

## تخمین مقاوم جهت نگاه نسبت به چرخش سر با استفاده از یک دوربین معمولی

محمد رضا محمدی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، ابوالقاسم اسدالله راعی<sup>۲</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- mrmohammadi@aut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران- raie@aut.ac.ir

**چکیده:** مسئله "تخمین جهت نگاه" به دلیل کاربردهای متعدد، از جمله کمک به ارتباط معلولین با کامپیوتر، از سال‌ها قبل مورد تحقیق بوده است. در سال‌های اخیر روش‌های غیرمداخله‌جویانه، مبتنی بر پردازش تصویر، مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، از استخراج مرزهای عنیبه، برآش بیضی به لبه‌های عنیبه و ارتباط هندسی موجود میان تصویر دوئدی و سه‌بعدی عنیبه‌های حل مسئله استفاده می‌شود. دقت این روش به دقت پارامترهای بیضی برآش شده وابسته است، که خود مستلزم داشتن تصویری بزرگتر از عنیبه و/یا افزایش دقت الگوریتم‌ها است. دستاوردهای اصلی این مقاله استفاده از یک دوربین معمولی و در عوض ارائه الگوریتم‌های جدید با عملکردهای بهتر برای تشخیص مرز عنیبه و برآش بیضی است. از مهمترین خصوصیات الگوریتم پیشنهادی برای استخراج مرزهای عنیبه، سوعت بالا و مقاوم بودن در برابر نویز و شکستگی است. الگوریتم برآش بیضی، بر اساس قیودی پیشنهادی و با استفاده حداکثری از نقاط مرزی عنیبه، دقت بالایی را برای سیستم نهایی نتیجه می‌دهد. همچنین، این سیستم، برخلاف کارهای پیشین، از هیچ پیش‌فرضی در مورد وضعیت سر استفاده نمی‌کند. بنابراین، دستاوردهای این مقاله مقاوم بودن سیستم پیشنهادی نسبت به چرخش‌های گوناگون سر است. کیفیت عملکرد سیستم با تصاویر ساختگی و واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** تخمین جهت نگاه، چرخش سر، استخراج مرز، رشد دادن ناحیه، برآش بیضی.

## Pose-invariant eye gaze estimation using a conventional camera

Mohammad Reza Mohammadi<sup>1</sup>, Graduate Student, Abolqasem Asadollah Raie<sup>2</sup>, Associate Professor

1- Electrical Engineering Department-Amirkabir University of Technology-Tehran-Iran

2- Electrical Engineering Department-Amirkabir University of Technology-Tehran-Iran

**Abstract:** The "Gaze Estimation" problem, due to its manifold applications, including human computer interaction for the handicapped, has been a topic of research since many years ago. Recently, the non-intrusive methods, based on image processing, are interested. In this paper, iris boundaries extraction, ellipse fitting to iris edges and geometrical relation between 3D and 2D images are used to estimate gaze direction. The accuracy of this method mainly relies on the accuracy of the fitted ellipse parameters which in turn requires higher resolution of iris image and/or more accurate algorithms. The key contributions of this paper are proposing novel algorithms to improve the performance of iris boundary extraction and ellipse fitting, while a conventional camera is employed. The main characteristics of the proposed algorithm for iris boundary extraction are being faster and robust to noisy and imperfect images. The ellipse fitting algorithm based on the proposed constraints, utilizes most of the iris boundary points which results in higher accuracy for the overall system. Moreover, this algorithm, unlike previous ones, has no pre-assumption about the head pose. Thus, another important contribution of this paper is the robustness of the proposed system to the head pose variations. The performance of the system has been evaluated on both synthetic and real images.

**Keywords:** Gaze Estimation, Head Rotation, Boundary Extraction, Region Growing, Ellipse Fitting.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۳/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۰/۱/۰۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: مهندس محمد رضا محمدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران- خیابان حافظ- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی برق

مردمک روش " به وجود می آید و به همین دلیل تشخیص ناحیه مربوط به مردمک ساده‌تر می‌شود. به دلیل استفاده از دوربین‌های حساس، چنین سیستم‌هایی معمولاً قیمت‌های برای تخمین جهت نگاه معرفی شده‌اند که از نورپردازی معمولی استفاده می‌کنند (در حدود ۱۰،۰۰۰ دلار). در سال‌های اخیر سیستم‌هایی برای تخمین جهت نگاه کاربری شده‌اند که از نورپردازی معمولی استفاده می‌کنند [۱۵-۱۸]. تاریخچه کاملتری از سیستم‌های تخمین جهت نگاه در [۱۹] جمع‌آوری شده است.

اصول به کار رفته در اکثر روش‌هایی که از پردازش تصویر برای تخمین جهت نگاه استفاده می‌کنند مشابه است. در این روش‌ها، ابتدا چهره کاربر تشخیص داده می‌شود، سپس چشم‌های وی شناسایی شده و در نهایت، با توجه به مشخصات تصاویر چشم‌ها و دیگر اجزای چهره، جهت نگاه تخمین زده می‌شود. تفاوت اصلی در بین این روش‌ها، نحوه تشخیص چهره، تشخیص چشم‌ها، و مهمتر از همه، نحوه تخمین جهت نگاه است.

در [۷] از تقارن موجود میان چشم‌های چپ و راست برای طبقه-بندی جهت نگاه به ۳ جهت (مرکز، چپ و راست) استفاده شده است. در الگوریتم پیشنهادی در [۱۵]، با استفاده از الگوریتم تبدیل هاف یک دایره برای عنایه برازش شده است و از محاسبه فاصله مرکز این دایره با حالتی که کاربر به روبرو نگاه می‌کند، ۹ جهت برای نگاه کاربر لحاظ شده است. در [۱۶] چشم سمت راست کاربر با توجه به هندسه چهره استخراج شده و از مختصات مرکز ثقل آن برای طبقه‌بندی جهت نگاه به ۴ جهت استفاده شده است.

در بسیاری از الگوریتم‌های تخمین جهت نگاه، مانند [۱۶-۱۷ و ۱۵]، جهت نگاه کاربر، تباها به چند زاویه محدود شده است. در برخی از مقاله‌های دیگر، مانند [۱۷-۱۸]، جهت نگاه کاربر به صورت یک بردار در فضای سه‌بعدی بیان شده است. در [۱۷] از یک دوربین برای تشخیص زاویه چهره و از یک دوربین دیگر با توانایی بزرگنمایی بالا برای تصویربرداری از چشم راست استفاده شده است. سپس، با استفاده از ویژگی‌های هندسی چشم، جهت نگاه تخمین زده شده است. در [۱۸] زاویه چهره کاربر با استفاده از یک سیستم مجرا بدست می‌آید و مانند الگوریتم [۱۷]، جهت نگاه با استفاده از پارامترهای مرز و مرکز عنایه تخمین زده می‌شود. استفاده از دو دوربین که یکی از آنها، به منظور افزایش دقت، توانایی بزرگنمایی بالایی دارد در [۱۷] و سیستم مجرا برای تخمین زاویه چهره در [۱۸] باعث گران قیمت شدن سیستم آنها می‌شود.

همچنین، بنا بر مفروضات روش‌های [۱۵-۱۶ و ۷]، محدوده چرخش و جایجایی سر بسیار محدود است و در [۱۷-۱۸] برای رفع این محدودیت از یک سیستم دقیق تخمین وضعیت سر استفاده شده است. محدودیت وضعیت سر یکی از چالش‌های مهم برای تخمین جهت نگاه است.

در این مقاله الگوریتمی برای تخمین جهت نگاه معرفی می‌شود که از تصاویر بدست آمده توسط یک دوربین معمولی استفاده می‌نماید

## ۱- مقدمه

حس بینایی یکی از پنج حس ادراکی در انسان است که اطلاعات مهمنی در مورد آنچه انسان اراده کرده است در اختیار طرف مقابل قرار می‌دهد. به همین دلیل، تحقیقات فراوانی برای بدست آوردن جهت نگاه کاربر، که یکی از مهمترین ویژگی‌های چشم انسان می‌باشد، صورت گرفته است. تخمین جهت نگاه در حوزه‌های متنوعی کاربرد دارد که برخی از آنها عبارتند از سیستم پایش میزان هوشیاری راننده در حین رانندگی [۱-۲]، انجام تحقیقات روانشناسی و برسی میزان توجه در حین مطالعه یک متن یا تماشای یک برنامه تلویزیونی [۳-۵]، کاربردهای توابخشی و ایجاد ارتباط بین انسان و رایانه [۶-۷] که در حدود بیست سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

تمام روش‌های برسی شده برای تخمین جهت نگاه را می‌توان به دو دسته اصلی طبقه‌بندی کرد. در دسته اول از وسائل خاصی مانند الکترود، کلاه یا عینک مخصوص استفاده می‌شود [۸-۱۰]، در حالیکه در دسته دوم با استفاده از یک (یا چند) تصویر و پردازش آن، جهت نگاه کاربر تخمین زده می‌شود [۷-۱۱-۱۸] در اغلب موارد، روش‌های موجود در دسته اول نتایج دقیق‌تری را فراهم می‌کنند اما این روش‌ها به دو دلیل نمی‌توانند به طور وسیع مورد استفاده قرار بگیرند. اول‌اً، به دلیل استفاده از وسائل مخصوص، این روش‌ها اکثراً گران قیمت هستند و نمی‌توانند برای همه افراد قابل تهیه باشند. دوماً، تجهیزات مورد استفاده در این روش‌ها با بدن کاربر در تماس هستند و به همین دلیل کاربر در هنگام استفاده از آنها راحت نخواهد بود. به دلیل همین تماس، روش‌های دسته اول را اصطلاحاً مداخله‌جویانه (یا تهاجمی) و روش‌های دسته دوم را غیر مداخله‌جویانه می‌نامند. شکل ۱ دو نمونه از سیستم‌های استفاده شده در روش‌های مداخله‌جویانه و غیر مداخله-جویانه را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمونه‌هایی از سیستم‌های تخمین جهت نگاه در روش‌های مداخله-جویانه (ردیف بالا) و غیر مداخله‌جویانه (ردیف پائین) [۷ و ۱۷]

در حال حاضر بسیاری از روش‌های غیرمداخله‌جویانه از نورپردازی فعال مادون قرمز برای تصویربرداری استفاده می‌کنند [۱۱-۴]. در تصاویر حاصل از شرایط نورپردازی فعال معمولاً اثراتی مانند آنر

نتایج بدست آمده بر روی یک مجموعه از تصاویر ساختگی و سپس نتایج اعمال الگوریتم بر روی تعدادی تصویر واقعی ارائه می‌شود. بخش ششم نیز مربوط به جمع‌بندی نتایج است.

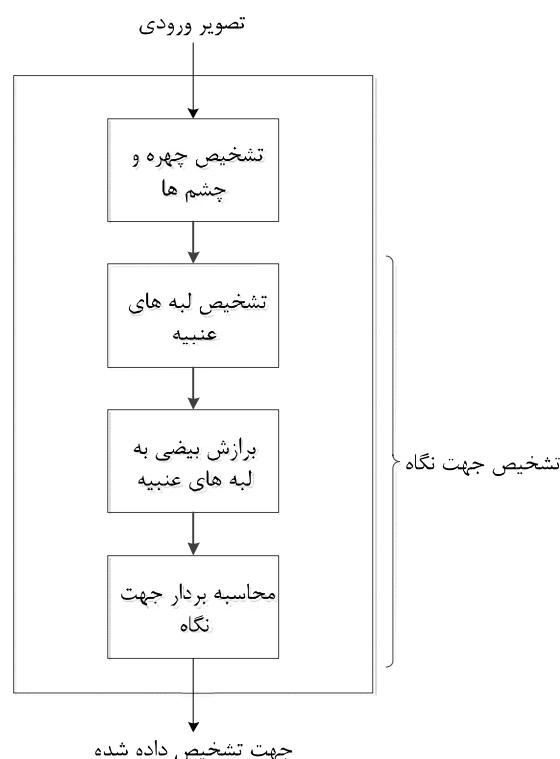
## ۲- تشخیص لبه‌های عنبیه

در سیستم پیشنهادی پس از تشخیص چهره و استخراج چشم چپ از تصویر، لازم است که لبه‌های عنبیه برای برازش یک بیضی استخراج شوند. در [۱۷] برای جداسازی ناحیه عنبیه از سایر قسمت‌های اطراف چشم از آستانه‌سازی استفاده شده و سپس عملگر کنی (canny) برای ایافتن لبه‌ها به کار رفته است. برای تصاویر واقعی و کوچک عنبیه، که با یک دوربین معمولی و بدون بزرگنمایی بالا بدست آمده است، چنین روشی نمی‌تواند دقت مناسبی را تأمین نماید زیرا ناحیه عنبیه به دلیل شفافیت دارای نویزهای فراوانی است و آستانه‌سازی خطای زیادی خواهد داشت. از آنجایی که دقت استخراج مرزهای عنبیه، بر دقت نهایی سیستم تأثیر بسیاری دارد، در ادامه و پیش از ارائه الگوریتم جدید، برخی از روش‌های مشهور و مزایا و محدودیت‌های آنها به اختصار بررسی می‌شوند.

از روش‌های مشهور برای استخراج مرزهاییک شیء، الگوریتم مار است که اولین بار در [۲۱] پیشنهاد شد. این الگوریتم با دقت بالایی مرزهاییک شیء را شناسایی می‌کند. البته این الگوریتم دارای معایبی است که مهمترین آنها هزینه محاسباتی بالای آن است که پیاده‌سازی آن را به صورت بلادرنگ غیر ممکن می‌سازد. روش‌های متنوعی برای بهبود عملکرد الگوریتم مار پیشنهاد شده‌اند. الگوریتم مار حریص (GSA) [۲۲] یکی از روش‌هایی است که برای بهبود الگوریتم مار پیشنهاد شده است. ایده اصلی این الگوریتم محدود کردن جستجو به یک همسایگی محدود است. سرعت GSA نسبت به الگوریتم مار خیلی بیشتر شده است اما همگرا شدن آن به کمینه سراسری تضمین شده نیست و به محل کانتور اولیه حساسیت بالایی دارد. الگوریتم‌های مار حریص سریع [۲۳] و مار حریص پرش‌کننده [۲۴] نیز برای بهبود عملکرد GSA پیشنهاد شده‌اند اما آنها نیز بدست آوردن کمینه سراسری را تضمین نمی‌کنند.

در الگوریتم‌های ذکر شده از یک انرژی برای گرایش دادن کانتور به سمت لبه‌ها در تصویر استفاده می‌شود. بنابراین برای تصاویری که لبه‌های آن برای جداسازی از زمینه خیلی مناسب نیستند این روش‌ها کارآیی خود را از دست می‌دهند. در [۲۵] کانتورهای فعال مبتنی بر انرژی فازی پیشنهاد شده است که از ویژگی‌های ناحیه‌ای برای حرکت کانتور استفاده می‌کنند. این الگوریتم با دقت نسبتاً مناسبی مرز اشیا در یک تصویر را، با توجه به همگن بودن ناحیه‌شیء، پیدا می‌کند. اگرچه این الگوریتم با وجود مزایای فراوان آن مناسب‌ترین کاندید در بین روش‌های موجود به نظر می‌رسد، لیکن از نظر زمان اجرا و خصوصاً میزان همواری مرز بدست آمده توسط آن، برای یافتن مرز بیضی عنبیه کافی نیست.

و همچنین نسبت به چرخش و جابجائی سر مقاومت بالایی دارد. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله در شکل ۲ نشان داده شده است. گام اولدر این الگوریتم برای تشخیص موقعیت چهره و سپس چشم‌های Viola-Jones کاربر است که برای پیاده‌سازی آن از الگوریتم [۲۰] استفاده شده است. تمرکز اصلی این مقاله بر روی سه گام بعدی است. یعنی در این مقاله، برای رسیدن به دقت بیشتر، به جای استفاده از دوربین دومی با قیمت و بزرگنمایی بالا و تصویربرداری دو مرحله‌ای شامل تشخیص چشم و زوم کردن بر روی آن، الگوریتم‌های جدیدی با عملکرد بهتر و مستقل از چرخش سر برای استخراج مرزهای عنبیه و برازش بیضی ارائه شده است.



شکل (۲): گام‌های مورد نیاز برای تخمین جهت نگاه در الگوریتم پیشنهادی لذا در ارائه دستاوردهای این مقاله و در ادامه، الگوریتم جدیدی برای تشخیص لبه‌های عنبیه در بخش دوم معرفی می‌شود. از خصوصیات این الگوریتم، ساده بودن پیاده‌سازی آن، سرعت نسبتاً بالا و مقاوم بودن آن در برابر نویز و شکستگی است. در بخش سوم یک الگوریتم جدید برای برازش بیضی به لبه‌های عنبیه پیشنهاد می‌شود. این الگوریتم، بر اساس قیودی پیشنهادی و با استفاده حداقلی از نقاط مرزی عنبیه، دقت بالاتری را برای برازش حاصل می‌کند. در بخش چهارم از این مقاله، پارامترهای مورد استفاده در بیان جهت نگاه معرفی شده و روابط مورد استفاده در گام چهارم از الگوریتم استنتاج می‌شوند. با توجه به مدلی که برای بیان جهت نگاه معرفی می‌شود و همچنین روش پیشنهاد شده برای برازش بیضی به لبه‌های عنبیه، ثابت می‌شود این الگوریتم نسبت به چرخش و جابجائی سر مقاوم است. بخش پنجم مربوط به ارائه نتایج است. در بخش نتایج، ابتدا

یک همسایگی از آن و با وزن‌های مناسب، جمع ویژگی‌ها بیشینه باشد. این عمل معادل با فیلتر کردن تصویر ویژگی‌ها با یک پنجره مناسب است. وزن پیکسل‌ها و خصوصاً اندازه پنجره در این فرآیند مؤثر است. بطور کلی، انتخاب پنجره نسبتاً بزرگ و افزایش وزن پیکسل‌های نزدیک به مرکز پنجره، با تعریف ناحیه اولیه هماهنگ‌تر است و مانع از تعیین اشتباه آن خواهد شد.

در اکثر موارد انتخاب مقدار ۱ برای وزن تمامی پیکسل‌ها در پنجره کافیت می‌کند. در این صورت می‌توان از مزیت تصویر انتگرال که در [۲۰] معرفی شده است استفاده نمود که سرعت آن نسبت به روش کانولوشن، به خصوص در صورتیکه اندازه پنجره بزرگ باشد، بالاتر است.

بنابراین با یافتن مقدار وقوع آن بر رویشی بالاست و با رشد آن در گام می‌آید که احتمال وقوع آن بر رویشی بالاست و با رشد آن در گام بعدی، تمام شی پوشانده می‌شود.

### ۳-۲- رشد دادن ناحیه

پس از انتخاب ناحیه اولیه در تصویر، باید این ناحیه رشد داده شود تا به مرازهای شی مورد نظر برسد و عمل تشخیص مرز کامل شود. برای این کار، مقدار میانگین ویژگی مورد نظر در ناحیه اولیه را بدست آورده و با  $m$  نشان می‌دهیم. حال اختلاف مقدار ویژگی تمایز دهنده در هر پیکسل با مقدار  $m$  توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$Diff = |i - m| \quad (1)$$

اگرچه پیکسل‌هایی که مقدار  $Diff$  در آنها از یک مقدار آستانه ( $T$ ) کمتر است می‌توانند کاندید مناسبی برای ناحیه شی باشند، ولیکن در صورت انتخاب همه آنها، هیچ قیدی بر روی شکل ناحیه و پیوستگی آن اعمال نشده است.

لذا، برای اضافه کردن قید پیوستگی، رشد دادن ناحیه اولیه به صورت مرحله به مرحله انجام می‌شود و در هر مرحله به پیکسل‌هایی که در همسایگی ناحیه بدست آمده تا آن مرحله وجود دارند امتیاز پیشتری داده می‌شود. برای این منظورتابع  $Score$  به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$Score = Region * W \quad (2)$$

در این رابطه  $Region$ تابع نشان‌دهنده ناحیه مربوط به شی است. پیکسل‌هایی که در مرحله  $t$ ام به عنوان شی شناخته شده‌اند دارای مقدار ۱ در این تابع بوده و باقی عناصر در این تابع صفر هستند.  $W$  نیز پنجه‌ای است که امتیاز هر پیکسل همسایه را معین می‌سازد. به عبارت دیگر، تابع  $Score$  نشان می‌دهد که این پیکسل چه مقدار به ناحیه بدست آمده در مرحله  $t$ ام نزدیک است. اگر وزن اعضای پنجره  $W$  برابر ۱ باشد، تابع  $Score$  برای هر پیکسل، تعداد پیکسل‌هایی از ناحیه بدست آمده در مرحله  $t$ ام که در اطراف آن پیکسل قرار دارند، را نشان می‌دهد. در اینصورت، می‌توان باز هم از روش تصویر

در این بخش از مقاله، روش جدیدیبا عملکرد بهتر نسبت به روش‌های موجود و نیزروش "کانتورهای فعال مبتنی بر انرژی فازی" [۲۵]، برای استخراج مرز عنیبه پیشنهاد می‌شود. این روش می‌تواند در هر کاربردیمرزهاییک شی را، که از لحاظ یک ویژگی نسبت به زمینه متمایز است، به خوبی و با سرعت بالایی پیدا نماید. از آنجایی که عنیبه با ویژگی رنگ نسبت به زمینه متمایز می‌شود، روش پیشنهادی برای استخراج مرزهای عنیبه بسیار مؤثر و مناسب است و مرزهای عنیبه را به صورت هموار و در زمان کم استخراج می‌نماید. ایده اصلی در این روش تعیین محلی از تصویر با بیشترین تجمع ویژگی مورد نظر به عنوان ناحیه اولیه و سپس رشد دادن آن ناحیه به سمت مرزهایشناست. در ادامه سه بخش از الگوریتم جدید تعیین مرز، یعنی انتخاب ویژگی تمیز دهنده، تعیین ناحیه اولیه و رشد دادن آن با جزئیات بررسی می‌شوند.

### ۱-۲- انتخاب ویژگی تمیز دهنده

اولین و یکی از مهمترین قسمتها در این الگوریتم و اکثر الگوریتم‌های تشخیص شی، انتخاب یک ویژگی است که شی را نسبت به زمینه متمایز می‌سازد. این ویژگی در حالت کلی می‌تواند شدت روشنایی پیکسل‌ها، میانگین سطوح خاکستری در یک همسایگی، واریانس سطوح خاکستری در یک همسایگی، الگوی تکراری موجود در شکل، رنگ مخصوص و یا هر ویژگی تمیز دهنده دیگری باشد.

به عنوان نمونه در شکل ۳ یک تصویر از چشم دیده می‌شود که می‌خواهیم در آن مرزهای عنیبه را استخراج کنیم. همانطور که مشاهده می‌شود، ناحیه مربوط به عنیبه از دیگر ناحیه‌ها تیره‌تر است. بنابراین می‌توان از این ویژگی برای استنتاج ناحیه و مرزهای عنیبه استفاده نمود.

برای مسائل دیگر نیز باید ویژگی تمیز دهنده مناسب انتخاب شود. برای بهبود و تعمیم الگوریتم می‌توان از ترکیبی از ویژگی‌ها استفاده نمود. به عبارت دیگر، می‌توان ویژگی‌های مختلفی از تصویر را مورد بررسی قرار داد و سپس برای ادامه کار از آن ویژگی که تغییرات در تصویر محسوس‌تر است بهره برد.



شکل (۳): یک تصویر از چشم

### ۲-۲- تعیین ناحیه اولیه

ناحیه اولیه قسمتی از تصویر است که تجمع ویژگی مورد نظر در آن بیشینه است، که با تعیین و رشد آن، محدوده شی مورد نظر بدست می‌آید. برای انتخاب ناحیه اولیه، می‌توان پیکسلی را پیدا کرد که در

عبارتند از:  $T = 0.1$  و  $n = 1$ . در بخش پنجم مقاله نتایج عملکرد این الگوریتم، بیشتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### ۳- برآش بیضی به لبه‌های عنبیه

پس از تعیین مرزهای عنبیه، باید با استفاده از آنها، پارامترهای بیضی عنبیه محاسبه شوند. در بخش بعدی مقاله اثبات می‌شود که مدل ارائه شده برای تخمین جهت نگاه حساسیت بالایی به پارامترهای بیضی برآش شده دارد. بنابراین، نیاز است تا دقت الگوریتم تشخیص بیضی بسیار بالا باشد. مشکل اصلی در حل این مسئله این است که تمام لبه‌های استنتاج شده برای عنبیه، متعلق به بیضی عنبیه نیستند و برخی از آنها مربوط به محل اشتراک عنبیه با پلک‌ها است. شکل ۵ چنین حالت را نشان می‌دهد. در ادامه و پیش از ارائه روش پیشنهادی این مقاله، برخی از روش‌های موجود که مورد ارزیابی محدود نیز قرار گرفته‌اند، با ذکر مزایا و محدودیت‌های آنها به اختصار بررسی می‌شوند.

یک الگوریتم کارآی برای تشخیص پارامترهای بیضی، در شرایطی که همه مرزها متعلق به آن نیست، تبدیل هاف است. این الگوریتم چون از تمامی نمونه‌ها برای ایجاد یک بیضی استفاده نمی‌نماید، حساسیت پائینی نسبت به نمونه‌های مربوط به لبه پلک‌ها دارد. مهمترین ایراد تبدیل هاف برای شکل‌هایی با تعداد پارامتر زیاد، مانند بیضی که دارای ۵ پارامتر است، زمان بر بودن آن است. برای بهبود عملکرد این الگوریتم پیشنهادهای متنوعی صورت گرفته است. به طور نمونه، در [۲۶] تبدیل هاف تصادفی شده معرفی شده است که سرعت بهتری دارد. در ارزیابی‌های انجام شده بر روی نمونه تصاویر ساختگی و واقعی، عملکرد این الگوریتم نیز از نظر سرعت و همچنین دقت آن برای کاربرد تخمین جهت نگاه کافی شناخته نشده.

انتخاب دیگر برای برآش بیضی، استفاده از الگوریتم نمونه‌برداری تصادفی و اجماع (RANSAC) [۲۷] است. در این الگوریتم، تعدادی نقطه به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و سپس پارامترهای بهینه برای آن نقاط بدست می‌آیند. اگر تعداد نقاطی از مجموعه اولیه که با این پارامترها تطابق دارند از حدی بیشتر باشد، یک شکل شناسایی می‌شود و در غیر این صورت باید نقاط دیگری به صورت تصادفی انتخاب شوند. از مزایای این الگوریتم نیز حساسیت پائین نسبت به نمونه‌های مربوط به لبه پلک‌ها است. در عین حال، بر اساس ارزیابی‌هایی صورت گرفته، سرعت این الگوریتم نسبتاً مناسب ولی دقت آن کافی نبود.

انتگرال برای محاسبه کانولوشن با سرعت بالا استفاده نمود. حال برای اضافه نمودن شرط پیوستگی به ناحیه مربوط به شی، تعریفتابع Diff به صورت رابطه (۳) تغییر داده می‌شود:

$$Diff = \frac{|i - m|}{F(Score)} \quad (3)$$

تابع  $F$  صعودی انتخاب می‌شود تا پیکسلی که در اطراف آن تعداد پیکسل‌های متعلق به شی بیشتری وجود دارد با احتمال بزرگتری به ناحیه اضافه شود. از توابع مناسب برای  $F$  تابع توان است، که در این صورت رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$Diff = \frac{|i - m|}{Score^n} \quad (4)$$

در کاربرد این الگوریتم نکاتی چند قابل ذکر است:  
الف) با انتخاب  $n$  بزرگتر در رابطه (۴)، پیوستگی ناحیه تشخیص داده شده بیشتر می‌شود.

ب) اگرچه برای اکثر تصاویر، انتخاب  $1 = n$  جواب مناسبی ایجاد می‌نماید، ولی چنانچه در مورد شی موجود در صحنه اطلاعاتی در دست است می‌توان از  $n$  مناسب‌تری بهره برد. به طور نمونه، اگر توقع  $n$  رود شی حالت دایروی داشته باشد استفاده از مقدار ۲ برای  $n$  مناسب‌تر است. همچنین باید توجه داشت که افزایش  $n$  موجب کاهش انعطاف پر ز بدهد.

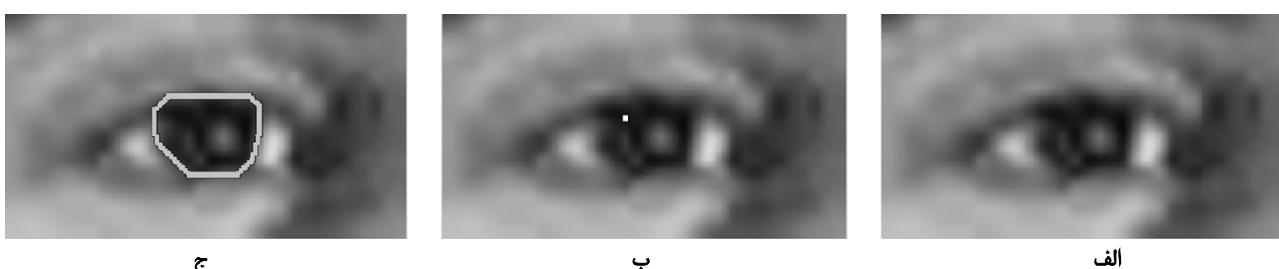
ج) برای افزایش کارآیی الگوریتم می‌توان مقدار  $m$  را پس از هر مرحله بروزرسانی کرد. برای بروزرسانی  $m$  باید در نظر گرفت که مقدادر قبلی ارزش بیشتری دارند. بنابراین در حالت کلی برای  $m$  رابطه (۵) پیشنهاد می‌شود:

$$m' = \alpha M' + (1 - \alpha)m'^{-1} \quad (5)$$

که در این رابطه  $m'$  مقدار جدید برای  $m$ ،  $m'^{-1}$  مقدار قدیمی آن و  $M'$  میانگین ویژگی پیکسل‌های متعلق به شی در تکرار  $t$  است.  $\alpha$  نیز یک ضریب است که باید در تکرارهای اول نزدیک به ۱ باشد و سپس به تدریج کاهشیابد.

د) مقدار مناسب برای حد آستانه ( $T$ ) نیز به میزان تفکیک کنندگی ویژگی‌های انتخاب شده در تصویر بستگی دارد. در کاربرد تعیین مرزهای عنبیه، برای  $1 = n$  مقدار آستانه ۰.۱ مرزهای مناسبی را نتیجه داده است.

شکل ۴ نمونه‌ای از عملکرد این الگوریتم برای تشخیص لبه‌های عنبیه را نشان می‌دهد. اندازه پنجره مورد استفاده برای بدست آوردن ناحیه اولیه  $11 \times 11$  انتخاب شده است. دو پارامتر دیگر برای این تصویر



شکل (۴): استخراج مرز عنیبه توسط الگوریتم پیشنهادی: (الف) تصویر اصلی، (ب) ناحیه اولیه انتخاب شده بر روی شیء (ج) مرز بدست آمده

متوسط در قبل و بعد از آن استفاده شده است. برای محسوس شدن منطق روش پیشنهادی به شکل ۵ ب به عنوان نمونه توجه شود. نقاط تجزیه و اجد دو شرط هستند؛ اولاً تغییر شیب در آن نقاط زیاد است و ثانیاً، شیب متوسط تعدادی از نقاط قبلی و تعدادی از نقاط بعدی آنها تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارند.

اولین پارامتر برای تفکیک نقاط لبه‌ها شیب آنها است. تغییر شیب در یک بیضی نمی‌تواند از حدی بیشتر باشد و بنابراین با محاسبه شیب می‌توان اولین گام در عمل تجزیه را برداشت. مقدار شیب در یک نقطه با استفاده از روابط (۶) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} dx_i &= x_i - x_{i-1} \\ dy_i &= y_i - y_{i-1} \end{aligned} \quad (6)$$

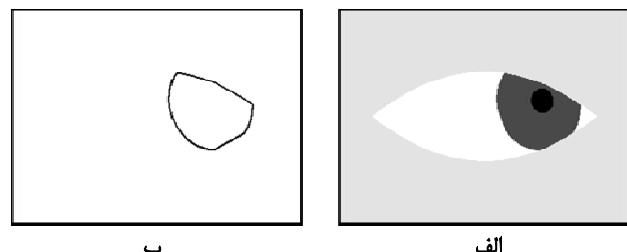
تغییر در شیب می‌تواند از ضرب داخلی نرمالیزه به صورت رابطه (۷) بدست بیاید:

$$d = \frac{dx_{i+1}dx_i + dy_{i+1}dy_i}{\sqrt{(dx_{i+1})^2 + (dy_{i+1})^2} \sqrt{(dx_i)^2 + (dy_i)^2}} \quad (7)$$

به راحتی ثابت می‌شود اگر تعداد نقاط بیضی زیاد باشد مقدار  $d$  باید در تمامی نقاط حدود ۱ باشد. لیکن اگر به طور نمونه بیضی تنها شامل ۲۰ پیکسل باشد و نسبت قطر بزرگ به کوچک آن کمتر از ۲ باشد (معادل با ۶۰ درجه انحراف نسبت به دید مستقیم)، مقدار  $d$  از لحاظ تئوری بین ۰.۸۱۷۶ و ۰.۹۸۷۵ تغییر می‌نماید. از این رو، مقدار آستانه ۰.۸ برای نقطه تجزیه انتخابی می‌شود.

استفاده از تغییر در شیب به تنهایی برای تعیین نقاط تجزیه، حساسیت بالایی نسبت به نویز و خطاهای در پیدا کردن لبه‌های تصویر دارد. بنابراین، از شیب متوسط به عنوان عامل دوم برای تجزیه نقاط استفاده می‌کنیم. برای دستیابی به تخمین مناسبی از شیب متوسط برای  $k$  نقطه قبل از محل مورد نظر، یک خط به آن نقاط برآش کرده و از شیب آن خط استفاده می‌نماییم. با استفاده از روش حداقل مربعات خط برای معادله پارامتری یک خط، رابطه (۸) برای شیب متوسط بدست می‌آید:

$$m_1 = \frac{\sum_{l=1}^k lx_{ll} - \frac{k+1}{2} \sum_{l=1}^k x_{ll}}{\sum_{l=1}^k ly_{ll} - \frac{k+1}{2} \sum_{l=1}^k y_{ll}} \quad (8)$$



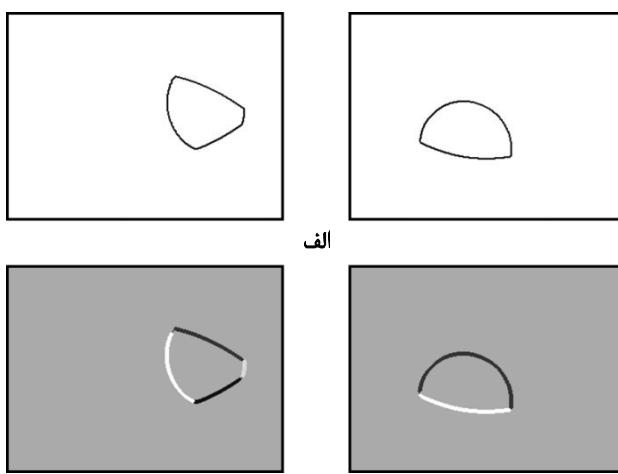
شکل (۵): بخش‌هایی از لبه‌های بدست آمده برای عنیبه مربوط به وجود پلک‌ها است: (الف) یک تصویر ساختگی از چشم، (ب) لبه‌های بدست آمده برای عنیبه

انتخاب دیگر استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر روش حداقل مربعات خط است که معمولاً دقت بالایی دارد. الگوریتم‌های کلی در این گروه، معمولاً از حلقه و تکرار یک پروسه استفاده می‌نمایند و به همین دلیل سرعت آنها قابل قبول نیست. لیکن در [۲۸] فرمول بسته‌ای برای بدست آوردن پارامترهای بیضی مبتنی بر حداقل مربعات خط ارائه شده است. با داشتن فرمول بسته، مشکل سرعت وجود ندارد ضمن اینکه داشتن بخش کوچکی از اطلاعات بیضی، که در برخی از جهت‌های نگاه رخ می‌دهد، برای برآشش بیضی کفایت می‌کند. مشکل اساسی دیگر در این روش حساسیت بیشتر آن، نسبت به دو الگوریتم قبلی، به لبه پلکها است که از شکل مورد نظر فاصله زیادی دارند. بنابراین، برای رسیدن به دقت مطلوب، لازم است که تا حد ممکن نقاط بیضی عنیبه تفکیک شوند.

با توجه به بررسی‌های فوق، در این بخش از مقاله الگوریتمی جدید، برای برآشش بیضی ارائه می‌شود. در این الگوریتم، با تجزیه و ترکیب لبه‌های بدست آمده در مرحله قبلی، نقاط بیضی عنیبه از سایر نقاط تفکیک می‌شوند. سپس، با استفاده از فرمول بسته تخمین پارامترهای بیضی، پارامترهای بیضی با حداقل مربعات خط، محاسبه می‌شوند. در ادامه و در بخش ۱-۱، نحوه تجزیه نقاط به چند قسمت بررسی شده و در بخش ۲-۳ نحوه ترکیب آنها معرفی می‌شود. نتایج آزمایشات، سرعت و دقت مناسب این الگوریتم را نشان داده‌اند.

### ۱-۳- تجزیه نقاط به چند قسمت

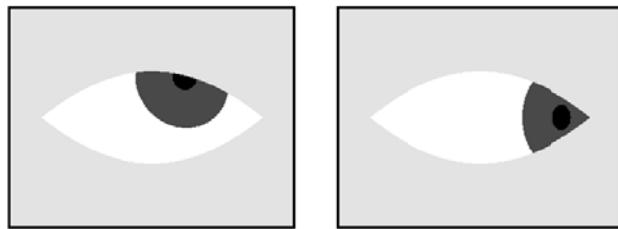
تجزیه کردن مجموعه نقاط به چند قسمت معادل است با بدست آوردن چندین نقطه که محل‌های تجزیه شدن را معین می‌سازند. برای بدست آوردن نقاط تجزیه لبه‌ها، از تغییر شیب در نقطه تجزیه و شیب



شکل (۶): تجزیه لبه‌های بدست آمده برای عنبیه: (الف) لبه‌های خام، (ب) نتیجه تجزیه

رفع این محدودیت مستلزم بدست آوردن میزان چرخش سر بوده و حتی با بدست آوردن آن برای مواردی همچون شکل ۷-الف، که در آن تنها یک لبه عمودی برای عنبیه در تصویر موجود است، و برای مواردی همچون شکل ۷-ب که قسمت‌هایی از لبه‌های عنبیه بدليل عمودی نبودن دور ریخته می‌شوند، خطای بالایی گزارش شده است.

در این مقاله برای تجمعیح حداقلی نقاط بیضی عنبیه و رفع محدودیت چرخش سر، یکتابع برازندگی تعریف و روش بهینه کردن آن پیشههاد شده است. به عبارت دیگر، یکتابع برازندگی برحسب پارامترهای مختلف هر قسمت تعریف شده و سپس تنها قسمت‌هایی با یکدیگر ترکیب می‌شوند که آن تابع را بهتر نمایند.



شکل (۷): حالت‌هایی که انتخاب دو لبه عمودی به عنوان لبه‌های عنبیه مناسب عمل نمی‌کند: (الف) تنها یک لبه عمودی وجود دارد، (ب) بیشتر لبه‌های عنبیه عمودی نیستند

در پیاده‌سازی‌های صورت گرفته از چهار ویژگی در تابع برازندگی استفاده شده است. ویژگی اول میانگین فاصله نقاطه مجموعه موجود در هر قسمت نسبت به بیضی برآش شده برای آن قسمت است ( $f_1$ ). به عبارت دیگر، این ویژگی بیان می‌دارد که نقاط موجود در آن قسمت تا چه حدی بیضوی هستند. ویژگی دوم تعداد نقاطی در مجموعه اصلی است که فاصله کوچکی با بیضی برآش شده دارند ( $f_2$ ). این ویژگی مشخص می‌کند که بیضی برآش شده با چه تعدادی از نقاط مجموعه اصلی تطابق دارد. ویژگی سوم میزان دایروی بودن بیضی مربوطه است ( $f_3$ ). از آنجا که در اکثر مواقع لبه‌های مربوط به عنبیه نسبت به

در این معادله  $x_{1l}$  و  $y_{1l}$  مختصات نقاط قبلی هستند، به همین ترتیب برای  $k$  نقطه بعد از نقطه فعلی رابطه (۹) حاصل می‌شود:

$$m_2 = \frac{\sum_{l=1}^k l x_{2l} - \frac{k+1}{2} \sum_{l=1}^k x_{2l}}{\sum_{l=1}^k l y_{2l} - \frac{k+1}{2} \sum_{l=1}^k y_{2l}} \quad (9)$$

میزان تفاوت این دو شبیه نیز می‌تواند از ضرب داخلی نرمالیزه آنها به صورت رابطه (۱۰) محاسبه شود:

$$m = \frac{|1 + m_1 m_2|}{\sqrt{(1 + m_1^2)(1 + m_2^2)}} \quad (10)$$

بنابراین اگر مقدار  $m$  نزدیک به ۱ باشد به معنای عدم تغییر شبیب متوسط است و در غیر این صورت تغییر شبیب متوسط را نتیجه می‌دهد. بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته، در صورتیکه تعداد نقاط بیش از ۵۰ باشد، انتخاب ۴ درصد از کل نقاط برای  $k$  مناسب است. با این انتخاب، برای بیضی‌هایی که نسبت قطر بزرگ به کوچک آن کمتر از ۲ باشد، مقدار  $m$  بین ۰.۸۸۰۰ و ۰.۹۹۲۱ تغییر می‌نماید. بنابراین حد آستانه برای این پارامتر ۰.۸۵ انتخاب شده است.

با این توضیحات، خلاصه الگوریتم از این قرار است:

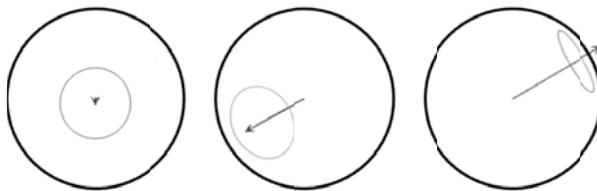
ابتدا برای هر نقطه، تغییر شبیب از معادله (۷) محاسبه می‌شود. آنگاه اگر شرط  $d < 0.8$  برقرار باشد، برای آن نقطه تغییر شبیب متوسط با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود. نقطه‌ای که در آن  $d < 0.8$  باشد یک محل تجزیه کردن خواهد بود.

شکل ۶ دو نمونه از عمل تجزیه کردن را نمایش می‌دهد. قسمت (الف) در این شکل لبه‌های خام را نشان می‌دهد و در قسمت (ب) نتایج تجزیه با رنگ‌های مختلف نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، عمل تجزیه با دقت بسیار خوبی صورت گرفته است.

### ۲-۳- ترکیب قسمت‌های بدست آمده

پس از تجزیه کردن لبه‌ها به چند قسمت، لازم است تا ترکیب برخی از قسمت‌هایی که مربوط به بیضی عنبیه هستند، مشخص شوند. برای این منظور در [۱۷] دو لبه عمودی با بیشترین تعداد پیکسل انتخاب شده‌اند. عملکرد این روش برای چهره‌های بدون چرخش مناسب گزارش شده است. حساسیت این روش نسبت به چرخش سر کاربر مهمترین محدودیت آن است.

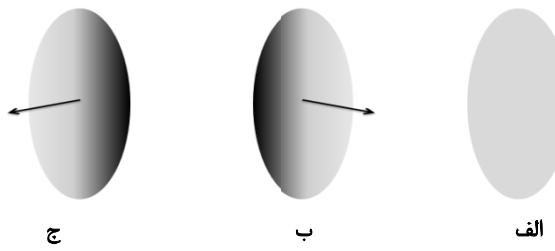
عنیبه، جهت نگاه را بدست آورد. در بخش بعدی هندسه افکنش برای یک دایره مورد بررسی قرار می‌گیرد و روابط موردنیاز برای دستیابی به جهت نگاه از معادله کانتور عنیبه استنتاج می‌شوند.



شکل (۱۰): سه جهت نگاه مختلف و تأثیر آن‌ها بر روی شکل مرز عنیبه در تصویر دوبعدی

#### ۴-۱- هندسه افکنش برای یک دایره

همان طور که در بخش قبل بیان شد، در این مقاله فرض شده است که کانتور عنیبه به صورت یک دایره است و سپس از بردار عمود بر این دایره، که از مرکز هسته چشم می‌گذرد، به عنوان جهت نگاه کاربر استفاده می‌شود. با استفاده از هندسه افکنش ثابت می‌شود که یک بیضی می‌تواند به دو دایره در فضای سه بعدی با جهت‌های مختلف برگردانده شود. شکل ۱۱ برای توضیح این مطلب ایجاد شده است. شکل ۱۱-الف یک بیضی را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۱-ب و ۱۱-ج نیز دو دایره‌ای را نشان می‌دهند که می‌توانند با تصویربرداری دوبعدی از فضای سه بعدی به این بیضی تبدیل شوند (بردار عمود بر دو دایره نیز بر روی آن‌ها نشان داده شده است). در این شکل، رنگ‌های تیره‌تر به معنای نزدیک‌تر بودن به دوربین هستند. از روی این شکل ملاحظه می‌شود که زاویه‌های این دو بردار عمود، نسبت به بردار عمود بر صفحه دوربین قرینه هستند. بنابراین، با در اختیار داشتن پارامترهای بیضی مربوط به عنیبه می‌توان دو جهت نگاه را بدست آورد که البته تنها یکی از آن‌ها قابل قبول است.



شکل (۱۱): یک بیضی در فضای سه بعدی می‌تواند با تصویربرداری از دو دایره مختلف در فضای سه بعدی بدست بیاید: (الف) یک بیضی، (ب) و (ج) دو دایره مربوطه

در ادامه این بخش معادلات برای هر دو حالت بدست می‌آیند و در بخش بعدی جواب یکتا استنتاج می‌شود.

شکل ۱۲ یک بیضی در فضای سه بعدی را نشان می‌دهد. روابط (۱۲) و (۱۳) معادلات پارامتری این بیضی هستند:

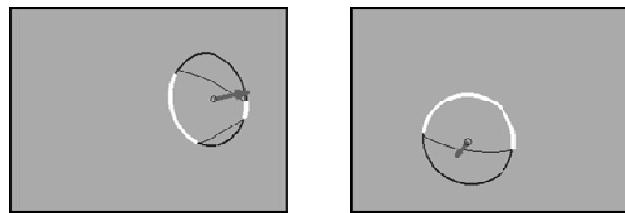
$$x(t) = h + a \cos(t) \cos(\varphi) - b \sin(t) \sin(\varphi) \quad (12)$$

$$y(t) = k + a \cos(t) \sin(\varphi) + b \sin(t) \cos(\varphi) \quad (13)$$

لبه‌های پلک‌ها دایروی تر هستند، می‌توان نسبت قطرهای کوچک و بزرگ هر بیضی را به عنوان یک ویژگی در نظر گرفت. ویژگی چهارم میانگین شدت روشنایی پیکسل‌های اطراف هر قسمت است (f<sub>۴</sub>). از آنجاییکه ناحیه هسته چشم نسبت به باقی ناحیه‌ها روش‌تر است، میانگین شدت روشنایی پیکسل‌های اطراف قسمت‌های مربوط به عنیبه می‌تواند مقدار بزرگ تری داشته باشد. بنابراین تابع پرازنگی به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$f = Af_1 + Bf_2 + Cf_3 + Df_4 \quad (11)$$

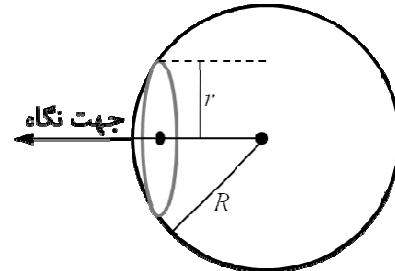
پیاده‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند دقیق این روش بسیار بالا است و می‌تواند وجود لبه‌های ناخواسته زیادی را مدیریت نماید. شکل ۸ نتیجه اعمال این الگوریتم بر روی نمونه‌های شکل ۶ را نشان می‌دهد. فلش رسم شده در این شکل جهت نگاه بدست آمده با استفاده از روابط ارائه شده در بخش بعدی را نمایش می‌دهد.



شکل (۸): لبه‌های بدست آمده پس از ترکیب قسمت‌های مختلف به همراه بیضی برآششده و جهت بدست آمده برای نمونه‌های شکل ۶

#### ۴- مدل چشم و جهت نگاه

در این مقاله از یک مدل ساده و پربازده برای مدل‌سازی چشم و جهت نگاه استفاده می‌کنیم که در [۱۷] پیشنهاد شده است. در این مدل فرض می‌شود که هسته چشم یک کره با شعاع ثابت R است. همچنین فرض می‌شود که عنیبه بر روی مرز هسته چشم قرار دارد و می‌توان کانتور آن را با یک حلقه دایروی با شعاع r مدل کرد.



شکل (۹): مدل چشم و نحوه بیان جهت نگاه

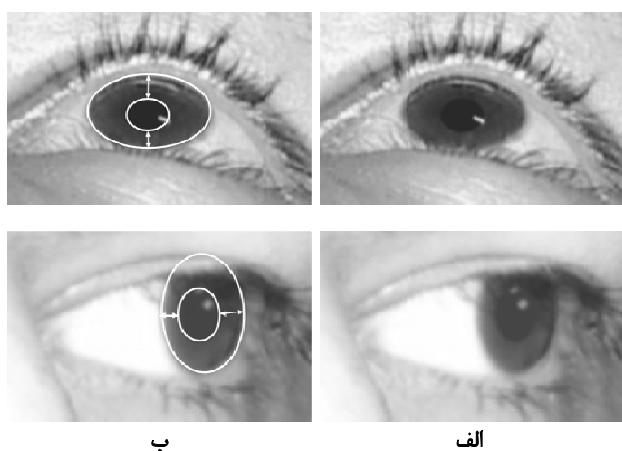
محور نوری چشم خطی است که از مرکز هسته چشم و مرکز عنیبه عبور می‌کند؛ این خط به عنوان جهت نگاه تعریف می‌شود (شکل ۹). با تغییر وضعیت جهت نگاه، هسته چشم حول مرکز خود می‌چرخد و این بردار تغییر می‌کند. شکل ۱۰ سه نمونه از جهت‌های نگاه مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای جهت‌های نگاه مختلف، کانتور عنیبه در تصویر دوبعدی با ظاهرهای متفاوتی دیده می‌شود. بنابراین، می‌توان با استفاده از معادله کانتور

#### ۴-۲-انتخاب بیضی یکتا

انتخاب بیضی یکتا در [۱۷] متنکی بر سه فرض است. اولاً، گوشه‌های چشم و مختصات آنها، با دقت بسیار بالایی در فضای سه بعدی، توسط سیستم تعیین موقعیت سر در اختیار است. ثانیاً، فاصله مرکز کره چشم از گوشه‌های چشم تقریباً یکسان فرض می‌شود. ثالثاً، نسبت شعاع عنبیه به شعاع هسته چشم برای تمامی افراد تقریباً مقدار ثابتی فرض می‌شود. در این صورت، با بدست آوردن مقدار  $r$  می‌توان تقریب خوبی از  $R$  را محاسبه نمود. سپس، اگر از مرکز عنبیه بدست آمده در خلاف جهت بردار عمود بر آن به اندازه  $c$  حرکت کنیم به مختصات سه بعدی مرکز چشم خواهیم رسید. با این روش، می‌توان دو مرکز چشم برای دو جواب ممکن بدست آورد. جوابی قابل قبول است که فاصله مرکز چشم بدست آمده از دو گوشه چشم تقریباً یکسان و برابر با  $R$  باشد.

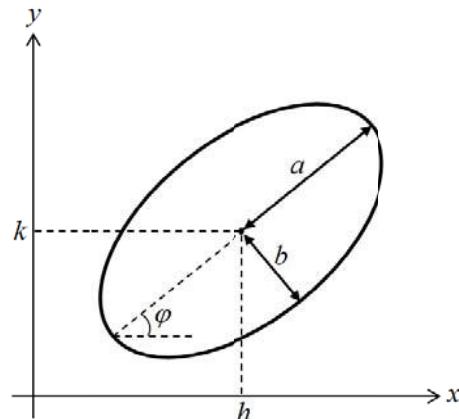
در این مقاله روشی پیشنهاد می‌شود که بدون نیاز به سیستم دقیق تعیین موقعیت سر و مختصات سه بعدی گوشه‌های چشم، تنها با استفاده از اطلاعات عنبیه و مردمک چشم در تصویر دو بعدی، جواب یکتا تعیین می‌شود.

با توجه به ویژگی‌های ساختاری چشم، ثابت می‌شود در یک تصویر دو بعدی، مردمک چشم به لبه‌هایی از عنبیه که در خلاف جهت نگاه قرار دارند نزدیک‌تر است. شکل ۱۳ این خصوصیت را به وضوح نشان می‌دهد. همچنین، ثابت می‌شود مرکز مردمک بر روی قطر کوچک بیضی عنبیه قرار دارد. لذا در روش پیشنهادی این مقاله، قطر کوچک بیضی عنبیه برای بدست آوردن مرکز مردمک جستجو می‌شود. سپس از انتقال مرکز مردمک به مرکز بیضی عنبیه یک بردار دو بعدی به وجود می‌آید. جواب یکتا جوابی است که بردار جهت نگاه مربوط به آن در صفحه تصویر به این بردار نزدیک‌تر باشد.



شکل (۱۳): تعیین جواب یکتا با استفاده از بیضی‌های عنبیه و مردمک؛ (الف) تصویر اصلی، (ب) رسم بیضی‌های عنبیه و مردمک

که در این معادلات  $t$  یک پارامتر است و می‌تواند از صفر تا ۳۶۰ درجه تغییر نماید.



شکل (۱۲): یک بیضی در فضای دو بعدی

با استفاده از هندسه افکش روابط (۱۸) تا (۲۰) برای پارامترهای بیضی مربوط به دایره‌ای با شعاع  $r$  که نسبت به محور  $Z$  با زاویه  $\theta$  و نسبت به محور  $X$  با زاویه  $\phi$  دوران داشته است بدست می‌آیند:

$$a = r \quad (۱۴)$$

$$b = r \cos(\theta) \quad (۱۵)$$

$$h = c \sin(\theta) \cos(\phi) \quad (۱۶)$$

$$k = c \sin(\theta) \sin(\phi) \quad (۱۷)$$

$$\varphi = \phi + \pi/2 + i\pi \quad (۱۸)$$

که در روابط (۱۶) و (۱۷) متغیر  $c$  فاصله میان مرکز هسته چشم و مرکز عنبیه است و از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$c = \sqrt{R^2 - r^2} \quad (۱۹)$$

حال باید روابط معکوس استنتاج شوند تا جهت نگاه از روی پارامترهای بدست آمده برای بیضی محاسبه شوند. با استفاده از روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۸) معادلات (۲۰) تا (۲۲) نتیجه می‌شوند:

$$r = a \quad (۲۰)$$

$$\theta = \cos^{-1}(b/a) \quad (۲۱)$$

$$\phi = \varphi - \pi/2 - i\pi \quad (۲۲)$$

می‌توان با استفاده از معادلات (۱۶) و (۱۷) نیز رابطه (۲۳) را برای  $\phi$  بدست آورد:

$$\phi = \text{atan2}(k, h) \quad (۲۳)$$

مقادیر  $k$  و  $h$  باید نسبت به مرکز هسته چشم سنجیده شوند که مختصات مرکز هسته چشم در دست نیست و بنابراین نمی‌توان به طور مستقیم از معادله (۲۳) بهره برد.

#### ۴-۴- حساسیت جهت نگاه بدست آمده نسبت به پارامترهای بیضی برازش شده

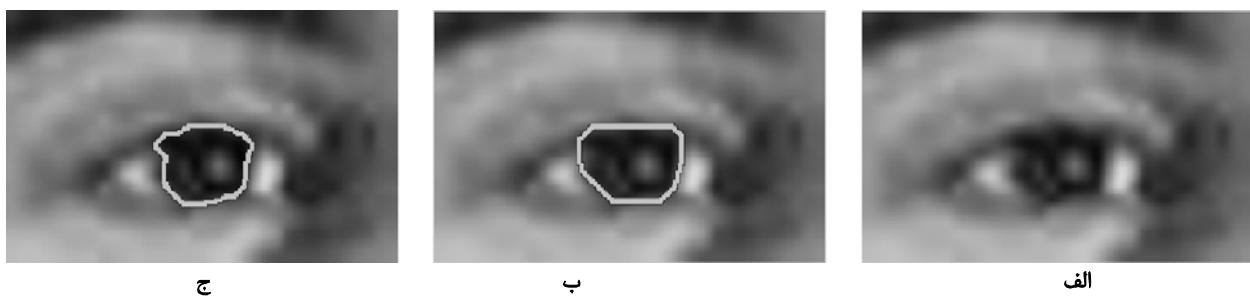
در این بخش، حساسیت زوایای بدست آمده برای جهت نگاه بررسی می‌شوند. زاویه  $\theta$  تنها به نسبت اندازه قطرهای بیضی بستگی دارد. حساسیت این وابستگی از رابطه (۲۴) بدست می‌آید:

$$\frac{d\theta}{d(b/a)} = \frac{-1}{\sqrt{1-(b/a)^2}} \quad (24)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین حساسیت مربوط به حالتی است که دو قطر بیضی برابر باشند و کمترین حساسیت مربوط به حالتی است که قطر کوچک بیضی صفر باشد. به عبارت دیگر، حساسیت الگوریتم برای زمان‌هایی که کاربر به سمت روبرو نگاه می‌کند حداقل است.

#### ۴-۳- حساسیت سیستم نسبت به چرخش سر

در سیستم پیشنهادی تنها از ویژگی‌های هندسی عنیبه و مردمک برای تخمین جهت نگاه استفاده می‌شود. بنابراین، اگر بتوانیم بیضی مناسبی را برای عنیبه برازش کنیم، جهت نگاه بدون وابستگی به اطلاعات چرخش سر بدست می‌آید. سیستم پیشنهادی برای تشخیص ناحیه عنیبه دارای قدرت بالایی است و اگر عنیبه در تصویر قبل مشاهده باشد، می‌تواند با دقت خوبی لبه‌های آن را استنتاج نماید. الگوریتم مربوط به برازش بیضی نیز از هیچ فرضی در مورد حالت عنیبه کمک نمی‌گیرد و بنابراین در حالات‌های مختلف چهره می‌تواند بیضی مناسب را برای لبه‌های عنیبه استخراج نماید. لذا، سیستم پیشنهادی نسبت به چرخش‌های سر، تا زمانی که هنوز مرزهای عنیبه قابل مشاهده هستند، مقاوم است.



شکل (۱۴): مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم Fuzzy: (الف) تصویر اصلی، (ب) نتیجه الگوریتم پیشنهادی، (ج) نتیجه الگوریتم Fuzzy

پارامتر دیگر برای مقایسه دو الگوریتم، زمان همگرایی است. زمان مورد نیاز برای الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم فازی برای تصویر شکل ۱۴ به ترتیب حدود ۳۴.۲ms و ۲۹۱ms بدست آمده‌اند. برای مجموعه تصاویر تست نیز سرعت الگوریتم پیشنهادی به طور متوسط حدود چهار برابر سرعت الگوریتم فازی بوده است. کدهای هر دو الگوریتم با شرایط مشابه بر روی MATLAB پیاده‌سازی شده و سیستم موردن استفاده نیز دارای CPU با فرکانس ۲.۶۷GHz بوده است.

#### ۵-۲- برازش بیضی

هدف اصلی از ارائه الگوریتم در این زمینه، تفکیک حداکثری و دقیق نقاط بیضی عنیبه از مرزهای بدست آمده و مستقل از چرخش سر، برای برازش بیضی بوده است. در جهت ارزیابی عملکرد این الگوریتم، از ۲۲ تصویر حقیقی استفاده شده است. برای هر تصویر، تعداد کل پیکسل‌های مرز حاصل از مرحله قبل، تعداد پیکسل‌های بیضی عنیبه و پیکسل‌های حاصل از اجرای الگوریتم شمارش شده و در ارزیابی استفاده شده‌اند. برای کل تصاویر، از مجموع ۱۸۲۰۱ پیکسل که به عنوان مرز تشخیص داده شدند، ۱۴۰۶ پیکسل در نقاط تجزیه حذف شده‌اند و ۱۱۷۴۹ پیکسل به عنوان لبه‌های بیضی عنیبه شناسایی شده‌اند. خطای الگوریتم در انتخاب نقاط غلط ۳۲۹ پیکسل و در عدم انتخاب نقاط صحیح ۲۳۱ پیکسل بوده است.

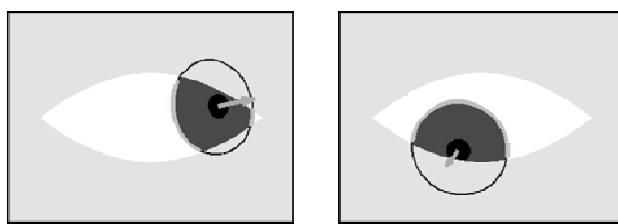
زاویه  $\phi$  یک رابطه مستقیم با زاویه  $\varphi$  دارد و بنابراین حساسیت آن نسبت به این پارامتر ثابت بوده و برابر با ۱ است.

#### ۵- نتایج ارزیابی

در این بخش، نتایج ارزیابی بخش‌های مختلف و نیز کل سیستم پیشنهادی ارائه می‌شوند.

#### ۱-۵- تشخیص مرزهای عنیبه

در اینجا ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی استخراج مرزهای عنیبه مورد نظر است. با توجه به اینکه اندازه زیر تصویر مربوط به چشم‌ها در یک تصویر معمولی بسیار کوچک بوده و در اطراف و حتی داخل عنیبه لبه‌های غیر دلخواه فراوانی وجود دارد، الگوریتم‌های [۲۳] FGSA و [۲۴] SGSA برای تصاویری مانند شکل ۳ مناسب عمل نکرده‌اند و لذا مقایسه تنها میان الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم کانتورهای فعال مبتنی بر انرژی فازی [۲۵]، صورت می‌گیرد. دقت و سرعت، دو پارامتر اصلی برای مقایسه این الگوریتم‌ها است. شکل ۱۴ یک نمونه از تصاویر متعددی است، که در ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مرزهای حاصل از الگوریتم پیشنهادی نرم‌تر بوده و از این حیث برای کاربرد تخمین جهت نگاه کیفیت بهتری دارد.



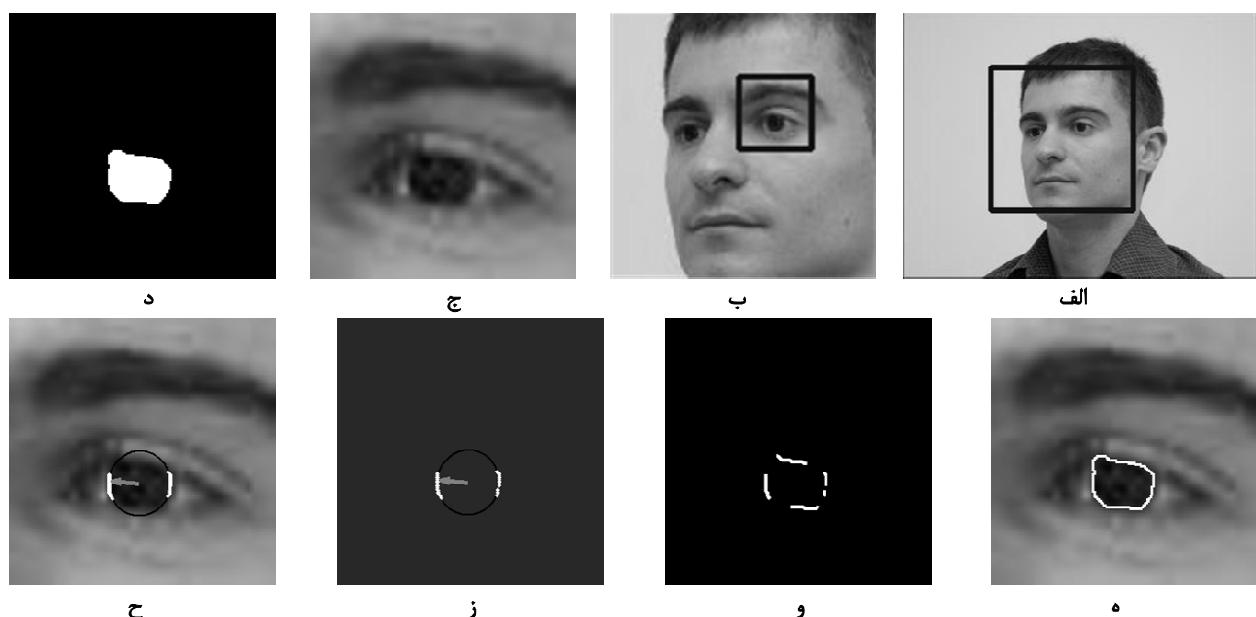
شکل (۱۵): جهت نگاه بدست آمده برای دو نمونه از تصاویر ساختگی

خطای میانگین برای تصاویر ساختگی با زوایای چرخش  $0 \leq \theta \leq 35^\circ$  و  $\phi < 180^\circ - 3^\circ$  درجه بوده است. در صورتی که اثر پلک‌ها حذف شود، خطای میانگین به حدود ۱ درجه کاهش می‌یابد. دلیل این خطا تعداد محدود پیکسل‌های تصویر است. بیشترین خطا نیز مربوط به حالاتی است که بیشتر از نیمی از تصویر عنیبه توسط پلک‌ها پوشیده شده است. در حالتی که زاویه  $\theta$  صفر است نیز یک پیک در خطاء با مقداری حدود ۴ درجه وجود دارد که دلیل آن حساسیت بالای الگوریتم در حالت نگاه مستقیم است.

بنابراین، حدود ۲٪ از لبه‌های عنیبه مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و حدود ۳٪ از لبه‌های دیگر، به اشتباہ به عنوان لبه‌های عنیبه منظور شده‌اند، که این آمار، گویای عملکرد مناسب الگوریتم هستند.

### ۳-۳- تخمین جهت نگاه

برای بررسی دقیق عملکرد سیستم پیشنهادی در محیط شبیه سازی، از مجموعه بزرگی از تصاویر ساختگی برای زوایای چرخش متفاوت استفاده شده است. جهت‌های بدست آمده برای دو نمونه از این تصاویر ساختگی در شکل ۱۵ دیده می‌شود.



شکل (۱۶): عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی یک تصویر واقعی؛ (الف) تصویر اصلی و نتیجه تشخیص چهره، (ب) تشخیص چشم چپ در زیر تصویر چهره، (ج) زیر تصویر چشم چپ، (د) نتیجه بدست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی برای ناحیه عنیبه، (ه) نمایش مرز بدست آمده بر روی زیر تصویر چشم، و) تجزیه لبه‌های عنیبه، (ز) نتیجه ترکیب لبه‌های مربوطه، به همراه بیضی برآش شده برای آنها و جهت تخمین زده شده برای نگاه، (و) نمایش لبه‌های مربوط به عنیبه، بیضی برآش شده و جهت تخمین زده شده بر روی زیر تصویر چشم

نشان می‌دهد که این عمل با دقیق مناسبی صورت گرفته است. قسمت (ز) نتیجه ترکیب قسمت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لبه‌های مربوط به عنیبه به خوبی تشخیص داده شده‌اند. قسمت (ح) نیز نتیجه نهایی الگوریتم را بر روی زیر تصویر چشم نمایش می‌دهد.

### ۴-۴- مراحل تعیین جهت نگاه بر روی یک تصویر

شکل ۱۶ نتیجه مراحل مختلف سیستم پیشنهادی بر روی یک تصویر واقعی را نشان می‌دهد. قسمت‌های (الف) تا (ج) نتیجه تشخیص چشم چپ در تصویر ورودی، قسمت (د) ناحیه بدست آمده برای عنیبه توسط الگوریتم پیشنهادی و قسمت (ه) مرز آن ناحیه بر روی زیر تصویر چشم را نشان می‌دهد. قسمت (و) نتیجه تجزیه لبه‌ها را

## مراجع

- [1] P. Smith, M. Shah, and N. da Vitoria Lobo, "Monitoring head/eye motion for driver alertness with one camera," in Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on, 2000, pp. 636-642 vol.4.
- [2] B. Bhowmick, and K. S. Chidanand Kumar, "Detection and classification of eye state in IR camera for driver drowsiness identification," in Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), 2009 IEEE International Conference on, 2009, pp. 340-345.
- [3] N. Franck, E. Daprati, F. Michel et al., "Gaze discrimination is unimpaired in schizophrenia," Psychiatry Research, vol. 81, no. 1, pp. 67-75, 1998.
- [4] D. D. Salvucci, "Inferring intent in eye-based interfaces: tracing eye movements with process models," in Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: the CHI is the limit, Pittsburgh, Pennsylvania, United States, 1999.
- [5] Y. Sawahata, R. Khosla, K. Komine et al., "Determining comprehension and quality of TV programs using eye-gaze tracking," Pattern Recogn., vol. 41, no. 5, pp. 1610-1626, 2008.
- [6] O. Spakov, and P. i. Majaranta, "Scrollable Keyboards for Casual Eye Typing," Psychology Journal, vol. 7, no. 2, pp. 159-173, 2009.
- [7] J. J. Magec, M. Betke, J. Gips et al., "A Human-Computer Interface Using Symmetry Between Eyes to Detect Gaze Direction," Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, vol. 38, no. 6, pp. 1248-1261, 2008.
- [8] D. G. Evans, R. Drew, and P. Blenkhorn, "Controlling mouse pointer position using an infrared head-operated joystick," Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on, vol. 8, no. 1, pp. 107-117, 2000.
- [9] R. Vaidyanathan, C. Beomsu, L. Gupta et al., "Tongue-Movement Communication and Control Concept for Hands-Free Human&dash;Machine Interfaces," Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, vol. 37, no. 4, pp. 533-546, 2007.
- [10] R. Barca, L. Boquet, M. Mazo et al., "System for assisted mobility using eye movements based on electrooculography," Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on, vol. 10, no. 4, pp. 209-218, 2002.
- [11] C. H. Morimoto, D. Koons, A. Amir et al., "Pupil detection and tracking using multiple light sources," Image and Vision Computing, vol. 18, no. 4, pp. 331-335, 2000.
- [12] Z. Zhu, and Q. Ji, "Eye and gaze tracking for interactive graphic display," Mach. Vision Appl., vol. 15, no. 3, pp. 139-148, 2004.
- [13] P. Kang Ryoung, "A Real-Time Gaze Position Estimation Method Based on a 3-D Eye Model," Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, vol. 37, no. 1, pp. 199-212, 2007.
- [14] Y. Dong Hyun, and C. Myung Jin, "Non-intrusive eye gaze estimation without knowledge of eye pose," in Automatic Face and Gesture Recognition, 2004. Proceedings. Sixth IEEE International Conference on, 2004, pp. 785-790.
- [15] D. B. B. Liang, and H. Lim Kok, "Non-intrusive eye gaze direction tracking using color segmentation and Hough Transform," in Communications and Information

## ۵-۵- ارزیابی عملکرد بر روی تصاویر واقعی

در شکل ۱۷ چهار تصویر واقعی نشان داده شده است. این تصاویر توسط یک دوربین معمولی با نام Samsung NV15/Landiao NV15 تهیه شده‌اند. تصاویر انتخابی، مقاومت سیستم پیشنهادی را نسبت به چرخش‌های سر نشان می‌دهند.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستمی برای تخمين جهت نگاه ارائه شد که از یک دوربین رایج، ویژگی‌های چشم و هندسه افکنش استفاده می‌نماید. انگیزه اصلی در این تحقیق، کاهش هزینه‌های سخت افزاری و نرم افزاری ضمن رسیدن به دقت هرچه بیشتر بوده است.



شکل (۱۷): چهار تصویر حقیقی برای نشان دادن مقاوم بودن سیستم پیشنهادی نسبت به چرخش سر

در این راستا، روش نوینی برای تشخیص لبه‌های عنیبه، با سادگی، سرعت بالا و مقاومت در برابر نویز و شکستگی ارائه شد. همچنین برای برآش بیضی بهینه به لبه‌های عنیبه، الگوریتم جدیدی، برای استفاده مؤثر و حداکثری از نقاط بیضی عنیبه معرفی شد. مهم‌ترین مزیت این سیستم مقاوم بودن آن در برابر چرخش‌های گوناگون سر با استفاده از یک دوربین معمولی و عدم نیاز آن به سیستم تشخیص دقیق و سه‌بعدی میزان چرخش سر است.

در ادامه کار این مقاله، می‌توان با استفاده از هر دو چشم یا یک دوربین معمولی دیگر، دقت را افزایش و حساسیت سیستم را نسبت به نگاه مستقیم کاهش داد. همچنین، بررسی اثر عینک بر روی دقت سیستم پیشنهادی و ارائه یک الگوریتم مقاوم نسبت به آن، یکی از کارهای آینده است.

- Technologies, 2007. ISCIT '07. International Symposium on, 2007, pp. 602-607.
- [16] H. M. Peixoto, A. M. G. Guerreiro, and A. D. D. Neto, "Image processing for eye detection and classification of the gaze direction," pp. 2475-2480.
- [17] J.G. Wang, E. Sung, and R. Venkateswarlu, "Estimating the Eye Gaze from One Eye," Computer Vision and Image Understanding, 98(1):83-103, April 2005.
- [18] M. J. Reale, S. Canavan, Y. Lijun, H. Kaoning, and T. Hung, "A Multi-Gesture Interaction System Using a 3-D Iris Disk Model for Gaze Estimation and an Active Appearance Model for 3-D Hand Pointing," Multimedia, IEEE Transactions on, vol. 13, no. 3, pp. 474-486, 2011.
- [19] D. W. Hansen, and J. Qiang, "In the Eye of the Beholder: A Survey of Models for Eyes and Gaze," Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 32, no. 3, pp. 478-500, 2010.
- [20] P. Viola and M. Jones, "Robust real-time object detection," Intl. Workshop on Stat. and Comp. Theories of Vision, July 2001.
- [21] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active contour models," Int. J. Comput. Vis., vol. 1, pp. 321-331, 1988.
- [22] D. J. Williams, and M. Shah, "A fast algorithm for active contours and curvature estimation," Comput. Vis. Graph. Image Process., vol. 55, pp.14-26, 1992.
- [23] K. M. Lam and H. Yan, "Fast algorithm for locating head boundaries," J. Electron. Imag., vol. 3, no. 4, pp. 352-359, 1994.
- [24] M. Sakalli, K. Lam, and H. Yan, "A faster converging snake algorithm to locate object boundaries," IEEE Transactions on Image Processing, 15(5):1182-1191, 2006.
- [25] S.Krinidis, V.Chatzis, "Fuzzy Energy-Based Active Contours," IEEE Transactions on Image Processing, 18(12):2747-2755, 2009.
- [26] L. Xu, E. Oja, and P. Kultanen, "A new curve detection method: Randomized Hough transform (RHT),"Pattern Recog. Lett. 11, 1990, 331-338.
- [27] M.A. Fischler and R.C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Communications of the ACM, 24(6):381-395, 1981
- [28] A. Fitzgibbon, M. Pilu, and R.B. Fisher, "Direct least square fitting of ellipses," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 21, no. 5, pp. 476-480, 1999.