

## تعقیب مسیر نگاه با استفاده از پردازش تصویر به منظور کمک به افراد ناتوان حرکتی

علیرضا رحیم پور<sup>۱</sup>، عباس نصیرایی مقدم<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه بیوالکترونیک، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران  
ali.rahimpour@aut.ac.ir  
<sup>۲</sup>استادیار، گروه بیوالکترونیک، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران

### چکیده

هدف از انجام این پروژه تعقیب حرکت‌های چشم کاربر در هنگام کار با رایانه است؛ طراحی سیستمی که در عین سادگی و ارزان بودن از سرعت و دقت قابل قبولی بمنظور کار با رایانه برخوردار باشد. سامانه تعقیب‌گر معرفی شده، بدون استفاده از هرگونه سخت‌افزار اضافی و نور مادون قرمز و تنها با استفاده از دوربین تعبیه شده در رایانه‌های همراه معمولی قادر به تعقیب زمان واقعی حرکات چشم فرد است. در سامانه معرفی شده، تعقیب چهره فرد، تعقیب چشم و ویژگی‌های آن مانند عنبیه، گوشه‌های چشم، پلک‌ها و صلیبه (ناحیه سفید چشم) با حداقل کردن اثر تغییرات پس زمینه، حرکت‌های سر فرد و تغییرات یکنواخت نور محیط انجام می‌شود. از ویژگی‌های بارز این سامانه - که در پژوهش‌های انجام شده گذشته کمتر دیده شده است - تشخیص مسیر نگاه به صورت زمان واقعی با استفاده از ویژگی‌هایی از چشم مثل ناحیه سفید آن، عدم استفاده از شبکه‌های عصبی و بی‌نیاز بودن آن از تعلیم است. روش مورد استفاده در این تحقیق استفاده از تطبیق سلسله مراتبی الگو با تابع همبستگی بهنجار وزن‌دار به منظور تشخیص و تعقیب ویژگی‌های مورد نظر در تصویر است.

کلیدواژگان: تعقیب اجزای چهره در تصویر، تعقیب مسیر نگاه، تطبیق الگو در تصویر.

\*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، خیابان حافظ، روبروی سمیه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی پزشکی، کدپستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

تلفن: ۰۲۱-۶۴۵۴۲۴۹۸، دورنگار: ۰۲۱-۶۴۵۴۲۴۹۸، پیام‌نگار: Nasiraei@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

امروزه روش‌های مختلف پردازش تصویر به ابزاری قدرتمند بمنظور کمک به زندگی انسان تبدیل شده است. استفاده از چشم انسان به عنوان واسطه انسان و کامپیوتر یکی از این کاربردها است. بسیاری از افراد ناتوان حرکتی به دلایلی نظیر بیماری‌های عصبی-عضلانی قادر به کنترل اندامهای خود و استفاده از آنها نیستند. در مورد این افراد، نگرستن تنها راه ارتباط با دنیای خارج محسوب می‌شود. حدود بیست سال است که تعقیب مسیر نگاه برای کاربردهای توانبخشی و ایجاد ارتباط بین انسان و ماشین<sup>۱</sup> (HCI) مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱]. برای رسیدن به این هدف تلاش‌های گوناگونی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های نوری، استفاده از سیگنال چشم<sup>۲</sup> (EOG)، روش‌های پردازش تصویر و... اشاره کرد. در روش نوری، پرتو نوری به چشم فرد تابانده می‌شود و جهت نگاه فرد از نور بازتابیده تعیین می‌شود [۲]. این روش در عین سادگی معایبی را همچون مشکل بودن پردازش، حساسیت به نور محیط، عدم کارایی در صورت استفاده شخص از عینک و... دارد. اکثر سیستم‌های تعقیب نگاه از فناوری مبتنی بر تابش نور مادون قرمز به چشم فرد استفاده می‌کنند [۳]. اگر چه استفاده از تکنولوژی مادون قرمز مزایایی دارد، در نور آفتاب و به طور کلی در محیط‌هایی که منبع مادون قرمز خارجی وجود دارد، دقت این سیستم‌ها کاهش می‌یابد و این مهم‌ترین مشکل آنهاست. بهترین شرایط عملکردی این سیستم‌ها، در نور فلورسنت و به دور از هرگونه منبع مادون قرمز دیگر است.

روش دیگر برای تعقیب حرکت چشم، استفاده از سیگنال EOG است [۴]. این روش به دلیل تماس مستقیم با کاربر، ممکن است برای او مشکل ساز باشد، اما دقت قابل ملاحظه‌ای دارد و در مطالعات روانشناختی، سنجش میزان توجه و هوشیاری به کار می‌رود. این روش به دلیل دشواری استفاده از آن، توصیه نمی‌شود. روش دیگری که در این پژوهش نیز مطرح می‌شود،

کاربرد پردازش تصویر برای یافتن جهت نگاه شخص و استخراج اطلاعات از چشم فرد در نور مرئی و با تصاویر عادی است. استفاده از این فناوری ارزان قیمت و غیر تهاجمی، محتاج الگوریتم‌های پیچیده در مواجهه با محدودیت‌های زمان واقعی بودن سیستم است. برای تشخیص محل اجزای چهره با روش‌های پردازش تصویر رویکردهای مختلفی وجود دارد. روش‌های تشخیص چشم‌ها و اجزای چهره را بر اساس اطلاعات تصویری می‌توان به روش‌های مبتنی بر اطلاعات روشنایی و مفهوم بافت گونه [۵]، روش‌های مبتنی بر اطلاعات رنگ [۶]، روش‌های مبتنی بر اطلاعات لبه و گرادیان [۷]، روش‌های تطبیق الگو [۸، ۱] و روش‌های مبتنی بر حرکت [۹] طبقه‌بندی کرد. در میان این روش‌ها، تطبیق الگو روشی مؤثر و ساده برای یافتن ویژگی‌های مورد نظر در تصویر است. این روش دارای زمان محاسباتی نسبتاً زیاد است، ولی با اعمال ترفندهایی می‌توان این زمان را کم کرد و از آن در کاربردهای زمان واقعی استفاده کرد. در این روش الگویی از ویژگی مورد نظر تهیه شده؛ در تصویر بهترین انطباق بین الگو و تصویر یافت می‌شود. هر قسمتی از تصویر که دارای بیشترین مشابهت بین الگو و تصویر باشد، محل ویژگی مورد نظر در تصویر است. از روش‌های مختلفی مثل استفاده از کمینه کردن خطا، استفاده از ضرایب همبستگی و الگوهای تغییر شکل پذیر می‌توان این میزان مشابهت را اندازه‌گیری کرد. به طور مثال در روش تطبیق الگو، با استفاده از تابع انرژی و الگوهای تغییر شکل پذیر، ویژگی مورد نظر به صورت الگویی پارامتری تعریف می‌شود. در مرجع [۸] ویژگی‌هایی از چهره مثل چشم‌ها و دهان با استفاده از تطبیق الگوهای تغییر پذیر استخراج و تعقیب شده‌اند. در این روش، یک تابع انرژی به نحوی تعریف می‌شود که ویژگی‌هایی از تصویر را مثل لبه‌ها، دره‌ها و قله‌ها در شدت روشنایی به پارامترهای الگو مرتبط می‌کند. تابع انرژی کل به صورت مجموع توابع انرژی مربوط به لبه‌ها، دره‌ها و قله‌ها در

<sup>۱</sup>Human Computer Interface<sup>۲</sup>Electrooculography

پارامترها، نگاشتی از مسیر نگاه فرد به صفحه نمایش انجام می‌شود. در واقع با این نگاشت مشخص می‌شود که نگاه فرد در هر لحظه متناظر با کدام کلید صفحه نمایش است.

نشانگر رایانه در صفحه نمایش با توجه به این که فرد به کدام کلید نگاه می‌کند بر روی کلیدها جابه‌جا می‌شود. در این حالت نگاه کاربر به یک نقطه خاص برای مدت زمان معینی به معنای انتخاب کلید متناظر با آن موقعیت در صفحه نمایش است و دستور متناظر با آن کلید در رایانه انجام می‌شود. این حالت می‌تواند با بستن چشم برای مدت زمان معین نیز اعمال شود. در سامانه پیشنهادی بسته شدن ارادی چشم از چشمک زدن طبیعی چشم قابل تفکیک است. طرح صفحه کلید به صورت سلسله مراتبی است و انواع متنوعی از دستورات را شامل می‌شود؛ به طوری که با انتخاب یک کلید توسط کاربر، کلیدهای دیگری با اندازه بزرگتر و دستورات مرتبط با آن کلید ظاهر می‌شود.

شناسایی و تشخیص چهره و اجزای آن در تصویر یکی از مراحل ابتدایی در تمام سیستم‌های تعقیب‌گر مسیر نگاه محسوب می‌شود. در این پژوهش از انطباق الگوهای سلسله مراتبی جهت استخراج و تعقیب چهره، چشم و برخی اجزای آن استفاده شده است. در این روش الگویی از ویژگی مورد نظر در تصویر تهیه می‌شود و مختصاتی از تصویر که بیشترین مشابهت را به الگوی مورد نظر داشته باشد مورد جستجو قرار می‌گیرد. همان طور که گفته شد، بمنظور انتخاب معیاری برای سنجش مشابهت الگوی مورد نظر و تصویر، در این تحقیق از تابع همبستگی استفاده شده است. در واقع مبنای استفاده از ضرایب همبستگی در تطبیق الگو را می‌توان بر اساس مجذور فاصله اقلیدسی دانست. مجذور فاصله اقلیدسی بین تصویر  $f$  و الگوی  $t$  با رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$d_{f,t}^2(u,v) = \sum_{x,y} [f(x,y) - t(x-u, y-v)]^2 \quad (1)$$

شدت روشنایی تعریف می‌شود که هر کدام از این توابع انرژی تعریف مشخصی دارند. الگوی پارامتری در ارتباط با تصویر مورد نظر، طوری پارامترهایش را تغییر می‌دهد و تغییر شکل پیدا می‌کند که تابع انرژی حداقل شده؛ بهترین انطباق ایجاد شود.

در این تحقیق از تابع همبستگی به عنوان معیار مشابهت استفاده شده است که در بخش بعد شرح داده خواهد شد. هدف این مقاله ارائه روشی بمنظور تعقیب حرکت‌های چشم کاربر در هنگام کار با رایانه است؛ طراحی سیستمی که در عین سادگی و ارزان بودن از سرعت و دقت قابل قبول جهت کار با رایانه برخوردار باشد. از ویژگی‌های بارز این سامانه- که در مطالعات انجام شده گذشته دیده نشده است- تشخیص مسیر نگاه به صورت زمان واقعی بدون استفاده از هرگونه سخت‌افزار اضافی و نور مادون قرمز و تنها با استفاده از دوربین‌هایی است که بطور معمول در رایانه‌های همراه تعبیه شده است. الگوریتم ارائه شده از ویژگی‌هایی از چشم همچون ناحیه سفیدی چشم استفاده می‌کند و از شبکه‌های عصبی و تعلیم بی‌نیاز است.

## ۲- روش

سیستم تعقیب مسیر نگاه معرفی شده در این پژوهش شامل دو قسمت اصلی است: ۱- استخراج‌کننده و تعقیب‌گر چهره و چشم و نقاط مشخصه مربوط به آن. ۲- تحلیل‌گر تصاویر چشم بمنظور ایجاد نگاشت بین حرکات چشم و مختصات مورد نظر روی نمایشگر و تخمین مسیر نگاه. روش کار بدین نحو است که ابتدا کاربر در مقابل یک صفحه نمایش قرار می‌گیرد و در این وضعیت یک دوربین ویدئویی از وضعیت سرکاربر تصویربرداری می‌کند. دنباله ویدئویی به صورت زمان واقعی پردازش می‌شود و در هر قاب از ویدئو، پارامترهایی استخراج می‌شوند که مشخص‌کننده مسیر نگاه کاربر است. این پارامترها شامل مختصات مرکز عنق، گوشه‌های چشم، پلکها و همچنین میزان سفیدی چشم است. از ویژگی‌های استخراج شده در این مرحله برای تشخیص مسیر نگاه استفاده می‌شود. با این

تصویر برای انطباق الگو و ویژگی مورد نظر را از بین ببرد؛ لذا استفاده از فیلتر، چندان مناسب به نظر نمی‌رسد. با هنجارسازی الگو و تصویر به یک اندازه واحد، با استفاده از رابطه زیر، مشکل تغییرات انرژی در تصویر حل می‌شود:

$$B(U,V) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x-u, y-v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0.5}} \quad (\xi)$$

در این رابطه،  $t$  میانگین الگو و  $\bar{f}_{u,v}$  متوسط  $f(x,y)$  در ناحیه‌ای از تصویر است که الگو روی آن قرار دارد. با توجه به مطالب گفته شده در بالا، در این تحقیق از ضرایب همبستگی به صورت بهنجار به عنوان معیار سنجش مشابهت استفاده شده است. علت استفاده از ضرایب بهنجار، نامتغیر بودن و پایداری نسبی آن به تغییرات یکنواخت روشنایی است. نکته بسیار مهم در روش تطبیق الگو، انتخاب الگوی مناسب از نظر ساختار و اندازه است. الگوی انتخاب شده باید به خوبی نشان‌دهنده ویژگی مورد تعقیب در تصویر (مثلاً چهره) باشد. یک الگوی مناسب باید شامل مرزها، خط یا شکل خاص و تغییرات روشنایی در شیء مورد جستجو باشد. به عبارت دیگر کارایی سیستم تعقیب‌گر در روش انطباق الگو با پیچیدگی و ساختار الگوی مورد نظر رابطه مستقیم دارد.

انتخاب اندازه مناسب برای الگوی مورد نظر نیز امری مهم در روش تطبیق الگو به شمار می‌رود. هر قدر الگوی تهیه شده برای شناسایی و تعقیب یک ویژگی در تصویر بزرگتر باشد؛ از آنجایی که با بزرگ شدن آن جزئیات بیشتری مثل تغییرات روشنایی، لبه‌ها و ... در آن وجود خواهد داشت، دقت تشخیص بیشتر خواهد بود. از طرفی بزرگتر شدن الگو در روش مورد استفاده نیازمند محاسبه تعداد بیشتری از ضرایب همبستگی بهنجار است که این زمان محاسبات را افزایش می‌دهد و برای کاربرد مورد نظر، یعنی تعقیب زمان واقعی تصاویر گرفته شده از

در این رابطه، مجموع بر روی  $x$  و  $y$  در پنجره‌ای شامل ویژگی مورد نظر در مختصات  $(u,v)$  گرفته می‌شود. با بسط رابطه (۱) داریم:

$$d_{f,t}^2(u,v) = \sum_{x,y} [f^2(x,y) - 2f(x,y)t(x-u, y-v) + t^2(x-u, y-v)] \quad (۲)$$

مؤلفه  $\sum t^2(x-u, y-v)$  ثابت است. حال اگر مؤلفه  $\sum f^2(x,y)$  را نیز تقریباً ثابت در نظر بگیریم، آنگاه مؤلفه باقی‌مانده تعریف تابع همبستگی است:

$$c(u,v) = \sum_{x,y} f(x,y)t(x-u, y-v) \quad (۳)$$

تابع همبستگی می‌تواند به عنوان معیاری از مشابهت تصویر و ویژگی مورد جستجو در تصویر به کار گرفته شود. در این جا نکته قابل توجه این است که اگر مؤلفه انرژی تصویر  $(\sum f^2(x,y))$  ثابت نباشد، ممکن است در استفاده از تابع همبستگی به عنوان معیاری از مشابهت تصویر و ویژگی مورد جستجو در تصویر، خطا ایجاد شود. به عنوان مثال ممکن است همبستگی بین الگو و ناحیه ویژگی مورد نظر در تصویر از همبستگی بین الگو و یک نقطه روشن کمتر شود. اشکال دیگری که در استفاده از تابع همبستگی در روش تطبیق الگو وجود دارد این است که محدوده تغییرات  $C(u,v)$  مستقل از دامنه<sup>۳</sup> الگو و تصویر است.

این تغییرات در انرژی تصویر را می‌توان با استفاده از فیلتری بالاگذر قبل از انجام عمل همبستگی حذف کرد. در این حالت انتخاب فرکانس قطع مناسب مسأله مهم و دشواری است. انتخاب فرکانس قطع کم، می‌تواند مقدار زیادی از تغییرات انرژی تصویر را بدون تغییر باقی بگذارد. همچنین انتخاب فرکانس قطع زیاد و نامناسب ممکن است اطلاعات مفید در

<sup>3</sup>Amplitude

ماتریس ضرایب اختصاص داریم. این کار با ضرب کردن یک ماتریس وزن در ماتریس ضرایب همبستگی انجام شد.

برای در نظر گرفتن حرکت‌های سر در طول عملیات تعقیب در جهات مختلف و در نتیجه تغییرات احتمالی اندیس‌ها در ماتریس ضرایب، وزندهی را برای اندیس‌های کناری مؤلفه مورد نظر نیز انجام دادیم.

محاسبه ضرایب همبستگی یک عملیات زمان‌بر محسوب می‌شود و در کاربردهای زمان واقعی باید این موضوع در نظر گرفته شود. از آنجایی که کاهش اندازه ناحیه جستجو گامی مؤثر در افزایش دقت و سرعت به شمار می‌رود، این کاهش اندازه به دو صورت در تحقیق حاضر انجام شد. در راهکار نخست، ابتدا ناحیه چهره به روشی ساده و سریع در کل تصویر برداشت شده با دوربین، تشخیص داده شد. همان‌طور که گفته شد، الگویی مناسب از تصویر چهره کاربر تهیه شد و با محاسبه ضرایب همبستگی بین تصویر چهره فرد (الگو) و تصویر برداشت شده با دوربین محل چهره فرد در تصویر با توجه به بیشینه ضریب همبستگی پیدا شد. سپس این ناحیه از تصویر - که از نظر اندازه تقریباً ۱۱٪ کل تصویر است - از تصویر جدا و جستجوهای بعدی برای یافتن نواحی چشم فقط به این ناحیه کوچک از تصویر محدود شد. این موضوع برای یافتن سایر ویژگی‌ها به طور سلسله‌مراتبی تکرار شد. برای مثال، در مورد چشم‌ها، پس از این که تصویر هر چشم به عنوان الگو برای همان چشم استفاده شد و با محاسبه ضرایب همبستگی محل چشم‌ها یافت شد. تصویر چشم‌ها از تصویر چهره جدا شد و به همین ترتیب، جستجو برای یافتن گوشه‌های چشم فقط در تصویر ناحیه چشم - که ناحیه‌ای به اندازه ۱٪ کل تصویر اصلی است - انجام شد. بدین سان در هر مرحله ناحیه جستجو کاهش می‌یافت. با توجه به اهمیت اندازه ناحیه جستجو، تصویر اولیه گرفته شده از دوربین نیز در حداقل اندازه (۲۴۰ × ۳۲۰ پیکسل) تهیه می‌شد. گرچه کوچک بودن تصویر، کار را برای تشخیص نواحی مختلف در تصویر چشم سخت می‌کند، در افزایش

دوربین، مناسب نیست. لذا باید انتخاب اندازه الگوی مورد نظر به گونه‌ای انجام شود که مصالحه‌ای بین دقت و سرعت تعقیب برقرار باشد [۱۰].

نکته دیگر در انتخاب الگو، استفاده از الگوهای اختصاصی یا عمومی است. در الگوهای اختصاصی، مثلاً برای تشخیص ناحیه چهره در تصویر، از تصویر همان شخص (کاربر) به عنوان الگو استفاده می‌شود. الگوهای عمومی از حذف ویژگی‌های اختصاصی الگوهای اختصاصی افراد بدست می‌آیند. در این تحقیق از الگوی اختصاصی برای تشخیص چهره استفاده شده است. استفاده از الگوی اختصاصی، تشخیص چهره را با دقت زیادی انجام می‌دهد. استفاده از الگوهای اختصاصی با اندازه و ساختار مناسب در پایداری این روش نسبت به حرکت‌های سریع سر به اطراف و تغییرات یکنواخت نور محیط، مؤثر است. همچنین انتظار می‌رود که این روش در مقایسه با روش‌هایی که از اطلاعات رنگ برای تشخیص چهره استفاده می‌کنند، نسبت به تغییرات پس‌زمینه پایداری بیشتری داشته باشد و لزوم یکنواخت بودن یا سفید بودن پس‌زمینه تصویر در این روش از بین برود.

در این مقاله از تخصیص مجموعه‌ای از وزن‌ها برای ضرایب همبستگی بمنظور افزایش دقت تعقیب ویژگی‌های مورد نظر استفاده شد. این وزن‌ها متناسب با سابقه محل چهره در قاب‌های پیشین تصویر بود. توزیع مکانی احتمال حضور شیء مورد نظر را وارد محاسبات کرد. روش وزن‌دار کردن ضرایب همبستگی بهنجار بدین نحو بود که وقتی محل چهره در قاب‌های تصویر با انتخاب اندیس بیشترین مقدار ضریب همبستگی مشخص شد، با در نظر گرفتن چند قاب متوالی تصویر اندیس‌های بیشینه مربوط به محل چهره در ماتریس ضرایب همبستگی آنها مشخص شدند. بدین ترتیب محل چهره در قاب تصاویر گذشته بدست آمد، لذا به ضرایب همبستگی مربوط به اندیس‌های متناظر با این مکان ضرایب بیشتری در مقایسه با سایر مؤلفه‌های

چشم و نیز مختصات فرارگیری هر کدام از نواحی سفید در چشم تعیین شده؛ برای تعیین مسیر نگاه فرد در راستای افقی استفاده شد. با توجه به اینکه سفیدی در سمت چپ و راست تصویر چشم و در محدوده مختصات معینی قرار می‌گیرند، بقیه مرزهای بسته موجود در تصویر حذف، و فقط دو ناحیه در مختصات مورد نظر به عنوان سفیدی چشم جدا شدند.

وضعیت گوشه‌های چشم، نمادی از وضعیت سر تلقی می‌شود و به کمک آنها میزان و نحوه حرکت سر نسبت به محور دوربین برآورد می‌شود. گوشه‌های چشم نقاطی هستند که تغییرات شدت و جهت لبه (گرادیان) در آنها شدید است. در این پژوهش برای تشخیص و تعقیب گوشه‌های چشم از سه رویکرد مختلف استفاده شده است. این روش‌ها عبارت‌اند از: گوشه‌یابی هریس<sup>۴</sup>، مقدار ویژه کمینه<sup>۵</sup> و تطبیق الگو در تصویر چشم. در هر سه روش یک ماتریس سنجش گوشه<sup>۶</sup> برای تصویر بدست می‌آید و پیکسل‌هایی که بزرگترین مقدار معیار سنجش گوشه را در این ماتریس دارند به عنوان گوشه در تصویر معرفی می‌شوند. در سیستم‌های تعقیب‌گر مسیر نگاه مبتنی بر ویدئو - که از نور مرئی برای این کار استفاده می‌کنند - یکی از رایج‌ترین راه‌های تشخیص مسیر نگاه شناسایی عنبیه به جای مردمک و تطبیق یک بیضی یا دایره به مرز آن با استفاده از تبدیل هاف است. از آنجایی که ثابت فرض کردن شعاع عنبیه در این روش، فرض کاملاً درستی نیست و با تغییر فاصله چهره از دوربین این مقدار تغییر می‌کند و نیز به علت کیفیت پایین و اندازه کوچک تصویر چشم، این روش با خطاهای بسیاری همراه است. برای حل این مشکل و افزایش دقت سیستم از تطبیق الگو برای شناسایی عنبیه نیز در کنار این روش استفاده شد و تنها زمانی مختصات مورد نظر به عنوان مرکز عنبیه معرفی شد که هر دو روش، مقداری مشابه یا با اختلاف اندک با یکدیگر را به عنوان مرکز عنبیه اعلام کردند.

سرعت سیستم تأثیر بسزایی دارد. راهکار اندیشیده شده دوم بمنظور افزایش سرعت سیستم تعقیب‌گر استفاده از اطلاعات ساختاری چهره است. بدین صورت که وقتی تصویر چهره از تصویر اولیه جدا شد، برای تعقیب و شناسایی چشم‌ها می‌توان چنین در نظر گرفت که چشم‌ها در تصویر چهره مطمئناً در نیمه بالایی تصویر صورت قرار دارند. مثلاً برای شناسایی چشم چپ، مشخص است که تنها در یک چهارم بالا و راست باید جستجو را انجام داد. بدین ترتیب با کاهش اندازه ناحیه جستجو به ترتیب سلسله مراتبی هم سرعت و هم دقت سیستم افزایش چشمگیری خواهد داشت.

## ۲-۱- استخراج ویژگی‌های چشم

پس از شناسایی چشم‌ها در تصویر، این ناحیه از کل تصویر جدا و جستجوهای بعدی برای استخراج ویژگی‌های چشم مثل سفیدی چشم‌ها، گوشه‌های چشم، عنبیه و پلک‌ها به همین ناحیه کوچک از تصویر محدود می‌شود. ناحیه سفید رنگ موجود در چشم - که صلبیه نام دارد - در هر تصویر چشم می‌تواند با عددی بین صفر و یک تعیین شود که نسبت سفیدی یک طرف را به کل سفیدی آن چشم تعیین می‌کند. (رابطه ۵). با توجه به اختلاف شدت روشنایی در این ناحیه از چشم با سایر قسمت‌های آن، از این ویژگی برای تشخیص صلبیه در چشم استفاده شد. قبل از انجام هرگونه عملیات بر تصویر چشم، به منظور افزایش تمایز سطوح روشن و تیره در تصویر، یک عملیات افزایش تمایز بر روی تصویر چشم انجام شد. سپس این تصویر با یک آستانه‌گذاری به تصویر باینری تبدیل شد. بعد از باینری کردن تصویر با مجموعه‌ای از عملیات مورفولوژیک مانند گشودن و بستن، ناپیوستگی‌های موجود در برخی نواحی پر شده؛ پیکسل‌های اضافی منفرد نواحی غیر مربوط دیگر حذف شدند. با قسمت‌بندی تصویر، مرز نواحی بسته مشخص، و تعداد پیکسل‌های درون این نواحی شمرده شد. در هر قاب تصویر، تعداد پیکسل‌های نواحی مربوط به سفیدی چپ و راست هر

<sup>4</sup>Harris corner detection

<sup>5</sup>Minimum Eigen value method

<sup>6</sup>Coner metric matrix

قرمز به چشم کاربر و استفاده از ویژگی شفافیت سطح کره چشم، نقاط روشنی روی تصاویر ایجاد می‌شود که حاصل از بازتاب نور در قرنیه هستند<sup>۸</sup>. اگر این منابع روی نقاط ثابتی نصب و وضعیت سر نسبت به آنها ثابت فرض شود، موقعیت نسبی مرکز مردمک نسبت به این نقاط می‌تواند معیاری از تغییر مسیر نگاه باشد.

در روش‌های تعقیب مسیر نگاه که تنها از نور مرئی و دوربین‌های ساده استفاده می‌شود، استفاده از نقاط مشخصه معین در تصویر صورت و موقعیت این نقاط نسبت به هم رایج‌تر است. برای مثال وضعیت گوشه‌های چشم، می‌تواند نمادی از وضعیت سر تلقی شود و می‌توان به کمک آنها برآوردی از میزان و نحوه حرکت سر نسبت به محور دوربین به دست آورد و از آن در تخمین مسیر نگاه استفاده کرد. روش اجرا شده در این پژوهش، که از نقاط مشخصه به دست آمده از تصویر صورت برای تخمین مسیر نگاه استفاده می‌کند؛ در این بخش معرفی می‌شود.

تخمین مسیر نگاه در دو راستای افقی و عمودی انجام شد. در تخمین مسیر نگاه در راستای افقی از دو ویژگی مختلف استفاده شد:

۱- استفاده از تغییرات سفیدی چشم در تعقیب مسیر نگاه

۲- استفاده از مرکز عنبیه در تشخیص مسیر نگاه

در مورد استفاده از تغییرات سفیدی چشم، بمنظور داشتن معیاری کمی از تغییرات صلبیه و استفاده از آن برای یافتن مسیر نگاه، متغیر  $\alpha$  را به صورت زیر تعریف کردیم:

$$\alpha = \frac{A(L)}{A(L) + A(R)} \quad (5)$$

$A(L)$  و  $A(R)$  به صورت تعداد پیکسل‌های سفید موجود در

نواحی نشان داده شده در شکل (۱) تعریف می‌شوند.

در سیستم تعقیب مسیر نگاه پیاده سازی شده، دو نوع حرکت بسته شدن چشم در نظر گرفته شد. این دو نوع حرکت شامل پلک‌زدن‌های عادی چشم<sup>۷</sup> و بستن‌های طولانی مدت ارادی چشم به منظور اجرای دستوری خاص مثل کلیک کردن و ... بود. بمنظور تشخیص بسته بودن چشم، ماتریس ضرایب همبستگی برای الگویی از یک چشم بسته و تصویر چشم محاسبه شد. در این مورد به جای استفاده از اندیس مورد نظر در این ماتریس به دنبال مقادیر موجود در آن ماتریس بودیم. وقتی چشم فرد بسته می‌شود، در مختصاتی از ماتریس ضرایب همبستگی، مقدار ضریب همبستگی به واسطه افزایش مشابهت بین الگوی چشم بسته و تصویر چشم افزایش می‌یابد. لذا با تعریف آستانه مشخصی برای مقدار ضریب همبستگی، بسته بودن چشم تشخیص داده شد. تفکیک انواع بسته‌بودن‌های چشم با استفاده از مدت زمان بسته بودن آن با شمارنده‌ای در حالت‌های مختلف انجام شد. بدین طریق با بستن چشم به مدت‌های  $T1$ ,  $T2$  و ... مدهای مختلفی مثل کلیک کردن، رفتن به مد اصلاح، راه‌اندازی مجدد سامانه تعقیب‌گر در صورت ایجاد خطا و ... برای سامانه تعقیب‌گر مسیر نگاه تعریف شد.

## ۲-۲- تشخیص مسیر نگاه با استفاده از ویژگی‌های

### استخراج شده از تصویر

بعد از استخراج چهره و چشم‌ها و ویژگی‌های آن از جمله صلبیه، مرکز مردمک و عنبیه، پلک‌ها و گوشه‌های چشم مسأله مهم بعدی ایجاد نگاشتی مناسب از این اطلاعات به صفحه نمایش و تخمین مسیر نگاه است. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، روش‌های پردازشی به کار رفته به شدت تحت تأثیر سخت‌افزار و ویژگی‌های تصاویر ورودی قرار دارند. به عنوان مثال در سیستم‌هایی که از منابع مادون قرمز برای ایجاد نقاط مبنا روی سطح کره چشم استفاده می‌شود، روش محاسبه این نگاشت بسیار متفاوت از سیستم‌هایی است که در نور مرئی و با تهیه تصویر از کل چهره فرد کار می‌کنند. در روش‌های مبتنی بر استفاده از نور مادون قرمز با تاباندن یک (یا چند) منبع مادون

<sup>7</sup>Blinking

<sup>8</sup>Glint

### ۳- نتایج

برای مقایسه نتایجی که در ادامه بیان می‌شوند با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران، بیان شرایط لازم و ویژگی‌های سخت‌افزاری سیستم تعقیب‌گر طراحی شده در این تحقیق، ضروری به نظر می‌رسد. سیستم تعقیب مسیر نگاهی که در این پژوهش طراحی و اجرا شد، احتیاج به هیچ گونه وسیله اضافی یا شرایط نورپردازی خاص به غیر از یک رایانه و یک دوربین که بر روی آن تعبیه شده باشد؛ نداشت و پایگاه داده تصاویر زمان واقعی برداشت شده از دوربین با آهنگ ۳۰ قاب در ثانیه بود. رایانه مورد استفاده برای پیاده‌سازی دارای 2GB حافظه رم و پردازنده *Dual core CPU 2GHZ* بود و سیستم با نرم افزار (*R2009a*) *MATLAB7.8.0* و در محیط *Simulink* اجرا شد. نمایشگر مورد استفاده نیز ۱۷ اینچی و با ابعاد ۲۱ در ۳۶ سانتی متر بود.

دوربین مورد استفاده، مدل *Sony Visual Communication Camera* بود که با فاصله یک سانتی‌متر در بالای صفحه نمایشگر نصب شده بود. ابعاد و کیفیت تصویر برداشت شده از دوربین *320x240 VGA* بود. با این اندازه کوچک، تشخیص بسیاری از جزئیات در تصویر با دشواری‌هایی همراه بوده؛ نیازمند پردازش‌های دقیق‌تر است. برخلاف بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در زمینه تعقیب چهره و مسیر نگاه، در روش پیشنهادی ما نیازی به استفاده از پرده سفید یا پس زمینه ساده در تصاویر دوربین نبود. در جدول (۱) ویژگی‌ها و مشخصات سامانه تعقیب‌گر چهره و اجزای آن چشم آورده شده است. در شکل (۲) نمونه‌ای از پایداری روش تعقیب اجزای چهره نسبت به کجی سر و تغییر فاصله کاربر تا نمایشگر و تغییر پس زمینه، نشان داده شده است. یادآوری این نکته ضروری است که حرکت‌ها و کج شدن‌های سر در قسمت تعقیب‌گر سر و چشم مجاز است. برای تعقیب مسیر نگاه فرد، سر بایستی به صورت ثابت و در فاصله ۶۰ سانتی‌متری جلوی دوربین قرار می‌گرفت.



شکل (۱) - تعریف A(R) و A(L)

با توجه به رابطه (۵) در پیدا کردن تصاویر چشم فقط به ناحیه A در این تصاویر نیاز داریم. جزئیات بیشتر در مورد تغییرات متغیر  $\alpha$  و دقت روش در قسمت نتایج آورده شده است. روش دیگری که بمنظور تشخیص مسیر نگاه در راستای افقی اجرا شد، استفاده از مختصات مرکز عنبیه (مردمک) نسبت به گوشه‌های چشم است. در پیاده‌سازی تشخیص مسیر نگاه در جهت عمودی (بالا به پایین نمایشگر) از دو ویژگی مختلف استفاده شده است. روش پیاده‌سازی شده اول استفاده از تعقیب پلک بالا در تشخیص نگاه‌های عمودی است. شکل تقریباً سهمی‌گون پلک‌ها می‌تواند مبنای استخراج اطلاعات مکانی مهم قرار گیرد. پلک‌ها مرزهای افقی هستند که می‌توان اطلاعاتی نظیر موقعیت گوشه‌های چشم و یا میزان باز یا بسته بودن چشم را بر مبنای آنها به دست آورد. پلک بالا در این پژوهش به وسیله تطبیق الگو با استفاده از ضرایب همبستگی بهنجار، شناسایی و تعقیب شد. در اینجا الگوی مورد استفاده، تصویر پلک بالا در هر چشم است. در نگاه به بالا و پایین، پلک بالا به طور جزئی تغییر می‌کند و از همین تغییرات می‌توان به عنوان معیاری از نگاه فرد به بالا و پایین استفاده کرد. البته تعداد حالت‌هایی که از این روش به دست می‌آید، محدود است و در عمل کارایی چندانی ندارد. از طرفی گوشه‌های داخلی و خارجی چشم‌ها با یکدیگر محوری را در راستای افقی تشکیل می‌دهند که چشم چپ را به چشم راست متصل می‌کند. این محور افقی می‌تواند معیاری از نگاه فرد در راستای عمودی باشد.



چشم) صفحه کلیدی با تعداد بیشتری کلید حاصل می‌شود. همان گونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، با وجود مشابه بودن استفاده از گوشه چشم برای راستای عمودی در هر دو حالت، در روش دوم به دلیل پوشانده شدن سفیدی چشم در برخی حالت‌های نگاه در راستای عمودی، دقت کمتری در این راستا وجود دارد.

نکته قابل ذکر دیگر حساسیت روش استفاده از سفیدی چشم به نورپردازی چهره است. اگر نور مستقیمی به ناحیه چشم تابانده شود، به طوری که یکنواختی نور در ناحیه چشم به هم بخورد، تعقیب مسیر نگاه در حالت افقی دچار خطا می‌شود.

جدول (۲) - مقایسه مشخصات در دو روش اجرا شده

خطا	دقت افقی (درجه)	دقت عمودی	تعداد کلیدها (افقی-عمودی)	حساسیت به نور پردازی چهره	روش اول
%۲۰	۶/۸	۴	۵ در ۵	دارد	روش اول
%۱	۱۱/۳	۲/۸	۳ در ۷	ندارد	روش دوم

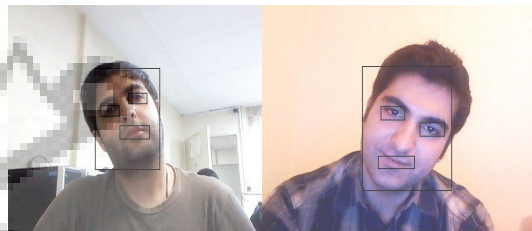
پس از تخمین مسیر نگاه با یکی از دو روش فوق، نشانگر رایانه با الگوریتمی مشخص (بر حسب محل کلید انتخاب شده) به سمت کلید مورد نظر حرکت می‌کند. عملیات انتخاب کلید در این سامانه با دو حالت امکان‌پذیر است: یکی خیره شدن فرد به کلید مورد نظر برای مدت زمانی مشخص و دیگری استفاده از بستن چشم برای مدت زمانی معین (TI). با انتخاب یک کلید، فرمان مربوط به آن کلید اجرا می‌شود.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در جدول زیر مقایسه‌ای بین سیستم تعقیب مسیر نگاه پیاده‌سازی شده در این پژوهش و سیستم‌های مشابه از نظر سرعت، دقت و قیمت انجام شده است (جدول (۳)). همانطور که جدول نشان می‌دهد، سیستم معرفی شده از نظر سرعت و دقت در مقایسه با نمونه‌های مشابه بهبود یافته است. به طور مثال، در منبع [۱۱]، از

جدول (۱) - ویژگی‌ها و مشخصات سامانه تعقیب‌گر چهره و اجزای آن

سرعت تعقیب	۳۰ قاب در ثانیه
حداکثر کجی سر	۲۰ درجه به چپ و راست
حداکثر سرعت حرکت کاربر جلوی دوربین	۰/۴ متر بر ثانیه
فاصله کاربر از مانیتور	۶۰ تا ۸۰ سانتی متر



شکل (۲) - پایداری روش تعقیب چهره و اجزای آن

در مورد یافتن گوشه‌های چشم از بین سه روش اجرا شده، تنها دقت روش تطبیق الگو قابل قبول بود. در مورد تعقیب نگاه در راستای عمودی نیز از نظر کاربرد واقعی و عملی استفاده از روش مبتنی بر گوشه‌های چشم، مناسب‌تر از حالتی است که از حرکات پلک بالا برای تعقیب نگاه در راستای عمودی استفاده شود. در حالت اخیر فرد مجبور می‌شود در برخی حالات چشم خود را به حالتی بیش از حالت عادی باز کند و با کوچکترین تغییر در حالت چشم، محل نشانگر روی صفحه نمایش تغییر می‌کند.

بمنظور تعقیب مسیر نگاه در حالت افقی با استفاده از سفیدی چشم، در حالتی که سر فرد به طور متقارن نسبت به نمایشگر و دوربین قرار دارد؛ از او خواسته شد تا به نقاطی به فاصله ۲ سانتی‌متر از یکدیگر در راستای افقی و از چپ به راست تصویر (۰ تا ۳۲) نگاه کند و مقادیر میانگین  $\alpha$  در این ۱۶ نقطه محاسبه شد. مقادیر لحظه‌ای هر ثانیه بار اندازه‌گیری شد و در بازه‌های ۱۰ ثانیه‌ای میانگین گرفته شدند. به دلیل تغییرات زیاد  $\alpha$ ، ۱۶ ناحیه (برای ۱۶ کلید در راستای افقی) به ۵ ناحیه در راستای افقی کاهش یافت تا خطا در انتخاب کلیدها کم شود. در جدول (۲) دقت و خطاهای مربوط به هر دو روش ذکر شده است. در استفاده از مرکز عنبیه برای راستای افقی (روش دوم) خطای کمتری وجود دارد، ولی در روش اول (استفاده از سفیدی

صورت موازی با سایر برنامه‌های سبک اجرا شود. پیشنهادهایی نیز بمنظور بهبود سیستم طراحی شده، اشاره کرد. از آنجایی که یکی از بزرگترین مشکلات موجود در سیستم حاضر پایین بودن کیفیت تصاویر برداشت شده با دوربین است و در نتیجه با نوعی کمبود اطلاعات در پردازش‌ها روبه‌رو هستیم، لذا استفاده از دوربین‌هایی با کیفیت برتر و تصاویری با اندازه بزرگتر می‌تواند دقت سیستم را افزایش دهد. البته این کار ممکن است باعث کاهش سرعت سیستم شود، ولی با اندیشیدن تدابیری مثل اجرای این برنامه در محیط‌های سریع تر مثل  $C$  می‌توان این کاهش سرعت را جبران کرد. همچنین در این پژوهش حرکات سر کاربر فقط در قسمت تعقیب چهره و اجزای آن مجاز در نظر گرفته شده است و در حالت تعقیب مسیر نگاه، سر فرد تقریباً باید ثابت باشد و فقط حرکت‌های اندک سر مجاز هستند. نکته قابل ذکر دیگر حساسیت روش استفاده از سفیدی چشم به نورپردازی چهره است که اگر نور مستقیمی به ناحیه چشم تابانده شود، به طوری که یکنواختی نور در ناحیه چشم به هم بخورد، تعقیب مسیر نگاه در حالت افقی دچار خطا می‌شود. موارد ذکر شده می‌تواند زمینه‌ای برای پژوهش‌های آینده در زمینه تعقیب مسیر نگاه باشد.

#### ۵- مراجع

- [1] Betke M., Gips J., Fleming P., The Camera Mouse: Visual tracking of body features to provide computer access for people with severe disabilities; IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., 2009; 10(1): 1-10.
- [2] Grauman K., Betke M., Lombardi J., Gips J., Bradski G.R., Communication via eye blinks and eyebrow raises: Video-based human-computer interfaces; Univers. Access Inf. Soc., 2009; 2(4): 359-373.
- [3] Gips J., A computer program based on Rick Hoyt's spelling method for people with profound special needs; in Proc. ICCHP, Karlsruhe, Germany, Jul. 2008: 245-250.
- [4] Schwerdt K., Crowley J.L., Robust face and eye tracking using color; in Proc. 4th IEEE Int. Conf. Autom. Face Gesture Recog., Grenoble, France, Mar. 2008: 90-95.

شبکه‌های عصبی برای نگاشت نقاط مشخصه به صفحه نمایشگر استفاده شده است.

در شرایط آزمایش [۱۱] بیان شده است که برای افزایش سرعت تعقیب بهتر است از پس زمینه سفید استفاده شود. همچنین به یک منبع نور اضافی در مقابل کاربر برای تعقیب چشم نیاز است. از نظر مقایسه شرایط نوری و پس زمینه، سیستم معرفی شده در پژوهش حاضر برتری دارد. نکته قابل توجه دیگر در سیستم مطرح شده در منبع [۱۱]، نیاز به کالیبراسیون وقت‌گیر است؛ زیرا از داده‌های حاصل از کالیبراسیون به عنوان داده تعلیم استفاده می‌شود و لذا افزایش دقت سیستم مستلزم افزایش تعداد داده‌های تعلیم است که این برای کاربر خسته‌کننده است. در سامانه معرفی شده در این تحقیق، نیازی به این نوع کالیبراسیون نیست.

جدول (۳) - مقایسه سامانه معرفی شده در این تحقیق با موارد مشابه

محصول	تجهیزات به کار رفته	دقت افقی	دقت عمودی	تعداد کلیدها	قیمت	نحوه کاربری
سیستم های تجاری معرفی شده در [2]	دوربین های با بزرگنمایی زیاد و نور مادون قرمز	۱ درجه	۱ درجه	۱۰ تا ۴۰ کلید	چند ده هزار دلار	نصب شونده روی سر-زمان واقعی
معرفی شده در [1]	وب کم	۸ درجه	۸ درجه	۱۲ کلید	حدود چند صد دلار	رومیزی- زمان واقعی
معرفی شده در [۱۱]	وب کم	۶/۸	۶/۱۲	۲۰ (۵ کلید افقی و ۴ کلید عمودی)	حدود چند صد دلار	رومیزی- غیر زمان واقعی
در این پژوهش	وب کم	۶/۸	۲/۸	۲۵	حدود چند صد دلار	زمان واقعی

سیستم طراحی شده تعقیب مسیر نگاه در این پژوهش، به صورت عملی و زمان واقعی کار می‌کند. در ضمن اجرای این برنامه در محیط *WINDOWS 7* آزمایش شده است و ظرفیت زیادی از حافظه و پردازنده را مصرف نمی‌کند و می‌توان به

- Video Sequences for Predicting Driver Fatigue; Journal of Communication and Computer, ISSN1548-7709, 2007; 4(1): Serial No. 26.
- [10] Guerrero S.T., Model-Based Eye Detection and Animation; Master Thesis, Department of Electrical Engineering - Image Coding Group, Linköping University, June 2006.
- [11] بیگزاده مریم، پردازش تصویر به منظور تعقیب حرکت چشم برای کمک به افراد ناتوان در اجرای کامپیوتری فرامین؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۸.
- [5] Takami O., Morimoto K., Ochiai T., Ishimatsu T., Computer interface to use head and eyeball movement for handicapped people; in Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man Cybern. Intell. Syst. 21st Century, 1995; 2: 1119-1123.
- [6] Hjelmas E., Low B.K., Eye detection: A survey; Comput. Vis. Image Underst., 2001; 83(3): 236-274.
- [7] Yao Z., Li H., Tracking a detected face with dynamic programming; Image and Vision Computing, 2006; 24: 573-580.
- [8] Smith P., Shah M., Lobo N.V., Monitoring Head/Eye Motion for Driver Alertness with One Camera; Computer Science, University of Central Florida, 1998.
- [9] Feng J., Jin T., Ming-biao L., Gui-ming H., Locating Eye and Nose Features Precisely in IR



انجمن مهندسی پزشکی ایران

## Eye tracking by Image processing for helping disabled people

A. Rahimpour<sup>1</sup>, A. Nasiraei Moghaddam<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>M.S.c, Faculty of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran  
Alirahimpour4280@gmail.com

<sup>2</sup>Assistant Professor, Faculty of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

Nowadays eye gaze tracking has wide range of applications in human computer interaction. One of these applications is using trajectory of eye gaze instead of foot or hand for disabled people to execute some commands. Various methods have been proposed, some of this methods can successfully track the eye gaze. However, they always require specific circumstances, training or are not capable of real-time performance. In this paper, we proposed a framework to track eye gaze in real-time by using a simple and low cost webcam mounted on ordinary laptops. This process widely exploits the weighted normalized correlation function in an adaptive template matching approach. The implemented system tracks the face and also extracts some eye features such as iris position, eye corners and sclera region in eyes, in real time. These features are used in eye gaze estimation. Also the influence of illumination changes, background alterations, different faces and face movements is minimized as much as possible. The implemented gaze tracking system is able to control the motions of mouse cursor and click on an onscreen keyboard in real time.

**Key words:** Eye tracking, Image processing, Template matching, Correlation function

\* Corresponding author

Address: Department of Biomedical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Hafez Avenue, Tehran, Iran 15914  
Tel: +982164542498  
Fax: +982164542498  
E-mail: Nasiraei@aut.ac.ir