول برمی گردد؛ در غیر این صورت حلقه خاتمه می یابد.

نمونه برداری مجدد باعث تکثیر ذرات با وزن های بیشتر و حذف نمونه ها با وزن های کم می شود. به عنوان یک نتیجه منفی در این نوع نمونه برداری، از آنجایی که تعداد تکرارها افزایش می یابد ممکن است گروه خاصی از ذرات نمونه برداری مجدد شده و در نهایت، رفتار کل جمعیت ذرات به سمت تعداد معدودی از ذرات تمایل پیدا کند و تنوع نمونه ها کاهش یابد. به این پدیده فقر نمونه^{۱۷} گفته می شود. در روش پیشنهادی این مقاله برای جلوگیری از وقوع این کاستی از الگوریتم ژنتیک استفاده می شود. استفاده از الگوریتم ژنتیک در فیلتر ذره ای باعث می شود که تنوع ذرات حفظ شده و یکنواختی انواع ذرات تا حد امکان کاهش یابد. همچنین، از بهترین نمونه ها برای پیش بینی هدف در مراحل پیش بینی استفاده شود.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم های تکاملی است که الهام گرفته از طبیعت جاندار می باشد. در دهه هفتاد میلادی دانشمندی از دانشگاه میشیگان به نام جان هالند ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک را در بهینه سازی های مهندسی مطرح کرد. این الگوریتم یکی از الگوریتم های جستجوی تصادفی است که اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است. ایده اساسی این الگوریتم انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن هاست. در طبیعت از ترکیب کروموزوم های بهتر، نسل های بهتری

محاسبه می شود. در تخمین کالمن معادله بروز رسانی اندازه گیری شامل تخمین ماتریس کوواریانس خطا می باشد. این ماتریس یک ماتریس متقارن است و مقادیر آن در هر نمونه زمانی بروز رسانی می شود. ماتریس کوواریانس خطا تعیین کننده ترین عامل در تخمین کالمن می باشد زیرا به وسیله این ماتریس میزان بهره کالمن تعیین شده و سپس میزان اختلاف بین اندازه گیری نویزی و میزان تخمینی در این بهره ضرب می گردد و پس از آن طبق معادله (۱۳) نمونه تخمین زده می شود.

بهره کالمن برای هر متغیر حالت تنها یک عدد می باشد. اگر این عدد به درستی تخمین زده شود، فیلتر کالمن به خوبی هدف را ردیابی می کند. حال اگر تغییرات بردار حالت بسیار زیاد باشد یا به عبارت دیگر هدف گم شود، ماتریس کوواریانس خطا به صورت نادرست به روز رسانی می شود و همین نیز سبب می شود که ردیابی در آخرین مرحله متوقف شده و در اصطلاح فیلتر در حالت تردید گیر می کند. همچنین اگر حرکت هدف بسیار سریع تر از سرعت نمونه برداری تصویر باشد امکان عقب افتادن ردیاب از تصویر بسیار محتمل است. در بسیاری از مواقع مخصوصاً اگر تصاویر تکرنگ باشند ممکن است به اشتباه دو هدف شناسایی شود. متأسفانه، فیلتر کالمن عادی امکان اولویت بندی بین اهداف را ندارد [۳۱].

فیلتر ذره ای

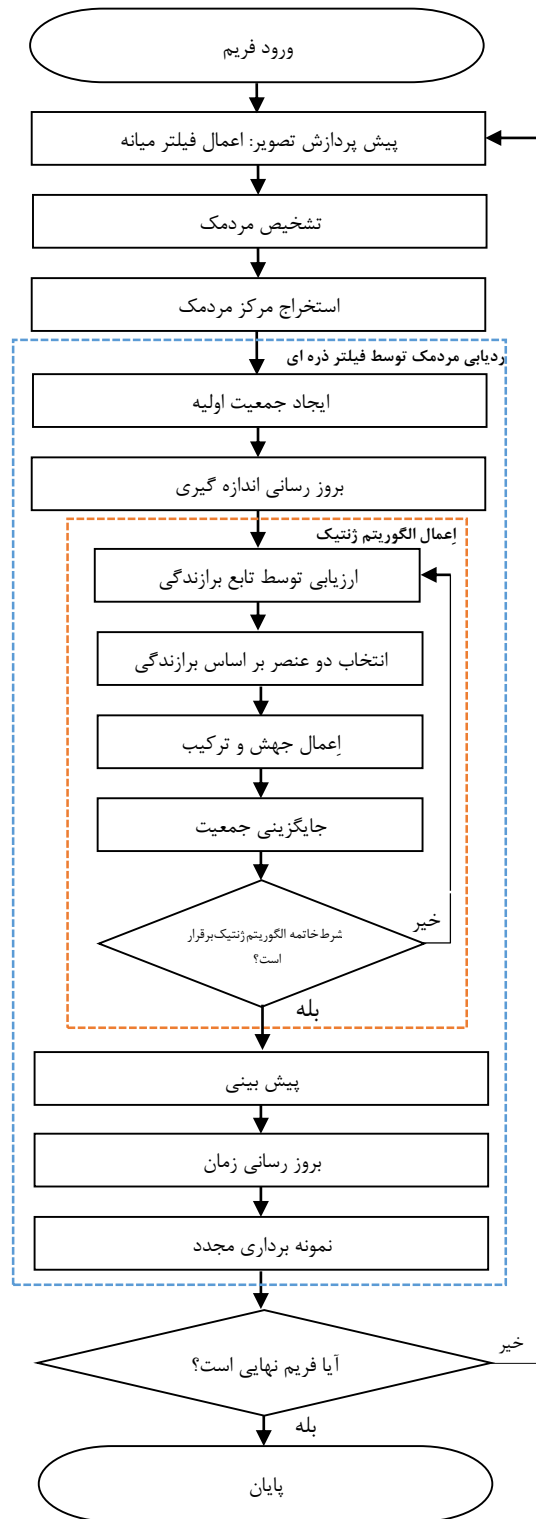
در صورتی که سیستم غیرخطی باشد از روش های زیر بهینه و تقریبی مانند فیلتر ذره ای^{۱۵} برای تخمین استفاده می شود. فیلتر ذره ای یک روش غیر پارامتریک برای پیاده سازی فیلتر بیز است. فیلتر ذره ای در اصل پیاده سازی روش بیزین بر اساس نمونه برداری است و هدف آن تخمین تابع چگالی احتمال پسین با مجموعه ای از ذرات وزن داده شده می باشد. فیلتر ذره ای کاربرد وسیعی در تخمین سیستم های غیرخطی و غیر گوسی دارد، که از آن جمله می توان کاربرد فیلتر ذره ای در موقعیت یابی، نقشه یابی، ردیابی^{۱۶} و تشخیص خطا را نام برد [۳۰].

فیلتر ذره ای از معادلات اندازه گیری بیزین و به روز رسانی برای پیش بینی تابع توزیع بعدی استفاده می کند. به این صورت که ابتدا موقعیت اولیه N ذره $\{x_{0:k}^i\}$ ، $i = 1 \dots N$ ، به صورت تصادفی با استفاده از تابع چگالی پیشین $p_0(x_1)$ تولید شده و به هر کدام از این ذرات وزن $\frac{1}{N}$ اختصاص داده می شود $\{w_1^i = 1/N\}_{i=1}^N$. سپس گام های زیر اجرا می شود [۳۲]:

حلقه زیر به تعداد k (تعداد مشاهدات) مرتبه تکرار می شود و گام های اساسی زیر در طی هر تکرار طی می شود:

(۱) بروز رسانی اندازه گیری

حالت سیستم با مشاهده z_k بروز رسانی می شود.



شکل ۱: فلوچارت روش پیشنهادی

پدید می‌آیند. در این بین گاهی اوقات جهش‌هایی نیز در کروموزوم‌ها روی می‌دهد که ممکن است باعث بهتر شدن نسل بعدی شوند. الگوریتم ژنتیک نیز با استفاده از این ایده اقدام به حل مسائل می‌کند. الگوریتم ژنتیک در مسائل متنوعی نظیر بهینه‌سازی، جستجو و یادگیری ماشین به کار می‌رود [۳۳].

به‌طور خلاصه الگوریتم ژنتیک دارای مراحل زیر است [۳۳]:

۱- شروع: تولید تصادفی جمعیت که شامل تعداد زیادی کروموزوم (روش‌های حل مسئله) می‌باشد.

۲- ارزش گذاری: محاسبه برازندگی تابع $f(x)$ به ازای هر کروموزوم (x) در جمعیت

۳- ایجاد جمعیت جدید: تولید جمعیت جدید با انجام تمامی مراحل زیر:

۱-۳ انتخاب: انتخاب کروموزوم‌های پدر و مادر از جمعیت قبلی با توجه به برازندگی آن به طوری که هر چه برازندگی بهتر باشد (دقت جواب در هم‌گرایی بیشتر باشد) شانس بیشتری برای انتخاب دارد.

۲-۳ تولیدمثل: با توجه به احتمال ترکیب (p_c) ، والدین برای تشکیل فرزندان جدید باهم ترکیب می‌شوند.

۳-۳ جهش: با توجه به احتمال جهش (p_m) ، فرزندان در هر موقعیت در کروموزوم مورد جهش قرار می‌گیرند.

۴-۳ پذیرش: فرزندان جدید در داخل جمعیت جدید گنجانده می‌شوند.

۵-۳ جایگزینی: جمعیت جدید به جای جمعیت قبلی گنجانده شده و در مراحل بعدی الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۶-۳ تست: اگر شرایط مطلوب در حل مسئله محقق شود، بهترین جواب به دست آمده است و الگوریتم خاتمه می‌یابد در غیر این صورت به مرحله ۲ برمی‌گردد و دوباره همین روند تکرار می‌شود.

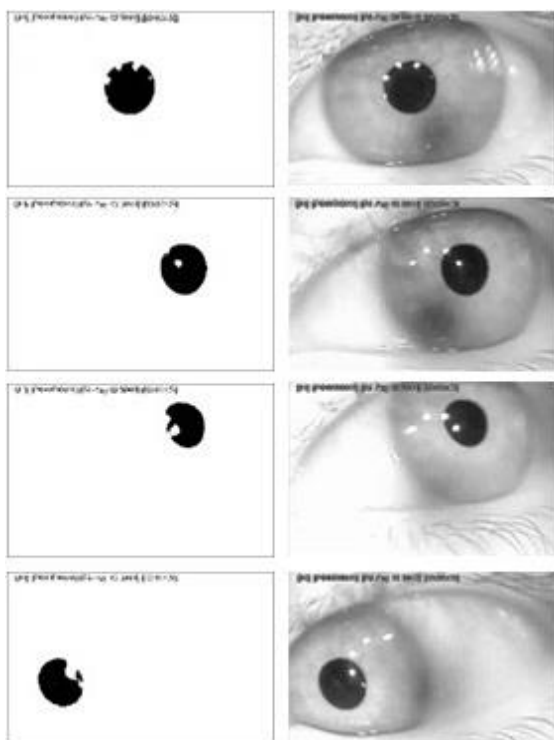
فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در ادامه مراحل روش پیشنهادی توضیح داده شده است. روش پیشنهادی ابتدا ویدیوی چشم را دریافت کرده و پیش‌پردازش روی هر فریم انجام می‌شود. سپس، قطعه‌بندی تصویر در هر فریم انجام شده و مردمک توسط اختلاف شدت نور تشخیص داده می‌شود. در روش پیشنهادی برای پیش‌بینی دقیق‌تر مردمک، مرکز ثقل مردمک در هر فریم محاسبه می‌شود، سپس برای پیش‌بینی مرکز ثقل مردمک حالت بعد از روش تخمین فیلتر ذره‌ای و برای بهبود این حالت و نزدیک کردن مرکز مردمک پیش‌بینی شده به حالت واقعی آن، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

۱-۲- دریافت تصویر

تشخیص داده می‌شود. به این منظور، به ازای هر پیکسل i بررسی می‌شود که اگر مقدار پیکسل i از مقدار آستانه در نظر گرفته شده کمتر باشد پیکسل سیاه بوده و یکی از پیکسل‌های تشکیل دهنده مردمک می‌باشد. به همین صورت به ازای تمام پیکسل‌های تصویر بررسی می‌شود و پیکسل‌هایی که کمتر از این مقدار آستانه هستند پیدا می‌شوند و در نهایت مردمک تشخیص داده می‌شود. در صورتی که مقدار پیکسل از مقدار آستانه بیشتر باشد پیکسل سفید بوده و جزو مردمک نمی‌باشد. با این روش مردمک به صورت یک دایره سیاه‌رنگ در خروجی نمایان می‌شود. شکل 4 مردمک تشخیص داده شده در چند فریم را نمایش می‌دهد.

الگوریتم پیشنهادی ابتدا ویدیو مورد نظر را دریافت می‌کند. ویدیو استفاده شده در این مقاله با استفاده از یک دوربین قابل نصب روی سر^{۱۸} (HMD) و تابش نور مادون قرمز تصویربرداری شده است. استفاده از دوربین قابل نصب روی سر باعث افزایش کیفیت تصویر و کاهش بار محاسباتی می‌شود [۲۶]. به‌طور کلی بیشتر روش‌های ردیابی خیرگی چشم از دوربین مادون قرمز (IR) و برای دستیابی به عملکرد دقیق‌تر استفاده می‌کنند [۲۱]. استفاده از نور مادون قرمز در تصویربرداری نه تنها باعث افزایش کیفیت تصویربرداری می‌شود بلکه تأثیر نور محیط را به حداقل می‌رساند [۲۶]. نمونه‌هایی از فریم‌های ورودی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل 4: (الف) تصاویر اصلی، (ب) نتایج تشخیص مردمک

۴-۲- استخراج مرکز مردمک

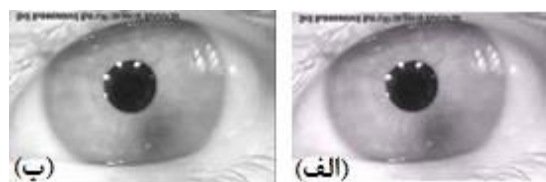
در روش پیشنهادی برای ردیابی دقیق‌تر موقعیت مردمک چشم، ویژگی مرکز مردمک در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن مرکز مردمک نیاز به استخراج ویژگی‌های طول و عرض مربعی می‌باشد که مردمک چشم را احاطه می‌کند و بر آن مماس است (شکل ۵). این مربع به دور مردمک قرار گرفته و نقطه وسط آن مرکز مردمک می‌باشد. در این محاسبه، دو ویژگی طول و عرض مربع را به دست آورده و با تقسیم هر یک از آن‌ها بر دو، وسط مربع که همان مرکز ثقل مردمک می‌باشد به دست می‌آید. شکل ۵ انجام این محاسبه را نشان می‌دهد. با اجرای مراحل فوق مرکز ثقل مردمک به دست می‌آید. در این مرحله، برای



شکل ۲: نمونه فریم‌های ویدیوی چشم

۲-۲- پیش‌پردازش تصویر

در این مرحله ابتدا تصاویر رنگی به تصاویر خاکستری تبدیل می‌شوند. سپس با استفاده از فیلتر میانه، نویز موجود در تصاویر، فریم به فریم، حذف می‌شود. فیلتر میانه معمولی با در نظر گرفتن یک همسایگی تعیین شده حول هر پیکسل، مقدار شدت روشنایی میانه این همسایگی را به پیکسل مرکزی همسایگی نسبت می‌دهد. این کار منجر به هموارتر شدن تصویر و کاهش نویزهایی مانند نویز فلفل-نمکی می‌گردد [۳۴]. شکل ۳ (الف) و (ب) به ترتیب، تصویر را قبل و پس از اعمال فیلتر میانه نمایش می‌دهد.



شکل ۳: پیش‌پردازش تصویر؛ (الف) قبل از اعمال فیلتر میانه، (ب) پس از اعمال فیلتر میانه

۳-۲- تشخیص مردمک

هدف از این مرحله تشخیص مردمک در هر فریم می‌باشد. از آنجایی که شدت نور مردمک از بقیه نقاط چشم کمتر است و همچنین اختلاف شدت نور ناحیه مردمک با نواحی مجاور آن خیلی زیاد است، برای تشخیص مردمک در هر فریم با در نظر گرفتن یک مقدار آستانه، تصویر خاکستری را به تصویر سیاه و سفید تبدیل کرده و در نهایت مردمک

۲-۱) **ارزیابی:** الگوریتم ژنتیک با استفاده از تابع برازندگی، میزان فاصله هر ذره را با مرکز واقعی مردمک محاسبه می‌کند. تابع برازندگی، فاصله اقلیدسی بین مکان هر ذره و مرکز واقعی مردمک می‌باشد. فاصله اقلیدسی به صورت معادله (۲۰) محاسبه می‌شود. مرکز ثقل مردمک می‌باشد.

$$(20) \quad \frac{1}{2}((x_i - x_r)^2 - (y_i - y_r)^2)$$

۳-۱) **تولید جمعیت جدید:** در این مرحله کروموزوم‌های پدر و مادر از جمعیت قبلی انتخاب می‌شوند. در الگوریتم پیشنهادی هر ذره ای که مختصات (x, y) داشته باشد یک ژن محسوب می‌شود و هر یک از ذرات جمعیت نیز یک کروموزوم محسوب می‌گردند. برای انتخاب کروموزوم‌های والد از بین جمعیت اولیه، از روش انتخاب نخبگان استفاده می‌شود. از این رو، در هر دور از الگوریتم ژنتیک ذراتی که فاصله اقلیدسی کمتری با مرکز واقعی مردمک دارند، به مرکز واقعی مردمک نزدیک‌تر بوده و انتخاب می‌شوند. بنابراین، در هر دور از الگوریتم ژنتیک مکانی ذره‌ها به سمت مرکز مردمک بهبود می‌یابد. در الگوریتم ژنتیک استفاده شده عملگرهای زیر برای تولید جمعیت جدید استفاده شده‌اند.

ترکیب: نوع ترکیبی که در الگوریتم ژنتیک روش پیشنهادی استفاده شده است، ترکیب یکنواخت^{۱۹} می‌باشد. در این ترکیب، هر ژن، بسته به موقعیتش به صورت تصادفی از یکی از دو والد انتخاب می‌شود.

جهش: نوع جهشی که در الگوریتم ژنتیک روش پیشنهادی استفاده شده است، عملگر جهش گوسی می‌باشد.

پذیرش: ذرات جدید در داخل جمعیت جدید گنجانده می‌شوند.

جایگزینی: جمعیت جدید به جای جمعیت قبلی گنجانده شده و در مراحل بعدی الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴-۱) **بررسی شرط خاتمه الگوریتم ژنتیک:** اگر شرایط مطلوب در حل مسئله که در روش پیشنهادی تعداد نسل مشخص می‌باشد، محقق شود، بهترین جواب به دست آمده است و الگوریتم خاتمه می‌یابد در غیر این صورت به مرحله ۲-۱ برمی‌گردد و دوباره این روند تکرار می‌شود.

در پایان الگوریتم ژنتیک، ذراتی که فاصله کمتری با مرکز ثقل مردمک دارند انتخاب می‌شوند. سپس به هر کدام از این ذرات یک وزن اختصاص داده می‌شود. وزن هر ذره، میزان حرکت هر ذره را مشخص می‌کند. در این مقاله از تابع توزیع گوسی (توزیع نرمال) که به صورت معادله (۲۱) می‌باشد برای تخصیص وزن به هر ذره استفاده می‌شود (شکل ۶).

$$(21) \quad \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

پس از تخصیص وزن به هر ذره، وزن ذرات نرمالیزه می‌شوند.

ردیابی موقعیت مردمک، روش تخمین فیلتر ذره‌ای به همراه الگوریتم ژنتیک پیشنهاد می‌شود. این الگوریتم با استفاده از تخمین فیلتر ذره‌ای، ذراتی را به عنوان مرکز مردمک فریم بعدی پیش‌بینی می‌کند، سپس با استفاده از تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک، مکان تمامی این ذرات را با مرکز ثقل مردمک که در مرحله ۲-۴ به دست آمد مقایسه می‌کند و از بین این ذرات، ذراتی که مکان آن‌ها به مرکز واقعی مردمک نزدیک‌تر است انتخاب می‌کند. همچنین الگوریتم ژنتیک با اعمال عملگرهای ترکیب و جهش بر روی ذرات انتخاب شده توسط تابع برازندگی، ذرات جدیدی را به عنوان مرکز مردمک حالت بعد پیشنهاد می‌دهد. این ذرات با اجرای هر دور از الگوریتم ژنتیک به مرکز واقعی مردمک نزدیک‌تر می‌شوند و ذرات بهینه‌ای را در اختیار فیلتر ذره‌ای قرار می‌دهند.



شکل ۵: الف) مربع احاطه‌کننده و مماس بر دایره مردمک، ب) تقسیم طول و عرض مربع بر دو و تشخیص مرکز مردمک

۵-۲- ردیابی مردمک

هدف از این مرحله، پیش‌بینی مرکز مردمک در فریم بعدی است. به این منظور، الگوریتم فیلتر ذره‌ای را با الگوریتم ژنتیک ترکیب می‌نماییم. مراحل این الگوریتم به صورت زیر است:

ابتدا موقعیت اولیه N ذره $\{x_{0:k}^i\}$ ، $i = 1 \dots N$ ، به صورت تصادفی با استفاده از تابع چگالی پیشین $p_0(x_1)$ تولید شده و به هر کدام از این ذرات وزن $1/N$ اختصاص داده می‌شود $\{w_1^i = 1/N\}_{i=1}^N$. سپس گام‌های زیر اجرا می‌شود:

به عنوان مثال فرض می‌شود فریم جاری، فریم $(k-1)$ است و هدف پیش‌بینی مرکز مردمک در فریم (k) است، برای این کار مراحل زیر انجام می‌شود:

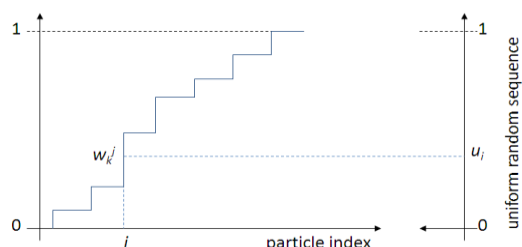
حلقه زیر به تعداد $k=210$ مرتبه تکرار می‌شود و گام‌های زیر در هر تکرار طی می‌شود:

۱) بروز رسانی اندازه‌گیری

حالت سیستم با مشاهده فریم $(k-1)$ بروز رسانی می‌شود. برای این کار مراحل الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود:

۱-۱) **ایجاد جمعیت اولیه:** مکان تمامی ذراتی که توسط فیلتر ذره‌ای به عنوان مرکز مردمک فریم بعدی پیش‌بینی شده است به الگوریتم ژنتیک داده می‌شود.

داشته باشد به دست می‌آید. ذراتی که وزن بیشتری دارند شانس بیشتری برای انتخاب شدن دارند. این ذرات انتخاب شده جایگزین ذرات با وزن ناچیز می‌شوند. در نهایت به تعداد جمعیت اولیه ذره خواهیم داشت [۳۵]. شکل ۷ نحوه نمونه‌برداری مجدد از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۷: نمونه‌برداری از نمونه‌ها بر اساس وزن اهمیت آن‌ها [۴].

در نهایت شرط پایان الگوریتم بررسی می‌شود، اگر فریم اجرا شده آخرین مشاهده نباشد الگوریتم به گام اول برمی‌گردد. در غیر این صورت الگوریتم خاتمه می‌یابد.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی

در این بخش، ابتدا نحوه پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی توضیح داده می‌شود. سپس، نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بیان می‌شود. در نهایت، پس از معرفی پارامترهای ارزیابی، نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی با روش فیلتر ذره‌ای [۲۶] مقایسه می‌شود.

۳-۱- نحوه پیاده‌سازی

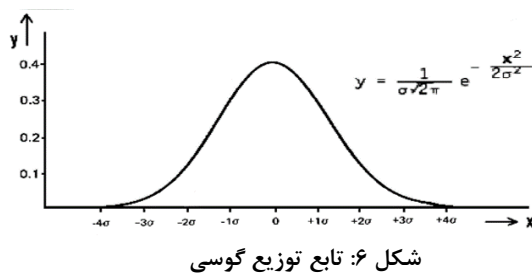
شبیه‌سازی و اجرای الگوریتم‌های روش پیشنهادی بر روی فریم‌های تصاویر ویدیویی در نرم‌افزار MATLAB و بر روی یک سیستم با نام تجاری DELL و مدل Vostro 1400 با پردازنده Intel Core 2 duo ، 2.0 GHz و با RAM: 1 Gb انجام شده است. ویدیو استفاده شده در این مقاله، ویدئو استفاده شده در مرجع [۲۶] است. این ویدئو با نرخ فریم ۲۴ در ثانیه به فریم‌های متوالی تبدیل شده است. اندازه وضوح تصویر هر فریم ۴۸۰ × ۷۲۰ و تعداد کل فریم‌ها ۲۱۰ می‌باشد.

۳-۲- نتایج پیاده‌سازی

خروجی الگوریتم پیشنهادی، مردمک ردیابی شده در هر فریم می‌باشد که با ذرات آبی‌رنگ نمایش داده می‌شود. این ذرات آبی‌رنگ به اندازه تعداد ذرات جمعیت فیلتر ذره‌ای می‌باشد. نمونه‌هایی از فریم‌های خروجی در شکل ۸ نشان داده شده است. الگوریتم پیشنهادی موقعیت مردمک را با حرکت مردمک به درستی ردیابی می‌کند.

همچنین الگوریتم در فریم‌هایی که مردمک حرکات بسیار سریعی دارد (شکل ۹) مردمک را به درستی ردیابی می‌کند. این حالت در واقع

$$\tilde{w}_k^i = \frac{w_k^i}{\sum_{j=1}^N w_k^j} \quad (22)$$



شکل ۶: تابع توزیع گوسی

با اتمام هر دور از الگوریتم ژنتیک از بین ذراتی که فیلتر ذره‌ای به‌عنوان مرکز مردمک پیش‌بینی کرده است، ذرات بهینه و جدید بر اساس تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شوند، سپس به هر کدام از آن‌ها یک وزن اختصاص داده می‌شود. این ذرات در مرحله نمونه‌برداری مجدد باعث ایجاد تنوع در نمونه‌ها می‌شوند. همچنین، از آنجایی که الگوریتم ژنتیک بهترین ذرات را انتخاب می‌کند باعث پیش‌بینی بهینه مرکز مردمک توسط فیلتر ذره‌ای می‌شود.

۲) پیش‌بینی

در این مرحله فیلتر ذره‌ای، مرکز مردمک حالت بعد (فریم k) را با در نظر گرفتن مکان و وزن نرمال شده هر ذره در فریم جاری (فریم k-1) و با استفاده از تابع تخمین پیش‌بینی می‌کند.

$$E\{f(x_k)\} = \sum_{i=1}^N \tilde{w}_k^i f(x_k^i) \quad (23)$$

وزن هر ذره مشخص‌کننده میزان حرکت آن ذره می‌باشد. بنابراین مکان ذرات در هر فریم باید با حرکت ذره‌ها طوری تغییر داده شوند که بتوان به هدف (همان مرکز مردمک) در فریم (k) دست یافت.

۳) بروز رسانی زمان

با بروز رسانی زمان، پیش‌بینی‌ها طبق توزیع پیشنهادی تولید شده، سپس وزن ذرات بروز رسانی می‌شود. برای این کار مکان ذرات و سرعت هر کدام از آن‌ها در فریم (k-1) نیاز است. این ذرات به صورت تصادفی در کنار یکدیگر قرار داده می‌شوند.

۴) نمونه‌برداری مجدد

در این مرحله، ذرات با وزن ناچیز حذف می‌شوند و ذرات با وزن بیشتر تکثیر شده و به آن‌ها وزن $\frac{1}{N}$ اختصاص داده می‌شود:

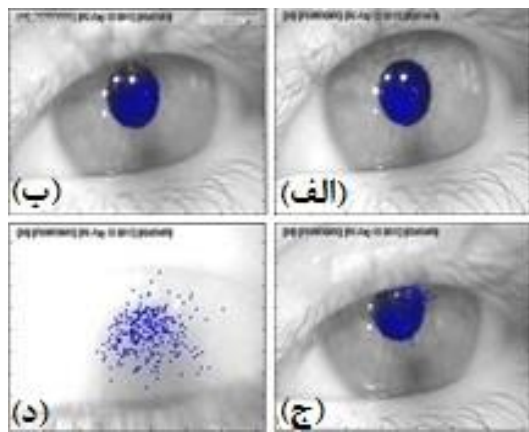
$$\{x_k^j, w_k^j = \frac{1}{N}\}$$

نحوه نمونه‌برداری مجدد از نمونه‌ها بر اساس وزن آن‌ها به این صورت انجام می‌شود که ابتدا عددی بین صفر و یک به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت تولید می‌شود و با تصویر کردن آن بر روی تابع تجمعی وزن‌های نرمالیزه، اندیس ذره‌ای که باید در جمعیت گام بعدی حضور

موارد را به درستی ردیابی می کند. در این حالت فیلتر ذره‌ای هدف را گم می کند.

یکی از ویژگی‌های فیلتر ذره‌ای این است که در صورت گم شدن هدف، الگوریتم دوباره خود را مقداردهی اولیه کرده و به سرعت هدف را پیدا می نماید و به سمت آن همگرا می شود. به همین دلیل پس از فریمی که موقعیت مردمک در آن گم شده است، تعدادی از ذرات فریم هنوز خارج از مردمک هستند و در حال همگرا شدن برای پیش‌بینی موقعیت مردمک در فریم‌های بعد می باشند.

از ویژگی‌های خاص الگوریتم پیشنهادی آن است که موقعیت مردمک چشم را حتی در حالت پلک زدن و نیمه‌باز بودن چشم به درستی ردیابی می کند. واضح است که اگر در یک فریم از ویدیو آزمایش شده، چشم به صورت کامل بسته شود، ردیابی مردمک چشم امکان پذیر نیست (شکل ۱۰ (د)).

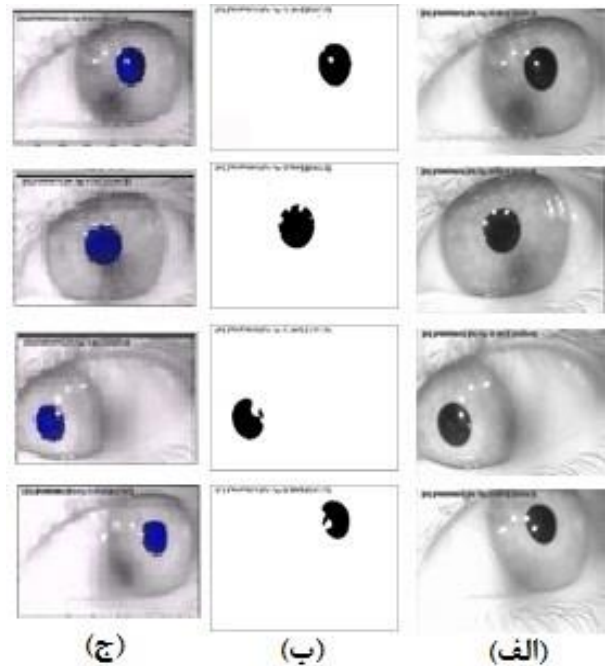


شکل ۱۰: (الف و ب) و (ج) ردیابی مردمک در حالت پلک زدن چشم، (د) ردیابی مردمک در حالت بسته شدن چشم

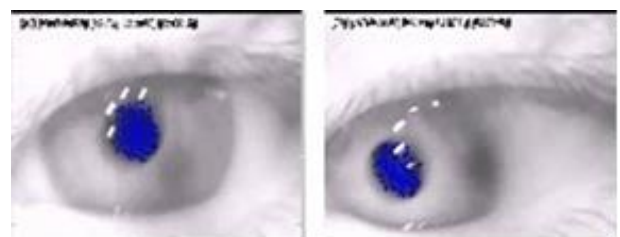
۳-۳- پارامترهای ارزیابی

امروزه گستره وسیعی از کاربردهای ردیابی چشم وجود دارد که به طور کلی به دو دسته تشخیصی و تعاملی تقسیم می شوند [۵]. در کاربردهای تشخیصی [۲۸، ۳۶]، الگوهای ضبط شده حرکات چشم کاربر برای ارزیابی برون خطی^{۲۰} مورد استفاده قرار می گیرند. کاربردهای تشخیصی با دستگاه‌های ردیابی چشم غیرعلنی انجام می شود و نیاز به واکنش نگاه ناظر ندارد. در برخی موارد حتی مطلوب است ردیاب چشم پنهان بماند به طوری که فرد از حضور آن آگاه نباشد. در این روش با توجه به الگوهای ضبط شده حرکات چشم، نقطه دید ناظر تشخیص داده می شود. در این کاربردها پارامتر دقت مهم ترین عامل برای یک دستگاه ردیابی چشم است. در کاربردهای تعاملی [۲، ۳ و ۱۹]، برای تعامل انسان با کامپیوتر و انجام واکنش به نگاه کاربر در زمانی کوتاه و یا در حالت ایده آل در بلادرنگ، علاوه بر پارامتر دقت، پارامتر سرعت نیز یک عامل مهم برای یک دستگاه ردیابی چشم است. از این رو دو پارامتر دقت و

نمونه‌ای از به اصطلاح تار شدن تصویر می باشد. هنگامی که سرعت حرکت هدف از سرعت تخمین بسیار بیشتر باشد، تصویر تار و نامشخص می شود و به عبارت دیگر هدف در تصویر به صورت مبهم و کشیده شده به نظر می رسد. یکی از ویژگی‌های فیلتر ذره‌ای این است که در این حالات با داشتن تابع توزیع احتمال مناسب، هدف را به درستی پیش‌بینی می کند.



شکل ۸: (الف) تصاویر اصلی، (ب) نتایج تشخیص مردمک با حرکت مردمک، (ج) نتایج ردیابی مردمک با حرکت مردمک

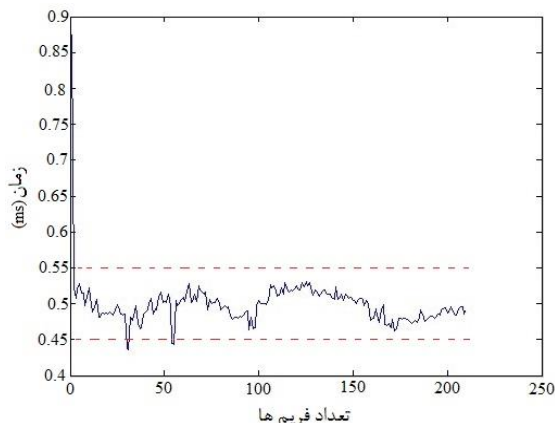


شکل ۹: ردیابی مردمک در حرکات سریع مردمک

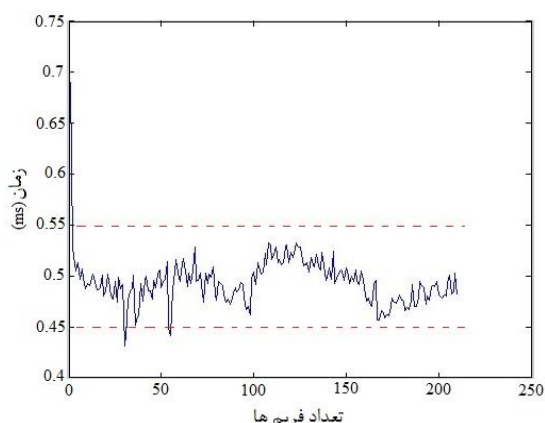
با محاسبه مختصات مرکز مردمک در هر فریم حرکت افقی و عمودی مردمک مشخص می شود. به این صورت که مؤلفه (x) بیانگر حرکت افقی مردمک و مؤلفه (y) بیانگر حرکت عمودی مردمک است. با بررسی مرکز مردمک در فریم‌های متوالی مشخص می شود که مردمک چند پیکسل حرکت افقی و چند پیکسل حرکت عمودی داشته است. در ویدیو آزمایش شده بیشتر حرکات مردمک حرکات افقی پیوسته و عمودی پیوسته است که الگوریتم پیشنهادی به درستی این حرکات را ردیابی می کند. در ۲۲ فریم از ۲۱۰ فریم ویدیو استفاده شده نیز حرکت ناگهانی مردمک وجود دارد که الگوریتم پیشنهادی به جز یک فریم بقیه

پایه‌سازی شده و دو پارامتر سرعت و دقت به ازای هر کدام از این جمعیت‌ها محاسبه شده است.

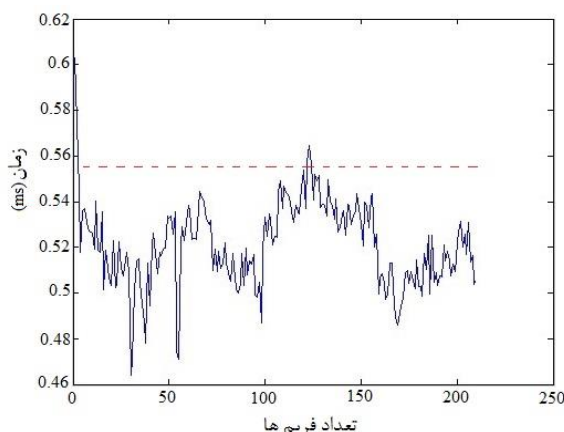
به‌عنوان نمونه، نمودار زمان پردازش برای جمعیت‌های ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ فیلتر ذره‌ای به ترتیب در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: نمودار زمان به ازای تعداد فریم‌ها با جمعیت ۱۰۰



شکل ۱۲: نمودار زمان به ازای تعداد فریم‌ها با جمعیت ۵۰۰



شکل ۱۳: نمودار زمان به ازای تعداد فریم‌ها با جمعیت ۱۰۰۰

همان‌طور که در نمودارهای زمان جمعیت‌های مختلف فیلتر ذره‌ای ملاحظه می‌شود، زمان محاسبات در اولین فریم بیشتر از سایر

سرعت برای روش ارائه شده به ازای جمعیت‌های مختلف فیلتر ذره‌ای ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌های مختلف روی ویدیو انتخاب شده نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی موقعیت مردمک در هر فریم را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند.

دقت: برای سنجش میزان دقت روش پیشنهادی، به ازای جمعیت‌های مختلف فیلتر ذره‌ای مراحل زیر انجام می‌شود:

(۱) در هر فریم، مختصات تمام ذرات محاسبه می‌شود. مختصات هر ذره به صورت یک (x, y) می‌باشد که مؤلفه x بیانگر موقعیت افقی هر ذره و مؤلفه y بیانگر موقعیت عمودی هر ذره می‌باشد.

(۲) طول ضلع مربعی که دایره مردمک را احاطه کرده و بر آن مماس شده است بر دو تقسیم کرده و شعاع مردمک محاسبه می‌شود.

(۳) در هر فریم مختصات هر کدام از ذرات با مختصات مرکز ثقل مردمک مقایسه شده و اختلاف آن‌ها به دست می‌آید. در صورتی که این اختلاف برای مؤلفه x و y از شعاع مردمک کمتر باشد این ذره در داخل دایره مردمک واقع شده و جزو پیش‌بینی‌های درست روش پیشنهادی برای تخمین موقعیت بعدی مردمک می‌باشد. در غیر این صورت ذره در داخل دایره مردمک واقع نشده و خطا محسوب می‌شود.

(۴) در هر فریم ذراتی که خطا محسوب می‌شود محاسبه کرده و برای کل فریم‌ها نیز همین کار انجام می‌شود و تعداد کل خطاها در کل فریم‌ها محاسبه می‌شود و با توجه به آن نرخ صحیح با استفاده از رابطه (۲۵) به دست می‌آید.

$$A = T - E \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، A نرخ صحیح، T تعداد کل ذرات و E نرخ خطا می‌باشد.

در نهایت دقت کل با استفاده از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$PA = A/T \times 100 \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، PA دقت کل برحسب درصد می‌باشد.

سرعت: برای ارزیابی زمان پردازش روش پیشنهادی، زمان پردازش در هر فریم را محاسبه کرده و سپس زمان پردازش کل با استفاده از رابطه (۲۷) به دست می‌آید.

$$AVG_t = \frac{\sum t}{N} \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)، AVG_t میانگین میانگین زمان پردازش کل فریم‌ها برحسب میلی‌ثانیه، $\sum t$ نشان‌دهنده مجموع زمان پردازش تمام فریم‌ها و N نمایانگر تعداد فریم‌ها می‌باشد.

۴-۳- نتایج ارزیابی

الگوریتم پیشنهادی بر روی ۲۱۰ فریم و به ازای جمعیت‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ فیلتر ذره‌ای

دقت الگوریتم نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش تعداد ذرات باعث افزایش بار محاسباتی می‌شود. لذا، همان‌طور که نتایج آزمایش‌ها بر روی جمعیت‌های ۱۰ تا ۱۰۰۰ فیلتر ذره‌ای نشان می‌دهد هر چقدر جمعیت فیلتر ذره‌ای افزایش پیدا می‌کند دقت الگوریتم افزایش یافته و سرعت الگوریتم کاهش می‌یابد.

در کاربردهای تشخیصی مانند زمینه‌های روانشناسی و علوم اعصاب، بازاریابی/ تبلیغات، عوامل انسانی مانند سیستم‌های نظارت و بازبینی بصری، سهولت استفاده از ماشین و ... که الگوهای ضبط‌شده حرکات چشم کاربر برای ارزیابی برون‌خطی مورد استفاده قرار می‌گیرند و دقت ردیابی حرکات چشم پارامتر بسیار مهم‌تری نسبت به زمان محسوب می‌شود می‌توان با افزایش جمعیت فیلتر ذره‌ای تا حد مطلوب، بالاترین دقت را برای ردیابی حرکات مردمک چشم به دست آورد. در کاربردهای تعاملی که به انجام واکنش در مدت زمان بسیار کوتاه و در حالت ایده‌آل در همان لحظه نیاز است، می‌توان بین دقت و سرعت الگوریتم مصالحه صورت داد و جمعیت فیلتر ذره‌ای را طوری انتخاب کرد که یک تعامل بهینه بین دقت و سرعت به وجود آید. به‌عبارت‌دیگر در عین حال که سرعت الگوریتم بهینه است دقت الگوریتم نیز افزایش یابد.

دقت و سرعت روش پیشنهادی با دقت و سرعت روش فیلتر ذره‌ای [۲۶] به ازای جمعیت‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ ذره مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مقایسه روش پیشنهادی با روش فیلتر ذره‌ای

جمعیت فیلتر ذره‌ای							دقت (%)	سرعت (ms)	روش پیشنهادی
۵۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۶۰	۳۰	۱۰			
۹۷	۹۵	۸۳	۴۰	۲۲	۱۵	۱۲	دقت (%)	روش پیشنهادی	
۷۹۰	۷۸۰	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۲۰	سرعت (ms)	روش پیشنهادی	
۹۸/۰۵	۹۶/۱۹	۸۵/۹۸	۷۶/۲۴	۴۱/۴۶	۱۲/۳۱	۱۰/۳	دقت (%)	روش پیشنهادی	
۴۸۵	۴۷۷	۴۷۴	۴۶۹	۴۵۹	۴۵۶	۴۵۲	سرعت (ms)	روش پیشنهادی	

نقطه‌ضعف فیلتر ذره‌ای مسئله فقر نمونه [۳۷] و تباهیدگی [۳۸] می‌باشد. به‌منظور حل این مشکلات، در این مقاله از الگوریتم ژنتیک در فیلتر ذره‌ای استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی به‌طور تصادفی در فضای حالت شروع به جستجو می‌کند و با استفاده از تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک بهترین تخمین حالت‌ها را در هر لحظه به دست می‌آورد.

فریم‌هاست که این موضوع به دلیل مقداردهی اولیه ذرات توسط الگوریتم فیلتر ذره‌ای می‌باشد. بدیهی است که هر چقدر تعداد ذرات جمعیت فیلتر ذره‌ای بیشتر باشد زمان پردازش در اولین فریم و همچنین در سایر فریم‌ها نیز بیشتر می‌شود. اما زمان محاسبات در سایر فریم‌ها تقریباً در یک محدوده مشخص، متغیر است. با انجام آزمایش‌ها بر روی جمعیت‌های ۱۰ تا ۱۰۰۰ مشاهده می‌شود که زمان اجرای محاسبات به‌غیراز اولین فریم در بقیه فریم‌ها برای جمعیت‌های زیر ۱۰۰۰ تقریباً در بازه ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ متغیر است.

به دلیل تصادفی بودن برخی متغیرها، نمودار زمان برای یک جمعیت مشخص در هر بار اجرا متفاوت است از این رو برای محاسبه زمان محاسبات، میانگین شش بار اجرا برای هر جمعیت در نظر گرفته شده است.

نتایج دقت و سرعت روش پیشنهادی به ازای جمعیت‌های مختلف فیلتر ذره‌ای در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: نتایج دقت و سرعت روش پیشنهادی برای جمعیت‌های مختلف

نرخ نمونه‌برداری	جمعیت الگوریتم ژنتیک	جمعیت فیلتر ذره‌ای	سرعت (ms)	دقت
۲۴	۵	۱۰	۴۵۲	۱۰/۳۷ %
۲۴	۵	۳۰	۴۵۶	۱۲/۳۱ %
۲۴	۵	۶۰	۴۵۹	۴۱/۴۶ %
۲۴	۵	۱۰۰	۴۶۹	۷۶/۲۴ %
۲۴	۵	۲۰۰	۴۷۴	۸۵/۹۸ %
۲۴	۵	۳۰۰	۴۷۷	۹۶/۱۹ %
۲۴	۵	۵۰۰	۴۸۵	۹۸/۰۵ %
۲۴	۵	۷۰۰	۵۰۳	۹۸/۳۱ %
۲۴	۵	۹۰۰	۵۰۹	۹۸/۶۵ %
۲۴	۵	۱۰۰۰	۵۱۹	۹۸/۷۶ %

دقت در جدول ۱ بیانگر تعداد ذراتی است که در داخل مردمک واقع شده‌اند. این در حالی است که ممکن است موقعیت مردمک به‌درستی پیش‌بینی شده باشد اما تعداد معدودی از ذرات در خارج از مردمک قرار گرفته باشند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است هر چقدر جمعیت فیلتر ذره‌ای کاهش پیدا می‌کند دقت الگوریتم نیز کاهش می‌یابد. به‌طورکلی در فیلتر ذره‌ای در صورتی که تعداد ذرات فیلتر ذره‌ای از یک مقدار آستانه کوچک‌تر شود فیلتر ذره‌ای ناپایدار می‌شود. در روش پیشنهادی این مقدار آستانه‌ای برابر ۶۰ است. علت این موضوع آن است که در این حالت ذرات نمی‌توانند تابع چگالی احتمال پسین را به‌درستی تخمین بزنند. دقت فیلتر ذره‌ای به‌شدت به تعداد ذرات وابسته می‌باشد. از این رو، هر چقدر جمعیت فیلتر ذره‌ای افزایش پیدا می‌کند

مرکز واقعی مردمک انتخاب شده و در نتیجه موقعیت مردمک در فریم بعدی به درستی پیش‌بینی می‌شود.

کارایی الگوریتم پیشنهادی با تجزیه و تحلیل پارامترهای سرعت و دقت به ازای جمعیت‌های مختلف فیلتر ذره‌ای ارزیابی شد. با انجام آزمایش‌های مختلف روی ویدیو انتخاب شده به ازای جمعیت‌های مختلف مشاهده شد که روش ارائه شده موقعیت مردمک چشم را با در نظر گرفتن جمعیت مناسب برای فیلتر ذره‌ای با دقت مطلوبی تخمین می‌زند.

دقت و سرعت روش پیشنهادی با روش فیلتر ذره‌ای مقایسه شده و مشاهده گردید که روش پیشنهادی موقعیت مردمک در هر فریم را با دقت بالاتری نسبت به روش فیلتر ذره‌ای تخمین می‌زند. همچنین با در نظر گرفتن جمعیت مناسب برای الگوریتم پیشنهادی زمان انجام محاسبات الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش فیلتر ذره‌ای کمتر است. در کارهای آتی می‌توان با بهره‌گیری از فریم‌های متنوع، روش پیشنهادی را برای افرادی که از عینک استفاده می‌کنند و همچنین در فریم‌هایی که چندین مردمک در یک تصویر وجود دارد پیاده‌سازی کرد تا بتوان نگاه چند نفر را به‌طور هم‌زمان دنبال کرد.

مراجع

- [1] T. Koccejko, A. Bujnowski and J. Wtorek, "Eye mouse for disabled", in Proc. IEEE Conf. Human Syst. Interact., pp. 199-202, May 2008.
- [2] R. Khushaba, Ch. Wise, S. Kodagoda, J. Louviere, B. E. Kahn and C. Townsend, "Consumer neuroscience: Assessing the brain response to marketing stimuli using electroencephalogram (EEG) and eye tracking", Elsevier, Expert Systems with Applications, vol. 40, Issue. 9, pp. 3803-3812, July 2013.
- [3] R. C. Coetzer and G. P. Hancke, "Eye detection for a real-time vehicle driver fatigue monitoring system", in Proc. IEEE Intell. Veh. Symp, pp. 66-71, Jun. 2011.
- [4] C. Corcoran, F. Nanu, S. Petrescu and P. Bigioi, "Real-time eye gaze tracking for gaming design and consumer electronics systems", IEEE Transactions Consumer Electronics, vol. 58, Issue. 2, pp. 347-355, 2012.
- [5] A.T. Duchowski, *Eye Tracking Methodology*, Verlag London Limited, Springer, 2007.
- [6] Z. Zhu and J. Qiang, "Robust real-time eye detection and tracking under variable lighting conditions and various face orientations", Elsevier, Computer Vision and Image Understanding, 2005.
- [7] D. W. Hansen and J. Qiang, "In the eye of the beholder: a survey of models for eyes and gazes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, no. 3, 2010.
- [8] G. Daunys, et al., *D5.2 Report on New Approaches to Eye Tracking*. Communication by Gaze interaction (COGAIN), IST-2003-511598: Deliverable 5.2., 2006 http://www.cogain.org/results/reports/COGAIN_D5.2.pdf.
- [9] R. M. Sundaram, B. C. Dhara and B. Chanda, "A fast method for iris Localization" in Proc. 2nd Int. Conf. EAIT, pp. 89-92, 2011.
- [10] A. Pranith and C. R. Srikanth, "Iris recognition using corner detection" in Proc. 2nd ICISE, pp. 2151-2154, 2010.
- [11] R. Valenti and T. Gevers, "Accurate eye center location and tracking using isophote curvature" Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2008.
- [12] B. Fu and R. Yang, "Display control based on eye gaze estimation" in Proc. 4th Int. CISP, vol. 1, pp. 399-403, 2011.

همچنین الگوریتم ژنتیک با اعمال عملگرهای ترکیب و جهش بر روی ذرات انتخاب شده توسط تابع برازندگی، ذرات جدیدی را به‌عنوان مرکز مردمک حالت بعد پیشنهاد می‌دهد. این ذرات با اجرای هر دور از الگوریتم ژنتیک به مرکز واقعی مردمک نزدیک‌تر می‌شوند و ذرات بهینه‌ای را در اختیار فیلتر ذره‌ای قرار می‌دهند. در نتیجه روش پیشنهادی ذرات را سریع‌تر به سمت نقطه بهینه سوق می‌دهد.

طبق نتایج به دست آمده از مقایسه روش پیشنهادی و روش فیلتر ذره‌ای در جدول ۲ مشاهده می‌شود که دقت هر دو روش با افزایش جمعیت فیلتر ذره‌ای بهبود می‌یابد. دقت روش ارائه شده به ازای جمعیت‌های ۱۰ و ۳۰ کمتر از دقت روش فیلتر ذره‌ای است زیرا در صورتی که جمعیت فیلتر ذره‌ای از یک مقدار (در روش پیشنهادی، از آستانه ۶۰) کمتر باشد فیلتر ذره‌ای ناپایدار می‌شود و ذرات نمی‌توانند حالت بعدی را به درستی تخمین بزنند. بنابراین، بیشتر ذرات خارج از شعاع مردمک قرار می‌گیرند و چون بیشتر ذرات خارج از شعاع مردمک قرار می‌گیرند و پراکنده می‌شوند تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک که فاصله اقلیدسی هر ذره تا مرکز مردمک است، نیز نمی‌تواند ذرات بهینه را به درستی انتخاب کند.

همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، دقت روش پیشنهادی به ازای جمعیت‌های ۶۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ بیشتر از دقت روش فیلتر ذره‌ای است. دلیل این برتری آن است که با افزایش جمعیت فیلتر ذره‌ای، فیلتر ذره‌ای پایدار شده و موقعیت بعدی مردمک را با دقت بیشتری تخمین می‌زند. از این رو ذرات به مرکز واقعی دایره مردمک چشم در فریم تصویر نزدیک‌تر می‌شوند. واضح است که در این شرایط، الگوریتم ژنتیک در هر بار اجرا با انتخاب ذرات بهینه‌ای که به مرکز مردمک نزدیک‌تر هستند و استفاده از این ذرات در پیش‌بینی‌های فیلتر ذره‌ای باعث بهبود دقت تخمین می‌شود.

همچنین، طبق جدول ۲ مشاهده می‌شود که زمان انجام محاسبات در روش فیلتر ذره‌ای با افزایش ذرات به سرعت افزایش پیدا می‌کند. در حالی که در روش پیشنهادی زمان انجام محاسبات به نسبت بسیار کمتری افزایش پیدا کرده و به ازای جمعیت‌های در نظر گرفته شده تقریباً در یک بازه زمانی ثابت است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای بهبود دقت تخمین موقعیت مردمک در فریم‌های تصاویر ویدیویی ارائه شد. روش ارائه شده از تخمین فیلتر ذره‌ای به همراه الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی موقعیت مردمک در فریم‌های ویدیویی استفاده می‌کند. از آنجایی که روش پیشنهادی ویژگی مرکز مردمک را برای ردیابی مردمک در هر فریم استفاده می‌کند و همچنین با استفاده از تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک که فاصله اقلیدسی مکان ذرات پیش‌بینی شده تا مرکز واقعی مردمک است، نزدیک‌ترین ذرات به

- [27] H. Qin, X. Wang, M. Liang and W. Yan, "A novel pupil detection algorithm for infrared eye image", IEEE International Conference, Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), pp. 1-5, 2013.
- [28] Th. Charoenpong, P. Patrapisetwong, Th. Chanwimalueang and M. Mahasithiwat, "Accurate pupil extraction algorithm by using integrated method", IEEE, knowledge and smart Technology (KST), pp. 32 - 37, 2013.
- [29] A. AL-rahayfeh and M. Faezipour, "Eye tracking and head movement detection: a state-of-art survey", Rehabilitation Devices and Systems, vol. 1, 2013.
- [۳۰] رمضان هاونگی، محمد تشنه لب، محمد علی نکویی و حمید رضا تقی راد، «بررسی مسئله تخمین از دیدگاه بهینه‌سازی مقید و طراحی تخمین‌گر تکاملی»، مجله مکانیک هوافضا (دینامیک، ارتعاشات، کنترل)، جلد ۷، شماره ۲۷، ۱-۴۰، ۱۳۹۰.
- [۳۱] سید فرید موسوی پور، نادعلی زارعی، «فیلتر کالمن و ذره‌ای در ردیابی اهداف چالش‌ها و رهیافت‌ها»، پنجمین کنفرانس ملی فرماندهی و کنترل ایران، دانشگاه تهران، ۱-۷، آذر ۱۳۹۰.
- [32] M. Shakir Hussain, *Real-Coded Genetic Algorithm Particle Filters for High-Dimensional State Spaces*, Ph.D. Thesis, Department of Computer Science University College London, pp. 11, 2014.
- [33] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [۳۴] مجتبی جعفری، تشخیص تومور در تصاویر سی‌تی مغزی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات چندجمعیتی همراه با جستجوی محلی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، ۴۸، ۱۳۹۳.
- [۳۵] امیر حسین تمجید، انتخاب، استخراج و تطبیق ویژگی در Visual SLAM، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه طوسی، ۳۰، ۱۳۸۶.
- [36] A. Slama, A. Machraoui and M. Sayadi, "Pupil tracking using active contour model for Videonystagmography applications", IEEE IPAS'14: International Image Processing Applications and Systems Conference, pp. 1 - 5, 2014.
- [37] S. Park, J. Hwang, E. Kim, and H. Kang, "A new evolutionary particle filter for the prevention of sample impoverishment" IEEE Trans. On evolutionary Computation, vol. 13, no. 4, 2009.
- [38] D. Simon, "Optimal state estimation kalman, H. and non-linear approaches", John Wiley and Sons, New Jersey, 2006
- [13] H. Liu and Q. Liu, "Robust real-time eye detection and tracking for rotated facial images under complex conditions" in Proc. 6th ICNC, vol. 4, pp. 2028-2034, 2010.
- [14] J. Tang and J. Zhang, "Eye tracking based on grey prediction" in Proc. 1st Int. Workshop Educ. Technol. Comput. Sci., pp. 861-864, 2009.
- [15] S. Kawato and N. Tetsutani, "Detection and tracking of eyes for gaze-camera control" Proc. 15th Int'l Conf. Vision Interface, 2002.
- [16] S. Sirohey, A. Rosenfeld and Z. Duric, "A method of detecting and tracking irises and eyelids in video" Pattern Recognition, vol. 35, no. 6, pp. 1389-1401, June 2002.
- [17] S.A. Sirohey, A. Rosenfeld, "Eye detection in a face image using linear and nonlinear filters" Pattern Recognition, vol. 34, pp. 1367-1391, 2001.
- [18] C. Morimoto and M. Nimica, "Eye gaze tracking techniques for interactive applications", Elsevier, Computer Vision techniques for interactive applications, vol. 98, Issue. 1, pp. 4-24, April 2005.
- [19] Z. Zhu and J. Qiang, "Eye and gaze tracking for interactive graphic display", Springer, Machine Vision and applications, vol. 15, Issue. 3, pp. 139-148, July 2004.
- [20] Y. Matsumoto, T. Ogasawara and A. Zelinsky, "Behavior recognition based on head pose and gaze direction measurement", IEEE, Intelligent Robots and Systems, vol. 3, pp. 2127-2132, NOV 2000.
- [21] K. Choi, S. Baek, Ch. Ma, S. Park and S. Ko, "Improved pupil center localization method for eye-gaze tracking-based human-device interaction", IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 514-515, 2014.
- [22] H. Qin, X. Wang, M. Liang and W. Yan, "A novel pupil detection algorithm for infrared eye image", Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), IEEE International Conference, pp. 1-5, 2013.
- [23] Th. Charoenpong, P. Patrapisetwong, Th. Chanwimalueang and M. Mahasithiwat, "Accurate pupil extraction algorithm by using integrated method", Knowledge and Smart Technology (KST), 2013 5th International Conference on IEEE, pp. 32 - 37, 2013.
- [24] K. Choi, S. Baek, Ch. Ma, S. Park and S. Ko, "Improved pupil center localization method for eye-gaze tracking-based human-device interaction", IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 514-515, 2014.
- [25] A. Liaghatdar, k. Kangarloo and F. Farokhi, "Pupil localizing in video images the first step toward eye monitoring", IEEE, Multimedia Technology(ICMT), pp. 3163-3166, 2011.
- [26] M. Sadri, k. Kangarloo and F. Farokhi, "Particle filtering in the design of an accurate pupil tracking system", International Journal of Computer Applications (0975 - 8887), vol. 51, no. 8, pp. 6-11, August 2012.

زیر نویس‌ها

^{۱۲} Chapman-Kolmogorov

^{۱۳} Kalman Filter

^{۱۴} Linear - Gaussian

^{۱۵} Particle Filter

^{۱۶} Tracking

^{۱۷} Sample Impoverishment

^{۱۸} Head-mounted eye gaze tracker

^{۱۹} Uniform crossover

^{۲۰} Offline

^۱ Gaze

^۲ Shape-Based Approaches

^۳ Appearance-Based Methods

^۴ Feature-Based Methods

^۵ Contour

^۶ Image template

^۷ Holistic methods

^۸ Neural Network

^۹ Support Vector Machine

^{۱۰} Classification

^{۱۱} Probability Density Function Posterior