

استخراج مدل سه بعدی جسم با ادغام ویژگی‌های مستخرج از تصاویر استریو، تخمین حرکت و تصاویر نیمرخ

حسین ابراهیم نژاد صدیق و حسن قاسمیان یزدی

شکل حاصل می‌شود که بر خود جسم در فضای سه بعدی محیط می‌باشد. با اخذ تصاویر نیمرخ جسم از زوایای مختلف، مخروط‌های محیطی متعددی از جسم بدست می‌آید که حجم مشترک محصور بین این مخروط‌ها پوسته قابل دید جسم را بدست می‌دهد.

استفاده از اطلاعات زمانی و تخمین حرکت، در مدلسازی سه بعدی در دهه اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است [۵] تا [۸]. در [۵] از یک روش مبتنی بر نقاط ویژگی و محاسبه فاصله chamfer جهت تخمین حرکت استفاده می‌گردد. نقاط ویژگی در این روش بعنوان بخشی از کانتورهای سه بعدی انتخاب می‌شوند. در [۶] از تغییر فرم کانتورهای آشکار^۵ در سطح جسم برای تخمین حرکت استفاده می‌شود. در این روش با افزودن قید مربوط به خط epipolar و استفاده از تخمین حداکثر احتمال، میزان حرکت جسم صلب محاسبه می‌گردد. در [۷] از مجموعه حداقل نقاط در چهار فریم مختلف برای تخمین محور حرکت دایره‌ای با یک درجه آزادی استفاده می‌شود. در [۸] یک روش مبتنی بر پایداری رنگ برای نقاط متعلق به پوسته قابل دید جسم، جهت تخمین حرکت بکار گرفته می‌شود. در این روش از خاصیت اصلی پوسته قابل دید که هر لبه محیطی باید جسم را حداقل در یک نقطه لمس کند، استفاده شده و نقاط مماس در فریم‌های متوالی استخراج می‌گردد. این نقاط رنگی که اصطلاحاً CSP نامیده می‌شوند، در تصاویر دریافتی از چند دوربین با هم مقایسه شده و با توجه به اصل پایداری رنگ، میزان حرکت جسم تخمین زده می‌شود.

کنده‌کاری و کسل^۶ روش دیگری است که از خاصیت پایداری رنگ برای استخراج مدل سه بعدی جسم استفاده می‌کند [۹]. در این روش یک حجم محیطی اولیه به صورت مکعب در نظر گرفته شده و به وکسل‌های مساوی تقسیم می‌گردد. وکسل‌هایی از حجم که دارای پایداری رنگ در دوربین‌های مشاهده‌گر^۸ نباشند از حجم جدا می‌شوند و حجم باقی مانده مدل سه بعدی جسم را بدست می‌دهد. این روش در نواحی بدون بافت یا نواحی دارای خاصیت آئینه‌ای با مشکل مواجه می‌شود. در [۱۰] تکنیکی برای بهبود روش کنده‌کاری و کسل ارائه شده است. در این تکنیک از مجموع مولفه‌های پخش و آئینه‌ای نور برای تقریب نور بازتابی از سطح جسم استفاده می‌گردد، که برای سطوح مات و آئینه‌ای نیز معتبر می‌باشد. در این مقاله روشی پیشنهاد می‌گردد که با بهره‌گیری از نقاط قوت سه روش تطبیق استریو [۳]، [۱۰] و [۱۱]، تخمین حرکت [۵] تا [۸]، تصاویر نیمرخ [۱] تا [۴] و ادغام آنها، به استخراج مدل سه بعدی جسم می‌پردازد. مهمترین مزیت روش نیمرخ این است که می‌توان از آن برای استخراج مدل سه بعدی اجسام بدون بافت استفاده نمود. چون در روش نیمرخ فقط از اطلاعات مربوط به کانتور مرزی جسم استفاده می‌شود. از

چکیده: در این مقاله یک روش جدید برای بازسازی مدل سه بعدی جسم صلب با استفاده از نیمرخ‌های^۱ آن در طول زمان حرکت جسم ارائه می‌گردد. ایده اصلی مقاله ارائه راهکاری مناسب جهت کاهش مشکلات و تنگناهای موجود در بازسازی دقیق مدل سه بعدی همراه با افزایش سرعت بازسازی می‌باشد. از جمله این مشکلات می‌توان به ابهام موجود در تطبیق تصاویر استریو برای نواحی با درجه تباین^۲ پائین، توازن^۳ غیر دقیق شدت نور و رنگ دوربین‌ها در مرحله راه اندازی و ایجاد خطا در تطبیق نقاط متناظر، ایجاد سایه بدلایل تغییر زاویه تابش منبع نور در زمان حرکت جسم و خطای ناشی از آن در تخمین حرکت و نهایتاً وابستگی شدید روش نیمرخ به تعداد دوربینها اشاره نمود. در این مقاله یک روش کاملاً ابتکاری برای ادغام سه روش تطبیق استریو، تخمین حرکت و نیمرخ پیشنهاد می‌گردد که با بهره‌جویی از نقاط قوت هر روش، به برطرف ساختن نقاط ضعف آنها می‌پردازد. ابتکارات بکار گرفته شده در این مقاله عبارتند از: ارائه الگوریتم مبتنی بر رشد ناحیه برای نقاط همسایگی با تفاضل رنگ پائین، جهت افزایش دقت در فرآیند حذف پس‌زمینه. استخراج نقاط ویژگی جسم با درجه تباین بالا، جهت افزایش دقت تطبیق استریو و کاهش حساسیت آن به توازن شدت نور و رنگ دوربین‌ها. بکارگیری روش تطبیق چندگانه به جای تطبیق استریو، جهت افزایش دقت در استخراج مختصات سه بعدی نقاط منفرد جسم. استفاده از نقاط منفرد سه بعدی برای تخمین دقیق حرکت جسم صلب. ایجاد دوربین‌های مجازی و افزایش تعداد نیمرخ‌های جسم در مدت زمان حرکت جسم. ارائه یک الگوریتم سریع سلسله مراتبی جهت استخراج پوسته قابل دید^۴ از نیمرخ‌های جسم.

کلید واژه: پوسته قابل دید، تخمین حرکت، تطبیق استریو، نیمرخ، نقاط ویژگی، نقاط منفرد.

۱- مقدمه

بازسازی مدل سه بعدی جسم با استخراج پوسته قابل دید از روی تصاویر نیمرخ بطور گسترده‌ای در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است [۱] تا [۴]. پوسته قابل دید، بصورت مدل خامی از سطح جسم تعریف می‌گردد که همواره بر خود جسم محیط بوده و از اطلاعات مربوط به کانتور مرزی نیمرخ‌های جسم قابل استخراج می‌باشد. با اتصال تمامی نقاط این کانتور به مرکز دوربین اخذ کننده تصویر، یک حجم مخروطی

مقاله در تاریخ ۲۸ اردیبهشت ماه ۱۳۸۴ دریافت شد و در تاریخ ۳۰ شهریور ماه ۱۳۸۴ بازنگری شد.

حسین ابراهیم نژاد صدیق، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

حسن قاسمیان یزدی، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

5. Apparent Contours
6. Colored Surface Points
7. Voxel Carving
8. Visible Cameras

1. Silhouette
2. Contrast
3. Balance
4. Visual hull

مجازی استخراج شده و با انجام عمل تقاطع بین مخروط‌های حاصل از نیمرخها، پوسته قابل دید جسم سه بعدی بازسازی می‌گردد.

۲- حذف پس‌زمینه و تنظیم دوربین‌ها

تمامی روش‌های خودکار برای بازسازی مدل سه بعدی جسم مورد علاقه، به دو پیش پردازش حذف پس‌زمینه و تنظیم دوربین‌ها نیاز دارند. روش‌های متعددی برای حذف پس‌زمینه در سالهای اخیر ارائه شده است [۱۳] و [۱۴]. بسیاری از این روشها از مقایسه رنگ یا شدت نور پیکسل‌ها در تصویر مرجع و فریم‌های بعدی استفاده می‌کنند. یکی از مشکلات جدا سازی جسم از پس‌زمینه، تشخیص سایه ایجاد شده در حوالی جسم می‌باشد. جهت غلبه بر این مشکل، مقایسه پیکسل‌ها بر مبنای رنگ صورت می‌گیرد. استفاده از فضای رنگ RGB به جای سطوح خاکستری باعث افزایش دقت در مرحله جداسازی جسم از پس‌زمینه می‌گردد. از نظر تئوری، شدت نور در قسمت‌های سایه‌دار کاهش می‌یابد ولی رنگ تغییری پیدا نمی‌کند. در عمل استفاده از اختلاف رنگ در تشخیص سایه بهبود ایجاد می‌کند ولی همچنان بعضی از نقاط ناحیه سایه که به پس‌زمینه متعلق است، بصورت غلط بعنوان بخشی از جسم تشخیص داده خواهد شد. مشکل دیگری که ممکن است در فرآیند حذف پس‌زمینه بوجود آید، تشخیص غلط نواحی کوچک در پس‌زمینه و جسم می‌باشد که از شباهت رنگ بخشی از نقاط جسم و پس‌زمینه ناشی می‌شود. در این مقاله دو روش ابتکاری جهت تعدیل این مشکلات ارائه شده است.

برای حذف نواحی کوچک که غلط تشخیص داده شده اند، از یک فیلتر بر مبنای اندازه استفاده می‌گردد. این فیلتر به شکل حساس نبوده و فقط به اندازه ناحیه حساس می‌باشد و می‌تواند نواحی کوچک واقع در یک ناحیه بزرگ را حذف کند. نحوه عملکرد فیلتر بدین صورت است که از روش رشد نقاط در آن استفاده شده و هر ناحیه که دارای مساحتی کمتر از مقدار آستانه باشد، حذف می‌گردد.

جهت کاهش خطا در تشخیص غلط ناحیه سایه، برای هر پیکسل در ناحیه پس‌زمینه پیکسل‌های مجاور بررسی می‌گردد. پیکسل‌هایی که از گرادیان رنگ کمتری در تفاضل تصاویر مرجع و فریم بعدی برخوردار باشند، بعنوان پس‌زمینه انتخاب می‌گردند و بقیه پیکسل‌ها بعنوان بخشی از جسم باقی می‌مانند. در حقیقت، تغییرات رنگ در نواحی سایه به صورت ملایم صورت می‌گیرد ولی در ناحیه مرز جسم و پس‌زمینه، تغییرات شدیدی در رنگ خواهیم داشت. لذا اگر تابع گرادیان رنگ مربوط به تفاضل در یک نقطه از سطح آستانه کمتر باشد، می‌توان آن نقطه را به ناحیه سایه منتسب نمود. فرض کنید که رنگ پیکسل j و i در تصویر مرجع با بردار $C_{bg}(i, j)$ نمایش داده شود که این بردار شامل سه مولفه RGB می‌باشد. رنگ پیکسل j و i در تصویر مربوط به فریم‌های بعدی نیز با $C_{ivf}(i, j)$ که در آن ivf مخفف (Incoming Video Frame) می‌باشد، نشان داده می‌شود.

الگوریتم پیشنهادی جهت حذف پس‌زمینه در تصویر به صورت زیر می‌باشد:

برای هر پیکسل، اختلاف شدت نور در تصویر مرجع و فریم بعدی محاسبه می‌گردد. اگر این اختلاف از یک سطح آستانه پائین‌تر باشد می‌توان به طور قطعی تعیین نمود که پیکسل مورد نظر در دو فریم مرجع و بعدی شبیه بوده و در نتیجه به پس‌زمینه متعلق می‌باشد. در صورتی که اختلاف شدت نور از یک سطح آستانه بالاتر باشد، می‌توان به طور قطعی تعیین نمود که پیکسل مورد نظر به جسم تعلق دارد. چنانچه اختلاف شدت نور در فاصله بین دو آستانه قرار گیرد، تصمیم گیری در مورد این

طرف دیگر روش نیمرخ دارای دو ایراد اساسی می‌باشد: اول اینکه، پوسته قابل دید صرفنظر از تعداد نیمرخهای دریافتی از جسم، قادر به استخراج فرورفتگی‌های جسم نمی‌باشد. دوم اینکه، برای بازیافت جزئیات جسم تعداد زیادی از نیمرخها مورد نیاز می‌باشد.

جهت تعدیل مشکل اول، ترکیب روش نیمرخ با روش تطبیق استریو مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساساً روش نیمرخ اشعه‌هایی را مورد استفاده قرار می‌دهد که بر رویه جسم مماس هستند، در حالیکه روش استریو اشعه‌های برخاسته از خود جسم را بکار می‌برد [۱۰]. به همین دلیل روش تطبیق استریو می‌تواند فرو رفتگی‌های جسم را نیز استخراج کند. بنابراین با ترکیب دو روش نیمرخ و تطبیق استریو می‌توان از کاستی‌های روش نیمرخ کاسته و کیفیت بازسازی را افزایش داد.

برای رهایی از مشکل دوم که بکارگیری تعداد زیادی دوربین را می‌طلبد، می‌توان جسم را به حرکت در آورده و با تخمین حرکت به نیمرخهای مختلف جسم دست یافت [۱۲]. در مورد اجسام صلب، حاصلضرب ماتریس حرکت جسم و ماتریس تنظیم دوربین واقعی، ماتریس تنظیم جدیدی را بدست می‌دهد که برای آن می‌توان یک دوربین مجازی در نظر گرفت. در واقع دوربین مجازی معادل با یک دوربین واقعی است که در جهت مخالف حرکت جسم حرکت نموده و نیمرخ جدیدی از جسم را بدست می‌دهد. با استفاده از این دوربین‌های مجازی می‌توان تعداد نیمرخهای جسم صلب را در طول زمان تا حد دلخواه افزایش داد.

روشهای ارائه شده در [۸] و [۹] نیز دارای کاستی‌هایی می‌باشند. در هر دو روش از یک سطح آستانه برای تصمیم گیری در مورد پایداری یا عدم پایداری رنگ در مورد نقاط مورد بازرسی استفاده می‌گردد. عدم توازن دقیق رنگ و شدت نور در دوربین‌های مختلف یکی از عواملی است که موجب ایجاد خطا در آزمایش پایداری رنگ می‌شود. به علاوه تغییرات زاویه منبع نور و ایجاد سایه در هنگام حرکت جسم، باعث افزایش خطا می‌گردد.

در این مقاله روشی پیشنهاد می‌گردد که در آن با استفاده از تطبیق تعدادی از نقاط ویژگی متعلق به رویه جسم در تصاویر دوربین‌های مختلف، مشکلات فوق تعدیل می‌گردند. مهمترین خاصیت نقاط ویژگی اختلاف زیاد رنگ آنها در مقایسه با نقاط همسایگی می‌باشد. همین خاصیت امکان انتخاب سطح آستانه بزرگتر را بدست داده و می‌تواند از ابهام موجود در عمل تطبیق استریو بکاهد. مراحل کار بدین صورت است که در زمانهای متوالی، تصاویری از جسم توسط چند دوربین کالیبره شده اخذ می‌گردد. پس از حذف پس‌زمینه، نقاط ویژگی در تمام تصاویر استخراج می‌شود. تعدادی از این نقاط ویژگی که در تمامی دوربین‌ها قابل مشاهده باشند، در طول خطوط epipolar مطابقت داده می‌شوند. بدین ترتیب با اعمال قیود مختلف یعنی: استفاده از فضای رنگ RGB به جای فضای سطوح خاکستری جهت افزایش دقت در مرحله جداسازی جسم از پس‌زمینه و مرحله تطبیق نقاط متناظر، انجام تطبیق بر روی نقاط ویژگی جسم بجای تمامی نقاط تصویر، انجام تطبیق چند دوربینی بجای تطبیق استریو و انجام تطبیق بر روی خطوط epipolar بجای تمامی نقاط تصویر، مختصات دقیق سه بعدی برای تعدادی از نقاط ویژگی استخراج می‌گردد. این نقاط را اصطلاحاً نقاط منفرد جسم می‌نامیم. با معلوم شدن مختصات نقاط منفرد، از آنها جهت تخمین حرکت در فریم‌های بعدی استفاده می‌شود. با ضرب کردن ماتریس حرکت در ماتریس تنظیم دوربین‌های واقعی، ماتریس تنظیم برای دوربین‌های مجازی در فریم‌های زمانی بدست می‌آید. در نهایت، نیمرخهای جسم در تصاویر دوربین‌های

مرجع و فریم بعدی، کمتر از حد آستانه باشد (۳)، که در آن $\mu_{|C_{ivf}-C_{bg}|}(i, j)$ رنگ متوسط نقطه i و j در تصویر تفاضلی مرجع و فریم بعدی، در یک همسایگی 3×3 می‌باشد. شکل ۱ نتایج حذف پس‌زمینه با الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، این الگوریتم با کیفیت بسیار خوبی قادر به جدا سازی پس‌زمینه، حتی در نواحی دارای بافت می‌باشد. در الگوریتم پیشنهادی فقط جسمی که به تصویر مرجع اضافه می‌شود به عنوان جسم مورد علاقه استخراج می‌گردد و بقیه اجسام که در تصویر مرجع و فریم‌های بعدی ثابت هستند، هر چند که از بافت بسیار پیچیده‌ای برخوردار باشند از صحنه حذف می‌گردند.

تنظیم دوربین نیز از مراحل ضروری در بازسازی مدل سه بعدی جسم می‌باشد و با استفاده از آن می‌توان روش استاندارد برای تبدیل مختصات سه بعدی جسم به مختصات دو بعدی تصویر بدست آورد. هدف از تنظیم عمدتاً تخمین پارامترهای خارجی دوربین، شامل ماتریس چرخش و بردار انتقال مرکز دوربین نسبت به یک نقطه مرجع و پارامترهای داخلی آن شامل فاصله کانونی در جهت محور افقی و عمودی و مختصات مرکز CCD نسبت به مرکز دوربین می‌باشد. با بدست آوردن پارامترهای خارجی و داخلی می‌توان ماتریسی تعریف نمود که مستقیماً مختصات فضای سه بعدی را به مختصات دو بعدی در صفحه تصویر دوربین تبدیل کند [۱۵]. معادله (۴) نحوه تشکیل این ماتریس را نشان می‌دهد. معادله (۵) طرز استفاده از ماتریس تنظیم را برای تبدیل مختصات سه بعدی یک نقطه در فضا به مختصات دو بعدی تصویر توصیف می‌کند.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{CA} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} x_{im} = u/w \\ y_{im} = v/w \end{cases} \quad (5)$$

در این معادلات متغیرهای r و T به ترتیب پارامترهای چرخش و انتقال مرکز دوربین نسبت به نقطه مرجع، f فاصله کانونی لنز دوربین و o مختصات مرکز دوربین نسبت به مرکز CCD می‌باشد. همچنین بردار $[X_w, Y_w, Z_w]$ مختصات نقطه دلخواه W در فضا نسبت به نقطه مرجع و بردار $[x_{im}, y_{im}]$ مختصات تبدیل یافته W در صفحه تصویر دوربین می‌باشد. روشهای مختلفی برای تنظیم دوربین وجود دارد که مهمترین آنها روش تنظیم فتومتریک می‌باشد. در این روش از یک جسم سه بعدی که دارای شکل هندسی مشخصی بوده و مختصات دقیق آن در دست می‌باشد، استفاده می‌گردد. این جسم سه بعدی معمولاً دو صفحه

پیکسل به بررسی اختلاف رنگ موکول می‌گردد. انتخاب سطح آستانه بالا و پائین بر اساس میزان سایه موجود در تصویر صورت می‌پذیرد. به عبارت دیگر سطح آستانه بالا باید به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود تا این اطمینان را بدست دهد که پیکسل مورد نظر به بخشی از پس‌زمینه که در ناحیه سایه واقع شده، متعلق نبوده و صرفاً بخشی از جسم مورد علاقه می‌باشد. با توجه به ثابت ماندن رنگ در بخش سایه‌دار پس‌زمینه، تصمیم‌گیری در مورد نقاطی که در تعلق آنها به جسم یا نواحی سایه‌دار پس‌زمینه ابهام وجود دارد به بررسی اختلاف رنگ موکول می‌گردد. در این تحقیق برای شدت نور ۲۵۶ سطح در نظر گرفته شده که سطح آستانه بالا برابر با ۱۱۰ و سطح آستانه پائین برابر با ۵ انتخاب گردیده است. این مقادیر با انجام آزمایش‌های مختلف بدست آمده‌اند.

$$d(i, j) = \|C_{ivf}(i, j) - C_{bg}(i, j)\| \quad (1)$$

If $d(i, j) > T^U$ *then the pixel* (i, j) *is object*
Else if $d(i, j) < T^L$ *then the pixel* (i, j) *is background*
Else goto step 2

اختلاف رنگ پیکسل، در تصویر مرجع و فریم بعدی محاسبه می‌شود. اگر اختلاف رنگ از یک سطح آستانه پائین‌تر باشد می‌توان به طور قطعی تعیین نمود که رنگ پیکسل مورد نظر در دو فریم مرجع و بعدی شبیه بوده و در نتیجه به پس‌زمینه متعلق می‌باشد. در صورتی که اختلاف شدت رنگ از سطح آستانه بالاتر باشد، می‌توان به طور قطعی تعیین نمود که پیکسل مورد نظر به بخش سایه‌دار پس‌زمینه تعلق نداشته و صرفاً بخشی از جسم می‌باشد. از نظر تئوری زاویه رنگ در نواحی سایه‌دار تغییر نمی‌کند و در نتیجه سطح آستانه زاویه رنگ می‌بایست برابر با صفر درجه انتخاب گردد. لیکن در عمل مقداری تغییر رنگ در نواحی سایه‌دار مشاهده می‌شود. لذا در این تحقیق با انجام آزمایش‌های مختلف سطح آستانه مناسب برای زاویه رنگ برابر با ۵ درجه انتخاب گردیده است.

$$\theta(i, j) = \cos^{-1} \left[\frac{C_{ivf}(i, j) \cdot C_{bg}(i, j)}{\|C_{ivf}(i, j)\| \cdot \|C_{bg}(i, j)\|} \right] \quad (2)$$

If $\theta(i, j) > T^C$ *then the pixel* (i, j) *is object*
Else the pixel (i, j) *is background*

با استفاده از فیلتر کردن بر مبنای مساحت ناحیه، نواحی کوچکی که بصورت غلط تشخیص داده شده اند، حذف می‌گردند. جهت کاهش اثر سایه، ناحیه پس‌زمینه در نواحی مرز جسم رشد داده می‌شود. عمل رشد برای پیکسل‌هایی صورت می‌گیرد که گرادیان رنگ آنها در تصویر تفاضل

$$\theta(i+m, j+n) = \cos^{-1} \left[\frac{\mu_{|C_{ivf}-C_{bg}|}(i, j) \cdot \|C_{ivf}(i+m, j+n) - C_{bg}(i+m, j+n)\|}{\|\mu_{|C_{ivf}-C_{bg}|}(i, j)\| \cdot \|C_{ivf}(i+m, j+n) - C_{bg}(i+m, j+n)\|} \right] \quad (3)$$

$m, n = \pm 1$ $(i, j) \in \text{Background} \ \& \ (i+m, j+n) \in \text{Object}$
 if $\theta(i+m, j+n) < T^C \Rightarrow \text{pixel}(i+m, j+n) \in \text{Background}$

$$\mathbf{CA} = \begin{bmatrix} -f_x r_{11} + o_x r_{r1} & -f_x r_{12} + o_x r_{r2} & -f_x r_{13} + o_x r_{r3} & -f_x T_x + o_x T_z \\ -f_y r_{11} + o_y r_{r1} & -f_y r_{12} + o_y r_{r2} & -f_y r_{13} + o_y r_{r3} & -f_x T_y + o_x T_z \\ r_{r1} & r_{r2} & r_{r3} & T_z \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$



شکل ۱: مراحل حذف پس‌زمینه جهت استخراج نیمرخ جسم مورد علاقه، (الف) تصویر مرجع، (ب) فریم بعدی، (ج) قدر مطلق تفاضل تصویر مرجع و فریم بعدی، (د) حذف پس‌زمینه بر مبنای آستانه شدت نور و رنگ، (ه) بخش بندی بعد از حذف نواحی با اندازه کوچک، (ی) بخش بندی بعد از رشد ناحیه پس‌زمینه جهت کاهش اثر سایه.

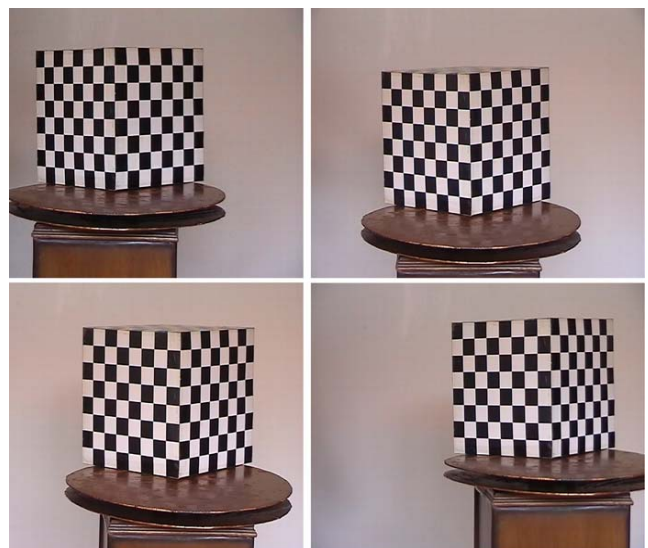
۳- استخراج نقاط ویژگی

نقاط ویژگی در یک تصویر مانند لبه‌ها و گوشه‌ها از جمله نقاطی هستند که دارای درجه تباین بالایی می‌باشند. به عبارت دیگر گرادیان شدت نور یا رنگ در این نقاط از مقدار بالایی برخوردار است. با استفاده از تطبیق استریو می‌توان عمق نقاط ویژگی را با دقت بالایی استخراج نمود. علاوه بر این در تطبیق نقاط ویژگی به توازن دقیق شدت نور و رنگ در دوربین‌های مختلف نمی‌باشد [۱۲]. با استفاده از نقاط ویژگی می‌توان حرکت جسم را نیز با دقت بالایی تخمین زد.

ایده اصلی در این مقاله پیدا کردن مکان دقیق تعدادی از نقاط ویژگی متعلق به رویه جسم در فضا می‌باشد. با مشخص شدن مختصات سه بعدی این نقاط، عمل ردیابی و تخمین حرکت جسم صلب براحتی و بدون هیچگونه ابهامی صورت خواهد گرفت. همچنین تغییر زاویه تابش نور منبع و ایجاد سایه، اثر مخرب کمتری را در تطبیق نقاط ویژگی می‌گذارد. جهت استخراج نقاط ویژگی متعلق به جسم و تخمین عمق برای نقاط منفرد روش زیر پیشنهاد می‌گردد:

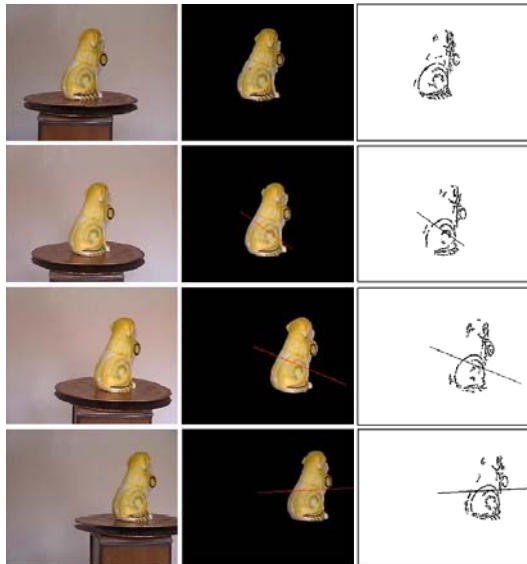
مقدار متوسط رنگ برای هر پیکسل در همسایگی $M \times M$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\mu_M(i, j) = C(i, j) * \frac{1}{M^2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (6)$$



شکل ۲: تصاویر جسم مورد استفاده جهت تنظیم در دوربین‌هایی با موقعیت مکانی مختلف.

شطرنجی عمود بر هم می‌باشد (شکل ۲). جهت تخمین پارامترهای خارجی و داخلی دوربین می‌بایست تعدادی از نقاط را که مختصات دقیق آنها در فضای سه بعدی و در روی تصویر دوربین مشخص می‌باشد انتخاب نموده و با حل تعدادی معادله، پارامترهای مجهول را بدست آورد [۱۵].



شکل ۴: نیم‌رخهای بدست آمده از جسم در ۴ دوربین مختلف با در نظر گرفتن قیود خط epipolar، نقاط ویژگی و تطبیق چند دوربینی.

پس از استخراج نقاط ویژگی در تصاویر تمامی دوربین‌ها، فرآیند تطبیق برای نقاط ویژگی صورت می‌گیرد. هدف از این فرآیند، استخراج مختصات دقیق سه بعدی نقاط ویژگی می‌باشد. برای انجام اینکار تعدادی از نقاط ویژگی در تصویر دوربین شماره ۱ به صورت تصادفی انتخاب شده و با وصل کردن آن به مرکز دوربین یک اشعه در فضای سه بعدی ایجاد می‌گردد. معادله این خط از دیدگاه مرکز دوربین شماره ۱ از رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} X_{C_1} &= -Z_{C_1} \cdot (x_{im_1} - o_{x_1}) / f_{x_1} \\ Y_{C_1} &= -Z_{C_1} \cdot (y_{im_1} - o_{y_1}) / f_{y_1} \end{aligned} \quad (8)$$

برای پیدا کردن تصویر این خط در صفحه دوربین k ابتدا یک تبدیل شامل چرخش و انتقال از سیستم مختصات دوربین ۱ به سیستم مختصات نقطه مرجع و بعد به سیستم مختصات دوربین k توسط معادله (۹) صورت می‌گیرد

$$\begin{bmatrix} X_{Ck} \\ Y_{Ck} \\ Z_{Ck} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_k \cdot \mathbf{R}_1^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{C_1} - T_{1x} \\ Y_{C_1} - T_{1y} \\ Z_{C_1} - T_{1z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{kx} \\ T_{ky} \\ T_{kz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن \mathbf{R} ماتریس چرخش است که از معادله (۱۰) محاسبه می‌گردد و ϕ_x و ϕ_y و ϕ_z زوایای چرخش اولر می‌باشد.

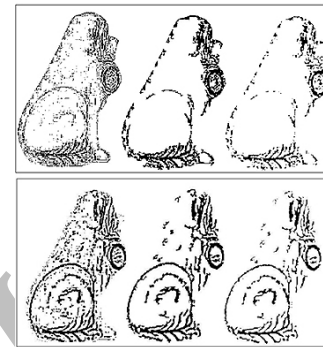
سیس تبدیل از فضای سه بعدی به صفحه دو بعدی در دوربین k توسط معادله (۱۱) انجام می‌گیرد.

$$\begin{aligned} x_{imk} &= -f_{xk} \cdot X_{Ck} / Z_{Ck} + o_{xk} \\ y_{imk} &= -f_{yk} \cdot Y_{Ck} / Z_{Ck} + o_{yk} \end{aligned} \quad (11)$$

بدین ترتیب اشعه به تمامی دوربین‌ها تابیده و تصویر آن در صفحه دوربین‌ها مشخص می‌گردد. تصویر اشعه در واقع همان خط epipolar می‌باشد. حال قید مربوط به نقاط ویژگی و تطبیق چند دوربینی بر روی



(ب) (الف)



(د) (ج)

شکل ۳: استخراج نقاط ویژگی از تصویر نیم‌رخ جسم، (الف) تصویر اصلی، (ب) جسم مورد علاقه بعد از حذف پس‌زمینه، (ج) استخراج نقاط ویژگی با پنجره متوسط گیری 9×9 ، (د) استخراج نقاط ویژگی با پنجره متوسط گیری 9×9 .

تفاضل رنگ نرمالیزه شده برای هر پیکسل در دو تصویر اصلی و تصویر متوسط گیری شده به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$d(i, j) = \frac{\|C(i, j)\| - \|\mu_M(i, j)\|}{\|\mu_M(i, j)\|} \quad (7)$$

هر پیکسل i و j که در آن $d(i, j)$ از سطح آستانه بیشتر باشد به عنوان یک نقطه ویژگی استخراج می‌گردد.

برای بهبود نقاط ویژگی، نواحی کوچک حذف می‌گردد و سپس عمل نازک سازی برای بدست آوردن لبه‌های برجسته انجام می‌گیرد.

در شکل ۳ نتایج حاصل از استخراج نقاط ویژگی برای یک تصویر واقعی که توسط دوربین فیلم برداری از مجسمه سگ گرفته شده است، دیده می‌شود. اندازه تصویر 750×603 می‌باشد و نتایج به ازای دو مقدار متفاوت پنجره متوسط گیری یعنی $M = 3$ و $M = 9$ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود انتخاب مناسب اندازه پنجره نقش مهمی در استخراج نقاط ویژگی ایفا می‌کند. در حقیقت با انتخاب اندازه پنجره کوچک فقط نقاطی استخراج می‌شوند که از اختلاف رنگ زیادی نسبت به نقاط همسایگی نزدیک برخوردار باشند (لبه‌های تیز). ولی با انتخاب پنجره بزرگ می‌توان نقاطی را که از اختلاف رنگ نسبتاً کمتری در مقایسه با نقاط همسایگی دورتر نیز برخوردار هستند، استخراج نمود (لبه‌های نرم). عبارت دیگر هر چه اندازه پنجره بزرگتر باشد، نوارهای پهن تری از نقاط ویژگی بدست خواهد آمد که لبه‌های نرمتر را نیز در بر خواهد گرفت. در این تحقیق با انجام آزمایش مقدار مناسب اندازه پنجره برابر با ۹ انتخاب گردیده است.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \phi_y \cos \phi_z & \cos \phi_x \sin \phi_z + \sin \phi_x \sin \phi_y \cos \phi_z & \sin \phi_x \sin \phi_z - \cos \phi_x \sin \phi_y \cos \phi_z \\ -\cos \phi_y \sin \phi_z & \cos \phi_x \cos \phi_z - \sin \phi_x \sin \phi_y \sin \phi_z & \sin \phi_x \cos \phi_z + \cos \phi_x \sin \phi_y \sin \phi_z \\ \sin \phi_y & -\sin \phi_x \cos \phi_y & \cos \phi_x \cos \phi_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

مولفه‌های چرخش و انتقال است، بدست آورد. بنابراین هدف از تخمین حرکت، پیدا کردن ماتریسی برای بیان حرکت سه بعدی می‌باشد. با ضرب ماتریس حرکت در مختصات نقاط منفرد، مختصات جدید آنها پس از حرکت بدست می‌آید. نقاط جدید از فضای سه بعدی به فضای دو بعدی در هر یک از دوربین‌ها تابیده می‌شود. با تخمین صحیح ماتریس حرکت، می‌بایست تصویر نقاط در فضای دو بعدی بر نقاط ویژگی استخراج شده در فریم بعدی در تمامی دوربینها منطبق باشد. بنابراین می‌توان یک تابع خطا برای میزان انطباق تعریف نموده و ماتریس حرکت را چنان یافت که تابع خطا را به حداقل مقدار خود برساند. این تابع می‌تواند مربع اختلاف رنگ نقاط در دو فریم متوالی باشد. فرض کنید که w_i نقطه منفرد i ام؛ N_f تعداد کل نقاط منفرد و μ_i میانگین رنگ نقطه i ام در تمامی نیمرخها در فریم فعلی باشد. K تعداد کل دوربینها و $C^k(W_i)$ بردار رنگ نقطه i ام پس از تابیدن به نیمرخ شماره k در فریم فعلی می‌باشد. برای تخمین میزان حرکت، تابع خطا به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$e = \sum_{i=1}^{N_f} e_i; \quad (12)$$

$$e_i = \sum_{k=1}^K e_i^k = \sum_{k=1}^K (C^k(\mathbf{R} \cdot \mathbf{W}_i + \mathbf{T}) - \mu_i)^2$$

که در آن \mathbf{R} ماتریس چرخش و \mathbf{T} بردار انتقال ناشی از حرکت می‌باشد. تابع $C^k(\mathbf{R}\mathbf{W}_i + \mathbf{T})$ رنگ نقطه منفرد \mathbf{W}_i را پس از اعمال حرکت و تابیدن به نیمرخ k ام در فریم بعدی نشان می‌دهد. شش پارامتر چرخش و انتقال را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\Theta = [\theta_x, \theta_y, \theta_z, \theta_r, \theta_s, \theta_t] \quad (13)$$

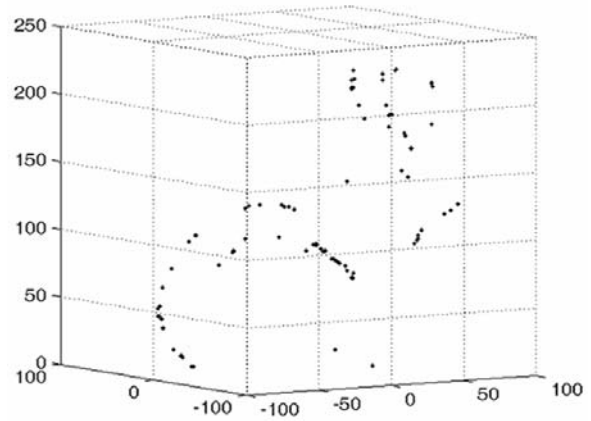
که در آن θ_r و θ_s و θ_t و θ_x و θ_y و θ_z زوایای چرخش اولر (یعنی ϕ_x و ϕ_y و ϕ_z) و θ_r و θ_s و θ_t به ترتیب مولفه‌های T_x و T_y و T_z بردار انتقال هستند. برای مینیمم کردن تابع خطا در معادله (۱۲) می‌توان از روشی مشابه با الگوریتم Marquardt بصورت زیر استفاده کرد [۸]:

۱- با تخمین اولیه‌ای از Θ ماتریس Hessian به صورت $\mathbf{H} = [h_{mn}]$ و بردار تفاضل به صورت $\mathbf{d} = [d_m]$ که در آن $m, n = \{1, 2, \dots, 6\}$ می‌باشد، تعریف می‌گردد. مقادیر h_{mn} و d_m از روابط زیر بدست می‌آید:

$$h_{mn} = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{k=1}^K \frac{\partial e_i^k}{\partial \theta_m} \cdot \frac{\partial e_i^k}{\partial \theta_n} \quad (14)$$

$$d_m = -2 \cdot \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{k=1}^K e_i^k \cdot \frac{\partial e_i^k}{\partial \theta_m} \quad (15)$$

۲- پارامترهای Θ با مقدار $\Delta\Theta = \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{d} / \lambda$ تجدید می‌گردند که در آن λ یک پارامتر پایدارساز متغیر با زمان می‌باشد. در حقیقت پارامتر λ میزان گام تغییرات پارامترهای Θ را مشخص می‌نماید. هر چه مقدار λ بزرگتر باشد گام تغییر پارامترها کوچکتر بوده و دقت عمل در همگرایی بیشتر خواهد شد. لیکن گام‌های کوچکتر به معنی افزایش زمان همگرایی می‌باشد و البته می‌تواند مشکلات مربوط به گیر کردن در تله مینیمم‌های محلی را افزایش دهد. لذا در آغاز، مقدار λ نسبتاً کوچک انتخاب می‌شود و همزمان با افزایش تعداد تکرارها و همگرا شدن الگوریتم، مقدار λ افزایش می‌یابد تا دقت همگرایی را افزایش دهد. در این تحقیق مقدار λ در اولین تکرار برابر با ۴۰ انتخاب گردیده است که با ضریب ۱/۰۲ در هر تکرار مقدار آن افزایش می‌یابد.



شکل ۵: مختصات سه بعدی نقاط منفرد استخراج شده، با روش تطبیق چند دوربینی بر مبنای نقاط ویژگی.

اشعه اعمال می‌گردد. یعنی فقط نقاطی از اشعه انتخاب می‌شوند که تصویر آنها در تمامی خطوط epipolar نقاط ویژگی را قطع کند (شکل ۴). در ادامه، قید رنگ نیز بر روی نقاط انتخاب شده، اعمال می‌گردد. در نهایت یک نقطه از اشعه که دارای بیشترین تطبیق رنگی در تمامی تصاویر باشد به عنوان نقطه متعلق به رویه جسم انتخاب می‌گردد و بدین ترتیب مختصات سه بعدی آن بدست می‌آید. این نقطه را نقطه منفرد جسم نام گذاری می‌کنیم. عملیات فوق برای تعداد محدودی از نقاط ویژگی به صورت تصادفی انجام می‌گیرد و بدین ترتیب مختصات سه بعدی تعدادی از نقاط منفرد به صورت پراکنده بر رویه جسم استخراج می‌گردد. با توجه به افزایش قیود اعمالی در تطبیق نقاط منفرد، روش پیشنهادی برای انجام عمل تطبیق بسیار مقاوم می‌باشد. این روش می‌تواند مختصات سه بعدی قیود اعمالی عبارتند از: خطوط epipolar، تطبیق نقاط ویژگی بجای تطبیق نقاط عادی در تصاویر، تطبیق چند دوربینی بجای تطبیق استریو برای کاهش ابهام و استفاده از تطبیق رنگ نقاط. ضمناً محدوده آستانه برای تطبیق رنگ به اندازه کافی بزرگ انتخاب می‌شود تا از حساسیت عمل تطبیق به توازن نور و رنگ در دوربین‌های مختلف و همچنین سایه ناشی از تغییر زاویه تابش نور به جسم بکاهد. شکل ۴ تصاویر اخذ شده از مجسمه سگ توسط ۴ عدد دوربین از زوایای مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل نقاط ویژگی استخراج شده از نیمرخها و قید خط epipolar هر تصویر نیز نمایش داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود بکارگیری قید نقاط ویژگی بطور چشم گیری باعث کاهش ابهام در عمل تطبیق می‌گردد. چون فقط نقاطی از خط epipolar (انتقال یافته اشعه به هر تصویر) انتخاب می‌شوند که در تمامی تصاویر بر روی نقاط ویژگی قرار گرفته باشند. استفاده از تطبیق چند دوربینی، با افزودن قیدی دیگر، دقت تطبیق را در مقایسه با تطبیق استریو بالا می‌برد. شکل ۵ نتایج پیاده سازی برای تطبیق چند دوربینی بر مبنای نقاط ویژگی را نشان می‌دهد. این شکل مختصات سه بعدی تعداد محدودی از نقاط منفرد متعلق به رویه جسم را نشان می‌دهد. این نقاط همان نقاط منفرد می‌باشند که پس از اعمال قیود مختلف بعنوان نقاط حائز شرایط انتخاب می‌گردند.

۴- تخمین حرکت سه بعدی با استفاده از نقاط منفرد

فرض کنید که مجموعه‌ای از نقاط سه بعدی را داشته باشیم و بخواهیم حرکت آنها را در طول زمان پیدا کنیم. این حرکت برای یک جسم صلب می‌تواند به صورت چرخش و انتقال در فضا با ۶ درجه آزادی بیان شود. با داشتن این ۶ پارامتر می‌توان ماتریس حرکت را که شامل

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi_y \cos \varphi_z & \cos \varphi_x \sin \varphi_z + \sin \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z & \sin \varphi_x \sin \varphi_z - \cos \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z & T_x \\ -\cos \varphi_y \sin \varphi_z & \cos \varphi_x \cos \varphi_z - \sin \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z & \sin \varphi_x \cos \varphi_z + \cos \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z & T_y \\ \sin \varphi_y & -\sin \varphi_x \cos \varphi_y & \cos \varphi_x \cos \varphi_y & T_z \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

واقعی شماره k باشد، ماتریس تنظیم دوربین‌های مجازی متعلق به آن از معادله (۲۱) بدست می‌آید.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w} &= CA \cdot \mathbf{W} \\ \mathbf{W}^{(r)} &= M_1 \cdot \mathbf{W} \\ \mathbf{W}^{(r)} &= M_r \cdot \mathbf{W}^{(r)} = M_r \cdot M_1 \cdot \mathbf{W} \\ &\vdots \\ \mathbf{W}^{(n)} &= M_{n-1} \cdot \mathbf{W}^{(n-1)} = M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_r \cdot M_1 \cdot \mathbf{W} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w}^{(n)} &= CA \cdot \mathbf{W}^{(n)} = CA^{(n)} \cdot \mathbf{W} \\ CA^{(n)} &= CA \cdot (M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_r \cdot M_1) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (21)$$

frame : n , camera : $k \Rightarrow$

$$CA_k^{(n)} = CA_k \cdot (M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1)$$

۵- بازسازی پوسته قابل دید سه بعدی

در این مقاله یک روش سلسله مراتبی، جهت افزایش سرعت بازسازی پوسته قابل دید با استفاده از تقاطع مخروطهای ناشی از تصاویر نیم‌رخ پیشنهاد می‌گردد. لبه‌های محیطی روشی برای نمایش پوسته قابل دید جسم می‌باشد که در آن از ترکیب خطوط راست و مماس بر رویه جسم استفاده می‌گردد [۱۱]. جهت بازسازی لبه‌های محیطی، نقطه‌ای بر روی مرز نیم‌رخ i انتخاب شده و با اتصال آن به مرکز دوربین i یک اشعه در فضا ایجاد می‌شود. این اشعه به سایر نیم‌رخهای j که در آن $j = \{1, 2, \dots, k\}$ و $j \neq i$ می‌باشد، تابیده می‌شود. قسمت‌هایی از اشعه که در تمامی نیم‌رخهای j در داخل جسم قرار می‌گیرند، بعنوان لبه‌های محیطی انتخاب می‌شوند. اینکار برای همه نقاط مرزی در تمامی نیم‌رخها تکرار می‌شود و به ازای هر اشعه تعدادی لبه محیطی استخراج می‌گردد. بدین ترتیب با اجتماع تمام لبه‌های محیطی، پوسته قابل دید بازسازی می‌شود [۱۶]. لازم به توضیح است که لبه محیطی الزاماً یک خط پیوسته نمی‌باشد و ممکن است از چندین قطعه تشکیل یافته باشد. این حالت موقعی اتفاق می‌افتد که اشعه، نیم‌رخ را در نواحی مقعر جسم قطع کند. این نکته در شکل ۶- الف بوضوح نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، اشعه R_i که از اتصال نقطه i در مرز نیم‌رخ S_i به مرکز دوربین ۱ ایجاد شده است، دارای دو بخش مشترک در نیم‌رخهای S_p و S_r می‌باشد. برای بیان هر لبه محیطی کافی است که محل ابتدا و انتهای آن را بدانیم. ایده اصلی روش پیشنهادی در شکل ۶- ب نمایش داده شده است. بجای اینکه تمامی نقاط اشعه، مورد آزمایش قرار گیرد نقاط به صورت سلسله مراتبی آزمایش می‌شوند. ابتدا نقطه میانه در روی اشعه انتخاب شده و به تمامی نیم‌رخها تابیده می‌شود. چنانچه رنگ این نقطه در تمامی نیم‌رخها سیاه باشد نقطه واقع در فاصله $1/4$ آزمایش می‌شود و در غیر این صورت هر دو نقطه $1/4$ و $3/4$ آزمایش می‌شوند. این کار به صورت سلسله مراتبی تکرار می‌شود تا مختصات نقطه شروع لبه محیطی با دقت مورد نظر بدست آید. پس از یافتن ابتدای لبه محیطی

۳- به مرحله ۱ بازگشته و الگوریتم آنقدر تکرار می‌شود تا اینکه $\hat{\Theta}$ به یک بردار با مقادیر ثابت همگرا شود.

پس از تخمین حرکت و پیدا کردن ۶ پارامتر حرکت برای تمامی فریم‌ها می‌توان ماتریس حرکت را از معادله زیر برای هر فریم بدست آورد با داشتن ماتریس حرکت می‌توان از معادله زیر مختصات هر نقطه در فضا را پس از حرکت بدست آورد.

$$\mathbf{W}^{(r)} = M \cdot \mathbf{W} \quad \text{where : } \mathbf{W} = [X \ Y \ Z \ 1]^T \quad (17)$$

در این مقاله مفهوم جدیدی تحت عنوان دوربین مجازی تعریف می‌گردد. این مفهوم می‌تواند در بازسازی پوسته قابل دید بطور موثری مورد استفاده قرار گیرد. فرض کنید CA ماتریس تنظیم دوربین واقعی باشد که در معادله (۴) تعریف شده است. این ماتریس نقطه سه بعدی \mathbf{W} در فضا را به نقطه w در صفحه تصویر دوربین نگاشت می‌کند. نقطه \mathbf{W} در اثر حرکت M_1 به نقطه $\mathbf{W}^{(r)}$ در فضا منتقل می‌شود. فرض کنید تصویر این نقطه در صفحه دوربین، $w^{(r)}$ باشد که در فریم ۲ بدست می‌آید. حال برای فریم ۲ یک دوربین مجازی در نظر می‌گیریم، بطوریکه نقطه $w^{(r)}$ را مستقیماً از تبدیل نقطه \mathbf{W} بدست آورد. هدف پیدا کردن ماتریس تنظیم چنین دوربینی می‌باشد. با ترکیب دو معادله (۴) و (۱۷) داریم:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w} &= CA \cdot \mathbf{W} \\ \mathbf{W}^{(r)} &= M_1 \cdot \mathbf{W} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \mathbf{w}^{(r)} = CA \cdot \mathbf{W}^{(r)} = CA \cdot M_1 \cdot \mathbf{W}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \mathbf{w}^{(r)} &= CA^{(r)} \cdot \mathbf{W} \\ CA^{(r)} &= CA \cdot M_1 \end{aligned} \right. \quad (18)$$

تعبیر معادله (۱۸) اینست که فریم ۲ در صفحه دوربین واقعی معادل با یک تصویر در دوربین مجازی شماره ۲ با ماتریس تنظیم $CA^{(r)}$ می‌باشد. به همین ترتیب می‌توان رابطه مشابهی برای دوربین مجازی شماره ۳ متناظر با فریم ۳ بدست آورد:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w} &= CA \cdot \mathbf{W} \\ \mathbf{W}^{(r)} &= M_1 \cdot \mathbf{W} \\ \mathbf{W}^{(r)} &= M_r \cdot \mathbf{W}^{(r)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \mathbf{w}^{(r)} = CA \cdot \mathbf{W}^{(r)} = CA \cdot M_r \cdot \mathbf{W}^{(r)} \quad (19)$$

$$= CA \cdot M_r \cdot M_1 \cdot \mathbf{W} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \mathbf{w}^{(r)} &= CA^{(r)} \cdot \mathbf{W} \\ CA^{(r)} &= CA \cdot M_r \cdot M_1 \end{aligned} \right.$$

در معادله فوق $CA^{(r)}$ ماتریس تنظیم دوربین مجازی شماره ۳ می‌باشد. در این معادله M_i بیانگر ماتریس حرکت جسم از فریم i به فریم $i+1$ می‌باشد. در حالت کلی می‌توان ماتریس تنظیم دوربین مجازی متناظر با فریم شماره n را بر حسب ماتریس تنظیم دوربین واقعی بدست آورد:

برای هر دوربین می‌توان به ازای هر فریم تصویری یک دوربین مجازی در نظر گرفت. حال با فرض اینکه CA_k ماتریس تنظیم دوربین

$$N_{tot}(\max) = \sum_{i=1}^S E_i \cdot R \cdot (S-1) = E_i \cdot R \cdot S \cdot (S-1) \quad (22)$$

برای کاهش تعداد تبدیل‌ها، می‌توان نقاطی از اشعه را که تبدیل آنها حداقل در یک نیمرخ در خارج جسم باشد از فرآیند بررسی حذف نمود. زیرا همانطور که گفتیم نقاط متعلق به لبه‌های مرزی می‌بایست در تمامی نیمرخ‌های موجود (به جز نیمرخ تشکیل دهنده اشعه) در داخل جسم قرار گیرند. با اجرای طرح فوق تعداد تبدیل‌ها به مقدار زیر کاهش می‌یابد:

$$N_{tot} = \sum_{i=1}^S E_i R \cdot \left(1 + \frac{1}{k_{v_i}} + \frac{1}{k_{v_i} k_{r_i}} + \dots + \frac{1}{k_{v_i} k_{r_i} \dots k_{(S-r_i) i}}\right) \quad (23)$$

در معادله فوق k_{ij} میزان کاهش تعداد نقاط واقع در مخروط i ام را پس از تابش آنها به نیمرخ j ام نشان می‌دهد. این کاهش تعداد به دلیل آن است که تعدادی از نقاط مخروط i ام بعد از تاباندن به نیمرخ j ام در خارج جسم قرار گرفته‌اند و آزمایش این نقاط در سایر نیمرخ‌ها مورد نیاز نخواهد بود. مقدار k_{ij} به شکل هندسی مخروط i ام و شکل نیمرخ j بستگی دارد که در حالت کلی مقدار آن خیلی بزرگتر از یک می‌باشد. حال برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی فرض کنید که از هر اشعه در مرحله اول آزمایش n نمونه با فاصله یکسان انتخاب گردد.

پس از مواجه شدن با اولین تغییر رنگ، تعداد $\log(R/n)$ نقطه برای یافتن محل دقیق نقطه ابتدایی و به همین تعداد برای یافتن محل نقطه انتهایی مورد خواهد بود. برای نواحی محدب فقط یک نقطه ابتدایی و یک نقطه انتهایی خواهیم داشت و از اینرو تعداد نقاط مورد آزمایش در هر اشعه از معادله زیر بدست خواهد آمد

$$R_H = n + 2 \log_r(R/n) \quad (24)$$

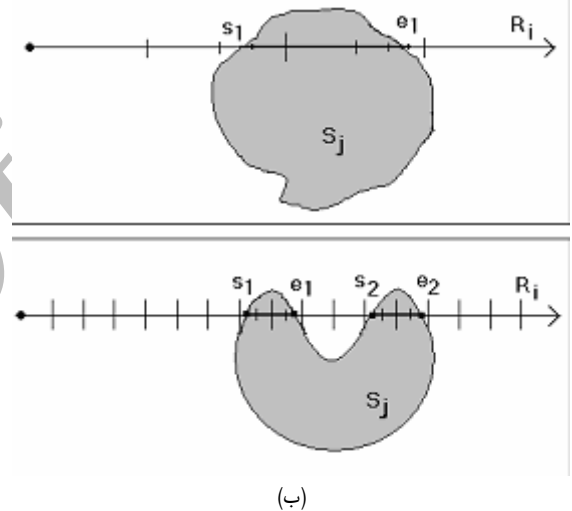
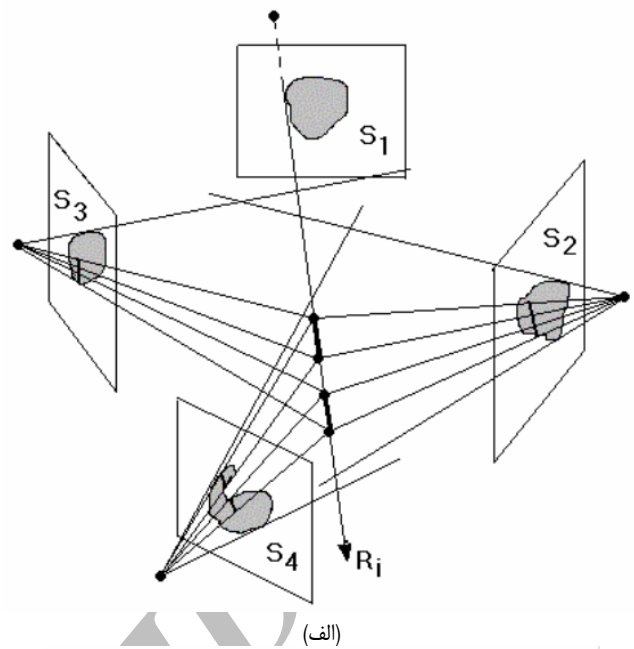
و تعداد کل تبدیل‌ها برای اجسام سه بعدی محدب برابر خواهد بود با

$$N_{totH} = \sum_{i=1}^S E_i \left(n + 2 \log_r\left(\frac{R}{n}\right) \left(1 + \frac{1}{k_{v_i}} + \dots + \frac{1}{k_{v_i} k_{r_i} \dots k_{(S-r_i) i}}\right) \right) \quad (25)$$

در نواحی مقعر تعداد لبه‌های محیطی هر اشعه بیشتر از یک بوده و می‌بایست تعداد بیشتری از نقاط آغاز و پایان مورد جستجو قرار گیرد. فرض اینکه هر اشعه از m لبه محیطی تشکیل یافته باشد تعداد نقاط مورد آزمایش در هر اشعه از معادله زیر بدست می‌آید:

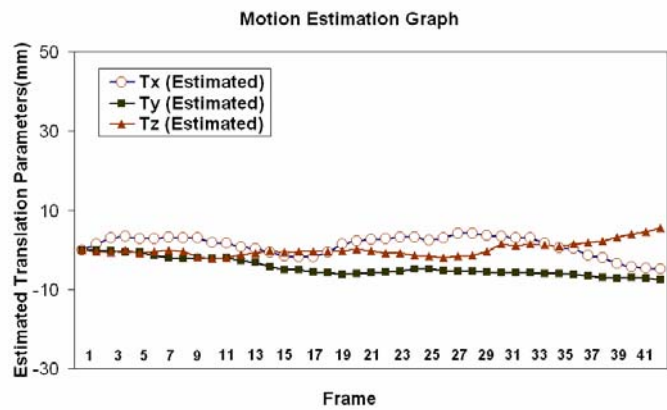
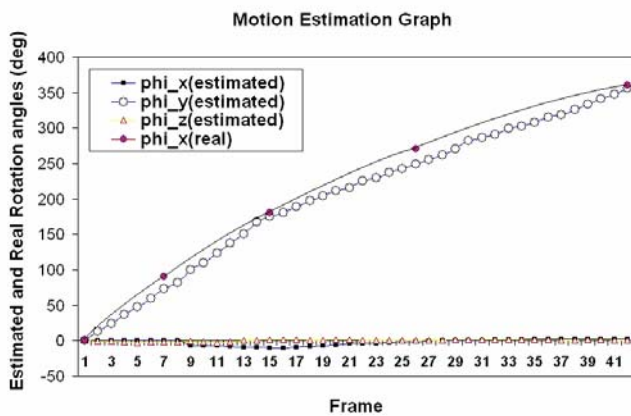
$$R_H(m) = n + 2m \cdot \log_r(R/n) \quad (26)$$

جهت مقایسه کمی الگوریتم سلسله مراتبی پیشنهادی با روش عادی، فرض کنید که هر اشعه از ۱۰۲۴ نقطه تشکیل یافته باشد. میزان کاهش تعداد نقطه مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بهترین حالت (برای جسم محدب) تعداد نقاط مورد آزمایش ۵۱/۲ برابر کاهش می‌یابد و در بدترین حالت موقعی که هر اشعه دارای سه لبه محیطی باشد این کاهش به ۱۶/۵ برابر می‌رسد. پس از استخراج پوسته قابل دید، عمل نگاشت رنگ به رویه سه بعدی به سادگی انجام می‌گیرد. هر نقطه واقع بر رویه سه بعدی به دوربین‌های مشاهده‌گر (دوربین‌هایی که نقطه توسط آنها دیده می‌شود) تاییده شده و رنگ آن از متوسط گیری رنگ این نقاط در تصاویر دو بعدی بدست می‌آید. برای اینکه مشخص شود یک نقطه از طریق دوربین قابل مشاهده می‌باشد یا نه، کافی است که وضعیت اشعه وصل کننده این نقطه به مرکز دوربین مورد نظر را مورد بررسی قرار دهیم. اگر چنانچه اشعه در فاصله بین این



شکل ۶: (الف) تابش اشعه به تصاویر نیمرخ جهت یافتن لبه‌های محیطی برای هر اشعه، (ب) روش سلسله مراتبی پیشنهادی، برای پیدا کردن ابتدا و انتهای هر لبه محیطی.

دوباره الگوریتم سلسله مراتبی برای یافتن انتهایی آن تکرار می‌شود. البته این روش فقط موقعی مناسب خواهد بود که لبه مرزی از یک قسمت تشکیل شده باشد (اشعه جسم را در ناحیه محدب قطع کند). برای مواردی که لبه‌های محیطی از دو یا چند قسمت تشکیل یافته باشد لازم است که دو یا چند نقطه آغاز-پایان مورد جستجو قرار گیرد. برای رفع مشکل بررسی نقاط به صورت درشت به ریز انجام می‌گیرد. یعنی نقاط روی اشعه ابتدا با گام بزرگتری مورد آزمایش قرار می‌گیرد و در صورت مشاهده تغییر رنگ، الگوریتم سلسله مراتبی جهت یافتن مختصات دقیق نقطه ابتدایی و انتهایی هر قسمت به کار گرفته می‌شود. آزمایش نقاط تا جایی صورت می‌گیرد که به انتهای اشعه برسیم. این مفهوم در شکل ۶- ب بوضوح نشان داده شده است. برای یافتن پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با روش معمولی فرض کنید: E_i تعداد نقاط واقع در مرز نیمرخ i ، R تعداد نقاط واقع در هر اشعه و S تعداد نیمرخ‌ها باشد. بدین ترتیب تمامی نقاط واقع بر رویه مخروطی متناظر با هر نیمرخ می‌بایست به سایر نیمرخ‌ها تاییده شود تا وضعیت نقاط از نکته نظر تعلق یا عدم تعلق به لبه‌های محیطی مشخص گردد. تعداد کل تبدیل‌های سه بعدی به دو بعدی عبارت است از



شکل ۷: تخمین حرکت سه بعدی با استفاده از نقاط منفرد واقع در رویه جسم.

جدول ۳: مقایسه عملکرد روش‌های موجود در استخراج مدل سه بعدی و روش پیشنهادی.

روش	روش تخمین حرکت	روش نیمرخ (تقاطع مخروطها)	روش ترکیبی پیشنهادی	
ندارد	ندارد	دارد	دارد	قابلیت استخراج مدل سه بعدی جسم با بافت کم
دارد	دارد	دارد	دارد	قابلیت استخراج مدل سه بعدی جسم با بافت زیاد
کم	کم	خیلی زیاد	کم	تعداد دوربین‌های مورد نیاز حساسیت در برابر عدم توازن نور و رنگ دوربینها
زیاد	زیاد	ندارد	بسیار کم	قابلیت ایجاد دوربین‌های مجازی
ندارد	ندارد	دارد	دارد	حجم سخت افزار مورد استفاده
کم	کم	خیلی زیاد	کم	دقت عمق استخراج شده برای نواحی با درجه تباین پائین
کم	کم	زیاد	زیاد	

می‌باشد برازش می‌شود. این منحنی با مقادیر حرکت بدست آمده از پیاده‌سازی الگوریتم تخمین حرکت مقایسه می‌گردد. نتایج آزمایش در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، مقدار تخمینی ϕ_y مقدار واقعی آن را با دقت خیلی خوبی دنبال می‌کند. مقادیر تخمینی ϕ_x و ϕ_z تقریباً برابر صفر هستند که با مقدار واقعی آنها کاملاً همخوانی دارد. همچنین مقادیر تخمینی T_x ، T_y و T_z بین ۵- تا ۵+ میلی متر تغییر می‌کند که در مقایسه با اندازه جسم یعنی ۲۰۰ میلی متر ناچیز به شمار می‌آید و خطای قابل قبولی است. البته مقداری از این خطا به دقت تنظیم دوربین‌ها بر می‌گردد که اجتناب ناپذیر می‌باشد. شکل ۸ نقشه عمق را برای مدل بازسازی شده مجسمه سگ، از روی تصاویر ویدیویی با ابعاد ۷۵۰×۶۰۳ نشان می‌دهد. در شکل ۸-الف عمق با استفاده از دو عدد دوربین و با روش تطبیق استریو استخراج گردیده است. در شکل ۸-ب نیز عمق با روش پیشنهادی و با استفاده از چهار عدد دوربین استخراج گردیده است. تعداد فریم‌های مورد استفاده در این روش ۴۲ عدد می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، روش استریو از خطای زیادی، مخصوصاً در نواحی با درجه تباین پائین، برخوردار است. ولی روش پیشنهادی با دقت بسیار بالاتری عمق را استخراج می‌نماید. همچنین در شکل ۹ مدل سه بعدی استخراج شده با روش پیشنهادی، بعد از نگاشت رنگ در زوایای مختلف نشان داده شده است. جدول ۲ زمان مصرفی در هر مرحله از بازسازی را نشان می‌دهد. پیاده‌سازی توسط کامپیوتر PC

جدول ۱: مقایسه تعداد نقاط مورد آزمایش در روش عادی و روش سلسله مراتبی به ازای ۱۰۲۴ نقطه بر روی هر اشعه.

m	n = ۲		n = ۸		n = ۱۶		n = ۳۲	
	R_H	R/R_H	R_H	R/R_H	R_H	R/R_H	R_H	R/R_H
۱	۲۰	۵۱/۲	۲۲	۴۶/۵	۲۸	۳۶/۶	۴۲	۲۴/۴
۲	-	-	۳۶	۲۸/۴	۴۰	۲۵/۶	۵۲	۱۹/۷
۳	-	-	-	-	۵۲	۱۹/۷	۶۲	۱۶/۵

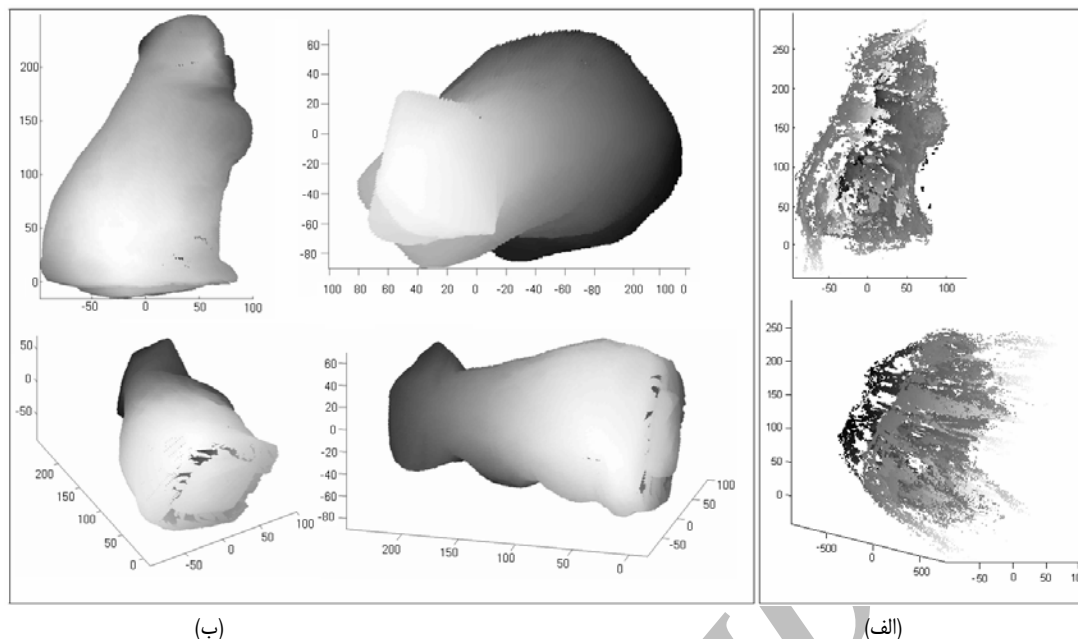
جدول ۲: مدت زمان تقریبی برای هر مرحله از بازسازی پوسته قابل دید.

نام مرحله	زمان محاسباتی برای هر فریم تصویری (ثانیه)
حذف پس‌زمینه	۱/۴
استخراج نقاط ویژگی	۱/۹
تطبیق نقاط ویژگی	۰/۷
تخمین حرکت	۲/۸
نام مرحله	زمان محاسباتی کل (ثانیه)
تقاطع مخروطها	۶۰
نگاشت رنگ	۳/۵۵

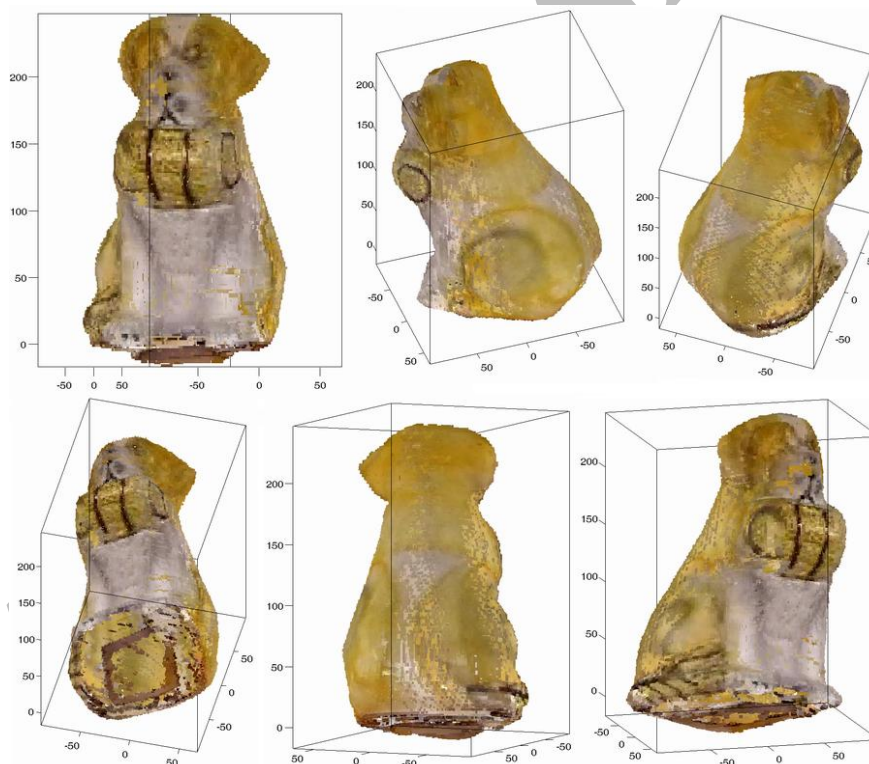
دو نقطه رویه سه بعدی را مجدداً قطع کند، نقطه قابل مشاهده نمی‌باشد و در غیر این صورت نقطه از طریق دوربین قابل مشاهده می‌باشد.

۶- نتایج آزمایش

برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در استخراج مدل سه بعدی، یک جسم واقعی مورد آزمایش قرار گرفت. بدین ترتیب که توسط ۴ عدد دوربین از یک مجسمه سگ که بر روی یک صفحه چرخان قرار داشت، فیلمبرداری شد. مهمترین خاصیت جسم انتخاب شده آنست که بخش اعظمی از رویه آن از درجه تباین پائینی برخوردار می‌باشد. همچنین در تصویر برداری جسم، دوربینها از نظر رنگ و شدت نور بصورت دقیق متوازن نشده اند. تفاوت رنگ و شدت نور در تصاویر اخذ شده توسط چهار دوربین در شکل ۴ کاملاً مشهود است. در فاصله زمانی چرخش به اندازه یک دور کامل، ۴۲ فریم تصویری از مجسمه گرفته شد. مرکز چرخش صفحه در حین تنظیم دوربین‌ها به عنوان نقطه مرجع انتخاب می‌گردد. بنابراین پارامترهای انتقال یعنی T_x ، T_y و T_z در حین چرخش صفر خواهد بود. جهت مشاهده میزان اعتبار الگوریتم تخمین حرکت با استفاده از نقاط منفرد، شماره فریم‌هایی که معادل چرخش صفحه به اندازه ۰ و ۹۰ و ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ درجه می‌باشند، ثبت می‌گردد. با استفاده از درون‌یابی، یک منحنی که بیانگر حرکت زاویه‌ای جسم در طول زمان



شکل ۸: نقشه عمق مدل بازسازی شده مجسمه سگ از زاویه‌های مختلف، (الف) با روش تطبیق استریو، (ب) با روش ترکیبی پیشنهادی که در آن از ۴ عدد دوربین استفاده شده و تعداد فریم‌های مورد استفاده در هر دوربین ۴۲ عدد می‌باشد.



شکل ۹: پوسته قابل دید استخراج شده از تصاویر مجسمه سگ بعد از انجام عمل نگاشت رنگ. مدل بازسازی شده در زوایای مختلف نمایش داده شده است.

تنظیم بسیار دقیق در مرحله راه اندازی، عملاً در تطبیق نقاط متناظر دچار مشکل خواهد شد. روش تخمین حرکت نیز با توجه به اینکه ماهیتا از تطبیق نقاط متناظر در فریم‌های متوالی استفاده می‌کند، تمامی مشکلات روش تطبیق استریو را دارا می‌باشد. مضاف بر اینکه این روش به تغییرات شدت نور در اثر حرکت جسم و ایجاد سایه شدید حساس می‌باشد روش نیم‌رخ مشکلات مربوط به تطبیق استریو و تخمین حرکت را نداشته و می‌تواند برای استخراج مدل سه بعدی اجسام بدون بافت نیز، مورد استفاده قرار گیرد. لیکن این روش، وابستگی شدیدی به تعداد دوربین‌ها داشته و برای بازسازی دقیق مدل نیازمند استفاده از تعداد زیادی دوربین

با ۲/۴CPU GHz و ۵۱۲ M RAM و بکمک نرم افزار MATLAB[®] انجام گرفته است. جدول ۳ عملکرد روش‌های مختلف موجود در بازسازی مدل سه بعدی و روش پیشنهادی را، مورد مقایسه قرار داده و برتری روش پیشنهادی را از جنبه‌های مختلف نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. روش تطبیق استریو به دلیل ابهام در تطبیق نقاط متناظر برای نواحی کم بافت و نواحی با درجه تباین پائین، از استخراج عمق در این نواحی عاجز می‌باشد. این روش فقط برای نقاط با درجه تباین بالا می‌تواند عمق را با دقت خوب استخراج نماید. علاوه بر این تطبیق استریو حساسیت شدیدی به توازن نور و رنگ دوربین‌ها دارد و در صورت عدم

- [2] A. Bottino and A. Laurentini, "The Visual hull of smooth curved objects," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 12, pp. 1622-1632, Dec. 2004.
- [3] Y. Liu, G. Chen, N. Max, C. Hofsetz, and P. McGuinness, "Visual hull rendering with multi-view stereo," *Journal of WSCG.*, vol. 12, no. 1-3, pp. 261-268, Feb. 2004.
- [4] E. Boyer and J.-S. Franco, "A Hybrid approach for computing visual hulls of complex objects," in *Proc. of the 2003 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03)*, vol. 1, pp. 695-701, Jun. 2003.
- [5] S. Chang Pei, C. Wen Ko, and M. Shing Su, "Global motion estimation in model-based image coding by tracking tree-dimensional contour feature," *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 181-190, Apr. 1998.
- [6] K. Astrom and F. Kahl, "Motion estimation in image sequences using the deformation of apparent contours," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 21, no. 2, pp. 114-127, Feb. 1999.
- [7] G. Jiang, L. Quan, and H. Tat Tsui, "Circular motion geometry using minimal data," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 6, pp. 721-731, Jun. 2004.
- [8] G. K. M. Cheung, S. Baker, and T. Kanade, "Visual hull alignment and refinement across time: a 3D reconstruction algorithm combining shape from silhouette with stereo," in *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition 2003*, vol. 2, pp. 375-382, Jun. 2003.
- [9] R. Yang, M. Pollefeys, and G. Welch, "Dealing with texture less regions and specula highlights – A progressive space carving scheme using a novel photo-consistency measure," in *Proc 9th IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV 2003)*, vol. 1, pp. 576-584, Oct. 2003.
- [10] S. Baker, T. Sim, and T. Kanade, "A characterization of inherent stereo ambiguities," in *Proc. of the 8th Int. Conf. on Computer Vision*, vol. 1, pp. 428-435, Jul. 2001.
- [11] K. Kutulakos and S. M. Seitz, "A Theory of shape by space carving," *Int. Journal of Computer Vision (IJCV)*, vol. 38, no. 3, pp. 199-218, Jul. 2000.
- [12] H. Ebrahimnezhad and H. Ghassemian, "3D Model reconstruction by multiple-views feature based matching and silhouette information during time," in *Proc. of 13th Iranian Conf. on Electrical Engineering (ICEE2005)*, vol. 1, pp. 459-464, May 2005.
- [13] Q. Zang, R. Klette, "Robust background subtraction and maintenance," in *Proc. of the 17th Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR 2004)*, vol. 2, pp. 90-93, Aug. 2004.
- [14] L. Li, W. Huang, I. Yu-Hua Gu, and Q. Tian, "Statistical modeling of complex backgrounds for foreground object detection," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 13, no. 11, pp. 1459-1472, Nov. 2004.
- [15] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 1, pp. 1330-1334, Nov. 2000.
- [16] H. Ebrahimnezhadi and H. Ghassemian, "3D model reconstruction through a silhouette based hierarchical method," in *Proc. of 10th CSICC2005*, vol. 2, pp. 40-47, Feb. 2005.

حسین ابراهیم نژاد صدیق کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در مهندسی الکترونیک از دانشگاه تبریز و مهندسی مخابرات گرایش سیستم از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی در سالهای ۱۳۷۲ و ۱۳۷۵ دریافت کرد. وی هم اکنون در مقطع دکترای مهندسی مخابرات (گرایش سیستم) دانشگاه تربیت مدرس مشغول به تحصیل است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه او، مدل‌سازی سه بعدی، بینایی ماشین، شناسایی الگو و پردازش تصویر می‌باشد.

محمدحسن قاسمیان یزدی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی مخابرات از دانشکده مخابرات در سال ۱۳۵۹ به اتمام رساند. از ۱۳۵۹ تا ۱۳۶۲ در مرکز تحقیقات مخابرات ایران به تحقیق مشغول بود. وی در ۱۳۶۳ و ۱۳۶۷ مدرک کارشناسی ارشد و دکترای خود را در رشته مهندسی مخابرات از دانشگاه Purdue آمریکا دریافت کرد. وی هم اکنون استاد بخش مهندسی برق دانشگاه تربیت مدرس است. برخی از زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش و تحلیل تصاویر چند منبعی، شناسایی الگو و پردازش اطلاعات، مهندسی سیستم‌های سنجش از دور، پردازش سیگنالها و تصاویر پزشکی.

می‌باشد که عملاً مشکلات سخت افزاری انتقال تصویر و پردازش توسط سیستم مرکزی را ایجاد می‌نماید. در روش پیشنهادی مشکلات فوق الذکر به طور فزاینده‌ای کاهش یافته و استخراج مدل سه بعدی اجسام با بافتهای مختلف با دقت بسیار زیادی قابل استخراج خواهد بود. روش پیشنهادی با بهره گیری از قیود مختلف یعنی استفاده از نقاط با درجه تباین بالا در نواحی لبه و استخراج نقاط منفرد در این نواحی، به استخراج بسیار دقیق عمق برای این نقاط می‌پردازد. این نقاط بدلیل برخورداری از گردیان نور و رنگ بالا، حساسیت کمتری به توازن نور و رنگ و همچنین تغییرات نور و رنگ در اثر تغییر زاویه تابش نور داشته و براحتی می‌توان عمل تطبیق را برای آنها انجام داد. علاوه بر این در روش پیشنهادی با تخمین دقیق حرکت با استفاده از نقاط منفرد می‌توان از خاصیت دوربین‌های مجازی در زمان حرکت جسم صلب بهره جست و با تعداد دوربین‌های کمتری روش تقاطع مخروطهای حاصل از نیمرخ‌ها را پیاده نمود. جهت مقایسه عددی، استخراج مدل سه بعدی در شکل ۹ با روش پیشنهادی توسط ۴ عدد دوربین در ۴۲ فریم متوالی صورت گرفته است. در حالیکه برای استخراج همین مدل با روش نیمرخ با کیفیت مشابه $4 \times 42 = 168$ عدد دوربین مورد نیاز خواهد بود. روش پیشنهادی برای استخراج مدل سه بعدی هر نوع جسمی با میزان بافت ساده یا پیچیده قابل پیاده سازی می‌باشد و فقط برای اجسام بدون بافت که دارای رنگ ثابت باشند قابل استفاده نمی‌باشد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش کارآمد جهت بازسازی پوسته قابل دید جسم صلب، با ادغام ویژگی‌های سه روش نیمرخ، تخمین حرکت و تطبیق استریو ارائه گردید. الگوریتمی جهت بهینه سازی فرآیند حذف پس‌زمینه و به حداقل رساندن اثر سایه پیشنهاد گردید که در آن از رشد ناحیه برای نقاط همسایگی با تفاضل رنگ پائین استفاده می‌شد. روشی مبتنی بر تطبیق چند دوربینی در لبه‌های تصویر برای استخراج مختصات سه بعدی تعدادی از نقاط ویژگی (نقاط منفرد) متعلق به رویه جسم پیشنهاد گردید. ملاحظه شد که این روش با اعمال قیود مختلف، تخمین عمق را در مقابل عدم توازن رنگ و نور دوربین‌ها و تغییر زاویه تابش منبع نور، مقاوم می‌کند. پس از استخراج عمق نقاط منفرد، از آنها جهت تخمین میزان حرکت در فریم‌های بعدی استفاده گردید. مفهوم جدیدی تحت عنوان دوربین مجازی تعریف شد. با مشخص شدن حرکت جسم صلب در هر فریم و با تولید دوربین‌های مجازی امکان افزایش تعداد نیمرخ‌ها در طول زمان میسر گردید. با افزایش تعداد نیمرخ‌ها امکان بازسازی پوسته قابل دید بصورت دقیق فراهم آمد. در نهایت، یک الگوریتم سلسله مراتبی جهت افزایش سرعت استخراج پوسته قابل دید جسم با استفاده از تقاطع مخروطهای وابسته به هر نیمرخ پیشنهاد گردید. نتایج نشان می‌دهد که با بهره گیری از ادغام ویژگی‌های سه روش نیمرخ، تخمین حرکت و تطبیق استریو می‌توان علاوه بر اجسام با مشخصات بافتی زیاد، مدل سه بعدی یک جسم با مشخصات بافتی کم را نیز با دقت بسیار بالائی استخراج نمود.

مراجع

- [1] A. Bottino and A. Laurentini, "Introducing a new problem: shape-from-silhouette when the relative positions of the viewpoints is unknown," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 25, no. 11, pp. 1484-1492, Nov. 2003.