

بخش‌بندی معنادار مدل سه‌بعدی اجسام براساس استخراج برجستگی‌ها و هستهٔ جسم

مهمسا میرلو و حسین ابراهیم‌نژاد

آزمایشگاه تحقیقاتی بینایی کامپیوتر، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده

بخش‌بندی مدل‌های سه‌بعدی، نقش مهمی در پردازش این مدل‌ها از جمله بازیابی، فشرده‌سازی و نهان‌نگاری مدل‌های سه‌بعدی دارد. در این مقاله روش جدیدی برای بخش‌بندی مدل‌های سه‌بعدی براساس استخراج نقاط برجسته ارائه شده است. تحقیقات علوم شناختی، تجزیه جسم سه‌بعدی به بخش‌های ساده‌تر را به عنوان یکی از راه‌های تحلیل و تشخیص اجسام سه‌بعدی توسط انسان معرفی کرده است. بر این اساس بخش‌های حاصل از تجزیه جسم سه‌بعدی، به دو دسته کلی هسته و بخش‌های برجسته تقسیم می‌شوند. در روش پیشنهادی، ابتدا مرکز ثقل مدل سه‌بعدی محاسبه می‌شود؛ سپس نقطه‌ای با پیش‌ترین فاصلهٔ اقلیدسی از مرکز مدل به عنوان نقطه برجسته که نمایندهٔ بخش برجسته‌ای از مدل است، انتخاب و همسایگی ژئوزیکی آن از مجموعه جستجوی نقاط برجسته حذف می‌شود. این فرآیند تا یافتن تمام بخش‌های برجستهٔ ادامه می‌یابد. سپس هستهٔ مدل به عنوان قسمتی که سایر بخش‌های برجسته را به یکدیگر متصل می‌کند، شناسایی شده و بدین ترتیب بخش‌بندی مدل سه‌بعدی صورت می‌پذیرد. معرفی مرکز ثقل مدل سه‌بعدی توسط انتخابی از مجموعه جستجوی نقاط، باعث مقاومشدن الگوریتم پیشنهادی در برابر تبدیلات جایه‌جایی، چرخش و تغییر وضعیت مدل و همچنین باعث افزایش سرعت اجرای الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌ها شده است.

وازگان کلیدی: بخش‌بندی، مدل‌های سه‌بعدی، فاصله ژئوزیک، نقاط برجسته، هسته.

۱- مقدمه

استفادهٔ فراگیر از مدل‌های سه‌بعدی در عرصه‌های مختلف توجه پژوهش‌گران را برای ارائه الگوریتم‌های پردازش این مدل‌ها به خود جلب کرده است. در حال حاضر الگوریتم‌های بخش‌بندی مدل‌های سه‌بعدی، دستهٔ پرکاربردی از الگوریتم‌های پردازش این مدل‌ها هستند.

الگوریتم‌های بخش‌بندی به دو دستهٔ کلی بخش‌بندی مبتنی بر ویژگی هندسی و بخش‌بندی مبتنی بر معنا تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌های مبتنی بر ویژگی هندسی، بخش‌هایی از مدل سه‌بعدی را که در شرایط مشابه هندسی قرار دارند، در یک دسته قرار می‌دهند. این ویژگی هندسی می‌تواند بیان‌گر شکل محلی مانند قطر متوسط و یا ویژگی ساختاری مانند گراف ریب باشد. این دسته بیشتر به عنوان مرحلهٔ

پیش‌پردازش سایر الگوریتم‌های پردازشی مانند فشرده‌سازی Ai, Liu (Cheng, Kuo et al., 2010)، بازیابی و نهان‌نگاری (2009) (et al.) به کار می‌روند. دستهٔ دیگر از الگوریتم‌های بخش‌بندی که مبتنی بر معنا هستند، ریشه در مطالعهٔ درک انسان دارند. بسیاری از تحقیقات با آزمودن درک بصری بشر نشان داده‌اند که بازیابی و درک انسان از اشکال مختلف، مبتنی بر تجزیهٔ ساختار آن به قسمت‌های ساده‌تر است. براساس این نتایج، روش‌های بخش‌بندی مبتنی بر معنا، شیء سه‌بعدی را به قسمت‌هایی که به لحاظ ظاهری معنادار هستند، تجزیه می‌کنند. این دسته در زمینه‌هایی مانند حاشیه‌نویسی (Attene, Robbianco et al., 2009) و مسائل مرتبط با وظیفه کاربرد دارند. این تقسیم‌بندی براساس هدف و نتیجه به دست آمده از الگوریتم بخش‌بندی صورت می‌پذیرد. به عنوان مثال در (Shlafman, Tal et al., 2002)

الگوریتم تنها مدل‌های سه‌بعدی صنعتی CAD را به‌خوبی بخش‌بندی می‌کند و برای مدل‌های طبیعی مانند مدل‌های انسان، حیوانات و انسیمیشن کارآمد نخواهد بود.

ما در الگوریتم پیشنهادی روشی را ارائه می‌کنیم که نسبت به تبدیلات صلب و مقادیر مختلف نویسه‌گوسی جمع‌شونده پایدار بوده و با داشتن پیچیدگی محاسباتی پایین، زمان اجرای آن نسبت به سایر الگوریتم‌ها کمتر است. علاوه‌بر این، روش پیشنهادی قابلیت به کارگیری در محدوده گسترده‌ای از مدل‌های سه‌بعدی را دارد.

۲- روش پیشنهادی

در این بخش ابتدا مفاهیم اولیه پردازش مدل‌های سه‌بعدی و مفهوم بخش‌بندی و سپس قسمت‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی شرح داده می‌شود.

۱-۲- مفاهیم اولیه

رویه مرزی سه‌بعدی M به صورت چندتایی $S = \{V, E, F\}$ تعریف می‌شود که از رئوس V (مجموعه نقاط تشکیل‌دهنده مدل)، یال‌های E (نحوه اتصال رئوس به یکدیگر) و وجود F (رویه‌های به وجود آمده از این اتصالات) تشکیل یافته است، به طوری که:

(۱)

$$V = \{p_i \mid p_i \in R^3, 1 \leq i \leq m\}$$

(۲)

$$E = \{e_{ij} = (p_i, p_j) \mid p_i, p_j \in V, i \neq j\}$$

$$F = \{f_{ijk} = (p_i, p_j, p_k) \mid p_i, p_j, p_k \in V, i \neq j \neq k\} \quad (3)$$

m تعداد رئوس مدل است. وجود F به‌طور معمول به صورت مثلث در نظر گرفته می‌شوند، هرچند می‌توان از شکل‌های دیگری مانند مربع و چندضلعی‌ها هم استفاده کرد. عبارت رویه مرزی برای تمایز این دسته رویه‌ها از رویه‌های سه‌بعدی حجمی استفاده شده است. محدودیت‌های بسیاری روی روابط بین عناصر مختلف رویه (رئوس، یال‌ها و وجود) دارد که نمایش‌های معتبری را سازمان‌دهی می‌کنند. شکل (۱) نمونه‌ای از بیان مدل سه‌بعدی با استفاده از رویه مرزی است.

ترکیب دو ویژگی هندسی فاصله اقلیدسی و فاصله زاویه‌ای برای بخش‌بندی مدل‌ها به عنوان مرحله پیش‌پردازش الگوریتم دگردیسی استفاده شده است. این نوع بخش‌بندی برای یک مدل تنها، نتایج قابل قبولی به دست می‌دهد، اما به دلیل تغییرات قابل ملاحظه ویژگی‌های استفاده شده، هنگام تغییر وضعیت مدل در اثر تبدیلات صلب، این الگوریتم بخش‌بندی، پایدار نخواهد بود. منظور از تغییر وضعیت، حالت‌های مختلف از مدل است. به عنوان مثال حالات‌های نشستن، ایستان و دویدن وضعیت‌های مختلفی از مدل سه‌بعدی انسان است. منظور از پایداری الگوریتم بخش‌بندی نسبت به تغییر وضعیت، این است که نتیجه بخش‌بندی در تمامی این حالت‌ها یکسان باشد. در مدل انسان، دست‌ها، پاها، سر و تنه باید به صورت یکسان از هم تفکیک شده باشند. زاویه بین اجزای بدن با یکدیگر یکی از ویژگی‌هایی است که در وضعیت‌های مختلف مقادیر متفاوتی دارد و فاصله ژئودزیک نقاط از هم که به صورت کمترین فاصله روی سطح در نظر گرفته می‌شود، ویژگی مقاوم در Shapira, Shamir et al., (2008) از ویژگی هندسی قطر متوسط شکل به منظور بخش‌بندی معنادار مدل‌های سه‌بعدی استفاده شده است. این الگوریتم پایداری بسیار خوبی دارد؛ اما قادر به جداسازی بخش‌های مجزا با قطر یکسان نیست. به عنوان مثال هر دو دست مدل انسان را متعلق به یک دسته می‌داند، در حالی که دو بخش مستقل هستند. در (Simari, Kalogerakis et al., 2006) بخش‌بندی مدل‌های سه‌بعدی براساس صفات تقارن آنها صورت پذیرفته است. واضح است که این روش برای مدل‌های نامتقارن کارساز نخواهد بود. روش معرفی شده در (Agathos, Pratikakis et al., 2010) شباهت‌هایی با روش پیشنهادی داشته و از این رو در بخش بررسی نتایج مورد مقایسه با الگوریتم پیشنهادی واقع شده است. این الگوریتم نیز رویه برای استخراج بخش‌هایی بر جسته معرفی کرده و از پایداری خوبی نیز برخوردار است؛ اما باز محاسباتی بالایی نسبت به روش پیشنهادی داشته و محدودیت نسبتاً سنگینی در انتخاب مدل‌ها اعمال می‌کند. این الگوریتم به دلیل استفاده از کانتورها قابل استفاده برای مدل‌هایی که شکافی روی سطح خود دارند، نیست. الگوریتم معرفی شده در (Wang and Yu, 2011) که با استخراج ویژگی‌های سطحی رویه به بخش‌بندی مدل‌های سه‌بعدی می‌پردازد، مدل‌ها را به قسمت‌های تخت، مقاطع کوادراتیک و بی‌شكل تقسیم می‌کند. با توجه به تقسیم‌بندی انجام شده، این

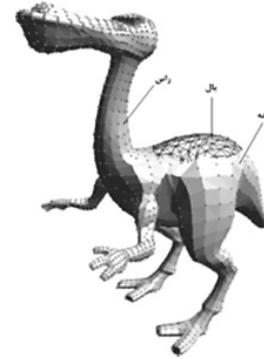
فصل نهم



$$\begin{aligned}x_c &= \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \\y_c &= \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \Rightarrow V_{center} = (x_c, y_c, z_c) \\z_c &= \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{N}\end{aligned}\quad (4)$$

V_{center} مرکز مدل به مختصات x_c, y_c, z_c است

که N تعداد کل رئوس تشکیل دهنده مدل و x_i, y_i, z_i مختصات رأس i ام رویه مدل هستند. مرکز مدل، نقطه‌ای است که همواره در داخل بخش هسته‌ای بوده و دوری و نزدیکی رئوس مدل از آن، مشخصه خوبی برای تفکیک بخش‌های برجسته است. از آنجا که بارزترین ویژگی نقاط برجسته دوربودن آنها از سایر نقاط است، در نتیجه دور بودن آنها نسبت به دیگر نقاط از نقطه مرجع معیار خوبی برای شناسایی آنها خواهد بود. انتخاب مرکز مدل به عنوان نقطه مرجع با روش گفته شده و با توجه به این که موقعیت آن نسبت به سایر رئوس، در اثر تبدیلات انتقال، چرخش و تغییر مقیاس ثابت است، الگوریتم را نسبت به چنین تبدیلاتی مقاوم می‌سازد.



(شکل-۱): نمونه‌ای از نمایش رویه مرزی سه‌بعدی (Shamir, 2008)

با توجه به تعاریف بالا، بخش‌بندی رویه به صورت زیر خواهد بود (Shamir, 2008): با داشتن رویه مرزی سه‌بعدی M و مجموعه عناصر S متناظر به آن که می‌تواند شامل V , E و یا F باشد، بخش‌بندی رویه که با نماد \sum نشان داده می‌شود، مجموعه‌ای از زیررویه به صورت: $\sum_{k=1}^{M_0, K} M_k$ خواهد بود که با افزایش S به k زیرمجموعه جدا از هم به وجود آمده است.

همان‌طور که گفته شد، S می‌تواند شامل رئوس، یال‌ها و یا وجه‌ها باشد و تجزیه S منجر به بخش‌بندی M می‌شود. الگوریتم‌های بخش‌بندی به طور معمول وجه‌های رویه را قطعه‌بندی می‌کنند ($S=F$)، برخی از آن‌ها رئوس را بخش‌بندی کرده ($S=V$) و تعداد کمی از آن‌ها یال‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهند ($S=E$). در الگوریتم پیشنهادی، مجموعه رئوس برای استخراج ویژگی و بخش‌بندی مورد توجه قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های بخش‌بندی به طور معمول از دو مرحله متوالی تشکیل می‌شوند. در مرحله اول ویژگی‌های مورد نظر از رویه استخراج و در مرحله دوم قسمت‌های مختلف مدل بر اساس ویژگی‌های استخراج شده به دسته‌های مشخص و جدا از هم تقسیم می‌شوند. مرحله استخراج ویژگی در الگوریتم پیشنهادی شامل محاسبه مرکز مدل، استخراج نقاط برجسته و تعیین نقطه مناسبی به نمایندگی از بخش هسته مدل است.

۲-۲- استخراج مرکز مدل

قدم اول در این الگوریتم یافتن مرکز مدل است که با میانگین گرفتن از رئوس مدل به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$D = [Dist(V_{center}, V_i)]_{N \times 1} \quad (5)$$

فاصله رأس i ام از مرکز مدل بوده و $Dist(V_{center}, V_i)$

این امر شرایط هندسی حاکم بر مجموعه رئوس است. مکان هندسی نقاطی از فضای سه بعدی که از یک نقطه فاصله یکسانی دارند، به صورت کره هایی حول نقطه مورد نظر است. درنتیجه هر چه این نقاط، که در اینجا برجستگی های استخراج شده هستند، از یکدیگر دورتر باشند فصل مشترک این کره ها کمتر بوده و جداسازی قسمت های مختلف در این شرایط، تنها با اعمال محدودیت فاصله اقلیدسی انجام می شود؛ اما این روش پایداری بسیار ضعیفی دارد؛ زیرا با تغییر وضعیت مدل، فاصله اقلیدسی نقاط مختلف تغییرات بسیاری نسبت به هم خواهد داشت؛ در نتیجه مجموعه $V_{neighbourhood}$ با استفاده از اشتراک همسایگی اقلیدسی و ژئودزیکی نقطه برجسته تعیین شده، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_{neighbourhood} = \{V_j \in V \mid D_{Geodesic}(V_{1_salient}, V_j) \leq r\} \quad (9)$$

طبق این رابطه، مجموعه همسایگی $V_{neighbourhood}$ زیرمجموعه ای از مجموعه رئوس V است؛ به طوری که فاصله ژئودزیکی تمام رئوس آن از نقطه $V_{1_salient}$ ، کمتر یا مساوی ضریبی از شعاع همسایگی اقلیدسی باشد. فاصله $D_{Geodesic}(V_{1_salient}, V_j)$ بیان گر فاصله ژئودزیکی بین V_j و $V_{1_salient}$ نشان دهنده شعاع همسایگی است. فاصله ژئودزیک به صورت کوتاه ترین فاصله بین دو نقطه رویه تعریف می شود و برای محاسبه آن چندین روش دقیق و تقریبی وجود دارد که در این مقاله از روش دیکسترا (Kanai and Suzuki 2001) استفاده شده است. برای یافتن یک مسیر با کوتاه ترین فاصله از نقطه مفروضی در رویه، فاصله تمامی رئوس همسایه نقطه مورد نظر را از آن محاسبه کرده و در راستای کوتاه ترین فاصله شروع به پیش روی می کنیم. چنانچه تمام مسیرهای ممکن از یک نقطه را مورد بررسی قرار دهیم، مطابق شکل (۲) فاصله ژئودزیک نقطه مورد نظر از تمام رئوس بر رویه به دست خواهد آمد. برای نمایش و درک بهتر این فاصله، کمترین فاصله از نقطه مورد نظر با رنگ آبی و بیشترین فاصله با رنگ قرمز مشخص شده و دیگر فواصل، طیف رنگ بین این دو مقدار را به خود گرفته است. برای نمونه، چند مسیر رویه که نشان دهنده فاصله ژئودزیک بین چند نقطه و نقطه مورد نظر است با خطوط مشکی رنگ مشخص شده است.

طبق تعریف فاصله اقلیدسی با رابطه (۶) محاسبه می شود:

(۶)

$$Dist(V_{center}, V_i) = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}$$

بدین ترتیب نقطه ای که بیشترین فاصله از مرکز را دارد طبق رابطه (۷) به عنوان اولین نقطه برجسته با نام $V_{1_salient}$ انتخاب می شود.

$$V_{1_salient} = \{V_j \in V \mid j = \arg(\max(D))\} \quad (7)$$

نقاطی که در همسایگی $V_{1_salient}$ قرار دارند در فاصله ای نزدیک به فاصله $\max(D)$ از مرکز مدل هستند، برای پرهیز از یافتن نقاط برجسته تکراری در یک ناحیه برجسته، نقاط همسایگی $V_{1_salient}$ از دامنه جستجوی نقاط حذف می شوند. بدین ترتیب مجموعه جستجوی نقاط از مجموعه کل رئوس مدل (V) به مجموعه V_{search_domain} به صورت رابطه (۸) کاهش می یابد:

$$V_{search_domain} = V - V_{neighbourhood} \quad (8)$$

نکته قابل تأمل در به دست آوردن همسایگی نقطه $V_{1_salient}$ یعنی مجموعه $V_{neighbourhood}$ این است که ممکن است نقاط برجسته مدل به لحاظ فاصله اقلیدسی به یکدیگر نزدیک باشند؛ اما هر یک به بخش برجسته متفاوتی تعلق داشته باشند؛ مانند نوک انگشتان یک دست که در شعاع کوچکی از همسایگی با فاصله اقلیدسی از هم قرار دارند، اما فاصله آنها رویه مدل از یکدیگر نشان دهنده دوربودن آنها از هم دیگر است و تعلق آنها به بخش های مجرزا را سبب می شود. در نتیجه، پیدا کردن این همسایگی باید به نحوی باشد که دو شرط زیر را برآورده سازد:

I) مانع انتخاب نقطه برجسته دیگری از یک بخش برجسته شود.

II) نقطه برجسته قسمت های دیگر وارد این همسایگی نشود.

شرط اول محدودیت فاصله اقلیدسی و شرط دوم محدودیت فاصله ژئودزیکی نقاط از $V_{1_salient}$ را بیان می کند. البته لازم به ذکر است که بخش بندی مدل هایی که قسمت های برجسته آنها فاصله اقلیدسی بالایی دارند، تنها با شرط اول امکان پذیر است (Chiang and Kuo, 2012). دلیل

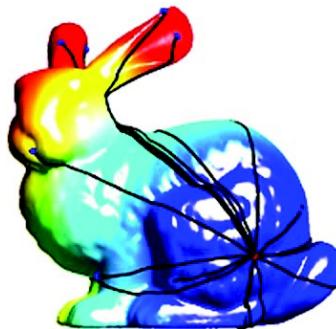
فصل نهم
فصل نهم



مدل بستگی به توبولوژی آن دارد. درنتیجه، مقادیر مختلفی برای مدل‌های کلاس‌های مختلف و مقادیر یکسانی برای مدل‌های متعلق به کلاس بکسان دارد. یکی از راه‌های تعیین مقادیر α و k ، مقداردهی آنها به صورت دستی توسط کاربر است (مهسا میرلو و حسین ابراهیم‌نژاد، شهریور ۱۳۹۲؛ مهسا میرلو و حسین ابراهیم‌نژاد، اسفند ۱۳۹۲). این مقادیر معین که در ابتدای بخش‌بندی مدل‌های مربوط به یک کلاس در اختیار الگوریتم قرار داده می‌شود، در واقع بخشی از دانش انسانی است که برای هوشمندسازی بینایی ماشین آلات در اختیار الگوریتم گذاشته می‌شود تا بخش‌بندی توسط الگوریتم، مشابه بخش‌بندی ذهن انسان شود؛ اما این روش از نظر معیارهای ارزیابی الگوریتم‌های بخش‌بندی (Attene et al., 2006؛ Katz et al., 2006) روش مناسبی نیست؛ چرا که خودکار بودن الگوریتم از بین می‌رود. روش خودکاری که در این مقاله برای تعیین k در نظر گرفته شده، استفاده از نامساوی (۱۴) است. تازمانی که این نامساوی برقرار است، حلق، یافتن نقاط بر جسته ادامه داشته و هر بار رأس جدیدی به عنوان نقطه بر جسته تعیین و به مقدار k اضافه می‌شود.

$$\frac{\min[Dist(V_{\text{search_domain}}, V_{\text{center}})]}{\max[Dist(V_{\text{search_domain}}, V_{\text{center}})]} \leq 0.5 \quad (14)$$

در شکل (۴)، روش پیشنهادی روی مدل‌های سه‌بعدی از دو NTU (Siddiqi, Zhang et al., 2008) McGill (McGill, Chen, Tian et al., 2003) پایگاه داده است. در این شکل در ستون راست، مدل‌های سه‌بعدی مورد نظر به نمایش گذاشته شده‌اند. در سه ستون وسط، نتیجه بخش‌بندی مدل‌ها با ضرایب متفاوت شعاع همسایگی نمایش داده شده است. در ستون سمت چپ، نقاط بر جسته که با اعمال α مناسب به دست آمده، مشاهده می‌شود. تغییرات مقدار پارامتر α به طور تقریبی روی همه مدل‌های پایگاه داده McGill مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان نمونه، نتیجه بررسی‌ها روی چند مدل در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که ذکر شد، مقدار α در بازه [۰.۵, ۱] تغییر کرده و تغییرات در این بازه نتیجه بخش‌بندی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آزمایش‌ها حاکی از این است که مقادیر کمتر از ۰.۵ و بیشتر از ۱ هیچ تغییری نسبت به $\alpha = 0.5$ را ایجاد نمی‌کنند. برای مدل‌هایی که نقاط بر جسته دور از هم دارند α بزرگتر و برای مدل‌هایی که نقاط بر جسته نزدیک به هم دارند α کوچکتر به جواب مناسب



(شکل - ۲): نمودار فاصله ژئودزیک از نقطه مشخص

برای دو رأس داده شده V_i و V_j یک مسیر $R(V_i, V_j)$ از V_i به V_j به صورت یکسری مرتب شده از رؤوس ($V_{r(1)}, \dots, V_{r(k)}$) تعریف می‌شود که از قیود رابطه (۱۰) پیروی می‌کند:

$$V_{r(1)} \equiv V_i \\ V_{r(k)} \equiv V_j \\ V_{r(h)} \text{ is adjacent to } V_{r(h+1)}, \forall h \in \{1, \dots, k-1\} \quad (10)$$

برای یک مسیر کلی ($R(V_i, V_j)$) طول آن با محاسبه مجموع فواصل اقلیدسی جفت رؤوس مجاور به دست می‌آید:

$$L(R(V_i, V_j)) = \sum_{h=1}^{k-1} d_E(V_{r(h)}, V_{r(h+1)}) \quad (11)$$

بر اساس مفروضات بالا، فاصله ژئودزیک بین دو رأس با عبارت زیر تقریب زده می‌شود:

$$\mu(V_i, V_j) = \min_R(L(R(V_i, V_j))) \quad (12)$$

در رابطه (۹) به صورت ضریبی از همسایگی اقلیدسی به شکل رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

$$r = \alpha \cdot Dist(V_{\text{salient}}, V_{\text{center}}) \quad (13)$$

α ضریبی است که به صورت تجربی به دست آمده و برای مدل‌های متعلق به کلاس‌های مختلف در بازه [۰.۵, ۱] تغییر می‌کند. پس از به دست آوردن دامنه جستجوی جدید، بر جستگی بعدی به همان ترتیب با در نظر گرفتن نقطه‌ای که در دامنه جستجوی جدید بیشترین فاصله را از مرکز مدل دارد، انتخاب می‌شود. این حلقه تا به دست آوردن تمام نقاط بر جسته ادامه می‌یابد. تعداد نقاط بر جسته (k) در هر

نقاط بر جسته با مناسب	نتیجه بخش بندی با روش پیشنهادی				مدل سه بعدی
	K=9, $\alpha=0.5$	K=9, $\alpha=0.99$	K=9, $\alpha=0.7$	K=9, $\alpha=0.5$	
Morph Shading					
Sheep					
Lamb					
Dolphin					

(شکل - ۳): بررسی تغییرات پارامترهای کنترلی

تقریبی یکسان بوده و تنها یک نقطه بر جسته برای هر بخش در نظر گرفته می شود، اما حذف همسایگی ها و استفاده از محاسبات ماتریسی در روش پیشنهادی این مقاله، پیچیدگی محاسباتی و زمان اجرای الگوریتم را به شدت کاهش داده و آن را به گزینه مناسبی جهت استفاده در کاربردهای مختلف منند اینیمیشن و مدل های پویا^۱ تبدیل کرده است.

۴-۲- تقریب هسته

پس از حذف بخش های بر جسته از مجموعه جستجوی نقاط، نقطه بعدی با بیشینه فاصله از مرکز مدل، نقطه ای روی هسته خواهد بود. بدین ترتیب، این نقطه می تواند به عنوان نماینده هسته مدل در نظر گرفته شود؛ اما نتایج شبیه سازی حاکی از این است که با انتخاب نماینده هسته به این شیوه، هسته مدل به گونه ای بدست می آید که با تعریف آن به عنوان بخشی که قسمت های بر جسته را به هم وصل می کند مغایرت دارد و برخی قسمت های بر جسته بدون کمک هسته، به طور مستقیم به یکدیگر متصل می شوند. یک دیگر از گزینه های ممکن برای یافتن نقطه ای به نمایندگی از هسته مدل، یافتن نقطه ای روی رویه است که کمینه فاصله

منتهی می شود. در نظر گرفتن یک مقدار میانه ثابت برای α که کمی بیش از مقادیر کوچک و اندکی کمتر از مقادیر بزرگ است، مرزها را در حدی جایه جا می کند که این جایه جایی در مقابل مزبت ثابت بودن پارامتر α و عدم تعیین آن توسط کاربر که باعث خود کارشناسی الگوریتم می شود، قابل صرف نظر کردن است. مرکز مدل با مثلث قرمزرنگ و نقاط بر جسته با مربع های سبزرنگ علامت گذاری شده است. این نقاط بدسترسی در تمام مدل ها محاسبه شده و اجزای معناداری را بیان می کنند. در سطر اول، پاهای بدن و تکه و شاخک های مدل مورچه؛ در سطر دوم، سر، بدن و پایه مهره شترنج و در سطر سوم، پاهای سر، بدن و دم مدل سگ بدسترسی تشخیص داده شده و به بخش های مجزا تقسیم شده اند. سطر چهارم نمونه ای از مدل هایی است که به دلیل دوربودن نسبی اجزای بر جسته از یکدیگر میزان موفقیت الگوریتم پیشنهادی به صورت چشم گیرتری قابل ملاحظه است. دلیل این موفقیت این است که مکان هندسی نقاطی از فضای سه بعدی که از یک نقطه فاصله یکسانی دارند به صورت کره هایی حول نقطه مورد نظر است. در نتیجه هر چه این نقاط (بر جستگی های استخراج شده) از یکدیگر دورتر باشند، فصل مشترک کره ها کمتر بوده و جداسازی قسمت های مختلف راحت تر انجام می شود. در سطر آخر نیز مدل دلفین به بخش های معنادار سر، باله فوقانی، دم و بدن تقسیم بندی شده که بدن آن به دلیل داشتن دو باله کناری که به عنوان نقاط بر جستگی شناسایی می شوند؛ به دو قسمت تقسیم شده است. قسمت نارنجی رنگ از زاویه دید نشان داده شده، یک باله کناری و قسمت زرد رنگ (که قسمتی از آن دیده می شود) شامل باله کناری دیگر است. پس از بررسی مقادیر مختلف α روی مدل های پیگاه داده های ذکر شده، مقدار آن با آزمون و خطای بطور ثابت ۰/۷ در نظر گرفته شد. در الگوریتم های بخش بندی مدل های سه بعدی که به طور مشابه مدل ها را به بخش های بر جسته و هسته ای خود تجزیه می کنند، استخراج نقاط ویژه به شیوه های متفاوتی صورت می پذیرد و در هیچ یک به حذف همسایگی نقاط و محدود کردن دامنه جستجو پرداخته نمی شود. روشی که سایر الگوریتم ها (Valette, Katz, Leifman et al., 2005; Kompatsiaris et al., 2005; Agathos, Pratikakis et al., 2010) برای پرهیز از استخراج چندین نقطه بر جسته برای یک بخش استفاده می کنند، شامل استفاده از فاصله متوسط رئودزیک و گروه بندی نقاط ویژه پس از انتخاب چندین نقطه بر جسته است. با اینکه خروجی تمام الگوریتم ها به طور

¹ Dynamic



(شکل -۴): (الف) بخش‌بندی بدون مرحله استخراج هسته (مهسا میرلو و حسین ابراهیم‌نژاد، شهریور ۱۳۹۲) (ب) بخش‌بندی با در نظر گرفتن مرحله استخراج هسته (الگوریتم پیشنهادی)

مدل اصلی	مرکز مدل	نقطه بر جسته ۱	همسایگی ۱
نقطه بر جسته ۲	همسایگی ۲	نقطه بر جسته ۳	همسایگی ۳
نقطه بر جسته ۴	همسایگی ۴	نقطه بر جسته ۵	همسایگی ۵
اندیکاتور هسته	نتیجه بخش بندی	اندیکاتور هسته	نتیجه بخش بندی

(شکل -۵): نمونه‌ای از مراحل بخش‌بندی توسط الگوریتم پیشنهادی

در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به مراحل گفته شده در روند الگوریتم، پس از به دست آوردن نقاط بر جسته نوبت به تعیین نقطه‌ای روی مدل به عنوان نماینده بخش مرکزی می‌رسد. انتخاب این نقطه با هر دو روش گفته شده در شکل (۵) دیده می‌شود و مطابق انتظار، انتخاب این نقطه با روش دوم به نتیجه مطلوب منتهی شده است.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیشنهادی روی مدل‌های سه‌بعدی پایگاه داده‌های Podolak, Shilane et al.) McGill, Chen, Tian et al., 2003 (NUT 2006 و (Chen, Tian et al., 2003) نشان داده شده

را از مرکز دارد و از آنجا که مرکز مدل مشخصات مشابهی با مجموعه نقاط هسته مدل دارد، این انتخاب گزینه مناسب‌تری برای به دست آوردن نماینده هسته است.

باید توجه کرد که بخش‌بندی مدل‌های سه‌بعدی براساس نقاط بر جسته به این معنی نیست که تنها با استخراج این نقاط بخش‌بندی درستی حاصل می‌شود، بلکه مرحله استخراج هسته بخش مهمی است که در ساختار چنانچه مرحله استخراج هسته به صورت جداگانه از استخراج نقاط بر جسته مورد بررسی قرار نگیرد (مهسا میرلو و حسین ابراهیم‌نژاد، شهریور ۱۳۹۲)، بخش هسته به درستی تعیین نمی‌شود و تعیین بخش‌های بر جسته به تنها یکی برای ارائه نتایج کامل کافی نیست. نمونه‌ای از نتایج بخش‌بندی با در نظر گرفتن قسمتی برای تعیین هسته و بخش‌بندی بدون این مرحله در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

با توجه به مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی مشاهده می‌شود که در کل الگوریتم از موقعیت نقاط نسبت به یکدیگر استفاده شده است و چون موقعیت نقاط تحت تبدیلات چرخش و انتقال ثابت است، در نتیجه الگوریتم پیشنهادی در برابر این تبدیلات مقاوم است.

در شکل (۵) نمونه‌ای از مراحل به دست آوردن نقاط بر جسته مدل با روش پیشنهادی مشاهده می‌شود. ابتدا اولین نقطه بر جسته که در دورترین فاصله اقلیدسی از مرکز مدل قرار دارد، روی سر اسب شناسایی شده است؛ سپس همسایگی حذف شده آن که در دو شرط همسایگی اقلیدسی و همسایگی ژئودزیکی می‌گنجد با رنگ قرمز مشخص شده و از دامنه جستجوی نقاط حذف می‌شود. پس از این مرحله، نقطه بر جستگی جدید که در پای اسب است مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به همسایگی اقلیدسی که در شکل به صورت کره‌ای در اطراف بر جستگی پا نشان داده شده است، پای دیگر اسب نیز در این همسایگی حضور دارد، لیکن شرط همسایگی ژئودزیکی مانع از حذف پای دیگر در همسایگی این نقطه می‌شود. اگر شرط تکمیلی همسایگی ژئودزیک در نظر گرفته نمی‌شد، پای دیگر اسب که خود قطعه بر جسته منحصر به فردی است در این مرحله حذف می‌شد و هر دو پا تنها یک بخش در نظر گرفته می‌شدند. الگوریتم با بررسی سایر نقاط ادامه یافته و تا محاسبه $k=5$ نقطه بر جسته ادامه می‌یابد که انتخاب نقطه جدید در هر مرحله و سپس حذف همسایگی آن از دامنه جستجوی نقاط

متفاوت است و این موضوع نتایج را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طور مثال در مدل سه‌بعدی اسب اگر هدف بخش‌بندی مبتنی بر شبیه‌سازی دستگاه بینایی انسان باشد، اسب به اجزای متعددی از جمله گوش‌ها، چشم‌ها، دهان، سر، گردن، پاهای، دم و تنہ تقسیم می‌شود؛ اما اگر بخش‌بندی اسب با هدف پیش‌پردازش مدل به منظور بازیابی یا طبقه‌بندی مدل باشد، مانند هدف الگوریتم پیشنهادی، تجزیه آن به قسمت‌های سر، بدن، پاهای و دم کافی است. علاوه بر اینکه نتیجه این دو بخش‌بندی تعداد اجزای متفاوتی دارند، شامل قسمت‌هایی هستند که قبل مقایسه با هم نیستند. به طور مثال بخش‌های گوش‌ها و چشم‌ها در هدف اول هیچ بخش متناظری در هدف دوم برای مقایسه ندارند. درنتیجه مقایسه الگوریتم‌های بخش‌بندی به‌طور کیفی بر مبنای رعایت‌کردن اصول کیفی بخش‌بندی صورت گرفته است. این اصول در روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و عبارتند از پایدار بودن معیار بخش‌بندی، عدم حساسیت به تغییر موقعیت و نوفه، خودکار بودن پارامترهای کنترلی، میزان پیچیدگی محاسبات و زمان اجرای الگوریتم.² الگوریتم آگاتس³ و همکاران (Agathos, Pratikakis et al., 2005; Valette, Kompatsiaris et al., 2010) و والت⁴ و همکاران (Valette, Kompatsiaris et al., 2010) با الگوریتم پیشنهادی مقایسه شده‌اند. این الگوریتم‌ها از کارهای انجام‌شده اخیر در همین زمینه بوده و از ویژگی مشابه استفاده از نقاط بر جسته بهره برده‌اند. استفاده از نقاط ویژه، که به‌طور معمول به صورت نقاط نماینده بر جستگی تعریف می‌شود، شامل الگوریتم‌هایی است که تفاوت آنها در نحوه به‌دست آوردن نقاط بر جسته و تعیین هسته مرکزی است. درنهایت تأثیر این تفاوت‌ها در نتایج به‌دست آمده از الگوریتم‌ها مشاهده و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

▪ نوع الگوریتم بخش‌بندی

الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم والت و الگوریتم آگاتس با روش‌های متفاوت، از ویژگی هندسی فاصله ژئودزیک برای استخراج نقاط بر جسته و تجزیه مدل سه‌بعدی به قسمت‌هایی با معنای ظاهری مشخص استفاده کرده‌اند.

▪ استخراج بخش‌های "درست"

در این معیار انتخاب بخش‌های "درست" به کاربرد، نقطه نظر بیننده و دانش دنیای اطراف وابسته بوده و تنها می‌تواند به صورت کیفی با مشاهده تصاویر خروجی از الگوریتم‌های بخش‌بندی مورد قضاوت قرار گیرد. نکته قابل

است. ارزیابی الگوریتم‌های بخش‌بندی به‌طور معمول بر اساس معیارهای معرفی شده در Attene, Katz et al., 2006) صورت می‌پذیرد که در این مقاله نیز از این معیارها استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی با چند روش با هدف مشترک با این الگوریتم، مقایسه می‌شود.

معیارهای ارزیابی الگوریتم‌های بخش‌بندی معرفی شده در (Attene, Katz et al., 2006) معیارهای کیفی جامعی هستند که به صورت کامل الگوریتم‌های بخش‌بندی را از نقطه نظرات مهم و کاربردی این علم مورد بررسی قرار داده‌اند و به این دلیل اغلب پژوهش‌گران، الگوریتم‌های پیشنهادی خود را با این معیارها ارزیابی کرده‌اند (Katz, Kim, Yun et al., 2005; Lee, Lee Leifman et al., 2005 et al., 2005; Valette, Kompatsiaris et al., 2005; Lin, Liao et al., 2007; Agathos, Pratikakis et al., 2010

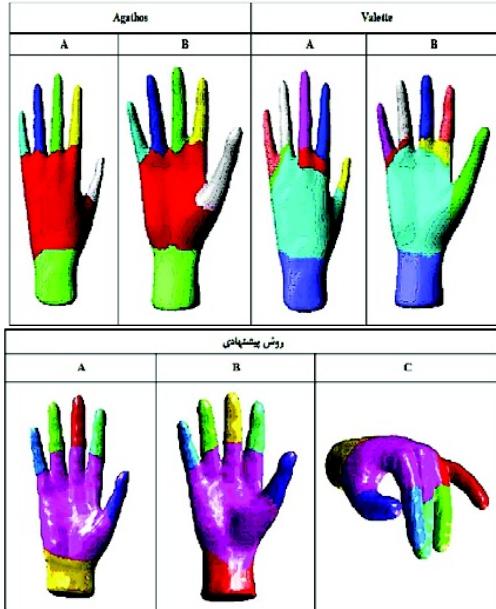
توجه به این نکته حائز اهمیت است که به دلیل ماهیت نتایج الگوریتم‌های بخش‌بندی، اغلب معیارهای معرفی شده برای ارزیابی این شاخه از علوم، معیارهای کیفی بوده (Attene, Chen et al., 2006) و تنها در برخی از مراجع مانند (Katz et al., 2006; Golovinskiy et al., 2009; Benhabiles, Lavoué et al., 2010) معیارهای کمی معرفی شده است. معیارهای کمی تنها برای دسته‌خاصی از الگوریتم‌ها روی مدل‌های به کار رفته در فرآیند تهییه و تعریف این معیارها قابل استفاده است. علاوه بر این، با این که این معیارها کمی هستند، اما قادر به اعلام نتیجه کلی درباره وضعیت الگوریتم‌ها نسبت به هم نیستند (Chen, Golovinskiy et al., 2009

معیارهای ارزیابی (Attene, Katz et al., 2006) که مقایسه روش‌ها نیز بر اساس آن صورت می‌پذیرد، عبارتند از: ۱. نوع الگوریتم بخش‌بندی، ۲. استخراج "درست" بخش‌ها، ۳. مرزها، ۴. بخش‌بندی سلسه‌مراتبی یا چندمقیاسی، ۵. حساسیت نسبت به تغییر وضعیت (تحت تبدیلات صلب)، ۶. حساسیت به نوفه، ۷. پیچیدگی زمانی و ۸. پارامترهای کنترلی.

معیارهای ارزیابی کمی موجود برای ارزیابی الگوریتم‌های بخش‌بندی مدل سه‌بعدی بر اساس داده‌های مرجع¹ خاصی تعریف شده‌اند. این داده‌های مرجع با تأکید بر هدف شبیه‌سازی نحوه بخش‌بندی توسط انسان با همکاری افراد متعدد جمع‌آوری شده‌اند و استفاده از آنها چند مشکل عمده دارد. اول اینکه هدف الگوریتم‌های مختلف بخش‌بندی

² Agathos
³ Valette

¹ Ground truth



(شکل-۶): بررسی استخراج بخش‌های درست توسط الگوریتم‌های مختلف



(شکل-۷): بررسی مرزها در مدل انسان

• بخش‌بندی سلسله‌مراتبی

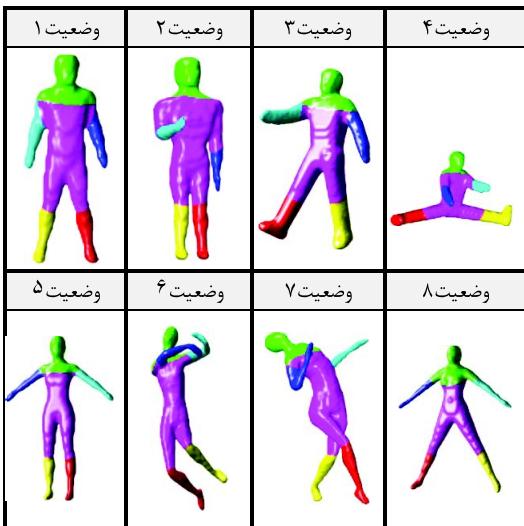
منظور از این معیار، تجزیه عناصر به زیر بخش‌های خود است. تجزیه پاها و دستها در مدل انسان به انگشتان و دیگر اجزاء، مانند آنچه که در (Katz, Leifman et al., 2005) اتفاق افتاده، بیان گر این نوع بخش‌بندی است. داشتن چنین مرحله‌ای، بستگی کامل به کاربرد نتایج بخش‌بندی داشته و در بسیاری از موارد، تجزیه مدل به بخش‌های بسیار جزئی مانند چشم و گوش در قسمت سر و انگشتان در قسمت دست یا پا هیچ ضرورت و مزیت خاصی به ارمغان نمی‌آورد. هیچ کدام از الگوریتم‌ها، الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم آگاتس و الگوریتم والت چنین مرحله‌ای ندارد.

توجه در این معیار، ثابت‌بودن مبنای "درست" بودن در بخش‌بندی مدل‌های مشابه است. مبنای درست‌بودن باید در طول بخش‌بندی ثابت و پایدار باشد. پایداری به این معنی است که بخش‌بندی مدل‌های مربوط به یک طبقه مشخص از داده‌ها منجر به نتایج مشابهی شود. به طور مثال تمام مدل‌های متعلق به طبقه دست در الگوریتم مورد بررسی باید به کف دست، مج و انگشتان تجزیه شوند. نتایج شکل (۶) حاکی از این است که الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم آگاتس به بخش‌بندی درست و پایداری از مدل‌ها، به طور مثال مدل دست منجر شده است. الگوریتم والت با اینکه به نظر پایدار است، اما بخش‌های معناداری را جداسازی نمی‌کند.

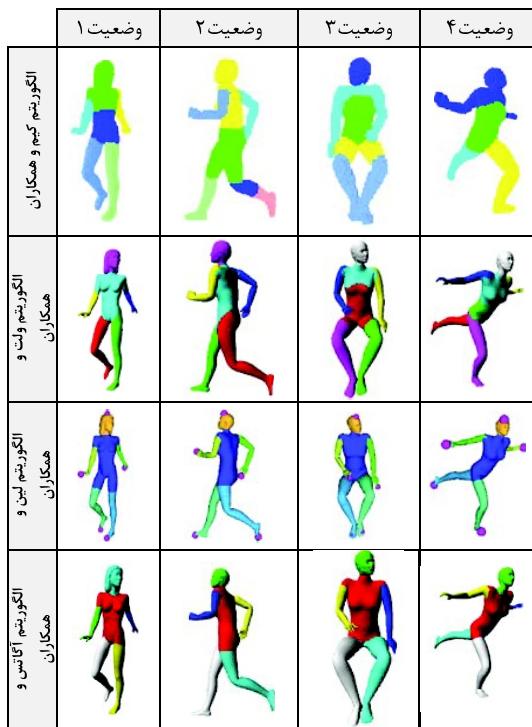
• مرزها

مسئله بخش‌بندی درواقع متضکل از دو زیر مسئله است. مسئله اول استخراج درست بخش‌ها و مسئله دوم داشتن مرزهای هموار و طبیعی. برخی از الگوریتم‌ها مانند (Mortara, Patané et al., 2004) داشتن مرزهای طبیعی را تضمین می‌کنند. الگوریتم پیشنهادی نیز بدلیل استفاده از همسایگی‌های اقلیدسی به شکل هندسی کروی دارای مرزهای هموار بوده و چون قسمت‌ها به درستی شناسایی شده‌اند، این مرزها در قسمت‌های طبیعی خود قرار می‌گیرند. به طور مثال، در مدل انسان در شکل (۷) این مرزها در گردن، شانه‌ها و پاها به درستی به صورت هموار و طبیعی مشخص شده‌اند. در الگوریتم آگاتس پس از بخش‌بندی اولیه، مرزها توسط برنامه‌ای براساس برش گراف‌ها و استفاده از کانتورها تصحیح شده‌اند که نتایج بسیار خوبی به همراه داشته است؛ اما این مزیت با محدودیت بزرگی روی مشاهی مورد استفاده همراه است. اضافه کردن چنین قسمتی باعث افزایش بار محاسباتی برنامه شده و استفاده از کانتورها این محدودیت را برای مدل ایجاد می‌کند که هیچ گونه شکافی روی رویه مدل نباشد. به همین دلیل آگاتس در (Agathos, Pratikakis et al., 2010) الگوریتم خود را تنها روی تعداد محدودی از مدل‌ها اعمال کرده است که چندین مدل آن یک مدل مشخص در وضعیت‌های مختلف است. الگوریتم والت نیز به تصحیح مرزها پرداخته و زمان اجرای الگوریتم آن مانند الگوریتم آگاتس بالاست؛ اما در الگوریتم پیشنهادی، هیچ محدودیت سنتگینی روی انتخاب مدل‌ها گذاشته نشده و به این دلیل توانسته‌ایم الگوریتم پیشنهادی را روی دو پایگاه داده متضکل از مدل‌های متعدد اعمال کنیم.

تفاوت دارند. الگوریتم آگاتس (Agathos, Pratikakis et al., 2010) حساسیتی به تغییر وضعیت نداشته است.



(شکل-۸): بررسی پایداری الگوریتم نسبت به تغییر وضعیت



(شکل-۹): بررسی حساسیت سایر الگوریتم‌های بخش‌بندی به تغییر وضعیت (شکل‌های مستخرج از Agathos, Pratikakis et al., 2010)

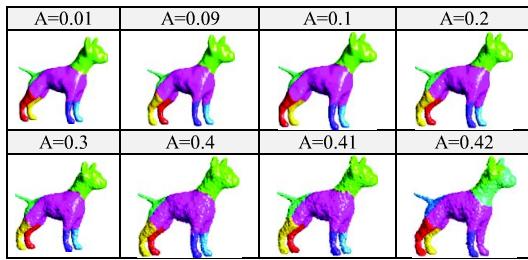
- حساسیت به تغییر وضعیت

نتایج خروجی الگوریتم پیشنهادی که در شکل (۸) برای وضعیت‌های مختلف از انسان نشان شده است، مثالی از پایداری الگوریتم پیشنهادی در برابر تغییر وضعیت است. درنظرگرفتن مرکز ثقل مدل به عنوان نقطه مرجع و استفاده از ویژگی فاصله رئودزیک که جزء ویژگی‌های مقاوم به تغییر وضعیت است، از مهم‌ترین دلایل عدم حساسیت الگوریتم پیشنهادی نسبت به تغییر حالت و وضعیت مدل است. علاوه‌بر این، حذف همسایگی‌ها در مرحله استخراج نقاط بر جسته باعث می‌شود تا تغییر مکان همسایگی‌ها که در اثر تغییر وضعیت ایجاد می‌شوند، تأثیری در نتیجه بخش‌بندی نداشته و الگوریتم پیشنهادی نسبت به تغییر وضعیت مقاوم باشد.

لازم به ذکر است که این تغییرناپذیری در مورد تغییرات مفصل دار برقرار بوده و اگر تغییر موقعیت چنان صورت گیرد که عضوی به قسمت دیگری بچسبد یا از آن جدا شود، بهدلیل تغییرات شدید در ساختار رویه و حذف یا اضافه شدن مسیرهای متعدد رئودزیکی، مقاومت نسبت به این تغییرات از بین خواهد رفت. مانند آنچه که در قسمت بازوی مدل‌های ۱، ۲ و ۳ اتفاق افتاده است. قسمت دست در هر صورت به طور مشابه به درستی جدا شده اما چون بازو در مدل‌های ۱ و ۲ به بدن متصل بوده و در مدل ۳ این تغییر حالت در حدی بوده که این اتصال را حذف کرده، بازو از قسمت‌های متفاوتی جدا شده است. چنانچه در شکل (۸) دیده می‌شود، این حالت در الگوریتم‌های دیگر نیز به طور طبیعی رخ می‌دهد. در شکل (۸)، مثال‌هایی برای بررسی حساسیت سایر الگوریتم‌های بخش‌بندی در برابر تغییر وضعیت و مقایسه آنها با الگوریتم پیشنهادی آورده شده است. در شکل (۹) نیز نتایج بخش‌بندی مربوط به چهار روش دیگر آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم کیم و همکاران (Kim, Yun et al., 2005) و الگوریتم ولت و همکاران (Valette, Kompatsiaris et al., 2005) نسبت به تغییر وضعیت مقاوم نیستند. نحوه جداسازی بخش‌های پاهای و تنہ در چهار وضعیت توسط الگوریتم کیم و نحوه جداسازی بخش تنه در الگوریتم ولت متفاوت است. مرازهای بخش‌های مختلف در الگوریتم لین و همکاران (Lin, Liao et al., 2007) نیز برای مدل‌های متفاوت نشان داده شده در وضعیت ۱ و ۲ بسیار با هم فاصله دارند؛ به عنوان مثال، مراز پاهای در وضعیت ۱ و ۲ با یکدیگر

فصل نهم

(Pratikakis et al., 2010) و جدول زمانی الگوریتم پیشنهادی، مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی به دلیل زمان اجرای پایین برای کار در حیطه کاربردهای مربوط به بینایی ماشین در هوشمندسازی ماشین آلات و تحلیل پویانمایی‌های سه‌بعدی مناسب است. زمان‌های ذکر شده در جدول (۱)، زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی در رابطه با Windows XP, Dual core, 2Gb of RAM MATLAB است. برای درک نسبی از نرم‌افزار 2012 MATLAB بالابوند سرعت اجرای الگوریتم پیشنهادی، بخشی از جدول زمان اجرای الگوریتم آگاتس را که در (Agathos, 2010) گزارش شده است، در جدول (۲) آورده‌ایم.



شکل - (۱۰): بررسی پایداری الگوریتم پیشنهادی در برابر مقادیر مختلف نوفه

جدول - (۱): زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌های مختلف

زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی (ثانیه)	تعداد قطعات	تعداد رئوس	تعداد وجهها	مدل سه‌بعدی
۹/۴۵	۱۱	۱۴۸۰۰	۲۹۵۹۶	حشره
۱۰/۹۲	۷	۱۵۸۹۶	۳۱۷۸۸	سگ
۵/۲۶	۷	۱۲۰۸۲	۲۴۱۶۰	دست
۳/۸۸	۸	۸۲۰۶	۱۶۴۰۸	دایناسور
۶/۳۳	۹	۱۱۶۶۸	۲۳۳۳۲	هشتپا
۲/۴۲	۵	۷۴۴۶	۱۴۸۸۸	انبر
۴/۱۴	۶	۱۱۰۷۸	۲۲۱۵۲	انسان
۱/۲۹	۶	۱۵۸۱	۴۵۸۶	پنگوئن
۲/۳۲	۷	۳۵۸۸	۷۲۵۷	اسپ
۲/۱۱	۶	۳۱۰۹	۶۱۶۰	خرس

• حساسیت نسبت به نوفه

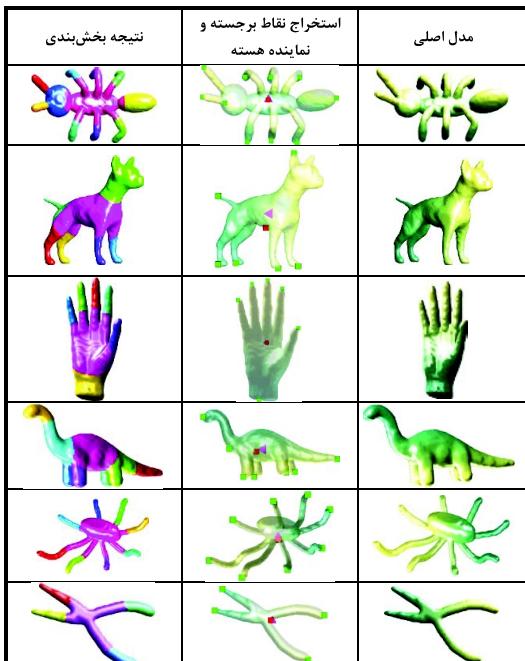
الگوریتم پیشنهادی نسبت به مقادیر مختلف نوفه جمع‌شونده (که به طور معمول در ارزیابی مورد بررسی قرار داده می‌شود) مقاوم بوده و نتایج بخش‌بندی مدل نوفه‌دار همانند مدل بدون نوفه به دست آمده است. در شکل (۱۰) نتایج بخش‌بندی با مقادیر مختلف نوفه نشان داده شده است. چنانچه مقادیر نوفه در حدی باشد که محل نقاط بر جسته و در نتیجه همسایگی آنها را بیش از حد تغییر دهد، نتایج تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ مانند آنچه که در دامنه ۰/۴۲ نوفه در شکل (۱۰) اتفاق افتاده است.

حساسیت سایر الگوریتم‌های مورد بحث نیز در همین حد است. در برخی الگوریتم‌ها، مانند (Mortara, Patané et al., 2004)، با افزودن یک مرحله پیش‌پردازش به الگوریتم بخش‌بندی تحت عنوان هموارسازی رویه، به شرط تحمل افزایش پیچیدگی زمانی، حساسیت نسبت به نوفه بسیار کاهش می‌یابد. مقادیر متفاوت دامنه نوفه مربوط به هر یک از نتایج در شکل (۱۰) آورده شده است.

• پیچیدگی محاسباتی

به طور معمول زمان اجرای الگوریتم‌ها روی مدل‌های مختلف ذکر می‌شود که این زمان عامل مهمی در کاربرد الگوریتم‌ها به حساب آمده و به نحوه پیاده‌سازی و شرایط زمینه اجرای برنامه بستگی دارد و درنتیجه به سختی قابل مقایسه است؛ اما مرتبه این پیچیدگی زمانی قابل بررسی است. فرض کنید N تعداد کل رئوس رویه، F تعداد وجوده آن و M تعداد بخش‌های هر مدل باشد. در الگوریتم پیشنهادی محاسبه فاصله ژئودزیک با استفاده از الگوریتم دیکسترا صورت پذیرفته و پیچیدگی آن از مرتبه $O(MN \log(N))$ است. این مرحله در الگوریتم آگاتس برای اطمینان بیشتر و افزایش وضوح از مرتبه $O(8MN \log(N))$ است و پیچیدگی زمانی الگوریتم والت در (Valette, Kompatsiaris et al., 2005) از مرتبه $O(MN \log(N))$ از مرتبه $O(MN \log(N))$ تخمین زده شده و زمان اجرا به عنوان مثال چهل ثانیه برای مدلی با ۵۰۰۰۰ رأس بوده است. در الگوریتم آگاتس پیچیدگی زمانی به دلیل وجود گروه‌بندی و انتخاب نقطه نهایی بر جستگی، تخمین هسته به شیوه متفاوت صورت گرفته و درنهایت تصحیح مرزها بیش از دیگر الگوریتم‌ها بوده و پیچیدگی محاسباتی این الگوریتم به مقادیر $O(8MN \log(N) + NN_{\max} \log(N_{\max}) + 8kmn \log(n))$ می‌رسد. با توجه به جدول زمانی موجود در (Agathos,

آگاتس پنج پارامتر کنترلی ثابت، بدون دخالت کاربر وجود دارد. در ادامه، نمونه‌هایی از مدل‌های دو پایگاه داده متفاوت مورد بررسی قرار گرفته که کارایی و صحت الگوریتم‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد. در شکل (۱۱) نتایج الگوریتم پیشنهادی روی پایگاه داده McGill با فرمت off. همراه با مرحله استخراج مرکز مدل، نقاط برجسته و نقطه نماینده هسته آورده شده است. در شکل (۱۲) نیز، نتایج الگوریتم پیشنهادی روی پایگاه داده NTU با فرمت obj. همراه با مرحله استخراج مرکز مدل، نقاط برجسته و نقطه نماینده هسته آورده شده است. نتایج این شکل‌ها حاکی از این است که الگوریتم، روی مدل‌های متنوع با فرمت‌های متفاوت به خوبی عمل کرده و نداشتن شرطی برای انتخاب مدل، قابلیت انعطاف‌پذیری و همه‌جانبه بودن الگوریتم را تأیید می‌کند.



(شکل-۱۱): نتایج الگوریتم پیشنهادی روی پایگاه داده McGill با فرمت off.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای بخش‌بندی مدل‌های سه‌بعدی مبتنی بر استخراج قسمت‌های برجسته مدل ارائه شد. این روش منجر به بخش‌بندی معنادار مدل‌های سه‌بعدی با استفاده از ویژگی هندسی فاصله اقلیدسی و زئودزیک شد. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی مدل‌های سه‌بعدی متعدد، با فرمت‌های متفاوت به نمایش

(جدول-۲): زمان اجرای الگوریتم آگاتس برای مدل‌های مختلف (Agathos, Pratikakis et al., 2010)

مدل بعدی	تعداد وجهها	تعداد رؤوس	تعداد قطعات	زمان اجرای الگوریتم آگاتس (ثانیه)
حشره	۱۷۰۰۴	۸۵۰۴	۱۱	۶
سگ	۱۸۹۸۰	۹۴۹۲	۷	۴۵
دست	۱۴۴۰	۷۳۲۲	۷	۳۴
انبر	۱۲۲۰۴	۶۱۰۴	۵	۲۴
انسان	۲۲۰۲۸	۱۱۰۱۶	۶	۵۹
اسب	۱۴۵۳۲	۷۲۶۸	۷	۳۵

لازم به ذکر است که این دو جدول را به طور مستقیم نمی‌توان مقایسه کرد زیرا نحوه پیاده‌سازی و زمینه اجرای جدول (۱) و جدول (۲) با هم یکسان نیستند و جدول (۲) با رایانه‌ای با مشخصات Pentium 4، 3GHz، 1.5Mb cash به دست آمده است. درواقع و پیاده‌سازی در برنامه C++ ساخت افزار پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی نیز به پایین‌بودن سرعت اجرای الگوریتم در نتایج به دست آمده تا حد کم کرده؛ اما زبان برنامه‌نویسی C++ نیز سریع‌تر از MATLAB است. با این حال دیده می‌شود که حتی با درنظرگرفتن عامل ساخت افزار پیاده‌سازی، نتایج الگوریتم پیشنهادی در زمان بسیار کمتری به دست آمده‌اند. به عنوان مثال با درنظرگرفتن ردیف اول در هر دو جدول مشاهده می‌شود که زمان لازم برای اجرای الگوریتم پیشنهادی برای مدل حشره با ۱۴۸۰۰ رأس ۹/۴۵ ثانیه است درحالی که این زمان برای الگوریتم آگاتس برای مدل حشره با تعداد رأس ۸۵۰۴ (که کمتر از تعداد رأس مدل استفاده شده در این مقاله است) شصت ثانیه است. این تفاوت آشکار حتی با درنظرگرفتن ضریب ساخت افزار نیز مقدار قابل ملاحظه‌ای است. برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های موجود در بحث حساسیت به تغییر وضعیت به اثبات رسید و از ذکر جدول زمانی مربوط به آنها خودداری می‌شود.

- پارامترهای کنترلی

تعداد و نوع پارامترهای کنترلی که بر میزان متقابل بودن^۱ الگوریتم دلالت دارد، برای به دست آوردن بخش‌بندی با کیفیت بالا تأثیرگذار است. در الگوریتم پیشنهادی، پارامترهای α و k پارامترهای کنترلی هستند که α مقدار ثابت $0/7$ در نظر گرفته شده است و k به صورت خودکار توسط الگوریتم برای هر مدل مشخص می‌شود. در الگوریتم والت، یک پارامتر کنترلی ثابت و در الگوریتم

^۱ Interactive

هشتمین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصویر ایران، زنجان.

Agathos, A., I. Pratikakis, et al. (2010). Protrusion-oriented 3D mesh segmentation. *The Visual Computer* 26(1): 63-81.

Ai, Q., Q. Liu, et al. (2009). A new digital watermarking scheme for 3D triangular mesh models. *Signal Processing* 89(11): 2159-2170.

Attene, M., Katz, S., Mortara, M., Patané, G., Spagnuolo, M., & Tal, A. (2006, June). Mesh segmentation-a comparative study. In *Shape Modeling and Applications, 2006. SMI 2006. IEEE International Conference on* (pp. 7-7). IEEE.

Attene, M., F. Robbiano, et al. (2009). Characterization of 3D shape parts for semantic annotation. *Computer-Aided Design* 41(10): 756-763.

Benhabiles, H., Lavoué, G., Vandeborre, J. P., & Daoudi, M. (2010, October). A subjective experiment for 3D-mesh segmentation evaluation. In *Multimedia Signal Processing (MMSP), 2010 IEEE International Workshop on* (pp. 356-360). IEEE.

Chen, D. Y., Tian, X. P., Shen, Y. T., & Ouhyoung, M. (2003, September). On visual similarity based 3D model retrieval. In *Computer graphics forum* (Vol. 22, No. 3, pp. 223-232). Blackwell Publishing, Inc.

Chen, X., Golovinskiy, A., & Funkhouser, T. (2009, July). A benchmark for 3D mesh segmentation. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)* (Vol. 28, No. 3, p. 73). ACM.

Cheng, S. C., C. T. Kuo, et al. (2010). A novel 3D mesh compression using mesh segmentation with multiple principal plane analysis. *Pattern Recognition* 43(1): 267-279.

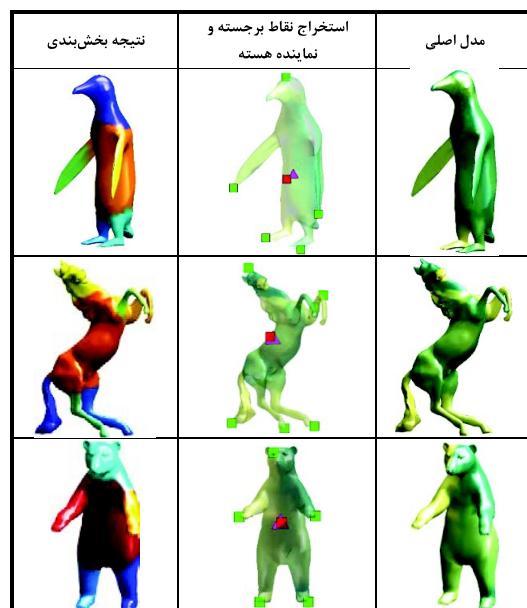
Chiang, P. Y. and C. C. J. Kuo (2012). Voxel-based shape decomposition for feature-preserving 3D thumbnail creation. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 23(1): 1-11.

Ho, T.-C. and J.-H. Chuang (2012). Volume based mesh segmentation. *Journal of Information Science and Engineering* 28(4): 705-722.

Kanai, T. and H. Suzuki (2001). Approximate shortest path on a polyhedral surface and its applications. *Computer-Aided Design* 33(11): 801-811.

Katz, S., G. Leifman, et al. (2005). Mesh segmentation using feature point and core extraction. *The Visual Computer* 21(8): 649-658.

گذاشته شد. ارزیابی الگوریتم، طبق معیارهای معرفی شده در (Attene, Katz et al., 2006) صورت پذیرفت. طبق این معیارها الگوریتم بخش‌بندی از نظر نوع الگوریتم، پایداری و درستی استخراج بخش‌ها، مرازها، وجود سلسه‌مراتب، حساسیت به نویه، پیچیدگی زمانی و پارامترهای کنترلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از جدول‌ها و مقایسه با روش‌هایی با هدف یکسان، کارایی و ارزشمندی الگوریتم‌های پیشنهادی را به اثبات رساند. سرعت بسیار بالا، پایداری و مقاومت در برابر انواع تبدیلات و نداشتن محدودیت‌های سنگین در انتخاب مدل‌های سه‌بعدی از نقاط قوت الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های موجود است.



(شکل-۱۲): نتایج الگوریتم پیشنهادی روی پایگاه داده NTU با فرمت .obj.

مراجع

مهرسا میرلو و حسین ابراهیم‌نژاد، (اسفند ۱۳۹۲)، بخش‌بندی هوشمند مدل‌های سه‌بعدی با استفاده از استخراج نقاط بر جسته. یازدهمین کنفرانس سیستم‌های هوشمند ایران، تهران.

مهرسا میرلو و حسین ابراهیم‌نژاد، (شهریور ۱۳۹۲)، تجزیه مدل‌های سه‌بعدی مبتنی بر ویژگی فاصله ژئودزیک.

Wang, J. and Z. Yu (2011). Surface feature based mesh segmentation. Computers & Graphics 35(3): 661-667.



مهسا میرلو تحصیلات مقطع کارشناسی خود را در سال ۱۳۸۹ در رشته مهندسی برق- مخابرات در دانشگاه زنجان به پایان رساند. تحصیلات کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق- مخابرات در دانشگاه صنعتی سهند ادامه داد و در سال ۱۳۹۲ مدرک کارشناسی ارشد خود را اخذ نمود. در حال حاضر در مقطع دکترای رشته مهندسی برق- مخابرات دانشگاه صنعتی سهند مشغول به تحصیل است و در زمینه پردازش مدل‌های سه‌بعدی و بینایی کامپیوتر به تحقیقات خود ادامه می‌دهد.
نشانی رایانامه ایشان عبارتست از:

m_mirloo@sut.ac.ir



حسین ابراهیم‌نژاد مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۵ در رشته مهندسی برق- الکترونیک و برق مخابرات از دانشگاه تبریز و دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اخذ کرد. همچنین مدرک دکترای خود را در گرایش مخابرات سیستم در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه تربیت مدرس دریافت کرد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان بینایی کامپیوتر، پردازش مدل سه‌بعدی، پردازش تصویر، شناسایی الگو و محاسبات نرم بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه صنعتی سهند است.
نشانی رایانامه ایشان عبارتست از:

ebrahimnezhad@sut.ac.ir

Kim, D. H., I. D. Yun, et al. (2005). A new shape decom-position scheme for graph-based representation. Pattern Recognition 38(5): 673-689.

Lee, Y., S. Lee, et al. (2005). Mesh scissoring with min-ima rule and part salience. Computer Aided Geome-tric Design 22(5): 444-465.

Lin, H., H.-Y. Liao, et al. (2007). Visual salience-guided mesh decomposition. Multimedia, IEEE Transactions on 9(1): 46-57.

Mortara, M., Patané, G., Spagnuolo, M., Falcidieno, B., & Rossignac, J. (2004, June). Plumber: a method for a multi-scale decomposition of 3D shapes into tubular primitives and bodies. In Proceedings of the ninth ACM symposium on Solid modeling and applications (pp. 339-344). Eurographics Association.

Podolak, J., Shilane, P., Golovinskiy, A., Rusinkiewicz, S., & Funkhouser, T. (2006, July). A planar-reflective symmetry transform for 3D shapes. In ACM Transactions on Graphics (TOG) (Vol. 25, No. 3, pp. 549-559). ACM.

Shamir, A. (2008, September). A survey on mesh segmentation techniques. In Computer graphics forum (Vol. 27, No. 6, pp. 1539-1556). Blackwell Publishing Ltd.

Shapira, L., A. Shamir, et al. (2008). Consistent mesh partitioning and skeletonisation using the shape diameter function. The Visual Computer 24(4): 249-259.

Shlafman, S., Tal, A., & Katz, S. (2002, September). Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition. In Computer Graphics Forum (Vol. 21, No. 3, pp. 219-228). Blackwell Publishing, Inc.

Siddiqi, K., J. Zhang, et al. (2008). Retrieving articulated 3-D models using medial surfaces. Machine Vision and Applications 19(4): 261-275.

Simari, P., Kalogerakis, E., & Singh, K. (2006, June). Folding meshes: Hierarchical mesh segmentation based on planar symmetry. In Symposium on Geometry Processing (pp. 111-119).

Valette, S., I. Kompatsiaris, et al. (2005). A polygonal mesh partitioning algorithm based on protrusion conquest for perceptual 3D shape. Workshop towards Semantic Virtual Environments: pp. 68-76.

