



طراحی ، ساخت و ارزیابی یک سیستم ردیاب حرکات چشم با متد تصویری جهت برقراری ارتباط معلولین کوادرپلژیک با کامپیوتر

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مکانیک گرایش بیومکانیک

دیاکو مردانگی

استاد راهنما:

دکتر محمد رضا ملاک زاده

شهریور ۱۳۸۸



قدردانی

بدین وسیله از زحمات استاد راهنما آقای دکتر ملاک زاده برای ارائه راهنمایی‌های ارزنده در طول انجام این پایان‌نامه قدردانی می‌نمایم. همچنین از آقای دکتر پورمحمد از دانشجویان دوره دکتری دانشگاه امیرکبیر جهت راهنمایی‌هایشان در زمینه پردازش تصویر تشکر می‌کنم. به علاوه از آقای رضایی مدیر محترم مجتمع توانبخشی ملائک نیز که امکانات مرکز را بی‌دریغ برای انجام مرحله ارزیابی این کار پژوهشی در اختیار اینجانب قرار دادند صمیمانه تشکر می‌نمایم. در پایان نیز گرامی می‌داریم یاد و خاطره دکتر داغیان که استاد اینجانب در دوره کارشناسی بوده و اندوه مبتلا شدن ایشان به یک بیماری در سالهای آخر عمرشان، انگیزه‌ای شد جهت ساخت این دستگاه در مقطع کارشناسی ارشد.

تأییدی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه/رساله

نام دانشکده:

نام دانشجو:

عنوان پایان‌نامه یا رساله:

تاریخ دفاع:

رشته:

گرایش:

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه‌ی دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما				
۲	استاد راهنما				
۳	استاد مشاور				
۴	استاد مشاور				
۵	استاد مدعو خارجی				
۶	استاد مدعو خارجی				
۷	استاد مدعو داخلی				
۸	استاد مدعو داخلی				

باسمه تعالی

اینجانب به شماره دانشجویی دانشجوی رشته مقطع تحصیلی تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص، اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی)، به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ممنوع است.

استاد راهنما می‌تواند یکی از گزینه‌های بالا را انتخاب کند و مسئولین کتابخانه موظف به رعایت موارد تعیین‌شده می‌باشند.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

چکیده:

اندازه‌گیری و دنبال کردن حرکات چشم از اواخر قرن نوزدهم میلادی ذهن محققین را به خود مشغول ساخته و امروزه با پیشرفت سیستم‌های کامپیوتری این امر بسیار بهتر و دقیق‌تر تحقق یافته است. به گونه‌ای که یک ردیاب چشم کاربردهای فراوانی در زمینه‌های پزشکی، نظامی، HCI، بازاریابی و ... پیدا کرده است. در این گزارش به ساخت یک ردیاب چشم ارزان، بلادرنگ و در عین حال کاربردی اشاره میشود که بر پایه تکنیک تصویری بوده و میتواند توسط افراد سالم و حتی معلول برای ارتباط راحت‌تر با رایانه مورد استفاده قرار گیرد، به گونه‌ای که نشانگر در صفحه همواره در نقطه‌ای که شخص نگاه میکند قرار گرفته و شخص می‌تواند بدون استفاده از دست و تنها با کمک چشم با کامپیوتر ارتباط برقرار نماید. این پروژه شامل سه بخش اصلی می‌باشد: طراحی و ساخت سخت‌افزار سیستم، طراحی نرم‌افزار ردیاب چشم و بخش سوم ارزیابی عملکرد سیستم ساخته شده می‌باشد.

شماره صفحه	فهرست مطالب
۱	۱. مقدمه
۳	۲. ردیابی چشم و روش کار ردیاب چشم ساخته شده
۳	۱.۲ ساختار چشم
۳	۱.۱.۲ کره چشم
۴	۲.۱.۲ عضلات چشم
۵	۳.۱.۲ حرکات چشم
۶	۲.۲ زاویه بینایی
۷	۳.۲ ردیابی چشم
۷	۱.۳.۲ تکنیک های رایج در ردیابی چشم
۸	۲.۳.۲ اندازه گیری به روش الکتریکی
۸	۳.۳.۲ تکنیک های رایج ، بر پایه استفاده از لنز تماسی
۹	۴.۳.۲ تکنیک های تصویری
۱۰	۵.۳.۲ دسته بندی
۱۱	۴.۲ آشنایی بیشتر با ردیاب های چشم تصویری
۱۲	۱.۴.۲ دسته ای از تحقیقات صورت گرفته پیشین در زمینه ردیاب های تصویری
۱۹	۲.۴.۲ متدهای رایج استفاده شده در ردیاب های تصویری
۲۰	۱.۲.۴.۲ ردیابی مرز عنبیه
۲۰	۲.۲.۴.۲ ردیابی مردمک
۲۱	۳.۲.۴.۲ اندازه گیری شکل مردمک
۲۱	۴.۲.۴.۲ بازتاب نور از قرنیه و استفاده از روش شبکه عصبی
۲۲	۵.۲.۴.۲ بازتاب دوگانه قرنیه
۲۲	۶.۲.۴.۲ وضعیت مردمک و بازتاب نور از قرنیه
۲۵	۳.۴.۲ تشخیص و اندازه گیری مشخصات چشم در تصویر
۲۵	۴.۴.۲ پردازش تصویر
۲۸	۵.۴.۲ تشخیص مردمک در تصویر
۲۹	۱.۵.۴.۲ یافتن ناحیه حدودی مردمک در تصویر
۳۰	۲.۵.۴.۲ یافتن مرکز مردمک با متد چهار ضلعی محیطی
۳۱	۱.۲.۵.۴.۲ رفع جابجایی انفرادی خطوط
۳۲	۲.۲.۵.۴.۲ تشخیص تغییرات قطر مردمک و رفع خطای آن در این روش
۳۲	۳.۵.۴.۲ یافتن آرایه ای از نقاط مرزی مردمک
۳۴	۴.۵.۴.۲ برازش به روش مینیمم مجموع مربعات و برازش به روش رانسک
۳۶	۵.۵.۴.۲ یافتن مرکز مردمک با متد برازش دایروی
۳۶	۶.۵.۴.۲ یافتن مرکز مردمک با متد برازش بیضوی
۳۶	۷.۵.۴.۲ یافتن مرکز مردمک با متد میانگین نقاط مرزی

۳۷	۶.۴.۲ تشخیص گلینت در تصویر
۳۷	۱.۶.۴.۲ تشخیص ناحیه حدودی گلینت
۳۷	۲.۶.۴.۲ تعیین مرکز گلینت
۳۸	۷.۴.۲ فیلتر حذف حرکات انفرادی گلینت
۳۹	۸.۴.۲ تشخیص پلک
۳۹	۵.۲ نگاشت و کالیبراسیون
۴۱	۶.۲ پردازش بر روی داده‌های ورودی و خروجی نگاشت
۴۳	۷.۲ تشخیص نقاط مکث و حرکات پرشی چشم
۴۴	۸.۲ کاربردها
۴۵	۱۸.۲ بازاریابی و تبلیغات
۴۶	۲۸.۲ طراحی صفحات وب
۴۶	۳۸.۲ فاکتورهای انسانی و ارگونومی
۴۸	۴۸.۲ وسایل نقلیه
۴۹	۵۸.۲ علوم کامپیوتر
۵۰	۶۸.۲ ورزش
۵۱	۷۸.۲ پزشکی
۵۲	۸۸.۲ الگوهای حرکتی چشم
۵۴	۹.۲ ردیاب‌های چشم تجاری
۵۴	۱۰.۲ کارهای پیشین در زمینه طراحی ردیاب‌های تصویری ارزان قیمت برای ارتباط کاربر با کامپیوتر
۵۶	۳. نرم افزار
۵۶	۱.۳ تحقیقات پیشین در زمینه طراحی ایتترفیس‌های مناسب جهت برقراری ارتباط بهتر با کامپیوتر به کمک چشم
۵۸	۲.۳ نرم افزار سیستم ساخته شده
۶۰	۳.۳ تنظیمات تصویربرداری
۶۲	۴.۳ ردیابی چشم
۶۵	۵.۳ کالیبراسیون
۶۷	۶.۳ حرکت دادن نشانگر با چشم
۶۸	۷.۳ کاربردها
۷۲	۸.۳ ترسیم نمودار
۷۵	۴. سخت افزار
۷۵	۱.۴ دوربین
۷۷	۲.۴ منبع نورانی مادون قرمز
۷۸	۳.۴ نمونه اول ردیاب چشم ساخته شده
۸۱	۴.۴ نمونه دوم ردیاب چشم ساخته شده
۸۴	۵.۴ نمونه سوم ردیاب چشم ساخته شده
۸۵	۶.۴ مقایسه
۸۷	۵. ارزیابی عملکرد بخش‌های مختلف نرم‌افزار (متد ها و الگوریتم ها)
۸۷	۱.۵ ارزیابی و مقایسه کالیبراسیون ۹، ۱۶ و ۲۵ نقطه در رزولوشنهای مختلف

۹۳	۲.۵ مقایسه اجمالی روشهای بکار رفته در ردیابی مرکز مردمک
۹۶	۳.۵ مقایسه عملکرد کلیک به روش زمان مکث با زمانهای مختلف در محیط تایپ
۱۰۱	۴.۵ عملکرد فیلتر "حذف حرکات انفرادی اضلاع چهار ضلعی محیطی مردمک"
۱۰۲	۵.۵ عملکرد فیلتر "جلوگیری از تغییر موقعیت مرکز مردمک در هنگام بزرگ و کوچک شدن مردمک"
۱۰۴	۶.۵ بررسی نگاشت دوجملهای کالیبراسیون
۱۱۰	۷.۵ آنالیز حساسیت نگاشت کالیبراسیون
۱۱۴	۶. ارزیابی عملکرد ردیاب چشم ساخته شده به کمک افراد معلول و سالم
۱۱۴	۱.۶ توصیف معلولیت مورد نظر و دسته بندی آنها
۱۱۵	۲.۶ کارایی سیستم برای هر دسته
۱۱۶	۳.۶ کلیات ارزیابی
۱۱۶	۴.۶ نحوه ارزیابی
۱۱۷	۵.۶ ترتیب مراحل
۱۲۱	۶.۶ نتایج
۱۲۶	۷. نتیجه گیری و جمع بندی
۱۲۸	۸. مراجع

۱ : مقدمه

در سال ۱۸۰۰ میلادی بررسی حرکات چشم بصورت مشاهده مستقیم با چشم شروع شد. در ۱۸۷۹ فردی به نام لوئیس جاوال (Louis Émile Javal) به این نکته اشاره کرد که در مطالعه یک متن، در چشم بجای حرکت نرم یک سری حرکات پرشی تند (Saccades) و نقاط مکث (Fixations) دیده می شود. در همان سالها بود که شخصی به نام هیوی (Huey) با استفاده از روشی کاملاً تهاجمی و با کمک یک لنز تماسی آزمایشاتی جهت اندازه گیری حرکات چشم انجام داد و با این لنز ها به نتایج جالبی رسید. اینکه چشم در هنگام خواندن یک جمله تنها بر روی برخی کلمات مکث می کند [1].

در ۱۸۹۱ یکی از اولین ردیابهای چشم که غیر تهاجمی بودند را ساختند که در آن از ضبط بازتاب نورقرنیه بر روی صفحات حساس به نور استفاده می شد و تنها حرکات افقی چشم تا حدی قابل تشخیص بود. البته با موقعیت ثابت سر [2].

البته در همین سال ها شخص دیگری به نام جورج بوسول (George Buswell) درشیکاگو با روشی مشابه به اندازه گیری غیر مستقیم و نوری حرکات چشم با استفاده از صفحات حساس به نور پرداخت [1].

با ادامه تحقیقات در قرن بیستم میلادی در ۱۹۰۵ سه دانشمند دیگر به نام های Judd, McAllister & Steel از بازتاب نور قرنیه و استفاده از تصاویر متحرک استفاده کرده و حرکات عمودی چشم را هم ردیابی می کردند. در ۱۹۴۷ میلادی پاول فیت (Paul Fitts) مطالعات جالبی با کمک دوربین های آن زمان بر روی حرکات چشم خلبانان در کابین انجام داد که شاید شروعی برای کاربرد های امروزی ردیاب های چشم در صنایع هوانوردی به حساب آید. در ۱۹۴۸: Hartridge و Thompson استفاده از سیستم های غیر نوری که بر روی سر نصب می شدند را دنبال کردند [2].

در ۱۹۶۸ یاربوس (Alfred L. Yarbus) مطالعات زیادی در مورد کاربرد های این سیستم ها انجام داد و کتابی در این زمینه تالیف کرد که هنوز از مطالب آن استفاده های زیادی می شود. تحقیقات یاربوس انگیزه مجددی شد برای ساخت سیستم های دقیقتر [2].

تحقیقات بعد از ۱۹۷۰ بسیار گسترده تر و تخصصی تر شد بگونه ای که تا به امروز ادامه داشته و کاربردهای این تکنولوژی جدید را می توان در زمینه های متنوعی مشاهده کرد. از جمله کاربردهای این تکنولوژی جدید می توان به استفاده از حرکات چشم به منظور ارتباط انسان با کامپیوتر اشاره نمود. اما آنچه که تاکنون مانع از فراگیر شدن استفاده از یک ردیاب حرکات چشم برای تقابل انسان با کامپیوتر، در کنار ابزارهای دیگری چون ماوس و صفحه کلید گشته است محدودیت هایست که هنوز

در این سیستم‌ها شاهد آن هستیم. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به قیمت بالای یک سیستم ردیاب حرکات چشم و دقت عملکرد پایین ردیاب‌های تصویری اشاره نمود. ردیاب‌های تصویری از روش تصویر برداری، برای تعیین نقطه دید شخص استفاده می‌کنند که این روش برای استفاده در کاربرد ذکر شده مناسب‌ترین روش به حساب می‌آید. (توضیحات بیشتر در بخش ۲. ۳. ۵ آمده است).

در این پایان نامه دو هدف دنبال شده است. یکی ارزان‌تر نمودن یک سیستم ردیاب حرکات چشم کارآمد بوده و دیگری کمک به استفاده از آن در ارتباط متقابل فرد معلول با رایانه می‌باشد. دقت کم ردیاب‌های چشم تصویری شاید برای استفاده مستقیم از آن بجای ماوس توسط افراد سالم مفید و مورد پسند واقع نشود، اما همین سیستم بادقت نه چندان بالا، می‌تواند برخی نیازهای اولیه یک معلول کوادریپلژیک را برای ارتباط با محیط فراهم نماید.

ساختار گزارش این پایان نامه که در ادامه از آن پیروی شده است اینگونه است که ابتدا در فصل دوم که بخش اصلی این گزارش را به خود اختصاص می‌دهد، با ردیابی حرکات چشم و روشهای متداول آن آشنا شده و پس از آن بر روی روش تصویری تمرکز نموده و به دسته‌ای از فعالیت‌های پیشین صورت گرفته در رابطه با روش‌های تصویری اشاره می‌شود. بعد از آنکه متدهای کلی تصویری و کارهای صورت گرفته در این زمینه معرفی گردید، روش کار ردیاب ساخته شده و جزئیات مربوط به بخش‌های مختلف آن شرح داده می‌شود. پس از آن به دسته‌ای از کاربردهای این تکنولوژی جدید یعنی ردیابی حرکات چشم اشاره می‌شود، و در پایان با اشاره به قیمت‌های بالای ردیاب‌های چشم کنونی و علل آن، چند نمونه از تحقیقات انجام شده اخیر در باب ساخت ردیاب‌های چشم ارزان قیمت معرفی می‌گردد. در فصل سوم پس از ذکر مقدماتی در باب ایتترفیس‌های مناسب با ردیاب‌های چشم، نرم‌افزار طراحی شده برای ردیاب چشم ساخته شده و قابلیت‌های آن معرفی می‌گردد. در فصل چهارم سخت‌افزار سیستم ساخته شده در این پروژه معرفی می‌گردد و سه نمونه ردیاب ساخته شده مقایسه می‌گردد. در فصل پنجم برخی از متدهای بکار رفته در ردیابی و کالیبراسیون مقایسه عددی شده و عملکرد آنها با هم مقایسه می‌گردد. در فصل ششم به شرح مراحل ارزیابی عملکرد ردیاب چشم ساخته شده بر روی دسته‌ای از معلولین و افراد سالم پرداخته و نتایج آن ارائه می‌گردد. و در فصل پایانی یعنی فصل هفتم به جمع بندی و نتیجه‌گیری می‌پردازیم.

۲ : ردیابی چشم و روش کار ردیاب چشم ساخته شده

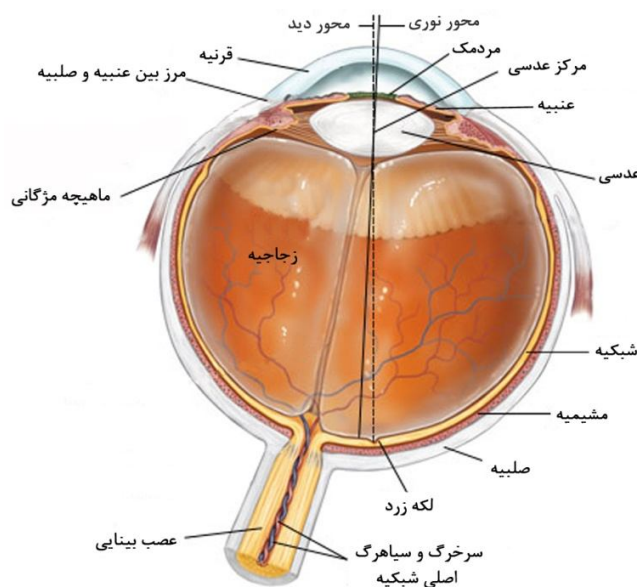
این بخش از پایان‌نامه به ۱۱ قسمت مختلف تقسیم‌بندی شده و طی آن خواننده به ترتیب با چشم، تعاریف اولیه، فرایند ردیابی چشم، انواع ردیاب‌های چشم کنونی و متدهای آنها بالاخص متد استفاده شده در ردیاب چشم منظور آشنا می‌گردد. در پایان نیز به اهمیت فراوان این تکنولوژی و کاربردهای گسترده آن در شاخه‌های مختلف علوم اشاره می‌گردد. در واقع هسته اصلی گزارش پایان‌نامه در باب آشنایی با تکنولوژی ردیابی چشم، نحوه عملکرد سیستم‌های ردیاب چشم و سیستم ساخته شده می‌باشد.

۱.۲ : ساختار چشم

در ذیل، بخش‌ها و حرکات اصلی چشم به صورت مختصر معرفی می‌گردد.

۱.۱.۲ : کره چشم

چشم شکلی تقریباً کروی دارد با شعاع حدودی ۱۲ میلیمتر.



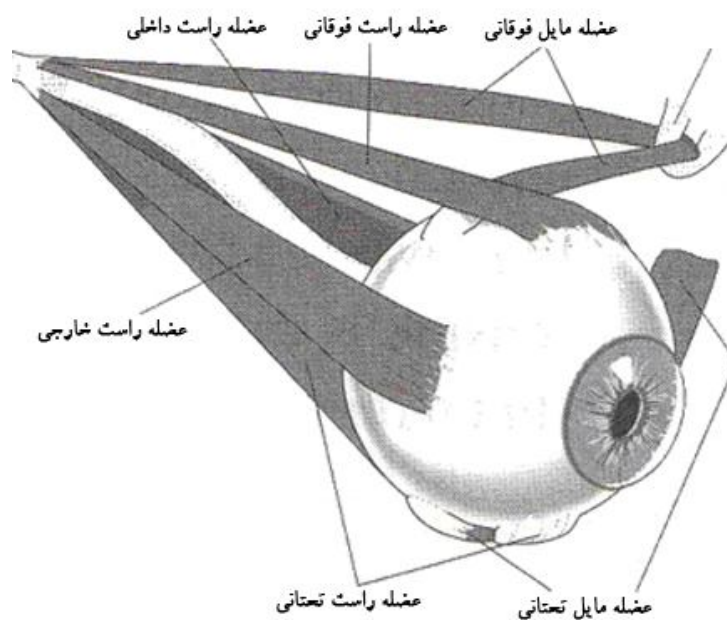
شکل ۱: معرفی اجزای مهم چشم (تصویر اصلی از مرجع [۳] گرفته شده است).

بخش‌های جلویی چشم که از بیرون قابل رؤیت‌اند عبارتند از سفیدی چشم یا صلبیه، عنبیه و مردمک. قرنیه یک لایه شفاف بدون رگ‌های خونی است که جلوی عنبیه را می‌پوشاند و مردمک روزنه کوچک وسط عنبیه است که میزان نور ورودی به چشم را کنترل میکند. در پشت عنبیه عدسی با تحدب

دوطرفه وجود دارد که تحذب آن در طی فرایند انطباق تصویر تغییر می‌کند و باعث می‌شود تصویر فوکوس شده شارپ روی شبکیه بیافتد. شبکیه هم لایه ایست شامل سلول‌های حساس به نور در بخش داخلی پشت چشم. بین عدسی و قرنیه با مایع آبی زلالیه پر شده و فضای بین شبکیه و عدسی هم با مایع شفاف غلیظ‌تر زجاجیه پر شده است. نقطه خاصی در شبکیه وجود دارد به نام لکه زرد که سلول‌های حساس به رنگ مخروطی در آنجا تجمع پیدا کرده‌اند و به درک جزئیات تصویر کمک میکند. این نقطه در امتداد محور نوری چشم که از مرکز کره چشم و مرکز مردمک عبور میکند، قرار ندارد. محور نوری را $line\ of\ gaze\ (LoG)$ یا امتداد تماشا و خیره شدن شخص می‌نامند و خطی که از لکه زرد می‌گذرد را محور دید $line\ of\ sight\ (LoS)$ یا امتداد توجه و دقت شخص گویند. LoS بیانگر نقطه توجه شخص است نه LoG . هرچند که با تعیین هرکدام از این امتدادها می‌توان کار ردیابی نقطه دید چشم را تحقق بخشید.

۲. ۱. ۲ : عضلات چشم

چشم انسان دارای ۶ عضله است که از جهات مختلف به آن متصل شده و حرکات مختلف آن را ممکن می‌سازند (شکل ۲).



شکل ۲: عضلات متصل به چشم

برای خلاصه سازی، نام و اثر هر عضله در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱: عضلات چشم و حرکت ایجادی توسط هر کدام

نام عضله	سطح اتصال عضله	حرکت ایجادی
عضله راست فوقانی	سطح جلویی، فوقانی	به بالا
عضله راست تحتانی	سطح جلویی، تحتانی	به پایین
عضله راست خارجی	سطح جلویی، خارجی	به سمت خارج
عضله راست داخلی	سطح جلویی، داخلی	به سمت داخل
عضله مایل فوقانی	سطح خلفی، فوقانی، خارجی	چرخش افقی به داخل
عضله مایل تحتانی	سطح خلفی، تحتانی، خارجی	چرخش افقی به خارج

۲. ۱. ۳: حرکات چشم

بطور کلی میتوان حرکات چشم را به ۷ دسته تقسیم بندی کرد [4]:

۱. همگرایی (Convergence): دوران دو چشم به سمت همدیگر می باشد. هنگامیکه جسم به چشم نزدیک میشود در صورتی که تطابق چشم به هم نخورد این حرکت رخ میدهد که البته گاهی بصورت ارادی نیز انجام میشود.
۲. غلتش (Rolling): دوران چشم بوده حول محور گذرنده از لکه زرد و مرکز مردمک، که در اثر تغییرات زاویه گردن نسبت به شیء رخ می دهد.
۳. حرکات پرشی یا ساکاید (Saccades): اصلی ترین حرکت چشم برای انتقال نقطه دید از یک نقطه تصویر به نقطه مطلوب بیننده می باشد که بطور معمول در حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی ثانیه انجام می شود. مدت زمانی که چشم مابین دو پرش ساکاید ساکن بوده و عمل ادراک و پردازش مغز در آن مدت صورت می گیرد نقاط مکث یا فیکسیشن (Fixation) نام دارد که بطور معمول در حدود ۲۰۰ تا ۶۰۰ میلی ثانیه می باشد.
۴. دنبال کردن (Pursuit motion): هنگامیکه چشم، شیئی متحرکی را دنبال می کند این حرکت را می بینیم که البته بصورت غیرارادی می باشد.
۵. حرکات غیرارادی (Nystagmus): درواقع نوعی حرکت سریع از نوع بالاست که در اثر یک حرکت آنی سر و یا دنبال کردن یک شیئی متحرک تکراری (مثل دنبال کردن پنجره های یک قطار) در جهت مخالف حرکت انجام می شود و به منظور حفظ نقطه دید قبلی صورت می گیرد.

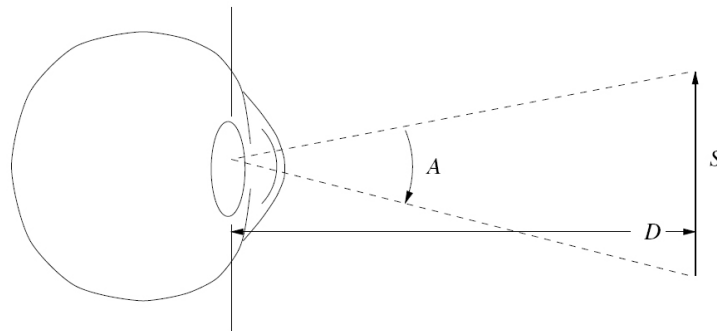
۶. میکروساکید (Drift and microsaccades): حرکات پرشی ریزی است که در بین فیکسیشن‌ها به صورت غیرارادی گاهاً دیده می‌شود.

۷. حرکات غیرارادی طبیعی (Physiological nystagmus): حرکت غیرارادی با فرکانس بالای چشم است برای آنکه تصویر بر روی شبکیه ساکن نباشد. اگر بصورت مصنوعی موقعیت یک تصویر را بر روی ثابت کنید ناپدید می‌شود. بنابراین این حرکت در حدی که بتواند تصویر را میان دو سلول مخروطی لکه زرد جابجا کند هرچند در حد ۰/۱ ثانیه از کمان، برای داشتن تصویر پیوسته در مغز اجتناب ناپذیر است.

اصلی‌ترین حرکت چشم ترکیب ساکید و فیکسیشن است و اکثر الگوهای حرکتی چشم از این دو تشکیل شده است. تمام اطلاعات اصلی گرفته شده از تصویر در طول مدت فیکسیشن صورت می‌گیرد.

۲.۲ : زاویه بینایی^۱

در اینجا لازم است یکی از پارامترهای بینایی که در این پایان نامه از آن استفاده شده است، تعریف شود. زاویه بینایی به صورت رابطه $A = 2 \arctan \frac{S}{2D}$ تعریف می‌گردد، که در این رابطه S طول و یا ارتفاع جسم مورد مشاهده بوده و D فاصله مرکز عدسی تا جسم می‌باشد [5].



شکل ۳ : زاویه بینایی [۵]

برای آنکه درک بهتری نسبت به زاویه بینایی حاصل شود، در جدول ۲ چند مثال آورده شده است:

¹ Visual angle

جدول ۲ : چند مثال از زاویه بینایی (اصل جدول از مرجع [۳] گرفته شده است)

زاویه دید مربوطه	فاصله	جسم
۱/۵ - ۲ درجه	طول دست	ناخن شست
۰/۵ درجه یا ۳۰ دقیقه کمان	-	ماه یا خورشید
۲ درجه	طول دست	سکه ۵۰ ریالی
۱ دقیقه کمان	۸۵ متر	سکه ۵۰ ریالی
۱ ثانیه کمان	۵ کیلومتر	سکه ۵۰ ریالی

۳.۲ : ردیابی چشم^۱

ردیابی چشم به فرایندی گفته می شود که طی آن بتوان حرکات چشم شخص نسبت به سر او را اندازه گیری^۲ نمود و امتداد دید ناظر^۳ را پیدا کرد. وسیله ای را که بتوان با آن به این امر نایل آمد، ردیاب چشم^۴ گویند [1].

در ذیل ابتدا بصورت مختصر، سه روش اصلی بکار گرفته شده در ردیاب های چشم امروزی معرفی گشته و سپس دلایل انتخاب روش تصویری را برای ردیاب چشم ساخته شده بررسی می نماییم.

۳.۲.۱ : تکنیک های رایج در ردیابی چشم

امروزه روش های زیادی برای ردیابی چشم استفاده می شود. به طور کلی سه روش برای اندازه گیری حرکات چشم (OculoGraphy) بکار برده می رود [5]:

۱. اندازه گیری به روش الکتریکی

Electro-OculoGraphy (EOG)

۲. استفاده از لنزهای تماسی

Scleral Contact Lens-OculoGraphy

۳. اندازه گیری با کمک تصویر

Photo-OculoGraphy (POG) or Video-OculoGraphy (VOG)

1 Eye Tracking (ET) or Eye Gaze Tracking (EGT) or Gaze Trackig (GT)

2 OculoGraphy اندازه گیری حرکات چشم

۳ نقطه دید (POR) Point Of Regard ، نقطه ایست که تصویر آن بر روی لکه زرد در شبکیه افتاده.

4 Eye Tracker Device (ETD) or Gaze Tracker Device (GTD)

۲. ۳. ۲ : اندازه گیری به روش الکتریکی^۱

ردیابی به روش الکتریکی (EOG) که توسط کافمن [6] ارائه گردید بر این پایه استوار است که یک میدان الکترومغناطیسی در پوست اطراف چشم قابل اندازه گیری می باشد که با چرخش کره چشم تغییر می کند.



شکل ۵ : الکترود های نصب شده در روش EOG [۵]

مقدار این میدان میتواند نماینده موقعیت کره چشم باشد. پتانسیل الکتریکی اندازه گیری شده در حدود $15-200 \mu V$ با دقت اسمی $20 \mu V/deg$ از حرکت چشم می باشد. با این روش موقعیت چشم نسبت به سر اندازه گیری می شود، بنابراین به تنهایی نمی توان از آن برای تعیین نقطه دید شخص استفاده کرد.

این روش در دهه ۱۹۷۰ از معمول ترین روش ها به حساب می آمد [7].

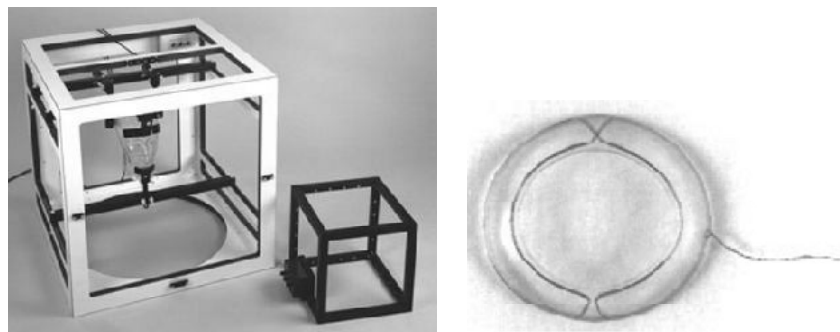
۲. ۳. ۳ : تکنیک های رایج ، بر پایه استفاده از لنز تماسی

اولین متدهای بکار گرفته شده در ردیابی چشم، استفاده لنزهای تماسی بوده که در دهه ۱۹۵۰ میلادی به بعد برای بهبود دقت در آنها تلاش های فراوانی صورت گرفت. با گذاشتن یک لنز در چشم بسیار دقیق می توان حرکات چشم را اندازه گیری کرد. اوایل از نشانگرهای متصل به لنز استفاده میشد که با حرکت چشم حرکت کرده و انتهای آن بر روی کاغذ اثر می گذاشت. اما امروزه دو روش رایج وجود دارد :

با قرار دادن دو سطح آینه ای ریز روی لنز و استفاده از بازتاب نور مادون قرمز (IR) در آنها می توان به تعیین موقعیت چشم پرداخت.

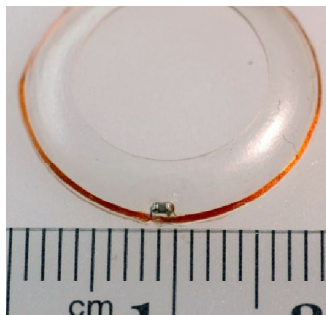
1 Electro-OculoGraphy (EOG)

نخستین بار رابینسن [8] از یک کویل ریز به نام Search coil استفاده کرد و آن را روی یک لنز تماسی جای داد. این لنز بطور کامل روی صلیبه چشم را می گیرد و با یک حالت مکندگی خاص سفت به سطح آن می چسبد تا با حرکات سریع چشم جابجا نشود. سپس موقعیت کره چشم با جریان القا شده در کویل توسط یک میدان الکترومغناطیسی اندازه گیری می شود. با وجود اینکه این روش بسیار تهاجمی بوده ولی از دقت خوبی برخوردار بود، دقتی در حدود ۱۰-۵ ثانیه از کمان در بازه محدود شده ۵ درجه [7].



شکل ۶: تجهیزات مورد استفاده در روش لنز تماسی با کویل سیمی (Search coil) [۵]

یکی از جدیدترین کارها در زمینه لنزهای ردیاب چشم، طراحی یک لنز بی سیم بوده که می توان برای مطالعه بیشتر به مقاله مراجعه نمود. [9]



شکل ۴: لنز ردیاب چشم بی سیم [۹]

۲. ۳. ۴: تکنیک های تصویری^۱

امروزه پرکاربردترین روش برای اندازه گیری نقطه دید شخص استفاده از تکنیک های تصویری می باشد که نخستین بار در ۱۹۰۱ میلادی بکار گرفته شد. اساس کار همه آنها استفاده از تصاویر گرفته شده از چشم و تعیین موقعیت چشم با پردازش این تصاویر است. با کمک تصاویر گرفته شده می توان

^۱ Photo-OculoGraphy (POG) or Video-OculoGraphy (VOG)

برخی از مشخصه‌های چشم را اندازه‌گیری کرد و با بررسی تغییرات این مشخصه‌ها است که موقعیت چشم اندازه‌گیری می‌گردد. از مشخصه‌های قابل اندازه‌گیری چشم می‌توان اشاره کرد به: شکل مردمک، موقعیت لیمبوس (مرز میان عنبه و صلبیه)، بازتاب یک منبع نورانی مقابل چشم از قرنیه و ...

۲. ۳. ۵ : دسته بندی

سیستم های ردیاب چشم کنونی از لحاظ وضعیت قرارگیری نسبت به ناظر دو نوعند [5] :

۱. یا بر روی سر نصب می شوند.

Head-Mounted Gaze Trackers (HMG)

۲. یا از فاصله ای خاص نسبت به کاربر به ردیابی حرکات چشم او می پردازند.

Table-Mounted Trackers or Remote Eye Gaze Tracker (REGT)



شکل ۵ : سمت راست نمونه ای از یک سیستم ردیاب چشم قابل نصب روی سر

سمت چپ نمونه ای از یک سیستم ردیاب چشم قابل نصب روی میز (شکل سمت چپ از مرجع [۵] می باشد).

تکنیک‌های اول و دوم یعنی روش الکتریکی و لنز تماسی هر دو بنابر ماهیت عملکردشان به ناچار می‌بایستی به نحوی با کاربر تماس داشته باشند. تکنیک سوم یعنی استفاده از تصویر، وابسته به تصویر گرفته شده از چشم می‌باشد که این تصویر می‌تواند توسط یک دوربین نصب شده بر روی سر و یا قابل نصب بر روی میز از چشم گرفته شود. بنابر آنچه که گفته شد تکنیک‌های اول و دوم هر دو تهاجمی^۱ به شمار می‌آیند اما تکنیک تصویری هم میتواند نیمه تهاجمی باشد و هم غیرتهاجمی^۲.

¹ Invasive

² Non Invasive

به طور کلی ردیاب‌هایی که از تکنیک‌های اول و یا دوم استفاده می‌کنند بسیار دقیق‌تر از ردیاب‌های تصویری عمل می‌کنند و برای کاربردهای آزمایشگاهی دقیق، بسیار مناسب می‌باشند. موقعیت اندازه‌گیری شده مردمک، عنیه و یا سایر مشخصات چشم، در هر سه تکنیک یاد شده، در صورتی نماینده یک نقطه مشخص از منظره مقابل شخص است که وضعیت سر کاملاً ثابت باشد. چراکه اگر شخص یک نقطه مشخص را نگاه کند با حرکت سر موقعیت مردمک یا عنیه در چشم تغییر می‌کند. در بسیاری از ردیاب‌های چشم ساخته شده، فرض اولیه همین است، بنابراین شخص ملزم است چانه خود را بر روی یک پایه ثابت^۱ قرار دهد تا سر حرکتی نداشته باشد. تنها در متد تصویری بازتاب قرینه-مردمک که در قسمت ۲.۴.۶ توضیح داده خواهد شد، می‌توان تا حدودی مستقل از وضعیت سر، نقطه دید کاربر را تعیین کرد.

۴.۲: آشنایی بیشتر با ردیاب‌های چشم تصویری^۲

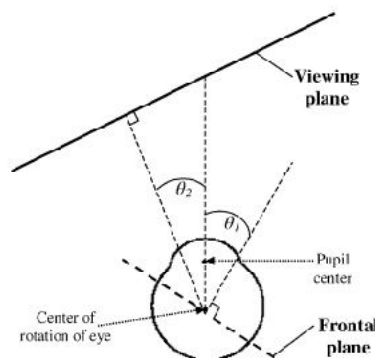
به طور کلی در یک سیستم بر پایه روش تصویری (VOG) که بتواند نقطه دید شخص را بطور دقیق تشخیص دهد چهار کار اصلی صورت می‌گیرد:

۱. نخست اینکه اطمینان حاصل شود در هر لحظه چشم در میدان دید دوربین قرار دارد. این امر در مورد ردیاب‌های قابل نصب بر روی سر خود بخود حل می‌شود چراکه با حرکت سر دوربین مقابل چشم نیز حرکت می‌نماید و موقعیت چشم در میدان دید دوربین تغییر نمی‌کند. در ردیاب‌های قابل نصب بر روی میز این شرط باید ارضا گردد.
۲. مرحله دوم در ردیاب‌هایی لحاظ می‌شود که سر کاربر را ثابت نگه نمی‌دارند. در این حالت می‌بایستی حرکات سر جبران شده تا نقطه دید کاربر درست اندازه‌گیری گردد. یکی از تکنیک‌هایی که به این منظور استفاده می‌گردد تکنیک بازتاب قرینه-مردمک می‌باشد.
۳. مرحله سوم اینست که از تصاویر گرفته شده، ویژگی‌های لازم همچون موقعیت دوبرعده و یا سه بعدی مردمک، موقعیت گلینت، مرز عنیه و ... با مدل‌های خاصی استخراج شود.
۴. مرحله چهارم مرتبط کردن و نگاشت کردن این اطلاعات به فضای اطلاعات مورد نیاز همچون نقطه دید کاربر یا زاویه دید کاربر است.

^۱ Chin-rest

^۲ Video Base Eye Trackers

زاویه دید کاربر می‌تواند بصورت زاویه بین امتداد دید و هر یک از خطوط عمود بر صفحه Frontal و یا خط عمود بر صفحه دید تعریف شود [10].



شکل ۶ : زاویه دید [۱۰]

۲. ۴. ۱ : دسته‌ای از تحقیقات صورت گرفته پیشین در زمینه ردیاب‌های تصویری

آنچه برای مرحله اول لازم می‌باشد، تشخیص چشم و ردیابی آن در هنگام حرکت سر است. روش‌ها و الگوریتم‌های زیادی تاکنون برای تشخیص مستقیم چشم و یا به عنوان عضوی از صورت ارائه شده است. مثلاً صورت به کمک اختلاف رنگ خاص آن، شکل و هندسه آن و یا به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی قابل شناسایی می‌باشد. در مرجع [11] به برخی از این الگوریتم‌ها و متدها اشاره شده است. لازم به ذکر است که شناسایی چشم بسته و تشخیص پلک زدن نیز الگوریتم‌های خاصی دارد که نمونه‌ای از آن را می‌توان در مراجع [12]-[14] یافت.

پس از شناسایی چشم در تصویر، اندازه‌گیری یکی از مشخصات چشم در تصویر همچون مرکز مردمک با دقت زیادی باید صورت گیرد (مرحله سوم). بالا بردن دقت و مقاوم ساختن این تشخیص و ردیابی به منظور استفاده بهتر از سیستم‌های ردیاب چشم بسیار ضروری است. به گونه‌ای که دیگر شخص نگران میزان روشنایی محیط، موقعیت دوربین نسبت به سر، وضعیت مژه‌ها و پلک زدن و استفاده از عینک نباشد. عامل دیگری که در دقت نقش بسزایی دارد، تفکیک‌پذیری تصویر گرفته شده از چشم می‌باشد. اندازه‌گیری دقیق مشخصه‌های مورد نیاز از چشم منوط بر، داشتن تصویری با کیفیت از چشم است. یک دوربین NTSC معمولی قابلیت تصویر برداری ۳۰ فریم بر ثانیه را دارد. رزولوشن تصویر نیز ۶۴۰×۴۸۰ می‌باشد. اگر دوربین لنز NA^1 با ۴ درجه زاویه دید افقی داشته باشد در فاصله

¹ Narrow Angle

عادی چشم از دوربین یعنی ۶۰۰ میلی‌متر می‌تواند ۴۰ میلی‌متر را تحت پوشش قرار دهد. که در این صورت هر پیکسل بیانگر ۰.۰۶۲۵ میلی‌متر است [10].

زو و یانگ [15] روشی ارائه دادند که در آن یک بیضی بر عنیبه محیط می‌شود (دقیقاً بر روی لیمبوس). معادله این بیضی را با روشی که فیتزگیون، پیلو و فیشر [16] ارائه دادند با استفاده از حداقل ۶ نقطه می‌توان تعیین کرد. این بیضی مستقیماً بر روی مردمک نیز می‌تواند محیط شود. برای کم کردن تأثیرات منفی ناشی از بازتاب‌ها و عوامل دیگر، اوهنو [17] متد محیط کردن دوگانه بیضی را پیشنهاد داده که ابتدا لبه‌های مردمک برای بیضی محیطی اول استفاده می‌شود و پس از آن لبه‌های مردمک که داخل بیضی اول قرار دارند برای بیضی دوم استفاده می‌شوند. بیضی دوم موقعیت مردمک را دقیق‌تر بیان می‌کند. که در نهایت به تعیین نقطه دید با دقت بیشتری منجر می‌شود.

برای تشخیص گلنت^۱ که در برخی روش‌ها استفاده می‌گردد نیز متدهای مختلفی وجود دارد. که در آنها به شناسایی یک نقطه نورانی در اطراف مردمک می‌پردازند. مرکز آن هم براحتی از مرکز لکه نورانی بدست می‌آید.

برخی از تحقیقات انجام شده در دهه‌های اخیر بر روی مرحله چهارم و بهینه نمودن مرحله کالیبراسیون متمرکز بوده، از جمله استفاده از الگوهای تغییر پذیر (برای مثال در [18])، انطباق الگوها [19] و یا رویکردهای آماری. این روش‌ها معمولاً نیازمند آموزش‌های طولانی بوده و در برابر تغییرات نور محیط بسیار حساس می‌باشد، به شکل‌های متفاوت چشم و رنگ آن حساس بوده و نیازمند مداخله دستی بوده و یا حجم محاسبات آن نسبتاً زیاد می‌باشد [10].

برای از بین بردن حساسیت سیستم در برابر نویزهای اندازه‌گیری، برخی از تقریب‌های غیر خطی کمک گرفته‌اند [20] و یا از روش‌های شبکه عصبی استفاده کرده‌اند [21]. این سیستم‌ها نیز بسیار در برابر تغییرات چهره همچون ابعاد و یا شکل موها حساس بوده و برای عملکرد دقیق نیازمند آموزش زیادی بوده و از لحاظ محاسبات نیز حجم بالای دارند. همچنین آنها حرکات بزرگ سر را پشتیبانی نمی‌کنند [10].

جی و زو [22] از یک ماشین نگه دارنده^۲ به همراه یک شبکه عصبی تعمیم یافته آماری^۳ برای تخمین نقطه دید و ردیابی چشم استفاده کردند و به دقت ۵ درجه دست یافتند.

¹ Glint

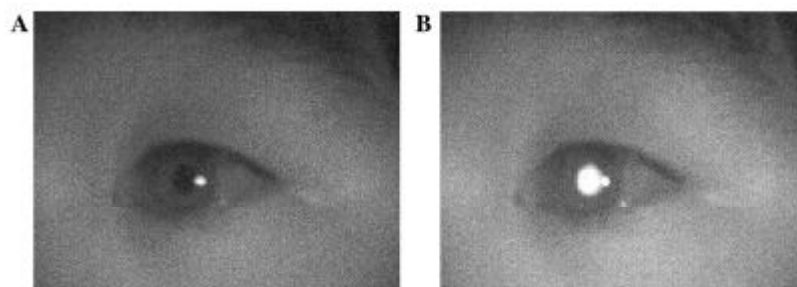
² Support Vector Machine (SVM)

³ Generalized regression neural network (GRNN)

زو و یانگ [15] برای عملکرد بهتر، مشخصات مورد نیاز چشم را با دقت های Sub-Pixel اندازه گیری می کردند. برخی از سیستم ها [23] و [24] با نگاه به مرکز مردمک و بازتاب های چندگانه از چشم، نیاز به کالیبراسیون را کمتر کردند اما به نظر می رسد که در برابر حرکات سر بسیار حساسند [10]. موریموتو [25] نیز برای کم کردن نیاز به کالیبراسیون استفاده از دو منبع نوری را بجای یک منبع پیشنهاد کرد اما تنها به بیان نتایج شبیه سازی اکتفا نمود [10].

بر خلاف سیستم های بالا یک ردیاب تصویری چشم کامل باید با وجود داشتن دقت بالا بتواند در برابر حرکات سرمقاوم باشد. تالمی و لیو [26] از دو دوربین ثابت و یک دوربین با قدرت تفکیک بالا متصل به یک پایه پن تیل^۱ برای اندازه گیری موقعیت مردمک استفاده کردند. سیستم آنها در برابر تغییرات چهره و روشنایی محیط مقاوم بود اما نیاز به آموزش زیادی داشت. بیشترین سرعتی که آنها به آن دست پیدا کرده بودند افریم بر ثانیه بود [10].

در بین سال های ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۸ اِبی ساوا [27]-[30] روش تصویری جدیدی ارائه داد. او از این خاصیت استفاده کرد که هنگامیکه منبع نور (مادون قرمز) در راستای محور دید قرار داشته باشد مردمک بجای یک دیسک تاریک در تصویر به صورت یک دیسک روشن دیده می شود [10].



شکل ۷: مردمک تاریک و روشن [۱۰]

به علت بالا رفتن کُتراست و اختلاف روشنایی بین مردمک و عنبیه، چنین سیستمی حساسیت بسیار پایین در برابر روشنایی محیط داشته و مردمک بسیار سریع و راحت در تصویر تشخیص داده می شود. این نور توسط چشم انسان قابل تشخیص نمی باشد و لذا مزاحمتی برای شخص ایجاد نمی کند. طول موج نورهای مادون قرمز استفاده شده در حدود ۸۸۰ نانومتر [10] است که آسیبی به انسان وارد نمی کند. البته دوربین های استفاده شده در این سیستم ها هم دوربین های حساس به نور مادون قرمز

^۱ Pan/Tilt

می‌باشند. معمولاً منبع نور مادون قرمز در نزدیکی محور نوری دوربین قرار داده می‌شود تا بازتاب آن از سطح شبکه توسط دوربین دیده شود و مردمک به صورت یک دیسک نورانی درآید. این ایده پس از ابی ساوا توسط دیگران نیز استفاده گردید.

پس از آن یک بیضی بر روی مرزهای مردمک منطبق کرد و از بردار رابط مرکز بیضی به مرکز گلینت به عنوان شاخص برای تعیین نقطه دید کمک گرفت. این سیستم از پردازش و آنالیز تصاویر گرفته شده برای از بین بردن اثرات منفی عینک استفاده می‌کند. نمونه اولیه آن گاهی در برابر حرکات سر خیلی ایده‌آل عمل نمی‌کرد. البته پس از آن او به همراه ماروی [31] وبا کمک مکانیزم پن‌تیلت توانستند تا حد زیادی این سیستم را بهبود ببخشند و به سرعت ۲.۵ فریم بر ثانیه دست بیابند [10].

موریموتو [32] نیز در سیستمی مشابه آنچه گفته شد از یک چند جمله‌ای مرتبه دوم برای نگاشت کردن بردار میان مرکز مردمک و مرکز گلینت به نقطه دید روی صفحه نمایش استفاده کرد. ضرایب این چند جمله‌ای نیز با نگاه کردن شخص به ۹ نقطه کالیبراسیون روی صفحه نمایش محاسبه می‌گردد. برای حرکات محدود سر او توانست به دقت ۱ درجه در زاویه دید دست یابد (معادل ۱ سانتی متر بر روی صفحه نمایشی که ۵۰ سانت با چشم فاصله دارد). فرکانس پردازش نیز ۳۰ هرتز بود. اما تا زمانی که از مکانیزم پن‌تیلت برای اطمینان از قرارگیری چشم در میدان دید دوربین استفاده می‌شود، شخص نمی‌تواند با آزادی کامل و بدون محدودیت سر خود را حرکت دهد.

وانگ و سانگ [33] از سیستمی استفاده کردند که می‌توانست عنبیه و خطوط دور چشم را ردیابی کند. آنها از یک دوربین ساکن برای تعیین موقعیت سر و صورت و از یک دوربین با قدرت تفکیک بالا با مکانیزم پن‌تیلت با قابلیت زوم برای ردیابی عنبیه و مرز چشم استفاد کردند و به دقت ۱.۵ سانتی متر در ۱.۵ متر فاصله صفحه نمایش برای تعیین نقطه دید، دست پیدا کردند. اما این سیستم در برابر تغییرات نور محیط، تغییرات چهره و استفاده از عینک حساس بود [10].

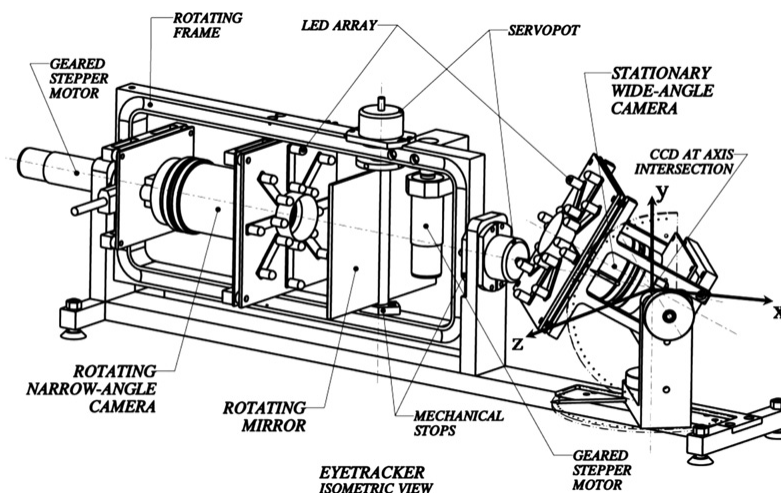
همه سیستم‌هایی که در بالا به آنها اشاره شد صرف نظر از عیوبی که دارند در بهترین حالت می‌توانند موقعیت مشخصاتی چون مرکز مردمک و عنبیه و ... را تا حد ۱ پیکسل در تصویر تشخیص دهند اما هیچ کدام در برابر حرکات بزرگ سر درست کار نمی‌کنند [10].

در ادامه به دسته‌ای از تحقیقات که برای پشتیبانی سیستم ردیاب چشم از حرکات بزرگ سر انجام گرفت، اشاره می‌شود.

بیمر و فلیکنر [34] با کمک یک مکانیزم مخصوص و با استفاده از دو جفت دوربین با لنز WA و NA با فواصل کانونی متغیر و آینه با پایه پن‌تیلت در برابر دوربین WA، سعی در ساخت یک

سیستم ردیاب با تمام ویژگی‌های مطلوب بالا که به دقت ۰.۶ درجه و فرکانس ۱۰ هرتز دست یافتند [10].

نورالدین [10] یک روش جدید برای شناسایی از راه دور چشم و ردیابی حرکات چشم ارائه می‌دهد. در اینجا از دو دوربین و یک آینه برای ردیابی بلادرنگ حرکات چشم با وجود حرکات آزاد سر شخص استفاده می‌شود و با آنالیز تصاویر مکان دقیق مردمک و بازتاب قرنیه مشخص می‌گردد. سه روش نیز برای تعیین محل دقیق نقطه دید شخص روی مانیتور، با کمک نرم افزار این سیستم ارزیابی می‌شود.



شکل ۸: نمونه ساخته شده توسط نورالدین [۱۰]

سیستم حرکت دوربین قادر به ردیابی چشم شخص به صورت بلادرنگ و با سرعت زیاد ۹ فریم بر ثانیه با وجود حرکات طبیعی سر با سرعت ۱۰۰ درجه بر ثانیه بصورت افقی و ۷۷ درجه بر ثانیه بصورت عمودی می‌باشد. این سیستم بر روی اشخاص با رنگ‌های متفاوت چشم و روشنایی متفاوت محیط و با وجود عینک تست شده و با دقت ۲.۹ درجه حرکات چشم را ردیابی می‌کند [10].

یو و چانگ [35] از دو دوربین استفاده کردند، یک دوربین با لنز Wide برای جهت دهی به دوربین با لنز معمولی دیگر. سیستم آن دو با فرکانس کاری ۱۵ هرتز دقت ۰.۹۸ درجه برای حرکت افقی و ۰.۸۲ درجه برای حرکت عمودی داشت [36].

اوهنو [17] در سال ۲۰۰۲ میلادی یک سیستم تک دوربین به دقت زیر ۱ درجه زاویه دید طراحی کرد. این سیستم توانایی متد خود را در ردیابی دقیق حرکات چشم به اثبات رساند اما میدان دید محدودی در حدود ۴×۴ سانتی متر در فاصله ۶۰ سانتی متری را دارا بود [36].

در سال ۲۰۰۴ نیز یک سیستم توسط اوهنو و موکاوا [37] با سه دوربین ساخته شد. دو دوربین WA و یک دوربین NA بر روی مکانیزم Pan/Tilt. این سیستم با فرکانس کاری ۳۰ هرتز دقت ۱ درجه داشت.

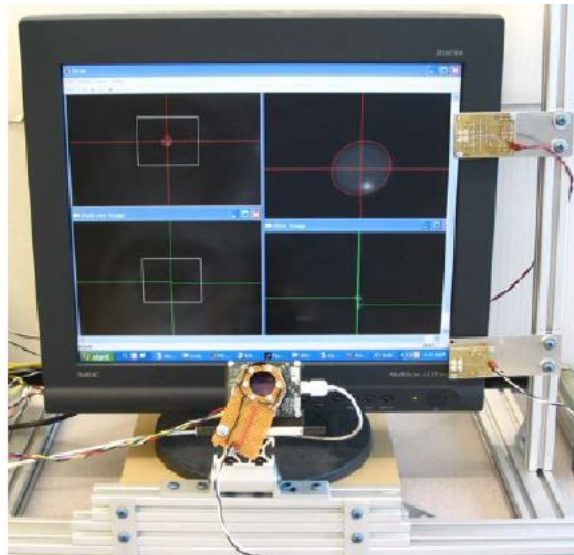
روی آوردن به استفاده از چند دوربین برای جهت‌دهی مناسب دوربین اصلی در هنگام حرکات بزرگ سر هرچند امکان حرکت دادن سر را برای شخص فراهم می‌کند اما به دلیل کاهش سرعت عملیات و پردازش در هنگام حرکت و نیاز به کالیبراسیون طولانی دوربین‌ها تا کنون مورد استقبال زیادی قرار نگرفته [36].

موریموتو [38] نیز یک سیستم ردیاب چشم تک دوربین را برای تعیین نقطه دید شبیه سازی کرد که سیستم او نیز دقتی در حدود ۲.۵ درجه را از خود نشان می‌داد [36].

شی و لیو [39] نیز یک سیستم تک دوربین را پیشنهاد دادند که البته از دو دوربین جانبی برای رفع قیود جانبی الگوریتمشان استفاده می‌کردند و در میدان دید محدود ۴×۴ سانتی متر به دقت حدودی ۱ درجه زاویه دید با فرکانس ۳۰ هرتز دست پیدا کردند [36].

مشکل اساسی سیستم‌های تک دوربین ساکن میدان دید محدود دوربین برای گرفتن تصویری با تفکیک بالا از چشم است. این در حالی است که برای حرکات بزرگ سر به میدان دید گسترده دوربین نیاز است.

هنسی، نورالدین و لورنس [36] سیستمی را طراحی کردند که از یک دوربین با قدرت تفکیک بالا استفاده می‌کند و میدان دید گسترده تری را تحت پوشش خود قرار می‌دهد. یک سیستم ردیاب تصویری نیازمند دوربینی با قدرت تفکیک بالا می‌باشد تا بتواند از تصاویری که از چشم درفاصله‌ای مشخص می‌گیرد، مشخصات مورد نیاز را بطور دقیق اندازه‌گیری کند. این دوربین امکان اندازه‌گیری دقیق مشخصه‌های چشم را در میدان دید گسترده‌تر فراهم می‌کند. به دلیل استفاده از یک متد ۳ بُعدی بر پایه بازتاب‌های دوگانه قرینه (Multiple Glint) در این سیستم، شخص قادر به حرکت سر در حین استفاده از سیستم می‌باشد. استفاده از یک دوربین ساکن به ساده‌سازی محاسبات هندسی و کالیبراسیون منجر می‌شود و زمان پردازش اطلاعات را بالاتر می‌برد. این مزیت عمده این سیستم است که استفاده و نصب آن را بسیار آسان می‌کند. با این سیستم نتایج مناسبی برای بازه حرکتی ۱۴×۱۲×۲۰ سانتی متری سرگرفتند. دقت آنها زیر ۱ درجه بود. این سیستم به یک کالیبراسیون ۵ ثانیه‌ای برای هر شخص نیاز داشت.



شکل ۹: نمونه ساخته شده با یک دوربین [۳۶]

این نشان می‌دهد که یک ردیاب تک دوربین با متدی مناسب می‌تواند در عین سادگی بسیار کارآمد باشد. شرکت توبی [40] (Tobii) یکی بزرگ‌ترین تولیدکنندگان ردیاب‌های چشم است که ردیاب‌های تک دوربین با متد بازتاب دوگانه قرنیه آن دارای دقت و سرعت بالایی می‌باشند. ریولن [41] یک متد جدید برای ردیابی لیمبوس توسط نور مادون قرمز ارائه داد که اندازه‌گیری حرکات چشم توسط نور مادون قرمز نامیده شد.^۱ او از چند منبع نور مادون قرمز^۲ و ترانزیستور حساس به IR در اطراف چشم استفاده کرد. به این ترتیب لیمبوس به حالت روشن در می‌آید. ترانزیستورهای نصب شده اطراف چشم نیز روشنایی دریافتی از لیمبوس را به صورت ولتاژ تبدیل می‌کنند. به این شکل کوچکترین حرکت عنبیه توسط این ترانزیستورها احساس و اندازه‌گیری می‌شود. این سیستم ایریس^۳ نامیده شد. دقت این سیستم بسیار خوب و در حدود ۲ دقیقه کمان بوده و برای کارهای کلینیکی بسیار مفید می‌باشد. سیستم IROG IRIS وزنی معادل ۳۰۰ گرم داشته و بر روی سر نصب می‌شد [10].

^۱ Infrared oculography (IROG)

^۲ IR

^۳ IRIS



شکل ۱۰: ردیاب ایریس [۴۲]

کرنسویت و کرین [43] یک سیستم ردیاب بسیار دقیق دیگر پیشنهاد دادند که از بازتاب‌های اول و چهارم استفاده می‌کرد. بازتاب اول یا همان گلینت در تصویر بسیار واضح و قابل تشخیص و ردیابی می‌باشد اما بازتاب‌های بعدی برای تشخیص نیاز به سخت افزارهای بخصوصی دارند اما امکان تعیین نقطه دید به صورت سه بعدی را بسیار راحت تر فراهم می‌کنند [10].

این سیستم همان متد گفته شده در بخش ۴-۳-۲-۶ یعنی DPI است. در سیستم‌های DPI، حرکت انتقالی چشم و دوران چشم تاثیرات متفاوتی بر موقعیت دو بازتاب اول و چهارم می‌گذارد که این امر باعث می‌شود تا بتوان دوران چشم و حرکت انتقالی آن را جداگانه اندازه‌گیری کرد. دقت این سیستم در حدود ۱ دقیقه کمان می‌باشد.

بالوجا و پومرلو [44] سیستمی طراحی کردند که در آن مشخصه معینی از چشم بصورت دقیق اندازه‌گیری نمی‌شد. متد آنها بر پایه شبکه عصبی استوار بود و تصویر چشم هنگامیکه به نقطه‌ای از صفحه نمایش خیره می‌شود به عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده می‌گردد. آموزش شبکه نیز با خیره شدن به نقاط مشخصی از صفحه نمایش انجام می‌شد. آنها ۲۰۰۰ نقطه برای آموزش استفاده کردند. این سیستم با فرکانس ۱۵ هرتز و دقت ۲ درجه امکان حرکت دادن سر را هم به شخص می‌داد [10].

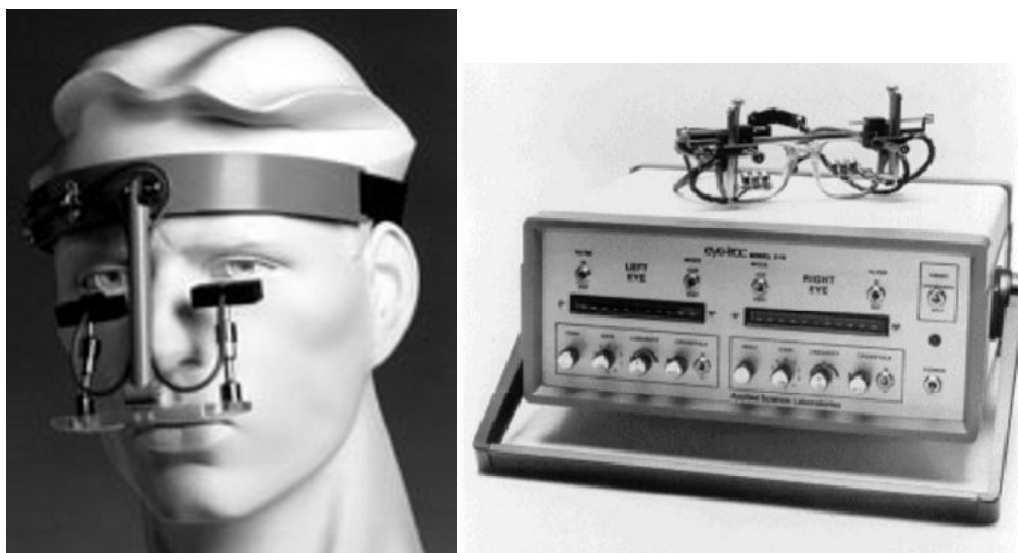
پس اشاره‌ای که به کارهای پیشین در زمینه ردیاب‌های تصویری شد، در قسمت بعد به طور خلاصه به جمع بندی متدهای استفاده شده در باب ردیاب‌های تصویری می‌پردازیم.

۲. ۴. ۲ : متدهای رایج استفاده شده در ردیاب‌های تصویری

پس از آنکه تصویر چشم گرفته می‌شود، ایده‌های مختلفی برای ردیابی چشم و نقطه دید شخص به ذهن می‌رسد. در زیر چند متد کلی که برای ردیابی حرکات چشم با روش تصویری استفاده گردیده است، معرفی می‌شود.

۲. ۴. ۲. ۱ : ردیابی مرز عنبیه^۱

لیمبوس^۲ مرز میان سفیدی صلیبیه و تیرگی عنبیه است. به علت این اختلاف رنگ این مرز به راحتی قابل تشخیص بوده و میتوان از وضعیت آن نسبت به موقعیت سر استفاده کرد، البته باید سر کاربر ثابت نگه داشته شود و یا ردیاب روی سر او محکم و ثابت شود. از آنجایی که عنبیه گاهی توسط پلک‌ها پوشیده می‌شود بهتر است از این روش برای حرکت‌های افقی چشم استفاده شود.



شکل ۱۱ : دو نمونه از سیستم‌های بر پایه ردیابی مرز عنبیه [۵]

۲. ۴. ۲. ۲ : ردیابی مردمک^۳

این روش نیز مشابه روش بالا می‌باشد با این تفاوت که از مرز بین مردمک و عنبیه استفاده میشود. موقعیت سر همچنان باید ثابت بوده و یا دستگاه نسبت به سر ثابت باشد. از ویژگی‌های این روش نسبت به روش قبل اینست که مردمک توسط پلک‌ها پوشیده نمی‌شود و قدرت ردیابی حرکات عمودی چشم را هم دارا می‌باشد. این مرز نسبت به مرز عنبیه شارپ‌تر بوده و دقت را بالاتر می‌برد. عیب این روش هم اینست که اختلاف رنگ بین عنبیه و مردمک کمتر بوده و تشخیص این مرز دشوارتر است.

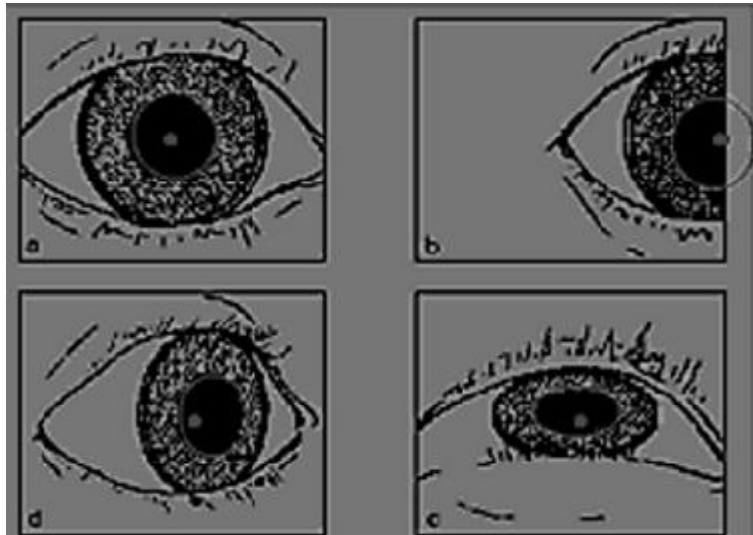
¹ Limbus Tracking

² Limbus

³ Pupil Tracking

۲. ۴. ۲. ۳ : اندازه‌گیری شکل مردمک

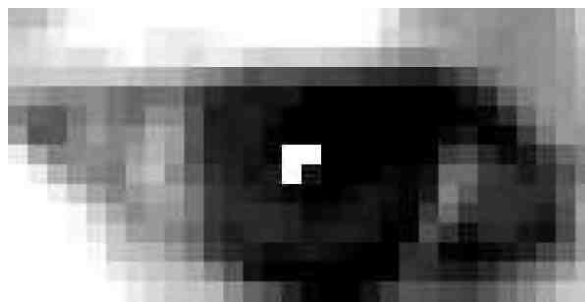
این روش به اندازه‌گیری شکل مردمک در تصویر می‌پردازد و با توجه به ارتباط میان موقعیت چشم با شکل مردمک، موقعیت چشم معین می‌گردد.



شکل ۱۲ : تغییرات شکل مردمک در تصویر گرفته شده از چشم در زوایای مختلف چشم [۵]

۲. ۴. ۲. ۴ : بازتاب نور از قرنیه و استفاده از روش شبکه عصبی^۱

در این روش تصویر نسبتاً باز (wide) از جلوی کاربر گرفته شده و به کامپیوتر منتقل می‌شود. پس از آن با پیدا کردن یک نقطه نورانی در پیش زمینه تیره، محل چشم تشخیص داده شده و یک مستطیل کوچک از تصویر حاوی تصویر چشم جدا می‌شود. این تصویر حدود ۴۰-۵۰ پیکسل بوده و مستقیم به عنوان ورودی شبکه عصبی^۲ استفاده می‌شود و خروجی آن مختصات نقطه دیده شده توسط کاربر خواهد بود.



شکل ۱۳ : نمونه ای از تصویر گرفته شده برای ورودی شبکه عصبی [۴]

^۱ Corneal Reflection and Eye Image using an Artificial Neural Network

^۲ ANN

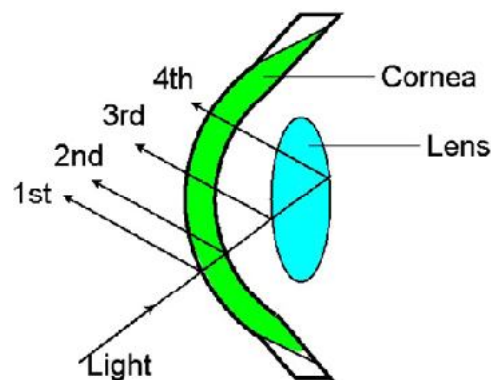
شبکه عصبی به چیزی جز یک کالیبراسیون ساده نیاز دارد و آن آموزش شبکه است. که با دنبال کردن یک نقطه روی صفحه نمایش انجام می شود. مهمترین حسن این روش آزادی عمل زیاد سرکاربر است. دقت آن هم در حدود 2° می باشد.

۲. ۴. ۲. ۵ : بازتاب دوگانه قرنیه^۱

در این روش از تصویر بازتاب اول و چهارم استفاده می شود. وضعیت این دو بازتاب بسیار دقیق تر نقطه دید کاربر را تعیین می کند. اما از آنجائی که بازتاب چهارم کم نور می باشد بایستی نور محیط را دقیقاً کنترل نمود. با این حال دقت خوبی در حدود ۱ دقیقه کمان را دارا می باشد.

۲. ۴. ۲. ۶ : وضعیت مردمک و بازتاب نور از قرنیه^۲

در اینجا از بررسی موقعیت بازتاب نور یک منبع نور (معمولاً مادون قرمز) در چشم نسبت به مردمک به تعیین نقطه دید و میزان حرکت چشم مستقل از حرکات سر پرداخته می شود.



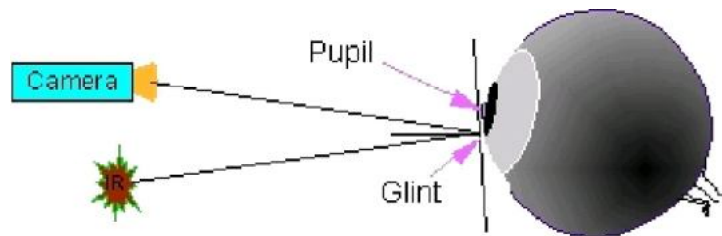
شکل ۱۴ : بازتاب نور در لایه های مختلف قرنیه و عدسی [۱۱]

هنگامیکه پرتو نور مادون قرمز به چشم می تابد چند نوع بازتاب نور در لایه های مختلف چشم خواهیم داشت که به آنها تصاویر پورکینیا^۳ (Purkinje Images) می گویند.

^۱ Dual-Purkinje image (DPI)

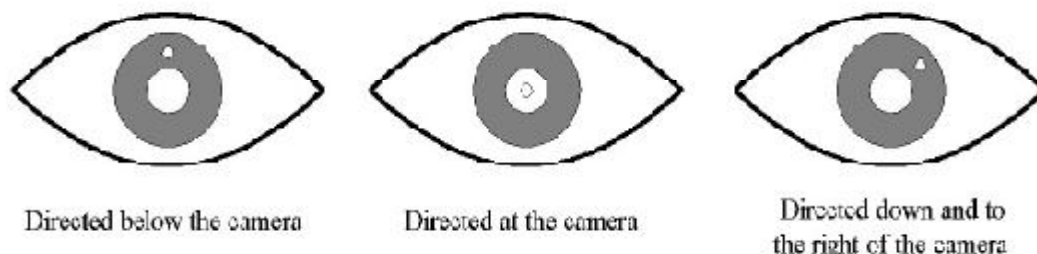
^۲ Corneal and Pupil Reflection Relationship

^۳ تلفظ های دیگری نیز از واژه Purkinje در فارسی استفاده می شود، همچون: پورکینج، پرکینی، پورکینژ



شکل ۱۵ : منبع نورانی، دوربین و چشم در روش بازتاب قرنیه-مردمک [۱۱]

بازتاب اول را گلینت^۱ گویند که در یک دوربین مادون قرمز به صورت یک نقطه نورانی دیده میشود. وضعیت مرکز مردمک نسبت به گلینت می تواند تعیین کننده نقطه دید ناظر باشد چرا که وقتی سر حرکت کرده و تغییر وضعیت بدهد تا زمانی که چشم به یک نقطه مشخص خیره شده باشد وضعیت گلینت و مردمک نسبت به هم ثابت خواهد ماند. اما اگر چشم حرکت افقی یا عمودی و یا دوران داشته باشد و به یک نقطه دیگر خیره شود، موقعیت نقطه نورانی نسبت به مرکز مردمک عوض می شود. بنابراین بردار واصل مرکز مردمک به مرکز گلینت، معیار اندازه گیری نقطه دید بوده که در ردیاب چشم ساخته شده نیز قبل از هر چیز به یافتن مرکز مردمک و مرکز گلینت و بدست آوردن بردار واصل این دو نقطه می پردازیم.



شکل ۱۶ : موقعیت بازتاب قرنیه با تغییر امتداد دید تغییر می کند. [۴۵]

یکی از کاربردهای مهم ردیاب های چشم که مطمئناً در آینده ای نه چندان دور بصورت فراگیر استفاده خواهد شد، استفاده از آنها به عنوان یک ابزار جدید در برقراری ارتباط کاربران با کامپیوتر میباشد. بطوریکه امروزه بخش عمده ای از تحقیقات علمی در زمینه تعامل انسان و رایانه (Human-Computer Interaction – HCI) را به خود اختصاص داده است (در ادامه بیشتر راجع به کاربردهای ردیاب های چشم توضیح داده خواهد شد). تکنیک های تصویری بالاخص متد بازتاب

¹ Glint

قرنیه-مردمک بهترین و منطقی‌ترین گزینه برای اینگونه ردیاب‌های چشم بشمار می‌رود چرا که کمترین تماس را با کاربر داشته و محدودیت‌های کمتری نسبت به روش‌های دیگر برای کاربر ایجاد می‌نمایند. تلاش برای بهبود روش‌ها و متدهای تصویری برای رسیدن به ردیاب‌های دقیق‌تر، سریع‌تر، ارزان‌تر و راحت‌تر همچنان ادامه داشته و با پیشرفت روزافزون در زمینه کامپیوتر ردیاب‌های چشم، کاربردی‌تر از گذشته خواهند شد.

در این پایان‌نامه به ساخت یک ردیاب چشم ارزان و نسبتاً دقیق با تکنیک‌های تصویری برای برقراری ارتباط با کامپیوتر پرداخته شده است. هدف اصلی نیز استفاده از آن توسط افرادی بوده که توانایی حرکت دادن بخش‌هایی از بدن همچون دست‌ها و پاها را نداشته و نیازمند کار با کامپیوتر می‌باشند. ردیاب چشم مورد نظر از نوع قابل نصب بر روی سر می‌باشد و از متد تصویری بازتاب قرنیه-مردمک استفاده می‌نماید. در ادامه بحث، با تکنیک‌های تصویری ردیابی چشم و روش کار ردیاب ساخته شده بیشتر آشنا می‌شویم.

قبل از اتمام این قسمت به این مطلب اشاره می‌شود که با فرض استفاده از متد اخیر یعنی بازتاب قرنیه-مردمک چه تفاوتی دارد که سیستم ردیاب از نوع قابل نصب بر روی سر باشد یا آنکه قابل نصب بر روی میز؟ در پاسخ باید گفت که تصویر گرفته شده توسط دوربین در ردیاب چشم نصب شده بر روی میز از فاصله دورتری نسبت به چشم گرفته می‌شود. بنابراین چشم جزء کوچکی از تصویر را تشکیل می‌دهد و پس از شناسایی موقعیت صورت و چشم در تصویر و بریدن تصویر چشم از تصویر کلی، به دلیل تفکیک پذیری^۱ کم آن دقت اندازه‌گیری کم می‌شود، مگر آنکه با استفاده از لنزهای تله^۲ تر بر روی چشم زوم کرده باشیم که در این حالت نیز این مشکل پیش می‌آید که با اندکی حرکت سر چشم از میدان دید دوربین خارج می‌شود. البته محدودیت‌های سخت افزاری نیز در ساخت یک ردیاب چشم قابل نصب بر روی میز وجود داشته که در بخش مربوطه، به آن می‌پردازیم. ایده‌های دیگری نیز برای قابل نصب بودن ردیاب‌ها بر روی میز و تصویر برداری از فاصله دور می‌توان مطرح نمود، مثلاً استفاده از دو دوربین که یکی از آنها دارای پایه متحرک پن تیل^۳ بوده و داشتن دو تصویر یکی از سر و دیگری از چشم. در یکی از تصاویر موقعیت چشم شناسایی شده و به کمک آن دوربین دوم را کنترل کرده تا چشم در میدان دید آن قرار گیرد.

^۱ Resolution

^۲ Tele Lens

^۳ Pan-Tilt

اما همه این نکات و ایده‌ها منوط به داشتن الگوریتم‌های مناسب برای اندازه‌گیری و ردیابی چشم و اطمینان از عملکرد درست آنها با فرض داشتن تصویر مناسب از چشم شخص می‌باشد. بنابراین آنچه در مرحله اول اهمیت پیدا می‌کند طراحی و ساخت یک ردیاب چشم قابل نصب بر روی سر و نرم افزارهای مربوط به آن می‌باشد، که در این پایان‌نامه به آن پرداخته شده است.

۳. ۴. ۲ : تشخیص و اندازه‌گیری مشخصات چشم در تصویر

در این بخش با فرض داشتن یک تصویر بسته از چشم یعنی تصویری که فقط چشم در آن دیده می‌شود، و با فرض کیفیت و روشنایی مناسب تصویر، به شناسایی و اندازه‌گیری مشخصات مورد نیاز چشم در تصویر می‌پردازیم. متناهی قبل از آن باید با پردازش تصویر، برخی مفاهیم کلی آن و اینکه منظور از کیفیت و روشنایی مناسب تصویر چیست، آشنا شویم که در قسمت بعد به آن می‌پردازیم.

۳. ۴. ۲ : پردازش تصویر^۱

یک تصویر تک رنگ^۲ مثلاً یک تصویر خاکستری را می‌توان توسط تابع دوبعدی $f(x,y)$ بیان نمود که در آن x و y را مختصات مکانی و مقدار f در هر نقطه را شدت روشنایی تصویر در آن نقطه می‌نامند. تابع f و همچنین مقادیر x و y در تصاویر دیجیتال مقادیری گسسته و محدود می‌باشند. شرط گسسته بودن در یک تصویر آنالوگ برقرار نمی‌باشد. می‌توان یک تصویر آنالوگ را با دیجیتال کردن مقادیر x و y و f به یک تصویر دیجیتال تبدیل کرد. دیجیتال کردن مقادیر x و y را Sampling و دیجیتال کردن مقدار f را Quantization می‌گویند.

"برای نمایش یک تصویر $M*N$ از یک آرایه دوبعدی (ماتریس) که M سطر و N ستون دارد استفاده می‌کنیم. مقدار هر عنصر از آرایه نشان دهنده شدت روشنایی تصویر در آن نقطه است. در تمام توابعی که پیاده‌سازی خواهیم کرد، هر عنصر آرایه یک مقدار ۸ بیتی است که می‌تواند مقداری بین ۰ و ۲۵۵ داشته باشد. مقدار صفر نشان دهنده رنگ تیره (سیاه) و مقدار ۲۵۵ نشان دهنده رنگ روشن (سفید) است." [46]

هر عنصر چنین آرایه‌ای را یک عنصر تصویر^۳ یا یک پیکسل^۴ می‌خوانند. عبارت تفکیک‌پذیری تصویر یا رزولوشن تصویر^۵ نیز به ابعاد تصویر و یا همان تعداد پیکسل‌های آن اشاره می‌نماید.

^۱ Image processing

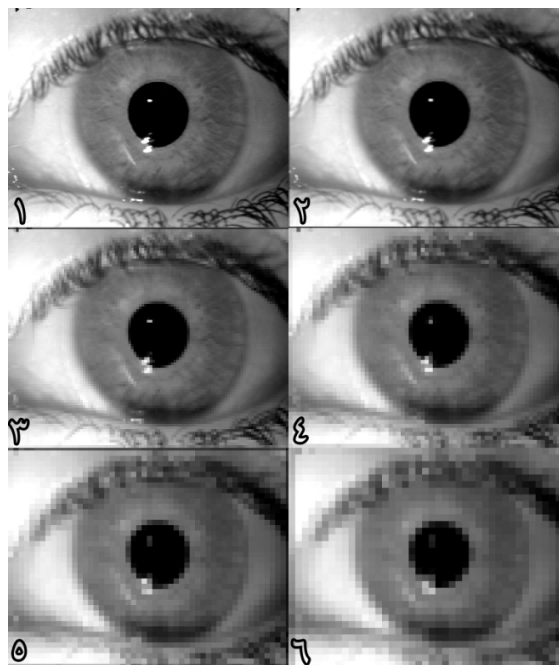
^۲ Monochrome image

^۳ Image element

^۴ Pixel

^۵ Image resolution

مثلاً در شکل ۱۷، شش تصویر با تفکیک‌پذیری‌های متفاوت نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود، هرچه تفکیک‌پذیری تصویر کمتر شود، تعداد پیکسل‌ها کمتر شده و جزئیات تصویر کمتر دیده می‌شود.



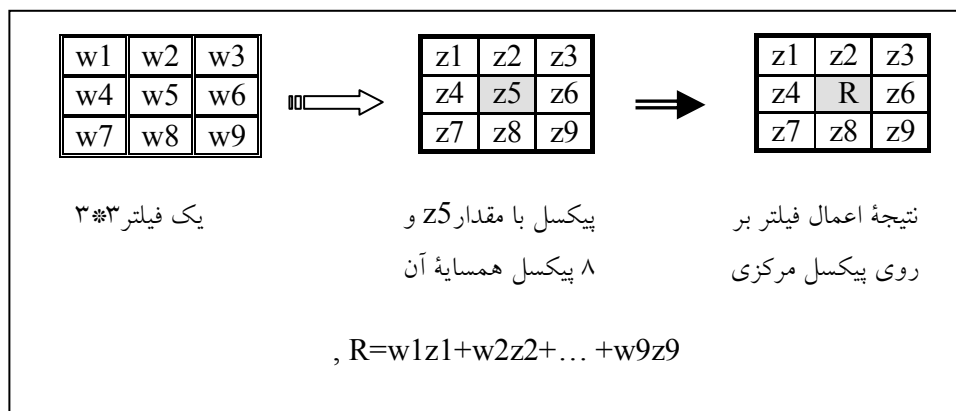
شکل ۱۷: تأثیر کاهش تفکیک‌پذیری و تعداد پیکسل‌ها بر وضوح تصویر.
از ۱ تا ۶ به ترتیب تفکیک‌پذیری کمتر شده و جزئیات کمتر دیده می‌شود.

به مجموعه عملیات و پردازش‌هایی که در راستای آنالیز تصویر در زمینه‌های مختلف انجام می‌شود، پردازش تصویر گویند. بهبود و ارتقاء تصویر^۱ نیز به یک سری پردازش‌ها بر روی تصویر گفته می‌شود که تصویر حاصل برای یک کاربرد خاص نسبت به تصویر اولیه مناسب‌تر باشد. ارتقاء تصویر در دو حوزه مکانی و فرکانسی می‌تواند انجام شود. توضیح درباره حوزه فرکانسی، شرح مبسوطی می‌طلبد و از آن صرف نظر می‌نماییم. اما در حوزه مکانی ارتقاء تصویر یا به صورت نقطه‌ای می‌باشد و یا به کمک نقاب‌ها انجام می‌شود. در حالت اول مقدار روشنایی هر پیکسل را، به صورتی غیر مرتبط با پیکسل‌های همسایه آن تغییر می‌دهیم. در حالت دوم مقدار روشنایی جدید هر پیکسل را با کمک یک رابطه خاص، از روشنایی اولیه آن پیکسل و پیکسل‌های همسایه آن محاسبه نموده و جایگزین می‌نماییم.

^۱ Image enhancement

یک ارتقاء نقطه‌ای معروف تصویر، آستانه‌گیری^۱ می‌باشد. حالت ساده آستانه‌گیری به این صورت انجام می‌شود که مقدار پیکسل‌هایی از تصویر که روشنایی آنها کمتر از یک مقدار خاص می‌باشد را صفر می‌کنیم و مقدار پیکسل‌هایی که روشنایی آنها بیشتر از آن مقدار باشد را یک در نظر می‌گیریم. آن مقدار خاص را نیز مقدار آستانه^۲ می‌گویند و به صورت دلخواه انتخاب می‌شود.

استفاده از نقاب‌ها برای پردازش تصویر در حوزه مکانی را معمولاً فیلتر کردن مکانی گویند و خود نقاب‌ها را فیلترهای مکانی می‌نامند. یک فیلتر مکانی ساده و خطی 3×3 و نحوه اعمال آن بر روی یک پیکسل را در شکل ۱۸ می‌بینیم. هنگامی که این فیلتر بر روی پیکسل مرکزی با مقدار $z5$ اعمال می‌شود، مقدار آن به صورت R در می‌آید که رابطه آن در شکل آورده شده است. هنگامیکه این فیلتر بر روی تمام پیکسل‌های تصویر اعمال شود به اصطلاح کل تصویر فیلتر شده است.



شکل ۱۸: یک فیلتر 3×3 با ضرایب دلخواه و نحوه اعمال آن بر روی یک پیکسل

یک فیلتر معروف که از آن نیز استفاده خواهیم نمود، فیلتر سوبل^۳ یا فیلتر لبه‌گیر می‌باشد. این فیلتر لبه‌ها را در تصویر آشکار می‌سازد. فیلتر سوبل افقی لبه‌های افقی تصویر و فیلتر سوبل عمودی لبه‌های عمودی تصویر را آشکار می‌نماید. در یک تصویر و تاثیر فیلتر سوبل بر آن دیده می‌شود.

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

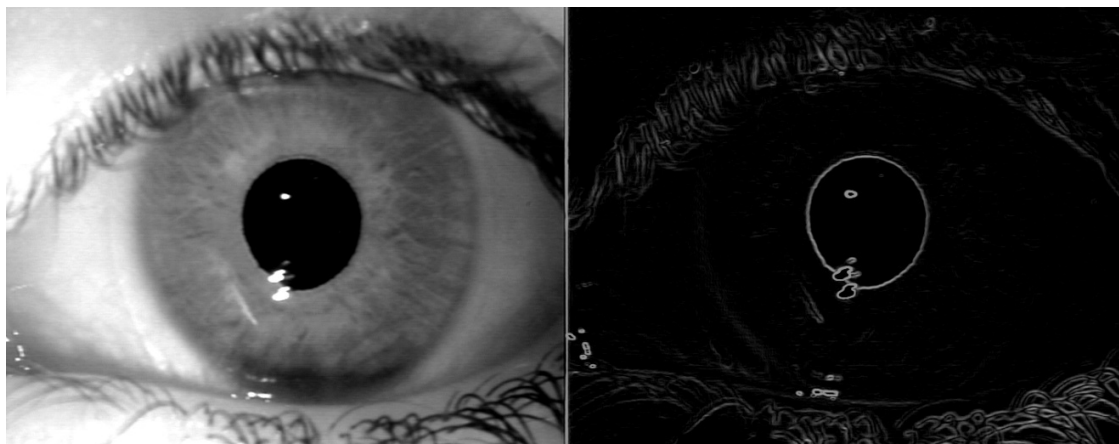
1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

شکل ۱۹: فیلتر سوبل افقی (سمت راست) و سوبل عمودی (سمت چپ)

¹ Thresholding

² Threshold value

³ Sobel



شکل ۲۰ : یک تصویر با فیلتر سوبل (سمت چپ تصویر اصلی می باشد).

آنچه گفته شد معرفی مختصری بود از پردازش تصویر و اصطلاحات بکار رفته در پایان نامه. اما قبل از اتمام این قسمت لازم است به این نکته اشاره شود که چه تصویری برای ردیاب ساخته شده مناسب می باشد. در مواردی همچون تنظیم نبودن لنز دوربین و دستگاه و یا روشنایی بیش از حد محیط، تصویر گرفته شده از چشم دارای نویز بوده و یا از روشنایی^۱ نامناسب و کنتراست^۲ پایینی برخوردار می باشد. تصاویر کنتراست پایین تصاویری هستند که در آنها اختلاف کمترین و بیشترین سطح روشنایی کم است. در اینگونه موارد تشخیص مردمک و گلینت و سایر اجزای چشم با مشکل مواجه می شود، هرچند که می توان تا حدودی قبل از شروع عملیات ردیابی چشم، این مشکلات را بصورت نرم افزاری برطرف نمود.

بنابراین داشتن تصویر مناسب از چشم پیش فرض اصلی عملیات در ردیاب ساخته شده می باشد. تصویر گرفته شده که عملیات پردازش بر روی آن انجام می شود، تصویر تک رنگ خاکستری می باشد.

۲. ۴. ۵ : تشخیص مردمک در تصویر

در این قسمت به چگونگی شناسایی مردمک در تصویر می پردازیم. هدف از شناسایی مردمک یافتن یک نقطه به عنوان مرکز قراردادی مردمک می باشد. آنچه مهم است، اینست که این نقطه برای همه وضعیت های مشابه مردمک، یکسان محاسبه شود. منظور از مرکز مردمک در ادامه پایان نامه، این نقطه می باشد. در ردیاب ساخته شده، با چند متد مختلف موقعیت دقیق مرکز مردمک قابل دستیابی است.

^۱ Brightness

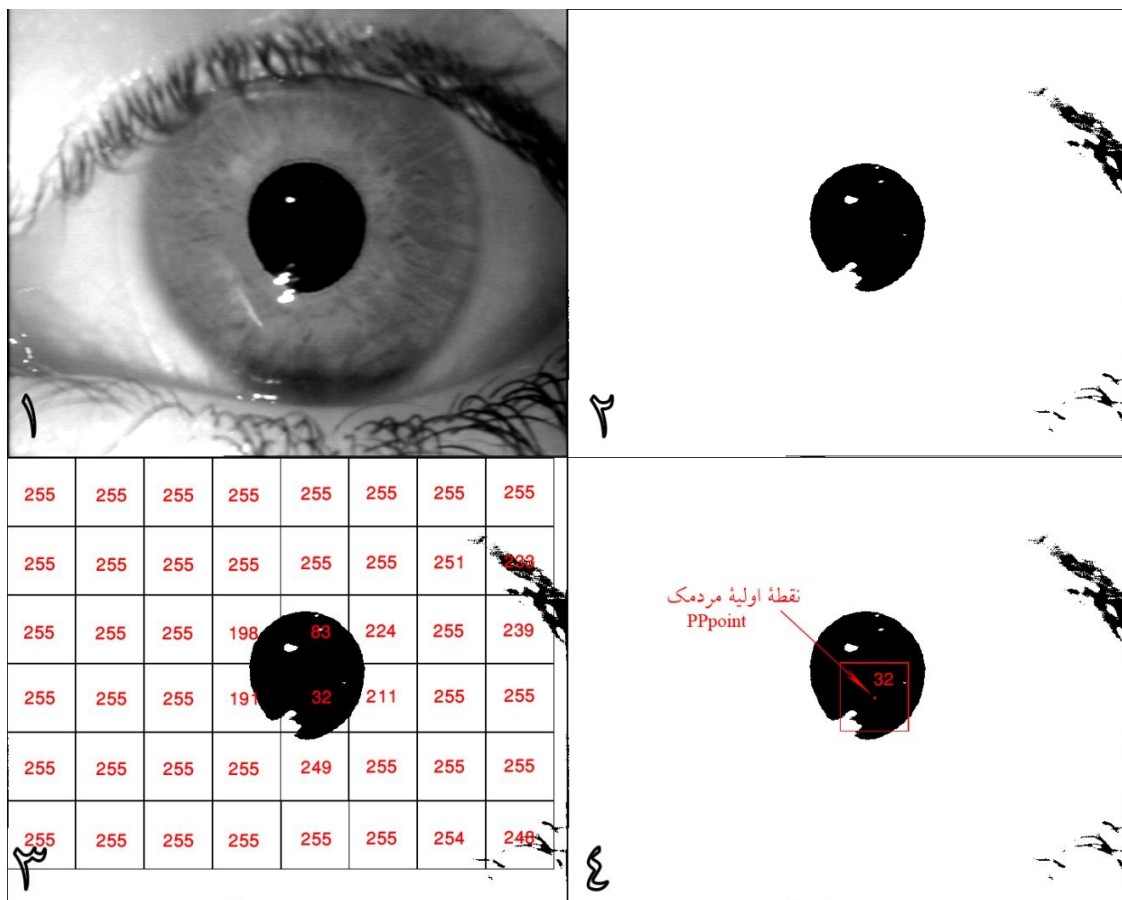
^۲ Contrast

منتها قبل ارائه این متدها، در قسمت بعدی ابتدا ناحیه حدودی مردمک و یک نقطه به عنوان نقطه شروع درون مردمک را با یک الگوریتم شناسایی می‌نماییم که در تمام متدها کاربرد دارد. ارزیابی عملکرد و مقایسه این متدها و الگوریتم‌های بکار رفته در آنها در بخش ۵ بررسی می‌گردد.

۲. ۴. ۵. ۱ : یافتن ناحیه حدودی مردمک در تصویر

در تصویر گرفته شده از چشم، مردمک به صورت یک ناحیه دایروی و یا در برخی حالت‌ها بیضی شکل تیره دیده می‌شود. قبل از هر چیز باید یک نقطه را درون مردمک پیدا کنیم تا هم ناحیه حدودی مردمک در تصویر شناسایی شود و هم جستجوی مرکز مردمک از آن نقطه آغاز گردد. بنابراین گام نخست را با یک آستانه‌گیری از تصویر با مقدار آستانه‌ای کم مثلاً حدود ۵ شروع می‌کنیم (شکل 21 تصویر دوم). پس از آن یک مربع با اندازه قابل تنظیم بر روی تصویر لغزانده می‌شود و میانگین روشنایی پیکسل‌های درون مربع در هر قدم محاسبه می‌گردد. میزان جابجایی مربع در هر قدم نیز قابل تنظیم می‌باشد. این میزان جابجایی برای آنکه کل تصویر اسکن شود، باید کمتر طول ضلع مربع باشد. اما هرچقدر این مقدار کمتر شود زمان محاسبات بیشتر می‌گردد. به صورت پیش فرض طول ضلع مربع تقریباً برابر با قطر حدودی مردمک و جابجایی مربع در هر قدم برابر با ۲۵٪ این مقدار در نظر گرفته می‌شود. پس از پایان عملیات، مربع با کمترین میانگین روشنایی به عنوان ناحیه حدودی مردمک در نظر گرفته شده و محل تقاطع اقطار مربع به عنوان نقطه‌ای درون مردمک مد نظر قرار می‌گیرد تا در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گیرد. در تصویر سوم از شکل ۲۱ تصویر آستانه‌گیری شده و اسکن شده توسط مربع‌ها نشان داده شده است. برای مفهوم‌تر شدن تصویر واجتناب از شلوغ شدن آن، اندازه مربع‌ها کوچک‌تر و جابجایی در هر قدم نیز برابر با طول ضلع مربع‌ها در نظر گرفته شده است.

در قسمت‌های بعدی منظور از نقطه PPpoint یا نقطه اولیه مردمک (Primary Pupil Point)، همین نقطه‌ایست که در این قسمت درون مردمک پیدا نموده‌ایم.



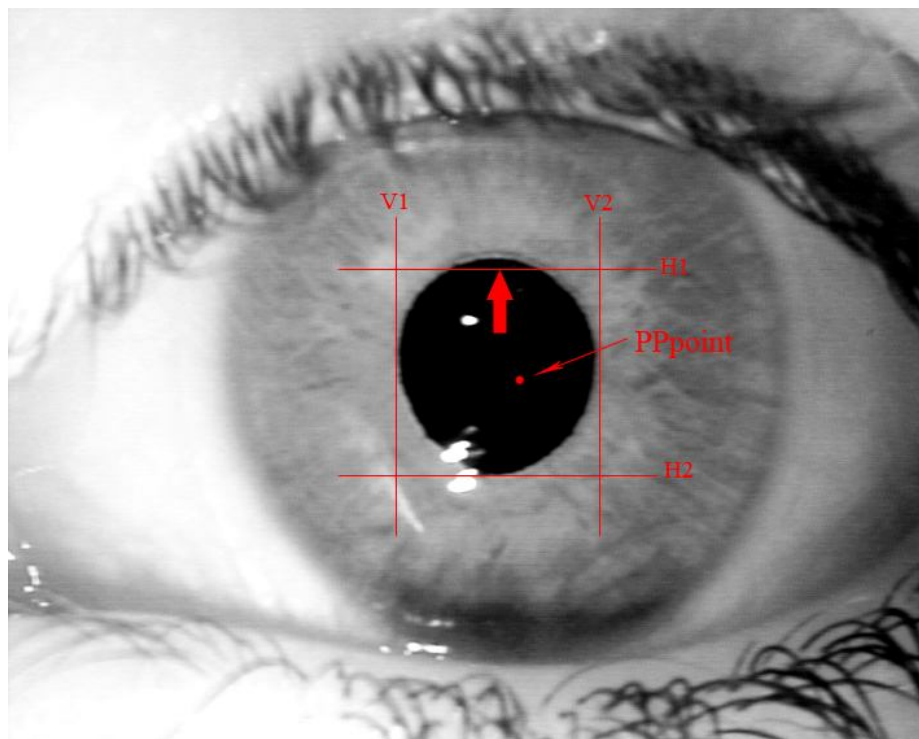
شکل ۲۱: یافتن ناحیه حدودی مردمک و یک نقطه درون آن

۲. ۴. ۵. ۲: یافتن مرکز مردمک با متد چهار ضلعی محیطی

در این روش یک چهار ضلعی بر مردمک محیط می‌شود و مرکز چهارضلعی به عنوان نقطه مرکزی مردمک فرض می‌گردد. برای این منظور از نقطه اولیه مردمک به جستجوی نقاط کناری چپ، راست، بالا و پایین مردمک می‌پردازیم. این کار را یا بر روی تصویر آستانه‌گیری شده انجام خواهیم داد و یا بر روی تصویر اصلی.

از PPpoint دو خط عمودی ($V1, V2$) و دو افقی ($H1, H2$) به ضخامت یک پیکسل، به سمت کناره‌های تصویر حرکت می‌کنند. پس از هر واحد حرکت، در هر خط، تعداد پیکسل‌هایی که روشنایی آنها در محدوده روشنایی مردمک می‌باشد شمارش می‌شود. چنانچه در هر کدام از خطها، تعداد این پیکسل‌ها به کمتر از ۳ پیکسل برسد، آن خط متوقف شده و موقعیت افقی و یا عمودی آن ذخیره می‌گردد. در شکل ۲۲ سه خط به کناره‌های مردمک رسیده و خط $H1$ در حال رسیدن به مرز بالایی مردمک است.

طول این خطها قابل تنظیم می‌باشد و تقریباً کمی بزرگتر از قطر تقریبی مردمک در نظر گرفته می‌شود. پس از محیط کردن چهارضلعی بر مردمک، محل تقاطع اقطار چهارضلعی را به عنوان مرکز مردمک در نظر می‌گیریم. این نقطه را PC یا Pupil Center می‌نامیم.



شکل ۲۲: یافتن چهار گوشه مردمک به کمک خطوط

۲. ۴. ۵. ۲. ۱: رفع جابجایی انفرادی خطوط

آنچه که در این روش باید مورد توجه قرار گیرد، تشخیص حرکت واقعی مردمک است، چرا که با داشتن خطا در هر کدام از خطها و جابجایی آن خط، موقعیت مرکز چهارضلعی یا همان مرکز قراردادی مردمک (PC) تغییر می‌کند هر چند که مردمک در تصویر ثابت می‌باشد. اگر در تصویر، مردمک واقعاً جابجایی عمودی داشته باشد، دو خط افقی $H1, H2$ هر دو تغییر موقعیت می‌دهند، همچنین در جابجایی افقی مردمک، دو خط عمودی $V1, V2$ هر دو تغییر موقعیت می‌دهند. بنابراین حرکت تنها یکی از دو خط عمودی و یا تنها یکی از دو خط افقی به عنوان خطای اندازه‌گیری تلقی می‌گردد. برای حذف کردن این خطا موقعیت خطوط در هر فریم، ذخیره شده و در فریم بعدی با موقعیت جدید آنها مقایسه می‌گردد، چنانچه تنها یکی از دو خط افقی جابجایی داشته باشد، مقدار قبلی موقعیت آنرا در نظر می‌گیریم. برای دو خط عمودی نیز همین کار را انجام می‌دهیم.

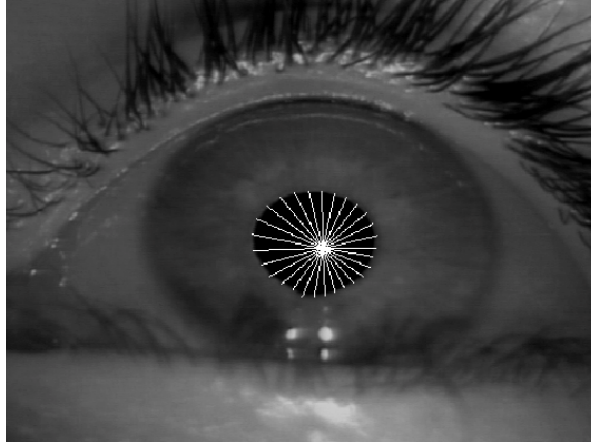
۲. ۴. ۵. ۲ : تشخیص تغییرات قطر مردمک و رفع خطای آن در این روش

یک حالت دیگر که ممکن است اشتباهاً جابجایی مردمک به حساب آید، تغییر قطر مردمک می باشد. مثلاً هنگامیکه قطر مردمک زیاد می شود، لزوماً خطوط عمودی و افقی به یک میزان جابجا نمی شوند و در نتیجه نقطه PC جابجا می گردد. علت اصلی این امر نیز اینست که مردمک به دلیل کروی بودن گره چشم همیشه از زاویه روبرو دیده نمی شود و ممکن با زاویه مایل دیده شود. بنابراین لزوماً جابجایی خطوط در یک تغییر قطر مشخص مردمک به یک میزان نمی باشد. برای رفع این خطای احتمالی برخی از حالت های جابجای خطوط نسبت به هم را شناسایی کرده و موقعیت نقطه PC را در آن فریم ها تغییر نمی دهیم.

جابجایی هر خط را نسبت به فریم قبلی اندازه گیری کرده و آنها را $dH1, dH2, dV1, dV2$ می نامیم. هنگامیکه مردمک در تصویر جابجا شود، جابجایی هر دو خط $V1, V2$ در یک جهت بوده و جابجای هر دو خط افقی $H1, H2$ نیز در یک جهت، یعنی $dH1 \times dH2 > 0$ و $dV1 \times dV2 > 0$. اما در تغییر قطر مردمک این جابجایی ها در جهت عکس یکدیگر می باشد، یعنی $dH1 \times dH2 < 0$ و $dV1 \times dV2 < 0$. بنابراین تغییر قطر مردمک قابل تشخیص بوده و در فریم هایی که مردمک نسبت به فریم قبلی تغییر قطر داده مرکز مردمک (PC) را تغییر نداده و مقدار آن را از فریم قبلی می گیریم.

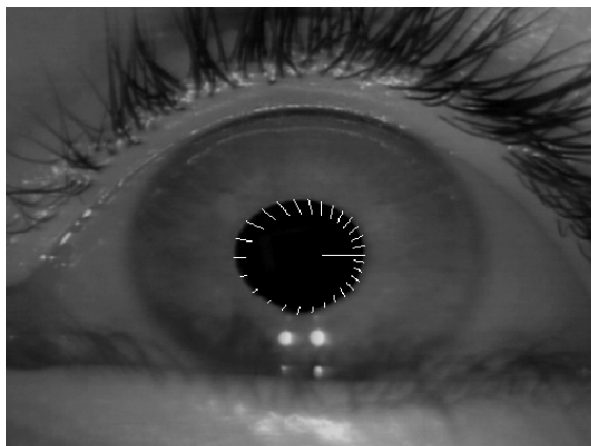
۲. ۴. ۵. ۳ : یافتن آرایه ای از نقاط مرزی مردمک

یافتن مرکز مردمک با دو متد برازش دایروی و بیضوی نیازمند داشتن آرایه ای از نقاط مرزی مردمک می باشد. برای اینکار از نقطه PPpoint برای شروع جستجوی نقاط مرزی مردمک استفاده می نمایم بگونه ای که از این نقطه شعاع هایی با اختلاف زاویه مشخص خارج نموده و بر روی هر شعاع به دنبال نقطه ای می گردیم که اختلاف رنگ پس از آن مشاهده می شود، یعنی رنگ تیره داخل مردمک به رنگ روشن عنبیه در تصویر تبدیل می گردد. این نقطه به عنوان یک نقطه از مرز مردمک که بر روی آن شعاع واقع است ذخیره می گردد. با اجرای این عمل بر روی هر شعاع یک نقطه از مرز مردمک بدست می آید. در شکل ۲۳ این فرایند نشان داده شده است.



شکل ۲۳: جستجوی نقاط مرزی مردمک

اما از آنجا که در این فرایند تعداد زیادی نقطه می‌بایستی کنترل شود، زمان پردازش تا حدی بالا می‌رود که می‌توان با یک ایده آن را بهینه نمود، به این صورت که اگر در شعاع اول نقطه مرزی در فاصله r_1 از PPpoint قرار داشته باشد، در شعاع دوم دامنه جستجو را به $[r_1 - \delta, r_1 + \delta]$ کاهش می‌دهیم، چنانچه در این بازه نقطه مرزی در فاصله r_2 یافت شود، در شعاع سوم نیز بازه جستجو را $[r_2 - \delta, r_2 + \delta]$ قرار می‌دهیم. به این ترتیب زمان جستجو بسیار کمتر و در حدود $\frac{1}{4}$ حالت پیش می‌شود. البته در هر شعاع چنانچه در بازه مربوطه نقطه‌ای یافت نشود، جستجو را از PPpoint آغاز می‌کنیم. در شکل ۲۴ نمونه‌ای از این فرایند نشان داده شده است.

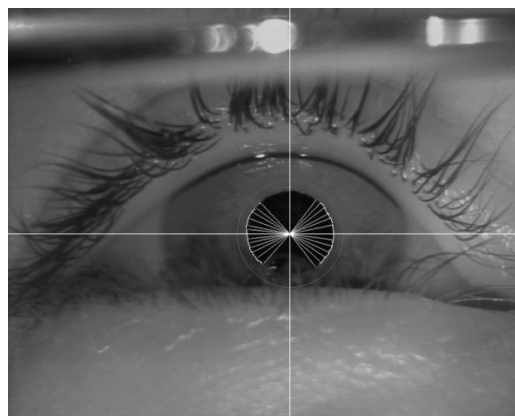


شکل ۲۴: جستجوی بهینه شده نقاط مرزی مردمک

البته در این روش برای آنکه نقاط مرزی مردمک با دقت مطلوبی پیدا شود، می‌بایستی از جستجوی نقاط در محدوده گلینت صرف نظر کرد که محدوده گلینت نیز از فریم قبلی بدست آمده است.

از آنجایی که نقطه اولیه PPpoint لزوماً در مرکز مردمک قرار ندارد، لذا در آن قسمت از مرز مردمک که به PPpoint نزدیکتر است نقاط مرزی یافت شده به هم نزدیکتر خواهند بود و به عکس در آن بخش از مرز مردمک که از PPpoint دورتر است فاصله نقاط مرزی از هم بیشتر خواهد بود. این بدین معنی است که در بخشی از مرز مردمک نقاط بیشتر و در طرف دیگر نقاط کمتری یافت می‌گردد. این ناهمگونی باعث می‌شود که مرکز مردمک محاسبه شده در مراحل بعدی دچار لرزش و جابجایی زیادی در طول زمان شود. برای رفع این مشکل روش‌های برازش را پس از اعمال روش چهارضلعی محیطی اعمال می‌کنیم. بگونه‌ای که ابتدا مکان مرکز مردمک را به روش چهار ضلعی محیطی پیدا نموده و سپس بجای نقطه PPpoint از این مرکز شعاع‌های جستجو را خارج می‌نماییم.

نکته دیگری که لازم است به آن اشاره نمود، اینست که در برخی افراد که دارای چشمان باریک بوده و یا مژه‌های بلندی دارند و یا افراد عینکی که ناچاریم زاویه دوربین را با خط دید بیشتر نموده و تصویر را از پایتتر گرفت، مرز بالایی و پایینی مردمک در تصویر در اکثر مواقع در زیر پلک‌ها و یا مژه‌ها پنهان گشته و یافتن نقاط مرزی در این نواحی با مشکل مواجه می‌شود. برای اجتناب از چنین حالت‌هایی زاویه جستجوی نقاط مرزی را همانند شکل 25، محدود کرده و از یافتن نقاط بالایی و پایینی مرز مردمک صرف نظر می‌نماییم.



شکل 25: جستجوی نقاط مرزی مردمک با صرف نظر از نواحی بالایی و پایینی

۲ . ۴ . ۵ . ۴ : برازش به روش مینیمم مجموع مربعات^۱ و برازش به روش رانسک^۲

برای برازش یک مدل با معادله‌ای خاص چون دایره و یا بیضی بر روی N نقطه با روش مینیمم مجموع مربعات، در واقع پارامترهای معادله آن مدل را بگونه‌ای بدست می‌آوریم که مدل بدست آمده کمترین

¹ Least Square Fitting

² RANdom SAMple Consensus (RANSAC)

فاصله را از نقاط داشته باشد. در واقع فاصله نقاط تا مدل را کمینه می‌نماییم. مثلاً با فرض مدل بیضی زیر:

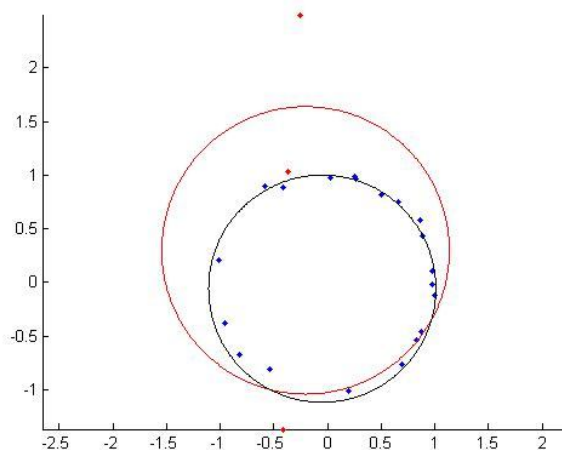
$$f(p, a) = x^T a = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (2-1)$$

$$x = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]^T, \quad p = [x, y]^T, \quad a = [a, b, c, d, e, f]^T$$

و با فرض نقاط $p_1, p_2, \dots, p_N$ و یا به عبارتی $p_i = [x_i, y_i]^T$ و فواصل $D(p_i, a)$ نقاط تا منحنی، بهترین a را برای کمینه شدن مجموع مربعات فواصل بدست می‌آوریم، یعنی $\sum_{i=1}^N [D(p_i, a)]^2$ را کمینه می‌نماییم.

روش رانسک نیز که نخستین بار در سال ۱۹۸۱ میلادی توسط فیشلر و بولز مطرح شد [47]، در مواردی استفاده می‌گردد که در میان داده‌هایمان تعدادی داده پرت داشته باشیم. این روش نخستین بار توسط دانگنگ لی [48] در ردیابی چشم مورد استفاده قرار گرفت. مراحل این روش اینگونه است که: ابتدا از میان داده‌ها تعدادی داده بصورت رندوم انتخاب شده و یک مدل بر آنها برازش می‌شود. پس از آن سایر داده‌ها با این مدل سنجیده شده و داده‌هایی را که فاصله آنها تا مدل بدست آمده قابل قبول باشد شناسایی می‌شوند. این مراحل، یعنی انتخاب تعدادی داده به صورت رندوم و برازش و بررسی سایر داده‌ها با مدل بدست آمده را به دفعات زیادی تکرار کرده و در پایان مدلی را که کمترین فاصله را نسبت به سایر داده‌ها در مرحله مربوطه داشته به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌گردد. تاثیر داده‌های پرت بر روی مدل در روش رانسک بسیار کمتر از روش یک مرحله‌ای مینیمم مجموع مربعات می‌باشد.

برای مثال در شکل ۲۶ بر روی تعدادی نقطه یکبار با روش مینیمم مجموع مربعات و یکبار با روش رانسک یک دایره برازش می‌شود. در میان نقاط، سه نقطه پرت وجود دارد که با رنگ قرمز نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، روش رانسک با دایره سیاه بسیار مقاوم‌تر از روش یک مرحله‌ای مینیمم مجموع مربعات با دایره قرمز، در برابر داده‌های پرت عمل نموده است.



شکل ۲۶: برازش دایروی بر روی تعدادی نقطه به روش معمولی مینیمم مجموع مربعات (دایره قرمز رنگ) و روش رانسک (دایره سیاه رنگ)

۲ . ۴ . ۵ . ۵ : یافتن مرکز مردمک با متد برازش دایروی

با داشتن آرایه نقاط مرزی مردمک، می توان یک دایره به آنها برازش نمود. این برازش می تواند یا با مینیمم مجموع مربعات صورت گیرد و یا با روش رانسک. در نهایت مرکز دایره بدست آمده به عنوان مرکز مردمک در نظر گرفته می شود.

۲ . ۴ . ۵ . ۶ : یافتن مرکز مردمک با متد برازش بیضوی

همچنین می توان بجای دایره از مدل بیضی برای مردمک استفاده نموده و یک بیضی بر نقاط مرزی مردمک برازش کرد. فصل مشترک دو قطر بیضی نیز می تواند به عنوان مرکز مردمک تلقی گردد.

۲ . ۴ . ۵ . ۷ : یافتن مرکز مردمک با متد میانگین نقاط مرزی

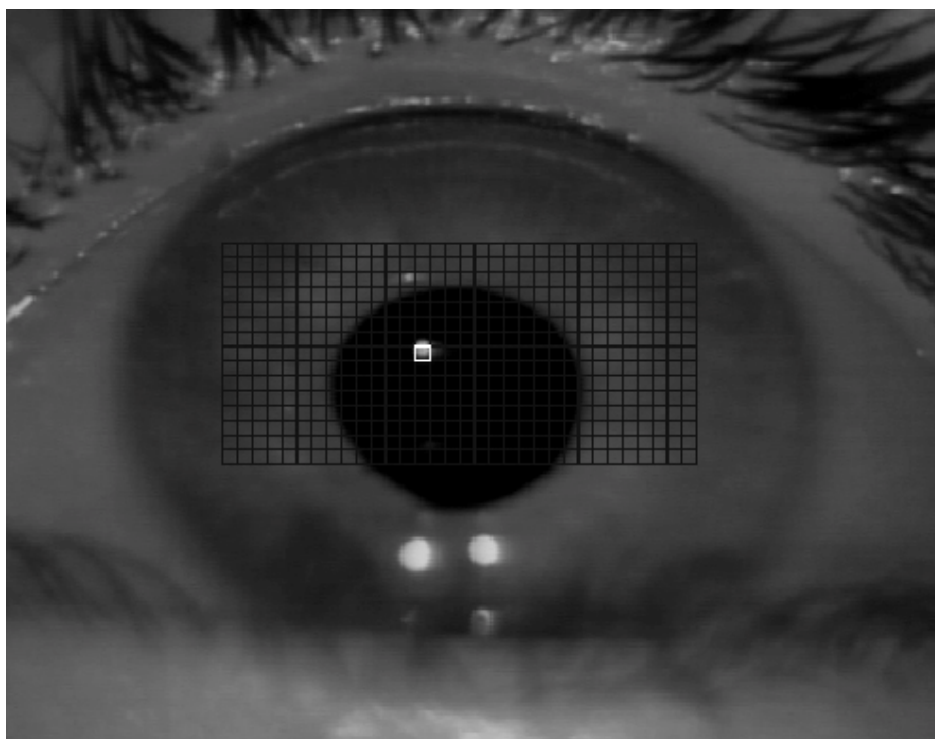
در این روش همانند روش چهارضلعی محیطی، مرکز مردمک با روش ساده میانگین گیری بدست می آید. با این تفاوت که در روش چهارضلعی محیطی میانگین چهار نقطه گرفته می شود ولی در این روش از آرایه نقاط مرزی استفاده کرده و میانگین آنها را به عنوان مرکز مردمک قرارداد می کنیم. در این حالت جابجایی چند نقطه در آرایه نقاط، تغییرات کمتری را نسبت به جابجایی ۴ نقطه کناری در روش چهارضلعی محیطی در نتیجه ایجاد می نماید.

۲. ۴. ۶ : تشخیص گلینت در تصویر

برای تشخیص گلینت و مرکز آن در تصویر نیز همچون مردمک عمل نموده بگونه‌ای که ابتدا موقعیت حدودی گلینت در تصویر را شناسایی نموده و سپس به شناسایی مرکز آن می‌پردازیم.

۲. ۴. ۱ : تشخیص ناحیه حدودی گلینت

از همان روشی که در بخش ۲. ۴. ۵. ۱ برای یافتن ناحیه حدودی مردمک استفاده نمودیم در اینجا نیز برای تشخیص ناحیه حدودی گلینت استفاده می‌نماییم، با این تفاوت که ناحیه جستجو را بجای کل تصویر به یک ناحیه اطراف مرکز مردمک و مربع‌های جستجو را کوچکتر و به اندازه گلینت در نظر می‌گیریم.

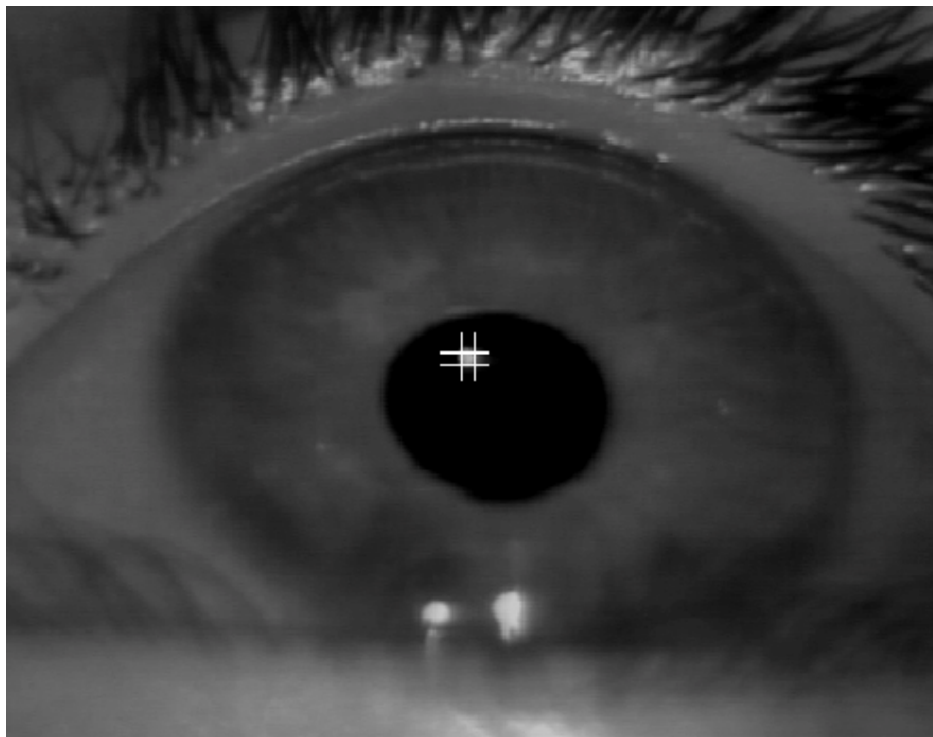


شکل ۲۷: یافتن ناحیه حدودی گلینت در اطراف مردمک

۲. ۴. ۲ : تعیین مرکز گلینت

حال که یک نقطه داخل گلینت یافته‌ایم، می‌توانیم از روش چهارضلعی محیطی برای یافتن مرکز گلینت استفاده نماییم. چهار خط از فاصله‌ای مشخص به سمت نقطه اولیه حرکت کرده و چنانچه تعداد پیکسل‌های روشن (روشنایی گلینت) در هر خط از ۲ یا ۳ پیکسل بیشتر شود، آن خط متوقف شده و

مختصات خط به عنوان مختصات آن لبه از گلینت تلقی می‌گردد. در پایان ۴ گوشه بالا، پایین، چپ و راست گلینت را شناسایی نموده و مرکز گلینت را مرکز چهارضلعی بدست آمده فرض می‌نماییم.



شکل ۲۸: یافتن مرکز گلینت با روش چهارضلعی محیطی

۲. ۴. ۷: فیلتر حذف حرکات انفرادی گلینت

این فیلتر برای کاستن خطای ناشی از قابلیت تکرار ضعیف الگوریتم‌های شناسایی مرکز مردمک و گلینت در نظر گرفته شده است که در برخی موارد استفاده از آن مفید خواهد بود. قابلیت تکرار ضعیف به این معنی است که چنانچه شخص به یک نقطه زل بزند، با وجود ثابت ماندن نقطه دید واقعی شخص، مراکز بدست آمده برای مردمک و گلینت ثابت نخواهند بود و ممکن است در هر فریم نسبت به فریم قبلی یک یا چند پیکسل جابجا شود. علت اصلی این مشکل، وجود نویز در تصویر و تغییرات آرام روشنایی در مرز مردمک و بالاخص گلینت می‌باشد. یعنی مردمک و گلینت مرز دقیقی با اطراف خود نداشته و همین امر باعث ایجاد خطا در شناسایی لبه‌ها و مرکز این دو می‌گردد.

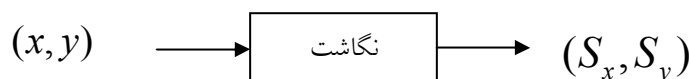
این فیلتر در واقع هنگامی در فریم جدید به شناسایی مجدد مرکز گلینت می‌پردازد که مرکز مردمک نسبت به فریم قبلی جابجا شده باشد. در واقع اجازه حرکات انفرادی را به گلینت نمی‌دهد. فرض اصلی این امر نیز این بوده که مردمک و گلینت همواره با هم دیگر در تصویر جابجا می‌گردند.

۲. ۴. ۸ : تشخیص پلک

در نرم افزار ردیاب مورد نظر، عدم شناسایی درست مردمک در تصویر، به عنوان معیاری برای تشخیص پلک زدن تلقی می‌گردد. چنانچه ناحیه حدودی مردمک در تصویر یافت نشود و یا آنکه در روش چهارضلعی محیطی، یکی از گوشه‌های مردمک یافت نشود و همچنین هنگامیکه نسبت طول به عرض چهار ضلعی محیطی مقداری غیر قابل قبول باشد، پلک زدن به حساب آمده و در این حالت در فریم مربوطه عملیات شناسایی مردمک و گلینت متوقف می‌گردد. در چنین فریمی دیگر مقادیر مرکز مردمک و مرکز گلینت مقداردهی نشده و مقدار آنها همان مقدار فریم قبلی خواهد ماند، به این ترتیب از پرش‌های ناگهانی نشانگر ماوس در هنگام پلک زدن، در حالت حرکت نشانگر با چشم، جلوگیری می‌شود.

۲. ۵ : نگاشت و کالیبراسیون

در قسمت‌های ۲. ۴. ۵ و ۲. ۴. ۶ یک نقطه به عنوان مرکز مردمک و یک نقطه به عنوان مرکز گلینت مشخص گردید چراکه معیار تعیین نقطه دید در روش بازتاب قرنیه-مردمک، بردار واصل مرکز مردمک به مرکز گلینت می‌باشد. اما این بردار باید توسط یک نگاشت برداری به فضای نقاط دید کاربر که در ردیاب مورد نظر نقاط صفحه نمایش می‌باشد، مرتبط گردد. این نگاشت برداریست چراکه دو خروجی افقی و عمودی دارد. بردار مردمک-گلینت را بردار $\vec{V} = (x, y)$ و نقطه دید کاربر در صفحه نمایش را نقطه $S = (S_x, S_y)$ می‌نامیم.



شکل ۲۹ : ارتباط مولفه‌های بردار مردمک-گلینت به نقطه دید با یک نگاشت

ساده‌ترین حالت اینست که $S_x = f(x)$, $S_y = g(y)$ یعنی مولفه افقی بردار V تأثیری در موقعیت عمودی نقطه دید نداشته همچنین مولفه عمودی بردار V نیز تأثیری در موقعیت افقی نقطه دید نداشته باشد. اما در عمل اینگونه نیست و نگاشت برداری مورد نظر دو بعدی نیز می‌باشد و مولفه افقی و عمودی بردار، هر دو در تعیین خروجی‌های نگاشت نقش دارند، یعنی $S_x = f(x, y)$, $S_y = g(x, y)$. حال ضوابط این نگاشت (f, g) نیز می‌تواند خود خطی و یا غیر خطی باشد.

در ردیاب ساخته شده از نگاشت غیر خطی مرتبه دو استفاده شده است. این نگاشت اولین بار توسط موریموتو [11] استفاده گردید و بصورت زیر است:

$$\begin{cases} s_x = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ s_y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \end{cases} \quad (2-2)$$

۱۲ پارامتر مجهول در این نگاشت برداری دوبعدی دیده می شود که طی یک مرحله کالیبراسیون تعیین می شوند.

کالیبراسیون که یک بار توسط کاربر می بایستی انجام شود به این گونه است که شخص به چند نقطه مشخص در صفحه خیره شده و درحالی که نشانگر را توسط ماوس در آن نقطه قرار داده است، با ماوس آن نقطه را کلیک می کند. البته انتقال نشانگر و کلیک کردن ماوس در این مرحله می تواند حذف شده و کالیبراسیون اینگونه انجام شود که کاربر تا زمانی که نقطه بعدی ظاهر نشده است، به نقطه چشمک زن در صفحه زل بزند. توضیحات بیشتر در این باره در بخش بعدی پایان نامه داده خواهد شد.

در واقع هر بار که کاربر به یک نقطه زل بزند، با داشتن موقعیت بردار و نقطه دید شخص عملاً یک دستگاه دو معادله و ۱۲ مجهول خواهیم داشت. تعداد نقاط گرفته شده در مرحله کالیبراسیون، در ردیاب مورد نظر ۹ نقطه و یا ۱۶ نقطه می باشد.

برای مثال با فرض ۹ نقطه در پایان عملیات، ۹ دستگاه یعنی ۱۸ معادله و ۱۲ مجهول خواهیم داشت، که با روش کمینه مجموع مربعات (Least Square Method) قابل حل می باشد. در این روش مجموع مربعات خطا را کمینه می کنیم. برای مثال تابع مجموع مربعات خطا برای S_x ها بصورت ذیل می باشد:

$$F = \sum_{i=1}^9 r_i^2 = \sum_{i=1}^9 (S_{xi} - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2))^2 \quad (3-2)$$

که در آن S_{xi} معرف S_x برای نقاط ۱ تا ۹ می باشد.

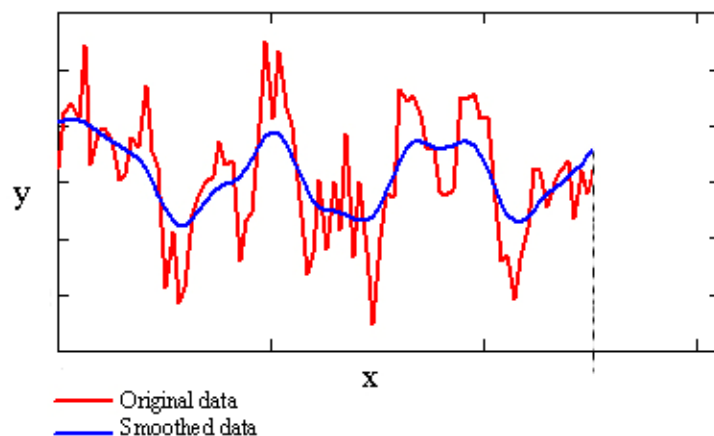
برای اینکه F کمینه گردد باید معادله (۳) برقرار باشد:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a_0} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial a_1} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial a_5} = 0 \end{cases} \quad (4-2)$$

به همین ترتیب ۶ معادله نیز برای K_y ها خواهیم داشت که در مجموع ۱۲ معادله و ۱۲ مجهول بدست می‌آید و دستگاه قابل حل می‌گردد.

۶.۲ : پردازش بر روی داده‌های ورودی و خروجی نگاشت

آنچه که در بخش مربوط به تشخیص مرکز مردمک و گلینت بدست آمد مختصات دو نقطه بود. این نقاط مستقیماً از هر فریم تصویر بدست می‌آمد. این داده‌ها در واحد زمان همچون یک سیگنال خشک^۱ و پرفت و خیز می‌باشند. علت این امر وجود نویزهایی در حد پیکسل، اختلافات جزئی در حد پیکسل میان دو فریم و در نهایت خطاهای اندازه‌گیری و تشخیص اجزا در تصویر می‌باشد. همین وضعیت برای خروجی گرفته شده از نگاشت یعنی نقاط دید محاسبه شده نیز وجود دارد. بنابراین آنچه در مرحله اول ضروری به نظر می‌رسد اعمال فیلترهای آماری بر روی این داده‌ها است تا از حالت خشک به سیگنالی نرم تبدیل گردند.



شکل ۳۰: یک نمونه از داده اولیه به همراه داده نرم شده آن

یکی از نرم‌کننده‌های معروف داده‌های رقمی، نرم‌کننده کرنل^۲ می‌باشد. نرم‌کننده کرنل گاوسی^۳ نوعی از این نرم‌کننده‌ها است که برای داده‌هایی که خطای آنها در یک محدوده مشخص می‌باشد و یک مدل قابل پیش‌بینی نداشته باشند، بسیار مناسب می‌باشد. میزان نرم کردن نیز با یک پارامتر قابل تغییر است. در اینجا تنها به بیان رابطه این نرم‌کننده و نحوه اعمال آن بر روی داده‌هایمان بسنده می‌کنیم. این نرم‌کننده از داده‌های قبلی برای تخمین داده کنونی استفاده می‌کند. از آنجایی که تعداد داده‌های ما در

^۱ Rough

^۲ kernel smoother

^۳ Gaussian kernel smoother

یک ردیاب چشم بلادرنک، از ابتدای شروع ردیابی دائماً در حال افزایش است و نا محدود فرض می گردد، همواره داده فریم کنونی و n فریم قبلی را مورد بررسی قرار می دهیم. n نیز بصورت اختیاری قابل تنظیم می باشد. مقادیر بیشتر از ۵۰ برای n در تخمین داده جدید تقریباً بی تأثیر بوده و تنها زمان محاسبه را افزایش می دهد، بنابراین مقدار آن کمتر از ۵۰ گرفته می شود. داده تخمین زده شده i ام توسط رابطه زیر بدست می آید:

$$y'_i = \frac{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right) \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right)} \quad (5-2)$$

که در رابطه بالا x_i شماره داده i ام، y_i داده واقعی i ام و b پارامتر تعیین کننده میزان نرم شدن داده می باشد. $K(t)$ نیز تابع کرنل نامیده می شود و یک مدل معروف آن کرنل گوس می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (0.37)} \cdot e^{\left(-\frac{t^2}{2 \cdot 0.37^2}\right)} \quad (6-2)$$

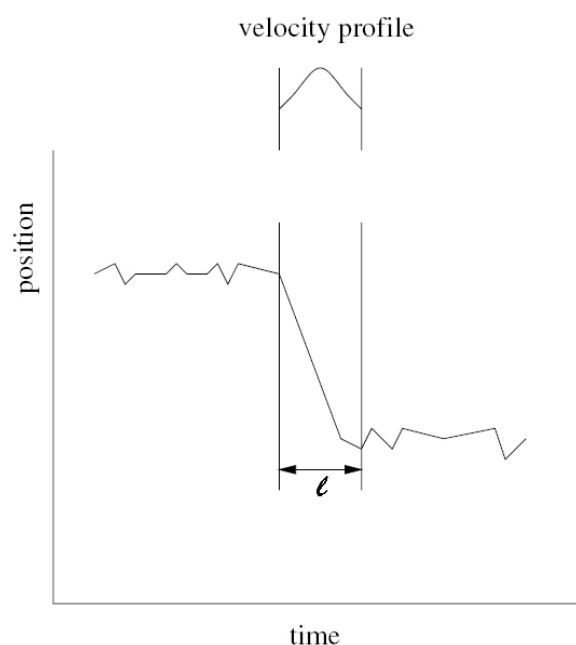
این رابطه برای داده تخمین زده شده در فریم کنونی به کمک n داده قبلی بصورت زیر درمی آید:

$$y' = \frac{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{n-j}{b}\right) \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{n-j}{b}\right)} \quad (7-2)$$

که y_j داده j ام بوده و y_n در واقع داده کنونی می باشد که y' مقدار تخمین زده آن است. امکان استفاده از این فیلتر نرم کننده در جاهای مختلفی از نرم افزار قرار داده شده است. که در فصل مربوط به نرم افزار با آنها آشنا می شویم.

۷.۲: تشخیص نقاط مکث^۱ و حرکات پرشی چشم^۲

همانگونه که در بخش مربوط به حرکات چشم گفته شد، حرکات معمولی چشم از دو فاز مکث و ساکاید تشکیل شده است. این دو فاز را نقاط مکث و حرکات پرشی نیز می‌توان خواند. علاوه بر تعیین نقطه دید کاربر، اگر بتوان این دو فاز را نیز در حرکات چشم تشخیص داد، استفاده‌های فراوانی چه در زمینه ارتباط با کامپیوتر و چه در زمینه آنالیز حرکات چشم، می‌توان از آن نمود. یک روش شناخته شده که برای ردیاب‌های بلادرنگ مناسب می‌باشد، تشخیص حرکات پرشی بر پایه سرعت حرکات چشم می‌باشد [49].



شکل ۳۱: نمونه‌ای از یک مولفه نقطه دید در صفحه بر حسب زمان، فاز پرش در بازه زمانی t میان دو فاز مکث دیده می‌شود. (تصویر اصلی از مرجع [۵] گرفته شده است.)

در این روش به اندازه‌گیری سرعت نقطه دید در یک بازه زمانی معلوم می‌پردازیم. نواحی که سرعت حرکت در آنها از یک مقدار آستانه بیشتر باشد به عنوان فاز پرشی قلمداد شده و نواحی با سرعت پایین‌تر از آن مقدار آستانه، فاز مکث قلمداد می‌شود.

¹ Fixation

² Saccade

در ردیاب ساخته شده سرعت نقطه حرکت میان دو فریم اندازه‌گیری می‌شود. با فرض بازه زمانی برابر میان فریم‌ها سرعت میان دو نقطه دید اندازه‌گیری شده را می‌توان از روی مسافت طی شده میان دو فریم نیز مورد مقایسه قرار داد. این جابجایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$ds = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (۸-۲)$$

که x_i موقعیت افقی نقطه دید اندازه‌گیری شده در فریم i ام می‌باشد. از آنجا که ردیاب مورد نظر بلادرنگ می‌باشد، همواره جابجایی نقطه دید کنونی نسبت به فریم قبلی اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه این جابجایی از یک مقدار قابل تنظیم بیشتر شود، چشم در فاز حرکت پرشی فرض می‌شود. لازم به ذکر است که این روش برای داده‌های نرم شده بسیار مناسب عمل می‌کند.

در ردیاب ساخته شده، طول مدت زمانی که چشم در هر کدام از فازهای حرکتی پرش و یا مکث قرار دارد، توسط یک تایمر اندازه‌گیری شده و قابل استفاده می‌باشد. بخصوص مدت زمان مکث چشم در یک نقطه می‌تواند به عنوان ابزاری باشد برای انتخاب، که در قسمت بعد به آن خواهیم پرداخت.

۸.۲ : کاربردها

اوایل از ردیاب‌های چشم به منظور پیشرفت‌های علمی تنها در آزمایشگاه‌ها و محیط‌های کنترل شده استفاده می‌شد. از اطلاعات بدست آمده از این سیستم‌ها در چشم پزشکی، عصب شناسی، روان-شناسی و شاخه‌های مرتبط به منظور مطالعه مشخصات اعصاب چشمی و ناهنجاری‌های آن و ارتباط آنها با پروسه‌های ادراکی و ذهنی در مغز استفاده می‌شد. امروزه کاربردهای فراوانی برای این سیستم‌ها بوجود آمده مثلاً در بازاریابی و تبلیغات، در مهندسی فاکتورهای انسانی، در ارزیابی اینترفیس‌های کامپیوتری و صفحات وب. اما هنوز تا حد زیادی محدود به آزمایشگاه‌ها می‌باشد. با آنکه این سیستم‌ها به عنوان ابزاری بسیار مفید برای ارتباط با کامپیوتر شناخته شده‌اند اما کاربردهای موفق و جدی آن‌ها بیشتر در زمینه‌های نظامی و یا یاری رساندن به معلولین جسمی دیده می‌شود [10].

داجوفسکی [5] از لحاظ کاربرد، سیستم‌های ردیاب چشم را به دو دسته تقسیم می‌کند:

(۱) کاربردهای تشخیصی (Diagnostic): تشخیص بیماری، ناهنجاری‌های جسمی، عصبی، روحی و...

(۲) کاربردهای ارتباطی (Interactive): تبادل اطلاعات میان ماشین و انسان و ...

کاربردهای تشخیصی به منظور استخراج اطلاعات از چشم برای سنجش بینایی و ادراکات شخص صورت می‌گیرد. و کاربردهای دستوری برای ایجاد ارتباط با دیگران یا کامپیوتر توسط حرکات چشم می‌باشد.

در ادامه به توضیح کاملاً مختصری در مورد کاربردهای ردیابی چشم در برخی زمینه‌ها صرفاً به منظور پی‌بردن به اهمیت این تکنولوژی در آینده بسنده می‌کنیم.

۲. ۸. ۱ : بازاریابی و تبلیغات

آنچه یک محقق در زمینه بازاریابی به آن نیاز دارد، اطلاع از نحوه برخورد مشتریان با نوع طراحی کالا و تبلیغات مربوط به آن است. مطالعات مربوط به ردیابی چشم می‌تواند به طراح در انتخاب رنگ، روشنایی و طراحی شکل کالا و... کمک‌های قابل توجهی بکند تا بتواند توجه بسیاری از مشتریان با سلیقه‌های مختلف را جلب نماید.



شکل ۳۲: استفاده از ردیاب چشم در بازاریابی [۵۰]

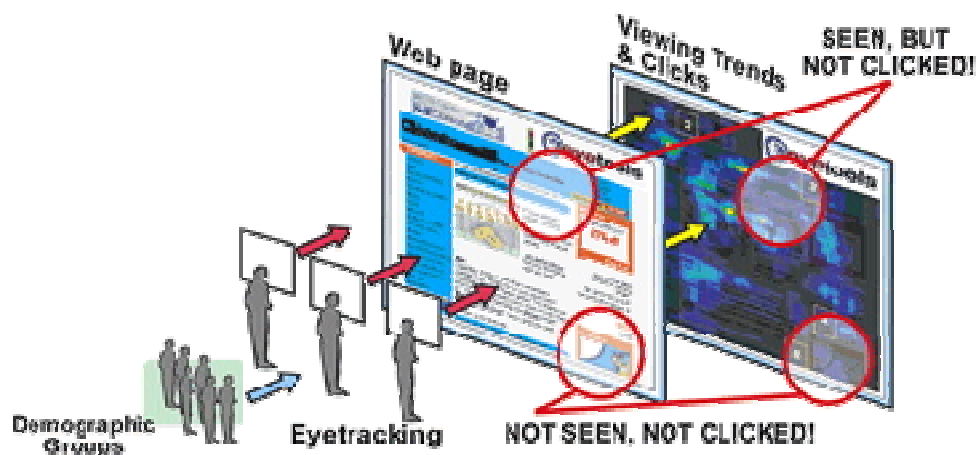
می‌توان با محرک‌های مناسب بینایی حس کنجکاوی بسیاری را جلب کرد. بسته بندی جذاب و دقیق تاثیر زیادی در انتخاب کالا و خرید آن دارد. یک ردیاب چشم می‌تواند در این زمینه بسیار کارآمد باشد، بخصوص با وجود رقابت سختی که امروزه میان تولید کنندگان وجود دارد. ردیابی چشم در امر تبلیغات بصری نیز نقش بسزایی داشته و اطلاعات مفیدی در مورد تاثیر تصاویر و بخش‌های مختلف آن بر بیننده، در اختیار ما قرار می‌دهد. اینکه چه مطالبی در تصویر آورده شود، رنگ و اندازه تصویر و اجزای آن چقدر باشد تا بیشترین جلب توجه را داشته باشد.



شکل ۳۳: نمایش مسیر حرکت چشم و نقاط خیره شدن برای یافتن نواحی مورد توجه در تصویر [۵۰]

۲. ۸. ۲ : طراحی صفحات وب

در طراحی وب سایت ها با توجه به حجم زیاد مطالب در صفحه، آنچه بسیار اهمیت دارد نحوه چیدمان مطالب در صفحه و طراحی درست و بهینه آن است. تحقیقات فراوانی نیز در زمینه طراحی مناسب صفحات وب و ارزیابی میزان کارایی آنها، هم اکنون در حال انجام است و امروزه ارزیابی وب سایت با کمک ردیابی حرکت چشم بسیار رواج پیدا کرده است.



شکل ۳۴: ارزیابی صفحات وب [۵۱]

۲. ۸. ۳ : فاکتورهای انسانی و ارگونومی

امروزه قابلیت اندازه گیری و تحلیل حرکات چشم بسیار در زمینه ارزیابی ارتباط متقابل بصری بین انسان و ماشین مورد نیاز است. در اتوموبیل، قطار، کشتی، هواپیما، اتاق های فرمان و کنترل ترافیک

هوایی و در واقع یک ردیاب حرکات چشم به نوعی یک ابزار اندازه‌گیری می‌باشد، بنابراین می‌تواند در کنار سایر تجهیزات اندازه‌گیری که در ارگونومی بکار گرفته می‌شود، از آن بهره گرفت. با این تفاوت که این ابزار نه تنها مشخصات فیزیکی و حرکتی چشم انسان را در اختیار محقق قرار می‌دهد، بلکه با آن می‌توان به برخی فرایندهای ادراکی شخص هم پی برد. که این امر در نهایت می‌تواند به تصمیم‌گیری صحیح تر ارگونومیست منجر شود.



شکل ۳۵: نقاط مورد توجه راننده در فرایند رانندگی [۵۰]

یکی از تحقیقات امید بخش در این زمینه در وسایل نقلیه بخصوص کابین‌های پرواز می‌باشد. تحقیق در مورد چگونگی و نحوه طراحی سیستم مقابل خلبان برای کاستن حواس پرتی و گیجی او و در نتیجه داشتن پرواز امن‌تر. همان‌گونه که در شکل زیر دیده می‌شود، سیستم‌های زیادی در یک کابین برای هدایت هواپیما در مقابل خلبان وجود دارد. که چیش صحیح این تجهیزات امری ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۳۶: تقسیم‌بندی بخش‌های مختلف کابین یک هواپیمای A330 که خلبان با آنها سرو کار دارد. [۵]

ارزیابی میزان کاربرد نرم‌افزارها^۱، ایمنی محصول^۲، کنترل محیط کار و ماشین^۳، کنترل وسایل نقلیه^۴، امنیت محیط^۵ کار نیز از دیگر کاربردهای این تکنولوژی در زمینه فاکتورهای انسانیست.

۲. ۸. ۴ : وسایل نقلیه

از ردیاب‌های چشم برای آموزش و تشخیص میزان مهارت راننده و خلبان و اطمینان از سرعت عمل او نیز استفاده می‌شود. نقش مفید این تکنولوژی در سیستم‌های شبیه‌ساز رانندگی^۶، خلبانی و ناوبری نیز بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۳۷: شبیه‌ساز رانندگی و پرواز [۵۰]

یک ردیاب چشم قادر به تشخیص خواب‌آلودگی و عدم توجه راننده می‌باشد. این در حالیست که علت بسیاری از تصادفات همین دو عامل است.

¹ Software usability

² Product safety

³ Machines / workplaces / plant control

⁴ Vehicle control (cars, airplanes, boats)

⁵ Workplace safety

⁶ Vehicle Simulators



شکل ۳۸: استفاده از ردیاب چشم برای ارزیابی مهارت در رانندگی [۵۰]

در زمینه‌هایی چون سیستم کنترل ایربگ^۱، ایمنی و وضعیت مسافر^۲، تنظیم موقعیت نسبت به چشم و راحتی بیشتر^۳، تشخیص هویت^۴، ارتباط متقابل با ماشین^۵ و غیره نیز، سیستم‌های ردیاب چشم نقش مفید خود را به اثبات رسانده‌اند.

۲. ۸. ۵: علوم کامپیوتر

تحقیقات گسترده‌ای در سالهای اخیر در زمینه ارتباط متقابل انسان و کامپیوتر^۶ و کاربرد ردیاب‌های چشم در این مقوله انجام شده است. یقیناً ردیاب‌های چشم به عنوان یکی از بهترین وسایل ارتباط با کامپیوتر، در آینده استفاده خواهد شد. ارتباط با کامپیوتر از طریق چشم در کنار سایر روش‌ها همچون صفحه کلید، ماوس، فرمان‌های صوتی و سیستم‌های لمسی، تحولی در زمینه اینترفیس‌های کامپیوتری تلقی می‌شود.

استفاده از حرکات چشم در فضای مجازی^۷، بازی‌های کامپیوتری، فروشگاه‌های اینترنتی، ارتباط با دیگران از طریق کامپیوتر و آموزش از طریق اینترنت نیز بسیار حائز اهمیت است.

^۱ Airbag control

^۲ Safety and passenger status

^۳ Position convenience (based on eye position)

^۴ Operator registration (identification)

^۵ Man-machine interaction

^۶ Human Computer Interaction (HCI)

^۷ Virtual Reality

استفاده از حرکت چشم برای جابجایی نمونه زیر میکروسکوپ و یا تغییر زاویه لنز دوربین از دیگر استفاده‌های ردیاب‌های چشم در سیستم‌های دیجیتال است. با قابلیت اندازه‌گیری حرکات مردمک چشم و با آگاهی از نقطه دید کاربر، گستره ارتباط کاربر با کامپیوتر و حجم اطلاعات قابل انتقال بسیار گسترده می‌شود. این تنها شروع بحث در مورد افزایش وسعت ارتباط کاربر با کامپیوتر است. قطعاً با مانیتور کردن کلیه حرکات کاربر و صدای کاربر می‌توان دامنه این ارتباطات را گسترش داد.

۲. ۸. ۶: ورزش

اگر شما یک محقق در زمینه ورزش هستید باید نگاه دقیق‌تری به حرکات تیمی و انفرادی ورزشکار داشته باشید. اندازه‌گیری و بهبود کارایی و راندمان یک ورزشکار نیازمند داشتن اطلاعات کامل بدنی، بیومکانیکی و رفتاری اوست. چون هماهنگی چشم با دست و بدن نقشی کلیدی در این زمینه دارد، یک ردیاب چشم، کمک چشم‌گیری به محقق و مربی در تشخیص اشتباهات ورزشکار و بهبود فعالیت‌های او خواهد داشت. مثلاً در ورزش‌های تویی باید بدانیم در موقعیت‌های مختلف تمرکز ورزشکار بر روی توپ است یا هدف. بنابراین ردیاب‌های چشم کاربرد زیادی در ورزش‌هایی همچون گلف، تنیس، بسکتبال، فوتبال و ... دارد.



شکل ۳۹: ردیاب چشم و کاربرد آن در ورزش [۵۰]

۲. ۸. ۷ : پزشکی

ردیاب‌های چشم به طور عمده‌ای در تحقیقات آزمایشگاهی، عصب‌شناسی، روانشناسی و چشم پزشکی استفاده می‌شوند.

می‌توان با ردیابی چشم به وجود بسیاری از ناهنجاری‌های جسمی و روحی و بیماری‌های عصبی و عضلانی پی برد. به طور خلاصه در fMRI، MEG، EEG، Pupillometry، Neuro-Ophthalmology، Neuro-Degenerative Diseases استفاده‌های فراوانی از آن می‌شود.

در چشم پزشکی تحقیقات در زمینه‌های تخصصی زیر نیز با کمک ردیاب‌های چشم امروزه ادامه دارد:

AMD

Vision Testing / Screening

Perimetry

Strabism

Oculomotor

Refractive Surgery

ردیاب چشم همچنین در زمینه‌هایی چون زبان‌شناسی و تحقیق در مورد فرایند مطالعه و نحوه پردازش تصاویر کمک شایانی به محققان می‌کند.

از آنجا که حرکات چشم شخص ارتباط تنگاتنگی با پروسه‌های ارادی و غیرارادی ادراکی مغز شخص دارد، تحقیقاتی نو در زمینه طراحی وسیله‌ای برای اندازه‌گیری احساسات و علاقه شخص و همچنین بررسی فرایندهای ادراکی^۱ مغز نیز انجام شده.

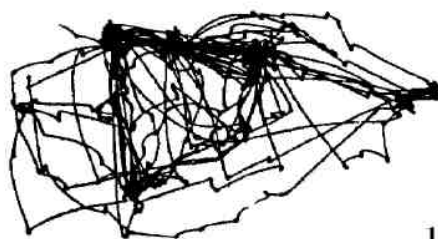
همچنین می‌توان به کاربرد آن برای معلولین اشاره کرد. باتوجه به پیشرفت روزافزون در دنیای دیجیتال و الکترونیک می‌توان بیش از پیش به راحت کردن فعالیت‌های روزمره معلولین کمک کرد. برای مثال ارتباطات یک معلول جسمی با محیط اطراف، می‌تواند با استفاده از یک سیستم ردیاب چشم و یک صفحه‌نمایش، به شدت افزایش یابد. او می‌تواند با چشم صحبت کند، ایمیل بزند، از اینترنت استفاده کند و یا حتی کنترل محیط را برعهده بگیرد: چراغ اتاقش را خاموش کند، درب اتاق را باز کند، ویلچرش را حرکت دهد و... .

^۱ Cognitive Studies

۲. ۸. ۸ : الگوهای حرکتی چشم

کاینمن [52] بطور کلی ۳ نوع تماشا و نگریستن را تعریف کرد:

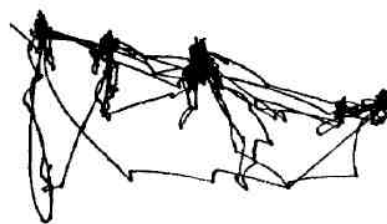
۱. تماشای بی اختیار (Spontaneous looking): هنگامیست که بیننده بدون هیچ منظور و هدف خاصی منظره و یا عکسی را نگاه می‌کند. مسلماً نقاطی از تصویر که حاوی اطلاعات بیشتری هستند و یا جلب توجه بیشتری می‌کنند نظر بیننده را جلب می‌کنند و آنچه که الگوی حرکتی چشم را در این شرایط تعیین می‌کند پیچیدگی، تازگی، عدم تناسب و اینگونه مشخصات است. هر چند که شناخت قبلی از تصویر نیز در این الگو دخیل است.
۲. تماشای متناسب با کار (Task-relevant looking): این تماشا هنگامی رخ می‌دهد که شخص به دنبال چیزی در تصویر می‌گردد و سوال و فکر خاصی در ذهن دارد. در یکی از آزمایشات یاربوس [53]، یک تصویر توسط شخصی با چند منظور متفاوت تماشا شده و هفت الگوی متفاوت بدست آمد. (شکل 40)
۳. الگوی فکر (Orientation of thought looking): هنگامی است که ناظر توجهی به منظره جلوی خود ندارد و چشم متناسب با آنچه در فکر او می‌گذرد حرکت می‌کند. مثلاً هنگامیکه از شخص خواسته می‌شود که کلمه‌ای را هجی کند کلمه را در ذهن تصور میکند و سپس چشم خود را از ابتدای کلمه تا آخر آن حرکت می‌دهد.



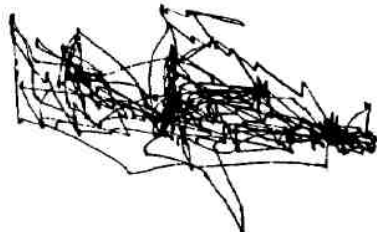
1



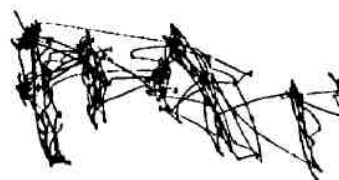
2



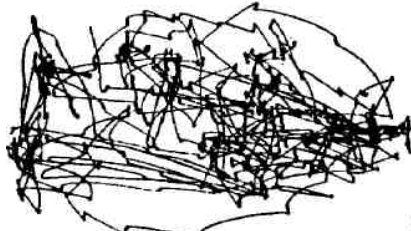
3



4



5



6



7

شکل ۴۰: الگوی حرکتی بدست آمده در آزمایش یاربوس [۵۳]

هر مرحله در حدود ۳ دقیقه به طول انجامید. (۱) تماشای آزاد (۲) تعیین رابطه خانوادگی افراد (۳) تعیین سن افراد (۴) قبل از ورود شخص جدید افراد مشغول چه کاری بودند (۵) بخاطر سپردن لباس افراد (۶) بخاطر سپردن مکان افراد و اشیاء در تصویر (۷) پی بردن به این مطلب که فرد تازه وارد چه مدت از خانواده دور بوده

شایان ذکر است که تحقیقات یاربوس خدمت شایانی به درک ما از الگوهای حرکتی چشم و ارتباط آنها با فکر و ادراک کرد. در اینجا می‌توان به ارتباط میان برخی کمیت‌های قابل اندازه‌گیری با ردیاب‌های چشم و ادراکات ذهنی شخص به ترتیب کاربرد آنها اشاره کرد.

تعداد نقاط مکث در کل تصویر در برخی کاربردها گویای نامنظم بودن تصویر و جستجوی ناموفق در آن است. در تصاویری که ترتیب قرارگیری اجزا نامناسب است، زمان جستجوی یک المان خاص در آن ارتباط عکس با تعداد کل نقاط مکث دارد.

درصد وجود حرکات پرشی در یک ناحیه نسبت به کل تصویر در برخی کاربردها مثل مطالعه گویای اهمیت آن ناحیه و کلمات می‌باشد.

مدت زمان بیشتر مکث و خیره شدن به یک نقطه یا ناحیه می‌تواند گویای پیچیدگی و طولانی بودن زمان درک محتوای آن نقطه باشد.

نسبت تعداد نقاط مکث در یک ناحیه کوچک یا یک نقطه، همانند کمیت دوم ذکر شده در بالا می‌تواند گویای اهمیت آن نقطه باشد.

مکث‌های کوتاه با حرکات پرشی کوتاه بین آنها در یک ناحیه می‌تواند گویای سادگی درک آن ناحیه باشد و جستجوی شخص برای کسب اطلاعات اضافی از آن باشد.

۹.۲ : ردیاب‌های چشم تجاری

با توجه به کاربردهای فراوان و روزافزون تجهیزات ردیاب چشم، شرکت‌های فراوانی اقدام به ساخت و تولید این سیستم‌ها به صورت تجاری نموده‌اند. با این حال هنوز ردیاب‌ها بصورت سیستم‌هایی دقیق، ارزان و ساده در نیامده‌اند و قیمتی در حدود ۲۰۰۰ دلار تا ۴۰۰۰۰ دلار دارند.

[40] Tobii، [50] SMI، [54] ASL و [55] LC چهار نمونه از شرکت‌های بزرگ تولید کننده به شمار می‌آیند.

۱۰.۲ : کارهای پیشین در زمینه طراحی ردیاب های تصویری ارزان قیمت برای

ارتباط کاربر با کامپیوتر

یکی از موضوعات مهم کنونی در زمینه ردیاب‌های چشم، قیمت تمام شده بالای این سیستم‌ها می‌باشد. قیمت ردیاب‌های تجاری هم اکنون بین ۵۰۰۰ دلار تا ۴۰۰۰۰ دلار می‌باشد. بنابراین یکی از گام‌های مهم که باید در جهت کاربردی نمودن و خانگی نمودن این تکنولوژی جدید برداشت تلاش در جهت ارزان‌تر نمودن ردیاب‌های چشم می‌باشد. [48] و [56]-[61] از جمله تلاش‌های اخیر در جهت ساخت ردیاب‌های ارزان قیمت می‌باشد.

قبل از هرچیز باید علل اصلی که در گران شدن سیستم‌های کنونی نقش دارد را شناسایی نمود که در [62] به خوبی به آنها اشاره گردیده است. هزینه‌های مربوط به: سخت‌افزار، تحقیقات، ساخت و تولید.

۱. سخت‌افزار: سخت‌افزار این سیستم‌ها عبارتند از یک یا دو دوربین با قدرت تفکیک بالا، فریم ریت بالا و حساس به طول موج مادون قرمز. لنز دوربین، منبع روشنایی مادون قرمز و مدار مربوطه و اجزای مکانیکی و نگهدارنده‌های سیستم.

۲. تحقیقات انجام شده، توسعه و بهبود روش‌ها: یک ردیاب چشم قابل اطمینان نیازمند هماهنگی میان بخش سخت‌افزار و نرم‌افزار می‌باشد. طراحی نرم‌افزار و پیاده‌سازی روش‌ها و متدها در بخش کالیبراسیون و آنالیز داده‌ها، پردازش تصویر و تحقیقات و مطالعات مربوطه، همگی نیازمند صرف زمان بوده و هزینه بر می‌باشد.

۳. هزینه‌های مربوط به تولید، بازاریابی و پشتیبانی محصول: این بخش بسیار هزینه بر بوده. تعداد فروش این سیستم‌ها چندان گسترده و زیاد نیست، همچنین از آنجایی که سیستم‌های موجود هنوز در شرایط مختلف ممکن است درست کار نکنند، نیازمند پشتیبانی و خدمات مداوم به کاربران می‌باشد.

از جمله کارهای اخیر در مورد ساخت ردیاب‌های ارزان قیمت، ردیاب چشم ارزان قیمتی با نام "ITU Gaze Tracker" می‌باشد که به منظور ارتباط با کامپیوتر در دانشگاه ITU دانمارک در سال ۲۰۰۹ میلادی ساخته شد که قابل ذکر می‌باشد. البته نرم‌افزار این سیستم تنها امکان حرکت نشانگر در صفحه نمایش را ممکن می‌سازد و امکان کلیک کردن و همچنین بخشهای جانبی و کاربردی در آن گنجانده نشده است.

در فصل بعد نرم‌افزار سیستم ساخته شده معرفی می‌گردد.

۳ : نرم افزار

تاکنون تنها به اندازه گیری نقطه دید کاربر بر روی صفحه نمایش پرداختیم. این امر به تنهایی نمی تواند ردیاب چشم را به یک عامل ارتباط کاربر با کامپیوتر^۱ تبدیل کند. آنچه امکان این ارتباط را فراهم می نماید تغییر موقعیت نشانگر ماوس به نقطه دید کاربر و قابلیت انتخاب یک نقطه با چشم می باشد. قبل از معرفی نرم افزار سیستم، اشاره ای به برخی تلاش های اخیر صورت گرفته در زمینه نرم افزارهای قابل استفاده با یک ردیاب چشم اشاره می شود، چراکه استفاده از یک ردیاب چشم به منظور برقراری ارتباط با کامپیوتر و عدم نیاز به ماوس، نیازمند تکنیک های جدیدی می باشد.

۳.۱ : تحقیقات پیشین در زمینه طراحی اینترفیس های مناسب جهت برقراری ارتباط

بهرتر با کامپیوتر به کمک چشم

بینایی انسان در انجام فعالیت های معمول روزانه، در کنار دست، انگشتان و سایر اجزاء، تنها برای دیدن استفاده می گردد. طراحی یک اینترفیس که تنها بتوان با چشم با آن ارتباط برقرار نمود مستلزم تشخیص برخی مشخصه های بینایی می باشد که با فرایند نگاه کردن معمولی تفاوت اندکی داشته است، چراکه انجام یک حرکت پیچیده، طولانی و خاص توسط چشم، غیر معمول و آزار دهنده خواهد بود و همانگونه که زای و دیگران [63] به آن اشاره نمودند، نامطلوب می باشد. برای استنباط برخی دستورات همچون کلیک کردن و یا فشار دادن یک دکمه، تنها از نگاه شخص و نقطه دید او، چه راهکارهایی موجود است؟

یکی از راه حل ها استفاده از تکنیک "Dwell-time" است که توسط هانسن [64] و ماجارانتا [65] مطرح شد. بگونه ای که شخص بر روی نقطه مورد نظر مدت زمان بیشتری خیره می شود و بنابراین مدت زمان مکث بیش از معمول بر روی یک نقطه به منزله یک دستور همچون انتخاب یا کلیک تلقی می گردد. این زمان آستانه نیز برای افراد مختلف متفاوت و قابل تنظیم می باشد. در رابطه با این تکنیک دو مسئله مطرح می گردد، یکی اینکه کاربرد در حین نگاه کردن و برقراری ارتباط با اینترفیس، دچار استرس روحی و پریشانی می شود. اینکه آیا مکثی که به هر دلیلی بر روی یک نقطه خاص نموده است، کلیک تلقی می گردد یا نه، نگرانی از اینکه در هنگام خیره شدن به یک نقطه بدون منظور

¹ Human-Computer Interface

انتخاب، زمان مکث از حد آستانه بیشتر نشود. مسئله دیگر تأخیری است که در اثر مدت زمان لازم برای انتخاب در طول انجام یک فرایند ایجاد می‌گردد. هرچند که این زمان سکون می‌تواند با کمی تمرین کمتر انتخاب شود اما باز هم یک تأخیر را در طول زمان ایجاد می‌نماید. بنابراین استفاده از این تکنیک تنها برای مواقعی توصیه می‌شود که شخص قادر به انجام هیچگونه فعالیت دیگری چون صحبت کردن و یا حرکت اجزای بدن نباشد. امروزه اکثر سیستم‌های ارتباطی برپایه ردیابی چشم، از تکنیک‌های چندگانه بدین منظور استفاده می‌کنند. استفاده همزمان از نقاط دید شخص در کنار ماوس [66]، صحبت [67] و صفحه کلید [68] برای برقراری ارتباط، اعمال دستور و انتخاب.

تکنیک "کوئیک گلنس"^۱ که توسط اوهنو [69] مطرح گردید یک تکنیک دو مرحله‌ای بوده و به اینگونه می‌باشد که شخص ابتدا بر روی نقطه مور نظر مکث کرده و سپس یک حرکت پرشی به یک ناحیه مورد نظر در صفحه به نام ناحیه انتخاب انجام می‌دهد. ناحیه انتخاب همیشه در صفحه معلوم بوده و کاربر به راحتی می‌تواند فرایند انتخاب را انجام دهد.

وجود خطا در سیستم‌های ردیاب تصویری و وجود نویز در آنها باعث شده روش‌هایی مبتنی بر قابلیت زوم در یک نقطه مورد نظر در فرایند انتخاب، به منظور انتخاب دقیقتر نقطه مورد نظر، مورد استفاده قرار گیرد. دو نمونه از این تکنیکها را میتوان در [68] و [70] مشاهده نمود. تکنیک هدف‌های بزرگ‌شونده نیز که توسط مینیوتاس و اسپاکو [71] مطرح گردید، که تا ۵۷٪ کاهش خطا را در بر داشته ولی روش سریعی برای برقراری ارتباط نمی‌باشد.

اجمالاً دسته‌ای از فعالیت‌ها در این زمینه به منظور توانبخشی معلولین بوده و هدف کمک به این دسته از افراد برای برقراری ارتباط با رایانه و طراحی ایتترفیس‌های منایب برای اینگونه افراد می‌باشد. ایتترفیس‌های ویژه تایپ با قابلیت تکلم نوشتار نمونه‌ای از این دسته می‌باشند. در این میان می‌توان به نرم‌افزارهای GazeTalk [72]، StarGazer [70] و Dasher [73] اشاره نمود که می‌توان با دو نمونه اول بین ۶ تا ۱۵ حرف در دقیقه و با نمونه سوم تا ۲۵ حرف در دقیقه تایپ نمود.

ایتترفیس‌های دیگری نیز چون [74] به منظور انجام فعالیت‌هایی چون دیدن عکس، کار با فایل‌های صوتی و همچنین بازی طراحی گردیده اند و همچنین نرم افزارهای تجاری که ویژه شرکت‌های بزرگ تولید کننده ردیاب‌های چشم، می‌باشند نمونه‌های دیگری از این ایتترفیس‌ها به شمار می‌روند.

¹ Quick Glance Selection Method

۲.۳ : نرم افزار سیستم ساخته شده

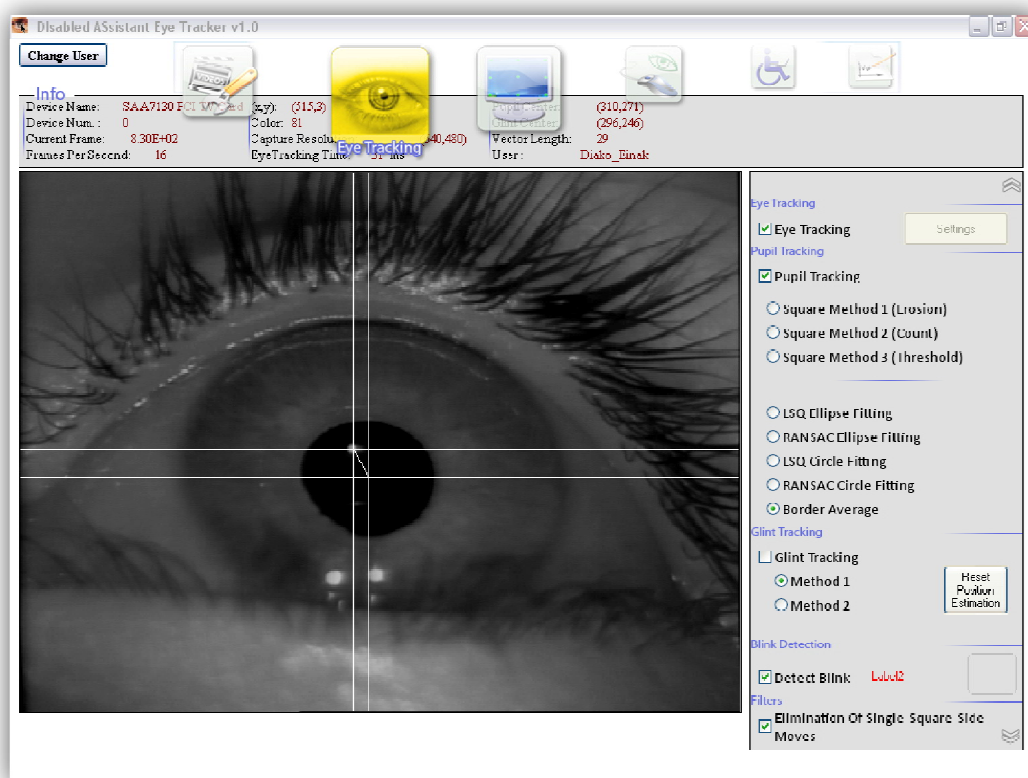
در این بخش، نرم افزار دستگاه و قابلیت‌های آن معرفی می‌گردد. نرم افزار طراحی شده برای سیستم ردیاب ساخته شده با زبان ویژوال بیسیک نوشته شده است و از ویژگی‌های قابل ذکر آن امکانات مختلفی است که یکجا در نرم افزار گنجانده شده است. بخش‌های ویژه تایپ، بازی و سرگرمی، دیدن آلبوم عکس و بخش مربوط به پخش فایل‌های صوتی و همچنین امکانات جانبی همچون رسم نمودار از داده‌های مربوط به ردیابی چشم و برخی مشخصات ظاهری چشم و بخش مربوط به رسم الگوهای حرکتی چشم در طول زمان هنگام دیدن فایل‌های ویدئویی و عکس، همگی از جمله امکانات این نرم‌افزار به شمار می‌رود. در ردیاب ساخته شده نحوه کلیک کردن و یا انتخاب با چشم با سه روش مختلف امکان پذیر گشته است. کلیک کردن با روش "Dwell-time" و همچنین کلیک کردن به کمک پلک زدن و یک حالت ترکیبی از این دو. شایان ذکر است که قابلیت دابل کلیک کردن در یک نقطه ضرورتی ندارد، چراکه می‌توان در تنظیمات بخش Folder Options ویندوز، گزینه Single-click to open an item را انتخاب نموده و تنها با یک کلیک بر روی آیتم مورد نظر آن آیتم را باز نمود.



شکل ۴۱: نرم‌افزار دستگاه DIAS Eye Tracker نام‌گذاری شده است، که واژه DIAS مخفف Disabled Assistant به معنی "یاور معلول" می‌باشد.

پس از کلیک بر روی آیکون نرم‌افزار در محیط ویندوز اکس.پی، نرم‌افزار اجرا شده و قبل از هر چیز نام کاربر پرسیده می‌شود. کاربر می‌تواند با نام جدید وارد محیط نرم افزار شده و یا نام خود را از لیست موجود انتخاب نماید چراکه تنظیمات مربوط به هر شخص و همچنین نتایج کالبراسیون آخرین

بار استفاده از نرم افزار توسط شخص ذخیره می گردد. پس از ورود به محیط نرم افزار نیز می توان با زدن دکمه Change User که در گوشه سمت چپ بالایی پنجره نرم افزار دیده می شود، کاربری را تغییر داد. شمای ظاهری نرم افزار مربوطه از سه کادر و یک منوی کلی تشکیل یافته است که در شکل ۴۲ دیده می شود. منوی برنامه که امکان دسترسی به ۶ بخش اصلی نرم افزار را فراهم می نماید در بالای پنجره نرم افزار دیده می شود. کادر سمت راست در پنجره نرم افزار در واقع پنجره ابزار نرم افزار بوده و گزینه ها و تنظیمات مورد نظر مربوط به ۶ بخش اصلی نرم افزار با انتخاب آن بخش از منوی نرم افزار، در این کادر نمایش داده می شود. کادر بزرگ سمت چپ نیز مربوط به تصویر گرفته شده از چشم می باشد که وضعیت تصویر چشم و صحت شناسایی اجزای تصویر در این کادر مشاهده می گردد. برخی اطلاعات مورد نیاز جهت تنظیم عملکرد دستگاه نیز در زیر منوی نرم افزار در یک کادر نمایش داده می شود.



شکل ۴۲: شمای کلی از پنجره اصلی نرم افزار

منوی اصلی نرم افزار به منظور راحتی کار با آن با چشم، اینگونه طراحی شده که با نزدیک شدن نشانگر به هر آیتم منو، آیتم مربوطه بزرگتر شده و انتخاب آن راحت تر خواهد بود. در شکل ۴۲، آیتم Eye Tracking بصورت بزرگ شده نشان داده شده است.

در ادامه، ۶ بخش مختلف نرم افزار و امکانات موجود در هر بخش توضیح داده خواهد شد. این ۶ بخش عبارتند از: تنظیمات تصویربرداری^۱، ردیابی چشم^۲، کالیبراسیون^۳، حرکت دادن نشانگر با چشم^۴، کاربردها^۵ و ترسیم نمودار^۶.

همچنین گام‌هایی اصلی که یک کاربر ساده برای استفاده از سیستم می‌بایستی بردارد، به ترتیب به صورت شماره‌بندی از ۱ تا ۶ در طول توضیحات بخش‌ها آورده شده است.

۳.۳: تنظیمات تصویربرداری

در این بخش که مربوط به اولین آیتم از سمت چپ منوی اصلی می‌باشد، تنظیمات مربوط به تصویر برداری و مشخصات تصویر در اختیار کاربر قرار دارد. همانگونه که در شکل ۴۳ مشخص شده، این بخش از ۴ قسمت تشکیل شده است.

- در قسمت مربوط به تصویر ورودی منبع تصویری که قست نمایش و ردیابی آن را داشته انتخاب می‌شود، این تصویر می‌تواند یک فیلم و یا یک عکس که قبلاً از چشم گرفته شده است باشد، و هم می‌تواند بصورت زنده از کارت کپچر گرفته شود. گزینه Video برای پخش زنده، گزینه AVI برای فایل ویدئویی و سه گزینه دیگر به ترتیب از بالا به پایین مربوط به تصویر ذخیره شده موجود در هارد، تصویر موجود در کلیپ بُرد و تصویر گرفته شده از صفحه نمایش می‌باشد. در حالت تصویر زنده، می‌توان کارت کپچر را با دکمه Device، فرمت و اندازه تصویر برداری را با دکمه Format، و مشخصاتی چون روشنایی تصویر را با دکمه Settings تغییر داد.

(۱) گزینه اول از این قسمت انتخاب می‌شود و به ترتیب دکمه‌های *Init* و *Start* از قسمت مربوط به کنترل پخش تصویر انتخاب می‌شود. پس از آنکه تصویر به نمایش درآمد، دستگاه را روشن کرده

¹ Video Settings

² Eye Tracking

³ Calibration

⁴ Mouse Movement

⁵ Applications

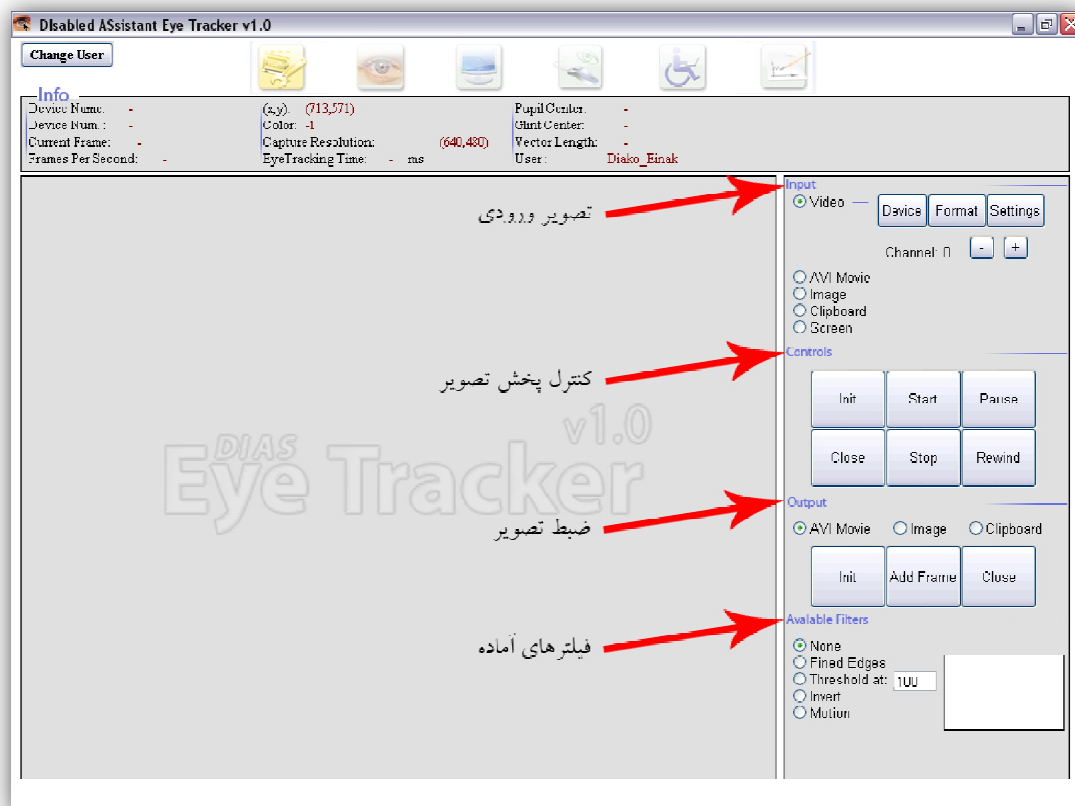
⁶ Plot

و بر روی سر قرار داده و به آرامی با تنظیم دوربین تصویر چشم را در مرکز پنجره نمایش قرار داده و با عقب و جلو بردن دوربین تصویر را فوکوس نمایید.

- در قسمت کنترل پخش، دکمه Init کار آماده سازی دریافت تصویر از ورودی، دکمه Start کار شروع پخش تصویر، دکمه Pause کار توقف موقت تصویر، دکمه Rewind کار برگشت به ابتدای فیلم، دکمه Stop کار قطع پخش و دکمه Close کار قطع ارتباط با ورودی را انجام می دهد.

- در بخش ضبط تصویر می توان یک فیلم و یا یک فریم از تصویر را ضبط نمود. برای ضبط فیلم به ترتیب گزینه AVI و دکمه های Init و Add Frame را زده و در پایان Close را می زنیم. برای ضبط تصویر بر روی هارد و یا کلیپ برد، گزینه Image و یا Clipboard را انتخاب و دکمه Init زده می شود.

در بخش فیلترهای آماده، ۴ فیلتر پر کاربرد و آماده پردازش تصویر در اختیار قرار داده شده است تا بتوان تأثیرات هر کدام را بر روی تصویر مشاهده نمود.



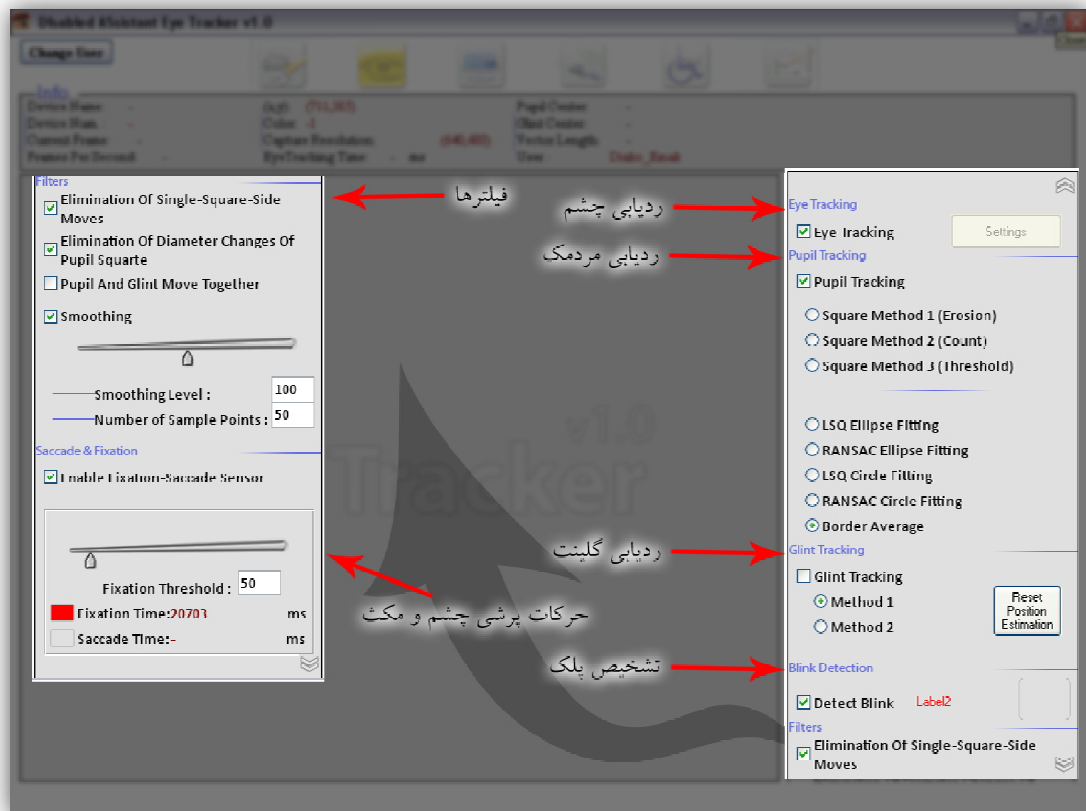
شکل ۴۳: قسمت های مربوط به بخش تنظیمات تصویر برداری

۴.۳ : ردیابی چشم

در این بخش تنظیمات مربوط به ردیابی چشم در ۶ قسمت دیده می‌شود. برای بالا و پایین رفتن پنجره تنظیمات این قسمت می‌توان از دو فلش بالایی و پایینی کادر تنظیمات استفاده نمود.

۲) گزینه *Eye Tracking* که در اولین قسمت این بخش دیده می‌شود، انتخاب شود تا بخش ردیابی چشم فعال شود. پس از آن گزینه *Pupil Tracking* از قسمت ردیابی مردمک انتخاب شود تا ردیابی مردمک آغاز گردد. چنانچه مردمک در پنجره نمایش با یک چهارضلعی محیط شود و مرکز آن با دو خط متقاطع مشخص گردد، ردیابی مردمک به درستی انجام گردیده است.

- در قسمت ردیابی مردمک با ۸ روش مختلف می‌توان مردمک را تشخیص داد. ۳ روش اول با کمی تفاوت از همان الگوریتم چهارضلعی محیطی استفاده نموده و ۴ روش دیگر نیز از برازش دایره و یا بیضی استفاده می‌کنند و روش آخر نیز روش میانگین نقاط مرزی می‌باشد. در نسخه اول این نرم افزار، چون برازش رانسک به کمک نرم افزار مطلب انجام می‌شود، لذا این دو متد تنها در صورت نصب بودن مطلب بر روی سیستم عامل فعال و قابل اجرا خواهند بود.



شکل ۴۴: قسمت‌های مربوط به بخش ردیابی چشم که در دو ستون نشان داده شده است.

۳) گزینه *Glint Tracking* در قسمت ردیابی مردمک انتخاب شده و چنانچه مرکز گلینت در تصویر با دو خط متقاطع مشخص گردد، ردیابی گلینت بخوبی صورت گرفته است.

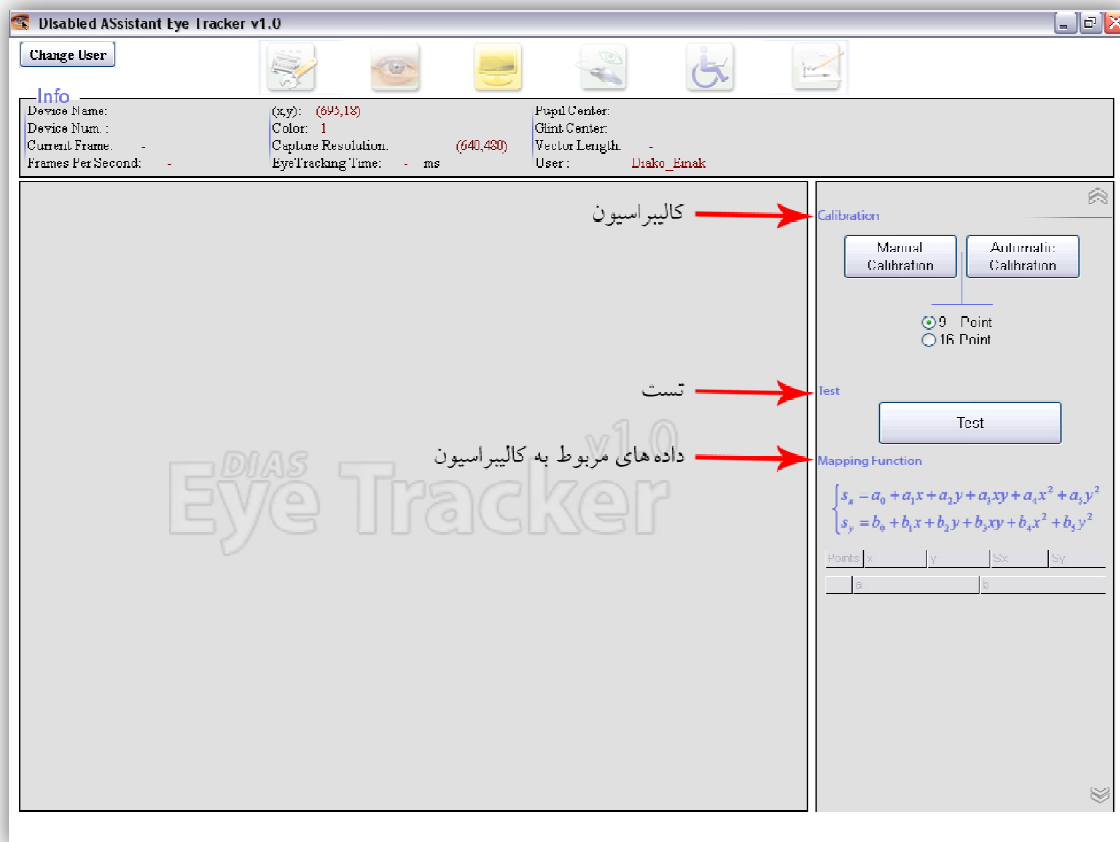
- در قسمت ردیابی گلینت، می‌توان با انتخاب گزینه "1 Glint" یک گلینت در تصویر شناسایی، و با انتخاب گزینه "2 Glint" دو گلینت شناسایی شود.

۴) گزینه *Detect Blink* از قسمت تشخیص پلک انتخاب گردد. چنانچه در هنگام پلک زدن چشمی که مقابل دوربین قرار دارد مربع کوچکی که در این قسمت قرار دارد قرمز شده و صدای تیک کوتاهی شنیده شود، تشخیص پلک به خوبی صورت گرفته است.

- در قسمت تشخیص پلک با انتخاب گزینه *Detect Blink*، عمل پلک زدن تشخیص داده می‌شود. و در هنگام پلک زدن مربع کوچکی که در این قسمت قرار گرفته قرمز شده و صدای تیک کوتاهی شنیده می‌شود.

- در قسمت مربوط به فیلترها، می‌توان از ۵ فیلتر مختلف استفاده کرد که البته در بخش‌های ۲. ۴. ۵. ۱ و ۲. ۴. ۵. ۲ و ۷. ۴. ۲ با آنها آشنا شدیم. فیلتر اول از بالا برای حذف حرکات انفرادی چهار ضلعی محیطی مردمک می‌باشد. فیلتر دوم برای جلوگیری از تغییر موقعیت مرکز مردمک در هنگام بزرگ و کوچک شدن مردمک بکار می‌رود. فیلتر چهارم برای کم کردن تغییرات ریز و در واقع نرم کردن اندازه مولفه‌های افقی و عمودی بردار واصل مردمک به گلینت بکار می‌رود. دو پارامتر n و b که در بخش ۶. ۲ با آنها آشنا شدیم در فیلتر آخر (Smoothing) قابل تغییر می‌باشد. فیلترهای ۱، ۲ و ۴ به صورت پیش فرض انتخاب گردیده‌اند.
- در قسمت مربوط به حرکات پرشی و مکث، با انتخاب گزینه موجود در این قسمت، تشخیص حرکات پرشی چشم و نقاط مکث ممکن می‌گردد. میزان حساسیت سنسور سرعت سنج حرکت نشانگر در صفحه در این قسمت قابل تنظیم بوده بگونه‌ای که با زیاد کردن مقدار عددی قابل تغییر در این قسمت حساسیت کم شده و با کم کردن آن حساسیت زیاد می‌شود. مدت زمان فاز مکث و پرشی نیز در این قسمت نشان داده می‌شود.

۵.۳ : کالیبراسیون



شکل ۴۵ : قسمت‌های مربوط به بخش کالیبراسیون نرم‌افزار

همانگونه که در شکل ۴۵ نشان داده شده است، در بخش کالیبراسیون نرم‌افزار ۳ قسمت در کادر تنظیمات مشاهده می‌گردد.

- قسمت اول کالیبراسیون نام دارد و در آن دو دکمه دیده می‌شود. با زدن دکمه Manual Calibration پنجره مربوط به کالیبراسیون دستی ظاهر می‌شود و با زدن دکمه Automatic Calibration پنجره مربوط به کالیبراسیون اتوماتیک. کالیبراسیون می‌تواند ۹ نقطه و یا ۱۶ نقطه باشد، که توسط دو گزینه در این قسمت قابل انتخاب می‌باشد. در صفحه مربوط به کالیبراسیون دستی دوایری به ترتیب در صفحه ظاهر می‌شوند که باید نشانگر ماوس را با دست به مرکز دایره مربوطه برده و درحالی‌که به مرکز دایره زل زده‌ایم، کلید سمت چپ ماوس

را یک بار بزنیم. این کار را برای تک تک دواير انجام می‌دهیم. در حالت کالیبراسیون اتوماتیک دواير به ترتیب ظاهر می‌شوند و پس از کوچک شدن قطر آنها به یک نقطه تبدیل می‌شوند. دواير به ترتیب ظاهر شده و کوچک می‌شوند و کاربر تنها می‌بایستی در طول مدت تغییر قطر نقاط به آنها زل بزند. در پایان عملیات کالیبراسیون خطای نگاشت محاسبه شده را در نقاط کالیبراسیون به صورت بیضی‌های رنگی نشان داده می‌شود هر چه خطا در یک نقطه بیشتر باشد، اندازه بیضی بزرگتر و رنگ آن به قرمز نزدیکتر می‌شود.

- در قسمت تست با زدن دکمه تست یک صفحه ظاهر می‌شود و در آن کاربر همانند صفحه کالیبراسیون می‌بایستی به نقاطی که در صفحه ظاهر می‌شوند نگاه کند. مسیر حرکت چشم در این صفحه با رنگ مشکی نمایش داده می‌شود و کاربر می‌تواند براحتی با نگاه کردن به نقاط مورد نظر در صفحه اختلاف نقطه دید اندازه‌گیری شده را با نقطه دید واقعی در صفحه مقایسه کند.

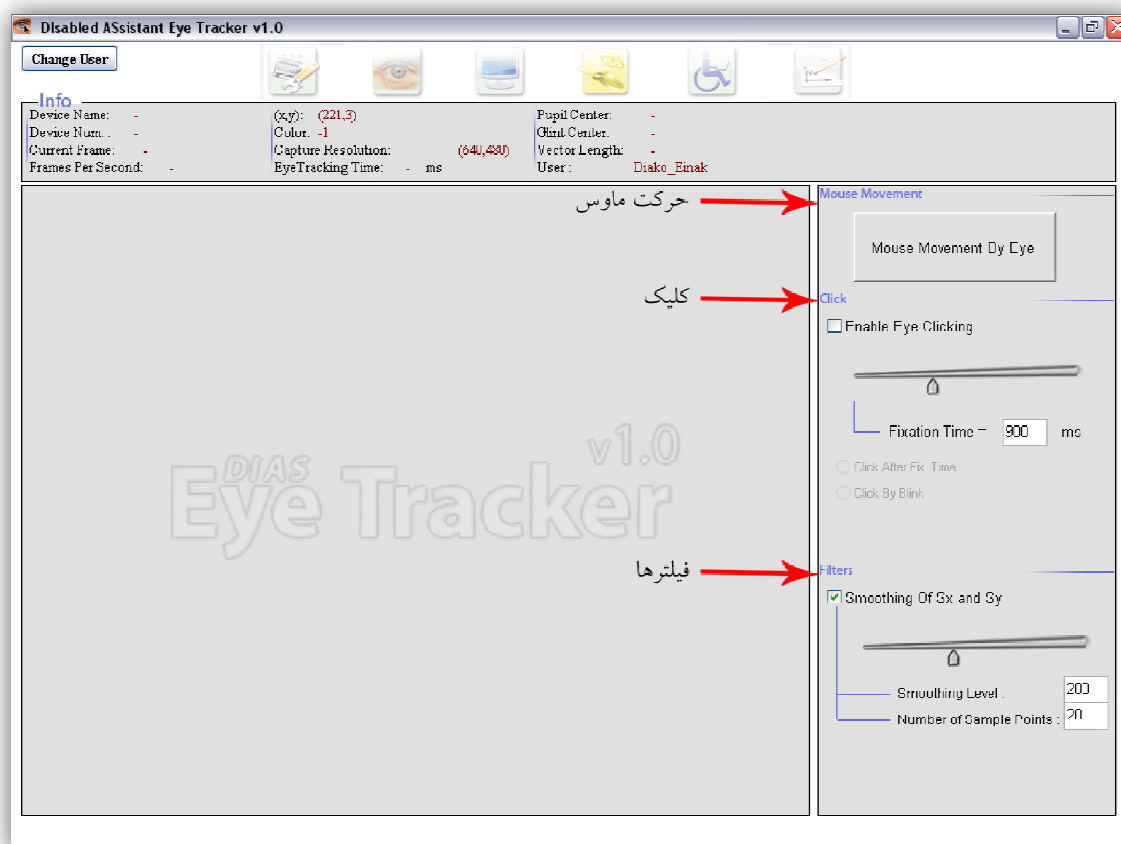
- در قسمت داده‌های کالیبراسیون، ابتدا معادله مرتبه دوم موریموتو دیده می‌شود که کالیبراسیون بر طبق آن صورت می‌گیرد، پس از انجام کالیبراسیون در این قسمت دو جدول و یک کادر کوچک نشان داده می‌شود. در جدول بالایی مختصات x و y نقاط کالیبراسیون و مولفه‌های افقی و عمودی بردار واصل مردمک به گلینت نشان داده می‌شود. در جدول دوم مقادیر محاسبه شده ۱۲ پارامتر نگاشت نشان داده خواهد شد. در کادر پایانی نیز مقدار می‌توان از درستی نگاشت بدست آمده اطمینان حاصل کرد. مولفه‌های بردار واصل مردمک به گلینت که در حین کالیبراسیون ذخیره شده بود، در نگاشت بدست آمده گذاشته شده و مقادیر نقاط دید متناظر با هر کدام محاسبه می‌گردد. این مقادیر چنانچه نگاشت به درستی بدست آمده باشد، می‌بایستی در نزدیکی همان نقاطی باشند که در حین کالیبراسیون به آنها نگاه می‌کردیم. اختلاف این مقادیر به صورت یک عدد در کادر پایانی این قسمت نشان داده خواهد شد. چنانچه اختلاف نقاط بیشتر حد قابل قبول باشد، آن مقدار به رنگ قرمز نشان داده خواهد شد. بنابراین سیاه بودن تمام مقادیر درون کادر می‌تواند نشان دهنده درستی انجام مراحل کالیبراسیون باشد.

۵) پس از ردیابی دقیق مردمک و گلینت در تصویر، به بخش کالیبراسیون رفته و گزینه *16 Points* و دکمه *Automatic Calibration* را در قسمت مربوط به کالیبراسیون زده و پس از ورود به صفحه

کالیبراسیون، به مرکز دویاری که در صفحه ظاهر می‌شوند خیره شوید. پس از اتمام مرحله کالیبراسیون چنانچه در کادر پایانی *Errors* که در انتهای کادر تنظیمات بخش کالیبراسیون دیده می‌شود، عدد قرمز رنگی مشاهده نشود، کالیبراسیون بدون مشکل انجام گردیده. آنچه که در طول استفاده از ردیاب مورد نظر و بویژه در طول مرحله کالیبراسیون می‌بایستی رعایت گردد اجتناب از حرکت دادن و یا دوران زیاد سر است. هر چه که سر وضعیت ثابت‌تری داشته باشد، دقت عملکرد بالاتر خواهد بود.

۶.۳ : حرکت دادن نشانگر با چشم

در این بخش از نرم افزار کاربر می‌تواند با کمک چشم، نشانگر را در صفحه نمایش حرکت داده و همچنین تنظیمات مربوط به نحوه کلیک کردن نیز در اختیار کاربر قرار داده شده است.



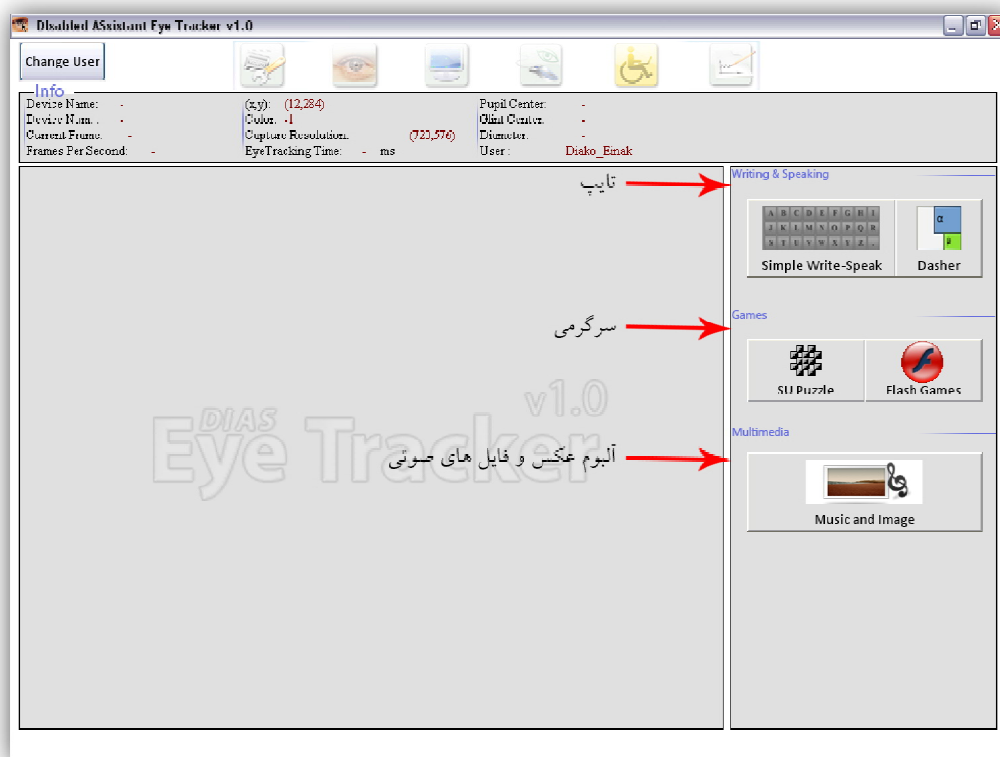
شکل ۶: قسمت‌های مختلف در بخش حرکت دادن نشانگر با چشم

۶) در این بخش با زدن دکمه "Mouse Movement By Eye" نشانگر در صفحه با چشم حرکت داده می‌شود و با زدن مجدد این دکمه این قابلیت غیر فعال می‌گردد. برای غیرفعال نمودن حرکت نشانگر با چشم در مواقع اضطراری می‌توان با تکان دادن ماوس این ارتباط را قطع نمود.

- با فعال نمودن گزینه "Enable Eye Clicking" دو انتخاب کلیک کردن با روش "Dwell-time" و یا با پلک زدن فعال گردیده و می‌توان یکی از آنها را انتخاب نمود. مدت زمان آستانه نیز در این قسمت قابل تنظیم می‌باشد.
- در پایین این کادر یک گزینه برای نرم نمودن حرکت نشانگر قابل انتخاب می‌باشد که در مواقعی که نشانگر لرزش زیادی دارد، می‌تواند مفید واقع شود و به نشانگر در صفحه یک حرکت نرم بدهد.

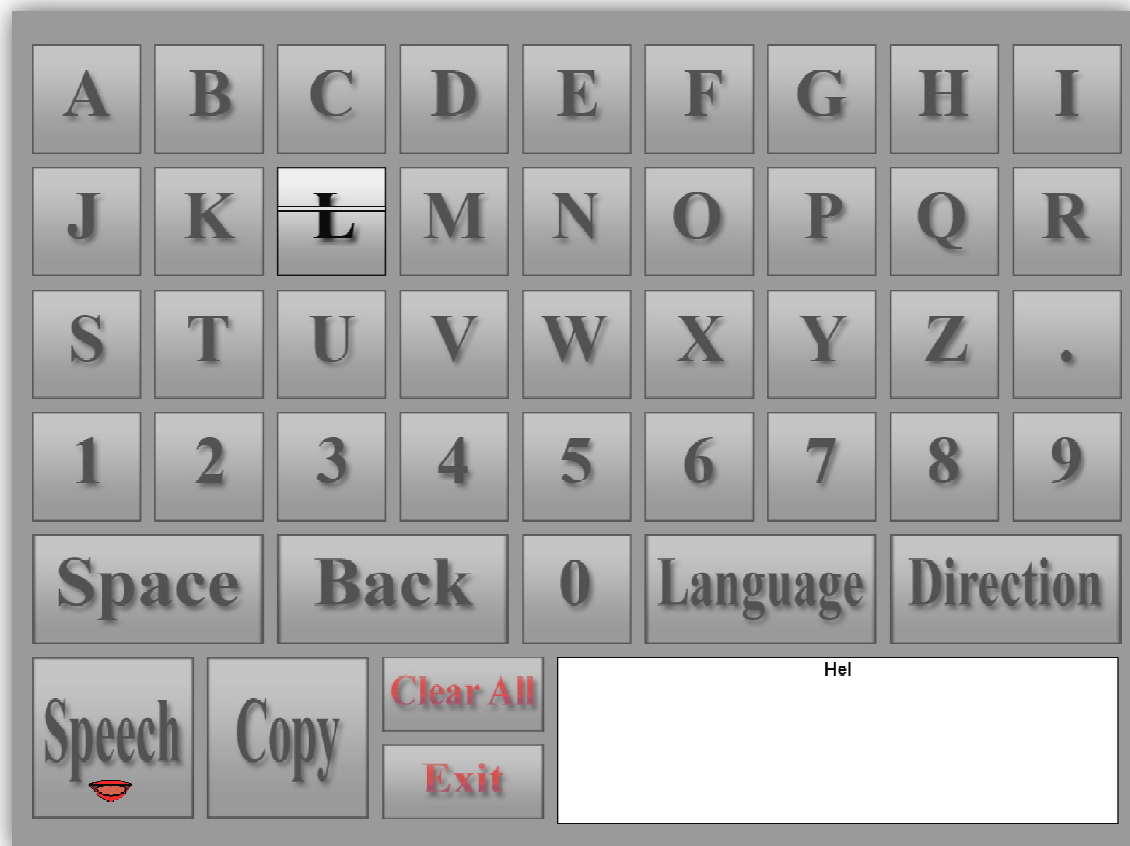
۷.۳ : کاربردها

در این بخش در کادر تنظیمات ۳ قسمت مجزا وجود دارد: تایپ، سرگرمی و فایل‌های صوتی و تصویری



شکل ۴۷: بخش کاربردها و بخش‌های مختلف آن

- در قسمت تایپ یک محیط ساده برای تایپ و گفتار و همچنین نرم افزار دَشر (Dasher) گنجانده شده است. نرم افزار دشر ایده‌ای نو در تایپ محسوب می‌شود که در سال ۲۰۰۲ مطرح شد [75] و اینترفیس بسیار خوبی است برای کار با ردیاب‌های چشم. محیط ساده‌ای هم که برای تایپ و گفتار ویژه این سیستم طراحی شده است در شکل ۴۸ نشان داده شده است. در این صفحه برای تمرکز بیشتر کاربر نشانگر محو شده و چنانچه شخص بر روی یک حرف برود آن حرف بصورت روشن‌تر متمایز می‌شود. چنانچه کلیک با پلک باشد، بر روی حروف مورد نظر رفته و با پلک زدن آنها را انتخاب می‌نماییم و اگر چنانچه کلیک با حالت مکث (Dweel-time) انتخاب شده باشد چنانچه نشانگر بر روی حرف مورد نظر در صفحه برود، یک خط افقی از بالا به پایین تصویر حرف حرکت می‌کند، بگونه‌ای که اگر زمان مکث بر روی حرف به حد آستانه برسد خط به انتهای مسیر خود رسیده و حرف مورد نظر با صدای تیک کوتاهی انتخاب می‌گردد. بدین ترتیب کاربر با آرامش، بدون استرس و با اطمینان خاطر از انتخاب حروف، متن خود را تایپ می‌نماید. امکانات ساده مورد نیاز برای تایپ در این صفحه گنجانده شده است همچنین نرم افزار از زبان فارسی نیز پشتیبانی می‌نماید. در پایان با زدن دکمه "Speech" متن تایپ شده توسط کامپیوتر خوانده می‌شود.



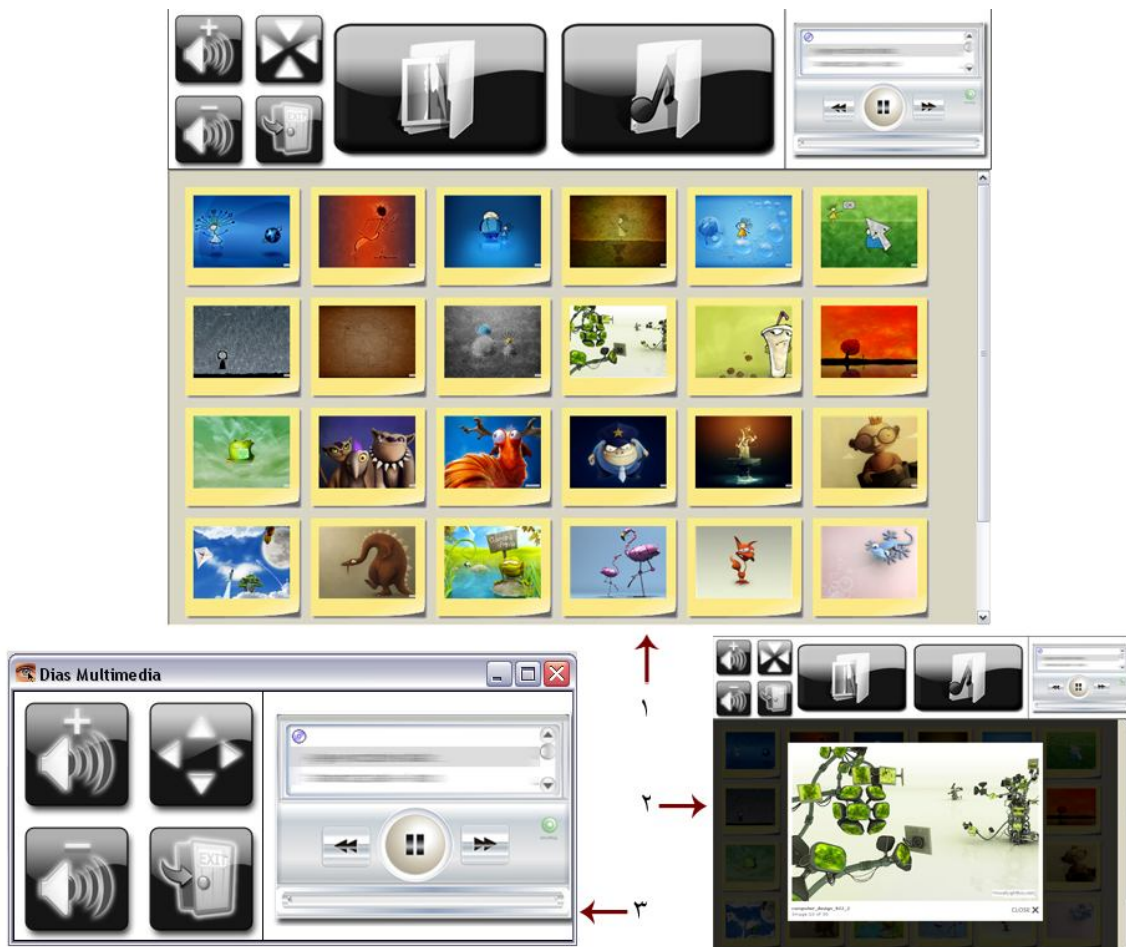
شکل ۴۸: بخش ویژه تایپ و گفتار که برای سیستم طراحی شده است.

- در قسمت سرگرمی، پازل و بازی‌های متنوعی گنجانده شده است. این بازی‌ها، بازی‌هایی با فرمت ".swf" یا همان فلش هستند که با چشم‌براحتی قابل انجام هستند و بازی‌هایی برای تقویت حافظه و تمرکز حواس و بینایی می‌باشند. در تصویری از صفحی مربوط به بازی نشان داده شده است که کاربر براحتی می‌تواند در آن بازی‌ها را انتخاب نموده و روند بازی را طی کرده و یا از صفحه خارج شود.



شکل ۴۹: صفحه‌ی مربوط به بازی

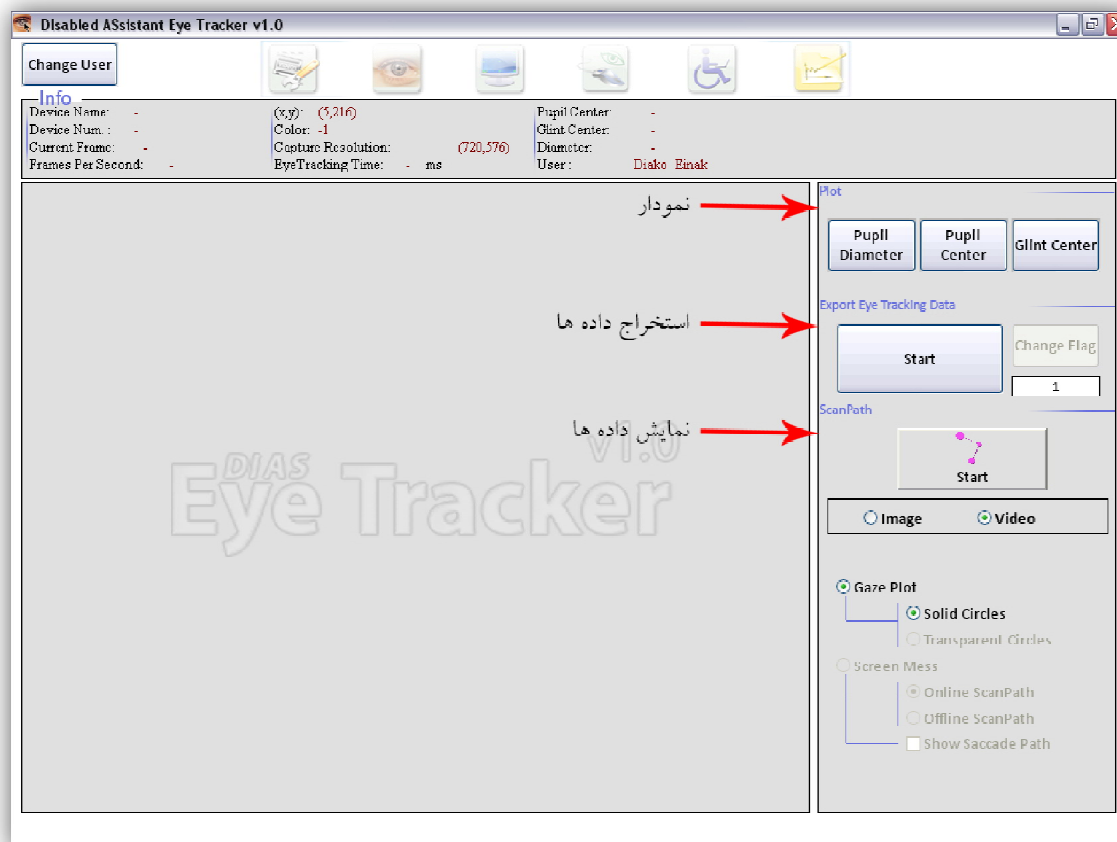
- در قسمت چند رسانه‌ای نرم‌افزار کاربر می‌تواند براحتی آلبوم فایل‌های صوتی و آهنگ مورد نظر را انتخاب کند و نیز با دو دکمه‌ی سمت چپ بالای پنجره صدا را کم و زیاد نماید. همچنین با انتخاب یک آلبوم عکس می‌تواند به تماشای عکس بپردازد. این پنجره می‌تواند در هنگام پخش فایل صوتی به حالت مینیمایز (Minimize) در آمده تا شخص به کارهای دیگر بپردازد.



شکل ۵۰: بخش مربوط به عکس و فایل های صوتی: در تصویر (۱) پنجره کلی این بخش، در تصویر (۲) یک عکس در حالت زوم شده و در تصویر (۳) حالت مینی مایز پنجره نشان داده شده است.

۸.۳ : ترسیم نمودار

در این بخش از نرم افزار نیز سه قسمت گنجانده شده است. در قسمت اول می توان نمودار داده هایی چون قطر مردمک، مختصات مردمک و مختصات گلینت را در طول زمان رسم نمود و تغییرات آن را شاهد بود. در قسمت دوم می توان داده های مربوط به مختصات نقاط دید شخص و مختصات نشانگر در صفحه را بصورت یک فایل استاندارد در بازه ای از زمان ذخیره نمود. این فایل بصورت یک فایل متنی بوده و با فرمت استاندارد که ردیاب های چشم از آن استفاده می کنند استخراج می شود. در قسمت سوم داده های مذکور یعنی، مسیر حرکت چشم، نقاط مکث، حرکات پرشی چشم و ترتیب آنها را در طول تماشای یک عکس و یا یک فایل ویدئویی با فرمت های مختلفی به نمایش در می آید.



شکل ۵۱: بخش مربوط به رسم و نمودار

این بخش کاربردهای بسیار فراوانی دارد که در بخش مربوط به کاربردهای ردیاب‌های چشم به آنها اشاره شد. در یک عکس و مسیر حرکت چشم و دید شخص را مشاهده می‌نماییم که با فرمت "ScanPath" توسط نرم‌افزار رسم شده است. در این فرمت نقاط مکث با دایره و حرکات پرشی با خطوط نشان داده می‌شود. قطر دایره مکث با مدت زمان خیره شده به آن نقطه رابطه مستقیم داشته و همچنین ترتیب نقاط دید با شماره گذاری دایره مشخص می‌شود.



شکل ۵۲: یک عکس و نمایش مسیر حرکت چشم در حین تماشای آن بصورت "ScanPath"

۴ : سخت افزار

در این بخش از پایان نامه به معرفی سخت افزار ردیاب چشم مورد نظر می پردازیم. اجزای اصلی ردیاب چشم ساخته شده عبارتند از دوربین، کارت کپچر کامپیوتر، منبع نورانی مادون قرمز و نهایتاً یک بخش قابل نصب بر روی سر که دوربین را در فاصله مشخصی از چشم نگه می دارد. معیار اصلی در انتخاب و طراحی این اجزا نیز، قیمت ارزان و راحتی استفاده از آنها در نظر گرفته شده بود.

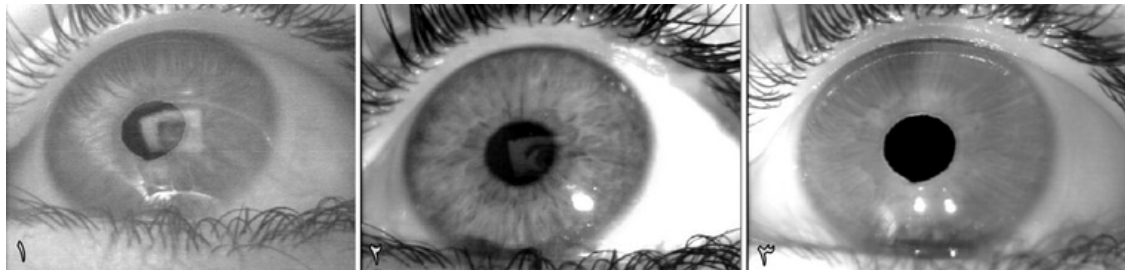
کارت کپچر کامپیوتر، مبدل تصویر آنالوگ دوربین به تصویر دیجیتال بوده و در واقع واسط میان دوربین ردیاب چشم و نرم افزار آن است. انتخاب این جزء کار سختی نبوده و می توان از یک کارت کپچر ساده نیز استفاده نمود. از کارت های اکسترنال نیز به جهت قابل حمل بودن آنها می توان استفاده نمود.

۱.۴ : دوربین

بخش اصلی در یک ردیاب چشم ویدئویی، دوربین است. نوع دوربین استفاده شده در یک ردیاب چشم، ارتباط مستقیم با متد استفاده شده برای ردیابی چشم دارد. از آنجا که در ردیاب ساخته شده از متد بازتاب قرینه-مردمک استفاده با مردمک تیره استفاده شده است، نیازمند یک دوربین با طول موج کاری بالا می باشیم بگونه ای که به امواج مادون قرمز با طول موج ۷۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر حساس باشد. این دوربین ها در بازار به دوربین های دید در شب نیز معروف می باشند.

در شکل 53 تصویر شماره ۱، تصویر چشم در روشنایی معمولی اتاق و بدون منبع روشنایی اضافی دیده می شود. علاوه بر کیفیت پایین تصویر در این حالت، بازتاب های نور محیط نیز بر روی سطح قرینه آشکارا دیده می شود. چنانچه از یک منبع روشنایی مرئی در کنار دوربین، برای روشن شدن میدان دید دوربین استفاده شود، علاوه بر وجود بازتاب نور محیط در سطح قرینه، جزئیات عنبیه نیز بسیار در تصویر خودنمایی می کند (شکل ۵۳ تصویر شماره ۲). هر چند که در این حالت تصویر، صاف و دارای کنتراستی مناسب است، اما مردمک و عنبیه مرز کاملاً مشخصی نداشته و برای ردیابی توسط دستگاه مناسب نمی باشد. چاره کار استفاده از یک منبع روشنایی مادون قرمز در کنار دوربین است. این منبع روشنایی که نزدیک چشم قرار می گیرد با آنچه در بخش بعد توضیح خواهیم داد متفاوت بوده و صرفاً برای روشن نمودن میدان دید دوربین استفاده می گردد و نه برای استفاده از بازتاب آن در سطح قرینه.

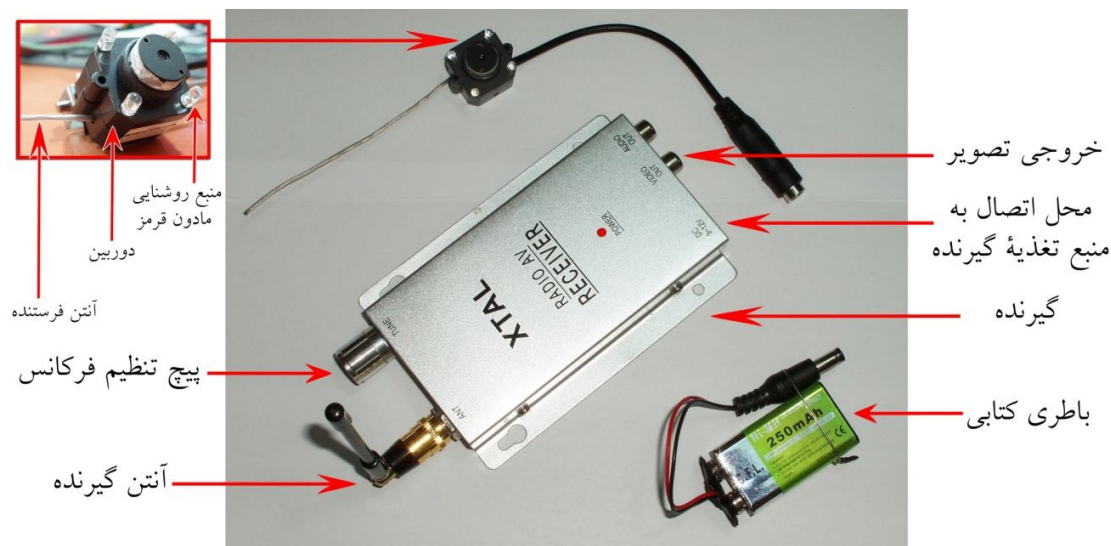
در این حالت (شکل 53 تصویر شماره ۳) هم بازتاب نور محیط در سطح قرنیه را نخواهیم داشت و هم اینکه تصویر کاملاً صاف بوده و مردمک بصورت یک قرص سیاه کاملاً متمایز در می آید. شدت نور مادون قرمزی که برای روشن نمودن میدان دید دوربین استفاده می گردد به حساسیت سنسورهای نوری دوربین نیز بستگی داشته بطوریکه در دوربین های ارزان تر با حساسیت کمتر شدت نور بیشتری نیاز است.



شکل ۵۳ : از چپ به راست، تصویر بدون منبع روشنایی اضافی، تصویر با منبع روشنایی مرئی و تصویر با منبع روشنایی مادون قرمز

از آنجا که ردیاب چشم از نوع قابل نصب بر روی سر می باشد، دوربین باید تا حد ممکن سبک و کوچک باشد. در ردیاب ساخته شده از یک دوربین سبک و کوچک با سنسور نوری CMOS استفاده شده است. انتقال تصویر در این دوربین به صورت بی سیم بوده و تصویر از طریق یک فرستنده کوچک به گیرنده که می تواند بر روی میز قرار داده شود ارسال می گردد. منبع تغذیه دوربین نیز می تواند یک باتری کتابی ساده باشد. بنابراین ردیاب بدون هیچگونه سیمی بر روی سر کاربر نصب می شود و این خود امتیاز مهمی بشمار می رود.

در شکل ۵۴ تصویری از گیرنده و یک نمونه دوربین استفاده شده نشان داده شده است.

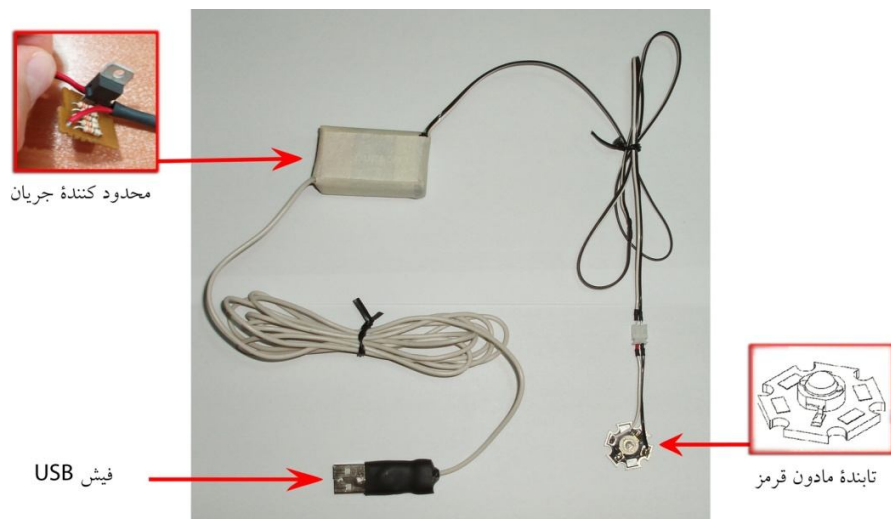


شکل ۵۴: دوربین بی سیم و گیرنده و منبع تغذیه دوربین (باتری کتابی)

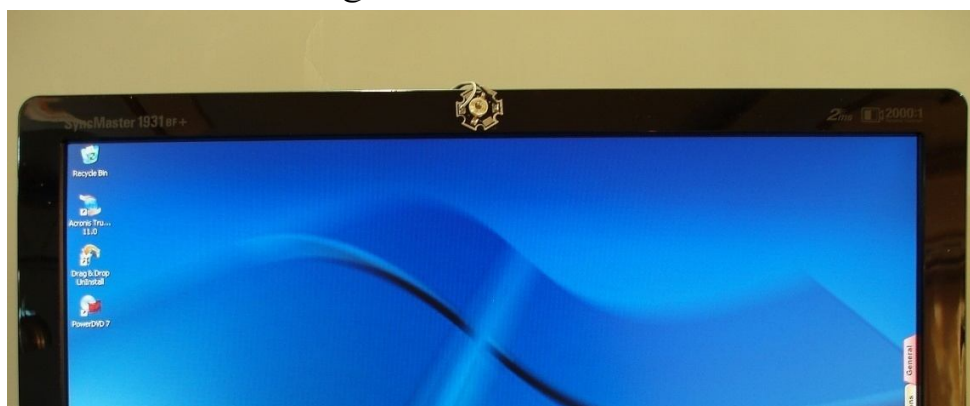
۲.۴: منبع نورانی مادون قرمز

همانگونه که در بخش ۶.۲.۴.۲ توضیح داده شد، برای داشتن بازتاب گلینت بر روی سطح قرنیه در متد بازتاب قرنیه-مردمک به یک منبع نورانی کوچک در فاصله‌ای از چشم نیاز می‌باشد. این منبع نورانی باید دارای موقعیتی ثابت نسبت به صفحه نمایش بوده و با حرکت سر حرکت نکند. در ردیاب ساخته شده از یک ال‌ای‌دی پرنور مادون قرمز^۱ استفاده است که در نزدیکی صفحه نمایش نصب می‌شود. برای تامین ولتاژ لازم این منبع نورانی از ولتاژ ۵ ولت پورت USB استفاده گردیده و برای این منظور با یک رگولاتور و چند مقاومت موازی جریان آن را محدود کرده و به ۲۰۰ میلی آمپر رسانده شده است.

^۱ IR Emitter LED



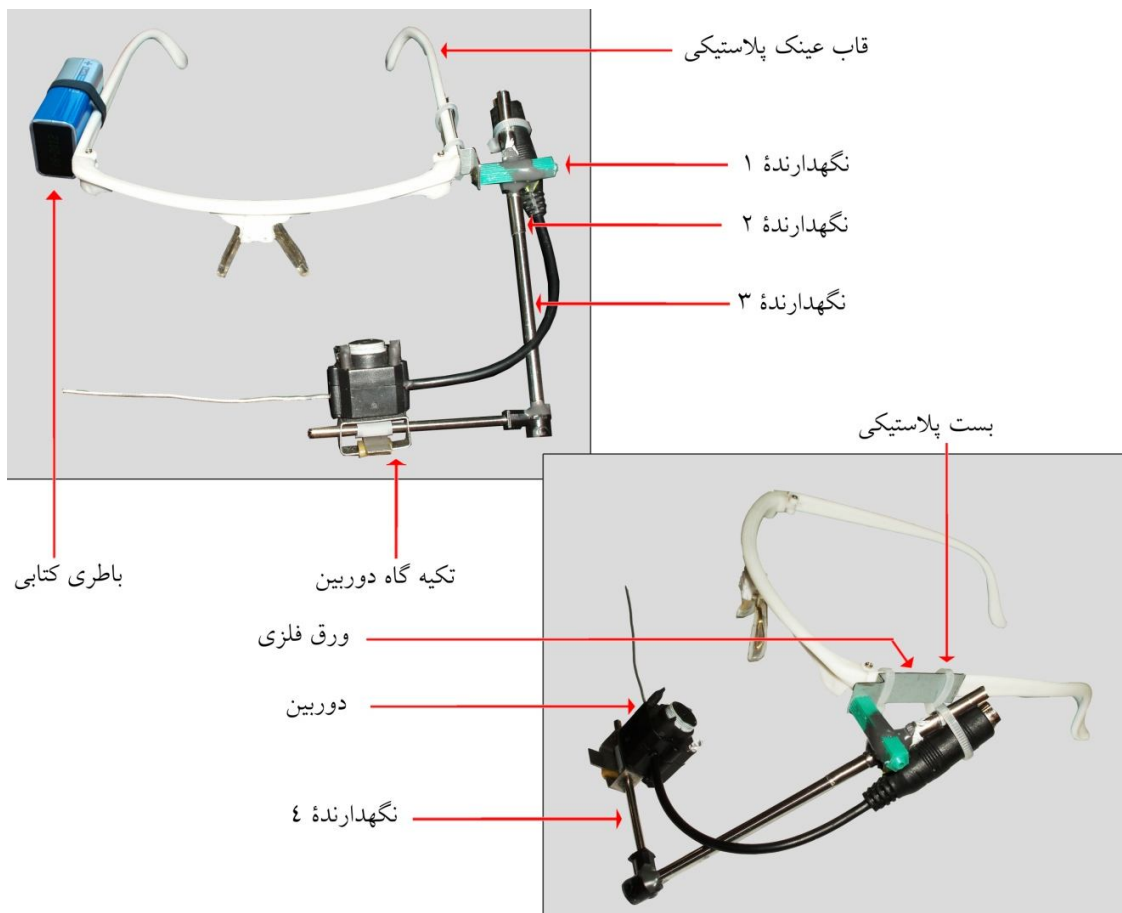
شکل ۵۵ : تصویری از منبع نورانی مادون قرمز استفاده شده
به جهت ایجاد بازتاب گلینت در سطح قرنیه



شکل ۵۶ : اتصال منبع نورانی بر روی صفحه نمایش

۳. ۴ : نمونه اول ردیاب چشم ساخته شده

در اولین نمونه ردیاب ساخته شده، از یک قاب عینک پلاستیکی سبک استفاده شده که دوربین بر روی آن نصب گردیده است. نحوه اتصال دوربین به قاب عینک بسیار حائز اهمیت می باشد چرا که موقعیت دوربین نسبت به چشم می بایستی قابل تنظیم باشد در عین حال وضعیت دوربین در برابر حرکت و تکان های سر، ثابت و بدون لرزش باشد.



شکل ۵۷: نمونه اولیه ردیاب چشم ساخته شده و اجزای مختلف آن

در شکل ۵۷ نمونه اولیه ردیاب ساخته شده و اجزای آن مشاهده می‌شود. وزن این سیستم بدون باتری (استفاده از آداپتور به عنوان منبع تغذیه دوربین) تقریباً ۴۴ گرم و با باتری ۴۴ گرم می‌باشد. مکانیزم نگهدارنده دوربین، ۵ درجه آزادی را برای آن فراهم نموده و براحتی میتوان موقعیت دوربین را در مقابل چشم تنظیم نموده تا تصویر مناسبی از چشم بدست آید. نگهدارنده ۱ قطعه‌ای پلاستیکی بوده که از یک سر با یک پیچ به ورقه فلزی متصل گردیده است و می‌تواند حول محور خود دوران نماید. این آزادی حرکت زمانی که بخواهیم از ردیاب چشم برای افراد عینکی استفاده نمایم بسیار مفید بوده چراکه در اینگونه مواقع تصویر چشم می‌بایستی از فاصله میان لبه پایینی عینک و گونه شخص گرفته شود بنابراین با این درجه آزادی زاویه دوربین را نسبت به صورت، کمتر می‌کنیم. با سفت کردن پیچ می‌توان این دوران را سخت‌تر نموده و یا پس از تنظیم کاملاً محکم نمود (شکل ۵۸).



شکل ۵۸ : دوران حول محور نگهدارنده ۱

نگهدارنده ۲ که یک لوله نازک فلزی می باشد که با زاویه ۹۰ درجه به نگهدارنده ۱ متصل بوده و عملاً با هم تشکیل یک قطعه واحد را می دهند. نگهدارنده ۳ نیز مشابه نگهدارنده ۲ بوده با این تفاوت که قطر آن اندکی کوچکتر می باشد و در نگهدارنده ۲ با انطباق پرسی جا رفته و با دست و نیرویی اندک درون آن دوران و یا حرکت کشویی دارد. با دوران نگهدارنده ۳ حول محور خود می توان زاویه نامناسب دوربین را در صورت افتادگی اندک عینک به طرفین، جبران نمود. حرکت کشویی آن درون نگهدارنده ۲ نیز فاصله دوربین را تا چشم کم و زیاد کرده که به فوکوس شدن تصویر چشم کمک می نماید.

یک میله فلزی که در شکل ۵۷، نگهدارنده ۴ نامیده شده است با زاویه قائمه به نگهدارنده ۳ متصل شده و تکیه گاه دوربین بر روی آن حرکت دورانی و کشویی خواهد داشت. با حرکت دورانی می توان چشم را در تصویر بالا و پایین کشیده و با حرکت کشویی آن را به چپ و راست تصویر حرکت داد. بدین شکل چشم کاملاً در وسط تصویر قرار خواهد گرفت. تکیه گاه دوربین از ورق فلزی بوده و یک لبه فنر مانند آن اتصال آن را به نگهدارنده ۴ محکم حفظ می کند بطوریکه با دست و نیرویی اندک می توان تکیه گاه را بر روی نگهدارنده ۴ لغزاند.

مکانیزم استفاده شده در این نمونه در برابر لرزش و تکان سر کاملاً مقاوم بوده و با آن تصویر بدون لرزشی از چشم خواهیم داشت.

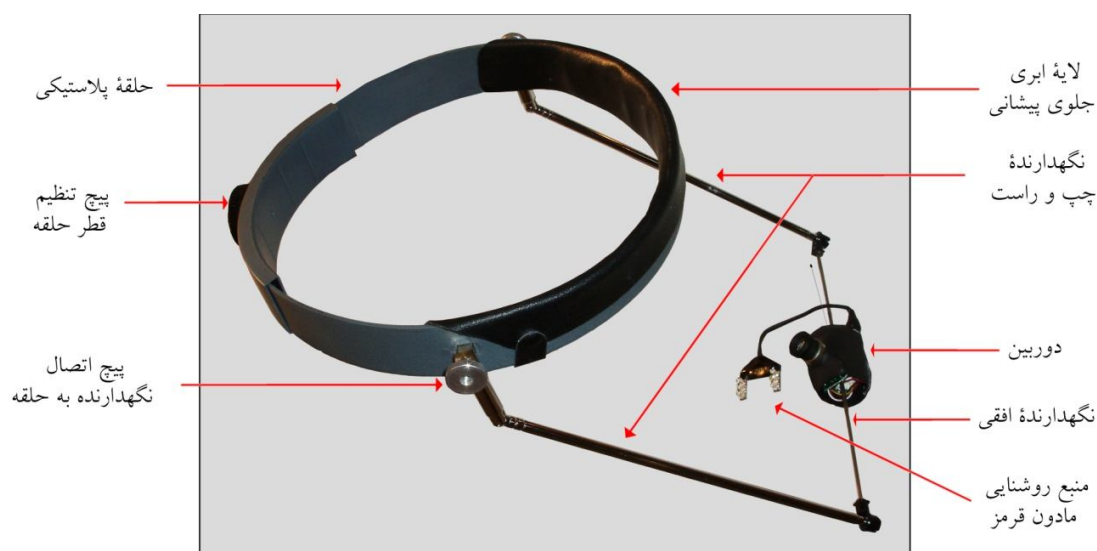
لازم به ذکر است که ورق فلزی پایه که نگهدارنده ۱ به آن پیچ شده به کمک دو بست پلاستیکی به قاب عینک متصل می شود. این بست ها با نیروی اندکی جابجا گشته و می توان مکانیزم را از قاب عینک جدا نمود و یا در صورت نیاز آن را به سمت دیگر عینک متصل نمود.

۴. ۴ : نمونه دوم ردیاب چشم ساخته شده

هدف از طراحی نمونه دوم ردیاب چشم دو نکته بود: اول پرهیز از استفاده نمودن عینک و تحمل وزن ردیاب توسط بینی، که ممکن است برای برخی افراد آزار دهنده باشد و دوم افزایش فاصله دوربین تا چشم بوده که سبب می شود کاربر احساس راحتی بیشتری نماید.

در این نمونه از یک حلقه نوار پلاستیکی استفاده شده که مانند هدبند به دور پیشانی محکم شده و سیستم دوربین و نگهدارنده های دوربین بر روی آن سوار می شود. بنابراین گشتاور ناشی از وزن دوربین و نگهدارنده ها به این حلقه منتقل شده و از طریق آن به طور یکنواخت به جلو و عقب سر وارد می شود. بنابراین با پخش شدن نیرو به دور سر، نیروی احساس شده توسط کاربر نسبت به نمونه ردیاب اولیه بسیار کمتر بوده و شخص احساس راحتی بیشتری می کند. لایه ابری جلوی حلقه نیز سبب شده که تماس نرمی میان پیشانی و حلقه بوجود آید.

تصویر نمونه دوم ردیاب ساخته شده در شکل ۵۹ دیده می شود. برای نگهدارنده های چپ و راست از دو عدد آنتن دو بخشی مشابه، استفاده شده است که می توانند حول مفصل خود دوران نمایند. بنابراین با دوران این دو نگهدارنده می توان ارتفاع دوربین را نسبت به چشم پایین تر آورد (مشابه شکل ۵۸ در نمونه اول). به انتهای این دو نگهدارنده یک میله افقی متصل گشته که در شکل ۵۹ با نام نگهدارنده افقی مشخص گردیده است. با تغییر طول نگهدارنده های چپ و راست می توان فاصله این نگهدارنده افقی و در نهایت دوربین متصل به آن را از صورت کم و یا زیاد نمود.

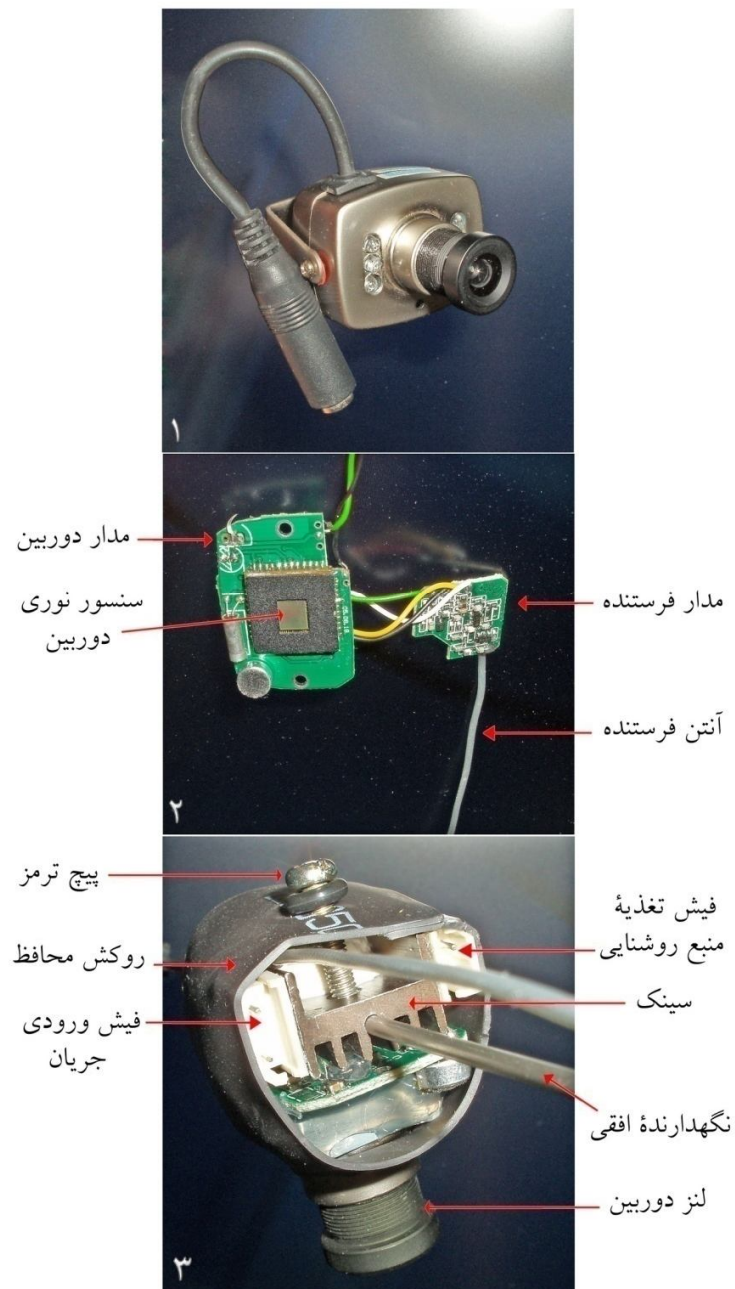


شکل ۵۹ : نمونه دوم ردیاب ساخته شده و اجزای آن

در این نمونه از دوربینی متفاوت استفاده شده است (شکل ۶۰ تصویر ۱). علت استفاده از این دوربین قابلیت تعویض لنز آن می‌باشد، چرا که در این نمونه فاصله دوربین از چشم بیشتر است و می‌بایستی از لنز زوم‌تری استفاده نمود.

طول نگهدارنده‌ها در این نمونه بیشتر از نمونه اول می‌باشد در عین حال نباید گشتاور ایجاد شده به علت وزن دوربین و اجزای سیستم، زیاد گردد. بدنه دوربین مورد نظر فلزی بوده بنابراین به علت وزن زیاد آن نمی‌توان از آن استفاده نمود، لذا اجزای داخلی دوربین از قاب آن بیرون آورده شده و مستقیم استفاده گردید. تنها آن بخش از بدنه که لنز بر روی آن سوار می‌شود یعنی پایه لنز، به علت رزوه‌های موجود در آن و موقعیت‌دهی مناسب لنز در جلوی سنسورهای نوری توسط آن، از بدنه جدا گشته و بر روی مدار دوربین چسبانده شد.

نکته دیگری که در این نمونه ملاحظه شده است، خنک‌کاری مدار دوربین و فرستنده می‌باشد. زیرا برخی از آی‌سی‌های موجود در مدار دوربین و بخصوص فرستنده به شدت گرم می‌شوند و چنانچه دمای آنها پایین آورده نشود ممکن است به آسیب دیدگی مدار منجر گردد. بدین منظور از یک سینک پره‌دار کوچک و سبک استفاده شده و مدار دوربین و فرستنده با چسب سیلیکون به دو طرف آن چسبانده شد. برای استفاده راحت تر و امن تر از دوربین، ورودی منبع تغذیه دوربین و خروجی جریان برای ال‌ای‌دی‌های روشنایی مادون قرمز به صورت دو فیش مخابراتی کوچک به کناره‌های سینک چسبانده شده و روی همه اجزا با یک روکش پلاستیکی پوشانده شده است.



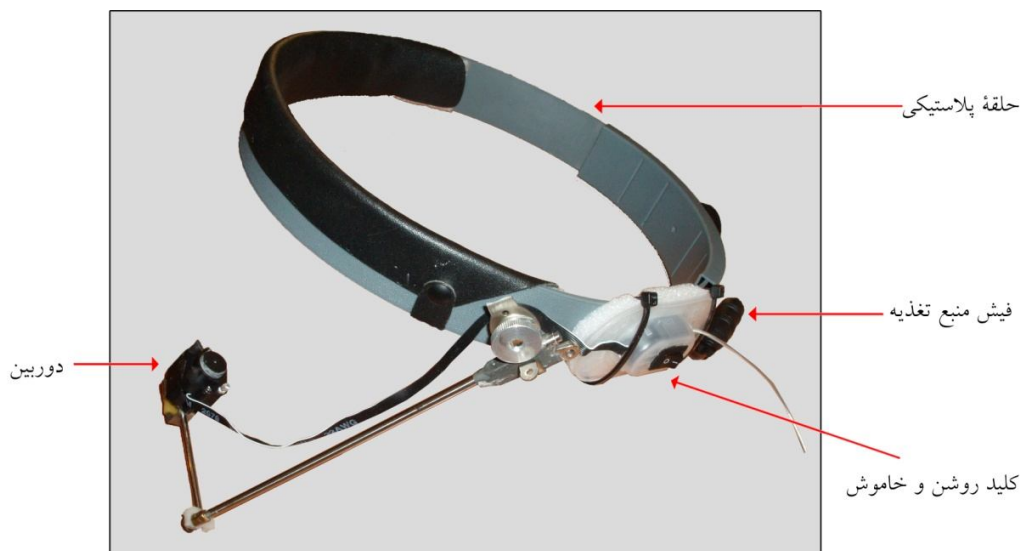
شکل ۶۰ : (۱) دوربین استفاده شده در نمونه دوم ردیاب، (۲) اجزای داخلی دوربین، (۳) تصویر دوربین مونتاژ شده بر روی سیستم ردیاب

در واقع سینک خنک کننده تکیه‌گاهی برای اجزای دوربین نیز بشمار می‌آید و لذا برای تأمین دو درجه آزادی دیگر دوربین از آن استفاده شد. همانگونه که در شکل ۶۰ تصویر ۳ دیده می‌شود، وسط سینک یک سوراخ به قطر ۲ میلی‌متر تعبیه شده تا بتوان نگهدارنده افقی را درون آن جا زد. بدین ترتیب دوربین به راحتی در امتداد نگهدارنده افقی، امکان حرکت کشویی و دوران خواهد داشت. برای محکم نمودن دوربین پس از تنظیم، از یک پیچ کوچک استفاده شده که در سوراخ پشتی سینک پیچانده شده و به این صورت سینک را به نگهدارنده محکم می‌کند.

وزن این نمونه با باتری و سیم‌های مربوطه و منبع روشنایی مادون قرمز؟؟؟ گرم شده که بیشتر آن ناشی از حلقه پلاستیکی می‌باشد همچنین وزن مجموعه دوربین و منبع روشنایی مادون قرمز نیز به تنهایی؟؟؟ گرم شده است.

۵. ۴ : نمونه سوم ردیاب چشم ساخته شده

هدف از طراحی این نمونه ترکیب قابلیت‌های دو نمونه پیش بوده، تا در عین سبکی و سادگی، دوربین بتواند براحتی تنظیم شود و در وضعیت خود کمترین لرزش را با حرکت سر داشته باشد.



شکل ۶۱: نمونه سوم ردیاب ساخته شده و اجزای آن

کلید روشن و خاموش بر روی خود ردیاب تعبیه شده است تا هر بار نیاز به قطع و وصل نمودن فیش منبع تغذیه نداشته باشیم. سیم‌های ارتباطی ظرفیت بیشتری دارند. و بطور کلی نگهدارنده‌ها و دوربین از نمونه اول و بدنه اصلی از نمونه دوم ایده برداری شده است.

فرستنده دوربین از دوربین جدا شده و به جعبه پلاستیکی ظرفی که کلید روشن و خاموش بر روی آن قرار گرفته، منتقل شده است. این امر باعث خنک شدن اجزای نزدیک چشم گردیده است. وزن این نمونه با ؟؟؟ گرم می‌باشد.

۶.۴ : مقایسه

در نهایت اگر بخواهیم مقایسه‌ای از نمونه‌های ردیاب ساخته شده ارائه دهیم می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

گرفتن تصویر چشم از مقابل شیشه عینک موجب می‌شود که بازتاب نور محیط بخصوص صفحه نمایش، از سطح شیشه در تصویر ظاهر شده و تصویر نامناسبی حاصل می‌گردد که تشخیص گلینت و مردمک در آن دشوار خواهد شد. در هر سه نمونه ردیاب ساخته شده این امکان وجود دارد که با پایین آوردن دوربین، تصویر چشم را از فاصله میان لبه پایینی عینک طبی و گونه شخص گرفت که در این حالت تصویر چشم باریک‌تر دیده می‌شود اما قابل استفاده خواهد بود. لازم به ذکر است که برای افراد عینکی با چشمان کشیده و یا مژه‌های بلند و یا افرادی که فضای کافی میان گونه و عینک آنها وجود ندارد، ردیاب قابل استفاده نمی‌باشد.

فشار احساس شده ناشی از نصب نمودن ردیاب بر روی سر، توسط کاربر و در نتیجه میزان ناراحتی کاربر در نمونه سوم بسیار کمتر از دو نمونه اول بوده و اکثر افراد از کار با نمونه سوم بیشتر احساس رضایت می‌کنند. با این وجود کوچک بودن نمونه اول و مشابهت آن با عینک سبب شده که برخی از کاربران این نمونه را بر نمونه دوم و سوم ترجیح دهند.

در هر سه ردیاب ساخته شده به راحتی می‌توان تصویر را به دلخواه از چشم چپ و یا راست گرفته و محدودیتی از این حیث وجود ندارد.

گرم شدن دوربین در نمونه اول در عین حال نزدیک بودن آن به چشم، ممکن است در برخی افراد باعث سوزش چشم و خشک شدن آن گردد که در نمونه دوم و سوم این عیب به چشم نمی‌خورد. تنظیم موقعیت دوربین در نمونه اول و سوم با نیروی اندک دست ممکن بوده و این مرحله بسیار سریع انجام می‌شود، در حالیکه در نمونه دوم حرکت کشویی و یا دوران دوربین مستلزم باز نمودن پیچ ترمز است که البته با دست نیز ممکن می‌باشد.

نکته حائز اهمیت در نمونه دوم صلب نبودن آن نسبت به نمونه اول و سوم می باشد که موجب می شود مقاومت ردیاب دوم در برابر تکان های سر کم شود و در نتیجه تصویر در هنگام حرکت سر اندکی لرزش داشته باشد.

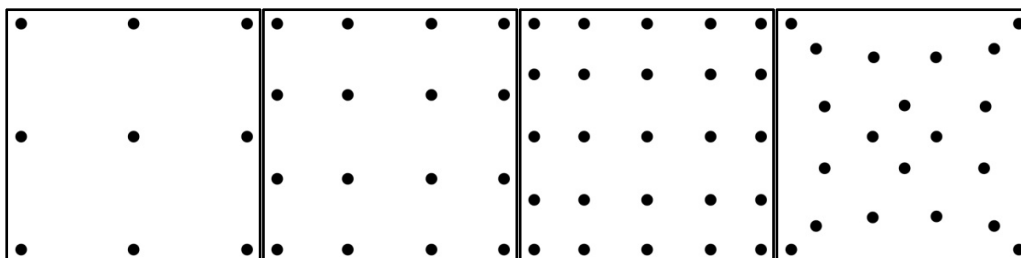
۵ : ارزیابی عملکرد بخش‌های مختلف نرم‌افزار (متدها و الگوریتم‌ها)

در این فصل به ارزیابی و بررسی عملکرد برخی متدها و روش‌هایی که در نرم‌افزار بکار رفته است می‌پردازیم. در فصل آخر به ارزیابی کلی عملکرد سیستم ردیاب چشم ساخته شده، بر روی نمونه‌های واقعی یعنی معلولین حرکتی پرداخته شده است و در واقع میزان مفید بودن آن در برقراری ارتباط معلولین با رایانه و میزان رضایت آنها از سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. اما نیاز است یک ارزیابی و مقایسه هم میان برخی متدهای نرم‌افزاری بکار رفته در سیستم داشته باشیم. انجام این مراحل بر روی معلولین حرکتی به دلیل مشکلات جانبی چون:

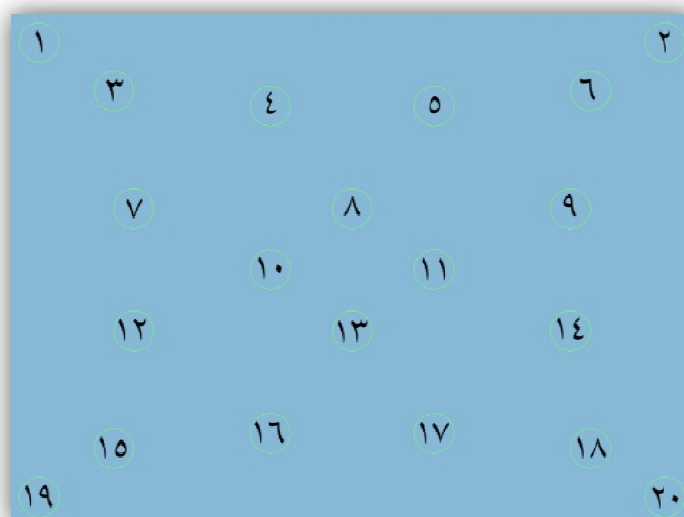
۱. عدم دسترسی به تعداد زیادی معلول جهت انجام همه ارزیابی‌ها
 ۲. عدم امکان دسترسی به معلولین به صورت طولانی مدت و یا چند نوبته
 ۳. عدم حوصله کافی معلولین کوادرپلژیک برای همکاری در تمام مراحل ارزیابی‌ها که گاهی ممکن است خشک، تکراری و خسته کننده باشند.
- امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین ارزیابی‌های مربوط به این فصل که بیشتر هم به منظور مقایسه کردن روش‌های مختلف انجام می‌گیرد را بر روی افراد سالم انجام می‌دهیم.

۵. ۱ : ارزیابی و مقایسه کالیبراسیون ۹، ۱۶ و ۲۵ نقطه در رزولوشن‌های مختلف

در این قسمت عملکرد کالیبراسیون ۹، ۱۶ و ۲۵ نقطه را با هم مقایسه می‌نماییم. بگونه‌ای که در شرایط یکسان، کالیبراسیون با تعداد نقاط مختلف صورت گرفته و پس از هر بار کالیبراسیون، کاربر در به ۲۰ نقطه مشخص از صفحه خیره شده و در طول مدت خیره شدن به هر نقطه اطلاعات مربوط به نقطه دید محاسبه شده ذخیره شده و نمایش داده می‌شود. ۵۰ داده برای هر نقطه گرفته خواهد شد که میانگین آنها به عنوان میانگین خطا ارائه می‌شود. اختلاف نقطه دید و مکان واقعی نقطه مورد نظر به عنوان خطا در دو راستای افقی و عمودی محاسبه می‌شود. این اختلاف برای ۲۰ نقطه در صفحه، ۳ بار توسط هر کاربر در هر سه حالت کالیبراسیون بدست آمده و به عنوان معیاری از دقت اندازه‌گیری نقطه دید بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که سر کاربر در طول فرایند ثابت گرفته شده و تنظیمات و شرایط محیطی دیگر نیز ثابت گرفته شده تا خطای اندازه‌گیری شده مقایسه درست‌تری از سه حالت کالیبراسیون باشد.



شکل ۶۲: به ترتیب از چپ به راست، موقعیت نقاط در حالت کالیبراسیون ۹ نقطه، ۱۶ نقطه و ۲۵ نقطه و در تصویر سمت راست نیز ۲۰ نقطه که کاربر باید به آنها خیره شود نشان داده شده است.



شکل ۶۳: ترتیب شماره گذاری ۲۰ نقطه ارزیابی در صفحه

وضعیت ۲۰ نقطه مورد نظر برای تست بگونه ای انتخاب شده است که شامل چهار نقطه کناری صفحه که جزو نقاط کالیبراسیون در هر سه حالت ۹، ۱۶ و ۲۵ نقطه می باشد بوده، به علاوه ۱۶ نقطه دیگر در صفحه که جزو هیچ کدام از نقاط کالیبراسیون نیستند را شامل شود. به این ترتیب چهار نقطه از خود نقاط کالیبراسیون و همچنین ۱۶ نقطه که جزو نقاط کالیبراسیون نیستند مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت (شکل ۶۲).

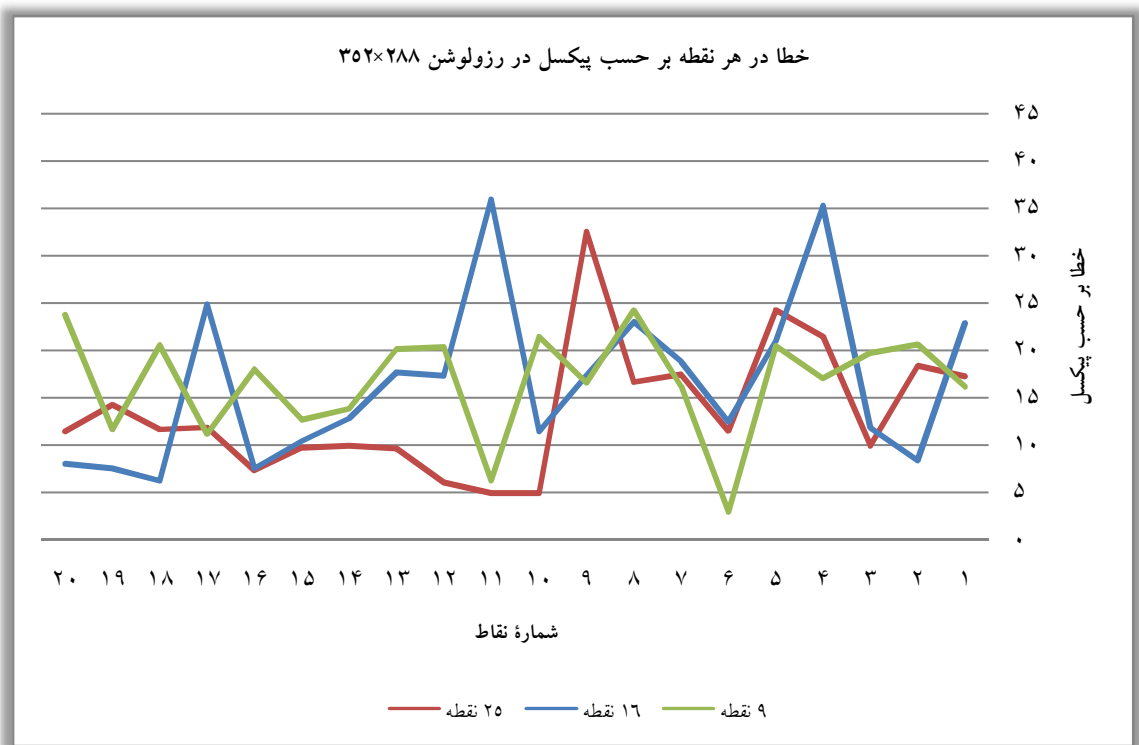
بنابراین هر کالیبراسیون جمعاً سه مرتبه توسط سه کاربر مختلف مورد ارزیابی قرار می گیرد. این ارزیابی برای سه رزولوشن 352×288 ، 640×480 و 720×576 سه مرتبه تکرار گردیده و با فرض آنکه ۲۰ نقطه مورد نظر برای تست را مطابق شکل ۶۳ شماره گذاری نماییم داده های بدست آمده بصورت زیر خواهد بود:

جدول ۳: میانگین خطای کل بدست آمده در ۲۰ نقطه صفحه در حالت‌های مختلف

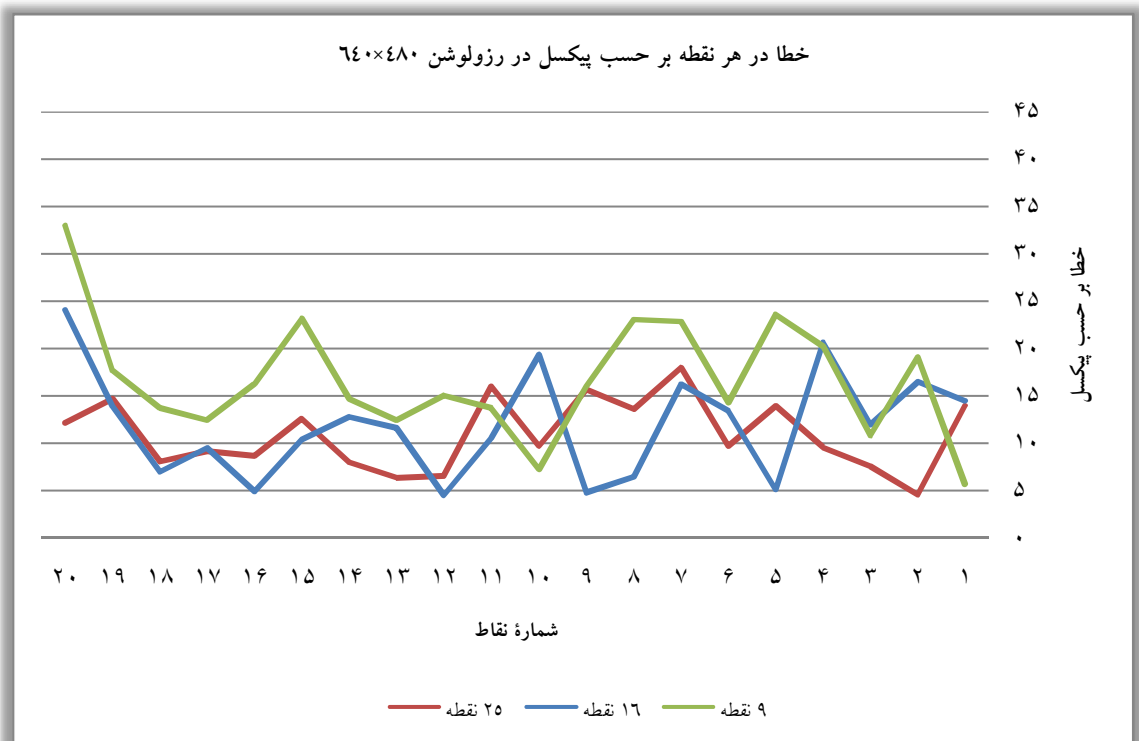
خطا در هر نقطه بر حسب پیکسل									
۷۲۰×۵۷۶			۶۴۰×۴۸۰			۳۵۲×۲۸۸			شماره نقاط
نقطه ۲۵	نقطه ۱۶	نقطه ۹	نقطه ۲۵	نقطه ۱۶	نقطه ۹	نقطه ۲۵	نقطه ۱۶	نقطه ۹	
28.1	14.7	12.8	14	14.5	5.7	17.2	22.8	16.1	۱
20.5	9.6	6.5	4.6	16.5	19.1	18.3	8.3	20.6	۲
13.7	10.3	27.3	7.6	12	10.8	9.9	11.8	19.7	۳
13.2	5.1	23.3	9.6	20.7	20.3	21.4	35.2	17	۴
7.1	12	13.5	14	5.1	23.6	24.2	20.9	20.4	۵
7.4	9.4	4.6	9.7	13.4	14.3	11.5	12.4	2.9	۶
1.8	10.8	21.6	18	16.2	22.9	17.4	18.8	16.2	۷
12.2	2.6	27.8	13.6	6.4	23.1	16.6	23	24.2	۸
21.2	12.2	12.5	15.7	4.8	16	32.5	17.3	16.5	۹
12.5	16	23.7	9.7	19.4	7.3	4.9	11.4	21.4	۱۰
10.5	14.4	24.6	16	10.5	13.8	4.9	35.9	6.2	۱۱
7	23.5	25	6.6	4.5	15.1	6	17.3	20.3	۱۲
5	7.4	13.3	6.4	11.6	12.5	9.6	17.6	20.1	۱۳
17.5	9.8	8.7	8	12.8	14.7	9.9	12.8	13.8	۱۴
1.8	4.8	20.1	12.6	10.4	23.2	9.7	10.4	12.6	۱۵
8.3	10.1	17.2	8.7	4.9	16.3	7.3	7.5	18	۱۶
10.9	9.3	12.8	9.2	9.5	12.5	11.8	24.8	11.1	۱۷
15.2	24.2	14.1	8.1	7	13.8	11.6	6.2	20.5	۱۸
8	10.8	33	14.7	13.9	17.7	14.2	7.5	11.6	۱۹
15.3	25	10.2	12.2	24.1	33	11.4	8	23.7	۲۰
11.9	12.1	17.6	11.0	11.9	16.8	13.5	16.5	16.6	میانگین

در جدول بالا برای بیان میزان خطا از بردار خطا استفاده خواهیم کرد، یعنی فاصله نقطه اندازه‌گیری شده تا نقطه واقعی. این خطا را در هر نقطه از میانگین خطای سه کاربر در آن نقطه بدست آورده و به مقایسه نتایج می‌پردازیم.

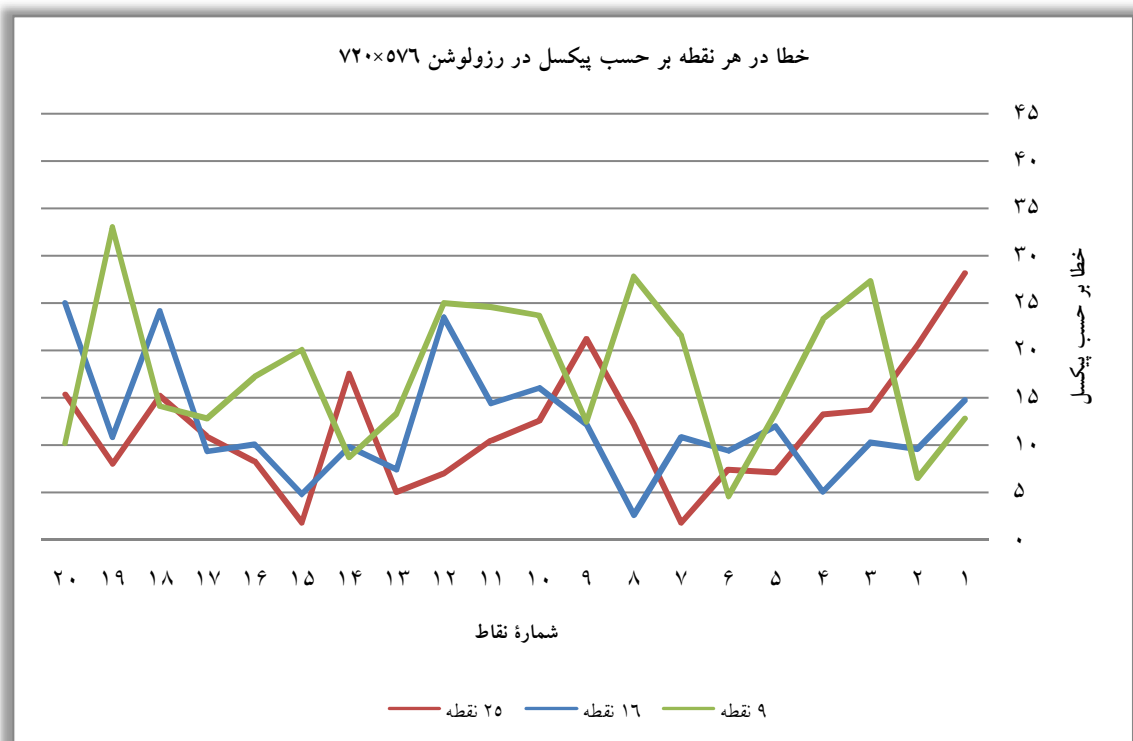
در اینجا ابتدا مقایسه‌ای خواهیم داشت بر میانگین خطا در ۳ نوع کالیبراسیون مختلف. میانگین خطا در ۲۰ نقطه مورد نظر از صفحه را می‌توان برای هر کالیبراسیون در زیر مشاهده نمود. این خطا در سه رزولوشن مختلف ۳۵۲×۲۸۸، ۶۴۰×۴۸۰ و ۷۲۰×۵۷۶ محاسبه شده و در سه نمودار مختلف نشان داده شده است.



شکل ۶۴

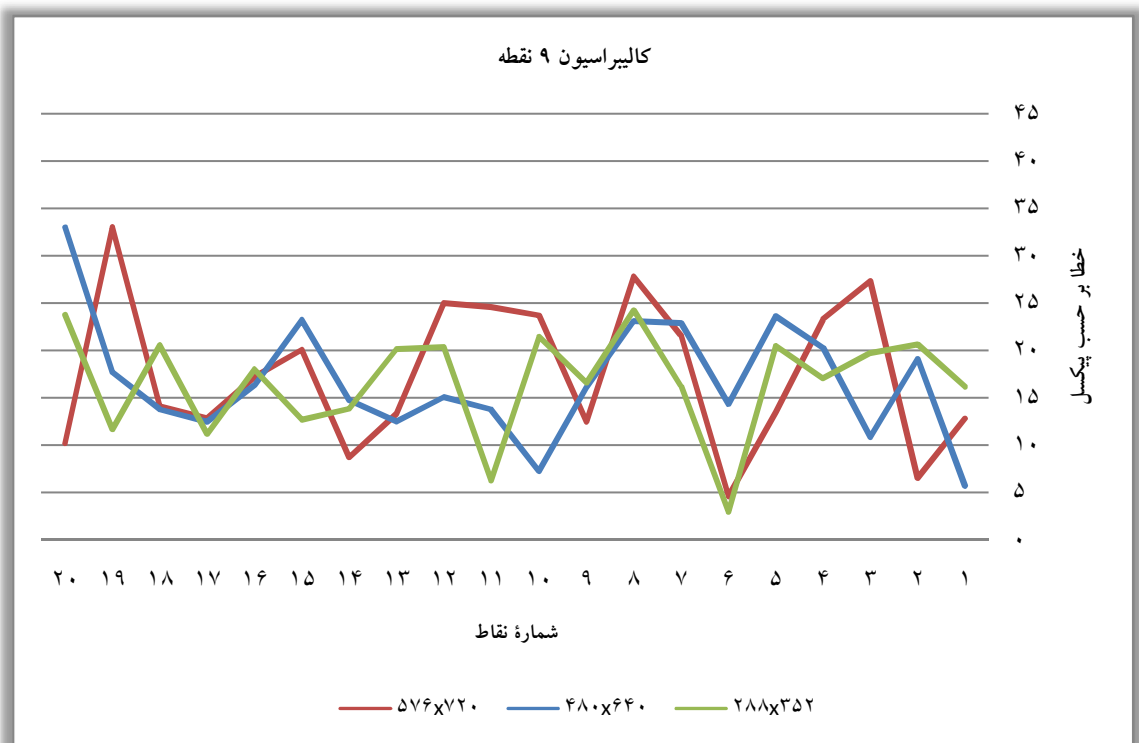


شکل ۶۵

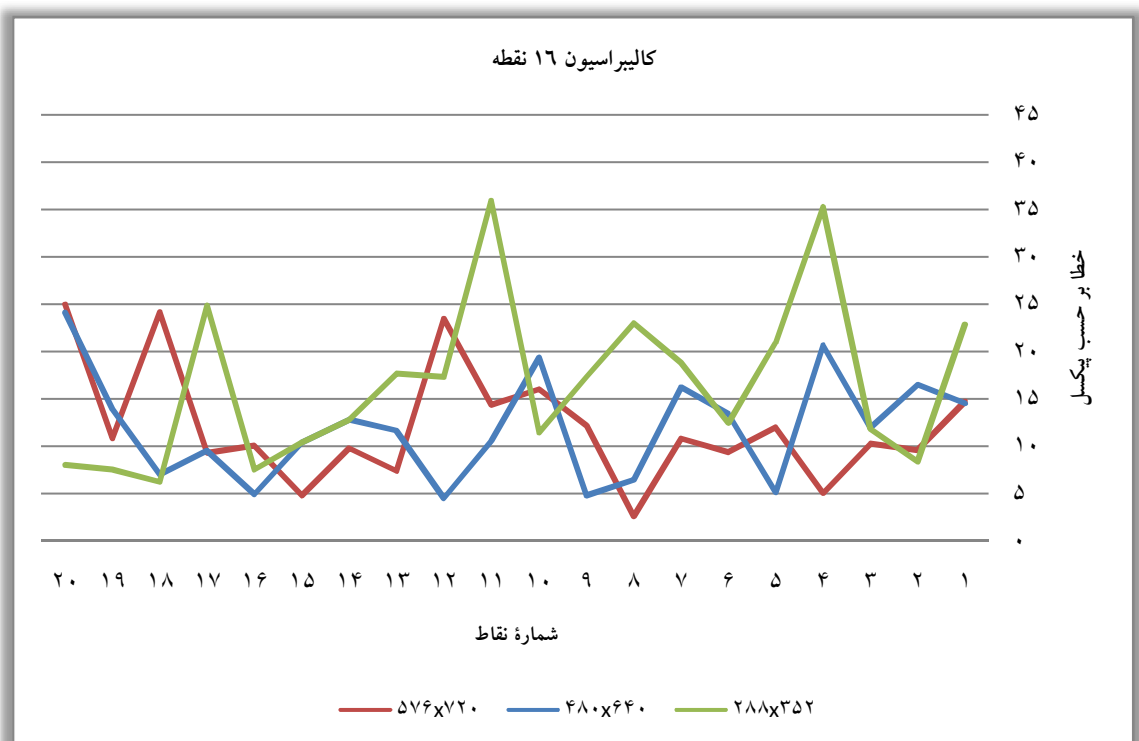


شکل ۶۶

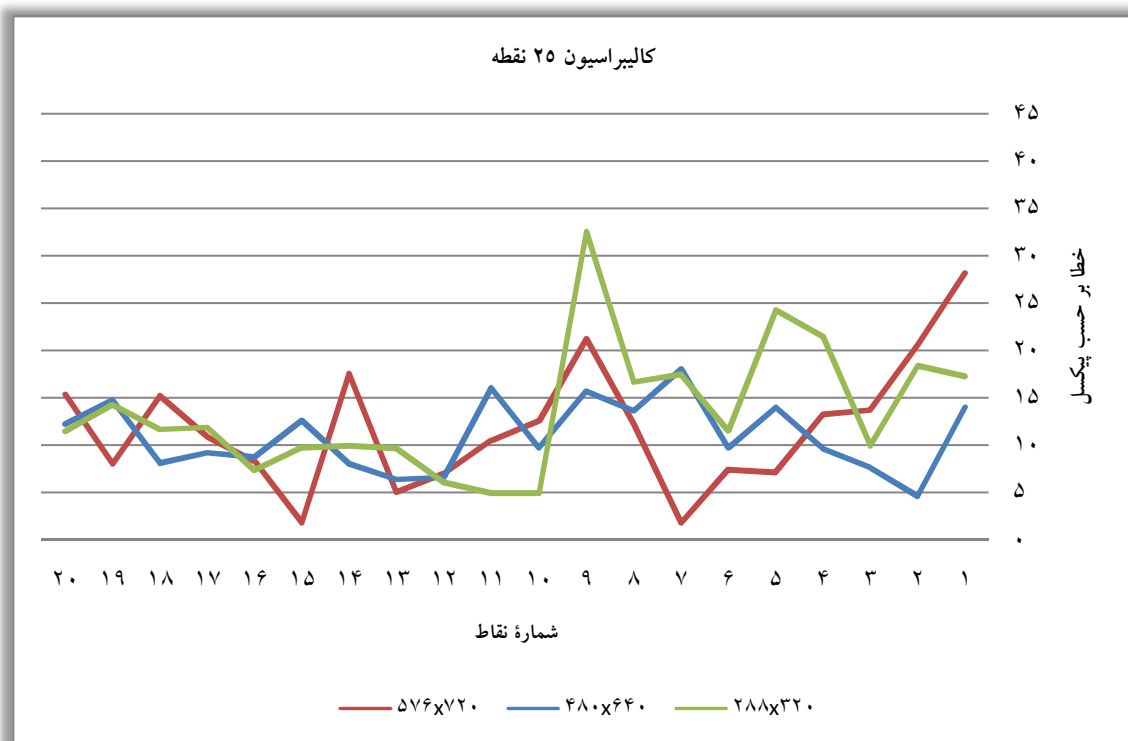
اجمالاً افزایش تعداد نقاط برای کالیبراسیون می‌تواند به کمتر نمودن خطا کمک کند. این نتیجه را میتوان از میانگین کل خطا در صفحه در حالت‌های مختلف مشاهده نمود که در سطر آخر جدول ۳ نیز آمده است. این اختلاف میان ۹ نقطه و ۲۵ نقطه قابل ملاحظه است. هر چند که در رزولوشن‌های بالاتر افزایش تعداد نقاط بخصوص از ۱۶ به ۲۵ نقطه تفاوت زیادی را در کاهش میزان خطا ایجاد نمی‌کند. این مطلب را از سه نمودار اول می‌توان دریافت. همچنین سه نمودار دیگر جهت مقایسه نقش تغییرات رزولوشن تصویر بر روی خطا از داده‌های این ارزیابی تهیه گردیده که در نمودارهای زیر برای سه نوع کالیبراسیون آورده شده است.



شکل ۶۷



شکل ۶۸



شکل ۶۹

از سه نمودار اخیر می‌توان دریافت که کالیبراسیون ۹ نقطه در رزولوشن‌های بیشتر میانگین خطای کمتری را داشته، حال آنکه کالیبراسیون با تعداد نقاط بیشتر مثل ۲۵ نقطه، در هر سه رزولوشن تقریباً یکسان عمل می‌نماید.

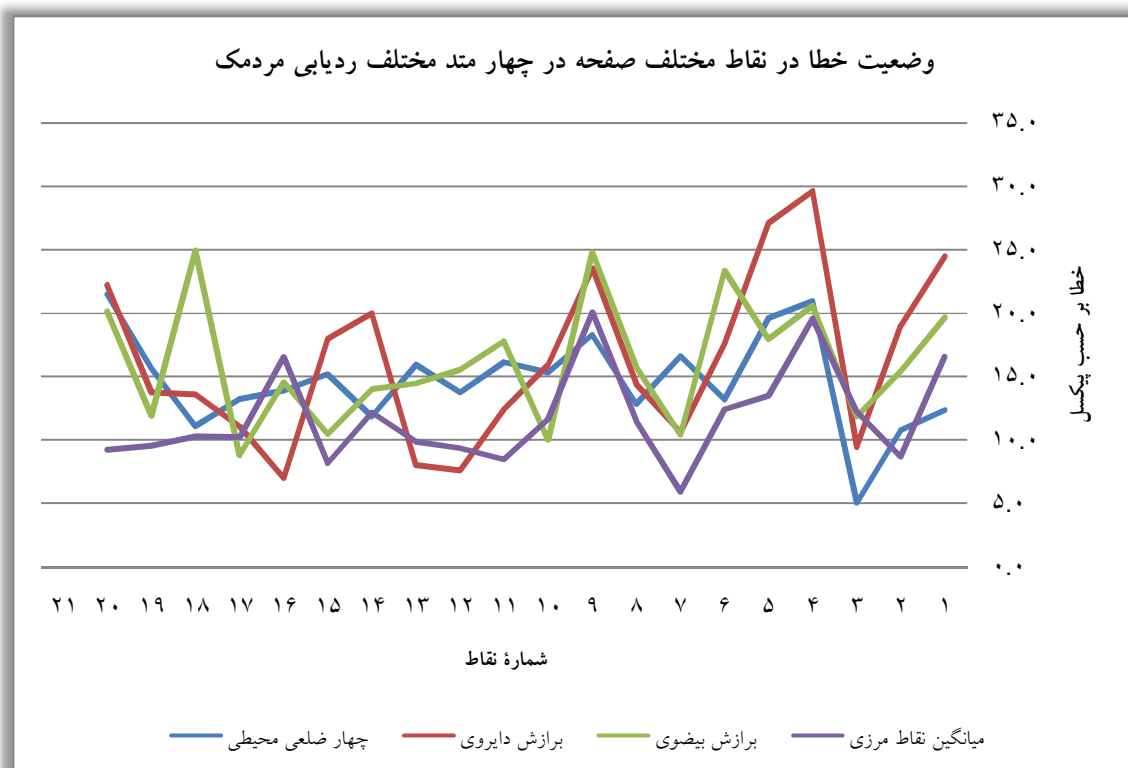
طبق نتایج این ارزیابی حالت بهینه را میتوان کالیبراسیون ۱۶ نقطه با رزولوشن ۷۲۰×۵۷۶ معرفی نمود.

۲.۵ : مقایسه اجمالی روش‌های بکار رفته در ردیابی مرکز مردمک

در اینجا به مقایسه عملکرد روش چهارضلعی محیطی و دو روش برازشی و روش میانگین نقاط مرزی از جهت سرعت عمل، دقت و کارایی در سیستم ساخته شده می‌پردازیم. بدین صورت که هر کدام از متدها را بر روی سه کاربر مشخص با کالیبراسیون ۱۶ نقطه تنظیم می‌نماییم. پس از آن با کمک صفحه ۲۰ نقطه که در بخش قبل توضیح داده شد خطای تعیین نقطه دید را برای هر روش بدست می‌آوریم. این خطا و در هنگام نگاه کردن به نقاط در جدول ۴ نشان داده شده است. در اینجا از فیلتر نرم کننده مرکز مردمک با عدد ۲۰۰ و همچنین از فیلتر نرم کننده حرکات ماوس با عدد ۳۵۰ استفاده شده است.

جدول ۴

بردار خطای هر نقطه بر حسب پیکسل در ۴ متد مختلف ردیابی مردمک												
کاربرسوم				کاربردوم				کاربراول				شماره نقاط
میانگین نقاط مرزی	برآزش بیضوی LSQ	برآزش دایروی LSQ	چهارضلعی محیطی	میانگین نقاط مرزی	برآزش بیضوی LSQ	برآزش دایروی LSQ	چهارضلعی محیطی	میانگین نقاط مرزی	برآزش بیضوی LSQ	برآزش دایروی LSQ	چهارضلعی محیطی	
18.4	14.6	23.1	11.9	13.9	20.1	19.8	17.2	17.4	24.2	30.5	8	۱
10.9	10.7	8.2	18.5	9.2	13	10.7	3.9	6	22.5	38.1	9.9	۲
18.5	11.6	13.8	4.9	9.9	13.8	12.7	6.8	8.4	10.1	1.8	3.4	۳
18.7	17.3	20.5	22.4	11.3	30.1	33.4	24.8	28.6	14.3	35	15.6	۴
20.9	21.9	40	13.9	17.1	17.4	12.2	15.5	2.5	14.5	29.1	29.5	۵
13.3	8.4	12.4	10.8	20.1	41.9	15.3	11.3	3.9	19.7	25.1	17.4	۶
6.1	14.7	11.8	17.1	5.3	11.3	3.9	22.7	6.4	5.3	16.2	10	۷
19.8	10.1	10.6	14.1	6.2	32.5	13.4	12	8.5	4.6	19.3	12.4	۸
17.3	14.2	24.6	15.8	18	33	15.8	23.7	24.9	27.1	30.3	15.4	۹
8.7	11.4	14.1	22.2	19.8	7	27.6	10.4	6.5	11.6	6.1	13.3	۱۰
8.9	17.3	13.4	10.8	9.8	19.2	21.1	18	6.7	16.8	2.8	19.7	۱۱
7	25	3.2	15.6	15.5	9.6	11.4	14.4	5.6	12	8.3	11.2	۱۲
4.7	18.2	9.8	11.9	20	9.7	8.3	15.7	4.9	15.4	6	20.2	۱۳
24.2	17.5	16.2	11.5	2.1	7.3	19.1	15.1	10.1	17.2	24.6	8.9	۱۴
4.3	8.9	16.4	22.6	10.6	13.1	17.2	10.7	9.6	9.4	20.4	12.2	۱۵
13.4	14.3	8.2	17.2	23.8	15.1	5.3	16.9	12.4	14.2	7.5	7.5	۱۶
12.6	17	15.7	18.7	5.1	3.7	6.8	6.1	12.9	5.7	10.8	14.9	۱۷
6.3	34.2	11.8	10.8	7	32	18.6	19	17.5	8.5	10.4	3.4	۱۸
8	5.3	6.8	12.2	7.6	12.1	13.3	22.5	13	18.4	21.1	12.2	۱۹
9.6	20.6	8.7	19.7	6.9	18.2	30.2	24.9	11.2	21.6	27.7	19.8	۲۰
12.6	15.7	14.5	15.1	12.0	18.0	15.8	15.6	10.9	14.7	18.6	13.2	میانگین کل خطا در صفحه



شکل ۷۰

سرعت عمل این متدها در تعیین مرکز مردمک نیز در جدول ۵ نشان داده شده است. در سه متد برازش و میانگین از ۱۸۰ نقطه مرزی مردمک استفاده گردیده است.

جدول ۵

	میانگین نقاط مرزی	برازش بیضوی LSQ	برازش دایروی LSQ	چهار ضلعی محیطی
سرعت پردازش هر فریم بر حسب میلی ثانیه	۱۸	۲۰	۲۰	۹

به طور کل می توان متد میانگین نقاط مرزی را از متدهای دیگر استفاده شده در ردیابی مردمک، دقیق تر دانست و در ضمن زمان پردازش آن نیز مطلوب بوده، در عین حال به علت استفاده از آرایه نقاط مرزی، و صرف نظر از نقاط پایینی و بالایی مرز مردمک در برابر تأثیر مژه ها و پنهان شدن مردمک در زیر پلک بالایی (همانگونه که در بخش ۲. ۴. ۵. ۳ توضیح داده شد.) نسبت به متد چهار ضلعی محیطی مقاومت بهتری از خود نشان می دهد.

۳.۵ : مقایسه عملکرد کلیک به روش زمان مکث با زمان‌های مختلف در محیط تایپ

انتخاب و کلیک به روش زمان مکث یکی از روش‌های استفاده شده برای کلیک کردن در سیستم ساخته شده است. در این قسمت قصد داریم بهینه‌ترین مدت زمان مکث را برای انجام فعالیت تایپ که کاربر در آن باید حروف مورد نظر را در صفحه نمایش انتخاب نماید، تعیین کنیم. برای این ارزیابی از سه معیار با هم استفاده می‌کنیم. یکی سرعت عمل تایپ، دیگری تعداد حروف غلط که بصورت ناخواسته تایپ شده و دیگری نظر خود کاربر در مورد هر کدام از حالت‌ها.

در این ارزیابی از ۳ کاربر که سابقه کار با دستگاه را داشته و همچنین از قبل با جای حروف در صفحه آشنایی داشته‌اند، و همچنین ۳ کاربر که با جای حروف در صفحه آشنا نبودند، خواسته شده که جمله "به نام خداوند بخشنده مهربان" را در چهار حالت تایپ نمایند: کلیک پس از ۵۰۰، ۹۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌ثانیه مکث.

سرعت عمل تایپ بر حسب تعداد حروف درست در دقیقه و همچنین تعداد حروف ناخواسته تایپ شده در جدول ۷ آورده شده است. پس از هر بار تایپ نیز از شخص سه سوال پرسیده می‌شود:

جدول ۶: سه پرسش مورد نظر برای ارزیابی عملکرد کلیک به روش زمان مکث با زمان‌های مختلف

سرعت عمل شما در تایپ جمله چقدر بود؟					
خیلی زیاد	۵	۴	۳	۲	۱
چقدر در هنگام تایپ احساس آرامش می‌کردید؟ (استرس و هل شدن)					
استرس زیاد	۵	۴	۳	۲	۱
چقدر این مدت زمان را برای تایپ مناسب می‌بینید؟					
بسیار مناسب	۵	۴	۳	۲	۱
خیلی نامناسب					

جدول ۷: مقایسه عملکرد کلیک به روش زمان مکث با زمان‌های مختلف در محیط تایپ

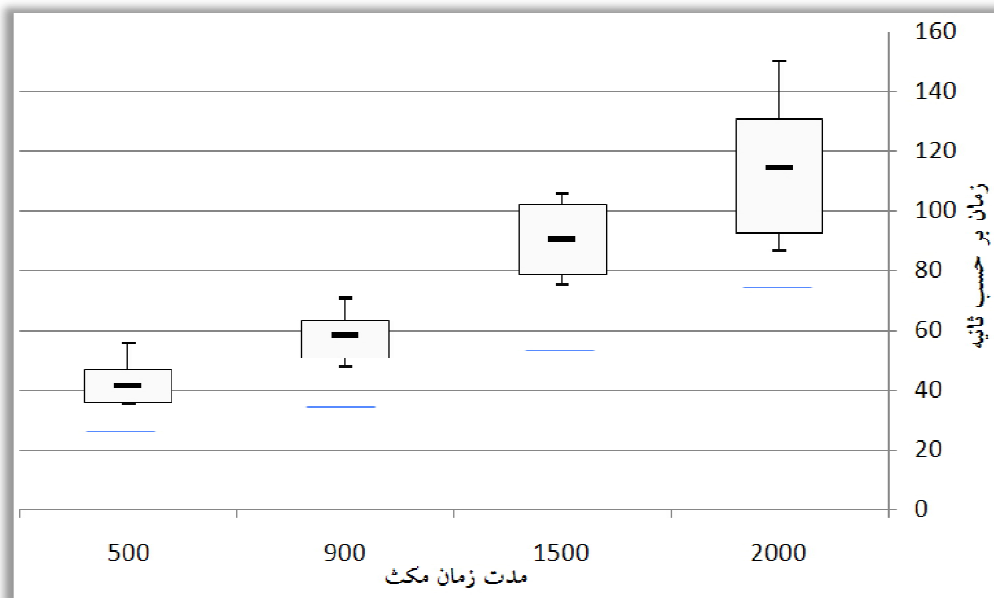
ردیف	معیار	کاربران آشنا با جای حروف در صفحه			کاربران ناآشنا با جای حروف در صفحه		
		کاربر اول	کاربر دوم	کاربر سوم	کاربر چهارم	کاربر پنجم	کاربر ششم
۱	مدت زمان تایپ (ثانیه)	86.5	123	87.9	105.4	133.1	150
	تعداد حروف غلط	0	1	0	0	2	2
	سوال اول	5	4	1	1	3	1
	سوال دوم	1	4	1	1	2	3
	سوال سوم	5	1	1	1	4	1
۲	مدت زمان تایپ (ثانیه)	75.1	77.5	82.1	105.8	98.1	103.1
	تعداد حروف غلط	0	0	1	1	2	1
	سوال اول	4	4	2	2	4	3

1	2	1	1	4	1	سوال دوم	
2	4	2	2	1	4	سوال سوم	
64.5	60.1	47.9	56.6	70.6	48.8	مدت زمان تایپ (ثانیه)	۱۰۰٪
0	0	0	0	0	0	تعداد حروف غلط	
4	4	4	4	4	1	سوال اول	
1	1	1	2	2	1	سوال دوم	
3	5	4	4	4	2	سوال سوم	
45.6	47.2	35.4	35.3	55.6	36.8	مدت زمان تایپ (ثانیه)	
1	1	1	0	1	0	تعداد حروف غلط	۱۰۰٪
5	5	5	5	5	1	سوال اول	
2	1	2	1	4	2	سوال دوم	
3	5	5	5	1	2	سوال سوم	
55.1	65.3	68.9	45.7	50.2	34.4	مدت زمان تایپ (ثانیه)	
1	0	0	0	0	0	تعداد حروف غلط	
4	3	5	4	4	3	سوال اول	۱۰۰٪
1	1	1	1	1	1	سوال دوم	
5	4	5	5	5	4	سوال سوم	

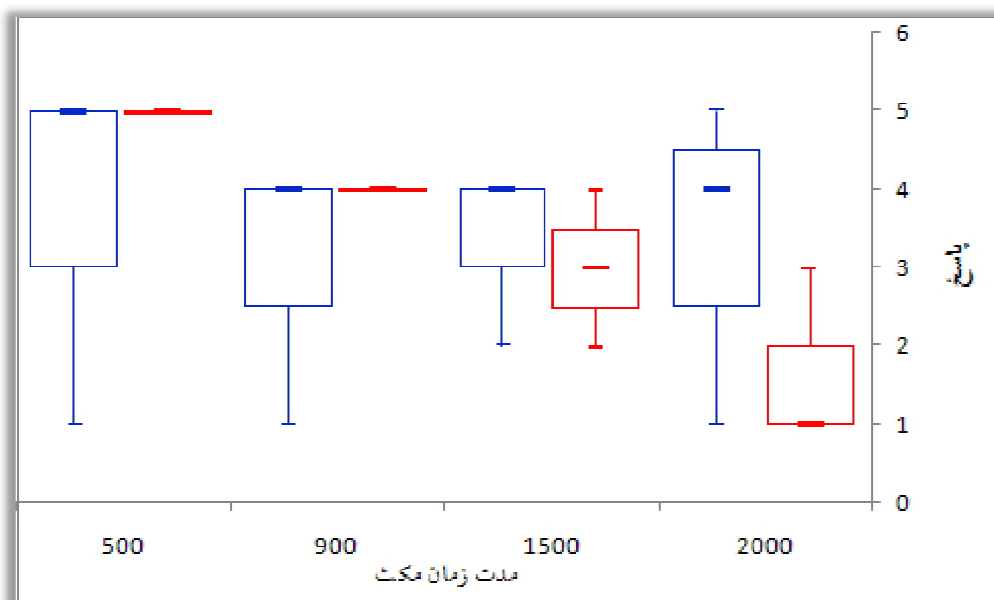
سرعت عمل تایپ بدست آمده به صورت تئوریک نیز برای هر حالت عبارتند از ۷۰ ثانیه برای مکث ۲۰۰۰ میلی ثانیه، ۵۶ ثانیه برای مکث ۱۵۰۰ میلی ثانیه، ۳۶ ثانیه برای مکث ۹۰۰ میلی ثانیه و ۲۵ ثانیه برای مکث ۵۰۰ میلی ثانیه.

در این بخش و بخصوص فصل بعد برای نشان دادن برخی نتایج ارزیابی ها از نمودار جعبه ای^۱ استفاده نموده ایم. نمودار جعبه ای نموداری است که به کمک معیارهای مرکزی و پراکندگی، موقعیت مجموعه داده ها را به شکلی بسیار گویا و مفید ارائه می دهد. در این نمودار با یک مستطیل (باکس) و یک خط در داخل آن، چارکهای اول و سوم و میانه رسم نشان داده می شود. همچنین کمترین و بیشترین اندازه مشاهده شده با استفاده از دو خط (ویسکر) در دو طرف مستطیل نشان داده می شود. با استفاده از این نمودار می توان مرکزیت، پراکندگی و چولگی داده ها را تفسیر نمود.

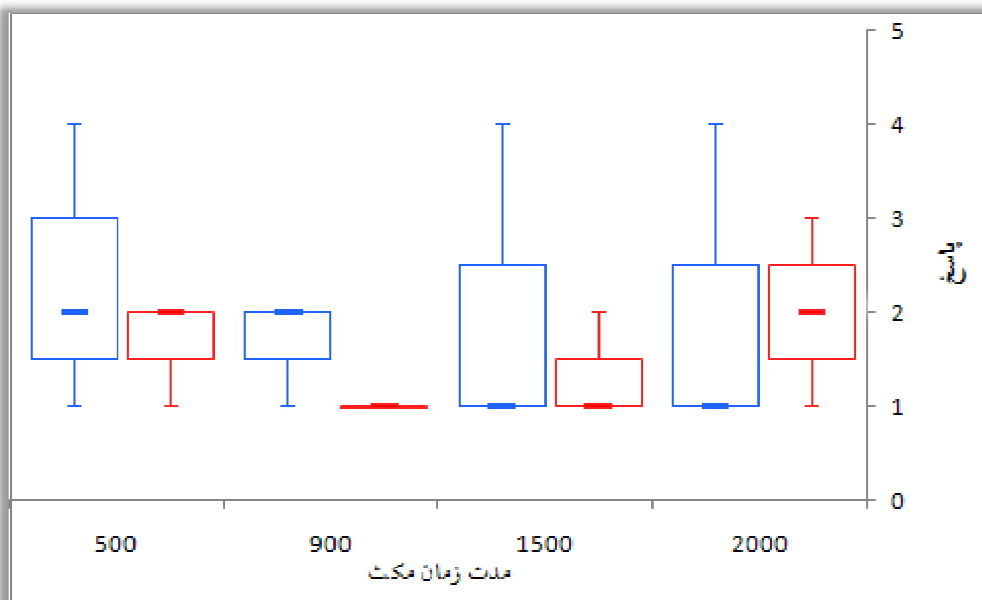
^۱ Box and Whisker Plot



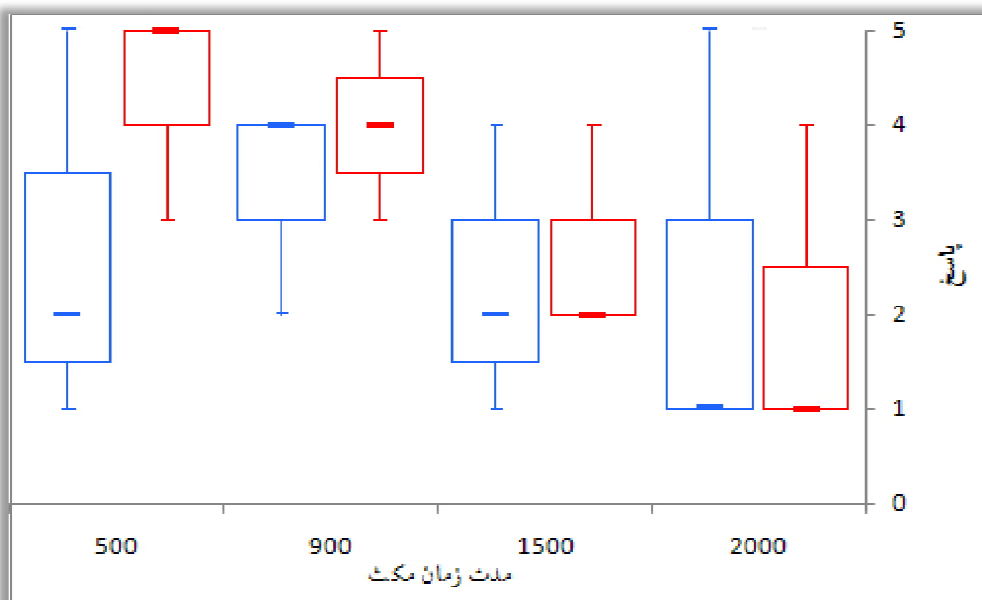
شکل ۷۱: سرعت عمل تایپ حروف در ۴ حالت مختلف کلیک با مکث. خطوط آبی رنگ نیز سرعت تتوریک و ایده آل برای هر حالت می باشد.



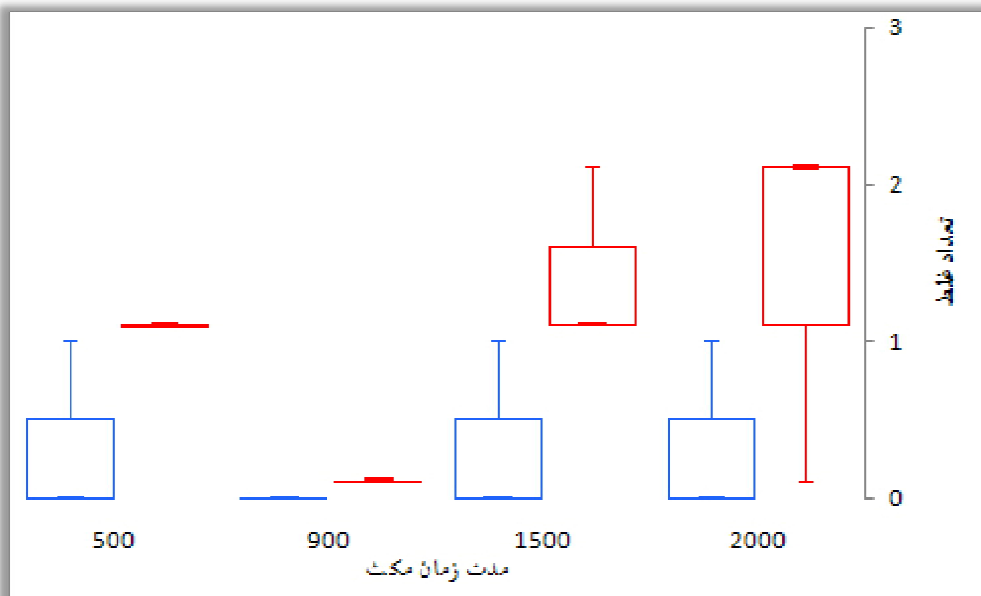
شکل ۷۲: پاسخ کاربران به سوال اول که نظرشان را در مورد سرعت عمل تایپ در ۴ حالت مختلف کلیک با مکث نشان می دهد، شاخص های قرمز سمت راست مربوط به کاربران نا آشنا و شاخص های آبی سمت چپ مربوط به کاربران آشنا با جای حروف در صفحه می باشد.



شکل ۷۳: پاسخ کاربران به سوال دوم که در مورد میزان استرس در حین تایپ در ۴ حالت مختلف کلیک با مکث می‌باشد، شاخص‌های قرمز سمت راست مربوط به کاربران ناآشنا و شاخص‌های آبی سمت چپ مربوط به کاربران آشنا با جای حروف در صفحه می‌باشد.



شکل ۷۴: پاسخ کاربران به سوال سوم که در مورد مناسب بودن مدت زمان مکث مورد نظر برای تایپ می‌باشد، شاخص‌های قرمز سمت راست مربوط به کاربران ناآشنا و شاخص‌های آبی سمت چپ مربوط به کاربران آشنا با جای حروف در صفحه می‌باشد.



شکل ۷۵: تعداد حروف غلط تایپ شده در ۴ حالت مختلف کلیک با مکث، شاخص‌های قرمز سمت راست مربوط به کاربران ناآشنا و شاخص‌های آبی سمت چپ مربوط به کاربران آشنا با جای حروف در صفحه می‌باشد.

در نهایت مدت زمان ۹۰۰ میلی‌ثانیه برای کلیک با مکث در محیط تایپ سرعت عمل مناسبی ارزیابی شده و کاربر در این سرعت حتی اگر آشنایی کمی با چیدمان حروف در صفحه داشته باشد، می‌تواند با اشتباه اندک آنها را انتخاب نماید. کاربران تقریباً با این مدت زمان قادر به تایپ ۳۰ حرف در دقیقه خواهند بود. سرعت بیشتر یعنی مکث ۵۰۰ میلی‌ثانیه به لحاظ احتمال اشتباه و استرس زیاد برای کاربران مناسب نمی‌باشد مگر کاربرانی مدت زیادی با دستگاه کار کرده‌اند.

کلیک کردن با پلک در محیط تایپ هرچند که سرعت مناسبی داشته و امکان اشتباه در آن کمتر است، اما به دلیل فعالیت فیزیکی که کاربر برای هر بار کلیک کردن توسط چشم می‌بایستی انجام بدهد، در جملات طولانی توصیه نمی‌گردد.

در محیط‌های دیگر که کاربر می‌بایستی با آرامش خاطر آیکون‌ها و دکمه‌های مورد نظر را پیدا کرده و بر روی آنها برود و آنها را کلیک نماید، پلک زدن روش مناسبی برای کلیک به حساب می‌آید. بالاخص هنگامیکه از متد پلک و مکث ترکیبی استفاده شود.

کلیک با مدت زمان مکث در این محیط‌ها همچون محیط مولتی‌مدیا با زمان ۲۵۰۰ میلی‌ثانیه نیز مناسب خواهد بود.

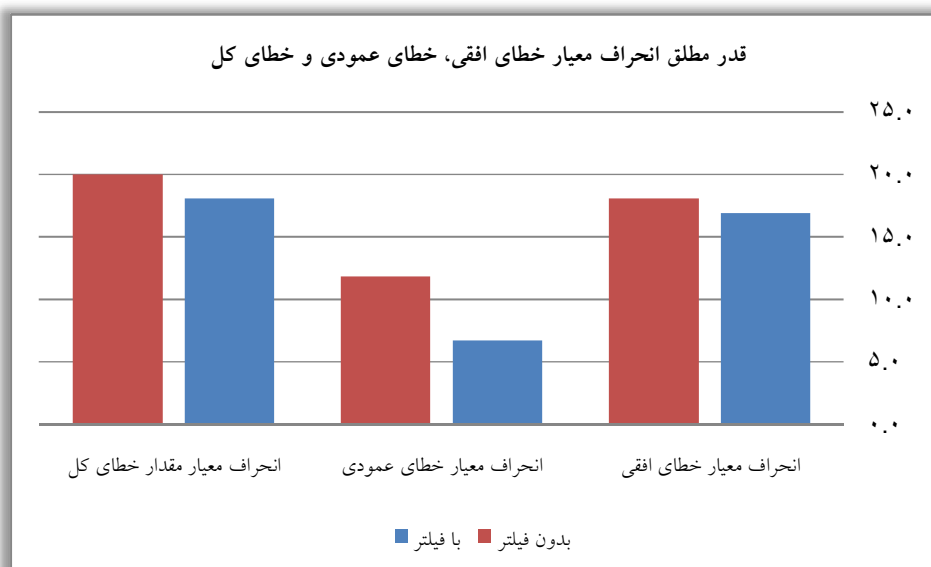
۴.۵ : عملکرد فیلتر "حذف حرکات انفرادی اضلاع چهار ضلعی محیطی مردمک"

جابجایی‌های ناخواسته اضلاع چهار ضلعی محیطی مردمک سبب جابجا شدن مرکز مردمک شده و در نهایت باعث ایجاد خطا در تعیین نقطه دید کاربر می‌گردد. عملکرد فیلتر حذف این حرکات انفرادی را می‌توان در میزان کاهش پرش‌های ناگهانی نقطه دید مشاهده نمود. از سه کاربر خواسته شده که یکبار با کمک این فیلتر و یکبار بدون آن با کالیبراسیون ۱۶ نقطه دستگاه را تست نمایند. بگونه‌ای که پس از تنظیم و کالیبراسیون به صفحه ۲۰ نقطه رفته و با خیره شده به نقاط بر روی آنها کلیک نمایند. میزان خطا در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۸

عملکرد فیلتر "حذف حرکات انفرادی اضلاع چهار ضلعی محیطی مردمک" بدون وجود فیلتر "نرم کننده بردار واصل مردمک به گلینت"												
بدون فیلتر						با فیلتر						شماره نقاط
میانگین فاصله نقطه دید واقعی از مقدار محاسبه شده ($\bar{F}$)	میانگین خطای عمودی ($\bar{Y}$)		میانگین خطای افقی ($\bar{X}$)			میانگین فاصله نقطه دید واقعی از مقدار محاسبه شده ($\bar{F}$)	میانگین خطای عمودی ($\bar{Y}$)		میانگین خطای افقی ($\bar{X}$)			
6.1	14.5	6.8	12.6	6.6	-1.8	0	18.4	0	-7	0	17	۱
1.3	6.1	4	0.2	2.7	4	194	52	8.9	-6.9	198.3	-30.6	۲
4.8	15.4	3.2	-9.8	5.6	11.1	2.1	6.6	0.5	4	2.2	5.2	۳
2.6	23.8	2.7	-22.9	5.9	2.8	4.6	16.1	5.1	-14.9	5.8	0.6	۴
125.3	49.2	25	-23.6	129.6	-13	5.5	14.6	4.6	-11.4	3.3	9	۵
2.8	21.6	2.6	-20.1	5.9	5.5	8.3	24.4	5.4	-18.5	7.5	15.3	۶
1.9	13.6	0.6	-11.8	3.3	-6.2	0.6	31.4	1.5	-30.6	6.8	2.6	۷
3.1	19.3	3	-19.1	3	0	1.5	30.1	0.4	-27.7	4.7	11.1	۸
3.3	19.6	3.2	-18.2	6.3	3.9	0.4	26.7	0.3	-14.8	0.2	22.3	۹
2.4	24.8	0.5	-23.4	5.7	-6.5	0	6.8	0	3	0	-6.1	۱۰
6.3	21.4	7.1	-19.9	2.6	6.7	1.7	15.8	1.8	12.5	3.5	9	۱۱
3.5	17.4	3.7	-11.5	3.1	-12.7	0	9.1	0	8.8	0	-2.3	۱۲
1.7	34.5	1.6	-33.9	6.4	-0.9	2.4	6.7	4	-3.6	3	3.6	۱۳
2.9	23	4	-17.3	5.4	13.9	3.5	19.4	0.5	6.3	3.9	18.3	۱۴
3.3	14.9	3.3	-14.1	4.5	1.2	3.8	18.6	3.8	-18.5	0.4	-0.7	۱۵
2.9	15.9	2.5	-11.4	3.1	-10.8	1.1	7.2	0.4	-5.5	3.4	-3.3	۱۶
214.7	62.2	153.1	-36.8	152.8	-43.1	126	31.5	91.5	-3.7	92.1	-4.4	۱۷
4.7	11.4	3.3	-6.2	5.4	-8.5	1.8	4.3	1.9	-3.4	0.2	2.5	۱۸

4.2	12.9	3.8	4.9	3.4	-11.6	4	30.2	4.2	-29.4	2.7	6.3	۱۹
2.8	16.5	2.8	-16.2	2.1	-2.1	0	23.3	0	-23	0	4	۲۰
20.0	21.9	11.8	-14.9	18.2	-3.4	18.1	19.7	6.7	-9.2	16.9	4.0	میانگین



شکل ۷۶

مطابق نتایج بدست آمده استفاده از فیلتر "حذف حرکات انفرادی اضلاع چهار ضلعی محیطی مردمک" در متد چهارضلعی محیطی، باعث کمتر شدن تغییرات مرکز بدست آمده برای مردمک در طول زمان شده و در نتیجه باعث کاهش خطا در تعیین نقطه دید می گردد. طبق سطر آخر جدول بالا، حالت با فیلتر، هم میانگین خطای کمتری را داشته و هم میانگین انحراف معیار کمتری را دارا می باشد.

۵.۵ : عملکرد فیلتر "جلوگیری از تغییر موقعیت مرکز مردمک در هنگام بزرگ

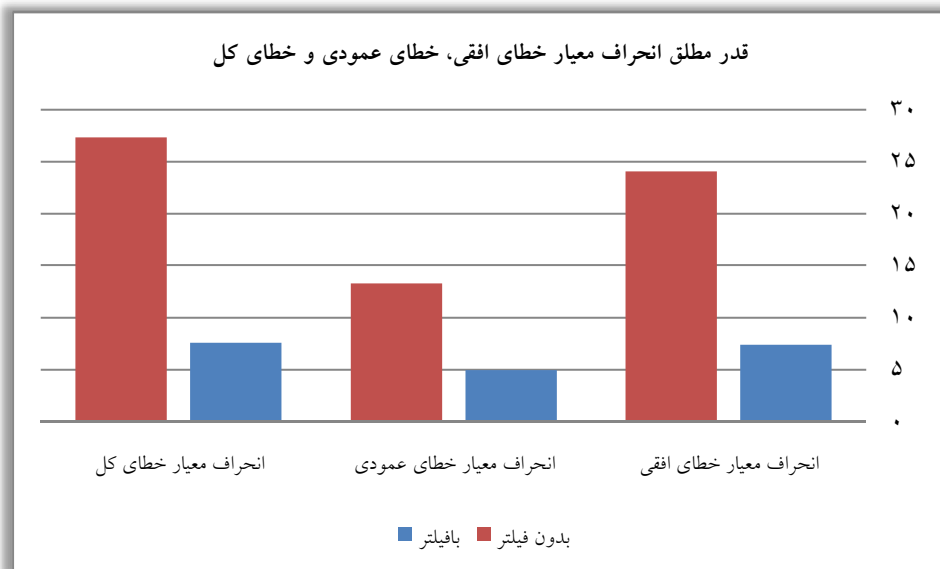
و کوچک شدن مردمک"

با این فیلتر در بخش ۲.۴.۵.۲ آشنا شدیم. با تغییر روشنایی ناحیه دید قطر مردمک تغییر می نماید. این تغییر قطر به دلیل آنکه مردمک در تصویر الزاماً دایره نیست و لذا تغییرات اضلاع چهارضلعی محیطی با هم برابر نمی شود، باعث جابجایی مرکز مردمک و در نتیجه نقطه دید محاسبه شده می گردد. برای ارزیابی میزان کارایی این فیلتر از صفحه ۲۰ نقطه استفاده می نماییم. در طول ارزیابی یک چراغ در مقابل صورت شخص روشن و خاموش می شود به گونه ای که در طول خیره

شدن به یک نقطه مردمک تقریباً ۶ بار کوچک و بزرگ می‌شود. خطای اندازه‌گیری شده در هر نقطه و انحراف معیار داده‌های مربوط به هر نقطه در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۹

عملکرد فیلتر "حذف حرکات انفرادی اضلاع چهار ضلعی محیطی مردمک" بدون وجود فیلتر "نرم کننده بردار واصل مردمک به گلینت"												
بدون فیلتر						با فیلتر						شماره نقاط
میانگین واقعی از مقدار محاسبه شده (F)	میانگین خطای عمودی (Y)		میانگین خطای افقی (X)		میانگین واقعی از مقدار محاسبه شده (F)	میانگین خطای عمودی (Y)		میانگین خطای افقی (X)				
1.5	9.9	1.9	8.5	1.6	4.8	4.6	18.4	9.4	4.7	2.7	15.6	۱
1.2	11.2	1.7	8.9	0.5	-6.7	2.2	12.9	2.6	-11.9	2.1	-4.2	۲
2.8	12.5	3.4	-11.6	2	-3.8	4.8	15.7	5.6	-5.5	8.6	-11.6	۳
5.3	11.9	5.1	-7.3	4.4	-8.5	3.4	20.3	6.5	-7	1.3	-18.2	۴
6.1	12	1.9	-6.8	7.2	-8.9	89.9	33.8	17.9	-19.6	89.1	-24.3	۵
204.5	85.6	21.2	-36.2	214.1	-40.8	2.4	14.5	6.5	3.1	1.5	-12.7	۶
5.7	16.1	5.7	-16	1.5	-1.1	4.3	25.6	3.3	-23.1	4.2	-10.5	۷
190.7	99.7	98	-42.1	181.8	-44.5	1.5	24.3	1.8	-24	2.4	-2.1	۸
5.6	17.4	7.8	-15.5	4.7	3.7	1.9	23.5	0.2	-20.8	5.6	9.5	۹
5.3	9.8	2.4	-4.3	7.1	-7	0.7	27.3	0.3	-26.7	2.1	-5.4	۱۰
8	16.6	8.3	-13.2	3.4	-9.2	3.5	18.3	4.1	-17.5	4.4	1.9	۱۱
71	23.5	67.8	-11.2	24.4	-16.7	8.2	18.6	9.3	-17.4	0.9	-5.1	۱۲
3.6	4.4	1.6	-1.6	4.2	-3.1	0.4	10.3	0.4	-10.3	0.2	-0.1	۱۳
6	15.1	6.3	-14.8	2.7	0.2	0	23.6	0	-23.2	0	-4.7	۱۴
5.2	20.8	7.7	11.1	1.5	-16.6	2.7	12.7	2.7	-12.3	0.6	-3	۱۵
8.7	15.7	8.6	8	11	-8.3	4.6	21.8	6.6	11.2	4.1	-17.7	۱۶
7.5	12.1	9.7	9.1	2.9	-4.4	2.6	8.3	5.6	-4.2	5.1	0.4	۱۷
1.6	12.1	2.8	-4.1	1.6	-11.1	3.5	20	6.3	-0.2	3.7	-19	۱۸
1.4	10.5	0.4	-5.3	1.6	9	6.9	18	7.3	4.8	5.6	-16.3	۱۹
5.1	21.9	4.5	-20.6	3	7.1	4	25.4	3.7	-25.1	3.1	3	۲۰
27.3	21.9	13.3	-8.3	24.1	-8.3	7.6	19.7	5.0	-11.3	7.4	-6.2	میانگین



شکل ۷۷

مطابق نتایج بدست آمده استفاده از فیلتر کنترل قطر مردمک در متد چهارضلعی محیطی، باعث کمتر شدن تغییرات مرکز بدست آمده برای مردمک با بزرگ و کوچک شدن آن و در نتیجه باعث کاهش خطا در تعیین نقطه دید می گردد. طبق سطر آخر جدول بالا، حالت با فیلتر، هم میانگین خطای کمتری را داشته و هم میانگین انحراف معیار کمتری را دارا می باشد.

۶.۵ : بررسی نگاشت دوجمله ای کالیبراسیون

نگاشت استفاده شده همانگونه که در بخش ۲.۵ شرح داده شد دو فضا را به هم مرتبط می نماید. فضای نقاط صفحه و فضای نقاط مرکز مردمک. فضای نقاط صفحه، یک فضای دو بعدی مستطیلی شامل 1024×768 نقطه می باشد. اما شکل فضای نقاط مرکز مردمک به چندین پارامتر بستگی دارد. این فضا عبارت است از مختصات نقطه مرکز مردمک در تصویر گرفته شده از چشم. اینکه رزولوشن تصویر چقدر باشد، فاصله دوربین تا چشم و زاویه آن چقدر باشد، دامنه حرکتی مردمک در تصویر هنگامیکه شخص چهار گوشه صفحه را نگاه می کند چقدر باشد (که البته به هندسه کره چشم نیز بستگی دارد)، همچنین زاویه سر با صفحه نمایش به چه صورتی باشد، همه و همه در تعیین نوع این فضای دوم نقش دارند. مثلاً در زیر این فضا برای یک شخص در چند حالت مختلف تنها جهت مقایسه نشان داده شده است. رزولوشن تصویر استفاده شده نیز 720×576 می باشد :

جدول ۱۰: وضعیت فضای نقاط مرکز مردمک متناظر با فضای نقاط صفحه نمایش در وضعیت‌های مختلف

محدوده فضای نقاط مرکز مردمک در تصویر	وضعیت		مختصات مرکز مردمک در تصویر		نقطه متناظر در صفحه نمایش	
	زاویه سر	تصویر چشم	x	y	Sx	Sy
			462	217	0	0
			319	206	1024	0
			316	288	1024	768
			458	302	0	768
			373	193	0	0
			251	264	1024	0
			312	324	1024	768
			431	264	0	768
			491	287	0	0
			380	216	1024	0
			315	288	1024	768
			446	365	0	768
			485	210	0	0
			344	242	1024	0
			363	324	1024	768
			497	288	0	768
			405	273	0	0
			271	235	1024	0
			251	319	1024	768
			384	354	0	768

آنچه در اینجا اهمیت دارد بازه تغییرات x و y است. به علت کوچک‌تر بودن این فضا نسبت به فضای نقاط صفحه نمایش، یک خطای ذاتی را با وجود استفاده از نگاشت کالیبراسیون خواهیم داشت. برای نشان دادن این خطای ذاتی، برای یک وضعیت معمولی، کالیبراسیون را انجام داده و پارامترهای a_i و b_i را پیدا می‌کنیم. نتایج برای سه رزولوشن متفاوت با کالیبراسیون ۲۵ نقطه در زیر آورده شده است. نگاشت دوجمله‌ای استفاده شده همانگونه که قبلاً اشاره گردید بصورت رابطه (۵-۱) است:

$$\begin{cases} s_x = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ s_y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \end{cases} \quad (5-1)$$

جدول ۱۱: نقاط متناظر دو فضای نقاط صفحه و مراکز مردمک در رزولوشن ۷۲۰×۵۷۶

نقطه متناظر در صفحه نمایش		مختصات مرکز مردمک در تصویر	
Sx	Sy	x	y
42	42	466	262
42	42	437	256
42	42	404	251
42	42	364	252
42	42	332	253
192	42	466	278
192	42	436	273
192	42	399	267
192	42	362	266
192	42	334	266
384	42	464	298
384	42	434	294
384	42	398	289
384	42	361	286
384	42	330	291
576	42	465	320
576	42	435	316
576	42	396	313
576	42	361	312
576	42	329	310
726	42	461	338
726	42	432	333
726	42	393	331
726	42	357	330
726	42	328	332

جدول ۱۲: محدوده تغییرات افقی و عمودی مرکز مردمک در تصویر در رزولوشن ۷۲۰×۵۷۶

محدوده تغییرات y بر حسب پیکسل	87
محدوده تغییرات x بر حسب پیکسل	138

جدول ۱۳: نتایج کالیبراسیون ۲۵ نقطه در رزولوشن ۷۲۰×۵۷۶

a	b	
3373.064	-3954.56	0
-7.409	5.675	1
0.473	14.231	2
0.001	0.003	3
0	-0.009	4
-0.002	-0.012	5

جدول ۱۴: نقاط متناظر دو فضای نقاط صفحه و مراکز مردمک در رزولوشن ۶۴۰×۴۸۰

مختصات مرکز مردمک در تصویر		نقطه متناظر در صفحه نمایش	
x	y	Sx	Sy
413	201	42	42
391	196	256	42
361	189	512	42
331	189	768	42
306	185	982	42
411	212	42	192
390	208	256	192
361	202	512	192
330	199	768	192
304	198	982	192
409	228	42	384
388	224	256	384
328	215	768	384
302	213	982	384
408	248	42	576
385	242	256	576
355	235	512	576
327	231	768	576
302	229	982	576
359	218	512	684
404	259	42	726
382	254	256	726
355	248	512	726
328	246	768	726
300	244	982	726

جدول ۱۵: محدوده تغییرات افقی و عمودی مرکز مردمک در تصویر در رزولوشن ۶۴۰×۴۸۰

74	محدوده تغییرات y بر حسب پیکسل
113	محدوده تغییرات x بر حسب پیکسل

جدول ۱۶: نتایج کالیبراسیون ۲۵ نقطه در رزولوشن ۶۴۰×۴۸۰

a	b	
2512.217	-4126.091	0
-3.066	7.461	1
1.978	20.374	2
-0.007	-0.002	3
-0.006	-0.012	4
-0.001	-0.019	5

جدول ۱۷: نقاط متناظر دو فضای نقاط صفحه و مراکز مردمک در رزولوشن ۳۵۲×۲۸۸

مختصات مرکز مردمک در تصویر		نقطه متناظر در صفحه نمایش	
x	y	Sx	Sy
225	119	42	42
212	115	256	42
196	111	512	42
179	109	768	42
166	109	982	42
224	126	42	192
212	122	256	192
196	118	512	192
178	117	768	192
165	116	982	192
224	136	42	384
210	132	256	384
196	128	512	384
178	126	768	384
164	126	982	384
222	145	42	576
210	141	256	576
194	139	512	576
176	136	768	576
164	138	982	576
221	152	42	726
210	151	256	726
192	174	512	726
176	146	768	726
164	145	982	726

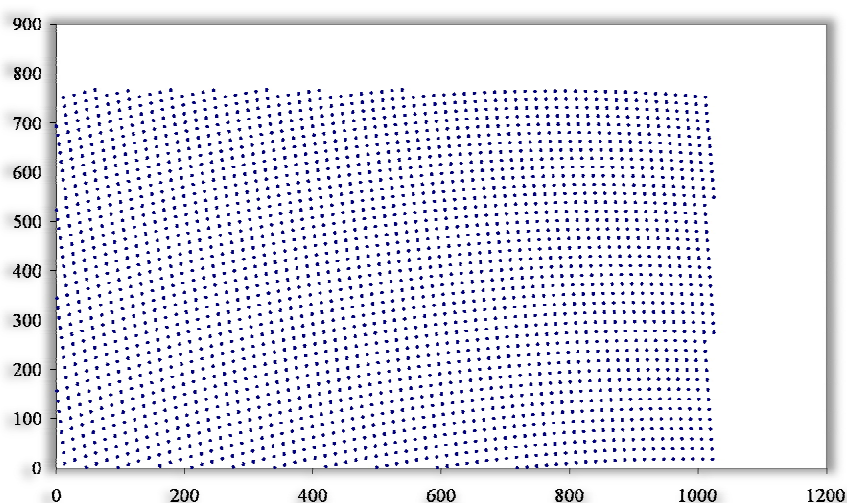
جدول ۱۸: محدوده تغییرات افقی و عمودی مرکز مردمک در تصویر در رزولوشن ۳۵۲×۲۸۸

65	محدوده تغییرات y بر حسب پیکسل
61	محدوده تغییرات x بر حسب پیکسل

جدول ۱۹: نتایج کالیبراسیون ۲۵ نقطه در رزولوشن ۳۵۲×۲۸۸

a	b	
3145.241	-3930.952	0
-11.484	17.018	1
1.415	26.963	2
-0.012	0.029	3
-0.007	-0.061	4
-0.002	-0.052	5

برای مثال اگر در رزولوشن ۳۵۲×۲۸۸ با پارامترهای بدست آمده تمام نقاط از فضای مرکز مردمک را در نگاشت قرار دهیم، مختصات تمام نقاط از صفحه که با این تنظیمات توسط سیستم می‌تواند به عنوان نقطه دید محاسبه گردد بدست می‌آید.



شکل ۷۸: تمام نقاط دید بدست آمده به ازای فضای نقاط مرکز مردمک در رزولوشن ۳۵۲×۲۸۸

در شکل بالا کمترین فاصله بین دو نقطه ۱۶ پیکسل بوده و نشان دهنده اینست که با بیشترین دقت قابل دسترسی برای نقاط دید در این حالت، خطایی در حد ۱۶ پیکسل می‌تواند وجود داشته باشد. در عین حال باید مدنظر داشت که برای بدست آوردن پارامترهای نگاشت از روش کمینه مجموع مربعات و تعدادی نقطه متناظر یعنی $(x, y) \rightarrow (Sx, Sy)$ استفاده نموده‌ایم. بگونه‌ای که پس از کالیبراسیون اگر یکی از همان نقاطی را که برای کالیبراسیون استفاده نموده‌ایم (x, y) در نگاشت قرار دهیم لزوماً نقطه متناظر با آن یعنی (Sx, Sy) را نمی‌دهد. و خود همین نکته باعث می‌شود که خطا بصورتی تقریباً یکنواخت در صفحه پخش شود، نه اینکه در نقاط استفاده شده در مرحله کالیبراسیون دقیق و در نقاط مجاور آنها غیر دقیق باشد.

این مقدار را می‌توان برای دو رزولوشن دیگر نیز محاسبه نمود. اما هدف از بدست آوردن پارامترهای نگاشت در این قسمت استفاده از آنها در آنالیز عدم قطعیت در بخش دیگر می‌باشد.

۵. ۷ : آنالیز حساسیت نگاشت کالیبراسیون

آنالیز عدم قطعیت در واقع نوعی پیش‌بینی خطا در خروجی یک تابع، در نتیجه خطاهای جزئی در متغیرهای تابع می‌باشد. در این جا هدف بررسی یک تحلیل ساده عدم قطعیت بر روی نگاشت استفاده شده است، چرا که متغیرهای این نگاشت دو جمله‌ای بصورت کاملاً قطعی تعیین نمی‌شوند. y و x یا همان مرکز قراردادی مردمک در تصویر، مطابق آنچه در ۲. ۴. ۵ بررسی گردید، همواره با خطایی در حد چند پیکسل اندازه‌گیری می‌شود. در اینجا می‌خواهیم بدانیم عدم قطعیت در اندازه‌گیری مرکز مردمک چه میزان خطا در تعیین نقطه دید ایجاد می‌نماید. به این منظور یک آنالیز عدم قطعیت عمومی بر روی نگاشت مورد نظر صورت می‌دهیم. به طور کلی میزان عدم قطعیت در نتیجه تابع f با n متغیر X_i یعنی $f = f(X_1, X_2, \dots, X_i)$ از ضابطه زیر بدست می‌آید:

$$U_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)^2 U_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)^2 U_{X_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 U_{X_i}^2 \quad (2-5)$$

که در آن U_{X_i} میزان عدم قطعیت در اندازه‌گیری متغیر X_i می‌باشد. [76]

نگاشت مورد نظر ما دو جمله‌ای بوده و عدم قطعیت کل را جداگانه برای هر جمله یعنی برای S_y و S_x محاسبه می‌نماییم. هر ضابطه تابعی از دو متغیر y و x می‌باشد، اما ۶ پارامتر مجهول نیز در ضابطه وجود دارد. قبل از هر چیز با انجام یک عملیات کالیبراسیون و با فرض اینکه در این مرحله اندازه‌گیری متغیرهای y و x قطعی و بدون خطا می‌باشد، این ۶ پارامتر را پیدا می‌کنیم، که این کار را در بخش قبل برای سه رزولوشن مختلف انجام دادیم. از این پس تعیین می‌کنیم که اگر مرکز مردمک با عدم قطعیتی برابر با U_x و U_y در راستای افقی و عمودی در تصویر تعیین شود، نقطه دید شخص با چه عدم قطعیتی محاسبه می‌گردد.

$$S = p_0 + p_1x + p_2y + p_3xy + p_4x^2 + p_5y^2 \quad (3-5)$$

$$\begin{aligned} U_S^2 &= \left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y}\right)^2 U_y^2 \\ \Rightarrow \frac{U_S^2}{S^2} &= \left(\frac{x}{S} \frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 \left(\frac{U_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{y}{S} \frac{\partial S}{\partial y}\right)^2 \left(\frac{U_y}{y}\right)^2 \\ \Rightarrow \frac{U_S^2}{S^2} &= \left(\frac{x}{S} (p_1 + p_3y + 2p_4x)\right)^2 \left(\frac{U_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{y}{S} (p_2 + p_3x + 2p_5y)\right)^2 \left(\frac{U_y}{y}\right)^2 \end{aligned} \quad (4-5)$$

با فرض اینکه در اندازه‌گیری مرکز مردمک به اندازه ۱ پیکسل خطا داشته باشیم، میزان عدم قطعیت در اندازه‌گیری نقطه دید را برای نمونه در ۹ نقطه از صفحه (همان ۹ نقطه صفحه کالیبرسیون ۹ نقطه) محاسبه نموده و در زیر آورده‌ایم. این کار را برای هر سه رزولوشن انجام داده که در سه جدول زیر نتایج مربوطه آورده شده است:

جدول ۲۰: نتایج آنالیز عدم قطعیت در تعیین نقطه دید با فرض عدم قطعیت ۱ پیکسلی در تعیین مرکز مردمک

برای ۹ نقطه مختلف در صفحه در رزولوشن ۳۵۲×۲۸۸

$\sqrt{(Sx\ error)^2 + (Sy\ error)^2}$	Sy error	Sx error	y error	x error	Sy	Sx
33	26	21	1	1	50	50
22	10	20	0	1		
24	23	5	1	0		
34	28	20	1	1	50	512
24	13	20	0	1		
25	25	5	1	0		
37	31	20	1	1	50	974
24	15	19	0	1		
27	27	5	1	0		
33	25	21	1	1	384	50
22	10	20	0	1		
24	23	5	1	0		
34	27	20	1	1	384	512
22	12	19	0	1		
25	25	5	1	0		
36	30	19	1	1	384	974
24	14	19	0	1		
27	27	5	1	0		
31	24	20	1	1	718	50
22	9	20	0	1		
23	22	5	1	0		
33	26	20	1	1	718	512
22	11	19	0	1		
25	24	5	1	0		
35	29	19	1	1	718	974
23	13	19	0	1		
26	26	4	1	0		

جدول ۲۱: نتایج آنالیز عدم قطعیت در تعیین نقطه دید با فرض عدم قطعیت ۱ پیکسلی در تعیین مرکز مردمک

برای ۹ نقطه مختلف در صفحه در رزولوشن ۶۴۰×۴۸۰

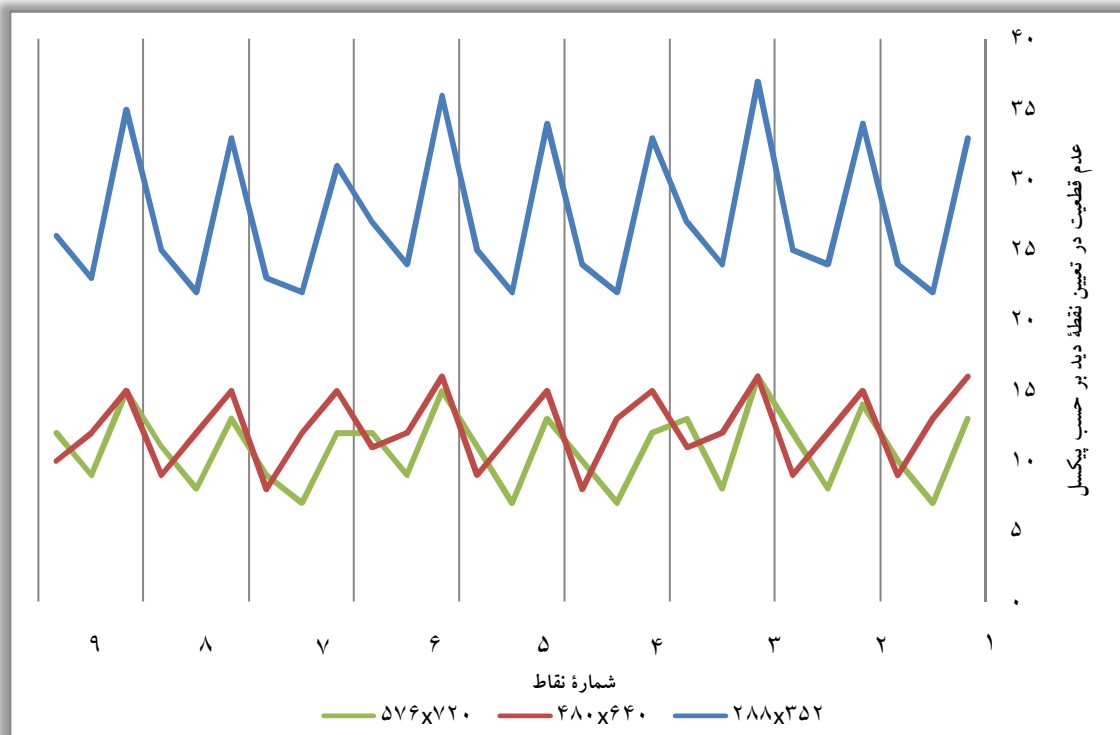
$\sqrt{(Sx\ error)^2 + (Sy\ error)^2}$	Sy error	Sx error	y error	x error	Sy	Sx
16	7	14	1	1	50	50
13	2	13	0	1		
9	7	5	1	0		
15	8	13	1	1	50	512
12	1	12	0	1		
9	8	5	1	0		
16	10	13	1	1	50	974
12	0	12	0	1		
11	10	5	1	0		

15	7	13	1	1	384	50
13	2	13	0	1		
8	7	4	1	0		
15	8	13	1	1	384	512
12	1	12	0	1		
9	8	4	1	0		
16	10	13	1	1	384	974
12	0	12	0	1		
11	10	4	1	0		
15	7	13	1	1	718	50
12	2	12	0	1		
8	7	4	1	0		
15	8	13	1	1	718	512
12	1	12	0	1		
9	8	4	1	0		
15	9	12	1	1	718	974
12	0	12	0	1		
10	9	4	1	0		

جدول ۲۲: نتایج آنالیز عدم قطعیت در تعیین نقطه دید با فرض عدم قطعیت ۱ پیکسلی در تعیین مرکز مردمک
برای ۹ نقطه مختلف در صفحه در رزولوشن ۷۲۰×۵۷۶

$\sqrt{(Sx \text{ error})^2 + (Sy \text{ error})^2}$	Sy error	Sx error	y error	x error	Sy	Sx
13	11	6	1	1	50	50
7	4	6	0	1		
10	10	0	1	0		
14	13	6	1	1	50	512
8	5	6	0	1		
12	12	1	1	0		
16	14	7	1	1	50	974
8	5	6	0	1		
13	13	1	1	0		
12	10	6	1	1	384	50
7	3	6	0	1		
10	10	0	1	0		
13	12	6	1	1	384	512
7	4	6	0	1		
11	11	0	1	0		
15	13	7	1	1	384	974
9	5	7	0	1		
12	12	1	1	0		
12	10	6	1	1	718	50
7	3	6	0	1		
9	9	0	1	0		
13	11	7	1	1	718	512
8	4	7	0	1		
11	11	0	1	0		
15	13	7	1	1	718	974
9	5	7	0	1		
12	12	1	1	0		

در جداول بالا خطای ۱ پیکسلی در تعیین مرکز مردمک فرض گردیده است، لازم به ذکر است که طبق روابط بدست آمده تقریباً n برابر شدن خطای اندازه‌گیری مرکز مردمک باعث n برابر شدن نتایج بدست آمده در جداول بالا خواهد شد. در نمودار زیر نتایج ستون آخر سه جدول بالا به منظور مقایسه نمایش داده شده است.



شکل ۷۹: میزان خطای ایجاد شده در اندازه‌گیری نقطه دید در اثر خطای یک پیکسلی تعیین مرکز مردمک در سه رزولوشن متفاوت

خطایی که در اینجا محاسبه نموده‌ایم با فرض اینست که در مرحله کالیبراسیون مرکز مردمک بدون عدم قطعیت اندازه‌گیری گردد، اما واقعیت اینست که به دلیل محدودیت‌های موجود در تشخیص یک نقطه به عنوان مرکز مردمک در تصویر در خود مرحله کالیبراسیون نیز پارامترهای نگاشت با عدم قطعیت محاسبه می‌گردند و این خود نیز یک منبع دیگر خطا خواهد بود.

۶ : ارزیابی عملکرد ردیاب چشم ساخته شده به کمک افراد معلول و سالم

۶.۱ : توصیف معلولیت مورد نظر و دسته بندی آنها

معلولیت عبارت است از مجموعه‌ای از عوامل ذهنی، جسمی و اجتماعی و یا ترکیبی از آنها که به نحوی در زندگی شخصی اثر سوء دارد و مانع از ادامه زندگی وی به صورت طبیعی می‌گردد و غالباً به دلیل عدم امکان زندگی مستقل از نظر شخصی و اجتماعی نیازمند خدمات توانبخشی می‌باشد به بیان دیگر معلولیت به ناتوانی در انجام تمام یا قسمتی از ضروریات عادی زندگی فردی یا اجتماعی گفته می‌شود که علت آن وجود یک نقص مادرزادی یا عارضی در قوای جسمانی یا روانی فرد می‌باشد. علل اصلی و شایع معلولیت را می‌توان بصورت زیر دسته‌بندی نمود:

۱. بیماری‌های عصبی

۲. بیماری‌های استخوانی، عضلانی

۳. حوادث و تصادفات

۴. سایر بیماری‌ها

هدف اصلی از طراحی و ساخت ردیاب حرکات چشم در این پروژه، توانبخشی معلولین بوده است. در اینجا لازم است یک دسته‌بندی از معلولین مورد نظر ارائه دهیم. با اینکه ردیاب چشم مورد نظر حتی برای افراد سالم نیز به عنوان یک ابزار کمکی قابل استفاده و مفید می‌باشد، اما هدف ما توانبخشی آن دسته از معلولینی می‌باشد که بدون استفاده از ردیاب چشم قادر به انجام برخی فعالیت‌ها نبوده، یا اینکه برای انجام آن فعالیت‌ها نیازمند ابزارهای توانبخشی دیگری هستند. بنابراین تمرکز اصلی ما معلولین کوادرپلژیک می‌باشد، یعنی معلولینی که دارای محدودیت حرکتی در اندام دست و پا هستند و قادر به نشستن و راه رفتن بصورت مستقل نیستند. اهمیت سیستم ردیاب چشم منظور، برای معلولین کوادرپلژیکی که دارای محدودیت‌های بیشتری بالاخص در ناحیه گردن به بالا هستند، آشکارتر خواهد شد. چرا که این دسته از افراد نیاز بیشتری به توانبخشی و برقراری ارتباط با دیگران داشته و در عین حال دستگاه‌های جانبی که می‌تواند توسط این افراد استفاده گردد، محدودتر می‌باشند. چشم و عضلات آن تقریباً جزو آخرین اعضای از بدن است که در برخی بیماری‌ها همچون ای.ال.اس^۱ دچار عارضه فلج و محدودیت حرکتی می‌شود، همچنین از آنجا که حرکت دادن چشم و نگاه کردن، فعالیتی ساده

^۱ ALS

بوده و کمترین خستگی را به دنبال خواهد داشت، امکان توانبخشی معلولین تنها به کمک چشم آنها، راهکاری جدید و مفید خواهد بود.

معلولین مورد نظر را در ۴ دسته زیر طبقه‌بندی می‌نماییم:

گروه ۱: محدودیت حرکت دست و پا

گروه ۲: محدودیت حرکت دست و پا + محدودیت حرکت گردن

گروه ۳: محدودیت حرکت دست و پا + محدودیت حرکت گردن + محدودیت تکلم

۲.۶: کارایی سیستم برای هر دسته

در اینجا به این نکته اشاره می‌شود که ردیاب ساخته شده چه کاربرد و فایده‌ای برای هرکدام از گروه‌های بالا خواهد داشت. اولین نیازی یک فرد معلول از گروه سوم در ارتباط با دیگران احساس می‌کند، توانایی صحبت کردن و رساندن منظور خود به مخاطب خویش است. توانایی تایپ کردن یک متن با روشی ساده و سریع و همچنین امکان تکلم متن تایپ شده تنها با کمک نگاه کردن یکی از کاربردهای سیستم طراحی شده است. این بخش نرم‌افزار می‌تواند برای افراد گروه اول و دوم نیز مفید واقع شود.

امکان گوش دادن به فایل‌های صوتی و آلبوم‌های عکس یکی دیگر از امکاناتی است که نرم‌افزار دستگاه در اختیار فرد معلول قرار می‌دهد که با تهیه آلبوم‌های صوتی و تصویری آموزشی برای فرد معلول می‌تواند نقش بسزایی در افزایش معلومات شخص داشته باشد. علاوه بر این بعد تفریحی این بخش نیز قابل ذکر می‌باشد.

بخش مربوط به سرگرمی نیز که در نرم‌افزار گنجانده شده است، می‌تواند بخشی از نیازهای معلولین با سنین پایتتر را برآورده سازد.

قابلیت ارسال سیگنال از طریق پورت USB نیز می‌تواند برای برقراری ارتباط فرد معلول با محیط اطراف مورد استفاده قرار گیرد. مثلاً شخص با نگاه کردن به چهار ناحیه مختلف از صفحه نمایش و یا کلیک کردن آیتم‌های مورد نظر در صفحه به حرکت دادن ویلچر برقی خود و یا فرضاً روشن و خاموش نمودن یک وسیله در محیط زندگی خود اقدام نماید.

شایان ذکر است که طراحی و ساخت یک ردیاب چشم و طراحی نرم‌افزارهای قابل استفاده توسط یک ردیاب چشم دو مقوله جدا بوده و ما در این پروژه تنها به طراحی چند نرم‌افزار جانبی پرداخته‌ایم.

اینکه فرد معلول بتواند، با چشم خود با کامپیوتر ارتباط برقرار نماید گام مهمی در توانبخشی او بشمار رفته و مطمئناً با طراحی نرم‌افزارهای گوناگون می‌توان بسیاری از نیازهای شخص را برآورده نمود.

۳.۶ : کلیات ارزیابی

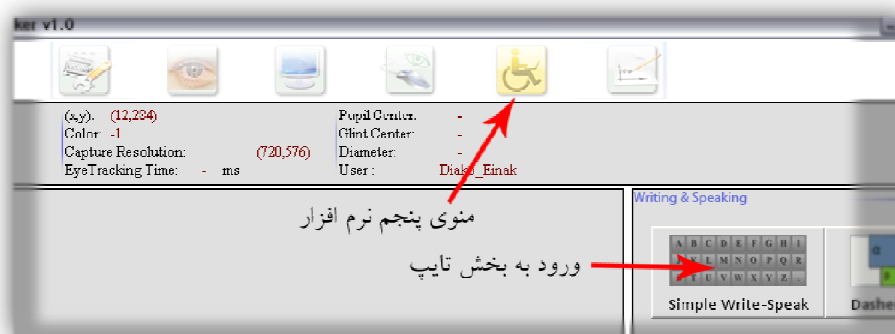
در این آزمایش از ۹ نفر معلول استفاده نموده‌ایم که این افراد رده سنی ۱۵ تا ۳۵ سال داشته و همگی با کامپیوتر آشنایی حداقل جزئی داشته و با مفاهیم اولیه آن آشنا بودند. برخی از آنها مشکل تکلم هم داشته و برخی دیگر از ناحیه گردن نیز دچار مشکل بوده و به سختی سر خود را در مقابل صفحه نمایش بدون حرکت و یا صاف نگه می‌داشتند. یکی از افراد عینکی بود. لازم به ذکر است که این ارزیابی در طول سه روز صورت پذیرفت.

۴.۶ : نحوه ارزیابی

در این مرحله، هدف ارزیابی کارایی سیستم و همچنین ارزیابی میزان رضایت کاربران از سخت‌افزار و نرم‌افزار ردیاب چشم ساخته شده می‌باشد. بدین منظور چند فعالیت در نظر گرفته شده است که پس از تنظیم سیستم و طی مرحله کالیبراسیون، کاربر می‌بایستی آنها را انجام بدهد. این مراحل ۲ بار توسط هر شخص انجام می‌شود، یکبار کلیک با مدت زمان مکث و بار دیگر کلیک با پلک خواهد بود. این فعالیت‌ها به طور کلی در بخش‌های مربوط به تایپ، قابلیت چندرسانه‌ای و سرگرمی نرم‌افزار انجام خواهد گرفت. برای اندازه‌گیری میزان پیچیدگی محیط نرم‌افزار در پایان آزمایش از یک پرسش‌نامه با سوالاتی مشابه سولات پرسش‌نامه (NASA Task Load Index (TLX) [77] (ضمیمه اول) استفاده می‌کنیم. همچنین به کمک دو فرم پرسش‌نامه دیگر که سوالاتی مشابه برخی سولات پرسش‌نامه (Chin et al, 1997) Q.U.I.S interfaceevaluation [78] و IBM Psychometric Evaluation (Lewis,1995) [79] دارند به ارزیابی میزان رضایت کاربر از سیستم و میزان کارایی آن برای شخص، از دیدگاه خود او می‌پردازیم. این فرم‌ها نیز در ضمیمه دوم و سوم آورده شده است.

۵.۶ : ترتیب مراحل

- معرفی سیستم و مراحل آزمون:
در این مرحله ردیابی حرکات چشم و سیستم ساخته شده معرفی گردیده و مراحل انجام آزمایش به شخص گفته می‌شود.
- آماده سازی:
در این مرحله شخص در فاصله مناسبی از صفحه نمایش قرار گرفته و سیستم ردیاب بر روی سر او نصب می‌گردد.
- تنظیمات اولیه:
پس از آن تنظیمات نرم‌افزار که ممکن است برای افراد مختلف متفاوت باشد انجام می‌شود. این مرحله در کمتر از یک دقیقه انجام می‌شود.
- کالیبراسیون :
در این مرحله آزمون را شروع کرده و به صفحه مربوط به کالیبراسیون اتوماتیک ۱۶ نقطه رفته و کالیبراسیون را انجام می‌دهیم. پس از خروج از این صفحه حرکت نشانگر با چشم و کلیک با تکنیک مکث و یا پلک به صورت فعال شده و از شخص می‌خواهیم مراحل ۵، ۶ و ۷ را بدون کمک و تنها با حرکات چشم و کلیک انجام بدهد.
- فعالیت تایپ:
شخص می‌بایستی منوی پنجم از نرم‌افزار را انتخاب نموده و دکمه مربوط به تایپ را بزند.



شکل ۸۰: ورود به بخش تایپ

در بخش تایپ شخص می‌بایستی جمله فارسی "به نام خداوند بخشنده مهربان" را تایپ نماید.



شکل ۸۱: صفحه تایپ فارسی استفاده شده در ارزیابی

پس از اتمام این مرحله دکمه خروج را زده و به محیط اصلی نرم افزار برخواهیم گشت.

- فعالیت چندرسانه‌ای:

دکمه مربوط به بخش صوتی تصویری نرم افزار را کلیک کرده و با ورود به این بخش این مرحله را شروع می نماییم.



شکل ۸۲: ورود به بخش چندرسانه‌ای

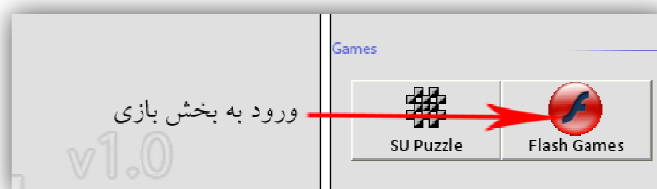
در این بخش شخص میبایستی دکمه مربوط به آلبوم فایل های صوتی را کلیک کرده و آلبوم صوتی را انتخاب نماید. پس از آن با رفتن بر روی دکمه افزایش ولوم صدا را زیاد کند. سپس به آهنگ دوم آلبوم برود.



شکل ۸۳: صفحه اصلی بخش چندرسانه‌ای

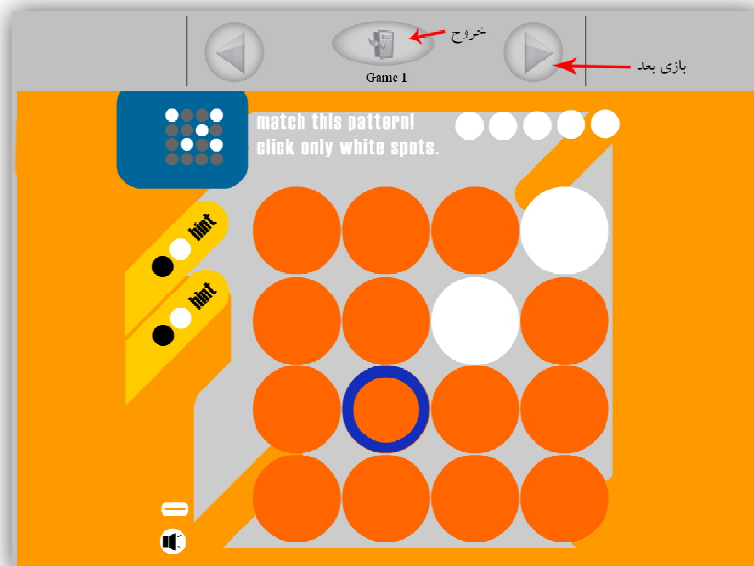
پس از آن در آلبوم فایل‌های صوتی یک آلبوم را انتخاب نموده و پس از باز شدن عکس‌ها یکی از آنها را کلیک نماید. پس از دیدن ۳ عکس با زدن دکمه خروج از این مرحله نیز خارج شود.

- فعالیت سرگرمی:



شکل ۸۴: ورود به بخش بازی

پس از آن شخص به بخش سرگرمی رفته و بازی دوم را انتخاب نموده و آن را تا سه مرحله انجام میدهد.



شکل ۸۵: بازی حافظه‌ای استفاده شده در ارزیابی

در این بازی شخص باید الگویی که در کادر آبی رنگ سمت چپ بالای صفحه به مدت چند ثانیه نشان داده می‌شود را با کلیک بر روی دایره‌های بزرگ پیاده نماید. با زدن دکمه خروج می‌توان از این محیط خارج شد. کاربر پس از خروج از این بخش با زدن دکمه مربوط به غیر فعال سازی حرکت نشانگر با چشم در منوی چهارم نرم‌افزار، قسمت اول آزمون را به پایان می‌رساند و دوربین از روی سر شخص برداشته می‌شود.

- پرسش‌نامه اول:

در این مرحله که کاربر برای اولین بار چند فعالیت را با نرم افزار انجام داده، از او می‌خواهیم فرم پرسش‌نامه اول را پاسخ دهد. میزان پیچیدگی مراحل و ظاهر نرم‌افزار با این پرسش‌ها سنجیده می‌شود.

- تکرار مراحل از شماره ۴:

در این قسمت فعالیت‌های مذکور را با کلیک با حالت دوم انجام خواهد داد.

- پرسش‌نامه‌های دوم و سوم:

پس از اتمام مراحل شخص به پرسش‌نامه دوم و سوم پاسخ خواهد داد.

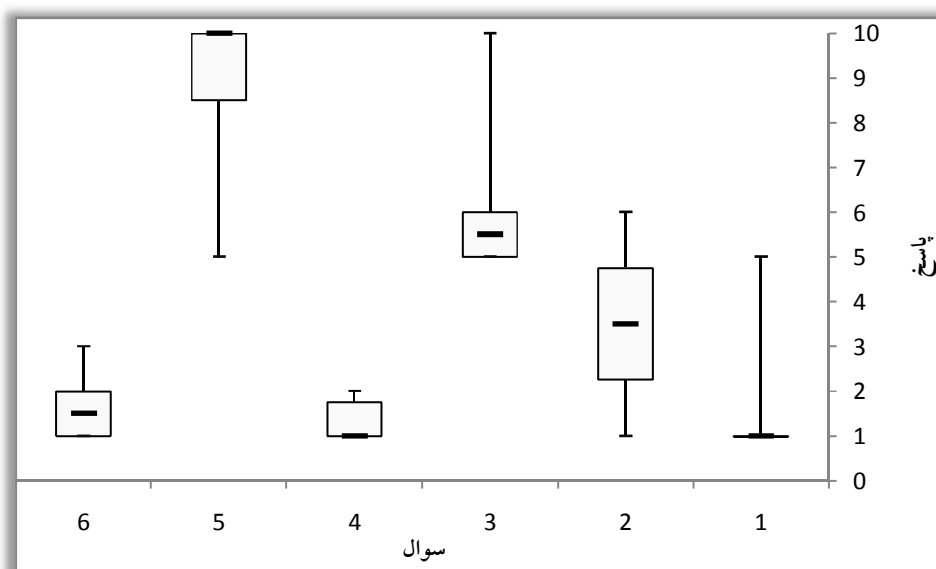
۶.۶ : نتایج

افراد مورد نظر هر سه فعالیت تعیین شده را بخوبی انجام دادند. تایپ جمله هر چند که در برخی موارد کند بوده و یا نیاز به پاک کردن اشتباهات می‌بود اما در مجموع قابل قبول بود. محیط بازی و چندرسانه‌ای نرم افزار نیز برای افراد بسیار جذاب می‌نمود.

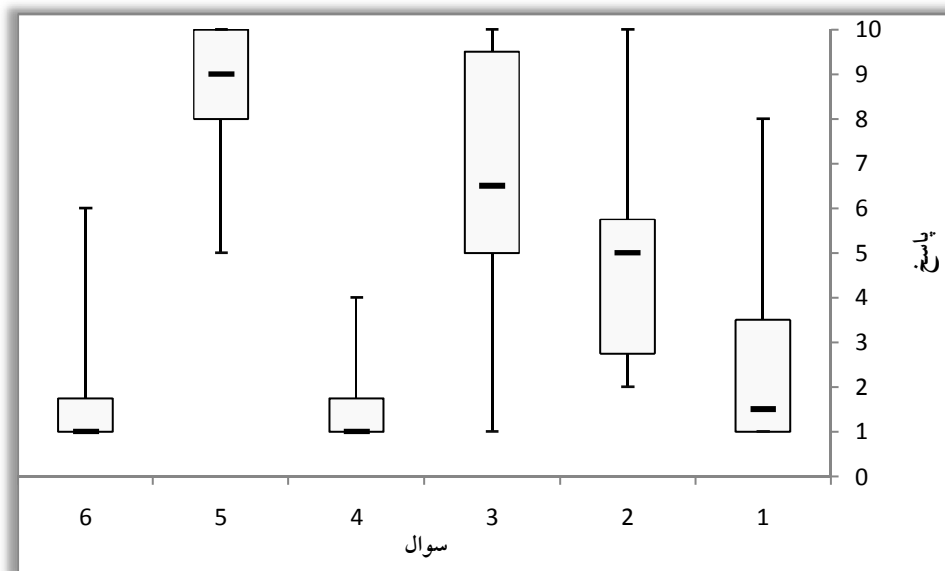
پاسخ افراد مورد آزمایش به پرسش‌نامه‌ها بصورت نمودار در زیر آورده شده است. در هر نمودار سوال و پاسخ افراد به آن دیده می‌شود.

پرسش‌نامه اول با سوالاتی مشابه سولات پرسش‌نامه (NASA Task Load Index (TLX)

۱. کار با نرم افزار ساده است یا دشوار؟ (دشوار/۱۰/ساده ۱)
۲. چه مقدار فعالیت جسمی برای کار با نرم افزار نیاز است؟ (زیاد/۱۰/کم ۱)
۳. برای انجام یک فعالیت عملکرد نرم افزار کند بود یا سریع؟ (سریع/۱۰/کند ۱)
۴. کار با نرم افزار و یا یادگیری درست یک فعالیت در آن چقدر دشوار به نظر می‌رسد؟ (دشوار/۱۰/ساده ۱)
۵. در انجام اهدافی که برای شما تعیین شده بود، چقدر موفق بودید؟ (موفق/۱۰/ناموفق ۱)
۶. در حین انجام یک فعالیت چه مقدار احساس نارضایتی، هزل شدن و فشار روحی می‌کردید؟ (زیاد/۱۰/کم ۱)



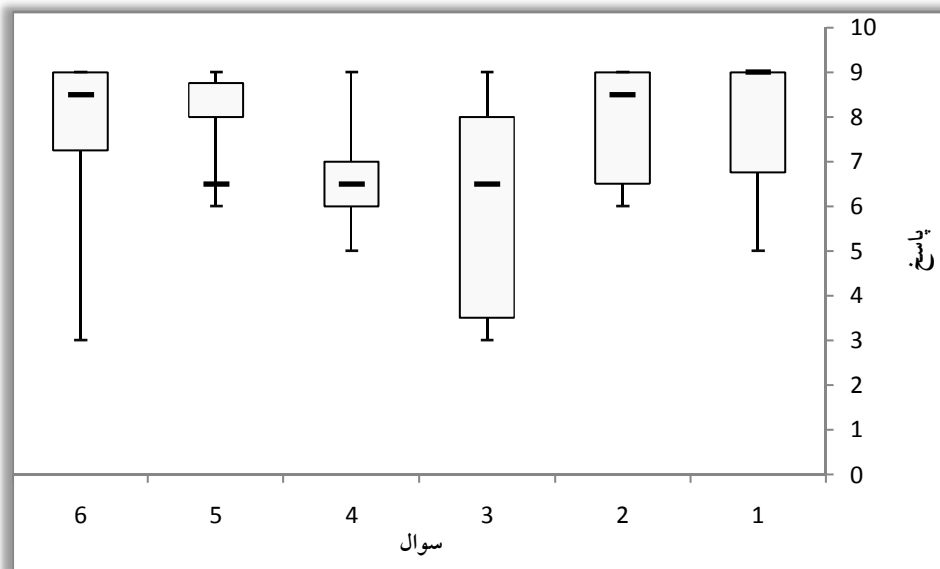
شکل ۸۶: پاسخ به پرسش‌نامه اول در حالت کلیک با پلک



شکل ۸۷: پاسخ به پرسش‌نامه اول در حالت کلیک با مگ

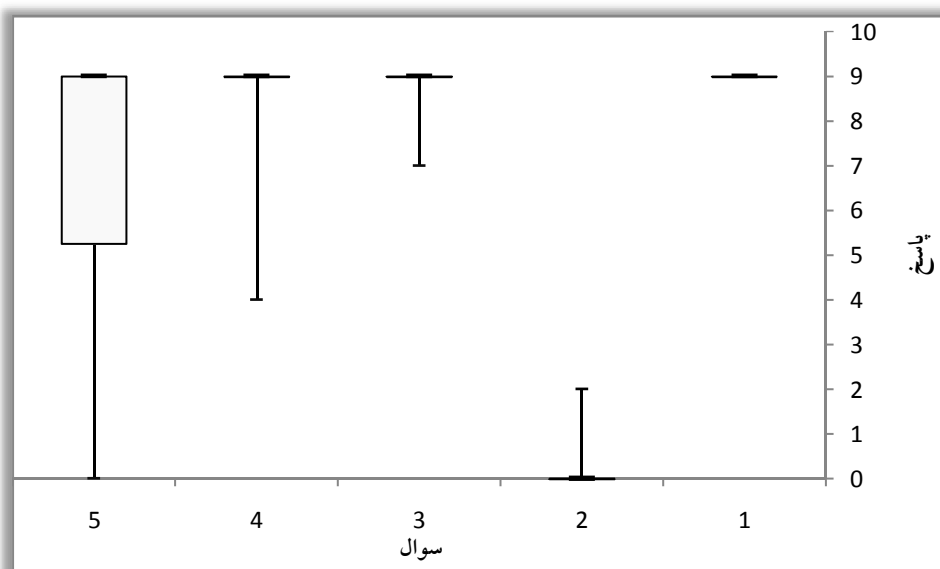
پرسش‌نامه دوم با سوالاتی مشابه سوالات پرسش‌نامه Q.U.I.S interface evaluation

۱. خیلی خوب / بیخود *
۲. آسان / دشوار *
۳. راضی کننده / خسته کننده *
۴. توانمندی بالا / توانمندی کم *
۵. مهیج / بیحال *
۶. قابل انعطاف / خشک *



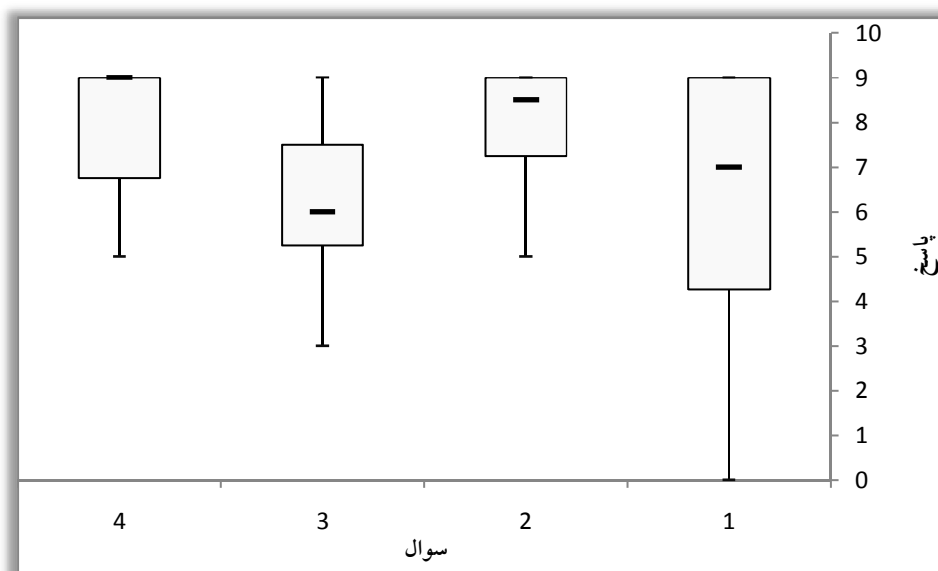
شکل ۸۸: پاسخ کلی درباره نرم افزار در پرسش نامه دوم

۱. حروف موجود در صفحه (خوانا/ناخوانا) (۰)
۲. برجسته شدن اجزاء با تغییر رنگ آنها به انجام بهتر فعالیت (کمک نمی کند/کمک می کند) (۰)
۳. ترتیب و چینش اجزاء و اطلاعات در صفحه (واضح/گیج کننده) (۰)
۴. یادگیری کار با سیستم (راحت/دشوار) (۰)
۵. یادگیری بخش های مختلف با سعی و خطا (راحت/دشوار) (۰)



شکل ۸۹: پاسخ کلی درباره ظاهر نرم افزار و یادگیری آن در پرسش نامه دوم

۱. سرعت سیستم (به اندازه کافی سریع ۱۰/کند ۰)
۲. قابلیت اعتماد (قابل اطمینان ۱۰/غیر قابل اطمینان ۰)
۳. درست کردن اشتباهات (ساده ۱۰/دشووار ۰)
۴. نیاز کاربران باتجربه و بی تجربه برآورده می شود (همیشه ۱۰/هرگز ۰)



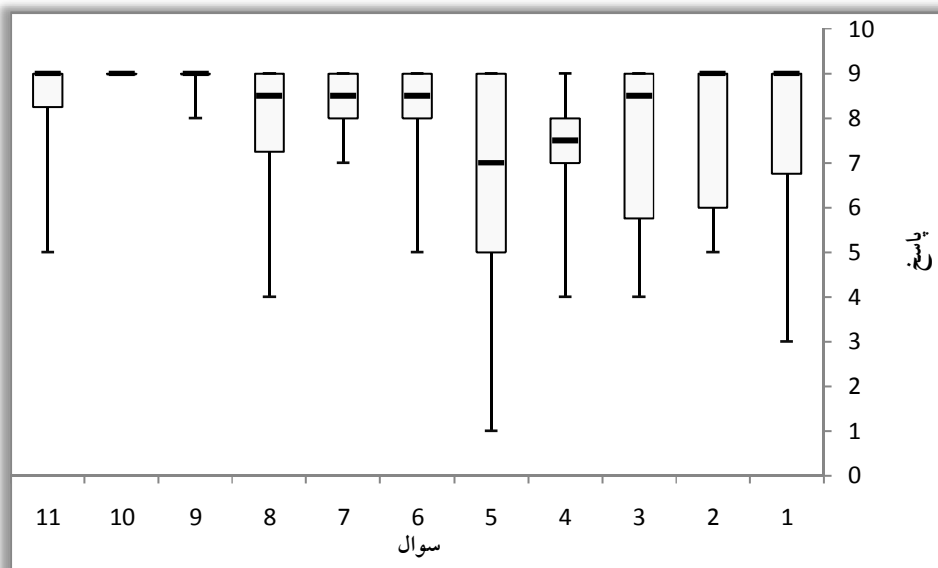
شکل ۹۰: پاسخ کلی درباره قابلیت های نرم افزار در پرسش نامه دوم

پرسش نامه سوم با سوالاتی مشابه سوالات پرسش نامه و IBM Psychometric Evaluation

۱. در مجموع من از سادگی کار با دستگاه ساخته شده راضی هستم.
۲. کار با دستگاه بسیار راحت است.
۳. من فعالیت های مورد نظر را می توانم بصورت موثر با این سیستم به انجام برسانم.
۴. من می توانم با این سیستم به سرعت کارم را به اتمام برسانم.
۵. من در هنگام استفاده از دستگاه احساس راحتی می نمایم.
۶. یادگیری کار کردن با سیستم راحت است.
۷. در صورت بروز اشتباه به سرعت می توانم آن را برطرف سازم.
۸. چیش اطلاعات در صفحه بسیار واضح است.
۹. محیط نرم افزار خوشایند و جذاب است.
۱۰. من از کار کردن با این دستگاه لذت می برم.

۱۱. در مجموع من از سادگی کار با دستگاه ساخته شده راضی هستم.

پاسخ به این سوالات به صورت (به شدت موافق ۱۰ / به شدت مخالف ۰) می باشد.



شکل ۹۱: پاسخ کلی درباره سیستم ساخته شده با پرسش نامه سوم

۷ : نتیجه گیری و جمع بندی

آنچه در این پروژه انجام شد طراحی و ساخت سخت افزار و نرم افزار یک سیستم ردیاب حرکات چشم قابل نصب بر روی سر با چند متد برای ردیابی مردمک و همچنین تکنیک بازتاب قرینه-مردمک بود که در پایان نیز کلیات سیستم و همچنین هدف اصلی آن یعنی توانبخشی معلولین مورد ارزیابی قرار گرفت و خوشبختانه این پروژه به اهداف اصلی خود دست پیدا کرده است. از قابلیت ها و مزایای مهم ردیاب چشم ساخته شده، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در ردیاب چشم ساخته شده، تصویر از پایین چشم گرفته می شود بطوریکه دوربین در میدان دید شخص قرار نمی گیرد. بنابراین این سیستم براحتی توسط افراد عینکی نیز قابل استفاده می باشد.
- قیمت بسیار پایین در مقایسه با نمونه های با کارایی پایین تر خارجی آن
- رزولوشن تصویر گرفته شده 720×576 بوده و مدت زمان پردازش هر فریم حداکثر $0/07$ ثانیه می باشد، به طوری که ۱۵ فریم در ثانیه توسط نرم افزار پردازش می گردد، بنابراین ردیابی کاملاً آنالین صورت می گیرد.
- امکان ردیابی و تشخیص مرکز مردمک با چند الگوریتم مختلف.
- استفاده از فیلتر های نرم کننده حرکات^۱ برای نرم کردن حرکات نشانگر موس در هنگام استفاده با چشم. میزان نرم کنندگی حرکت توسط کاربر قابل تنظیم می باشد.
- قابلیت کالیبراسیون مجدد در حین استفاده از سیستم: هنگامیکه کاربر حرکت و یا دوران زیادی به سر خود بدهد، ردیابی حرکات چشم با خطا مواجه می شود و در برخی نقاط درست عمل نمی کند. در اینگونه موارد تنظیم مجدد با نگاه کردن به آن نقاط و گرفتن دکمه وسط ماوس، بردن نشانگر ماوس با دست به آنجا و رها کردن دکمه وسط ماوس صورت می گیرد.
- امکان دسترسی به داده های گرفته شده از چشم توسط سیستم همچون: سرعت حرکت چشم، مدت زمان مکث روی نقاط، قطر مردمک و... و همچنین مناطقی از صفحه نمایش که بیشتر از نواحی دیگر دیده شده است در نرم افزار سیستم وجود دارد. امکان گرفتن نمودار های مختلف از این داده ها نیز امکان پذیر می باشد.
- تشخیص پلک زدن با دقت بالا با سه الگوریتم متفاوت.

¹ Smoothing Filters

به نتیجه رسیدن متدها و اطمینان از عملکرد نرم افزار سیستم زمینه را برای تبدیل سیستم به یک ردیاب قابل نصب بر روی میز فراهم نموده، بگونه ای که دوربین بجای اینکه بر روی شخص نصب گردد بر روی میز و مقابل صفحه نمایش نصب می گردد. لازمه این کار استفاده از تجهیزات و دوربین گران قیمت و همچنین الگوریتم های پردازش تصویر جانبی و اضافه چون ردیابی صورت و چشم می باشد. طبق آنچه از فصل ۵ برمی آید وجود خطا در حد ۱ سانتی متر بیش از آنکه متاثر از کالیبراسیون باشد، به علت خطاهای ناشی از تشخیص یک نقطه به عنوان مرکز مردمک در تصویر و ضعف در متدهای پردازش تصویر می باشد. بگونه ای که داشتن یک تصویر با کیفیت بهتر از چشم و پردازشگرهای سریع تر و در نتیجه متدهای دقیق تر، حتی با کالیبراسیون ۹ نقطه نیز دقت بهتری را خواهد داد، که امید است در آینده مورد توجه قرار گیرد.

- [1] "Eye tracking", Date of using the web site : August 1, 2008: <www.wikipedia .com>
- [2] R. J. K. Jacob, K. S. Karn (2003). Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises. In J. Hy'ona, R. Radach, & H. Deubel (Eds.), *The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research* (pp. 573–605). Amsterdam, The Netherlands:Elsevier Science.
- [3] "Eyeball", Date of using the web site : August 12, 2008: <www.Britannica.com>
- [4] A. J. Glenstrup and T. Engell-Nielsen, *Eye Controlled Media: Present and Future state*, University of Copenhagen, 1995.
- [5] A.T. Duchowski, (in press). *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. Springer, London.
- [6] A. Kaufman, A. Bandopadhyay, B. Shaviv, An eye tracking computer user interface, in: *Proc. of the Research Frontier in Virtual Reality Workshop*, IEEE Computer Society Press, 1993, pp. 78–84.
- [7] L. Young, D. Sheena, *Methods & designs: survey of eye movement recording methods*, *Behav. Res.Methods Instrum.* 7 (5) (1975) 397–429.
- [8] D.A. Robinson, A method of measuring eye movements using a scleral search coil in a magnetic field, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 10 (1963) 137–145.
- [9] D. Roberts, M. Shelhamer, A. Wong, A New "Wireless" Search-Coil System, Johns Hopkins University, 2008.
- [10] B. Nouredin, P.D. Lawrence, C.F. Man., A non-contact device for tracking gaze in a human computer interface. In *Computer Vision and Image Understanding* 98 (2005) 52–82
- [11] C.H. Morimoto, Marcio R.M. Mimica," Eye gaze tracking techniques for interactive applications", *Computer Vision and Image Understanding* 98, 4–24, 2005.
- [12] H. Tan , Y.J. Zhang, Detecting eye blink states by tracking iris and eyelids , *Pattern Recognition Letters* 27 (2006) 667–675.
- [13] M. Chau ,M. Betke, Real Time Eye Tracking and Blink Detection with USB Cameras, Boston University Computer Science Technical Report No. 2005-12
- [14] Morris, T., Blenkhorn, P., Zaidi, F., 2002. Blink detection for real-time eye tracking. *J. Network Comput. Appl.* 25, 129–142.
- [15] J. Zhu, J. Yang, Subpixel eye gaze tracking, in: *Proc. 5th Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition*, Washington, DC, 2002.
- [16] A. Fitzgibbon, M. Pilu, R.B. Fisher, Direct least squares fitting of ellipses, *IEEE Trans. Pattern Anal.Mach. Intell.* 21 (5) (1999) 476–480.
- [17] T.OHNO, N.MUKAWA, A. YOSHIKAWA2002. FreeGaze: A gaze tracking system for everyday gaze interaction. In *Proceedings of Eye Tracking Research and Applications (ETRA2002)*, 125-132.
- [18] A.L. Yuille, P.W. Hallinan, D.S. Cohen, Feature extraction from faces using deformable templates, *Int. J. Comput. Vis.* 8 (2) (1992) 99–111.
- [19] R. Wagner, H.L. Galiana, Evaluation of three template matching algorithms for registering images of the eye, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 39 (12) (1992) 1313–1319.
- [20] M. Betke, J. Kawai, Gaze detection via self-organizing grey-scale units, in: *Proc. Int. Workshop on Recognition, Analysis, and Tracking of Faces and Gestures in Real-Time Systems*, 1999, pp. 70–76.
- [21] R. Stiefelhagen, J. Yang, A. Waibel, Tracking eyes and monitoring eye gaze, in: *Proc. Workshop on Perceptual User Interfaces*, Banff, Canada, October 1997, pp. 98–100.
- [22] Q. Ji, Z. Zhu, Non-intrusive eye and gaze tracking for natural human computer interaction, *MMIinteraktiv J.* (2003) (special issue on Eye-gaze Tracking for Human Computer Interaction).
- [23] S.-W. Shih, Y.-T. Wu, J. Liu, A calibration-free gaze tracking technique, in: *Proc. 15th Int. Conf. on Pattern Recognition*, vol. 4, 2000, pp. 201–204.

- [24] D.H. Yoo, J.H. Kim, B.R. Lee, M.J. Chung, Non-contact eye gaze tracking system by mapping of corneal reflections, in: Proc. Fifth IEEE Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, 2002, pp. 101–106.
- [25] C. Morimoto, A. Amir, M.D. Flickner, Detecting Eye Position and Gaze from a Single Camera and 2 Light Sources, ICPR 2002, pp. 314–317.
- [26] K. Talmi, J. Liu, Eye and gaze tracking for visually controlled interactive stereoscopic displays, Signal Processing: Image Communication, vol. 14, 1999, pp. 799–810
- [27] M. Ohtani, Y. Ebisawa, Eye-gaze detection based on the pupil technique using two light sources and the image difference method, in: Proc. 17th Annual Int. Conf. of IEEE in Medicine and Biology Society, 1995.
- [28] Y. Ebisawa, Improved Video-Based Eye-Gaze Detection Method, IMTC _94, 1994.
- [29] Y. Ebisawa, Improved video-based eye-gaze detection method, IEEE Trans. Instrument. Meas. 47 (4) (1998) 948–955.
- [30] K. Tokunou, Y. Ebisawa, Automated thresholding for real-time image processing in video-based eyegaze detection, in: Proc. 20th Ann. Int. Conf. of IEEE in Medicine and Biology Society, 1998, pp.748–751.
- [31] T. Marui, Y. Ebisawa, Eye searching technique for video-based eye-gaze detection, in: Proc. 20th Ann. Int. Conf. of IEEE in Medicine and Biology Society, 1998, pp. 744–747.
- [32] C. Morimoto, D. Koons, A. Amir, M. Flickner, S. Zhai, Keeping an eye for HCI, in: Proc 12th Brazilian Symp. on Computer Graphics and Image Processing, Campinas, Brazil, October 1999, pp. 171–176.
- [33] J.-G. Wang, E. Sung, Study on eye gaze estimation, IEEE Trans. Syst. Man Cybernet. 32 (3) (2002).
- [34] D. Beymer, M. Flickner, Eye gaze tracking using an active stereo head, IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recogn. 2 (2003) 451–458.
- [35] D. H.YOO, M. J. CHUNG, 2005. A novel non-intrusive eye gaze estimation using cross-ratio under large head motion.Computer Vision and Image Understanding, vol. 98, 25-51.
- [36] C. Hennessey, B. Nouredin, P. Lawrence , A Single Camera Eye-Gaze Tracking System with Free Head Motion, ETRA 2006, San Diego, California, 27–29 March 2006.
- [37] T.OHNO, N.MUKAWA, 2004. A free-head, simple calibration, gaze tracking system that enables gaze-based interaction. In Proceedings of Eye Tracking Research and Applications (ETRA2004), 115-122.
- [38] C.MORIMOTO, A.AMIR, , M.FLICKNER, 2002. Free head motion eye gaze tracking without calibration. In CHI'02 extended abstracts on Human factors in computer systems, 586-587.
- [39] S. SHIH, J.LIU, 2004. A novel approach to 3-D gaze tracking using stereo cameras. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B, vol. 34, No 1, 234-245.
- [40] 2008 : <www.tobii.com>
- [41] J. Reulen, J.T. Marcus, D. Koops, F. de Vries, G. Tiesinga, K. Boshuizen, J. Bos, Precise recording of eye movement: the iris technique, part 1, Med. Biol. Eng. Comput. 26 (1) (1988) 20–26.
- [42] 2008 : <http://www.crsiitd.com/catalog/skalar/index.html>
- [43] T. Cornsweet, H. Crane, Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth purkinje images, J. Opt. Soc. Am. 63 (8) (1973) 921–928.
- [44] S. Baluja, D. Pomerleau, Non-intrusive gaze tracking using artificial neural networks, Tech. Rep.CMU-CS-94-102, School of Computer Science, CMU, CMU Pittsburgh, Pennsylvania 15213 (January 1994).
- [45] C. D. Redline, C. P. Lankford, (2001). Eye-movement analysis: A new tool for evaluating the design of visually administered instruments (paper and web). In Proceedings of the Section on Survey Research Methods of the American Statistical Association.
- [46] “تصویر دیجیتال چیست؟”, Date of using the web site : November 15, 2008: <www.hamedhabibi.com>
- [47] “RANSAC”, Date of using the web site : August 1, 2008: <www.wikipedia .com>
- [48] Li, D., J. Babcock, and D. J. Parkhurst. openEyes: A Low-Cost Head-Mounted Eye-Tracking Solution. In Proceedings of ETRA; Eye Tracking Research and Applications Symposium. San Diego, California, USA: ACM press, 2006.
- [49] J. Anliker, Eye Movements: On-Line Measurement, Analysis, and Control, (1976). In R. A. Monty & J. W. Senders (Eds.), Eye Movements and Psychological Processes (pp. 185–202). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

- [50] S.M.I. Inc, Eyelink gaze tracking, 2008, Available from: < <http://www.smi.de>>.
- [51] 2008 : <<http://www.eyetools.com/>>
- [52] D. Kahneman, Attention and Effort. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey,(1973).
- [53] A. L. Yarbus, Eye Movements and Vision. New York, NY: Plenum Press. 1967.
- [54] ASL. Available from: <<http://www.a-s-l.com/gazetracker.htm>>.
- [55] LCTech, The eyegaze development system, 2008 , Available from : < <http://www.eyegaze.com>>.
- [56] Babcock, J. S. and J. B. Pelz. Building a lightweight eyetracking headgear. In Proceedings of ETRA: Eye Tracking Research & Applications Symposium. San Antonio, Texas, USA: ACM Press. pp. 109-13, 2004.
- [57] Hansen, D. W. and J. P. Hansen. Eye Typing with Common Cameras. In Proceedings of Eye Tracking Research and Applications (ETRA) Symposium. San Diego, California: ACM Press. pp. 55, 2006.
- [58] Hansen, D. W., D. MacKay, and J. P. Hansen. Eye Tracking off the Shelf. In Proceedings of ETRA: Eye Tracking Research & Applications Symposium. San Antonio, Texas, USA: ACM Press. pp. 58, 2004.
- [59] Hennessey, C., B. Nouredin, and P. Lawrence. A Single Camera Eye-Gaze Tracking System with Free Head Motion. In Proceedings of ETRA: Eye Tracking Research and Applications Symposium. San Diego, California, USA: ACM Press. pp. 87-94, 2006.
- [60] Ohno, T. and N. Mukawa. A Free-head, Simple Calibration, Gaze Tracking System That Enables Gaze-Based Interaction. In Proceedings of ETRA: Eye Tracking Research & Applications Symposium. San Antonio, Texas, USA. pp. 115-22, 2004.
- [61] Ohno, T., N. Mukawa, and S. Kawato. Just Blink Your Eyes: A Head-Free Gaze Tracking System. In Proceedings of CHI. Ft. Lauderdale, Florida, USA: ACM Press. pp. 950-51, 2003.
- [62] Kumar, M., Reducing the Cost of Eye Tracking Systems. Technical Report CSTR 2006-08, Stanford University, Stanford, April 2006.
- [63] S. Zhai, What_s in the eyes for attentive input, Commun. ACM 46 (3) (2003) 34–39.
- [64] Hansen, J. P. et al. Command Without a Click: Dwell Time Typing by Mouse and Gaze Selections. In Proceedings of Ninth IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction (Interact '03) (Zurich, Switzerland, Sept 1-5, 2003)
- [65] Majaranta, P. et al. Effects of Feedback on Eye Typing with a Short Dwell Time. In Proceedings of the Eye Tracking Research & Application Symposium (ETRA 2004) (San Antonio, TX, 2004)
- [66] Zhai, S., C. Morimoto, and S. Ihde. (1999) Manual and Gaze Input Cascaded (MAGIC) Pointing. In Proceedings of CHI. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: ACM Press. pp. 246-53, 1999.
- [67] Miniotos, D. et al. Extending the Limits for Gaze Pointing through the Use of Speech. In Information Technology and Control, 2005, Vol. 34, No. 3, 225-230.
- [68] Kumar, M. et al. EyePoint: Practical Pointing and Selection Using Gaze and Keyboard. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI '07) (San Jose, CA, 2007).
- [69] Ohno, T. (1998). "Features of Eye Gaze Interface for Selections Tasks". Proceedings of The Third Asia Pacific Computer Human Interaction – APCHI '98. IEEE Computer Society. 1– 6
- [70] Skovsgaard, Henrik (2008): Noise Tolerant Selection by Gaze Controlled Pan and Zoom (TO BE PUBLISHED March 2008).
- [71] Ziniotas D., Špakov O. and Scott MacKenzie (2004). "Eye Gaze Interaction with Expanding Targets" Late breaking results paper presented at CHI 2004.
- [72] Hansen, D.W and Hammoud, R.I. (2007). An improved likelihood model for eye tracking. Computer Vision and Image Understanding 106 (2007), 220-230.
- [73] WARD, D. J., AND MACKAY, D. J. C. 2002. Fast hands-free writing by gaze direction. Nature 418, 6900, 838.
- [74] M. Tall, NeoVisus, Master Thesis, Lund University, Sweden, Spring 2008.
- [75] D.J. Ward, A.F. Blackwell, D.J.C. MacKay, Dasher: a gesture driven data entry interface for mobil computing, Hum Comput. Interact. 17 (2002) 199–228.

- [76] Coleman, H. W., and Steele, W. G., 1999, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, Wiley, New York, pp. 47-79
- [77] Chin, J. P., Diehl, V. A, Norman, K. (Sept. 1987) Development of an instrument measuring user satisfaction of the human-computer interface, *Proc. ACM CHI '88* (Washington, DC) 213-218. CSTR- 1926, CAR-TR-328
- [78] Lewis, J. R. (1995) IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires: Psychometric Evaluation and Instructions for Use. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 7:1, 57-78.
- [79] C.H. Morimoto, Marcio R.M. Mimica,” Eye gaze tracking techniques for interactive applications”, *Computer Vision and Image Understanding* 98, pp. 4–24, 2005.

ضمیمه ۱:

ارزیابی نرم افزار سیستم

Cognitive Workload / NASA Task Load Index

فعالیت ذهنی:

به نظر تان چه مقدار فعالیت ذهنی و ادراکی مورد نیاز است. (فکر کردن، جستجو، محاسبه، بخاطر آوردن و تصمیم گیری)

کار با نرم افزار ساده است یا دشوار؟

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ساده									دشوار

فعالیت فیزیکی و غیر ذهنی:

چه مقدار فعالیت جسمی برای کار با نرم افزار نیاز است؟ (کلیک کردن و یا فعال نمودن آیتم ها با چشم، حرکات اضافی چشم و ...)

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
فعالیت کم									فعالیت زیاد

سرعت عمل:

برای انجام یک فعالیت عملکرد نرم افزار کند بود یا سریع؟

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
کند									سریع

تلاش:

کار با نرم افزار و یا یادگیری درست یک فعالیت در آن چقدر دشوار به نظر می رسد؟

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ساده									دشوار

کارآیی:

در انجام اهدافی که برای شما تعیین شده بود و یا خود قصد انجام آنها را داشتید، چقدر موفق بودید؟

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ناموفق					کاملاً				
					موفق				

مستاصل کنندگی:

در حین انجام یک فعالیت چه مقدار احساس نارضایتی، بی‌اعتمادی، هُل شدن و فشار روحی می‌کردید؟

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
کم					زیاد				

ضمیمه ۲:

ارزیابی ایترفیس دستگاه بر پایه Q.U.I.S

پاسخ کلی در باره نرم افزار									
توانمندی بالا					توانمندی کم				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
مهیج					بی حال				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
قابل انعطاف					خشک				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
راضی کننده					خسته کننده				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

ظاهر نرم افزار									
ترتیب و چینش اجزاء و اطلاعات در صفحه					حروف موجود در صفحه				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
واضح					خوانا				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
کمک نمی کند					برجسته شدن اجزاء با تغییر رنگ آنها به انجام بهتر فعالیت				
کمک می نماید					کند				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

یادگیری									
یادگیری بخش های مختلف با سعی و خطا					یادگیری کار با سیستم				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
راحت					راحت				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

قابلیت های نرم افزار									
درست کردن اشتباهات					سرعت سیستم				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
ساده					به اندازه کافی سریع				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نیاز کاربران باتجربه و بی تجربه برآورده می شود					قابلیت اعتماد				
همیشه					قابل اطمینان				
۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaire

	IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaire
۱	در مجموع من از سادگی کار با دستگاه ساخته شده راضی هستم.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹
۲	کار با دستگاه بسیار راحت است.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹
۳	من فعالیت‌های مورد نظر را می‌توانم بصورت موثر با این سیستم به انجام برسانم.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹
۴	من می‌توانم با این سیستم به سرعت کارم را به اتمام برسانم.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹
۵	من در هنگام استفاده از دستگاه احساس راحتی می‌نمایم.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹
۶	یادگیری کار کردن با سیستم راحت است.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹
۷	در صورت بروز اشتباه به سرعت می‌توانم آن را برطرف سازم.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹
۸	چینش اطلاعات در صفحه بسیار واضح است.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹
۹	محیط نرم‌افزار خوشایند و جذاب است.
	به شدت موافق به شدت مخالف ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹

۱۰	من از کار کردن با این دستگاه لذت می‌برم.
	به شدت موافق ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ به شدت مخالف
۱۱	در مجموع من از سادگی کار با دستگاه ساخته شده راضی هستم.
	به شدت موافق ۰ ۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ به شدت مخالف