

بهبود عملکرد توصیفگرهای الگوریتم SURF جهت انطباق تصاویر

مرضیه غریبی^۱، ستار میرزا کوچکی^۲

۱دانشجوی کارشناسی ارشد برق الکترونیک دانشگاه علم و صنعت ایران marziehgharibi@elec.iust.ac.ir

۲دانشیار دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۳۰

چکیده

تطبیق تصاویر یکی از مهمترین موضوعات علم بنیایی ماشین و پایه بسیاری از سیستم‌های هوشمند تشخیص اشیاء در علم ریاتیک، تجزیه و تحلیل تصاویر و اطلاعات دریافتی از ماهواره، ردیابی هدف در صنایع نظامی و بازیابی تصاویر، به شمار می‌رود. هدف کلی این مقاله ارائه الگوریتمی بهبود یافته بر پایه ویژگی‌های محلی برای تطبیق تصاویر است که در برابر تغییراتی همچون چرخش و تغییر مقیاس و همچنین تغییرات شدت روشنایی و محوشدگی تا حد زیادی مقاوم باشد. یکی از مهمترین الگوریتم‌هایی که در این زمینه ارائه شده الگوریتم SURF است، الگوریتم‌های جدیدتری که در این زمینه ارائه شده‌اند یا به بهبود عملکرد در ازای افزایش نه چندان مطلوب زمان اجرایی دست یافته‌اند یا اینکه در ازای از دست رفتن مقدار قابل توجهی از دقت و عملکرد الگوریتم به زمان اجرایی کمتر از الگوریتم SURF دست یافته‌اند. در این مقاله الگوریتم نوینی ارائه می‌شود که نسبت به الگوریتم SURF دارای بهبود قطعی عملکرد است در حالیکه الگوریتم پیشنهادی از نظر زمان اجرایی، هیچ افزایشی نسبت به الگوریتم SURF ندارد.

کلیدواژه

نقاط مطلوب، ویژگی محلی، توصیفگر، تطبیق.

مقدمه

در برابر این تغییرات مقاوم باشند. همچنین زمان اجرای الگوریتم نیز پارامتر مهمی در این زمینه است و اضافه شدن محاسبات بسیار پیچیده به قیمت از دست رفتن زمان زیادی برای اجرای الگوریتم چندان مطلوب نیست. در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهشگران بنیایی ماشین، به منظور کاهش آثار این مشکلات، عملیات بینایی را به کمک ویژگی‌های محلی انجام داده‌اند. استفاده از ویژگی‌های محلی مناسب، قدرت یک عملیات بینایی در مقابل مشکلات مذکور را تا حدود زیادی افزایش می‌دهد.

هدف این مقاله ارائه الگوریتمی برای تطبیق تصاویر است که در مقابل تغییرات چرخش و مقیاس و تغییرات شدت روشنایی و محوشدگی مقاوم باشد و عملکرد آن در مقایسه با الگوریتم‌های مطرح در این زمینه بهبود یافته باشد و همزمان زمان محاسبه نیز تغییری نداشته باشد.

جدیدترین الگوریتم‌های موجود در این زمینه بر پایه ویژگی‌های محلی دارای سه مرحله اصلی می‌باشند. مرحله اول به آشکارسازی یکسری نقاط کلیدی^۶ در تصویر بر اساس معیارهایی خاص

علم بنیایی ماشین^۱ یکی از شاخه‌های مهم علوم مهندسی است که در طی ۲۰ سال اخیر پیشرفت چشم‌گیری داشته است. تطبیق تصاویر^۲، یکی از مسایل کلیدی در علم بینایی ماشین و پایه بسیاری از سیستم‌های پیشرفته در این زمینه می‌باشد. بازشناسی اشیاء^۳، ردیابی هدف^۴، بازشناسی چهره و ژست^۵، تعدادی از کاربردهای مطرح در این زمینه است.

باید توجه داشت که در صحنه‌های واقعی پارامترهای زیادی در نتیجه کار موثر هستند برای مثال ممکن است در فریم‌های متوالی یک ویدیو شاهد تغییراتی از قبیل چرخش و تغییر مقیاس، محوشدگی، تغییرات شدت روشنایی و تغییر نقطه دید بود که در این شرایط تطبیق فریم‌ها یا درحقیقت تصاویر متوالی، بسیار پیچیده‌تر است و تلاش بر این است که الگوریتم‌های ارائه شده در این زمینه

- 1Machine Vision
- 2Image Matching
- 3Object Recognition
- 4Tracking
- 5Face and Gesture Recognition

6Interest Point

بعدی یافتن توصیفگر^{۱۵} برای هر نقطه مطلوب است. اطلاعات همسایگی هر نقطه مطلوب در قالب بردار ویژگی آن نقطه بیان میشود. که بهتر است تا جای ممکن توصیفگرها در مقابل نویز، تغییرات مکانی، تغییرات هندسی و شدت روشنایی مقاوم باشند. در نهایت در مرحله سوم، توصیفگرهای مربوط به نقاط مطلوب در دو تصویر با یکدیگر مقایسه می‌شوند و نقاط انطباق یافت میشود. ابعاد بردار توصیفگر عاملی تعیین کننده برای زمان اجرای برنامه به شمار می‌رود از طرفی اگر تعداد مولفه‌های توصیفگر را به منظور دستیابی به سرعت بالاتر، کاهش داد، دقت و کارایی نتیجه افت می‌کند. بدین ترتیب بهتر است نقطه بهینه ای میان سرعت و دقت انتخاب شود تا یک ویژگی قربانی ویژگی دیگر نشود. طیف وسیعی از ردیابها و توصیفگرها تاکنون ارائه شده‌اند، که در ادامه توضیحاتی در رابطه با کارهایی که تاکنون در این حوزه انجام شده ارائه می‌شود.

نگاهی به انواع آشکارسازهای نقاط مطلوب

آشکار ساز گوشه هریس^{۱۶} از جمله گسترده‌ترین آشکارسازهای نقاط مطلوب می‌باشد [۱] که در سال ۱۹۸۸ معرفی شد. این آشکارساز بر پایه مقادیر ویژه ماتریس ممان دوم می‌باشد. عیب بزرگ آشکارساز گوشه هریس تغییر ناپذیری آن با مقیاس است. لیندبرگ^{۱۷} [۲] مفهوم تعیین مقیاس برای نقاط را مطرح کرد. این مفهوم امکان نسبت‌دهی مقیاسی منحصر به فرد به هر نقطه مطلوب را فراهم می‌آورد، لیندبرگ برای آشکارسازی ساختارهای حبابی شکل، هم با دترمینان ماتریس هسین و هم با لاپلاسیان (که متناظر با اثر ماتریس هسین است) به آزمایشهایی مبادرت ورزید. میکولاچزک^{۱۸} و اشمیت [۴] این روش را با ایجاد آشکارسازهای تغییرناپذیر با مقیاس و بهبود خاصیت تکرارپذیری اصلاح کردند و آن را هریس لاپلاس و هسین لاپلاس نامیدند. آنها از معیار هریس یا همان دترمینان ماتریس هسین برای انتخاب مکان نقاط مطلوب و از لاپلاسیان برای انتخاب مقیاس آن نقاط استفاده کردند. لو^{۱۹} در سال ۱۹۹۹ برای افزایش سرعت الگوریتم، پیشنهاد استفاده از تقریبی از لاپلاسیان گوسین را به جای استفاده از فیلتر تفاضل گوسین مطرح کرد [۳].

چند آشکارساز دیگر که تغییر ناپذیر با مقیاس هستند نیز پیشنهاد شده، به عنوان مثال میتوان به آشکار ساز ناحیه برجسته که توسط کدیر^{۲۰} و همکارانش [۵] معرفی شد اشاره کرد که آنتروپی درون ناحیه را حداکثر می‌کند و همچنین آشکار ساز ناحیه مبتنی بر لبه

میپردازد، مرحله دوم یافتن توصیفگر^۷ برای نقاط یافت شده در مرحله اول بر اساس نواحی همسایگی آن نقاط است و مرحله سوم تطبیق^۸ توصیفگرهای یافته شده در دو تصویر مورد آزمایش می‌باشد.

در این مقاله تمرکز اصلی بر روی قسمت دوم یعنی نحوه یافتن توصیفگر است. در الگوریتم پیشنهادی از توصیفگرهایی استفاده شده که در هر عضو آن ترکیبی از خصوصیات همسایگی‌ها نهفته و در قسمت نتایج دیده می‌شود که در مقایسه با الگوریتم‌هایی که از فیلتر ویولت هار یا گرادینان‌های جهتی برای یافتن توصیفگرها در آنها استفاده می‌شود، در روش پیشنهادی جدید تعداد تطبیق‌های غلط کاهش می‌یابد. برای شبیه‌سازی این الگوریتم از نرم‌افزار متلب و همچنین برای زمان سنجی الگوریتم از نرم‌افزار ویژوال استادیو بهره گرفته شده است.

ساختار این مقاله بدین شرح می‌باشد که در ادامه مروری بر روشهایی که تاکنون در این زمینه ارائه شده‌اند انجام می‌شود و روند آنها به اختصار توضیح داده می‌شود در قسمت بدست آوردن آشکارسازهای نقاط مطلوب، نحوه بدست آوردن آشکارسازها به طور کامل شرح داده می‌شود سپس در قسمت تعیین توصیفگر برای نقاط مطلوب روش ابداعی برای بدست آوردن توصیفگرهای نوین به صورت کامل توضیح داده می‌شود و همچنین روش تطبیق شرح داده می‌شود. در قسمت شبیه‌سازی به بررسی نتایج عملکرد الگوریتم و مقایسه آن با روشهای موجود پرداخته می‌شود و در این مقایسه از معیارهای ارزیابی استاندارد در این زمینه استفاده می‌شود و در انتها نیز جمع‌بندی کلی از کار انجام شده، در قسمت نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

در تطبیق بر اساس ویژگی‌های شاخص از اطلاعات بیشتری همچون گرادینانهای محلی^۹ یا لاپلاسیان^{۱۰} یا ماتریس هسین^{۱۱} برای تطبیق استفاده می‌شود. برتری این دسته نسبت به دسته قبل فراهم آوردن توصیف کیفی در کنار توصیف کمی برای اجزاء استخراج شده از تصویر است که نتیجه بهتری را دربر دارد. تطبیق بر اساس ویژگی‌های شاخص معمولاً شامل سه مرحله اساسی است که در ادامه به توضیح هر کدام پرداخته می‌شود.

اولین مرحله یافتن نقاط مطلوب^{۱۲} در مکان‌های مشخصی از تصویر است، که به وسیله الگوریتم ردیابی^{۱۳} انجام می‌گیرد. مهم‌ترین مشخصه ردیاب برای یافتن نقاط مطلوب تکرارپذیری^{۱۴} آن‌ها است. تکرار پذیری قابلیت اطمینان ردیاب برای یافتن نقاط مطلوب متناظر در دو تصویر مشابه با زوایای دید مختلف می‌باشد. مرحله

- 7Descriptor
- 8Matching
- 9Local Gradient
- 10laplacian
- 11Hessian Matrix
- 12Interest Points
- 13Detector
- 14Repeatability

- 15Descriptor
- 16 Harris
- 17Lindbergh
- 18Mikołajczyk
- 19Lowe
- 20Kadir

الگوریتم در ازای از دست رفتن دقت کارکرد، به سرعتی مشابه سرعت الگوریتم سرف دست یافت. به طور کلی ابعاد بزرگ بردار توصیف‌کننده سیفت عیب این الگوریتم در مرحله انطباق به‌شمار می‌رود. برای کاربردهای بلادرنگ^{۲۶} با استفاده از یک کامپیوتر معمولی، هر یک از گام‌های آشکارسازی، توصیف‌کنندگی و انطباق، باید سریع انجام شوند.

اخیراً بعضی از محققین برای کاربردهایی که سرعت یک نیاز بحرانی محسوب می‌شود استفاده از یکسری توصیفگرهای باینری [19,18] را پیشنهاد میکنند برای مثال توصیفگر بریسک^{۲۷} یکی از این نمونه‌هاست. [17] البته عملکرد توصیفگر بریسک پایین‌تر از الگوریتم سرف است در این توصیفگر تعدادی نقطه اطراف نقطه مطلوب به صورت دایروی لحاظ می‌شود به صورتی که چینش این نقاط و فاصله شعاعی آنها تا مرکز بر اساس توزیع گوسی انجام میشود که پارامترهای توزیع نیز تابعی از مقیاس نقطه مطلوب شناسایی شده است. سپس ترکیب‌های دو تایی از این نقاط به صورت رندم انتخاب می‌شوند و بر اساس فاصله زوج نقطه انتخاب شده به دو گروه نقاط با فاصله نزدیک و نقاط با فاصله دور تقسیم می‌شوند. سپس دو گرادیان برای نقطه مطلوب تنها با استفاده از زوج نقاطی که در دسته نقاط فواصل دور قرار دارند برای دو جهت افقی و عمودی محاسبه می‌شود سپس با استفاده از تانژانت معکوس گرادیان‌ها یک زاویه برای نقطه مطلوب تعیین میشود و مکان نقاط تست به اندازه زاویه بدست آمده دوران داده می‌شوند و بدین ترتیب مکان پیکسلهایی که برای بدست آوردن توصیفگرها استفاده میشود، بدست می‌آیند. زوج نقاط با فواصل کوتاه برای بدست آوردن توصیفگرها بکار می‌روند. توصیفگرها به روش خیلی ساده‌ای محاسبه می‌شوند بدین ترتیب که اگر در زوج نقطه انتخاب شده نقطه اول بزرگتر از نقطه دوم باشد مقدار توصیفگر ۱ و در عکس این حالت ۰ در نظر گرفته می‌شود بدین ترتیب یک دنباله باینری به عنوان توصیفگر برای هر نقطه مطلوب بدست می‌آید. و تطبیق توصیفگرهای باینری فقط با عمل XOR میان دنباله‌های باینری انجام می‌شود.

بدست آوردن آشکارسازی نقاط مطلوب

راهکاری که برای آشکارسازی نقاط مطلوب از آن استفاده شده، تقریب ماتریس هسین است که ثابت شده نسبت به آشکارسازهای دیگر از جمله آشکار ساز بر پایه هریس-لاپلاس و تفاوت گوسین‌ها دارای شاخص تکرار پذیری بالاتری است [15] که برای محاسبه آن از روش تصویر انتگرالی استفاده می‌شود.

که توسط اشمیت و ژوری^{۲۱} [۶] معرفی شد. البته این روشها از نظر زمان اجرایی نسبت به روشهای ذکر شده قبل ضعیفتر هستند. با مقایسه آشکارسازهای موجود و مقایسه‌های انجام شده [۷] میتوان نتیجه گرفت که آشکارسازهای مبتنی بر هسین پایدارتر و تکرارپذیرتر از آشکارسازهای مبتنی بر هریس هستند. به علاوه، در استفاده از دترمینان ماتریس هسین به جای اثر آن (یعنی لاپلاسیان) مزایایی همچون دقت‌تر بودن ساختارهای یافته شده در نقاط کلیدی نهفته است. همچنین استفاده از تقریبهایی همچون تفاضل گوسین مقدار قابل توجهی به سرعت در ازای از بین رفتن مقدار کمی دقت می‌افزایند.

نگاهی به انواع توصیفگرهای نقاط مطلوب

انواع زیادی توصیف‌کننده ویژگی نقاط مطلوب تاکنون پیشنهاد شده، مانند مشتق‌های گوسین^{۲۲} [۸]، ثابت‌های لحظه‌ای، ویژگی-های مبتنی بر فاز [۹] و توصیف‌کننده‌هایی که توزیع ویژگی‌ها با مقیاس کوچکتر را در همسایگی نقاط مطلوب نمایش می‌دهند که توسط لو معرفی شد [۱۰] و از نظر کارکرد بهتر از سایرین است [۱۱] ولی نسبت به توصیف‌کننده سرف^{۲۳} سرعت کمتری دارد. توصیفگر لوکه سیفت^{۲۴} نام دارد [۱۰]، گرادیان‌های جهت دار محلی را در اطراف نقطه مطلوب یا همان نقطه کلیدی محاسبه میکند و اطلاعات محاسبه شده را در یک بردار ۱۲۸ بعدی ذخیره میکند. اصلاحات گوناگونی روی این طرح پیشنهاد شده است، کی و همکارانش [۱۲] PCA را روی گرادیان تصویر حول نقطه مطلوب آشکار شده، اعمال نمودند، این PCA-SIFT یک توصیف‌کننده ۳۶ بعدی ایجاد می‌کند که برای انطباق سریع می‌باشد اما در مطالعه مقایسه‌ای دوم توسط میکولایچیزیک^{۲۵} اثبات شده که PCA-SIFT نسبت به SIFT تمایز کمتری دارد و اعمال PCA سرعت محاسبات را کاهش میدهد.

هنوز به نظر میرسد که توصیف‌کننده سیفت برای کاربردهای عملی جزء جذاب‌ترین توصیف‌کننده‌ها می‌باشد و به همین خاطر نیز استفاده گسترده‌ای دارد این توصیف‌کننده متمایز و نسبتاً سریع است ولی توصیف‌کننده سرف از سیفت نیز سریعتر است که در انتهای فصل به صورت گسترده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. سرعت بالاتر الگوریتم سرف به دلیل استفاده از تکنیک تصویر انتگرالی میباشد.

گربنر^{۲۵} در سال ۲۰۰۶ [۱۴] به تقریب الگوریتم سیفت با استفاده از تصویر انتگرالی پرداخت، مرحله آشکار سازی در الگوریتم او بر اساس تفاضل میانگین (بدون درونیایی) و مرحله توصیف‌کننده الگوریتم او بر اساس هیستوگرام‌های انتگرالی است او در این

21Jurie and C.Schmid
22Gaussian
23SURF(Speeded Up Robust Feteate)
24SIFT(Scale Invariant Feature Transform)
25Grabner

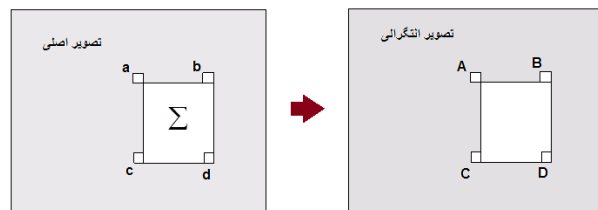
26Real-time
27Brisk

تصویر انتگرالی

استفاده از تصویر انتگرالی برای محاسبه سریع کانولوشن عکس با فیلترهای جعبه‌ای به کار می‌رود [16]. به اینصورت که ابتدا از ماتریس عکس یک ماتریس انتگرالی ساخته می‌شود که برای بدست آوردن مقدار هر پیکسل در ماتریس انتگرالی ابتدا پیکسل با همان آدرس در ماتریس عکس در نظر گرفته می‌شود سپس مجموع تمام پیکسل‌های چپ و بالای آن پیکسل و همچنین خود آن پیکسل محاسبه می‌شود و به جای مقدار پیکسل با آدرس مورد نظر در ماتریس انتگرالی قرار داده می‌شود، به طوریکه راست‌ترین و پایین‌ترین پیکسل در تصویر انتگرالی معرف مجموع تمام پیکسل‌های تصویر اصلی است. نحوه بدست آوردن ماتریس تصویر انتگرالی در رابطه ۱ نمایان است.

$$I_{\Sigma}(X) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(i, j) \quad (1)$$

بدین ترتیب با استفاده از تصویر انتگرالی میتوان مجموع پیکسل‌های درون مستطیل با هر ابعادی در تصویر اصلی را با سه عمل جمع، صرفنظر از سایز مستطیل انجام داد، به همین دلیل استفاده از روش تصویر انتگرالی برای محاسبه نتایج اعمال فیلترهای مختلف بر روی تصویر، باعث افزایش سرعت میشود که در شکل ۱ نشان داده شده است.



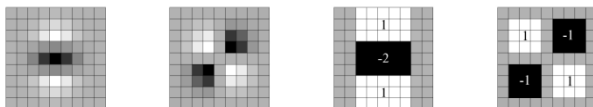
شکل ۱. تصویر انتگرالی-استفاده از تصویر انتگرالی باعث می‌شود تنها با سه جمع بتوان به مجموع پیکسل‌های درون مستطیل با هر اندازه‌ای دست یافت.

هسین، آشکارساز بر پایه ماتریس هسین انتخاب شده است. هدف، آشکار سازی ساختارهای حبابی شکل در مکان‌هایی است که در آنها دترمینان ماتریس هسین بیشینه است. برای نقطه $X=(x,y)$ در تصویر I ، ماتریس هسین در نقطه X با مقیاس σ به صورت رابطه 2 تعریف میشود [15].

$$H = \begin{pmatrix} L_{xx}(X, \sigma) & L_{xy}(X, \sigma) \\ L_{xy}(X, \sigma) & L_{yy}(X, \sigma) \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن $L_{xx}(X, \sigma)$ حاصل کانولوشن مشتق دوم تابع گوسین در جهت x ها $(\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma))$ با تصویر در نقطه X است، $L_{xy}(X, \sigma)$ و $L_{yy}(X, \sigma)$ نیز به همین ترتیب محاسبه می‌شوند.

استفاده از فیلتر گوسین برای آنالیز فضا-مقیاس بهینه است. ولی در عمل برای افزایش سرعت و امکان استفاده از روش تصویر انتگرالی، این الگوریتم از تقریب این فیلترها به صورت فیلترهای جعبه‌ای استفاده میکند، که همین امر باعث از دست رفتن مقدار کمی از تکرارپذیری آشکارساز، در چرخش در زوایای مضرب فرد $\pi/4$ می‌شود. معیار تکرارپذیری در اطراف زوایای با اندازه ضریب $\pi/2$ به بیشینه مقدار خود می‌رسد که به دلیل مربعی بودن شکل فیلترهاست، با این وجود کارایی آشکارسازها در کل مطلوب است به طوریکه کاهش بسیار کم در کارایی، ارزش چشمپوشی از استفاده از کانولوشن سریع با استفاده از تصاویر انتگرالی را ندارد. استفاده از تصویر انتگرالی با گسسته کردن و تقریب فیلترهای لاپلاسین گوسین امکانپذیر است. در شکل ۲ این فیلترها با تقریب‌هایشان نشان داده شده‌اند.



شکل ۲. سمت چپ: فیلترهای مشتق دوم گوسین در جهت عمودی و جهت افقی-عمودی سمت راست: فیلترهای جعبه‌ای که گسسته شده و تقریب فیلترهای سمت چپ هستند که D_{xy} و D_{yy} نامیده میشوند. وزن نواحی خاکستری رنگ صفر در نظر گرفته می‌شود [15]

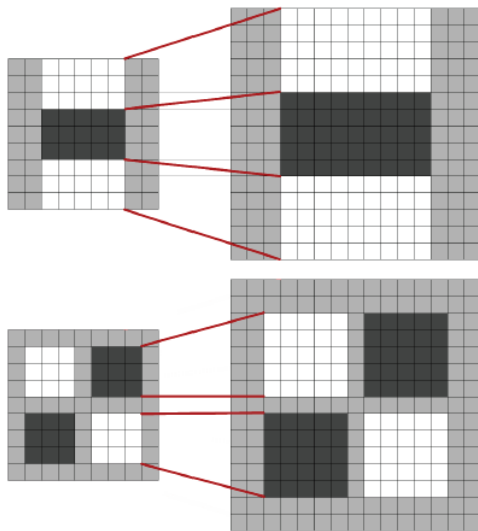
کانولوشن تصویر با تقریب مشتق مرتبه دوم گوسین با استفاده از روش تصویر انتگرالی میتواند در زمان بسیار کوتاه‌تر از حالت بدون تقریب آن محاسبه شود همچنین زمان محاسبه مستقل از سایز فیلتر میباشد زیرا در تصاویر انتگرالی مجموع پیکسل‌های درون مستطیل با هر اندازه‌ای تنها با سه عمل جمع انجام می‌پذیرد همچنین در بخش نتایج دیده میشود که آشکارساز تقریب‌هسین نسبت به هسین معمولی در بعضی شرایط بهتر عمل می‌کند.

در شکل ۲ فیلترهای جعبه‌ای 9×9 که تقریب لاپلاس گوسین هستند با مقیاس $\sigma = 1/2$ که نشان‌دهنده کوچکترین مقیاس (بالاترین وضوح مکانی) است برای محاسبه ساختارهای حبابی-

نقاط مطلوب بر پایه ماتریس هسین

در الگوریتم سرف به دلیل دقت بالا و کارایی مطلوب ماتریس

تعداد ثابتی مقیاس مشخص است، بنا به خاصیت گسستگی تصویر انتگرالی، کمینه تفاوت میان دو مقیاس متوالی، به طول l_0 که یک سوم اندازه فیلتر است بستگی دارد. در اکتاو اول اندازه فیلترها با پله ۶ پیکسل بزرگ میشوند (در فیلترها به قسمتهای وزن دار به هر طرف یک پیکسل اضافه شده که در مجموع برابر ۶ پیکسل افزایش است).



شکل ۳. فیلتر Dyy (بالا) و فیلتر Dxy (پایین) با اندازه‌های ۹ و ۱۵ [15].

ساختار فضای مقیاسی با فیلتر ۹×۹ شروع میشود که پاسخ حساب در تصویر را برای کوچکترین مقیاس می‌سازد، بعد از آن فیلترهایی با سایز ۱۵×۱۵ و ۲۱×۲۱ و ۲۷×۲۷ به تصویر اعمال می‌شود پس از آن دو مرحله حذف غیرماکزیمم به صورت سه‌بعدی میان این پاسخهای فیلتری انجام می‌گیرد به همین دلیل اولین و آخرین پاسخ فیلتری در این مجموعه فقط برای مقایسه استفاده میشود و همانطور که در ادامه بیشتر توضیح داده خواهد شد در اولین اکتاو کمترین و بیشترین مقیاس عبارتند از $\sigma=1/6$ و $\sigma=2/3$. در اکتاو جدید اندازه فیلترها با پله ۱۲ پیکسل افزایش می‌یابد، در اکتاو سوم با پله ۲۴ پیکسل در اکتاو چهارم با پله ۴۸ پیکسل اندازه پیکسلها رشد می‌کند.

همزمان با افزایش اندازه فیلترها در هر اکتاو، فاصله نمونه برداری برای استخراج نقاط مطلوب نیز در هر اکتاو دو برابر میشود. با دو برابر کردن فاصله نمونه برداری در هر اکتاو، زمان اجرایی برنامه کاهش می‌یابد و در ازای آن کاهش دقت که در نتیجه حاصل میشود قابل رقابت با روش سنتی نمونه برداری کاهش از تصویر اصلی برای ساختن هرم تصویر است. اندازه فیلترهای اکتاو دوم عبارتند از: ۲۷ و ۵۱ و ۳۹ و ۵۱، اندازه فیلترهای اکتاو سوم عبارتند از: ۲۷ و ۵۱ و ۷۵ و ۹۹ و اگر اندازه تصویر اصلی به اندازه کافی بزرگ باشد از اکتاو چهارم نیز استفاده میکنیم و اندازه فیلترها

شکل نشان داده شده‌اند. که ازین پس این فیلترهای جعبه‌ای را با D_{xx} و D_{yy} و D_{xy} می‌شناسیم. وزنهایی که برای نواحی مستطیلی منظور شده برای راحتی محاسبات ساده در نظر گرفته شده‌اند. دترمینان ماتریس هسین به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\det(H_{approx}) = D_{xx} D_{yy} - (\omega D_{xy})^2 \quad (3)$$

وزن نسبی ω در پاسخ فیلتری برای متعادل سازی دترمینان ماتریس هسین است که به صورت زیر محاسبه میشود:

$$\omega = \frac{|L_{xy}(1,2)|_F |D_{yy}(9)|_F}{|L_{yy}(1,2)|_F |D_{xy}(9)|_F} = 0.912... \approx 0.9 \quad (4)$$

که $|x|_F$ هنجار فروبنیوس است. از دید نظری بسته به تغییر مقیاس وزن ω تغییر خواهد کرد، ولی در عمل به دلیل نداشتن اثر قابل توجه در نتایج خروجی، این فاکتور ثابت نگه داشته میشود. بعلاوه پاسخ فیلتری با توجه به اندازه فیلترها نرمال میشود. با استفاده از دترمینان تقریبی ماتریس هسین پاسخ حساب در تصویر در مکان x در مقیاس‌های متفاوت محاسبه و ذخیره میشود پس از آن ماکزیمم‌های محلی در این پاسخها محاسبه میشوند.

نمایش فضا-مقیاس

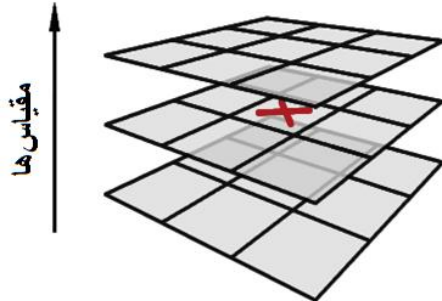
آشکارسازی نقاط مطلوب نیاز است که در مقیاس‌های متفاوت انجام شود زیرا ممکن است دو عکسی که مورد تطبیق قرار می‌گیرند در مقیاسهای متفاوتی باشند. مفهوم فضا-مقیاس معمولاً به صورت هرم تصویر پیاده‌سازی میشود. برای رسیدن به مرتبه‌های بالاتر در هرم تصویر نیاز است که روی تصویر به صورت مکرر فیلتر گوسی اعمال شود و سپس از تصویر زیر تصویر تولید میشود. لو در الگوریتم سیفت^{۲۸} لایه‌های هرمی را به منظور محاسبه تفاضل گوسین در تصویر برای آشکارسازی لبه‌ها و ساختارهای حسابی-شکل بکار می‌برد.

کاری که در این الگوریتم در رابطه با مفهوم فضا-مقیاس انجام میشود به این صورت است که فیلترهای جعبه‌ای در اندازه‌های مختلف بر تصویر اصلی اعمال میشوند با این تفاوت که هر چه اندازه فیلتر بزرگتر می‌شود، پله حرکت در اعمال فیلتر در عکس دو برابر میشود که در ادامه در بحث اکتاوها بیشتر توضیح داده خواهد شد.

با اعمال فیلتر جعبه‌ای با اندازه ۹×۹ به تصویر، لایه اول هرم تصویر با مقیاس ۱/۲ ساخته میشود و ساختن لایه‌های بالاتر هرم با اعمال فیلترها با اندازه بزرگتر ادامه می‌یابد.

فضای مقیاسها به اکتاوها تقسیم می‌شود. یک اکتاو در حقیقت دسته‌ای از پاسخهای فیلتری است که از کانولوشن تصویر ثابت با فیلترهایی با اندازه بزرگ شونده به دست آمده است. هر اکتاو شامل

دقیقتر و مقیاس دقیقتر نقطه مطلوب انجام می‌شود که مرحله درونیابی باعث میشود اثر تفاوت زیاد مقیاس در فیلترهای اولیه اکتاوها تا حدودی از بین رود.



شکل ۵. حذف $3 \times 3 \times 3$ غیر ماکزیمم

شکل ۶ مثالی از نمایش نقاط مطلوب با استفاده از روش «هسین سریع» در تصویر است، علامت عبارت $D_{xx} + D_{yy}$ در نقاط مطلوب در دوائر قرمز و آبی عکس متفاوت از یکدیگر می‌باشد.



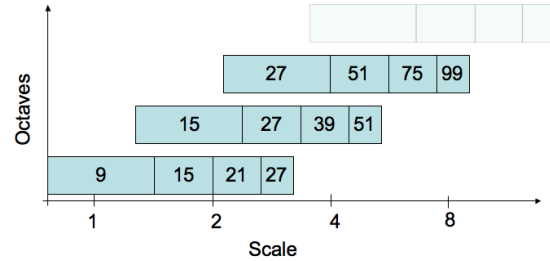
شکل ۶. نمایش ساختارهای حبابی شکل

تعیین توصیفگر برای نقاط مطلوب

توصیفگر اطلاعاتی راجع به توزیع شدت روشنایی پیکسل‌های همسایگی نقاط مطلوب در اختیار می‌گذارد در این الگوریتم توصیفگر نوینی طراحی شده که در ادامه شرح کاملی از آن ارائه می‌شود.

در این الگوریتم توصیفگرها با استفاده از دو فیلتر خاص که برای محاسبات آنها از روش تصویر انتگرالی استفاده می‌شود، محاسبه می‌شوند و ابعاد توصیفگرها ۶۴ است که در مقایسه با الگوریتم سیفت نصف شده که باعث سرعت در انطباق می‌شود و همزمان ثابت شده که دارای قدرت بیشتری است. همچنین در این الگوریتم از علامت لاپلاسیان به عنوان یک شاخص برای انطباق استفاده می‌شود که هم در کارایی و هم در سرعت انطباق مهم است و این الگوریتم را از سیفت متمایز می‌کند.

عبارتنداز: 51×99 و 47×195 . شکل ۴ نشان‌دهنده اندازه فیلترها برای سه اکتاو اول است. تعداد نقاط مطلوب استخراج شده در هر اکتاو روند کاهشی دارد و دو برابر شدن فاصله نمونه برداری در هر اکتاو در این امر بی‌تاثیر نیست.



شکل ۴. نمایش مصور اندازه فیلترها در اکتاوها. همپوشانی اکتاوها به دلیل دربرگرفتن تمام مقیاسها به صورت یکپارچه است [15]

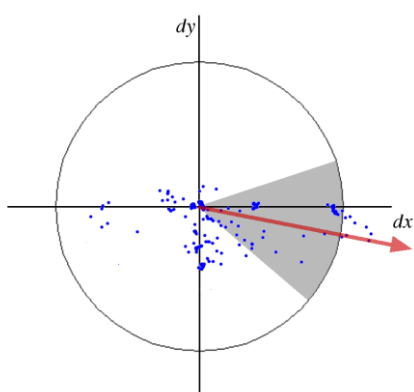
در فیلترهای اول اکتاوها تغییرات شدید مقیاس دیده میشود (برای مثال بین فیلترها با اندازه ۹ و ۱۵ تغییر مقیاس حدود $1/7$ است) که این باعث میشود مقیاس نقاط مطلوبی که در این نواحی شناسایی میشوند کمی به صورت تقریبی باشد، برای جلوگیری از این اتفاق میتوان ابتدا اندازه تصویر را با استفاده از درونیابی خطی دو برابر کرد و سپس اندازه فیلترهای اکتاو اول را افزایش داد، که به این ترتیب اندازه فیلترهای اکتاو اول عبارتند از: ۱۵ و ۲۱ و ۲۷ و ۳۳ و ۳۹ و سپس اکتاو دوم که اندازه آنها با پله ۱۲ پیکسل رشد می‌کند بدین ترتیب تغییرات مقیاس میان دو فیلتر اکتاو اول $1/4$ خواهد بود همچنین کمترین مقیاسی که پس از درونیابی میتوان به آن دست یافت $1/2$ خواهد بود.

بخش تعیین مکان و مقیاس نقاط مطلوب

برای مکان‌یابی نقاط مطلوب در تصویر یک حذف غیر ماکزیمم سه بعدی در همسایگی $3 \times 3 \times 3$ انجام می‌شود و سپس یک درونیابی فضا و مقیاس بر روی آنها انجام می‌شود [۲].

حذف غیر ماکزیمم بدین صورت است که ماتریسی که از درمینیان لاپلاس گوسین در جهات مختلف بدست آمده محاسبه می‌شود و سپس حاصل ماتریس را برای فیلترها با اندازه‌های فیلترهای اکتاو اول بدست آورده می‌شود و به عنوان مثال در اکتاو اول یک مقایسه میان سه لایه اول و دوم و سوم و یک مقایسه میان سه لایه دوم و سوم و چهارم انجام می‌شود. این مقایسه‌ها برای همه نقاط و در هر لایه یک محدوده 3×3 همانند شکل ۵ در مقایسه شرکت میکند و در مجموع در سه لایه مقایسه $3 \times 3 \times 3$ میان پیکسل وسطی در محدوده 3×3 لایه وسط و بقیه ۲۶ پیکسل انجام میشود [۲] که اگر این پیکسل از ۲۶ پیکسل دیگر بزرگتر و همچنین بزرگتر از آستانه خاصی که در الگوریتم معمولاً 0.04 تعیین میشود بود به عنوان یک نقطه مطلوب با همان مقیاس لایه وسط تعیین می‌شود. پس از این مرحله یک مرحله درونیابی برای تعیین مکان

مطلوب میشود سپس جهت غالب پیدا می‌شود. برای یافتن جهت غالب یک قطاع با زاویه ۶۰ درجه در ناحیه دایروی چرخش داده می‌شود و در هر ۶۰ درجه میان نقاط درون قطاع برآیند گیری می‌شود و در پایان بردار برآیند با بیشترین طول به عنوان نتیجه انتخاب و زاویه آن با محور راست x ها زاویه غالب در نظر گرفته می‌شود و به عنوان جهت نقطه مطلوب تعیین می‌شود. اندازه زاویه قطاع چرخشی پارامتری مهم است زیرا زوایای کوچکتر از ۶۰ درجه نقاط کمی را در بر میگیرد و زوایای بیشتر از ۶۰ درجه باعث انتخاب بردارهایی به عنوان بیشینه می‌شود که به خوبی بیانگر جهت نیستند که در هر دو حالت نتیجه کار بدتر از زاویه ۶۰ می‌باشد این روش در شکل ۸ نمایان است.



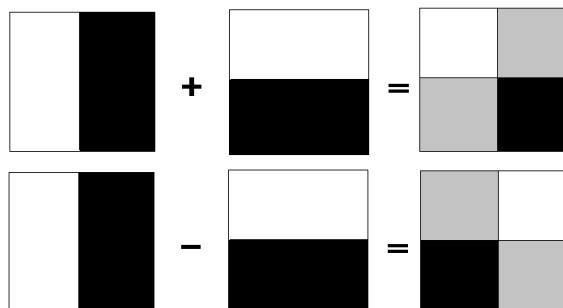
شکل ۸. انتساب جهت

در بسیاری از کاربردها نیاز به خاصیت تغییرناپذیری با چرخش نیست و میتوان این مرحله را از الگوریتم حذف نمود و با حذف این مرحله نیز الگوریتم نسبت به چرخش ۱۰ +/- درجه تغییرناپذیر است.

محاسبه مولفه‌های توصیفگر

برای بدست آوردن توصیفگرها، مرحله اول تعیین یک ناحیه مربعی به مرکز هر نقطه مطلوب با ضلع $s \times 20$ است. سپس این مربع به 16 مربع کوچکتر تقسیم می‌شود و در جهت زاویه انتخاب شده در مرحله قبل چرخش داده می‌شود. سپس فیلترهای ترکیبی با اندازه $s \times 2$ در دو جهت افقی و عمودی به هر مربع کوچک اعمال می‌شود سپس تمام پاسخهای حاصل اعمال فیلتر افقی در هر مربع کوچک جمع شده، یکبار نیز جمع مطلقشان حساب می‌شود همچنین همینکار برای پاسخهای فیلتر عمودی انجام می‌شود در پایان برای هر مربع کوچک 4 مولفه $\sum d1$ و $\sum d2$ و $\sum |d1|$ و $\sum |d2|$ محاسبه شده و در مجموع برای هر نقطه مطلوب که از 16 مربع کوچک تشکیل شده 64 مولفه که همان توصیفگرهای نقطه مطلوب است محاسبه می‌شود. اینکار برای همه نقاط مطلوب آشکار شده انجام میشود. قبل از

فیلترهایی که در این مرحله از آنها استفاده می‌شود عبارتند از تقریب جمع گرادیان تابع گوسین در جهت محورهای افقی و عمودی و تفریق آنها، که ازین پس در ادامه مقاله با نام فیلترهای ترکیبی استفاده می‌شوند و در شکل ۷ نیز نشان داده شده‌اند.



شکل ۷. قسمت بالا: جمع فیلترهای تقریب زده شده گرادیان گوسین در جهت افقی و عمودی. قسمت پایین: تفریق فیلترهای تقریب زده شده گرادیان گوسین در جهت افقی و عمودی. وزن نواحی مشکی -1 ، وزن نواحی سفید رنگ $+1$ ، و وزن نواحی خاکستری 0 در نظر گرفته شده. وزن فیلترهای ترکیبی با تقسیم بر 2 نرمال شده‌اند.

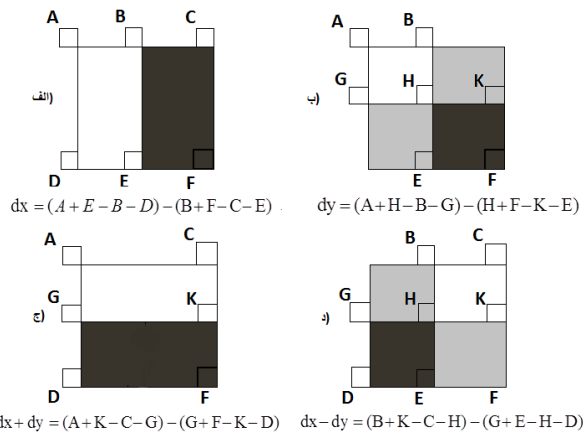
اولین مرحله در تعیین توصیفگرها، تعیین جهت برای نقاط مطلوب در یک همسایگی دایروی شکل از پیکسلهای اطراف آنهاست که در پایان یک زاویه برای هر نقطه مطلوب استخراج می‌شود سپس از یک ناحیه مربعی در اطراف نقطه مطلوب که در جهت زاویه بدست آمده چرخش داده شده برای بدست آوردن توصیفگرها استفاده میشود.

تعیین جهت برای نقاط مطلوب

برای بدست آوردن خاصیت تغییرناپذیر بودن در برابر چرخش، یک زاویه به هر نقطه مطلوب نسبت داده می‌شود که برای بدست آوردن این زاویه یک ناحیه دایروی با شعاع $s \times 6$ حول نقطه مطلوب در نظر گرفته می‌شود و فیلترهای ترکیبی به این ناحیه اعمال میشوند، s مقیاس نقطه مطلوب است که در مرحله قبل پس از درونیابی تعیین شده است همچنین پله حرکت فیلترها در این ناحیه دایروی شکل برابر s میباشد و همینطور اندازه فیلترهای ترکیبی برابر $s \times 4$ انتخاب می‌شود. برای تسریع محاسبات، برای بدست آوردن پاسخ فیلترهای ترکیبی از تصویر انتگرالی استفاده می‌شود.

بعد از اینکه پاسخ فیلترهای ترکیبی محاسبه شد و فیلتر گوسین با ابعاد $s \times 2$ و به مرکز نقطه مطلوب به پاسخها اعمال شد از هر پاسخ یک نقطه استخراج می‌شود، به اینصورت که پاسخ فیلتر ترکیبی حاصل جمع در جهت تغییرات x اندازه نقطه روی محور x ها و پاسخ فیلتر ترکیبی حاصل تفریق، اندازه نقطه روی محور y ها را می‌سازد بدین ترتیب یکسری نقطه حاصل میشود که اعمال فیلتر گوسی باعث قویتر شدن اثر پاسخهای نزدیک مرکز نقطه

اجرای الگوریتم رخ نمی‌دهد، دلیل این موضوع اینست که در محاسبه پاسخ فیلترهای الگوریتم سرف همانطور که در ۹۰ نمایان است برای محاسبه dx در مجموع دو مستطیل به کار رفته که برای محاسبه مجموع پیکسل‌های درون مستطیل با استفاده از تصویر انتگرالی سه جمع نیاز است که در مجموع برای محاسبه پاسخ فیلتر dx بر روی یک قسمت از تصویر هفت عمل حسابی نیاز است، برای محاسبه $dx+dy$ نیز به هفت عمل حسابی نیاز است این موضوع به صورت کامل در شکل ۹ به تصویر درآمده برای مقایسه محاسبه dy و $dx-dy$ این موضوع به همین ترتیب صادق است و در مجموع در تعداد اعمال حسابی مورد نیاز برای محاسبه توصیفگرها تغییری ایجاد نمی‌شود و زمان اجرایی با وجود دخیل کردن اطلاعات دقیقتر افزایش نمی‌یابد. همینطور تعداد مولفه‌های توصیفگرهای سرف و روش پیشنهادی این مقاله ۶۴ است به همین دلیل در مرحله تطبیق نیز افزایش زمان رخ نمی‌دهد که در ادامه مرحله تطبیق مفصلاً توضیح داده می‌شود.



شکل ۹. مقایسه نحوه محاسبه توصیفگر پیشنهادی و توصیفگر سرف (الف) نحوه محاسبه اعمال فیلتر dx بر روی تصویر با استفاده از تصویر انتگرالی (ب) نحوه محاسبه اعمال فیلتر dy بر روی تصویر با استفاده از تصویر انتگرالی (ج) نحوه محاسبه اعمال فیلتر $dx + dy$ بر روی تصویر با استفاده از تصویر انتگرالی (د) نحوه محاسبه اعمال فیلتر $dx - dy$ بر روی تصویر با استفاده از تصویر انتگرالی

تطبیق

هدف از مرحله تطبیق، یافتن نقاط مطلوبی در دو عکس است که با یکدیگر به درستی تطبیق دارند. و در حقیقت وقتی گفته می‌شود نقطه p در عکس اول با نقطه q در عکس دوم تطبیق دارد منظور این است که نقطه q ، نقطه متناظر نقطه p در عکس دوم است. برای اینکار ابتدا فاصله اقلیدسی میان توصیفگرهای هر نقطه مطلوب عکس اول با همه نقاط مطلوب عکس دوم محاسبه شود که در رابطه نشان داده شده است.

جمع مولفه‌ها در هر مربع کوچک یک فیلتر گوسی به مرکز نقطه مطلوب به همه پاسخها اعمال میشود، اینکار به دلیل بالا بردن مقاومت در برابر تغییرات هندسی در تصویر انجام می‌شود. بعد از اینکه توصیفگرها به طور کامل محاسبه شدند به صورت بردار - واحد نرمال میشوند که اثر تغییرات مقیاس در آنها از بین رود تا برای مقایسه با یکدیگر تحت معیار یکسانی باشند. برای یک نقطه مطلوب ۶۴ توصیفگر محاسبه می‌شود که در این توصیفگرها ۱۶ مولفه اول به نوعی بیانگر عبارت $\sum(dx + dy)$ برای ۱۶ مربع اطراف نقطه مطلوب است. فیلتر ترکیبی اول حاصل جمع گرادیان در جهت افقی و گرادیان در جهت عمودی است. ۱۶ مولفه دوم به نوعی بیانگر عبارت $\sum(dx - dy)$ برای ۱۶ مربع اطراف نقطه مطلوب است، فیلتر ترکیبی دوم حاصل تفریق گرادیان در جهت افقی و گرادیان در جهت عمودی است. ۱۶ مولفه سوم به نوعی بیانگر عبارت $\sum(|dx + dy|)$ برای ۱۶ مربع اطراف نقطه مطلوب است که در هنگام محاسبه ۱۶ مولفه اول، مجموع قدر مطلق‌های آنها نیز برای ۱۶ مولفه سوم محاسبه می‌شود و ۱۶ مولفه چهارم نیز بیانگر عبارت $\sum(|dx - dy|)$ برای ۱۶ مربع اطراف نقطه مطلوب است که در هنگام محاسبه ۱۶ مولفه دوم، مجموع قدر مطلق‌های آنها برای محاسبه ۱۶ مولفه چهارم استفاده می‌شود.

مزیت این توصیفگر پیشنهادی نسبت به توصیفگر الگوریتم سرف در این است که اگر بر حسب اتفاق دو نقطه در دو عکس مورد تطبیق، دارای تغییرات افقی یکسان یا تغییرات عمودی یکسان باشند، بنا به الگوریتم سرف دارای توصیفگرهایی با ۵۰٪ شباهت هستند در صورتیکه این دو نقطه متناظر یکدیگر نیستند، و اگر توصیفگرهای نقطه متناظر صحیح به دلیل تغییرات رخ داده در عکس دوم (چرخش، تغییر مقیاس، محو شدگی، تغییر نقطه دید و تغییر شدت روشنایی) در کل دارای مقدار کمتر از ۵۰٪ شباهت در توصیفگرها باشد، یک تناظر غلط اتفاق می‌افتد ولی هنگامی که ۱۶ مولفه اول توصیفگر به جای $\sum dx$ ، $\sum(dx + dy)$ باشد و ۱۶ مولفه دوم توصیفگر به جای $\sum dy$ ، $\sum(dx - dy)$ باشد احتمال اینکه دو نقطه در دو عکس تنها با داشتن ویژگی‌های افقی یکسان یا تنها با داشتن ویژگی‌های عمودی یکسان به عنوان نقاط متناظر شناخته شوند، بسیار کاهش می‌یابد و بدین ترتیب در توصیفگر پیشنهادی بسیاری از تناظرهای اشتباه رخ نمی‌دهد و همانطور که در فصل نتایج دیده می‌شود نرخ شناسایی افزایش می‌یابد.

نکته قابل ذکر در این موضوع اینست که توصیفگرهای پیشنهادی در حالیکه اطلاعات دقیقتری از همسایگی نقطه مطلوب در اختیار می‌گذارند، زمان اجرایی الگوریتم پیشنهادی با توصیفگرهای جدید برابر با زمان اجرایی الگوریتم سرف است و هیچ افزایشی در زمان

دقت استفاده میکنیم که در فصل نتایج و تفسیر آنها بیشتر توضیح داده می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی الگوریتم

معیار ارزیابی

نیاز است که عملکرد روش پیشنهادی با الگوریتمهای دیگر مقایسه شود که این مقایسه براساس معیارهای معتبر ارزیابی انجام می‌شود، که در ادامه به تعریف هر یک از آنها پرداخته می‌شود ولی قبل از آن نیاز است که توضیحاتی راجع به چگونگی صحیح دانستن یک تطابق داده شود.

در پایگاه اطلاعاتی استفاده شده برای هر دنباله پنج ماتریس هوموگرافی^{۳۰} نیز داده شده، ماتریس هوموگرافی در حقیقت یک ماتریس سه در سه است که پل ارتباطی میان عکس اول و عکس های دیگر دنباله است و از رابطه ۵۰ پیروی میکند [20].

(۵)

$$p_a = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix}, p'_b = \begin{bmatrix} \omega'x_b \\ \omega'y_b \\ \omega' \end{bmatrix}, H_{ab} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

$$p'_b = H_{ab}p_a$$

$$p_b = \frac{p'_b}{\omega'} = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix}$$

در این رابطه $p = (x_a, y_a)$ معرف یک نقطه از عکس اول است و $p' = (x_b, y_b)$ معرف نقطه متناظر p در عکس دوم است که رابطه ۵ میان آنها برقرار است. ماتریس هوموگرافی با محاسبات خاصی در آزمایشی که دو عکس توسط دو دوربین تهیه شده و اطلاعات زاویه چرخش دوربینها و فاصله آنها از هم و از صحنه بدست می‌آید که این ماتریس برای هر کدام از عکسهای دنباله ها با عکس اول در پایگاه داده به عنوان اطلاعات مرجع^{۳۱} در دسترس است.

حال در معیارهای ارزیابی، اولین مرحله این است که مستقل از مرحله دوم و سوم الگوریتم مورد استفاده، با استفاده از ماتریس هوموگرافی دو عکس مورد تطبیق، نقاط متناظر با نقاط مطلوب عکس اول در عکس دوم محاسبه شود و با نقاط مطلوب عکس دوم مقایسه شود و با استفاده از معیاری که میکولایچزیک [21] برای نتایج صحیح ارزیابی بدست آورده اگر میان نقطه p' که نقطه متناظر نقطه p در عکس دوم است و یکی از نقاط مطلوب یافت شده توسط قسمت اول الگوریتم در عکس دوم کمتر از سه پیکسل فاصله شعاعی باشد آنگاه آن نقطه یک تناظر معتبر حساب می‌شود. حالت ایده آل حالتی است که الگوریتم بتواند تمام تناظرهای

$$equilidian_distance = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-z} (Des_a - Des_i)^2} \quad (۵)$$

که در این رابطه:

Des_a معرف توصیفگرهای نقطه مطلوب a از عکس اول است.

Des_i معرف توصیفگرهای تمام نقاط مطلوب عکس دوم است و z تعداد نقاط مطلوب مطلوب عکس دوم است.

بدین ترتیب برای هر نقطه از نقاط مطلوب عکس اول یک لیست از فواصل اقلیدسی آن نقطه با تک تک نقاط مطلوب عکس دوم بدست می‌آید سپس این لیست به ترتیب از کوچک به بزرگ مرتب میشود.

در ادامه کار معمولاً از دو روش استفاده می‌شود:

روش اول: این روش که روش کمترین فاصله نامیده میشود بدین ترتیب است که اولین نقطه بدست آمده مربوط به عکس دوم در لیست هر نقطه مطلوب در عکس اول را به عنوان تطبیق برای هر نقطه مطلوب از عکس اول در نظر میگیرد، در حقیقت کوچکترین فاصله اقلیدسی میان توصیفگرهای دو نقطه از عکس اول و دوم معیار اصلی شباهت آنها در نظر گرفته می‌شود و یک حد آستانه نیز تعریف میشود که این کوچکترین فاصله اقلیدسی باید از آن حد آستانه کوچکتر باشد، زیرا در این میان ممکن است بر اثر تغییرات چرخش و تغییر مقیاس نقاطی در هر دو عکس وجود داشته باشند که همتایشان در عکس دیگر موجود نباشد و این نقاط احتمال وقوع تطابقهای غلط را افزایش میدهند و وجود مقدار حد آستانه به منظور کنترل نسبی تطابقها صورت میگیرد.

روش دوم: این روش با دو عدد اول لیست منتخب مربوط به هر نقطه مطلوب عکس اول کار می‌کند درحقیقت توصیفگرهای هر نقطه مطلوب از عکس اول با دو نقطه از نقاط مطلوب عکس دوم که به ترتیب کمترین فاصله اقلیدسی میانشان برقرار است مقایسه می‌شوند. که اگر نسبت این دو فاصله کمتر از ۰/۷۰ بود نقطه مورد نظر از عکس اول با اولین نقطه لیست خود تطبیق صحیح دارد و اگر بیشتر از این مقدار بود رد می‌شود، البته این مقدار آستانه به صورت کیفی برای بدست آوردن نمودار میله‌ای نرخ شناسایی بکار برده شده و در نمودار شناسایی-دقت این مقدار آستانه از ۰/۱ تا ۱ به صورت متغیر است تا نتایج الگوریتم مستقل از مقدار آستانه به نمایش در بیاید. بدین ترتیب برای اکثر نقاط مطلوب عکس اول یک تطبیق یافت میشود همچنین در بعضی موارد، دو نقطه از عکس اول با یک نقطه از عکس دوم منطبق می‌شوند که در این حالت نیز تطبیق با فاصله اقلیدسی کمتر، تطبیق درست شناخته میشود و تطبیق بعدی حذف می‌شود. در اینجا کار الگوریتم تمام شده حال برای دریافتن اینکه که تا چه حد نتایج کار صحیح است از اطلاعات مرجع موجود در پایگاه داده دانشگاه آکسفورد^{۲۹} و همچنین معیارهای ارزیابی نرخ شناسایی و شاخص

عبارتند از دنباله قایق^{۳۷} و دنباله تنه درخت^{۳۸} که دستخوش تغییرات مقیاس و چرخش^{۳۹} شده، دنباله دیوار^{۴۰} که نقطه دید^{۴۱} در آن متغیر است، دنباله دوچرخه^{۴۲} و دنباله درختها^{۴۳} که تغییر محوشدگی روی آن اعمال شده.

الگوریتم پیشنهادی در نرم افزار متلب شبیه سازی شده و در نهایت پس از اتمام مرحله تطبیق، نقاطی که به عنوان دو نقطه متناظر در دو عکس شناخته شده اند با یک خط به یکدیگر وصل می-شوند. طبیعتاً در دنباله هایی که عمل چرخش جزء تغییرات انجام گرفته نیست، خطوطی که نقاط متناظر را به یکدیگر وصل می-کنند با یکدیگر موازی هستند، بدیهی است که اگر میان این خطوط یک خط مورب دیده شود، دو نقطه ابتدایی و انتهایی آن خط، به اشتباه نقاط متناظر شناخته شده اند. همچنین وقتی چرخش نیز جزو تغییرات عکسهای دنباله است دیگر خطوط تطبیق موازی نیستند.

در ادامه، در ابتدا ارزیابی نمودارهای میله ای مربوط به شاخص "نرخ شناسایی"^{۴۴} در مقایسه با الگوریتم سرف آورده شده است که در نمودارهای میله ای نسبت نزدیکترین همسایه در مرحله تطبیق برابر 0.7 در نظر گرفته شده است و پس از آن نمودار فراخوانی-دقت مربوط به دنباله ها برای الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف به نمایش درآمده است که در این نمودارها نسبت نزدیکترین همسایه در مرحله تطبیق در بازه ۱-۰،۱ متغیر است.

مقایسه عکس ۱ با ۵ عکس دیگر دنباله ها در نمودار میله ای نمایان است. عکس شماره ۱ تا ۶ مربوط به پایگاه داده دانشگاه آکسفورد است که در این مقاله به عنوان پایگاه داده اصلی مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج مقایسه های انجام شده در این نمودارها به وضوح دیده می-شود، همانطور که مشاهده می شود میله های با رنگ تیره مربوط به الگوریتم پیشنهادی و میله های با رنگ روشن مربوط به الگوریتم معروف سرف است. همانطور که بیان شد الگوریتم سرف از بهترین و بهینه ترین الگوریتم های موجود برای تطبیق تصاویر می-باشد. الگوریتم پیشنهادی برای مقایسه تصویر ۱ با تصویر ۲ در میله اول که با شماره ۱۲ در محور افقی متمایز شده است مقایسه را میان الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف بخوبی نشان می-دهد. بدین ترتیب مشاهده می شود که الگوریتم پیشنهادی رفتار کلی الگوریتم سرف را پیروی می کند و علاوه بر آن، آنرا بهبود داده است که این موضوع در مقدار شاخص نرخ شناسایی مشاهده می-شود.

معتبر را پیدا کند ولی معمولاً این اتفاق نمی افتد که الگوریتم های مختلف بر حسب درصد تطابقهای صحیحی که پیدا میکنند ارزیابی می شوند.

حاصل مقایسه نتایج الگوریتم با نتایج اطلاعات مرجع، نقاط را به چهار دسته تقسیم می کند:

۱- تطبیقهایی که به درستی صحیح شناخته شده اند که TP^{۳۲} نامیده می شوند.

۲- تطبیقهایی که به غلط، صحیح شناخته شده اند که FP^{۳۳} نامیده می شوند.

۳- تطبیقهایی که به درستی، غلط شناخته شده اند که TN^{۳۴} نامیده می شوند.

۴- تطبیقهایی که به غلط، غلط شناخته شده اند که FN^{۳۵} نامیده می شوند.

که نتایج الگوریتم عبارتند از:

$$(6) \quad TP + FP: \text{ نتایج تطبیقهای الگوریتم}$$

$$(7) \quad TP + FN: \text{ اطلاعات مرجع}$$

• شاخص دقت

شاخص دقت در توصیفگرها عبارتند از نسبت تطابقهای درست یافت شده توسط توصیفگر به تعداد تطابقهایی که از نظر الگوریتم صحیح هستند.

$$(8) \quad \text{دقت: } TP / (TP + FP)$$

• شاخص نرخ شناسایی

شاخص نرخ شناسایی یا شاخص فراخوانی^{۳۶} عبارتند از نسبت تطابقهای درست که توسط توصیفگر یافت شده اند به کل تطابقهای موجود در دو عکس که از اطلاعات مرجع بدست آمده است.

$$(9) \quad TP / TP + FN$$

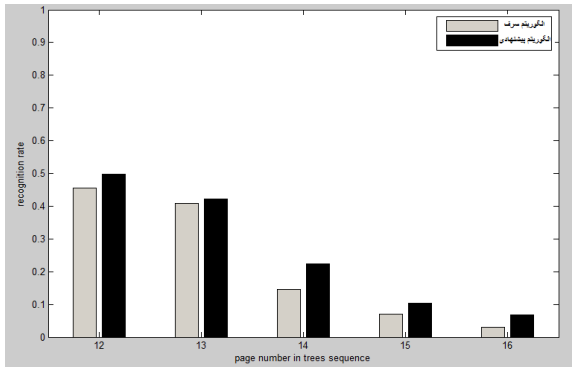
• شاخص فراخوانی

معمولاً در اینگونه الگوریتمها دونوع نمودار برای ارزیابی عملکرد الگوریتم رسم می شود. یکی نمودار میله ای نرخ شناسایی با آستانه ثابت برای نسبت نزدیکترین همسایه در مرحله تطبیق و دیگری نمودار نقطه به نقطه نرخ شناسایی بر حسب (دقت - ۱)، که بر اساس تغییر مقدار آستانه برای نسبت نزدیکترین همسایه در مرحله تطبیق بدست می آید، [22,23] که به بررسی این نمودارها برای الگوریتم پیشنهادی در ادامه می پردازیم.

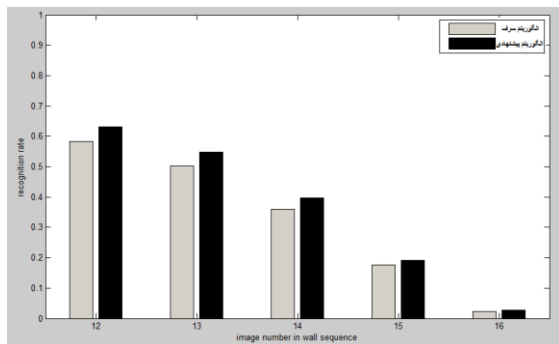
در پایگاه داده استفاده شده در این مقاله، از ۵ دنباله عکس که هر دنباله شامل ۶ عکس می باشد استفاده شده است، این دنباله ها

37Boat Sequence
38Bark Sequence
39Zoom & Rotation
40Wall
41Viewpoint
42Bike Sequence
43Trees Sequence
44Recognition Rate

32True Positive
33False Positive
34True Negative
35False Negative
36Recall

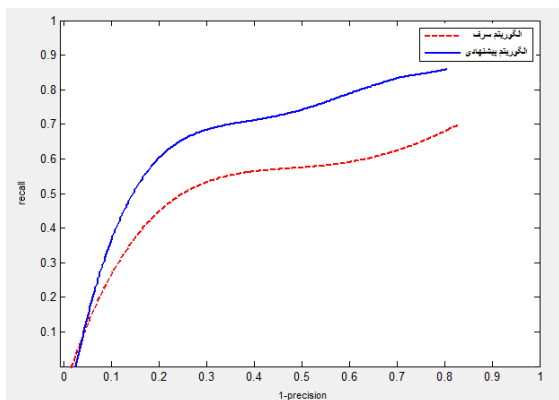


شکل ۱۳. مقایسه نرخ شناسایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم سرف در دنباله درختها



شکل ۱۴. مقایسه نرخ شناسایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم سرف در دنباله دیوار

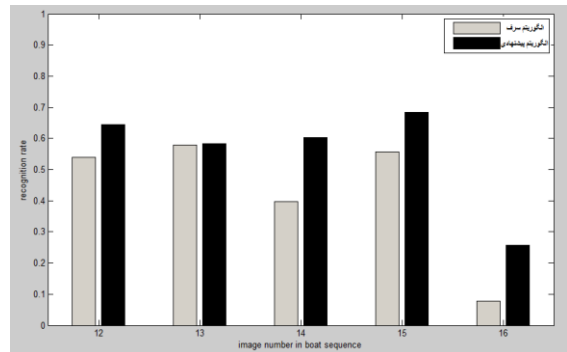
در ادامه نمودار نقطه به نقطه نرخ شناسایی یا همان فراخوانی بر حسب (دقت - ۱) رسم شده. لازم به ذکر است در این نمودار مقدار آستانه مربوط به روش نسبت نزدیکترین همسایه در مرحله تطبیق در بازه $[0, 1]$ متغیر است.



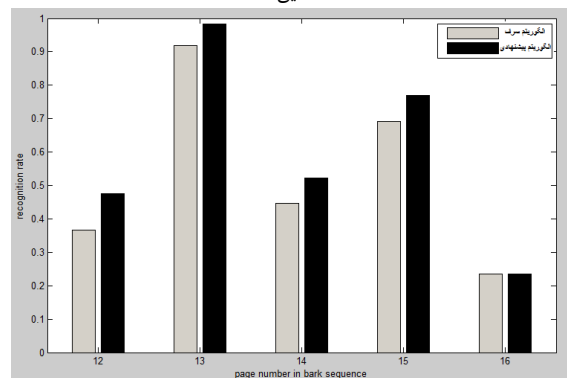
شکل ۱۵. نمودار ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف برای میانگین نتایج ۶ عکس دنباله قایق

همانطور که بیان گردید میزان شاخص نرخ شناسایی الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم سرف بالاتر است و این موضوع در مقایسه تصویر اول با تصاویر سوم تا ششم نیز انجام گرفته است. پیروی کردن از الگوریتم سرف و بهبود آن در میله‌های شماره ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ مشخص می‌باشد.

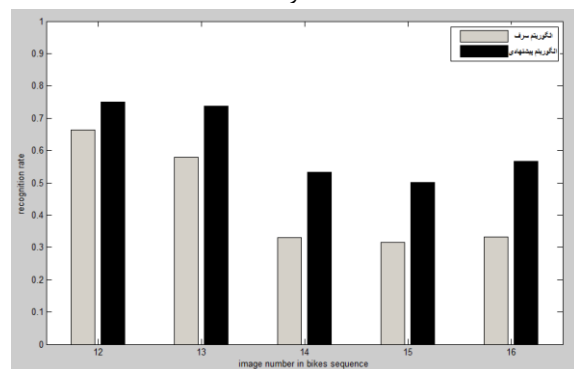
بنابراین بهبود روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم سرف به وضوح در نمودارهای میله‌ای مقایسه‌ای مشخص شده است.



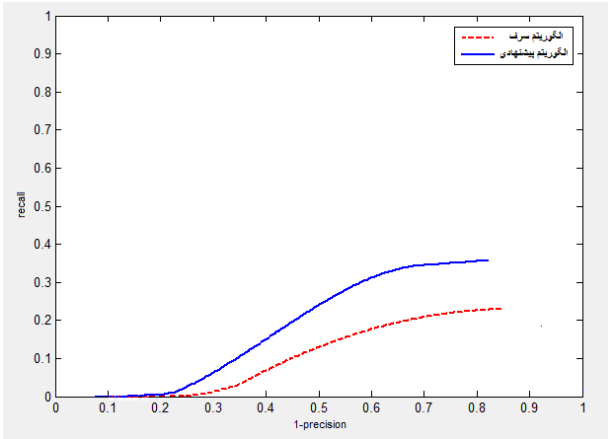
شکل ۱۰. مقایسه نرخ شناسایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم سرف در دنباله قایق.



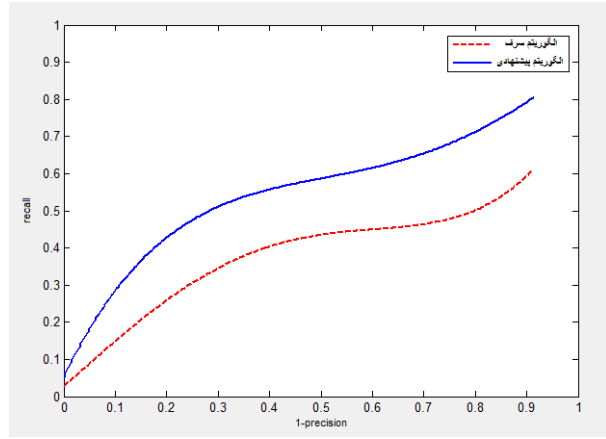
شکل ۱۱. مقایسه نرخ شناسایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم سرف در دنباله تنه درخت



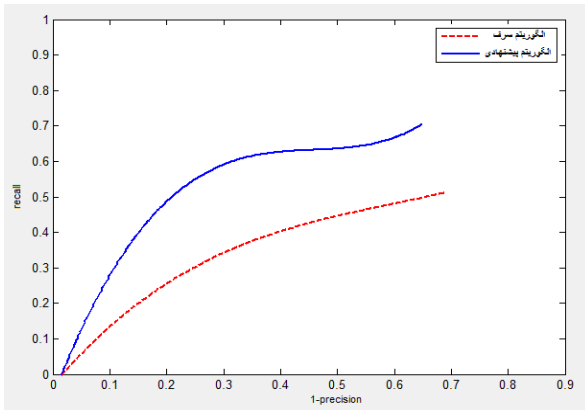
شکل ۱۲. مقایسه نرخ شناسایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم سرف در دنباله دوچرخه.



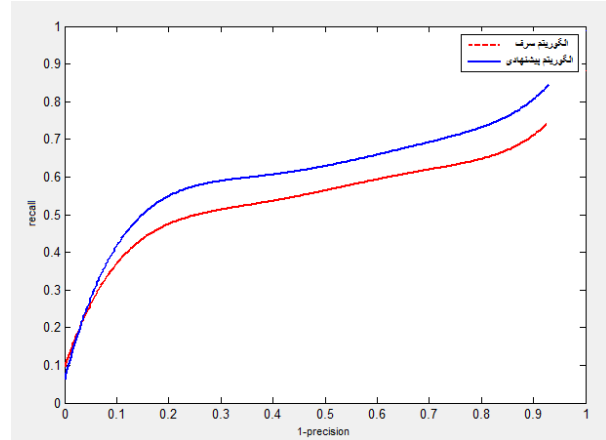
شکل ۱۸. نمودار ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف برای عکس اول و چهارم دنباله درختها



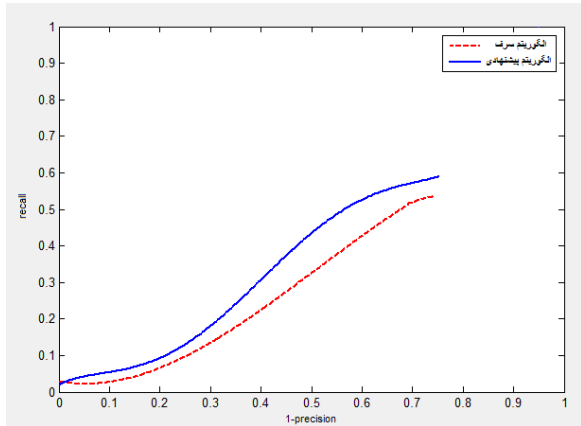
شکل ۱۶. نمودار ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف برای عکس اول و چهارم دنباله قایق



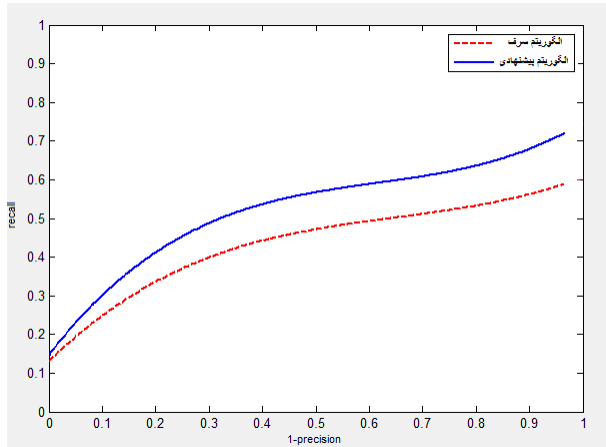
شکل ۱۹. نمودار ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف برای عکس اول و چهارم دنباله دوچرخه.



شکل ۱۶. نمودار ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف برای میانگین نتایج ۶ عکس دنباله تنه درخت



شکل ۲۰. نمودار ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف برای عکس اول و سوم دنباله دیوار.



شکل ۱۷. نمودار ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم سرف برای عکس اول و چهارم دنباله تنه درخت

نتیجه گیری

تشخیص اشیاء مختلف با استفاده از روشهای مبتنی بر ویژگی‌های محلی و توصیفگرها در سالهای اخیر رشد چشمگیری داشته و امیدهای زیادی را در زمینه بینایی ماشین برای داشتن سیستم‌های قدرتمند و با تواناییهای گسترده و متمایز ایجاد کرده است و

تغییرات در عکس، برای هر تغییر (چرخش و تغییر مقیاس، محو شدگی، تغییر نقطه دید) الگوریتم بر روی دو دنباله اعمال شده، تا نتایج حاصله وابسته به نوع عکس و زمینه و اشیاء موجود در عکس نباشد.

دو نوع نمودار میله‌ای و نقطه به نقطه برای نمایش عملکرد الگوریتم پیشنهادی در بخش نتایج استفاده شده که در هر مورد نتایج الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم سرف مقایسه شده است. برای مرحله تطبیق توصیفگرها از روش نسبت نزدیکترین همسایه استفاده شده و به همین دلیل مرحله ارزیابی در نمودار میله‌ای برای یک عدد ثابت برای آستانه نسبت نزدیکترین همسایه رسم شده و در نمودار نقطه به نقطه این آستانه متغیر در نظر گرفته شده و شاخص نرخ شناسایی بر حسب شاخص دقت به نمایش درآمده است که الگوریتم پیشنهادی در هر دو روش ارزیابی برای تمام عکسها دارای بهبود عملکرد به نسبت الگوریتم سرف بوده است.

مرجع‌ها

- [1] C. Harris and M. Stephens. A combined corner and edge detector. In Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988, pages 147 – 151.
- [2] T. Lindeberg. Feature detection with automatic scale selection. IJCV 1998, 30(2):79 - 116.
- [3] D. Lowe. Object recognition from local scale-invariant features. In ICCV, 1999.
- [4] K. Mikolajczyk and C. Schmid. Indexing based on scale invariant interest points. In ICCV, 2001, volume 1, pages 525 - 531.
- [5] T. Kadir and M. Brady. Scale, saliency and image description. IJCV 2001, 45(2):83 - 105.
- [6] F. Jurie and C. Schmid. Scale-invariant shape features for recognition of object categories. In CVPR, 2004, volume II, pages 90 - 96.
- [7] K. Mikolajczyk and C. Schmid. Scale and affine invariant interest point detectors. IJCV, 2004, 60(1): 63- 86.
- [8] L. M. J. Florack, B. M. ter Haar Romeny, J. J. Koenderink, and M. A. Viergever. General intensity transformations and differential invariants. JMI, 1994, 4(2):171-187.
- [9] G. Carneiro and A.D. Jepson. Multi-scale phase-based local features. In CVPR, 2003 (1), pages 736 - 743.
- [10] D. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints, cascade filtering approach. IJCV 2004, 60(2):91 - 110, January.
- [11] K. Mikolajczyk and C. Schmid. A performance evaluation of local descriptors. PAMI, 2005, 27(10):1615-1630.
- [12] Y. Ke and R. Sukthankar. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors. In CVPR 2004 (2), pages 506 - 513.
- [13] K. Mikolajczyk and C. Schmid. A performance evaluation of local descriptors. PAMI, 2005, 27(10):1615-1630.
- [14] M. Grabner, H. Grabner, and H. Bischof. Fast approximated sift. In ACCV (1), 2006, pages 918-927.

با توجه به اینکه سیستم بینایی حساس به ویژگی‌ها و خصوصیات محلی است، ابداع الگوریتمهایی که بر پایه ویژگی‌های محلی هستند امید دانشمندان را برای داشتن سیستمهایی با قابلیت‌های مشابه سیستمهای بینایی بیولوژیکی در سالهای نه چندان دور بیشتر و بیشتر کرده است.

برای الگوریتمهایی که در این زمینه ابداع شده‌اند مقاوم بودن در برابر تغییراتی از جمله چرخش، تغییر مقیاس و محو شدگی در تصویر امری اساسی است، زیرا در موقعیت‌های واقعی فیلم برداری و عکس برداری که در محیط باز و محیط‌های غیر آزمایشگاهی انجام میگیرد، اینگونه تغییرات در عکسهای گرفته شده یا فریمهای متوالی فیلم اجتناب ناپذیر است و الگوریتمی مطلوب به شمار می‌رود که توانایی مقاوم بودن در برابر درصد زیادی از این تغییرات را دارا باشد. الگوریتمهای سرف و سرف از مشهورترین الگوریتمهای بر پایه ویژگی‌های محلی هستند که الگوریتم سرف به دلیل سرعت بهتر برای کاربردهای بلادرنگ مناسبتر است. برتری الگوریتم سرف از نظر زمان اجرایی به دلیل استفاده از تکنیک تصویر انتگرالی است که با استفاده از آن مجموع پیکسلهای درون یک مستطیل با اندازه دلخواه تنها طی سه جمع انجام می‌پذیرد. هدف این مقاله بهبود عملکرد الگوریتم سرف بوده است که با تغییراتی که در روش به دست آوردن توصیفگرها اعمال شده، بهبود عملکرد به صورت مطلوب حاصل شده است به صورتیکه که این برتری در تمام عکسهای پایگاه داده استفاده شده، نمایان است.

تغییرات ایجاد شده در توصیفگر به گونه‌ایست که هر جزء ماتریس ۶۴ تایی توصیفگر را وابسته به ترکیبی از گردایانهای جهتی میکند، به این ترتیب بسیاری از تطابقهای اشتباهی که در الگوریتم سرف به دلیل شباهت تنها یک گردایان جهتی در توصیفگر سرف به دست می‌آمد در این روش اتفاق نمی‌افتند ولی اگر استفاده از ترکیب ویژگیهای گردایان جهتی وابسته به پارامترهای زیادی باشد، اختلاف توصیفگرهای نقاط نامتشابه با یکدیگر کم شده و به جای بهبود عملکرد، خاصیت تمایز در توصیفگرها کاهش یافته و تعداد تطابقهای اشتباه بیشتر میگردد، بنابراین استفاده از این ترکیب خصوصیات باید به گونه‌ای انجام شود که هم از نتایج چندگانه گردایانها استفاده شود و هم خصوصیت تمایز توصیفگرها حفظ شود.

در تمام کارهایی که تا بحال در این زمینه انجام شده بهبود عملکرد در ازای افزایش قابل توجه زمان اجرایی صورت گرفته در حالیکه در روش پیشنهادی در همه موارد عکسهای پایگاه داده بهبود نرخ شناسایی با زمان اجرایی برابر با زمان اجرایی الگوریتم سرف، صورت گرفته که شرایط قابل رقابتی با الگوریتمهای همتای خود را دارد.

برای ارزیابی این الگوریتم از دنباله‌های تصاویر پایگاه داده دانشگاه آکسفرده استفاده شده که برای آزمایش مقاوم بودن در برابر

- [20]M. Calonder, V. Lepetit, C. Strecha, and P. Fua. BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features. In Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV), 2010.
- [21]K. Mikolajczyk and C. Schmid. A performance evaluation of local descriptors. In CVPR, June 2003, volume 2, pages 257 - 263.
- [22]Miksik,O. Mikolajczyk, K. Evaluation of local detectors and descriptors for feature matching 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2012 .
- [23]Richard Szeliski, “Computer Vision: Algorithms and Applications” ,Series: Texts in Computer Science,Hardcover: 833 pages ,Publisher: Springer; 2011 edition (October 19, 2010) .
- [15]H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. V. Gool. SURF:Speeded up robust features. Computer Vision and Image Understanding(CVIU), 2008, 110(3):346–359.
- [16]P.A. Viola and M.J. Jones. Rapid object detection using boosted cascade of simple features. In CVPR (1), 2001, pages 511 –518.
- [17]S. Leutenegger, M. Chli, and R. Siegwart. Brisk: Binaryrobust invariant scalable keypoints. 2011.
- [18]M. Calonder, V. Lepetit, C. Strecha, and P. Fua. BRIEF:Binary Robust Independent Elementary Features. In Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV), 2010.
- [19]Alahi, A. ; Ortiz, R. ; Vandergheynst, P.FREAK: Fast Retina KeypointIEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012.