

تطابق استریوی متراکم دقیق و سریع با استفاده از Census سه حالتی برای محاسبه هزینه‌های انطباق و پنجره‌ی صلیبی تطبیقی برای تجمیع هزینه‌ها

حسین بلانی^۱ و علی محمد فتوحی^۲

چکیده

دو روش رایج برای تجمیع هزینه در روش‌های محلی تطبیق استریو، روش پنجره‌ی صلیبی و روش پنجره‌ی تطبیقی وزن‌دار می‌باشد. روش پنجره‌ی تطبیقی وزن‌دار برای تعیین وزن‌ها نیاز به انجام محاسبات پیچیده‌ای دارد و بنابراین مزیت اصلی روش‌های محلی یعنی سرعت بالای آن را منتفی می‌سازد. روش پنجره‌ی صلیبی نسبت به روش پنجره‌ی وزن‌دار تطبیقی سریع‌تر است زیرا تعریف وزن‌ها از روابط ریاضی پیچیده لازم نیست، اما دقت آن کم‌تر از روش پنجره‌ی وزن‌دار تطبیقی است. در پژوهش‌هایی که از روش پنجره‌ی تطبیقی صلیبی استفاده می‌کنند برای محاسبه‌ی هزینه از روش‌هایی نظیر قدر مطلق تفاضل شدت رنگ یا تبدیل Census معمولی استفاده می‌شود، که دقت آن به خوبی روش پنجره‌ی وزن‌دار تطبیقی نیست. در این مقاله برای محاسبه‌ی هزینه‌ها از روش Census سه‌حالتی استفاده می‌شود. این روش در کنار دو روش دیگر قدر مطلق تفاضل شدت رنگ و قدر مطلق تفاضل گرادیان به همراه تجمیع هزینه‌ی صلیبی استفاده می‌شود که سبب دستیابی به دقت خوب در کنار سرعت عملکرد مطلوب می‌شود. بررسی نتایج تجربی بر روی مجموعه‌ی داده‌ی استاندارد Middlebury تاییدکننده‌ی عملکرد مطلوب روش پیشنهادی از نظر دقت و سرعت اجرا است.

کلید واژه‌ها

تطابق استریو، نقشه متراکم جابجایی مکانی، تبدیل Census، پنجره صلیبی.

۱- مقدمه

بینایی استریو یکی از رایج‌ترین مباحث در کاربردهایی نظیر بینایی ربات‌ها، تحلیل تصاویر جغرافیایی، و واقعیت مجازی می‌باشد. روش‌های تطابق استریو در بینایی استریو به دو دسته‌ی سراسری و محلی تقسیم می‌شوند [۱، ۲].

روش‌های سراسری از جمله برش گراف و روش انتشار باور، که برای بهینه‌سازی یک تابع هزینه در محدوده هر سطر یا کل تصویر تلاش می‌کنند، غالباً منجر به نتایج بهتری نسبت به روش‌های محلی می‌شوند، ولی دارای محاسبات پیچیده و زمان‌بر هستند [۲]. در روش‌های محلی، هزینه‌ی انطباق هر پیکسل از یک تصویر با تمام پیکسل‌های کاندید در تصویر دیگر که می‌توانند مثلاً با قید حداقل-حداکثر جابجایی مکانی یا قید epipolar محدود شوند، محاسبه می‌شود. فرآیند انتخاب در روش‌های محلی به سادگی کاندیدی که دارای کمترین هزینه‌ی انطباق است را به عنوان پیکسل منطبق بر می‌گزیند. مقایسه‌ی C شدت روشنایی یا رنگ پیکسل به پیکسل برای تعیین d از رابطه‌ی (۱) به دلیل محدود بودن تعداد سطوح روشنایی، تفاوت مشخصات دو دوربین، و تفاوت انعکاس روشنایی یک نقطه از فضا در دو تصویر به دلایلی مانند

این مقاله در شهریورماه ۱۴۰۳ دریافت شد؛ در آذرماه بازنگری و سپس پذیرفته گردید.

^۱ دانش‌آموخته‌ی مهندسی برق، دانشگاه تفرش.

رایانامه: hosseinbalani6@gmail.com

^۲ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش.

رایانامه: fotouhi@tafreshu.ac.ir

نویسنده مسئول: علی محمد فتوحی

شود [۸]. روش‌های پیشنهاد شده در مراجع را می‌توان به سه گروه پنجره‌ی تطبیقی، چندپنجره‌ای و پنجره‌ی وزن‌دار دسته‌بندی کرد. در برخی از مراجع، ایده‌ی پنجره‌ی تطبیقی برای استفاده از پنجره‌ی بزرگتر، ضمن رعایت شرط DCWP مطرح شده است [۹-۱۱]، اما جابه‌جایی مکانی محصول نهایی تطابق در بینایی استریو است، بنابراین در این روش‌ها با تخمین اولیه‌ی جابه‌جایی مکانی و روش‌های تکراری سعی می‌کنند اندازه و شکل پنجره‌ی بهینه را در هر پیکسل به دست آورند. در [۹]، یک گراف جهت‌دار اطراف نقطه‌ی مورد نظر P در نظر گرفته می‌شود. یک تابع هزینه که متناسب با میانگین خطای شدت روش‌های تطابق نقاط متناظر پنجره‌ها و عکس اندازه‌ی پنجره است تعریف می‌شود. یک حلقه‌ی بسته از لبه‌های جهت‌دار گراف می‌تواند یک پنجره‌ی با شکل دلخواه اطراف نقطه‌ی P تشکیل دهد. با الگوریتم MRC^۲ در گراف اطراف نقطه‌ی P، پنجره‌ای که دارای کم‌ترین مقدار هزینه است انتخاب می‌شود.

در روش چندپنجره‌ای از یک تعداد پنجره شیفت داده شده [۱۴] یا یک پنجره‌ی میانی با هشت پنجره‌ی جانبی [۱۵]، استفاده شده است.

در روش پنجره‌ی وزن‌دار، در یک فضای پنجره‌ای مشخص، وزن‌های مناسبی به پیکسل‌های داخل پنجره نسبت داده می‌شود. ایده‌ی اصلی این روش‌ها آن است که به پیکسل‌هایی از پنجره که با احتمال بیشتری دارای جابه‌جایی مکانی برابر با پیکسل مرکزی هستند، وزن بزرگ‌تری نسبت داده شود. روش ارائه شده در [۱۷] بر مبنای شباهت رنگی و میزان مجاورت پیکسل‌های پنجره به پیکسل مرکزی، وزن‌های پنجره را مشخص می‌کند. در روش ارائه شده در [۱۸] تطابق استریو بر پایه‌ی وزن‌دهی geodesic استوار است، و وزن هر پیکسل با کوتاه‌ترین فاصله آن پیکسل تا پیکسل مرکزی پنجره نسبت معکوس دارد. این فاصله بر مبنای شباهت رنگی تعریف می‌شود و لذا پیکسل‌هایی که متعلق به سطوح متفاوت با رنگ متفاوت و در نتیجه به احتمال زیاد با عمق متفاوت هستند فاصله بزرگ‌تری دارند و بنابراین وزن کمتری در پنجره خواهند داشت.

در روش‌های پنجره‌ی تطبیقی و چندپنجره‌ای شکل پنجره‌ها محدود به مستطیلی شده است، که در مجاورت مرزهای تغییر عمق پیچیده، کافی نیست و نمی‌تواند از تغییر عمق در داخل پنجره جلوگیری کند. همچنین در این روش‌ها به دلیل استفاده از الگوریتم‌های تکراری و در روش‌های پنجره‌ای وزن‌دار برای تولید و ذخیره‌سازی وزن‌ها هزینه‌ی محاسباتی و حافظه‌ی بالا مورد نیاز است که مزیت اصلی روش‌های محلی را نقض می‌کند و آنها را به روش‌های سراسری نزدیک می‌کند.

در [۶] روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی پیشنهاد شده است. ابتدا برای پیکسل موردنظر یک صلیب محلی با چهار بازوی دارای طول

مشاهده از دو موضع مختلف و سایه، منجر به نتایج مطلوبی نخواهد شد، لذا از اطلاعات روش‌شنایی اطراف پیکسل در تصویر چپ در ناحیه‌ی پنجره‌ای W_i حول پیکسل p_i و در تصویر راستو در ناحیه‌ی پنجره‌ای W_{r,d_i} حول پیکسل p_{r,d_i} ، نیز برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق و تعیین جابه‌جایی مکانی d پیکسل p_i طبق رابطه‌ی (۲)، استفاده می‌شود [۱۱].

$$d = \min_{d_i} (C(p_i) - C(p_{r,d_i})) \quad (1)$$

$$d = \min_{d_i} (\sum_{W_i, W_{r,d_i}} (C(p_i) - C(p_{r,d_i}))) \quad (2)$$

فرض مهم در رابطه‌ی (۲) که در [۱] با عنوان قید سازگاری جابه‌جایی مکانی پیکسل‌ها در داخل پنجره (DCWP) مورد توجه قرار گرفته است، آن است که برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق متناظر با یک جابه‌جایی مکانی کاندید d_i تمام پیکسل‌های داخل پنجره‌ی تصویر چپ، دارای همان جابه‌جایی مکانی یا عمق هستند و لذا در پنجره‌ی متناظر در تصویر راست موجود می‌باشند. اما این فرض در مجاورت ناپیوستگی‌های عمق و انسداد یافته و در صورت هم-پوشانی پنجره با این نواحی چه در تصویر چپ و چه در تصویر راست، نقض می‌شود و لذا هزینه‌ی انطباق محاسبه شده نیز قابل استناد و استفاده نیست و در صورت استفاده منجر به نتایج صحیح نخواهد شد. لذا روش‌های محلی با آنکه دارای محاسبات ساده‌تری می‌باشند، برای رسیدن به نتایج مطلوب، چالش‌های بیشتری برای تعریف تابع هزینه یا معیار شباهت دقیق و تعریف پنجره‌ی تجمیع هزینه دارند. برای بهبود نتایج، روش‌هایی مانند پنجره‌ی تطبیقی، چندپنجره‌ای، و پنجره‌ی وزن‌دار پیشنهاد شده‌اند که تلاش شده است در قبال عملیات ریاضی پیچیده، با تغییر اندازه و شکل پنجره، یا تغییر وزن پیکسل‌های داخل پنجره، پیکسل‌های مربوط به یک عمق در محاسبه‌ی هزینه‌ی تطابق مشارکت داده‌شوند [۱].

در این مقاله روش جدید پنجره‌ای برای پیشنهاد شده است که ضمن دارا بودن دقت لازم، هزینه‌ی محاسباتی قابل قبولی دارد. در ادامه‌ی مقاله در بخش ۲ به مرور کارهای پیشین در زمینه‌ی تحقیق پرداخته می‌شود. در بخش ۳ روش پیشنهادی بررسی می‌گردد. بخش ۴ به ارائه‌ی نتایج تجربی و بخش ۵ به نتیجه‌گیری مطالب اختصاص یافته است.

۲- مرور کارهای پیشین

در روش تطابق پنجره‌ای، در نواحی بدون بافت یا دارای بافت کم و بدون تغییر عمق، اندازه‌ی پنجره باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا پیکسل‌های بیش‌تری را جهت حصول نسبت سیگنال به نویز بالا، قدرت تمایز بیشتر و در نتیجه انطباق مطمئن‌تر در بر گیرد. از طرفی ابعاد پنجره در مجاورت ناپیوستگی‌های عمق، به منظور رعایت شرط DCWP، باید به اندازه‌ی کافی کوچک اختیار

- گام چهارم پالایش نقشه‌ی جابه‌جایی مکانیه منظور بهبود آن است که در این مرحله از شش تکنیک پس پردازش "کشف پیکسل‌های دارای عمق اشتباه" (شامل روش LRCC)، "رای‌گیری عمق پیکسل‌های ناحیه به صورت تکراری"، "درون‌یابی عمق مناسب"، "تطبیق نواحی با عمق ناپیوسته"، "بهبود عمق پیکسل‌ها" و "فیلتر میانه"، استفاده می‌شود.



شکل (۱): بلوک دیاگرام کلی روش پیشنهادی

۳-۱- محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل

روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل پیشنهاد شده است. یک روش موفق در [۱۲] از ترکیب هزینه‌های AD و Census در یک پنجره‌ی مربعی برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق استفاده کرده است. در نواحی بدون بافت، روش AD در یافتن تناظر بین نواحی دچار خطای زیادی می‌گردد و روش Census نیز در نواحی بدون بافت و دارای نویز دچار خطا می‌شود. از آنجا که انواع هزینه انطباق پیکسل به پیکسل در نواحی مختلف تصویر رفتارهای متفاوتی دارند، برای رسیدن به نتایج مطلوب در روش پیشنهادی در این مقاله، مانند آنچه در [۳۰] پیشنهاد شده است، برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل از ترکیب سه روش AD، Census و GD سه حالت استفاده می‌شود. در روش Census سه حالت از یک بافر نویز استفاده می‌شود که آن را در برابر نویز، مقاوم‌تر می‌کند. در این تبدیل شدت رنگ پیکسل مرکزی پنجره با شدت رنگ پیکسل‌های اطراف آن مقایسه شده و حاصل هر مقایسه، عدد ۰ یا ۱ است. حاصل این مقایسه‌ها در کنار هم قرار می‌گیرند و یک رشته باینری تولید می‌شود. برای بهبود نتایج این تبدیل، باید اطلاعات بیشتری درون پنجره قرار داشته باشد تا تمایز بهتری بین نواحی مختلف تصویر صورت گیرد، بنابراین ابعاد پنجره باید افزایش یابد. اما هر چه پنجره بزرگ‌تر باشد، نواحی انسداد یافته‌ی بیشتری درون پنجره قرار می‌گیرد و در نتیجه، خطا افزایش می‌یابد و دقت نتایج، کاهش خواهد یافت.

متغیر که با توجه به قیود شباهت رنگی و پیوستگی تعیین می‌شوند، تشکیل می‌شود. سپس بر مبنای چارچوب صلیبی به دست آمده، یک ناحیه کامل با شکل تطبیقی ایجاد می‌شود. ناحیه تجمیع از اشتراک پنجره صلیبی بدست آمده در تصویر چپ و راست بدست می‌آید. در این روش به منظور محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل از اختلاف رنگ RGB و به منظور تسریع تجمیع هزینه در ناحیه‌ی صلیبی با شکل دلخواه در مدت زمان ثابت از روش تصویر تجمعی استفاده شده است. در [۳۰] برای تأمین دقت معیار شباهت پیکسل به پیکسل از ترکیب سه معیار تبدیل Census سه‌حالت در یک پنجره‌ی صلیبی-مربعی، شباهت رنگی و شباهت گرادیان رنگی استفاده شده است. برای تجمیع هزینه نیز از همان ایده‌ی پنجره‌ی وزن‌دار [۱۷] استفاده شده است و تنها اعمال ضرایب وزن را شرطی کرده است و به دو حالت مبتنی بر شباهت رنگی، یا ترکیب شباهت رنگی و مجاورت هندسی تبدیل نموده است. علت استفاده از پنجره‌ی با شکل صلیبی-مربعی، دربرگرفتن اطلاعات پیکسل‌های بیشتر، ضمن هم‌پوشانی کمتر با ناپیوستگی‌های عمق و انسداد، ذکر شده است.

۳- بررسی روش پیشنهادی

در الگوریتم‌های انطباق استریو، چالش اصلی دقت انطباق و سرعت اجراست که در تناقض با یکدیگر هستند، به طوریکه الگوریتم‌های دقیق معمولاً زمان‌بر هستند. در این مقاله تلاش می‌شود با ترکیب ایده‌های موجود در مراحل محاسبه هزینه‌ی انطباق اولیه، تجمیع هزینه و اصلاح نقشه جابجایی مکانی حاصل، روش دقیقی با راندمان زمانی مطلوب ارائه شود.

روش پیشنهادی که بلوک دیاگرام کلی آن در شکل (۱) نشان داده شده است، شامل چهار مرحله‌ی اصلی است.

- گام اول محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل است که در آن از سه روش Census سه‌حالت، قدر مطلق اختلاف (AD) روشنایی و تفاضل گرادیان (GD) روشنایی برای ایجاد هزینه‌های دقیق‌تر و در عین حال، پردازش بلادرنگ این هزینه‌ها استفاده می‌شود.
- گام دوم تجمیع هزینه است که از روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی (با ابعاد متغیر) با شیوه‌ی کاهش پارامتر استفاده می‌کند.
- گام سوم، انتخاب جابجایی مکانی هر پیکسل از بین کاندیداهای موجود از روش WTA استخراج و استخراج نقشه‌ی متراکم جابه‌جایی مکانی است.

^۱ Integrated Image

^۲ Three Moded Cross Census

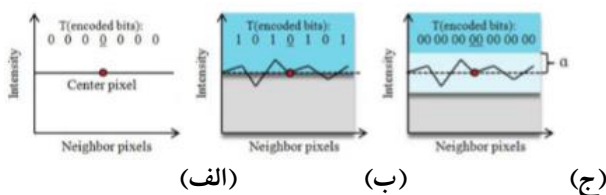
^۳ Absolute Difference

^۴ Gradient Difference

^۵ Winner Takes All

^۶ Left Right Consistency Check

$$\alpha = \left\lfloor \frac{I_c}{\beta} \right\rfloor \quad (۴)$$



شکل (۳): مقایسه‌ی عملکرد روش Census اصلی و سه حالت در نواحی بدون بافت [۳۰].

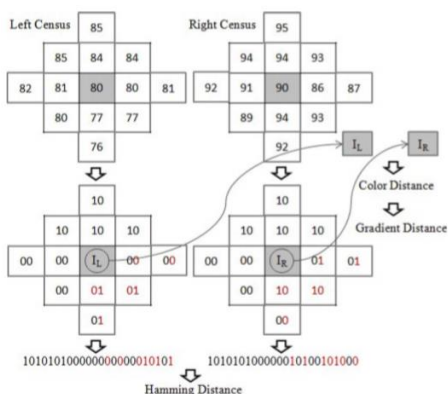
(الف) روش اصلی در نواحی بدون بافت و بدون نویز.

(ب) روش اصلی در نواحی بدون بافت و نویزدار.

(ج) روش سه حالت در نواحی بدون بافت و نویزدار.

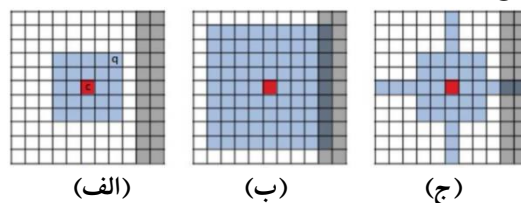
در رابطه‌ی (۴)، مقدار β برای تصاویر سنتز شده ۵۰۰ و برای تصاویر واقعی ۵۰ در نظر گرفته شده است. شکل (۳) عملکرد تبدیل سه حالت را در نواحی نویزدار نشان می‌دهد. در شکل (۳-۳) (الف) مشاهده می‌شود، که تبدیل اصلی در نواحی بدون بافت و بدون نویز، به خاطر وجود شدت رنگ‌های مشابه در اطراف پنجره، نتایج درستی را ایجاد می‌کند. در شکل (۳-۳) (ب) می‌توان دید نتایج تبدیل اصلی در نواحی بدون بافت و نویزدار در مقایسه با نواحی بدون بافت و بدون نویز، دستخوش تغییرات زیادی می‌گردد. در حالی که همان‌طور که در شکل (۳-۳) (ج) مشاهده می‌شود روش سه حالت در تصاویر بدون بافت و نویزدار نتایج درستی را ایجاد کرده است [۳۰].

از آنجایی که روش Census به تنهایی قادر به ارائه‌ی یک نتیجه‌ی مطلوب نیست، علاوه بر هزینه‌ی Census سه حالت (ΔH) ، از هزینه‌ی قدر مطلق اختلاف رنگ (ΔI) و اختلاف گرادیان (ΔG) در پیکسل مرکزی پنجره نیز استفاده شده است. در شکل (۴) محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق با مثالی نشان داده شده است. در واقع، از روش Census سه حالت برای مقایسه‌ی ناحیه‌ی داخل پنجره‌ها در تصاویر چپ و راست و از روش‌های قدر مطلق اختلاف رنگ و اختلاف گرادیان برای مقایسه‌ی پیکسل‌های مرکزی پنجره‌ها استفاده می‌شود.



شکل (۴): مثالی از روش Census سه حالت با $\alpha = 2$ و استفاده از سه روش Census سه حالت، اختلاف رنگ پیکسل‌های مرکزی و اختلاف گرادیان پیکسل‌های مرکزی [۳۰].

همان‌طور که مقایسه‌ی شکل (۲-الف) و (۲-ب) نشان می‌دهد، با افزایش اندازه‌ی پنجره، احتمال قرارگیری نواحی انسداده یافته (نواحی با رنگ خاکستری) در پنجره، افزایش می‌یابد. برای غلبه بر این مشکل، پنجره‌ای به شکل مربعی-صلیبی و با ابعاد ثابت مطابق با شکل (۲-ج) در [۳۰]، در نظر گرفته شده است که از طرفی با توجه به قرارگیری تعداد پیکسل‌های بیشتر در آن، اطلاعات بیشتری را نسبت به یک پنجره‌ی مربعی با ابعاد معمولی دارد و از طرف دیگر به خاطر شکل خاصی که این پنجره دارد، پیکسل‌های کم‌تری در نواحی انسداده‌یافته، قرار می‌گیرند و بنابراین نتایج با خطای کم‌تری نسبت به پنجره‌ی مربعی با ابعاد بزرگ، مواجه می‌شود.



شکل (۲): پنجره‌های مختلف برای تبدیل [Census ۳۰]

(الف) پنجره‌ی مربعی 5×5 (ب) پنجره‌ی مربعی 9×9 (ج) پنجره‌ی صلیبی

روش Census در برابر اعوجاج رادیومتری مقاوم است و هم در الگوریتم‌های محلی و هم در الگوریتم‌های سراسری، عملکرد خوبی دارد. اما این روش در یافتن تناظر مناسب برای نواحی بدون بافت، خوب عمل نمی‌کند. زیرا در نواحی بدون بافت، تقریباً تمام پیکسل‌های درون پنجره، شدت رنگ مشابهی دارند و در این شرایط این تبدیل حتی به نویزهای کم نیز حساس است و بسیار تغییرپذیر می‌باشد. اکثر تصاویر در بینایی استریو دارای نویزهایی هستند که ناشی از دوربین است. برای غلبه بر نویز، یک تبدیل Census سه حالت در [۳۰] پیشنهاد شده است. در تبدیل سه حالت، برای نتیجه‌ی مقایسه مطابق با رابطه‌ی (۳) سه حالت در نظر گرفته می‌شود:

$$T = \xi(I_c, I_q) \mid q \in W$$

$$\xi(x, y) = \begin{cases} 10 & \text{اگر } y > x + \alpha \\ 01 & \text{اگر } y < x - \alpha \\ 00 & \text{صورتا تغییر در} \end{cases} \quad (۳)$$

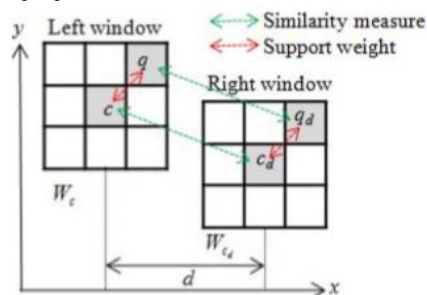
در رابطه‌ی (۳)، W ناحیه‌ی پنجره‌ای حول پیکسل مورد نظر است، I_c شدت رنگ پیکسل مرکزی پنجره و I_q شدت رنگ پیکسل‌های اطراف پیکسل مرکزی است که درون پنجره قرار دارند. α نیز مقدار آستانه‌ی حذف نویز است. نویز دوربین به شدت رنگ وابسته است و واریانس نویز متناسب با شدت رنگ است. هرگاه واریانس نویز افزایش یابد، مقدار آستانه‌ی حذف نویز نیز باید افزایش یابد. بنابراین α به صورت تابعی از شدت رنگ و با استفاده از رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود:

شکل (۵-ب) با استفاده از روش AD که روش رایجی است، به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این روش دارای خطاهای زیادی در نواحی با رنگ مشابه (کادر سبز رنگ) است. در شکل (۵-ج) روش Census سه حالتی نیز به روش AD، افزوده شده است. در نتیجه خطای تصویر حاصل شده، کاهش یافته است. اما همچنان نواحی با بافت زیاد و فرکانس بالا (کادر قرمز رنگ) دارای خطای قابل ملاحظه‌ای است. در شکل (۵-د) روش GD نیز به دو روش قبل افزوده شده است. در نتیجه تصویر حاصل دارای کم‌ترین خطا است. میزان تأثیرپذیری هر یک از سه روش ذکر شده بر ناحیه‌ای از تصویر که درون پنجره قرار دارد بسیار مهم است و بنابراین باید ضریب مناسبی برای هر یک از این روش‌ها تعیین گردد. در نتیجه برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل C_0 از رابطه‌ی (۸) استفاده شده است [۳۰]:

$$C_0(q, q_d) = 3 - \exp\left(-\frac{\Delta H_{qq_d}}{\gamma_H}\right) - \exp\left(-\frac{\Delta I_{qq_d}}{\gamma_I}\right) - \exp\left(-\frac{\Delta G_{qq_d}}{\gamma_G}\right) \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸)، ΔH_{qq_d} ، ΔI_{qq_d} و ΔG_{qq_d} به ترتیب فاصله‌ی همینگ به دست آمده از تبدیل Census سه حالتی، فاصله‌ی AD و فاصله‌ی GD بین پیکسل q و پیکسل q_d مطابق شکل (۶) بوده و γ_H ، γ_I و γ_G به ترتیب پارامترهای کنترل هزینه‌ی Census، هزینه‌ی اختلاف رنگ و هزینه‌ی اختلاف گرادیان می‌باشند.

با توجه به این که هزینه‌های انطباق پیکسل به پیکسل در [۳۰] با استفاده از روش پنجره‌ی وزن‌دار تجمیع می‌شوند و در این مقاله با استفاده از پنجره‌ی صلیبی تطبیقی تجمیع می‌شوند، پارامترهای Y_G و Y_I ، Y_H باید متناسب با روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی تعیین شوند. در [۳۰] مقادیر پارامترها به صورت $Y_H = 19$ و $Y_I = 15$ و $Y_G = 14$ انتخاب شده‌اند. از آن‌جا که پنجره‌ی صلیبی تطبیقی بر روی نواحی با رنگ مشابه قرار می‌گیرد باید نسبت تأثیر هزینه‌ی تبدیل Census بیشتر از دو پارامتر دیگر شود. زیرا این تبدیل برای تطبیق نواحی با رنگ یکنواخت، عملکرد خوبی دارد و در نسخه سه حالتی این عملکرد تقویت می‌شود. از طرف دیگر روش AD در نواحی با رنگ یکنواخت، عملکرد خوبی ندارد و بهتر است نسبت پارامتر آن نسبت به دو مورد دیگر به گونه‌ای تنظیم شود که تأثیر آن کمتر گردد. بنابراین می‌توان مقادیر پارامترها را به صورت $Y_H = 100$ و $Y_I = 200$ و $Y_G = 60$ در نظر گرفت.



شکل (۶): پنجره‌های تصاویر چپ و راست [۳۰]

رشته‌های باینری حاصل از تبدیل Census سه حالتی پنجره‌های تصاویر چپ و راست با استفاده از روش فاصله‌ی همینگ با یکدیگر مقایسه می‌شوند. فاصله‌ی همینگ ΔH برای محاسبه‌ی اختلاف رشته‌های باینری با استفاده از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود:

$$\Delta H = T_L \oplus T_R \quad (5)$$

در رابطه‌ی (۵)، T_L رشته‌ی باینری ایجاد شده در تصویر چپ و T_R رشته‌ی باینری ایجاد شده در پنجره‌ی تصویر راست است. \oplus نیز نشان‌دهنده‌ی عملگر XOR می‌باشد.

برای محاسبه‌ی اختلاف رنگ بین پیکسل‌های مرکزی پنجره‌ها، از فضای رنگ RGB استفاده می‌شود. اگر I_L شدت رنگ پیکسل مرکزی در پنجره‌ی تصویر چپ و I_R شدت رنگ پیکسل مرکزی در پنجره‌ی تصویر راست باشد و $I_L = (I_L^r, I_L^g, I_L^b)$ و $I_R = (I_R^r, I_R^g, I_R^b)$ تعریف شوند، اختلاف رنگ ΔI با استفاده از رابطه‌ی (۶) قابل توصیف است:

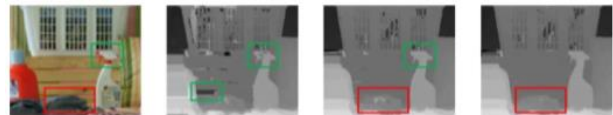
$$\Delta I = \sqrt{\sum_{u=r,g,b} (I_L^u - I_R^u)^2} \quad (6)$$

برای محاسبه‌ی اختلاف گرادیان از مشتق جزئی نسبت به x و y استفاده می‌شود. مشتق جزئی G_x را در فضای رنگ RGB می‌توان با استفاده از عبارات (G_x^r, G_x^g, G_x^b) بیان کرد. اختلاف گرادیان بین گرادیان در تصویر چپ $G_L = (G_{Lx}, G_{Ly})$ و گرادیان در تصویر راست $G_R = (G_{Rx}, G_{Ry})$ با استفاده از رابطه‌ی (۷) تعریف می‌شود:

$$\Delta G = \sqrt{\sum_{u=r,g,b} (G_{Lx}^u - G_{Rx}^u)^2 + \sum_{u=r,g,b} (G_{Ly}^u - G_{Ry}^u)^2} \quad (7)$$

در رابطه‌ی (۷)، G_{Lx}^u و G_{Rx}^u به ترتیب مشتق جزئی در راستای محور x برای شدت رنگ u در تصویر چپ و تصویر راست هستند. همچنین، G_{Ly}^u و G_{Ry}^u به ترتیب مشتق جزئی در راستای محور y برای شدت رنگ u در تصویر چپ و تصویر راست می‌باشند.

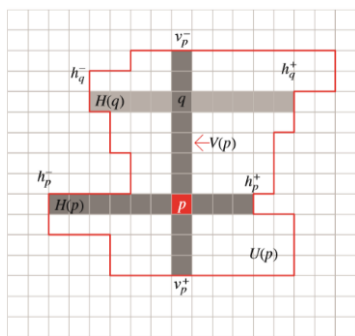
برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق کلی، هزینه‌های تبدیل Census سه حالتی، اختلاف رنگ و اختلاف گرادیان با یکدیگر ترکیب می‌شوند. شکل (۵) نشان می‌دهد که چگونه هر یک از روش‌های فوق به افزایش دقت محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق، کمک می‌کنند.



شکل (۵): نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی تصویر Laundry با استفاده از روش‌های محاسبه‌ی هزینه‌های انطباق مختلف [۳۰]

الف) تصویر چپ. ب) روش AD. ج) روش AD و تبدیل Census سه حالتی. د) روش AD و تبدیل Census سه حالتی و GD

۲-۳- تجمیع هزینه‌ی انطباق



شکل (۷): ساختار پنجره‌ی صلیبی تطبیقی، p پیکسل مرکزی، q پیکسل مورد بررسی، $H(p)$ نوار افقی و $V(p)$ نوار عمودی [۶]

در رابطه‌ی (۱۰)، I_c شدت رنگ در باند C و τ ضریب اطمینان شدت رنگ برای بررسی شباهت رنگی میان دو پیکسل در حال بررسی است.

اندازه و محل نوارهای افقی $H(p)$ و عمودی $V(p)$ پنجره‌ی صلیبی تطبیقی مطابق با شکل (۷) با چهار بازوی بالا (h_p^+) ، پایین (h_p^-) ، راست (h_q^+) و چپ (h_q^-) با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) تعیین می‌گردد [۶]:

$$\begin{cases} H(p) = \{(x, y) | x \in [x_p - h_p^-, x_p + h_p^+], y = y_p\} \\ V(p) = \{(x, y) | x = x_p, y \in [y_p - h_p^-, y_p + h_p^+]\} \end{cases} \quad (11)$$

برای تشکیل دادن پنجره‌ی صلیبی تطبیقی کافی است برای هر یک از پیکسل‌های p ، اندازه‌ی چهار بازوی آن تعیین شود. بنابراین روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی از حافظه‌ی کم‌تری نسبت به روش پنجره با وزن تطبیقی استفاده می‌کند و بنابراین سرعت اجرای الگوریتم افزایش می‌یابد.

در [۱۲] برای تعیین محدوده‌ی هر بازو از روش دقیق‌تری مبتنی بر روابط ریاضی پیشرفته‌تر نسبت به روش [۶] استفاده می‌شود، به این صورت که فاصله‌ی هندسی هر پیکسل از پیکسل مرکزی نیز در آن اهمیت دارد. مثلاً در مورد بازوی چپ (h_p^-) ، پیکسل سمت چپ p_i با پیکسل مورد نظر p مقایسه شده و در صورتی که شرط‌های زیر برقرار باشند، پیکسل سمت چپ p_i جزئی از بازوی h_p^- خواهد بود.

$$1. (D_c(p_i, p) < \tau_1) \& (D_c(p_i, p + (1, 0)) < \tau_1)$$

که تابع $D_c(p_i, p)$ اختلاف رنگ بین پیکسل‌های p و p_i بوده و τ_1 مقدار آستانه برای قدر مطلق اختلاف رنگ است. قدر مطلق اختلاف رنگ به صورت تفاضل شدت رنگ در فضای رنگی RGB و به صورت تعریف $D_c(p_i, p) = \max_{c \in R, G, B} |I_c(p_i) - I_c(p)|$ می‌شود.

۲. $D_s(p_i, p) < L_1$: که تابع $D_s(p_i, p)$ فاصله‌ی هندسی بین پیکسل‌های p و p_i بوده و L_1 مقدار آستانه برای فاصله‌ی هندسی است. فاصله‌ی هندسی به صورت

$$D_s(p_i, p) = |p_i - p|$$

۳. اگر $L_2 < D_s(p_i, p) < L_1$ آنگاه $D_c(p_i, p) < \tau_2$

در تطابق استریوی مترام دقیق و سریع به منظور استفاده از اطلاعات بیشتر در فرایند انطباق و در نتیجه بالا بردن دقت انطباق استفاده می‌شود. اما انتخاب اندازه پنجره مناسب به منظور تجمیع هزینه چالش مهمی است. استفاده از پنجره‌ی مربعی کوچک، اطلاعات کمی را در اختیار قرار می‌دهد در حالی که پنجره‌ی مربعی بزرگ نیز نواحی انسداده یافته‌ی بیشتری را در بر می‌گیرد و نتایج را با خطای بیشتری مواجه می‌سازد. هزینه‌های بدست آمده در رابطه (۸) باید در یک پنجره‌ی مناسب تجمیع شوند تا هزینه انطباق دقیق‌تر C_{agg} حاصل شود. در روش پیشنهادی این مقاله به منظور تجمیع هزینه از روش ارائه شده‌ی تجمیع هزینه‌ی پنجره‌ی صلیبی تطبیقی در [۶] و بهبود یافته‌ی آن در [۱۲] استفاده می‌شود.

در روش‌های تجمیع هزینه، هدف، بزرگ کردن پنجره ضمن جلوگیری از هم‌پوشانی پنجره با نواحی با تغییر عمق و انسداده است، زیرا در این صورت هزینه انطباق محاسبه شده اعتبار ندارد و تصمیم‌گیری بر مبنای آن منجر به نتایج نادرست می‌شود. در روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی، شکل پنجره، مربعی نبوده و پیکسل‌های اطراف پیکسل مرکزی با توجه به قیدهای شباهت رنگی و پیوستگی نسبت به پیکسل مرکزی پنجره، برای تشکیل دادن پنجره، انتخاب می‌شوند.

در روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی با توجه به این که نواحی دارای عمق یکسان، معمولاً دارای رنگ مشابهی هستند، از قید تشابه رنگ با پیکسل مرکزی پنجره و پیوستگی رنگ پیکسل‌های مجاور برای تصمیم‌گیری درباره‌ی حضور یا عدم حضور پیکسل‌های اطراف پیکسل مرکزی در پنجره استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا یک فیلتر 3×3 میانه برای کاهش نویز به تصاویر، اعمال می‌شود. سپس پنجره‌ای به شکل صلیب ایجاد شده و تشابه آن با پنجره‌ی صلیبی تطبیقی قرار گرفته در تصویر راست، بررسی می‌گردد. این پنجره از دو نوار عمود بر هم تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، این دو نوار دارای چهار بازو می‌باشند که اندازه‌ی این بازوها بر اساس روش پیشنهادی در [۶] با توجه به شباهت رنگ بین پیکسل‌های هر بازو و پیکسل مرکزی پنجره، به صورت تطبیقی تغییر می‌کند.

به عنوان مثال، برای تعیین بازوی سمت چپ در نوار افقی در هر مرحله، آخرین پیکسل سمت چپ با پیکسل قبلی آن، از نظر رنگ بررسی می‌شود. هدف از این کار، تعیین حداکثر مقدار بازوی سمت چپ (r^*) است به شرطی که پیکسل‌ها از نظر رنگ با هم مشابه باشند. مقدار r^* از رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید [۶]:

$$r^* = \max_{r \in [1, L]} (r \prod_{i \in [1, r]} \delta(p, p_i)) \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۹)، $p_i = (x_p - i, y_p)$ و L حداکثر طول پیش فرض بازو است. تابع شباهت رنگ بین پیکسل‌های p و p_i را با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌کند [۶]:

$$\delta(p, p_i) = \begin{cases} 1, & \max_{c \in R, G, B} (|I_c(p) - I_c(p_i)|) \leq \tau \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

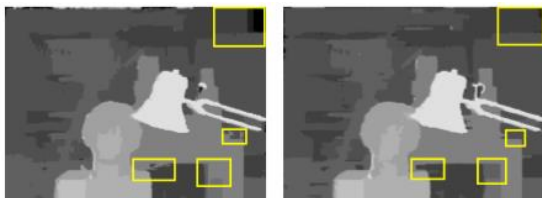
$$C_{agg}(p, d) = \frac{1}{||U_d(p)||} \sum_{q \in U_d(p)} \min(C_0(q, q_d) \cdot T) \quad (13)$$

در رابطه‌ی (۱۳)، C_0 هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل محاسبه شده از رابطه‌ی (۸)، با یک آستانه‌ی T ، مقایسه شده و حداقل مقدار بین این آستانه و C_0 استفاده می‌گردد. در نظر گرفتن آستانه‌ی T برای محدود کردن هزینه‌ی انطباق در نواحی انسداد یافته است. همچنین در رابطه‌ی (۱۳)، $U_d(p)$ اشتراک نواحی حاصل از پنجره‌ی صلیبی تطبیقی $U(p)$ حول پیکسل p در تصویر مرجع (چپ) و پنجره‌ی صلیبی تطبیقی $\hat{U}(p)$ حول پیکسل کاندیدای انطباق آن \hat{p} با جابجایی مکانی d در تصویر دیگر (راست) بوده و از رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$U_d(p) = \{(x, y) \mid (x, y) \in U(p), (x - d, y) \in \hat{U}(\hat{p})\} \quad (14)$$

همچنین $||U_d(p)||$ تعداد پیکسل‌هایی که از اشتراک پیکسل‌های پنجره‌ی صلیبی تطبیقی اعمال شده در تصاویر چپ و راست حاصل می‌شود را بیان می‌کند که برای نرمالیزه‌سازی تجمیع هزینه به کار می‌رود.

یکی از نکات مهم در تجمیع هزینه با روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی، این است که در ابتدا بازوی افقی تشکیل شود و سپس به صورت عمودی گسترش یابد، یا در ابتدا بازوی عمودی تشکیل شود و سپس به صورت افقی گسترش یابد. انتخاب هر یک از این روش‌ها، در شکل نهایی پنجره‌ی صلیبی تطبیقی تأثیرگذار است. استراتژی به کار رفته در [۱۲] این است که تجمیع هزینه برای دستیابی به مقادیر هزینه‌های پایدار، در چهار مرحله تکرار شود. در مراحل ۱ و ۳ در ابتدا بازوی افقی تشکیل شده و بعد به صورت عمودی گسترش می‌یابد و در مراحل ۲ و ۴ در ابتدا بازوی عمودی تشکیل شده و سپس به صورت افقی گسترش می‌یابد. استفاده از این استراتژی باعث کاهش خطا به‌ویژه در نواحی با ناپوستگی عمق می‌شود. در شکل (۹) روش تجمیع هزینه بدون تکرار با روش ذکر شده مقایسه شده است. همان‌طور که در کادرهای زرد مشاهده می‌شود، استراتژی به کار رفته در تصویر Tsukuba نتیجه‌ی دقیق‌تری نسبت به استفاده از روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی بدون تکرار و تنها استفاده از بازوی افقی و سپس گسترش آن، می‌دهد [۱۲].



(الف)

(ب)

شکل (۹): (الف) تجمیع هزینه با روش ساده‌ی پنجره‌ی صلیبی تطبیقی، (ب) تجمیع هزینه با روش تکرار و تشکیل بازوی افقی در ابتدا و گسترش عمودی آن و سپس تشکیل بازوی عمودی در ابتدا و گسترش افقی آن [۱۲]

در این روش با گسترش هدفمند بازوهای صلیب، ضمن تجمیع هزینه‌ی لازم، از هم‌پوشانی با نواحی انسداد و تغییر عمق پرهیز

در جدول (۱) شرایط فوق به صورت خلاصه شده نشان داده شده است:

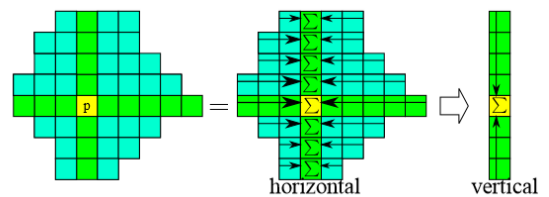
جدول (۱): شرایط در نظر گرفته شده برای گسترش بازوها

$L_1 < D_2$	$L_2 < D_1 < L_1$	$D_1 < L_2$	
خیر	بله	بله	$D_C < \tau_2$
خیر	خیر	بله	$\tau_2 < D_C < \tau_1$
خیر	خیر	خیر	$\tau_1 < D_C$

شرط ۱ نه تنها اختلاف رنگ بین پیکسل‌های p و p_i را با آستانه‌ی τ_1 محدود می‌کند، بلکه اختلاف رنگ بین پیکسل p_i و پیکسل بعدی در آن بازو $(1.0) + p_i$ را نیز با همان آستانه محدود می‌نماید. بنابراین بازوی مورد نظر روی لبه‌ها گسترش نمی‌یابد. شرایط ۲ و ۳ نیز انعطاف‌پذیری بیشتری در تعیین طول بازوی مورد نظر ایجاد می‌کنند. مقدار پارامتر L_1 باید بزرگ انتخاب شود تا پنجره‌ی صلیبی تطبیقی، پیکسل‌های زیادی را در نواحی بدون بافت در نظر بگیرد. اما وقتی که طول بازو از مقدار پیش‌فرض $L_2 < L_1$ تجاوز می‌کند، آستانه‌ی رنگ قوی‌تری به نام τ_2 (شرط $\tau_2 < \tau_1$) برای تابع $D_C(p_i, p)$ در نظر گرفته می‌شود تا اطمینان حاصل شود که پنجره‌ی صلیبی تطبیقی تنها در نواحی با رنگ بسیار مشابه، گسترش بیشتری می‌یابد.

برای تجمیع هزینه‌ی هر پنجره، همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، پس از قرارگیری پنجره بر روی هزینه‌های محاسبه شده، طبق رابطه (۱۲) باید ابتدا هزینه‌ی هر یک از نوارهای افقی موجود در پنجره محاسبه شده (جمع زدن هزینه‌ی پیکسل‌های موجود در پنجره به صورت افقی) و سپس هزینه‌ی این نوارهای افقی (به صورت عمودی) با هم جمع شوند.

$$U(p) = U_{q \in V(p)} H(q) \quad (12)$$



شکل (۸): تجمیع هزینه‌ی پنجره‌ی صلیبی تطبیقی [۱۲]

در این روش برخلاف بسیاری از روش‌های پنجره‌زنی که همان پنجره‌ی اعمال شده بر روی تصویر چپ، در تصویر راست هم اعمال می‌شود، پنجره‌ی صلیبی تطبیقی در تصویر راست هم تشکیل می‌شود. زیرا اگر همان پنجره‌ی صلیبی تطبیقی تصویر چپ بر روی تصویر راست هم اعمال شود، نواحی با عمق غیر یکسان درون پنجره قرار می‌گیرد. بنابراین اشتراک نواحی حاصل از پنجره‌ی صلیبی تطبیقی چپ و راست، هنگام محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق، در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌ی انطباق تجمیعی C_{agg} پیکسل p در تصویر مرجع و کاندیدای انطباق آن در تصویر دیگر با جابجایی مکانی d ، از رابطه‌ی (۱۳) محاسبه می‌گردد:

۴-۳- بهبود نقشه‌ی جابجایی مکانی

پس از تولید نقشه‌ی جابجایی مکانی در مراحل قبل، پالایش نتایج در این مرحله می‌تواند منجر به نتایج بهتری شود. منشأ اصلی پالایش‌های این مرحله که در ادامه بررسی می‌شوند، اعمال قیودی از قبیل پیوستگی جابجایی مکانی، یکتایی و حذف انطباق‌های نادرست در نواحی انسداد و یافتن جایگزین مناسب برای آن‌هاست.

الف - روش کشف پیکسل‌های دارای عمق اشتباه

در این روش در ابتدا پیکسل‌هایی که در نقشه‌ی جابجایی مکانی تصویر چپ، خطا دارند توسط روش LRCC مشخص می‌شوند. در روش LRCC، اگر نقشه‌ی جابجایی مکانی تصویر چپ را D_L و نقشه‌ی جابجایی مکانی تصویر راست را D_R بنامیم، اگر پیکسل مورد نظر در نقشه‌ی جابجایی مکانی تصویر چپ با پیکسل متناظر در نقشه‌ی جابجایی مکانی تصویر راست، برابر نباشد مقدار پیکسل p دارای خطا است. به عبارت دیگر اگر رابطه‌ی $D_L(p) = D_R(p - (D_L(p) - 0))$ برقرار نباشد، پیکسل p دارای خطا است. پیکسل‌هایی با مقادیر غلط که در نقشه‌ی جابجایی مکانی قرار دارند به دو دسته‌ی پیکسل‌های انسداد یافته و پیکسل‌هایی با عدم تطابق تقسیم می‌شوند. بنابراین برای یافتن و تفکیک این دو دسته به روش‌های متفاوتی نیاز است. برای هر یک از پیکسل‌های خطایی که در $D_L(p)$ قرار دارد، تطابق آن با $D_R(p)$ در راستای افقی بررسی می‌شود. اگر تطابق یافت نشود، پیکسل جزء دسته‌ی انسداد یافته و در غیر این صورت، جزء دسته‌ی عدم تطابق است [۱۲].

ب - روش رأی‌گیری عمق پیکسل‌های ناحیه به صورت تکراری
پیکسل‌هایی که در نقشه‌ی جابجایی مکانی دارای مقادیر غلط هستند باید با مقادیر صحیحی اصلاح شوند. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، در این روش از نواحی ایجاد شده توسط پنجره‌ی صلیبی تطبیقی و نوعی رأی‌گیری که شبیه به هیستوگرام است استفاده می‌شود. اگر هر یک از پیکسل‌های نقشه‌ی جابجایی مکانی که دارای مقدار غلطی است را p بنامیم، پنجره‌ی صلیبی و تطبیقی (با ابعاد متغیر) اطراف پیکسل مورد نظر تشکیل می‌شود و هیستوگرام آن ناحیه (H_p) که دارای $d_{max} + 1$ ستون است محاسبه می‌شود. سپس جابجایی مکانی که ستون آن دارای بیش‌ترین مقدار نسبت به سایر ستون‌ها است را d_p^* می‌نامیم و مجموع تعداد پیکسل‌های موجود در آن ناحیه را S_p می‌نامیم که برای محاسبه‌ی آن از $S_p = \sum_{d=0}^{d_{max}} H_p(d)$ استفاده می‌شود. اگر تعداد پیکسل‌های درون پنجره مطابق رابطه‌ی (۱۹) با مقادیر صحیح که دارای جابجایی مکانی d_p^* هستند (هیستوگرام d_p^*) بیش از یک آستانه‌ی مشخصی باشد، مقدار جابجایی مکانی پیکسل p برابر با d_p^* می‌شود. به عبارت دیگر:

$$S_p > \tau_s, \quad \frac{H_p(d_p^*)}{S_p} > \tau_H \quad (19)$$

می‌گردد. ضمناً به دلیل عدم استفاده از توابع پیچیده‌ی محاسباتی موجود در وزن‌ها که در روش پنجره‌ی وزن‌دار در یک ناحیه مربعی در [۳۰] مورد استفاده قرار گرفته است، این روش دارای بهره‌ی محاسباتی مطلوب می‌باشد، هرچند نباید انتظار دقت محاسباتی پنجره‌ی وزن‌دار را داشت.

۳-۳- تعیین جابجایی مکانی

این مرحله هزینه‌های انطباق تجمعی C_{agg} محاسبه شده در مرحله-ی قبل را استفاده کرده و مقدار جابجایی مکانی را در هر پیکسل محاسبه می‌کند. به این منظور از روش بهینه‌ساز Scanline چندجهته مبتنی بر روش انطباق نیمه‌سراسری [۳۱] استفاده می‌شود. در [۱۲]، دو بار بهینه‌سازی Scanline در جهت افقی و دو بار در جهت عمودی پیشنهاد شده است. برای Scanline در جهت r ، هزینه‌ی مسیر $C_r(p, d)$ در پیکسل p و جابجایی مکانی d از رابطه‌ی (۱۶) به روزرسانی می‌شود [۱۲]:

$$C_r(p, d) = C_{agg}(p, d) + \min(C_r(p - r, d), C_r(p - r, d \pm 1) + P_1 \cdot \min_k C_r(p - r, k) + P_2) + \min_k C_r(p - r, k) \quad (16)$$

در رابطه‌ی (۱۶)، $p - r$ پیکسل قبلی در همان جهت است و P_1 و P_2 (به طوری که $P_1 \leq P_2$) دو پارامتر برای جریمه‌ی تغییرات مقدار جابجایی مکانی بین پیکسل‌های همسایه هستند. مقادیر P_1 و P_2 با توجه به اختلاف رنگ دو پیکسل متوالی $D_1 = D_c(p, p - r)$ در تصویر چپ و $D_2 = D_c(pd, pd - r)$ در تصویر راست، تعیین می‌شوند [۱۲]:

(۱) اگر $(D_1 < \tau_{s0}) \& (D_2 < \tau_{s0})$ آنگاه

$$P_1 = \Pi_1, P_2 = \Pi_2$$

(۲) اگر $(D_1 < \tau_{s0}) \& (D_2 > \tau_{s0})$ آنگاه

$$P_1 = \frac{\Pi_1}{4}, P_2 = \frac{\Pi_2}{4}$$

(۳) اگر $(D_1 > \tau_{s0}) \& (D_2 < \tau_{s0})$ آنگاه

$$P_1 = \frac{\Pi_1}{4}, P_2 = \frac{\Pi_2}{4}$$

(۴) اگر $(D_1 > \tau_{s0}) \& (D_2 > \tau_{s0})$ آنگاه

$$P_1 = \frac{\Pi_1}{10}, P_2 = \frac{\Pi_2}{10}$$

که Π_1 و Π_2 مقادیر ثابت و τ_{s0} مقدار آستانه برای اختلاف رنگ است. مقدار هزینه‌ی نهایی با نماد $C(p, d)$ برای پیکسل p و مقدار جابجایی مکانی d با میانگین‌گیری از هزینه‌ها در چهار جهت و با استفاده از رابطه‌ی (۱۷) به دست می‌آید:

$$C(p, d) = \frac{1}{4} \sum_r C_r(p, d) \quad (17)$$

در نهایت جابجایی مکانی پیکسل p با قاعده‌ی WTA از رابطه‌ی (۱۸) تعیین می‌شود:

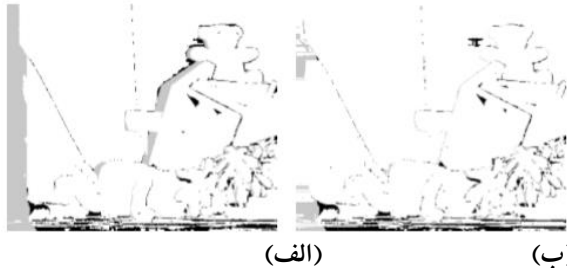
$$d_p = \arg \min_{d \in R} C_{agg}(p, d) \quad (18)$$

در رابطه‌ی (۱۸)، R محدوده‌ی مقادیر جابجایی مکانی کاندیدا برای پیکسل p مبتنی بر قید حداقل و حداکثر جابجایی مکانی، می‌باشد.

$$d^* = d - \frac{c(p,d_+) - c(p,d_-)}{2(c(p,d_+) + c(p,d_-) - 2c(p,d))} \quad (20)$$

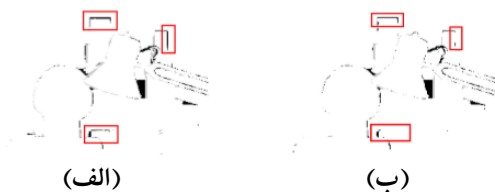
در رابطه‌ی (۲۰)، $d = d_L(p)$ و $d_+ = d + 1$ و $d_- = d - 1$ است.

در زمینه‌ی بهبود نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی، علاوه بر روش‌های ذکر شده، از یک فیلتر میان‌ه با ابعاد 5×5 برای بهبود نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی استفاده شده است که تأثیر به‌سزایی بر نتایج نهایی داشته است



(الف) (ب)

شکل (۱۱): نقشه‌ی خطاهای جابه‌جایی مکانی در تصویر Teddy. نواحی خاکستری، نواحی انسداد یافته و نواحی سیاه، نواحی با عدم تطابق است. الف) قبل از بهبود، ب) بعد از بهبود، نواحی دارای خطا به طور موثری کاهش یافته است [۱۲].



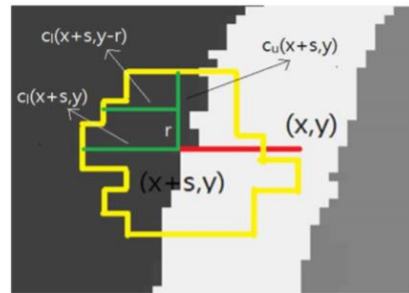
(الف) (ب)

شکل (۱۲): با استفاده از روش "تطبیق نواحی با عمق ناپیوسته" خطاهای موجود در نواحی با ناپیوستگی عمق، کاهش می‌یابد [۱۲]. الف) قبل از روش "تطبیق نواحی با عمق ناپیوسته"، ب) بعد از روش "تطبیق نواحی با عمق ناپیوسته"

۴- بررسی نتایج تجربی

در این مقاله، روش پیشنهادی بر روی تصاویر استریوی استاندارد [VMiddlebury] شامل چهار تصویر "Tsukuba"، "Venus"، "Teddy" و "Cones"، که غالباً برای مقایسه‌ی روش‌های پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارزیابی می‌شود. تصویر چپ از تصاویر این مجموعه‌ی داده و نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی صحیح آنها به ترتیب در شکل (۱۳-الف) و (۱۳-ب) نشان داده شده است. هر یک از این تصاویر دارای نواحی متعدد چالش-برانگیز در مسأله‌ی انطباق استریوی متراکم شامل نواحی بدون بافت، با بافت تکراری، شیب‌دار، ناپیوستگی عمق، و انسداد، در جهت‌های مختلف، می‌باشد. پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در محیط Visual Studio 2017 و با کتابخانه‌ی OpenCV صورت گرفته است. ارزیابی خطاها با درصد خطای تخمین نقشه‌ی متراکم جابه‌جایی مکانی در نقاط بدون انسداد (Nocc)، مجاورت ناپیوستگی‌های عمق (Disc) و کل تصویر (All)، با معیار خطای

در رابطه‌ی (۱۹)، T_H و T_S دو آستانه با مقادیر ثابت می‌باشند. برای این که روش ذکر شده نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی را به بهترین شکل ممکن بهبود دهد، این روش ۵ مرتبه تکرار می‌شود. هر پیکسل با مقدار غلطی که در هر مرتبه اصلاح می‌شود، در مرحله‌ی بعد به عنوان یک پیکسل با مقدار صحیح، استفاده می‌شود. در نتیجه مقدار جابه‌جایی مکانی صحیح در نواحی انسداد یافته گسترش می‌یابد [۱۲].



شکل (۱۰): استفاده از روش رأی‌گیری عمق پیکسل‌های ناحیه به صورت تکراری برای بهبود نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی [۳۰]

ج - روش درونیابی عمق مناسب

در این روش برای پیکسل‌هایی که دارای مقادیر خطا می‌باشند، در ۱۶ جهت، به دنبال پیکسل‌هایی با مقادیر صحیح می‌گردیم. اگر پیکسل p ، پیکسلی انسداد یافته باشد، از میان پیکسل‌های صحیح یافته شده در جهات مختلف، پیکسلی با کم‌ترین شدت رنگ، انتخاب می‌گردد. در غیر این صورت، پیکسلی با بیشترین شباهت رنگ انتخاب می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، با استفاده از روش‌های "رأی‌گیری عمق پیکسل‌های ناحیه به صورت تکراری" و "درونیابی عمق مناسب" اکثر پیکسل‌هایی که دارای مقادیر غلط هستند، اصلاح می‌شوند [۱۲].

د - روش تطبیق نواحی با عمق ناپیوسته

در این بخش پیکسل‌های اطراف نواحی با ناپیوستگی عمق که دارای خطا هستند، اصلاح می‌شوند. در ابتدا تمام لبه‌های موجود در نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی به دست آمده و سپس با استفاده از پیکسل‌هایی که روی لبه هستند، پیکسل‌های مجاور لبه، یافت شده و بررسی می‌شوند. حال مقدار جابه‌جایی مکانی هر یک از پیکسل‌های مجاور لبه که دارای هزینه‌ی انطباق کم‌تری نسبت به دیگری است، به پیکسلی که روی لبه است، نسبت داده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، این روش موجب کاهش خطاهایی می‌شود که در نواحی مجاور ناپیوستگی عمق رخ می‌دهد [۱۲].

ه - روش بهبود عمق پیکسل‌ها

در این روش از رابطه‌ی (۲۰) برای کاهش خطای پیکسل‌هایی که در سطوحی با جابه‌جایی مکانی گسسته رخ می‌دهند، استفاده می‌شود. در این رابطه، مقدار جابه‌جایی مکانی بهینه شده برای پیکسل p با نماد d^* نشان داده می‌شود.

هزینه‌ی انطباق از یک پنجره مربعی با ابعاد 9×7 استفاده شده است.

در جدول (۴) عملکرد روش پیشنهادی از نظر دقت نتایج با روش‌های [۱۲] و [۳۰] مقایسه شده است.

همان‌طور که در بخش (۳) هم پیش‌بینی شده بود، از نتایج جدول (۴) مشاهده می‌شود روش پیشنهادی به دلیل استفاده از تابع هزینه‌ی انطباق دقیق‌تر، نسبت به روش [۱۲] به طور متوسط در نواحی Nocc به اندازه‌ی ۲۷/۳٪، در نواحی Disc به اندازه‌ی ۳۰٪ و در نواحی All به اندازه‌ی ۲۴/۱٪ عملکرد بهتری داشته است. اما روش پیشنهادی به دلیل عدم استفاده از پنجره‌ی وزن‌دار در مرحله‌ی تجمیع هزینه، نسبت به روش [۳۰] به طور متوسط در نواحی Nocc به اندازه‌ی ۲۶/۸٪، در نواحی Disc به اندازه‌ی ۴۷/۵٪ و در نواحی All به اندازه‌ی ۲۳/۸٪ عملکرد بدتری دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی بهبود قابل ملاحظه‌ای بر روی روش پنجره‌ی صلیبی تطبیقی داشته است. علت این بهبود، قرار گرفتن تعداد کم‌تری از پیکسل‌های پنجره در نواحی انسداد یافته نسبت به روش رایج پنجره‌ی صلیبی تطبیقی (با پنجره‌ی 9×7 برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق) و در عین حال، وجود تعداد بیشتری از پیکسل‌ها نسبت به پنجره‌ی مربعی، است. همچنین در روش پیشنهادی از روش Census سه حالت استفاده شده و بنابراین روش تفاضل گرادیان نیز در آن به کار رفته است.

رابطه‌ی (۲۱)، درصد پیکسل‌های انطباق یافته‌ی نادرست در ناحیه‌ی مورد نظر، صورت می‌گیرد.

$$E_{\delta} = 100 \times \frac{1}{H \times W} \sum_{(x,y)} (|d(x,y) - d_{true}(x,y)| > \delta) \quad (21)$$
 در رابطه (۲۱)، $d(x,y)$ مقدار جابجایی مکانی محاسبه شده در پیکسل (x,y) و $d_{true}(x,y)$ مقدار جابجایی مکانی صحیح در پیکسل (x,y) ، H تعداد سطر و W تعداد ستون تصویر است. δ حد خطای جابجایی مکانی بر حسب پیکسل بوده و بطور معمول برابر با یک فرض می‌شود. همان‌طور که در بخش (۳) بررسی شد، روش پیشنهادی دارای پارامترها و آستانه‌هایی است که باید مقداردهی شوند. مقادیر استفاده شده در روش پیشنهادی، مطابق جدول (۲) تعریف شده‌اند.

جدول (۲): مقادیر پارامترها و آستانه‌های روش پیشنهادی

γ_H	γ_I	γ_G	τ_1	L_1	L_2
۱۰۰	۲۰۰	۶۰	۲۰	۳۴	۱۷
Π_1	Π_2	τ_{90}	τ_g	τ_H	τ_2
۰/۲	۰/۲	۱	۲۰	۰/۴	۶

نتایج پیاده‌سازی الگوریتم [۱۲]، [۳۰] و الگوریتم پیشنهادی در جدول (۳) برای چهار تصویر تست استاندارد در سه ناحیه‌ی بدون انسداد، در نواحی مجاورت ناپیوستگی عمق و در کل تصویر نشان داده شده است. در روش [۱۲] در مرحله‌ی محاسبه‌ی

جدول (۳): نتایج روش‌های [۱۲]، [۳۰] و روش پیشنهادی بر روی تصاویر تست استاندارد

Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			
Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	
٪ ۲/۵۵	٪ ۱۲/۶۱	٪ ۲/۴۳	٪ ۱/۴۶	٪ ۹/۹	٪ ۲/۵۵	٪ ۶/۸	٪ ۱۸/۵۵	٪ ۱۳/۴۸	٪ ۴/۳۳	٪ ۱۰/۹۶	٪ ۱۰/۹۵	روش [۱۲]
٪ ۲/۰۷	٪ ۱/۳۲	٪ ۲/۴۹	٪ ۰/۱۳	٪ ۰/۴۶	٪ ۰/۵۲	٪ ۵/۴۴	٪ ۹/۲۹	٪ ۱۰/۵۸	٪ ۲/۱۷	٪ ۸/۳۱	٪ ۷/۶۸	روش [۳۰]
٪ ۲/۱۲	٪ ۹/۷۷	٪ ۲/۶۶	٪ ۰/۲۲	٪ ۲/۲۹	٪ ۱/۰۳	٪ ۶/۳۷	٪ ۱۶/۴۵	٪ ۱۲/۰۶	٪ ۴/۲۸	٪ ۹/۹۴	٪ ۱۰/۵۲	روش پیشنهادی

جدول (۴): بهبود نتایج روش پیشنهادی نسبت به روش‌های [۱۲] و [۳۰]

Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			
Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	
٪ ۱۶/۹	٪ ۲۲/۵	٪ ۲۲/۴	٪ ۸۴/۹	٪ ۷۶/۹	٪ ۵۹/۶	٪ ۶/۳	٪ ۱۱/۳	٪ ۱۰/۵	٪ ۱/۱	٪ ۹/۳	٪ ۲/۹	روش [۱۲]
٪ -۲/۴	٪ -۸۶/۵	٪ -۶/۴	٪ -۴۰/۹	٪ -۷۹/۹	٪ -۴۹/۵	٪ -۱۴/۶	٪ -۷/۲	٪ -۱۲/۳	٪ -۴۹/۳	٪ -۱۶/۴	٪ -۲۷	روش [۳۰]

در زمینه‌ی بهبود نقشه‌ی جابجایی مکانی، علاوه بر روش‌های ذکر شده، از یک فیلتر میانه با ابعاد 5×5 برای بهبود نقشه‌ی جابجایی مکانی استفاده شده است که تأثیر به‌سزایی بر نتایج نهایی داشته است. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود،

جدول (۵): درصد خطای نقشه‌ی جابجایی مکانی در نواحی Nocc با تغییر اندازه‌ی پنجره‌ی فیلتر میانه

Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			
۲/۱۸			۰/۳۲			۶/۴۵			۴/۳۱			3×3
۲/۱۲			۰/۲۲			۶/۳۷			۴/۲۸			5×5
۲/۱۳			۰/۱۸			۶/۳۸			۴/۳۱			7×7

جدول (۶): درصد خطای نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی قبل و پس از اعمال فیلتر میانه با ابعاد ۵ × ۵ و درصد بهبود

Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			
Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	Nocc	Disc	All	
٪ ۲/۱۲	٪ ۹/۷۷	٪ ۲/۶۶	٪ ۰/۲۲	٪ ۲/۲۹	٪ ۱/۰۳	٪ ۶/۳۷	٪ ۱۶/۴۵	٪ ۱۲/۰۶	٪ ۴/۲۸	٪ ۹/۹۴	٪ ۱۰/۵۲	قبل از فیلتر
٪ ۲/۲۴	٪ ۹/۶۷	٪ ۲/۷۹	٪ ۰/۳۹	٪ ۲/۳۸	٪ ۱/۲	٪ ۶/۵۴	٪ ۱۶/۵	٪ ۱۲/۲۲	٪ ۴/۳۶	٪ ۱۰/۱	٪ ۱۰/۷۲	بعد از فیلتر
٪ ۵/۳۶	٪ -۱/۰۳	٪ ۴/۶۶	٪ ۴۳/۵۹	٪ ۳/۷۸	٪ ۱۴/۱۷	٪ ۲/۶	٪ ۰/۳	٪ ۱/۳	٪ ۱/۸	٪ ۱/۶	٪ ۱/۹	درصد بهبود

می‌توان گفت اعمال فیلتر میانه برای نواحی All، خطا را به طور میانگین ۵/۵٪ کاهش داده است.

برای ارزیابی سرعت اجرای الگوریتم‌ها، روش‌های ذکر شده با مشخصات پردازنده‌ی Intel Core i7-3520M و مقدار حافظه‌ی رم ۴ گیگابایت در محیط برنامه‌نویسی Visual Studio 2017 پیاده‌سازی و اجرا شدند. زمان اجرای روش‌های مختلف برای چهار تصویر تست در جدول (۷) بر حسب ثانیه مشاهده می‌شود. همچنین در این جدول، درصد افزایش سرعت اجرای روش پیشنهادی نسبت به روش پایه‌ی [۱۲] و [۳۰] نشان داده شده است. از نتایج این جدول به طور خلاصه می‌توان گفت روش [۱۲]

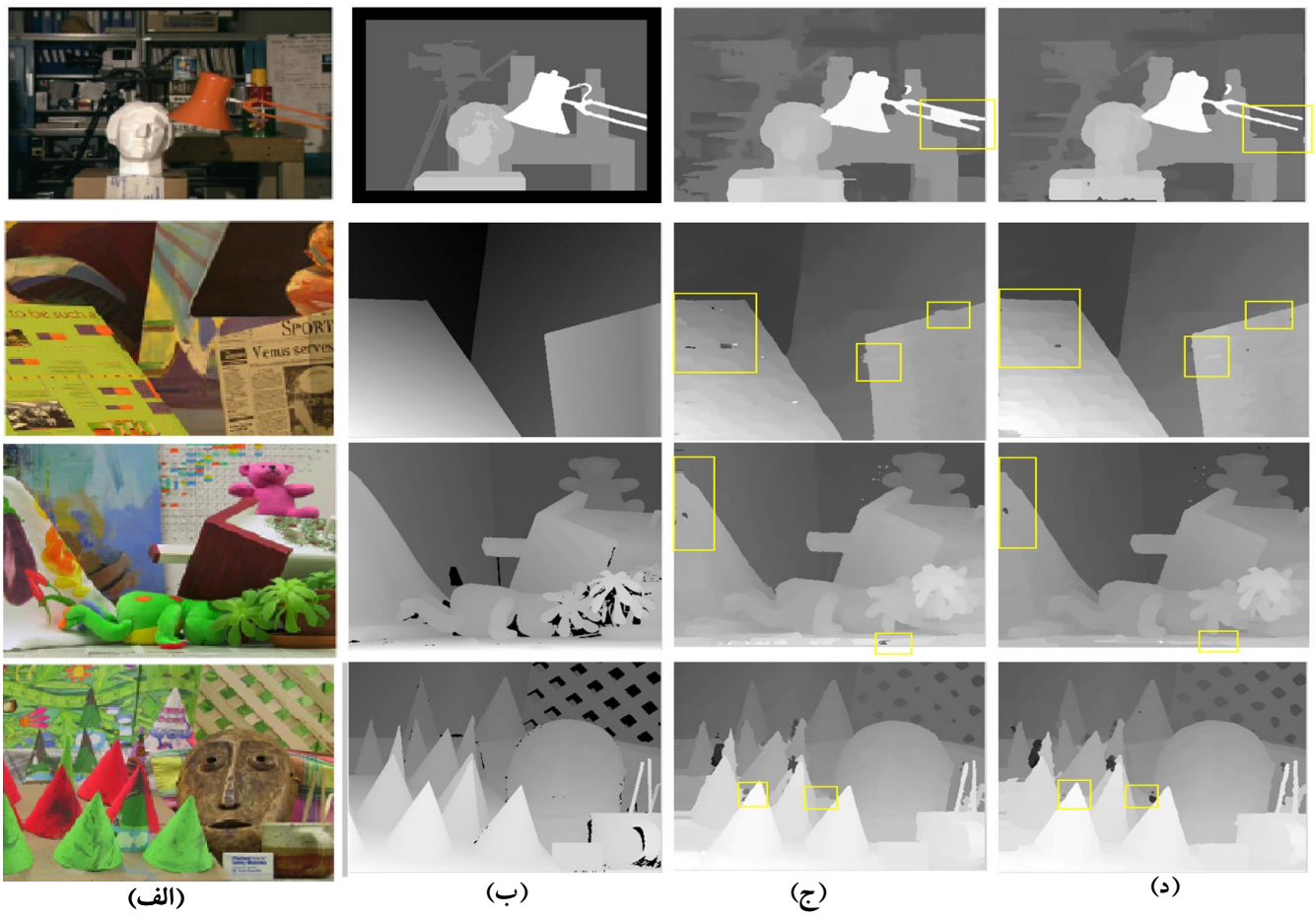
جدول (۷): مقایسه‌ی بین عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌های مشابه از نظر زمان اجرای الگوریتم (بر حسب ثانیه)

Tsukuba	Venus	Teddy	Cones	
۵	۹	۲۱	۱۸	روش پیشنهادی
۶	۱۰	۲۵	۲۲	روش [۱۲]
٪ ۱۶/۷	٪ ۱۰	٪ ۱۶	٪ ۱۸/۲	درصد بهبود سرعت نسبت به روش [۱۲]
۲۱	۳۵	۷۹	۷۸	روش [۳۰]
٪ ۷۶/۲	٪ ۷۴/۳	٪ ۷۳/۴	٪ ۷۶/۹	درصد بهبود سرعت نسبت به روش [۳۰]

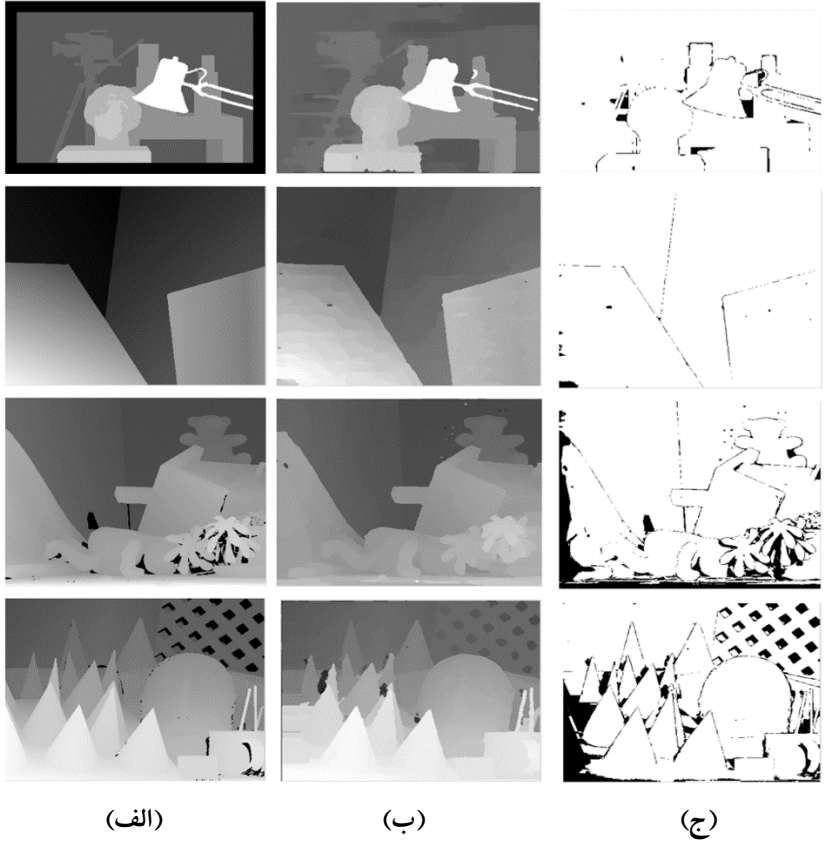
در جدول (۸) عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در نواحی بدون انسداد مشاهده می‌شود. اگر چه روش [۳۰] در مقایسه با روش پیشنهادی از دقت بهتری برخوردار است، اما همان‌طور که در جدول مقایسه‌ی نتایج از نظر سرعت (جدول ۷) مشاهده شد، روش پیشنهادی از سرعت‌خیلی بیشتری نسبت به روش [۳۰] برخوردار است. بنابراین در کاربردهای بلادرنگ، روش پیشنهادی نسبت به روش [۳۰] کاربرد بیشتری دارد. در شکل (۱۳-ج) و (۱۳-د) به ترتیب نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی تولید شده توسط روش پیشنهادی برای چهار تصویر تست و نقشه‌ی

جدول (۸): عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در نواحی بدون انسداد

Tsukuba	Venus	Teddy	Cones	
٪ ۲/۵۵	٪ ۱/۴۶	٪ ۶/۸	٪ ۴/۳۳	روش [۱۲]
٪ ۲/۱۰	٪ ۰/۱۲	٪ ۵/۴۶	٪ ۲/۱۲	روش [۳۰]
٪ ۲/۴۵	٪ ۱/۱۶	٪ ۷/۱۸	٪ ۳/۲۳	روش [۳۲]
٪ ۲/۸۵	٪ ۰/۷۳	٪ ۷/۰۵	٪ ۳/۸۱	روش [۳۳]
٪ ۲/۴۶	٪ ۱/۰۵	٪ ۷/۷۲	٪ ۳/۵۸	روش [۳۴]
٪ ۲/۱۲	٪ ۰/۲۲	٪ ۶/۳۷	٪ ۴/۲۸	روش پیشنهادی



شکل (۱۳): (الف) تصویر چپ از تصاویر پایگاه داده Middlebury، (ب) نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی صحیح، (ج) نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی روش [۱۲] و (د) نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی روش پیشنهادی



شکل (۱۴): (الف) نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی صحیح، (ب) نقشه‌ی نواحی دارای خط با آستانه‌ی ۱ و (ج) نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی روش پیشنهادی

- [4] G. Egnal And R. P. Wildes, (2002). *Detecting Binocular Hulf Occlusions: Empirical Comparisons of Five Approaches, Pattern Analysis And Machine Intelligence, IEEE Transactions, Vol. 24, PP. 1127-1133.*
- [5] M. G. M. Bleyer, (2007). *Simple But Effective Tree Structures For Dynamic Programming Based Stereo Matching. Presented at the VISAPP, PP. 415-422.*
- [6] Zhang, K., Lu, J., & Lafruit, G. (2009). *Cross-based local stereo matching using orthogonal integral images. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, Vol. 19, No. 7, PP. 1073-1079.*
- [7] D. S. a. R. Szeliski. *The Middlebury Stereo Vision Page. Available: <http://vision.middlebury.edu>*
- [8] Kanade, T., & Okutomi, M. (1994). *A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 16, No. 9, PP. 920-932.*
- [9] Veksler, O. (2002). *Stereo correspondence with compact windows via minimum ratio cycle. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 24, No. 12, PP. 1654-1660.*
- [10] Patricio, M. P., Cabestaing, F., Colot, O., & Bonnet, P. (2004). *A similarity based adaptive neighborhood method for correlation based stereo matching. In 2004 International Conference on Image Processing, Vol. 2, PP. 1341-1344.*
- [11] Boykov, Y., Veksler, O., & Zabih, R. (1998). *A variable window approach to early vision. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No. 12, PP. 1283-1294.*
- [12] Mei, X., Sun, X., Zhou, M., Jiao, S., Wang, H., & Zhang, X. (2011). *On building an accurate stereo matching system on graphics hardware. In 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), PP. 467-474.*
- [13] Gupta, R. K., & Cho, S. Y. (2010). *Real-time stereo matching using adaptive binary window. In Proc. 3DPVT, PP. 1-8.*
- [14] Bobick, A. F., & Intille, S. S. (1999). *Large occlusion stereo. International Journal of Computer Vision, Vol. 33, No. 3, PP. 181-200.*
- [15] Hirschmüller, H., Innocent, P. R., & Garibaldi, J. (2002). *Real-time correlation based stereo vision with reduced border errors. International Journal of Computer Vision, Vol. 47, No. 1-3, PP. 229-246.*
- [16] Veksler, O. (2003). *Fast variable window for stereo correspondence using integral images. In 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings, Vol. 1, pp. I-I.*
- [17] Yoon, K. J., & Kweon, I. S. (2006). *Adaptive support weight approach for correspondence search. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 28, No. 4, PP. 650-656.*

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ادامه کار

در این مقاله الگوریتمی برای استخراج نقشه‌ی متراکم جابه‌جایی-مکانی با یک پنجره‌ی ثابت صلیبی با روش‌های Census سه حالتی، تفاضل شدت رنگ و اختلاف گرادیان برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق، در کنار استفاده از روش پنجره‌ی صلیبی با ابعاد متغیر برای تجمیع هزینه و برخی از پالایش‌های نهایی نقشه‌ی جابه‌جایی مکانی پیشنهاد شد. روش پیشنهادی، ایده‌ی محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل را از [۳۰] و ایده‌ی تجمیع هزینه را از [۱۲] اقتباس نموده است. ترکیب ایده‌ها باعث شده است روش پیشنهادی نسبت به روش پایه‌ی [۱۲] از نظر دقت ۲۴/۱٪ و از نظر سرعت ۱۵/۲٪ بهبود داشته باشد. روش پیشنهادی نسبت به روش پایه‌ی [۳۰] از نظر دقت ۲۳/۸٪ بدتر عمل نموده، اما از نظر سرعت بهبود قابل توجه ۷۵/۲٪ داشته است. بنابراین در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت پنجره‌ی وزن‌دار در مرحله‌ی تجمیع هزینه دقت بالایی دارد، اما این روش به دلیل استفاده از توابع ریاضی پیچیده برای محاسبه‌ی وزن‌ها سرعت اجرای پایینی دارد و استفاده از پنجره‌ی صلیبی تطبیقی می‌تواند جایگزین مناسبی برای آن باشد. روش Census سه حالتی در ترکیب با اختلاف شدت روشنایی و اختلاف گرادیان روشنایی در مرحله‌ی محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق پیکسل به پیکسل دارای دقت بالایی است و می‌تواند سبب بهبود نتایج شود.

برای بهبود بیشتر در این زمینه می‌توان از یک پنجره‌ی باینری بر پایه‌ی رنگ پیکسل‌ها، استفاده کرد تا قید پیوستگی در پنجره‌ی صلیبی تطبیقی برداشته شود. زیرا استفاده از قید پیوستگی، در برخی از نواحی باعث کوچک شدن بیش از حد پنجره و عدم وجود اطلاعات کافی برای محاسبه‌ی صحیح جابه‌جایی مکانی می‌گردد. همچنین می‌توان پنجره‌ی صلیبی تطبیقی را وزن‌دار کرد. روش پیشنهادی در این مقاله برای محاسبه‌ی هزینه‌ی انطباق و تجمیع هزینه می‌تواند در سایر روش‌های انطباق استریوی متراکم از جمله روش‌های جدید مبتنی بر یادگیری عمیق بکار گرفته شود.

مراجع

- [۱] طاهر حبیب‌زاده، "بهبود نقشه‌ی متراکم جابه‌جایی مکانی در بینایی استریو مبتنی بر روش پنجره‌ی وزن‌دار" پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه تفرش، ۱۳۹۲.
- [2] D.Scharstein And R.Szeliski, (2002). *A Taxonomy And Evaluation of Dense Two Frame Stereo Correspondence Algorithms. International Journal of Computer Vision, Vol. 47, PP. 7-42.*
- [3] J.Sandr, (2009). *Epipolar Rectification For Stereo Vision. Czech Technical University, Center For Machine Perception, Department of Cybernetics Faculty of Electrical Engineering.*

- advanced support weight. *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 15, No. 8, PP. 1855-1864.
- [31] Hirschmuller, H. (2007). Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 30, No. 2, PP. 328-341.
- [32] Hosni, A., Rhemann, C., Bleyer, M., Rother, C., & Gelautz, M. (2012). Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 35, No. 2, PP. 504-511.
- [33] Lee, S., Lee, J. H., Lim, J., & Suh, I. H. (2015). Robust stereo matching using adaptive random walk with restart algorithm. *Image and Vision Computing*, Vol. 37, PP. 1-11.
- [34] Nguyen, V. D., Nguyen, D. D., Lee, S. J., & Jeon, J. W. (2014). Local density encoding for robust stereo matching. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 24, No. 2, PP. 2049-2062.
- [18] Hosni, A., Bleyer, M., Gelautz, M., & Rhemann, C. (2009). Local stereo matching using geodesic support weights. In *2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, PP. 2093-2096.
- [19] Zitnick, C. L., & Kanade, T. (2000). A cooperative algorithm for stereo matching and occlusion detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 22, No. 7, PP. 675-684.
- [20] Xu, Z., Ma, L., Kimachi, M., & Suwa, M. (2008). Efficient contrast invariant stereo correspondence using dynamic programming with vertical constraint. *The Visual Computer*, Vol. 24, No. 1, PP. 45-55.
- [21] Zheng, N., Loizou, G., Jiang, X., Lan, X., & Li, X. (2007). *Computer vision and pattern recognition*.
- [22] Baker, S., Szeliski, R., & Anandan, P. (1998). A layered approach to stereo reconstruction. In *Proceedings. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Cat. No. 98CB36231, PP. 434-441.
- [23] Lin, M. H., & Tomasi, C. (2003). Surfaces with occlusions from layered stereo. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings*, Vol. 1, PP. I-I.
- [24] Zitnick, C. L., Kang, S. B., Uyttendaele, M., Winder, S., & Szeliski, R. (2004). High-quality video view interpolation using a layered representation. *ACM transactions on graphics (TOG)*, Vol. 23, No. 3, PP. 600-608.
- [25] Bleyer, M., & Gelautz, M. (2005). A layered stereo matching algorithm using image segmentation and global visibility constraints. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing*, Vol. 59, No. 3, PP. 128-150.
- [26] Hirschmuller, H. (2005). Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, Vol. 2, PP. 807-814.
- [27] Sun, J., Li, Y., Kang, S. B., & Shum, H. Y. (2005). Symmetric stereo matching for occlusion handling. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, Vol. 2, PP. 399-406.
- [28] Yang, Q., Wang, L., Yang, R., Stewénius, H., & Nistér, D. (2008). Stereo matching with color weighted correlation, hierarchical belief propagation, and occlusion handling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 31, No. 3, PP. 492-504.
- [29] Yang, Q., Wang, L., Yang, R., Wang, S., Liao, M., & Nister, D. (2006). Real-time Global Stereo Matching Using Hierarchical Belief Propagation. In *BMVC*, Vol. 6, PP. 989-998.
- [30] Lee, Z., Juang, J., & Nguyen, T. Q. (2013). Local disparity estimation with three moded cross census and



حسین بلانی دوره کارشناسی را در دانشگاه پیام نور اصفهان در سال ۱۳۹۵ و دوره کارشناسی ارشد را در دانشگاه تفرش در سال ۱۳۹۸ در رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک به پایان رسانده است. زمینه تخصصی وی پردازش سیگنال دیجیتال، و بینایی ماشین است.



علی محمد فتوحی دوره کارشناسی را در دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۷۹ و دوره کارشناسی ارشد و دکتری را به ترتیب در سال ۱۳۸۲ و ۱۳۸۸ در دانشگاه صنعتی امیرکبیر در رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک به پایان رسانده است. وی اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه تفرش است. زمینه تخصصی وی پردازش سیگنال دیجیتال، بینایی ماشین، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین است.