

پویانمایی شخصیت کارتونی با انتقال حرکت مفصلی و مبتنی بر اسکلت موجودات دیگر

لیدا اصغریان و حسین ابراهیم‌نژاد*

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

چکیده

امروزه پویانماها با ایجاد حرکات طبیعی در اندام‌های شخصیت‌های کارتونی به شخصیت‌های تخیلی زندگی واقعی می‌بخشند. برای رسیدن به این هدف می‌توان حرکات موجودات زنده را به شخصیت‌های کارتونی اعمال کرد. در این مقاله، یک روش مبتنی بر تناظریابی اسکلتی برای انتقال حرکت یک شخصیت دوبعدی به شخصیت جدید ارائه و روش نوینی برای تناظریابی بین اسکلت مرجع و هدف ارائه شده است که بر مبنای موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده از گره‌ها و مجموع طول استخوان‌های متصل شده به گره‌ها می‌باشد. برای این منظور، دو شخصیت با ساختار آناتومی مشابه به عنوان شخصیت مرجع و هدف انتخاب می‌شوند. بر اساس سکانس حرکتی موجود از شخصیت مرجع، اسکلتی با مفاصل دقیق برای این شخصیت استخراج شده و اسکلت شخصیت هدف بر اساس الگوریتم استخراج اسکلت به-دست می‌آید. با تناظریابی بین اسکلت شکل مرجع و هدف می‌توان حرکات و تغییرات هر یک از استخوان‌های مرجع را به استخوان متناظر در شکل هدف منتقل کرد. تغییرات انتقال داده شده از شکل‌های مرجع، بیان‌گر میزان چرخش، جابه‌جایی و تغییر مقیاس هر یک از استخوان‌های شکل مرجع هستند. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و نمایش نتایج حاصل از آن، از شخصیت‌های پویانمایی دوبعدی استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده بیان‌گر توانایی الگوریتم در تولید شکل‌های با کیفیت و با حرکات طبیعی و واقعی هستند. الگوریتم پیشنهادی نسبت به تنوع شخصیت‌های مرجع مقاوم بوده و می‌تواند انواع تغییرات را به شخصیت‌های دیگر منتقل کند.

واژگان کلیدی: انتقال حرکت، پویانمایی، تناظریابی اسکلت، استخراج مفصل.

۱- مقدمه

امروزه با گسترش صنعت پویانمایی و بازی‌های رایانه‌ای نیاز به نرم‌افزارهایی که به‌طور خودکار و بدون دخالت پویانماها^۱، سکانس‌های پویانمایی^۲ را برای شخصیت‌های متنوع طراحی می‌کنند، به‌طور کامل محسوس است. فرآیند پویانمایی با مرحله مدلسازی از شکل شخصیت در فضای دوبعدی شروع شده و با به حرکت درآوردن، تغییر مفاصل و تغییر موقعیت قسمت‌های مختلف شکل موردنظر به پایان می‌رسد. برای این منظور، نیاز به شناسایی دقیق محل مفاصل و متحرک شکل است تا پویانما با کنترل این نقاط و تغییر حالت اندام‌ها بتواند حرکات پیوسته‌ای را در فرآیند پویانمایی برای شخصیت موردنظر پدید آورد. یک‌بار که نقاط کنترلی

¹ Animators

² Animation

شکل تعیین شدند، باید برای تمام قاب‌های موجود در سکانس پویانمایی اختصاص داده شوند. این کار، از آنجا که در هر شکل باید به محاسبه پارامترهای حرکتی پرداخته و از تولید تغییرات حرکتی قابل قبول برای شکل اطمینان حاصل کند، اغلب عملیاتی زمان‌بر محسوب می‌شود. به‌طوری‌که با داشتن یک تغییرشکل تولیدشده برای یک شیء می‌توان با اختصاص درست پارامترهای حرکتی به شیء دیگر، آن را نیز همانند شیء نخست تغییر داد. منظور از پارامترهای حرکتی، پارامترهایی هستند که برای هر حرکت خاص، تغییرات مناسبی را در شکل به‌وجود می‌آورند. در صورتی‌که بتوان پارامترهای حرکتی را برای شکل‌های مختلفی از شخصیت‌ها تطبیق داد، عملیات زمان‌بر کنترل محل مفاصل برای هر شکل خاص کاهش می‌یابد. در این مقاله، به‌دنبال روشی

برای آسان تر کردن فرآیند پویانمایی سازی با الگوریتم‌های مناسب هستیم. این الگوریتم باید بتواند با اطلاعات کسب‌شده از حرکت اجزای یک شخصیت، شخصیت دیگری را به حرکت درآورد؛ به طوری که روش‌های زمان‌بر و پرهزینه سنتی را از بین برده و تغییرات معناداری را برای اجزای شکل‌ها انتقال دهد. در این صورت، مسئولیت زیادی از دوش پویانما برداشته می‌شود. البته این سامانه باید نسبت به تغییرات از قبل ایجادشده در شخصیت مرجع مقاوم بوده و بتواند هر نوع تغییر را منتقل کند؛ بنابراین، در الگوریتم پیشنهادی سعی بر این است که سامانه مقاومتی نسبت به تغییرات از قبل ایجادشده در شکل مرجع، طراحی کنیم؛ چون برخی روش‌های قبلی نسبت به تغییرات شخصیت مرجع حساس بوده و نمی‌توانند تغییرات متنوعی را که با روش‌های متفاوت در شخصیت مرجع ایجاد شده‌اند، انتقال دهند. برای انتقال تغییرات بین دو شکل متفاوت نیاز به تناظریابی دقیق بین شکل‌ها می‌باشد؛ بنابراین، در این پژوهش دو مسئله اساسی، یعنی روش انتقال تغییرات و تناظریابی بین دو شکل مورد بررسی واقع می‌شوند.

در این مقاله الگوریتم تناظریابی نوینی، بر اساس موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از گره‌ها و مجموع طول استخوان‌های متصل‌شده به گره‌ها برای تناظریابی بین دو شکل ارائه شده است؛ به طوری که در هر یک از این مراحل نمره‌ای برای گره‌های متناظر در نظر گرفته می‌شود و در نهایت با کمک نمرات حاصل از این دو گام و ترکیب نتایج آن‌ها، گره‌های متناظر نهایی بین دو اسکلت مرجع و هدف انتخاب می‌شوند. برای استفاده دوباره از تغییرات یک شکل، نیازمند ارائه تغییراتی هستیم که بتوانیم آن‌ها را بین شکل‌ها منتقل کنیم. این تغییرات باید تا حد امکان عمومی باشند تا بتوانند تغییرات متنوعی را که در تولید یک سکانس پویانمایی به کار می‌روند، بیان کنند. یک بیان برای چگونگی تغییرات، استفاده از تغییر مکان و جابه‌جایی رئوس مثلث‌های مش است. (نوح و نیومن، ۲۰۰۱) از این فرآیند برای انتقال تغییرات حرکات صورت به مش صورت دیگر استفاده کردند. مهم‌ترین هدف انتقال تغییرات این است که تغییرات شکل مرجع را به شکل هدف اعمال کند. در نتیجه، بهتر است این تغییرات به صورت مقادیر تفاضلی بیان شوند. بیان جابه‌جایی فقط تغییرات مختصات کارتزین را نشان می‌دهد و در مورد چگونگی تغییر بردارهای تفاضلی اطلاعاتی نمی‌دهد؛ در نتیجه، افزودن این بردارها به شخصیت دیگر هیچ چرخشی را نشان نمی‌دهند. گرادیان تغییر نیز

می‌تواند بیان‌گر روابط تغییردهنده باشد. گرادیان تغییر، بیان‌گر چرخش صلب و کشیدگی در جسم بوده و می‌تواند هر نوع تغییرات وسیع را برای انتقال نشان دهد. (بار، ۱۹۸۴) از گرادیان تغییرات برای به‌دست‌آوردن مقادیر جدید مماس و نرمال بردارها بر روی مدل‌های هندسی استفاده کرد. گرادیان تغییر در یک نقطه مشخص می‌تواند با محاسبه مشتقات جزئی در نقطه موردنظر به‌دست آید. البته، این روش دارای محدودیت‌هایی در بیان تغییرات در نواحی شامل خمیدگی و چرخیده شده است. (سامنر و پاپویک، ۲۰۰۴) از گرادیان تغییرات مثلث‌های شکل پایه مرجع و شکل تغییر یافته مرجع برای انتقال تغییرات در مدل‌های سه‌بعدی استفاده کردند. در این روش، تناظریابی بین هر یک از مثلث‌های مش مرجع و هدف انجام می‌شود؛ ولی محاسبه تغییرات برای تک‌تک مثلث‌های مش هدف، عملیاتی زمان‌بر است. در بعضی موارد، جهت کاهش سختی کار فقط از الگوریتم‌های مربوط به مرز مش (سامنر و همکاران، ۲۰۰۵) برای محاسبه گرادیان تغییرات استفاده می‌شود. در این موارد، مثلث‌های مرزی مش انتخاب شده و مثلث‌های داخلی مش در محاسبات قرار نمی‌گیرند. در این شرایط، گرادیان تغییر توسط بردار لبه مثلث‌های مرزی مش پایه و مش تغییر یافته محاسبه می‌شود. از دیگر روش‌ها برای تغییر دادن شکل می‌توان به روش‌های درون‌یابی اشاره کرد. در این زمینه می‌توان روش ارائه‌شده توسط (سدبرگ و همکاران، ۱۹۹۲، ۱۹۹۳) را مطرح کرد. آن‌ها دو شکل چندضلعی با ساختار یکسان را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و با تغییر طول لبه و زاویه بین لبه‌های مجاور از مثلث‌ها و ایجاد خمیدگی‌های خطی بین اجزای متناظر دو شکل به بازسازی قاب‌ها پرداختند. مشکل این روش در نواحی قطع‌شده لبه‌ها است. روش دیگری نیز توسط (آکسا و همکاران، ۲۰۰۰) ارائه شد که در آن از یکسان‌سازی دو شکل و درون‌یابی بین آنها برای تغییر شکل استفاده می‌شود. برای این درون‌یابی از رئوس اضافی استفاده شده که باعث افزایش بار محاسباتی می‌شود. (سیکورا، ۲۰۰۵) برای تناظریابی شکل بلوک‌بندی‌شده، ترکیبی از بهینه‌سازی محلی را با روش "تا حد امکان صلب بودن" (ARAP) ارائه دادند. این روش برای اخذ حرکت شیء دوبعدی مناسب بوده، ولی نمی‌تواند تغییرات وسیع و محل‌های واقع‌شده در ناحیه کور را کنترل کند. (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) روشی برای انتقال حرکت بر اساس ردیابی مفاصل در طول یک سکانس پویانمایی ارائه

¹ As-Rigid-As-Possible

مثلث‌ها بین دو شکل بیان نشده و رئوس و لبه‌ها با فرض متناظر بودن اولیه، تغییر شکل می‌یابند. در صورتی که پیدا کردن لبه‌های متناظر بین دو شکل، کار پیچیده و دشواری است. از دیگر روش‌ها برای انتقال تغییرات می‌توان به روش‌های (لی و دنگ، ۲۰۱۴) و (سلیکان و همکاران، ۲۰۱۵) مبتنی بر تصاویر مثال که شامل حالات متفاوتی از اندام‌های یک شخصیت می‌باشند، اشاره کرد. این روش‌ها تنها در محدوده حرکات موجود در تصاویر مثال، قادر به ایجاد تغییرات در شکل هدف هستند و نمی‌توانند مستقل از حرکات تصاویر مثال عمل کنند. همچنین این روش‌ها بار محاسباتی بالایی دارند.

در این پژوهش، روش پیشنهادی برای انتقال تغییرات بر مبنای تغییر اندام‌های اسکلتی است. این روش برخلاف روش (لی و همکاران، ۲۰۱۳)، مستقل از ساختار شکل مرجع، تغییرات را به شکل هدف منتقل می‌سازد. علاوه بر این روش ارائه شده، می‌تواند برخلاف روش (لی و دنگ، ۲۰۱۴)، تغییرات را مستقل از محدوده تغییرات تصاویر مثال در شکل هدف ایجاد کند. در کارهای قبلی، روش دقیق و بهینه‌ای برای تناظریابی بین دو شکل ارائه نشده است. تحت این شرایط، انتقال تغییرات از شکل مرجع به هدف، به درستی انجام نمی‌شود. به این علت که تغییرات هر اندام در اثر تناظریابی نادرست به اندام‌های دیگر منتقل می‌شوند. در این مقاله، روش جدیدی برای تناظریابی بین دو شکل ارائه شده است که بر مبنای اسکلت استخراج شده از شکل‌ها است. در این الگوریتم، تناظریابی بین تعداد محدودی از اسکلت‌های شکل (به‌طور متوسط برابر سی اسکلتخوان برای هر شکل) انجام می‌شود و همانند روش‌های قبلی نیازی به تناظریابی بین هریک از مثلث‌های مش دو شکل (به‌طور متوسط بالاتر از چهارصد مثلث برای هر شکل) نیست. همچنین روش ارائه شده قادر به تناظریابی بین تمام گره‌های دو شکل شامل گره‌های اتصالی اصلی، اتصالی و انتهایی است. در حالی که، روش بیان شده توسط (بای و همکاران، ۲۰۰۷) تنها قادر به تناظریابی بین گره‌های انتهایی اسکلت‌ها است. به این علت که آن‌ها ابتدا گره‌های انتهایی اسکلت در اطراف منحنی استخراج شده از شکل را به صورت ساعت‌گرد برچسب‌گذاری می‌کنند و سپس با استفاده از ترتیب گره‌ها به تناظریابی بین دو اسکلت می‌پردازند. بنابراین روش آن‌ها قادر به تناظریابی بین گره‌های اتصالی اصلی و اتصالی نیست. چراکه این گره‌ها در اطراف منحنی شکل نیستند و نمی‌توان برای آن‌ها ترتیب منظمی در نظر گرفت. در این مقاله، عملیات تناظریابی در

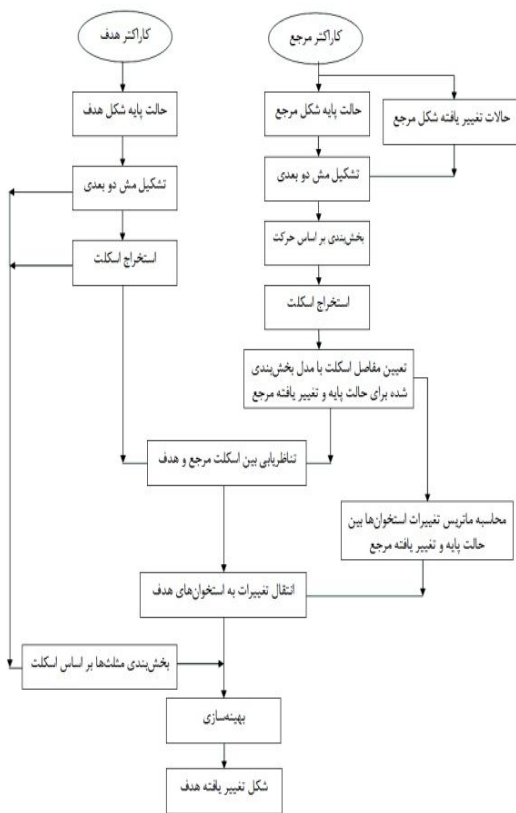
دادند. چون در هر قاب مفصل‌های شخصیت ردیابی می‌شوند، کوچک‌ترین مقدار خطا در هر قاب باعث می‌شود تا در قاب‌های پایانی مقادیر بالایی از خطا حاصل شود. به این علت که مقادیر خطای هر قاب جمع شده و در نهایت، مقدار زیادی خطا در مورد مکان مفاصل به دست می‌آید. برای ردیابی، ویژگی‌هایی مانند بافت، موقعیت و حجم مفاصل باید استخراج شوند. تا حرکات مفصل‌ها اخذ شوند. استخراج این ویژگی‌ها باید با دقت انجام گیرند، چون هر نوع خطایی منجر به ردیابی نادرست می‌شود. از دیگر روش‌های اخیر ارائه شده برای انتقال تغییرات در شکل‌های دوبعدی به روش (لی و همکاران، ۲۰۱۳) می‌توان اشاره کرد. در این روش، شکل تغییر یافته بین دو قاب با درون‌یابی تکمیل می‌شود. باید توجه داشته باشیم که در این روش، مش شکل موجود در قاب‌های یک سکانس پویانمایی، باید اتصالات یکسانی داشته باشد؛ ولی لبه‌های متصل شده شکل می‌توانند دلخواه باشند. در این روش، درون‌یابی با بهینه‌سازی تابع انرژی تغییرات انجام می‌شود. این تابع انرژی برای کاهش مؤلفه‌های غیر هم‌اندازه شکل تغییر یافته تعریف می‌شود. مؤلفه‌های غیر هم‌اندازه شکل بر اساس دو بردار عمود به دست می‌آیند. یکی از این دو بردار، بردار لبه بوده و دیگری برداری از مشتقات بردار لبه است. این الگوریتم، ابتدا با روش "تا حد امکان هم‌اندازه بودن" (AIAP) و درون‌یابی لبه‌های انفرادی، شکل مرجع را تغییر می‌دهد و اطلاعات تغییر یافته برای هر لبه از شکل مرجع را ذخیره می‌کند و سپس سکانس پویانمایی برای شکل هدف را توسط تغییرات بردارهای لبه تولید شده از شکل مرجع، قاب به قاب بازسازی می‌کند. در این روش، گاهی اوقات در اثر وجوه هم‌پوشان، شکل‌های نادرستی تولید می‌شوند که این وجوه از درون‌یابی خطی به دست می‌آیند. برای انتقال تغییرات یک شکل به شکل دیگر توسط روش AIAP، ابتدا باید شکل‌ها اتصالات یکسانی داشته باشند و بین رئوس و لبه‌های مش‌های دو شکل، تناظریابی دقیقی صورت گرفته باشد. علاوه بر این، باید تغییر شکل در قاب‌های سکانس مرجع بر اساس روش AIAP انجام گیرد. بنابراین، ویژگی‌هایی که از سکانس‌های مرجع استخراج می‌شوند، مستقل از ساختار شکل نبوده و بر اساس درون‌یابی به روش AIAP هستند. اگر شرایط بالا در شکل مرجع برقرار نباشند، نمی‌توان با این روش تغییرات موجود در یک شکل مرجع را به درستی به شکل هدف منتقل کرد. در این الگوریتم، روشی برای پیدا کردن رئوس متناظر

¹ As-Isometric-As-Possible

۳) انتقال تغییرات حاصل از استخوان‌های مرجع به استخوان‌های متناظر هدف.

۲- روش پیشنهادی

در این بخش، مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی به ترتیب توضیح داده می‌شوند. کلیات مبحث فرآیند انتقال حرکت در شکل (۲) نشان داده می‌شود. تغییرات مش مرجع توسط حالت پایه شکل مرجع (S) و حالت تغییر یافته شکل مرجع (S') به دست می‌آیند. این تغییرات از طریق جابه‌جایی، چرخش و تغییر مقیاس استخوان‌های حالت پایه مرجع و حالت تغییر یافته مرجع محاسبه می‌شوند. تغییرات کسب شده به حالت پایه مش هدف (T) با ساختاری متفاوت، منتقل شده و حالت تغییر یافته مش هدف (T') به وجود می‌آید.



(شکل ۱-۱): بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی.

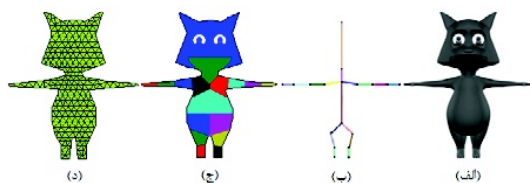
۲-۱- پیش پردازش

در مرحله پیش پردازش، شکل‌های مورد نظر را به حالتی تبدیل می‌کنیم که بتوانیم ویژگی‌های مفیدی برای

دو مرحله بین گره‌های اسکلت مرجع و هدف انجام می‌گیرد. در مرحله نخست، موقعیت زاویه‌ای اسکلت‌های خارج شده از هر گره محاسبه شده و در مرحله دوم، مجموع طول اسکلت‌های متصل شده به هر گره به دست می‌آیند. روش پیشنهادی مستقل از ترتیب گره‌ها بوده و نیازی به استخراج ترتیب بین گره‌ها نیست. بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱) ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی، حالت پایه شکل مرجع، حالات تغییر یافته شکل مرجع و حالت پایه شکل هدف را به عنوان ورودی دریافت می‌کند؛ سپس در مرحله پیش پردازش، برای تمامی شکل‌هایی که به عنوان ورودی دریافت کرده است، مش دو بعدی و اسکلت اولیه را استخراج می‌کند. توجه داشته باشید که با استفاده از روش بخش بندی بر اساس حرکت، اسکلت‌های ثانویه برای حالت پایه و حالات تغییر یافته شکل مرجع به دست می‌آیند. اسکلت ثانویه به ما کمک می‌کند تا مفاصل دقیق تری را برای بیان تغییرات در شکل مرجع پیدا کنیم. در مرحله بعد با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله، عملیات تناظریابی بین اسکلت حالت پایه شکل مرجع و شکل هدف انجام می‌شود. پس از محاسبه ماتریس تغییرات بین استخوان‌های حالت پایه و حالات تغییر یافته شکل مرجع، این تغییرات به استخوان‌های متناظر در شکل پایه هدف منتقل می‌شوند. زمانی که، میزان تغییرات برای هر یک از استخوان‌های شکل هدف کسب شدند، باید مطابق با تغییرات این استخوان‌ها، مثلث‌های مش دو بعدی شکل هدف نیز تغییر یابند. بنابراین، باید مثلث‌های شکل هدف بر اساس نزدیک ترین فاصله تا استخوان‌های مجاورشان بخش بندی شوند، تا مطابق با تغییرات استخوان‌های هم جوارشان تغییر شکل دهند. در اثر تغییر شکل مستقل هر یک از بخش‌های مثلثی در مناطق مفصلی، شکل هدف دچار شکستگی و یا هم پوشانی می‌شود. برای جلوگیری از این عوامل، عملیات بهینه سازی در مرحله نهایی به مثلث‌های گسیخته شده و یا هم پوشانی یافته در محل مفاصل اعمال می‌شود تا شکل تغییر یافته هدف، حالت پیوسته و درستی پیدا کند. در این مقاله، انتقال حرکت از شکل مرجع به شکل هدف با مراحل اصلی زیر تکمیل می‌شود:

- ۱) پیش پردازش (استخراج مش دو بعدی و اسکلت با مفاصل دقیق).
- ۲) تناظریابی بین اسکلت‌های استخراج شده از شکل‌های مرجع و هدف.

مثلث‌های دیگر در ارتباط است؛ درحالی‌که در مش‌های چندضلعی تعداد لبه‌های مشترک زیادتر است. در این شرایط تحلیل وجوه چندضلعی دشوارتر است. در الگوریتم پیشنهادی برای تشکیل مش دوبعدی شکل، علاوه‌بر استخراج لبه و تعبیه یک چندضلعی روی لبه، اسکلت تمامی اندام‌ها را استخراج می‌کنیم و سپس وابستگی اضلاع چندضلعی روی لبه شکل را نسبت به هریک از استخوان‌های اسکلت با استفاده از کم‌ترین فاصله اقلیدسی به‌دست می‌آوریم. برای هریک از اضلاع چندضلعی، در راستای عمود بر استخوان متناظرش نمونه‌برداری انجام می‌دهیم. تمامی نمونه‌های داخل شکل انتخاب شده و مختصات آن‌ها به‌عنوان ورودی به سامانه مثلث‌سازی (روپرت، ۱۹۹۵) وارد می‌شوند. خروجی این سامانه، رئوس مثلث‌ها و وجوه متناظر می‌باشند. شکل (۳) نمونه‌ای از مراحل این فرآیند را نشان می‌دهد.



(شکل-۳): تشکیل مش دوبعدی با روش نمونه‌برداری. (الف):

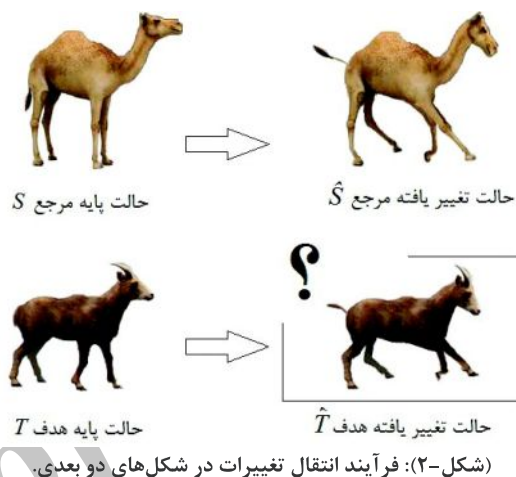
شکل اصلی. (ب): اسکلت. (ج): بخش‌بندی بر اساس اسکلت (لبه شکل با رنگ سیاه در اطراف شکل است). (د): شکل مش بندی‌شده.

• اسکلت‌بندی بر اساس حرکت

برای انتقال تغییرات از یک سکانس پویانمایی به سکانس دیگر، ابتدا باید تغییرات مفاصل را در هر قاب به‌دست آوریم؛ سپس با انتقال این تغییرات به مفاصل شخصیت دیگر باعث حرکت آن شویم.

برای این منظور، می‌توان اسکلت شکل را توسط الگوریتم استخراج اسکلت در هر قاب به‌دست آورد؛ ولی این الگوریتم هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد محل مفاصل در اختیار ما قرار نمی‌دهد. برای به‌دست‌آوردن محل مفاصل در قاب‌های متوالی از بخش‌بندی بر اساس حرکت استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر گرادیان تغییر شکل^۱ بوده و از تغییرات ایجادشده بین دو مثلث مجاور از مش دوبعدی در طی سکانس پویانمایی استفاده می‌کند. بنابراین، با کمک بخش‌بندی می‌توانیم اسکلتی با مفاصل دقیق در هر قاب به‌دست آوریم. الگوریتم بخش‌بندی بر اساس حرکت بر مبنای الگوریتم ارائه‌شده توسط (لی و همکاران، ۲۰۰۶)

نشان دادن تغییرات از آن‌ها استخراج کنیم. در الگوریتم پیشنهادی، تغییرات با استفاده از اندام‌های اسکلتی محاسبه شده و با انتقال به استخوان‌ها و مثلث‌های شکل هدف باعث تغییر شکل آن می‌شوند. بنابراین، در این مرحله مش دوبعدی برای شکل‌های مرجع و هدف به همراه اسکلتی با مفاصل دقیق برای شکل‌های مرجع کسب می‌شوند.



حالت پایه هدف T حالت تغییر یافته هدف \hat{T}

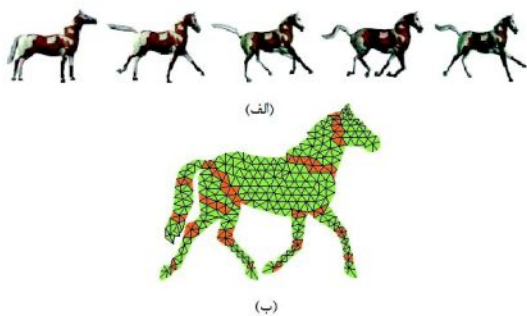
(شکل-۲): فرآیند انتقال تغییرات در شکل‌های دو بعدی.

• تشکیل مش دو بعدی

روش‌های مختلفی برای بیان هندسی شکل وجود دارند. ولی روش مطلوب با توجه به مزایا، معایب و کاربری بر اساس نیاز انتخاب می‌شود. مش‌های مثلثی یکی از رایج‌ترین روش‌های به‌کار رفته برای توصیف هندسه شکل است. چون به‌راحتی توسط سامانه‌های شناخته‌شده (روپرت، ۱۹۹۵) قابل پیاده‌سازی بوده و پردازش تغییرات برای هر مثلث سریع‌تر از پردازش تغییرات برای تک‌تک نقاط شکل انجام می‌گیرد. یک مش مثلثی مجموعه‌ای از رئوس $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ و وجوه $F=(f_1, f_2, \dots, f_n)$ است. هر رأس دارای موقعیتی در فضای دوبعدی بوده و هر وجه از یک مجموعه با سه رأس تشکیل می‌شود که بیان‌کننده چگونگی اتصال رأس‌ها برای به‌وجودآوردن یک مثلث است. ساختار هر مش بسته به تعداد رئوس، وجوه و اتصالات آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، شکل مش توسط موقعیت رأس‌ها تعیین می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی، مش‌های مثلثی به‌عنوان مناسب‌ترین روش بیان هندسه شکل در نظر گرفته می‌شوند. این روش دارای دو مزیت بر مش‌های چندضلعی می‌باشد. نخست این‌که، هر وجه در مش مثلثی تعداد یکسانی رأس دارد که فرآیند پیاده‌سازی را آسان‌تر می‌کند. دوم این‌که، هر مثلث با سه لبه با

¹ Deformation gradient

همسایه وجود دارد. مناطق مرزی در محل‌هایی به وجود می‌آیند که تغییرات زیادی بین دو وجه حاصل می‌شود. این مناطق، وجوه دیگر را به محل‌های جداگانه‌ای در اطراف مرز دسته‌بندی می‌کنند. مناطق مرزی به‌عنوان مناطق مفصلی در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۴) نمونه‌ای از مناطق مفصلی استخراج شده از یک سکناس حرکتی را نشان می‌دهد. با توجه به مفاصل کسب‌شده، به تصحیح مدل اسکلتی به دست آمده از الگوریتم استخراج اسکلت (بای و همکاران، ۲۰۰۷) می‌پردازیم و مفاصل دقیقی را برای هر شکل از سکناس پویانمایی تعیین می‌کنیم.



(شکل-۴): استخراج مناطق مفصلی. (الف): سکناسی از حرکت یک اسب. (ب): مناطق مفصلی استخراج شده با رنگ نارنجی نشان داده می‌شوند.

برای تصحیح مکان مفاصل، ابتدا با الگوریتم استخراج اسکلت، اسکلت شکل و مختصات محل تقاطع اسکلت‌ها را در مفاصل اولیه به دست می‌آوریم؛ سپس با توجه به مختصات مناطق مفصلی به دست آمده از سکناس حرکتی به تصحیح مختصات مفاصل قبلی می‌پردازیم. بدین صورت که مکان مفاصل حاصل از اسکلت استخراج شده را به مکان نزدیک‌ترین مفاصل حاصل از بخش‌بندی حرکتی منتقل می‌کنیم. همچنین، برای خطوط اسکلتی که در قبل هیچ مفصلی برای آن‌ها در نظر گرفته نشده بود، در این مرحله، مفصل تعیین می‌کنیم. در واقع برای خطوط اسکلتی که از مناطق مفصلی عبور می‌کنند، مفصلی در آن مختصات در نظر می‌گیریم. شکل (۵)، اسکلت تصحیح شده را برای شکل اسب نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در قسمت (الف)، تعداد محدودی از مفاصل (نقاط زرد رنگ) و در قسمت (ب) تعداد بیشتری از مفاصل با مکان دقیق نمایش داده می‌شوند.

برای مدل‌های سه‌بعدی است. روابط دوبعدی این الگوریتم در ادامه توضیح داده می‌شوند.

گرادیان تغییر شکل (سامنر و پوپویک، ۲۰۰۴) بخش غیرقابل انتقال ماتریس آفین^۱ است که می‌تواند تغییرات ایجاد شده بین حالت اولیه شکل مرجع و حالت تغییر یافته شکل مرجع را از قبیل میزان چرخش، جهت و مقیاس بیان کند. در صورتی که v_i رئوس مثلث در حالت اولیه و v'_i رئوس مثلث در حالت تغییر یافته (گرادیان تغییر شکل) بین این دو مثلث می‌تواند توسط رابطه زیر حاصل شود:

$$F = O' O^{-1} \quad (1)$$

در حالی که در مش دو بعدی $O = [v_2 - v_1 \quad v_3 - v_1]$ بوده و $O' = [v'_2 - v'_1 \quad v'_3 - v'_1]$ است. بنابراین، برای هر حالت تغییر یافته t در سکناسی از انیمیشن می‌توان تغییرات گرادیانی را برای هر وجه f_i تعیین کرد. توسط تبدیل (F'_i) می‌توان تغییرات ایجاد شده بین وجه حالت پایه مش (f_i) و وجه حالت تغییر یافته مش (f'_i) را پیدا کرد. تفاضل گرادیان تغییر شکل بین دو وجه همسایه f_i و f_j توسط ماتریس تفاضلی $(F'_i - F'_j)$ بیان می‌شود. نرم فروبنیوس این تفاضل بیانگر فاصله تغییرات بین این دو وجه است. علاوه بر این، فاصله به دست آمده با تقسیم به فاصله ژئودزیک^۲ $geo(f_i, f_j)$ بین مراکز وجه‌های همسایه f_i و f_j نرمالیزه می‌شود. در این صورت می‌توان تغییرات مثلث‌های کوچک را نیز با این روابط بیان کرد. بدون نرمالیزه کردن فقط تغییرات مثلث‌های بزرگ‌تر نشان داده می‌شوند. هدف از محاسبه تغییرات در وجه همسایه، شناسایی و تعیین نواحی مفاصل و قابل خم شدن است. این الگوریتم به محاسبه فاصله تغییرات بین وجه همسایه i و j در هر فریم پرداخته و بزرگ‌ترین فاصله را به عنوان D_{ij} انتخاب می‌کند. برای ارزیابی میزان تغییرات بین این دو وجه در همه فریم‌های انیمیشن به کار می‌رود. بنابراین، فاصله مورد نظر با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D_{ij} = \max \left(\frac{\|F'_i - F'_j\|_F^2}{geo(f_i, f_j)} \right) \quad \forall t \in N \quad (2)$$

در رابطه بالا، N بیانگر سکناسی از همه حالات پویا نما است. اگر هر دو وجه، گرادیان تغییر شکل مشابهی داشته باشند، فاصله تغییرات بین آن‌ها نیز کوچک‌تر می‌شود؛ ولی اگر فاصله بزرگ‌تر شود، یعنی تغییرات زیادی بین وجوه

¹ Affine transformation
² Geodesic distance

توسط تناظریابی پیشنهادی که از سه مرحله تشکیل یافته است، گره‌های متناظر نهایی انتخاب می‌شوند. در این الگوریتم، گام نخست بر اساس موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده از گره‌ها بوده، گام دوم بر اساس مجموع طول استخوان‌های متصل شده به گره‌ها است و گام سوم با استفاده از ترکیب نمرات حاصل از دو گام قبلی محاسبه می‌شود. هر سه گام این تناظریابی، به ترتیب در مورد تمامی گره‌های بخش‌بندی شده (سه گروه) به‌طور مجزا اجرا می‌شوند.

۲-۲-۱- برچسب‌زنی گره‌ها

ابتدا دایره‌ی معنی‌دار از زوایا (دایره مثلثاتی) را می‌سازیم که هر بخش آن بیان‌گر زاویه‌ای مشخص است؛ سپس به مرکز گره‌های اسکلت شکل مرجع و اسکلت شکل هدف، این دوایر رسم می‌شوند. تعداد محل تقاطع خطوط اسکلتی با دوایر مثلثاتی محاسبه شده و گره‌هایی که دوایر محیطی آن‌ها فقط در یک نقطه با خطوط اسکلتی قطع پیدا می‌کنند، به‌عنوان گره‌های انتهایی^۱، گره‌هایی که دوایر محیطی آن‌ها در دو نقطه با خطوط اسکلتی قطع پیدا می‌کنند، به‌عنوان گره‌های اتصالی^۲ و گره‌هایی که دوایر محیطی آن‌ها در بیش از دو نقطه با خطوط اسکلتی قطع پیدا می‌کنند، به‌عنوان گره‌های اتصالی اصلی^۳ برچسب زده می‌شوند. نمونه‌ای از گره‌های انتهایی، اتصالی و اتصالی اصلی در شکل (۷) نشان داده می‌شوند. گره‌های اتصالی اصلی با برچسب J، گره‌های اتصالی با برچسب C و گره‌های انتهایی با برچسب E مشخص می‌شوند.

پس از مشخص شدن برچسب هر یک از گره‌های شکل مرجع و هدف به تناظریابی بین دو شکل می‌پردازیم. برای رسیدن به این منظور، ابتدا به تناظریابی بین گره‌های اتصالی اصلی پرداخته و سپس عملیات تناظریابی به ترتیب در مورد گره‌های اتصالی و گره‌های انتهایی انجام می‌شود. الگوریتم پیشنهادی همانند شاخه‌های یک درخت عمل می‌کند. بدین ترتیب که در آن ابتدا تناظریابی در مورد تنه اصلی درخت (گره‌های اتصالی اصلی) انجام شده و سپس تناظریابی برای شاخه‌های درخت (گره‌های اتصالی و انتهایی) انجام می‌شود. در نتیجه، مراحل مختلف الگوریتم در مورد همه گره‌ها به ترتیب اجرا شده و بررسی از تنه اصلی به شاخه‌ها و سپس به زیرشاخه‌ها باعث افزایش دقت الگوریتم می‌شود.

¹ End node
² Connection node
³ Junction node

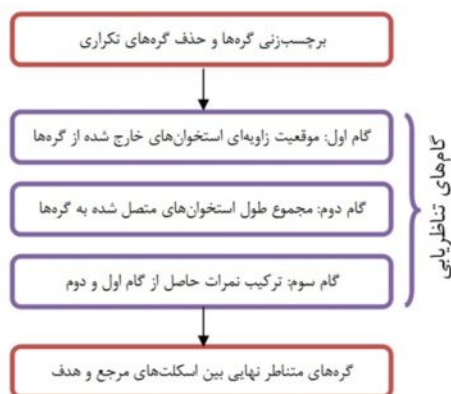


(الف) (ب)

(شکل-۵): تعیین مفاصل اسکلت با استفاده از سکانس حرکتی. (الف): مدل با اسکلت استخراج شده از الگوریتم استخراج اسکلت (بای و همکاران، ۲۰۰۷). (ب): مدل با اسکلتی از مفاصل تصحیح شده.

۲-۲-۲- تناظریابی اسکلت

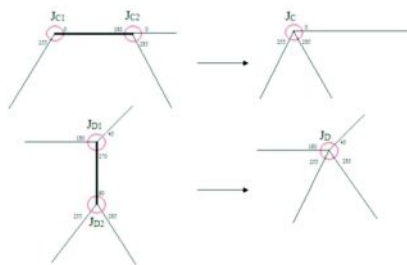
الگوریتم تناظریابی بین مفاصل اسکلت‌های شکل مرجع و هدف انجام می‌گیرد. مفاصل اسکلت شکل مرجع بر اساس بخش‌بندی حرکتی تعیین می‌شوند؛ ولی مفاصل اسکلت شکل هدف توسط پویانما به صورت دستی انتخاب می‌شوند؛ تا عملیات انتقال تغییرات به شکل هدف با کیفیت بالا و سلیقه پویانما انجام گیرد. در این بخش، الگوریتم تناظریابی بین اسکلت شکل مرجع و شکل هدف توضیح داده می‌شود. نمودار جریان الگوریتم تناظریابی اسکلتی در شکل (۶) نشان داده می‌شود.



(شکل-۶): بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی برای تناظریابی اسکلتی.

در این بخش، ابتدا مفاصل (گره‌ها) با توجه به تعداد استخوان‌های متصل شده به آن‌ها به سه دسته بخش‌بندی شده و برچسب مربوط به گروه خود را دریافت می‌کنند؛ سپس گره‌های تکراری که بر اثر الگوریتم استخراج اسکلت ظاهر شده‌اند، حذف می‌شوند. بعد از مرحله پیش‌پردازش،

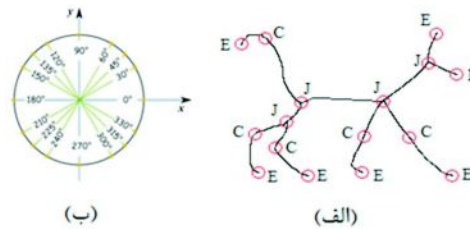
دایره محاسبه می‌کنیم؛ سپس فاصله مکانی گره‌های اتصالی اصلی را نسبت به هم محاسبه کرده و گره‌هایی که در همسایگی هم هستند، به‌عنوان گره‌های مجاور انتخاب می‌کنیم. موقعیت زاویه‌ای خطوط اسکلتی خارج‌شده از گره‌های مجاور مقایسه شده و خطوط اسکلتی که در موقعیت زاویه‌ای با اختلاف 180° درجه نسبت به هم واقع شده‌اند، به‌عنوان خطوط اسکلتی مشترک بین دو گره مجاور در نظر گرفته می‌شوند. درنهایت، دو گره اطراف این خطوط با یک گره برجسب زده می‌شوند. شکل (۹)، موقعیت زاویه‌ای خطوط اسکلتی بین گره‌های مجاور را نشان می‌دهد.



(شکل ۹): حذف خطوط اسکلتی مشترک توسط الگوریتم پیشنهادی. پس از اعمال روش پیشنهادی، اسکلت با گره‌های تکراری (J_{C1} , J_{C2}) و (J_{D1} , J_{D2}) به اسکلتی بدون گره‌های تکراری تبدیل شده و فقط گره‌های اتصالی اصلی (J_D , J_C) باقی می‌مانند.

۲-۲-۲- تناظر یابی گره‌ها

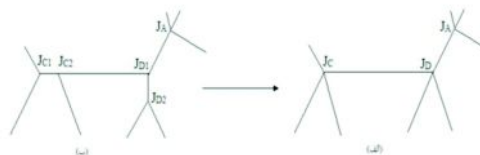
قبل از به‌کارگیری الگوریتم مورد نظر باید هر دو اسکلت در یک حالت و وضعیت قرار گیرند. برای رسیدن به این هدف می‌توان از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای شکل‌های دوبعدی (مزوگی و همکاران، ۲۰۱۲) استفاده کرد و هر دو اسکلت را در یک جهت غالب قرار داد. عملیات تناظر یابی برای هر گره در دو مرحله انجام می‌گیرد. در گام نخست، موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از هر گره نسبت به زوایای دایره مثلثاتی تعبیه‌شده در گرهی که این استخوان‌ها به آن وصل هستند، محاسبه شده و دو گره متناظر از اسکلت مرجع و اسکلت هدف بر اساس بیشینه مقدار تابع احتمال زاویه‌ای انتخاب می‌شوند. در گام دوم، مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌ها، سنجیده شده و دو گره متناظری که کم‌ترین فاصله را برای تابع انرژی معرفی شده در بخش بعد نتیجه می‌دهند، به‌عنوان گره‌های متناظر گام دوم در نظر می‌گیریم. درنهایت، نتایج حاصل از



(شکل ۷): برجسب‌زنی گره‌ها. (الف): اسکلت با گره‌های برجسب‌زده شده. (ب): دایره مثلثاتی.

• حذف گره‌های تکراری

در بعضی موارد، در اثر الگوریتم استخراج اسکلت و نیز ساختار شکل برای ناحیه مشخصی از شکل، اسکلت‌های متنوعی استخراج می‌شود. با این‌که این اسکلت‌ها از لحاظ ساختار کلی بسیار شبیه هم هستند، ولی از لحاظ ساختار محلی مانند تعداد گره‌ها متفاوتند. اکثر این گره‌های تکراری در همسایگی یکدیگر قرار گرفته و بیان‌گر یک ناحیه هستند؛ ولی در نظر گرفتن این گره‌ها به‌طور مجزا موجب تولید نتایج نادرست در تناظر یابی می‌شود. شکل (۸) نمونه‌ای از گره‌های تکراری در اسکلت استخراج‌شده را نشان می‌دهد.



(شکل ۸): حذف گره‌های تکراری. (الف): اسکلت بدون گره تکراری. (ب): اسکلت شامل دو گره تکراری (J_{C1} , J_{C2}) و (J_{D1} , J_{D2}) توسط الگوریتم ارائه شده، شکل (ب)، معادل شکل (الف) می‌شود.

برای از بین بردن خطای این گره‌ها به دنبال تبدیل برجسب چند گره به یک گره هستیم. همانند شکل (۸) که توسط روش ارائه‌شده، اسکلت (ب) با دو گره تکراری به اسکلت (الف) بدون گره تکراری تبدیل می‌شود. فرض کنید، تناظر یابی در مورد گره‌های اتصالی اصلی انجام می‌شود، ولی تعداد این گره‌ها در اسکلت شکل مرجع و هدف یکسان نیستند. برای مثال، در شکل (۸)، برای شکل مرجع (الف) سه گره اتصالی اصلی وجود دارد، ولی برای شکل هدف (ب) پنج گره اتصالی اصلی وجود دارد؛ چون تعداد گره‌ها در اسکلت هدف بیشتر است، ابتدا دوایری بر روی گره‌های اتصالی اصلی اسکلت شکل هدف تعبیه کرده و موقعیت زاویه‌ای خطوط اسکلتی خارج‌شده از این گره‌ها را در نواحی قطع‌شده با لبه

اگر مجموعه گره‌های شکل مرجع را با S و مجموعه گره‌های شکل هدف را با T نشان دهیم، در این صورت گره‌های اتصالی اصلی در اسکلت شکل مرجع با s_i و گره‌های اتصالی اصلی در اسکلت شکل هدف با t_j بیان می‌شوند. در شکل (۱۰) نمونه‌ای از گره‌های اسکلت شکل مرجع و هدف همراه با دایره تعبیه‌شده بر روی گره‌ها و موقعیت زاویه‌ای خطوط اسکلتی نشان داده می‌شوند. میزان تناظر زاویه‌ای بین گره‌ی از اسکلت شکل مرجع و هدف با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\delta_{\theta} = \max P(t_j | s_i) \quad (۴)$$

در رابطه بالا، $P(t_j | s_i)$ بیان‌گر تابع احتمال شرطی بین گره‌های اسکلت مرجع و هدف است. تناظر زاویه‌ای بین گره‌های مرجع و هدف با δ_{θ} مشخص می‌شود. تابع احتمال شرطی مطابق با زاویه‌ای گره‌ها با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P(t_j | s_i) = \frac{p(t_j) \cap p(s_i)}{p(s_i)} = \frac{p(\theta_{t_j} \cap \theta_{s_i})}{p(s_i)} \quad (۵)$$

$$p(\theta_{t_j} \cap \theta_{s_i}) = \frac{N(\theta_{s_i} = \theta_{t_j})}{\Psi_{s_i}}$$

در رابطه بالا، $P(\theta_{t_j} \cap \theta_{s_i})$ بیان‌گر اشتراک موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از گره اسکلت شکل مرجع و هدف است و $P(s_i)$ تابع احتمال زاویه‌ای رخداد گره s_i از بین مجموعه گره‌های شکل مرجع S است. توجه داشته باشید که $P(\theta_{t_j})$ و $P(\theta_{s_i})$ به ترتیب بیان‌گر تابع احتمال زاویه‌ای برای گره‌های اسکلت شکل مرجع و هدف هستند. در این رابطه، $N(\theta_{s_i} = \theta_{t_j})$ بیان‌گر تعداد گره‌ها با موقعیت زاویه‌ای مشترک بین گره‌های مرجع و هدف و Ψ_{s_i} بیان‌گر تعداد استخوان‌های خارج‌شده از گره نام اسکلت مرجع است. برای به دست آوردن موقعیت‌های زاویه‌ای مشترک بین گره‌های مرجع و هدف از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\delta_{\theta} = \arg \min_{\delta} \sum_{(s_i, t_j) \in \delta} |\theta_{s_i} - \theta_{t_j}| \quad (۶)$$

در این رابطه، $\delta \subseteq (S_i, T_j)$ بیان‌گر مجموعه متنظاری از گره‌های مرجع و هدف است که تناظرهای این مجموعه توسط رابطه (۶) مورد آزمایش قرار می‌گیرند. تناظرهایی که موجب کمینه‌سازی این رابطه می‌شوند، به‌عنوان گره‌های متنظر از این مرحله شناخته می‌شوند. این گره‌های متنظر، موقعیت‌های زاویه‌ای مشترک دارند. مراحل کسب جفت‌های متنظر بر اساس موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از گره‌ها در الگوریتم (۱) ارائه شده است. با توجه به مقادیر تابع احتمال زاویه‌ای بین جفت‌گره‌های متنظر، نمره‌ای به این جفت‌گره‌ها اختصاص داده می‌شود، که توسط این نمرات، جفت‌گره‌های متنظر این گام شناسایی می‌شوند. بالاترین

این دو گام با هم ترکیب شده و گره‌های متنظر نهایی انتخاب می‌شوند.

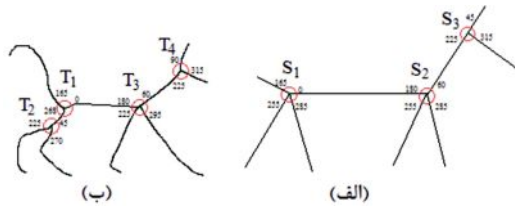
• گام نخست: موقعیت زاویه‌ای استخوان‌ها نسبت به زوایای دایره مثلثاتی

همان‌طور که در قبل نیز مطرح شد، ابتدا به تناظر یابی بین گره‌های اتصالی اصلی (تنه اصلی درخت) می‌پردازیم. در الگوریتم پیشنهادی برای بیان میزان تناظر بین گره‌های اسکلت مرجع و هدف از تابع احتمال شرطی استفاده می‌کنیم. ابتدا دایره معنی‌دار از زوایا را به مرکز گره‌های اتصالی اصلی در اسکلت‌های شکل مرجع و هدف تعبیه کرده و محل تقاطع خطوط اسکلتی خارج‌شده از هر گره را با لبه دایره متنظر در هر دو شکل به‌طور مجزا به دست می‌آوریم. با استفاده از مختصات محل تقاطع خطوط اسکلتی با لبه دایره می‌توان امتداد زاویه‌ای خطوط اسکلتی خارج‌شده از هر گره را با رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y_d - y_0}{x_d - x_0} \quad (۳)$$

در رابطه بالا، (x_0, y_0) مختصات مرکز دایره تعبیه‌شده بر روی گره است و (x_d, y_d) مختصات محل تقاطع خطوط اسکلتی با لبه دایره است. θ بیان‌گر میزان زاویه‌ای است که خطوط اسکلتی در امتداد آن از گره خارج می‌شوند.

با توجه به این که موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های متصل به گره‌ها در دسترس است، می‌توان با کسب موقعیت زاویه‌ای مشترک بین استخوان‌های مرجع و هدف و به کار بستن تابع احتمال شرطی در رابطه (۵) میزان تناظر زاویه‌ای بین گره‌های اسکلت مرجع و هدف را به دست آورد. تابع احتمال شرطی، میزان تناظر گره‌های هدف به شرط گره‌های مرجع را بیان می‌کند. بنابراین، بیشینه مقدار این تابع بالاترین میزان تناظر به دست آمده بین گره‌های مرجع و هدف را بیان می‌کند. بالاترین میزان این تابع بر اساس بیش‌ترین تعداد نقاط با موقعیت زاویه‌ای مشترک بین گره‌ی از اسکلت مرجع و هدف محاسبه می‌شود. برای کسب تعداد نقاط مشترک بین گره‌ی از اسکلت مرجع و هدف از رابطه (۶) استفاده می‌کنیم. در این رابطه گره‌هایی از اسکلت مرجع و هدف که استخوان‌های خارج‌شده از آن‌ها موقعیت زاویه‌ای متشابهی دارند، باعث کمینه‌سازی رابطه معرفی‌شده می‌شوند و به‌عنوان گره‌های متنظر این مرحله انتخاب می‌شوند. گره‌هایی که اسکلت‌های خارج‌شده از آن‌ها زوایای متفاوتی دارند، باعث بیشینه شدن مقدار رابطه (۶) می‌شوند.



(شکل - ۱۰): موقعیت زاویه‌ای خطوط اسکلتی بر روی دایرهٔ مثلثاتی (زوایا بر حسب درجه هستند). (الف): شکل مرجع با گره‌های اتصالی اصلی با برچسب S_i . (ب): شکل هدف با گره‌های اتصالی اصلی با برچسب T_j .

پس از این که در گام نخست، تابع احتمال زاویه‌ای بین جفت‌گره‌های متناظر محاسبه شد. در گام دوم به دنبال تناظر بر اساس مجموع طول استخوان‌های متصل‌شده به گره‌ها خواهیم بود. ترکیب این دو گام موجب بهبود نتایج شده و تناظرهای به‌دست‌آمده از این دو مرحله، دقیق‌تر از نتایج تک‌تک مراحل هستند.

• گام دوم: مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌ها

در این گام، تناظریابی بین جفت‌گره‌های اسکلت شکل مرجع و هدف بر اساس مجموع طول استخوان‌های متصل‌شده به گره‌ها انجام می‌شود. در این بخش نیز با توجه به میزان تناظر کسب‌شده بین دو گره، نمره‌ای به جفت‌گره‌های متناظر تعلق می‌گیرد. توجه داشته باشید که نمرات بخش قبل از نمرات این بخش مستقل هستند.

در این روش، ابتدا طول هریک از استخوان‌های موجود در اسکلت‌های مرجع و هدف محاسبه شده و سپس طول تمام استخوان‌ها نسبت به بزرگ‌ترین طول استخوان کسب‌شده از اسکلت مربوطه، نرمالیزه می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده می‌شود، مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌ها محاسبه شده و نتایج برای هریک از گره‌های اسکلت مرجع و هدف با رابطه (۷) مقایسه می‌شوند. طول استخوان‌هایی از دو اسکلت مرجع و هدف که به‌طور تقریبی با هم برابر بوده و موجب کمینه‌سازی رابطه (۷) می‌شوند، به‌عنوان دو گرهٔ متناظر در نظر گرفته می‌شوند. مقایسهٔ مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌های مرجع و هدف توسط رابطهٔ زیر انجام می‌شود:

$$\delta'' = \arg \min_{\delta} \sum_{(S_i, T_j) \in \delta} d_{(S_i, T_j)} \quad (7)$$

$$d_{(S_i, T_j)} = \sum_{\substack{(S_{iL}, T_{jM}) \in \delta'' \\ (S_{iL}, T_{jM}) \neq (S_i, T_j)}} |g(S_i, S_{iL}) - g(T_j, T_{jM})|$$

نمره به جفت‌گره‌ی تعلق می‌گیرد که بالاترین تابع احتمال زاویه‌ای را کسب می‌کند. همچنین کمترین نمره به جفت‌گره‌ی داده می‌شود که کمترین تابع احتمال زاویه‌ای را به‌دست آورده است.

الگوریتم ۱

تناظریابی بر اساس موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از گره‌ها

۱- ورودی: $(S_i, T_j) \in \delta$

۲- خروجی: $(S_i, T_j) \in \delta_0$

۳- مقدار دهی اولیه: $\min D = 50$

۴- حلقه:

برای هر جفت نامزد انتخاب‌شده $C' = (S_{\text{candid}}, T_{\text{candid}})$

از تناظرهای اولیهٔ موجود در δ ، جفتی به‌عنوان نامزد انتخاب می‌شود تا موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از این گره‌ها با روابط زیر محاسبه شوند.

$$\delta_{\theta} = \max P(t_j | s_i)$$

$$P(t_j | s_i) = \frac{P(t_j) \cap P(s_i)}{P(s_i)} = \frac{P(\theta_{t_j} \cap \theta_{s_i})}{P(s_i)}$$

$$P(\theta_{t_j} \cap \theta_{s_i}) = \frac{N(\theta_s = \theta_t)}{\psi_s}$$

$$\delta_{\theta} = \arg \min_{\delta} \sum_{(S_i, T_j) \in \delta} |\theta_{S_i} - \theta_{T_j}|$$

در این روابط، جهت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از گره S_i است θ_{S_i} جهت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از گره T_j است.

۵- اگر:

$$|\theta_{S_{\text{candid}}} - \theta_{T_{\text{candid}}}| < \min D$$

$$\min D = |\theta_{S_{\text{candid}}} - \theta_{T_{\text{candid}}}|$$

۶- اگر:

$$|\theta_{S_{\text{candid}}} - \theta_{T_{\text{candid}}}| < |\theta_{S_i} - \theta_{T_j}|$$

۷- آنگاه:

جفت‌کاندید $(S_{\text{candid}}, T_{\text{candid}})$ را در مجموعه δ_0 قرار ده.

۸- اتمام حلقه

(به شرطی که همهٔ جفت‌های موجود در δ ، $(S_i, T_j) \in \delta$)

مورد بررسی واقع شوند، $C' = \emptyset$).

۹- برگردان δ_0

غیر این صورت، اگر رابطه (Y) بیشترین مقدار خود را نتیجه دهد، کمترین نمره برای جفت گره متناظر در نظر گرفته می شود. مراحل کسب جفت های متناظر بر اساس مجموع طول استخوان های متصل به گره ها در الگوریتم (2) ارائه شده است.

• **گام سوم: ترکیب نمرات گام های نخست و دوم**
 پس از به دست آوردن نمرات برای گام های نخست و دوم باید نتایج هر دو گام با هم ترکیب تا گره های نهایی انتخاب شوند. مجموع نمرات هر دو گام طبق رابطه $w_{total} = \eta w_1 + \gamma w_2$ نتیجه نهایی را تشکیل می دهند. در این رابطه، w_1 نمرات گام نخست و w_2 نمرات گام دوم است. نمرات دو گام با وزن های یکسان η و γ با هم جمع می شوند.

الگوریتم 2

تناظر یابی بر اساس مجموع طول استخوان های متصل به گره ها

1- ورودی: $(S_i, T_j) \in \delta$

2- خروجی: $(S_i, T_j) \in \delta''$

3- مقداردهی اولیه: $\min D = 50$

4- حلقه:

برای هر جفت نامزد انتخاب شده $C' = (S_{candid}, T_{candid})$ از تناظر های اولیه موجود در $(S_i, T_j) \in \delta$ ، جفتی به عنوان نامزد انتخاب می شود تا مجموع طول استخوان های متصل به این گره ها با رابطه زیر محاسبه شوند.

$$\delta'' = \arg \min_{\delta} \sum_{(S_i, T_j) \in \delta} d(S_i, T_j)$$

$$d(S_i, T_j) = \sum_{\substack{(s_{il}, t_{jm}) \in \delta'' \\ (s_{il}, t_{jm}) \neq (S_i, T_j)}} |g(S_i, s_{il}) - g(T_j, t_{jm})|$$

در این رابطه S_{il} گره های فرعی متصل به گره اصلی S_i است و T_{jm} گره های فرعی متصل به گره اصلی T_j می باشد.

5- اگر:

$$d(S_{candid}, T_{candid}) < \min D$$

$$\min D = d(S_{candid}, T_{candid})$$

6- اگر:

$$d(S_{candid}, T_{candid}) < d(S_i, T_j)$$

7- آنگاه:

جفت نامزد (S_{candid}, T_{candid}) را در مجموعه δ'' قرار بده.

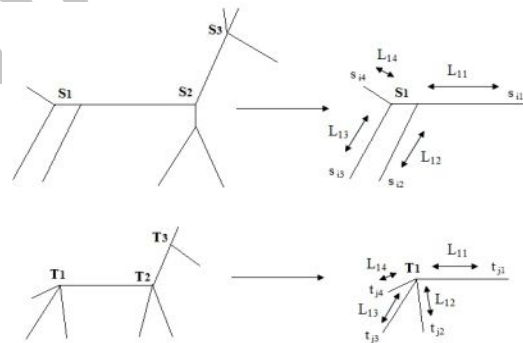
8- اتمام حلقه

(به شرطی که همه جفت های موجود در $(S_i, T_j) \in \delta$ مورد بررسی واقع شوند، $C' = \emptyset$).

9- برگردان δ''

در رابطه بالا، گره های اصلی اسکلت شکل مرجع با (S_1, S_2, S_3) و گره های اصلی اسکلت شکل هدف با (T_1, T_2, T_3) برچسب زده می شوند. در این رابطه می توان بیان کرد که $S_i \in S$ بوده و $T_j \in T$ است.

در رابطه (Y)، δ مجموعه ای از تمامی جفت گره های اصلی متناظر بین گره های مرجع و هدف $\delta = (S_i, T_j)$ است. اگر گره های فرعی اسکلت شکل مرجع با برچسب $(S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4})$ و گره های فرعی اسکلت شکل هدف با برچسب $(t_{j1}, t_{j2}, t_{j3}, t_{j4})$ بیان شوند، می توان $(S_{il}, t_{jm}) = \delta'$ را مجموعه ای از جفت گره های فرعی متصل به گره های اصلی مرجع و هدف مربوطه $\delta = (S_i, T_j)$ در نظر گرفت. توجه داشته باشید که جفت های متناظر بیان شده برای δ' ، گره های فرعی خارج شده از گره اصلی مرجع S_i و گره اصلی هدف T_j هستند؛ بنابراین، می توان بیان کرد که گره های فرعی S_{il} به گره های اصلی S_i متصل و گره های فرعی t_{jm} به گره های اصلی T_j متصل هستند. "مجموعه نهایی از جفت گره های متناظر بین گره های مرجع و هدف کسب شده از گام دوم است.



(شکل 11): مجموع طول استخوان های متصل به گره ها. اسکلت شکل مرجع در ردیف بالا و اسکلت شکل هدف در ردیف پایین قرار گرفته است. همچنین از سمت چپ به راست گراف های جداسازی شده اسکلت ها نشان داده می شوند. در این گراف ها، گره های اصلی با $(S_1, S_2, S_3, T_1, T_2, T_3)$ و گره های فرعی با $(S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}, t_{j1}, t_{j2}, t_{j3}, t_{j4})$ برچسب زده می شوند.

در این گام با توجه به جفت های متناظر فرضی در نظر گرفته شده (δ')، الگوریتم فاصله ژئودزیک بین گره های اصلی و فرعی (طول هریک از استخوان های مرجع و هدف) را محاسبه کرده و سپس مقادیر به دست آمده را توسط رابطه (Y) مقایسه می کند. اگر فاصله محاسبه شده برای طول استخوان های خارج شده از دو گره مرجع و هدف یکسان باشد، رابطه (Y) کمینه مقدار خود را نتیجه می دهد. در این شرایط، بالاترین نمره برای دو گره متناظر ثبت می شود. در



• تناظریابی برای گره‌های اتصالی و انتهایی

پس از اتمام مراحل بیان‌شده برای گره‌های اتصالی اصلی، تناظریابی به‌ترتیب در مورد گره‌های اتصالی و گره‌های انتهایی انجام می‌شود. پس از مشخص‌شدن تناظر بین گره‌های اصلی، الگوریتم در مسیر خطوط اسکلتی خارج‌شده از گره‌های اصلی به دنبال نزدیک‌ترین برجسب گره‌های اتصالی بوده و تناظریابی را در مورد آن‌ها انجام می‌دهد. البته پس از آن، الگوریتم با همین روش بر روی گره‌های انتهایی اعمال می‌شود. بنابراین، تناظریابی از تنه اصلی درخت به شاخه‌ها و سپس به زیر شاخه‌ها اعمال شده و این کار باعث کاهش خطا می‌شود. به این علت که پس از مشخص‌شدن تناظر بین گره‌های اتصالی اصلی، مسیرهای محدودی از گره‌های اصلی به بقیه گره‌های اتصالی و انتهایی وجود دارند که باید دنبال شوند.

توجه داشته باشید، اگر برای گرهی از شکل هدف هیچ تناظری در گره‌های شکل مرجع به‌دست نیامد، این گره در مرحله انتقال تغییرات، ماتریس تبدیل گره مجاوری را دریافت می‌کند که با استخوانی به آن وصل شده است.

۲-۲-۳- مزایای الگوریتم تناظریابی پیشنهادی

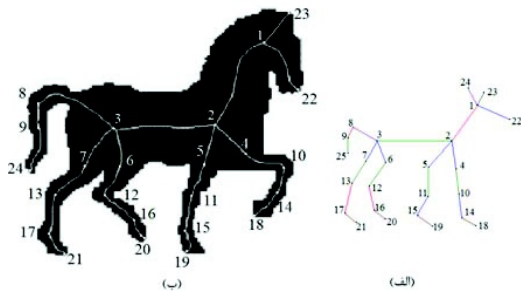
مهم‌ترین دلیل استفاده از دو گام در تناظریابی این است که اگر دو شکل ساختارهای متفاوتی داشته باشند و به هر دلیلی یکی از گام‌ها موفق به تناظریابی نشد، گام دیگر بتواند جواب‌گوی مسئله باشد. برای مثال، اگر موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های دو شکل به‌طور کامل متفاوت باشند در این شرایط، گام نخست ناموفق بوده و گام دوم موفق عمل خواهد کرد و یا اینکه اگر دو شکل با ساختارهای اسکلتی بسیار متفاوت مانند زرافه و بز با هم مقایسه شوند در این شرایط، گام دوم ناموفق بوده و گام نخست، نتایج درستی تولید می‌کند. در شکل (۱۲)، گره‌های متناظر بین اسکلت بز و اسب در شرایطی که حالات اولیه دو شکل به‌طور کامل یکسان نیستند، نمایش داده می‌شوند. در جدول (۱) نیز می‌توان درصد نتایج الگوریتم برای گام‌های متفاوت را مشاهده کرد.

معیار ارزیابی برای تناظر کسب‌شده بین دو گره متناظر از اسکلت شکل مرجع و اسکلت شکل هدف مطابق رابطه زیر است:

$$C_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i N_i}{W \cdot N}, \quad N_i \in (s_i, t_j) \quad (8)$$

در رابطه بالا، w_i میزان نمره به‌دست‌آمده بین دو گره متناظر از اسکلت شکل مرجع و اسکلت شکل هدف است. به‌طوری‌که W میزان بالاترین نمره در نظر گرفته شده است. این میزان معادل پنج در نظر گرفته می‌شود. N_i بیان‌گر گره‌های متناظر موجود در اسکلت مرجع و اسکلت هدف بوده و N بیان‌گر تعداد کل گره‌های موجود در اسکلت مرجع است. همچنین n بیان‌گر تعداد کل تناظرهای به‌دست‌آمده بین اسکلت مرجع و هدف است.

با معیار ارزیابی C_{ij} می‌توان درستی الگوریتم پیشنهادی در سه گام متفاوت را بررسی کرد. نمرات هر سه گام به‌صورت مستقل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.



(شکل-۱۲): تناظریابی بین گره‌های اسکلت بز و اسکلت اسب.
(الف): اسکلت بز به‌دست‌آمده از بخش‌بندی بر اساس حرکت.
(ب): اسکلت اسب به‌دست‌آمده از الگوریتم استخراج اسکلت (بای و همکاران، ۲۰۰۷).

(جدول-۱): نتایج تناظریابی بین اسکلت بز و اسکلت اسب.

تناظریابی	گام اول	گام دوم	ترکیب دو گام
اسکلت بز و اسکلت اسب	۶۸/۵۸٪	۷۳/۱۵٪	۸۶/۸۸٪

۲-۳- انتقال تغییرات بین اسکلت‌های متناظر

شکل مرجع و هدف

برای اینکه طبق الگوریتم ارائه‌شده، بتوان تغییرات موجود در شکل‌های مرجع را به شکل هدف منتقل کرد، ابتدا باید تغییرات تولیدشده بین استخوان‌های حالت اولیه شکل مرجع و استخوان‌های حالت تغییر یافته شکل مرجع محاسبه و سپس این تغییرات باید به استخوان‌های حالت پایه شکل هدف منتقل شوند. با کمک این روش نیازی به انتقال تغییرات تک‌تک مثلث‌های شکل مرجع به شکل هدف نبوده و فقط تغییرات ایجادشده در استخوان‌ها و گره‌های شکل مرجع به استخوان‌ها و گره‌های شکل هدف انتقال می‌یابند. در این روش هر استخوان نماینده دسته‌ای از مثلث‌ها است.

در رابطه (۹)، p هر نقطه روی استخوان C_1D_1 بوده و q نقطه متناظر بعد از اعمال تبدیل است. R ماتریس چرخش بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

در نهایت، بردار جابه‌جایی نیز با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T' = RT_{S_1} + T_{S_2} \quad (11)$$

اگر از قاب پایه به هر قاب تغییر یافته، تغییر مقیاسی در طول استخوان‌ها صورت گیرد، باید این تغییر مقیاس را نیز در نظر گرفت. پارامتر مقیاس را با α نشان می‌دهیم که بیانگر تغییر طول استخوان به اندازه α برابر حالت پایه است. برای این که C_1D_1 به اندازه طول C_2D_2 تغییر مقیاس دهد، از ماتریس مقیاس S در رابطه (۱۲) استفاده می‌کنیم:

$$S = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

در این رابطه، β پارامتر مقیاس در جهت عمود بر استخوان است. به طور معمول مقدار β برابر یک و یا برابر مقدار α در نظر گرفته می‌شود. البته مقادیر دیگر نیز می‌توانند انتخاب شوند. در نهایت، ماتریس تبدیل کلی بین استخوان C_1D_1 و C_2D_2 ترکیبی از موارد ذکر شده یعنی چرخش و تغییر مقیاس خواهد بود. این ماتریس با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$M' = S \cdot R \quad (13)$$

با استفاده از رابطه بالا می‌توان ماتریس تبدیل را برای هر یک از استخوان‌های تغییر یافته شکل مرجع در طی قاب‌های متوالی به دست آورد. در بخش بعد، هر یک از این ماتریس‌های تبدیل به استخوان‌های متناظر در شکل هدف (به دست آمده از عملیات تناظریابی) منتقل می‌شوند.

۲-۳-۲- تغییرات استخوانی در شکل هدف

پس از به دست آوردن تغییرات استخوانی در شکل مرجع که برای هر یک از قاب‌ها به دست آمده (بین هر یک از قاب‌های حالت تغییر یافته و قاب حالت پایه مرجع)، این تغییرات باید به استخوان‌های متناظر در شکل هدف منتقل شوند. از بخش قبل می‌دانیم که هر کدام از استخوان‌های مرجع و هدف در تناظر یک‌به‌یک با یکدیگر هستند. بنابراین، هر کدام از تغییرات به دست آمده به استخوان‌ها و گره‌های متناظر در حات پایه هدف، منتقل شده و باعث تغییر استخوان‌های شکل هدف می‌شوند. بعد از تغییر شکل استخوان‌ها باید مثلث‌های وابسته به هر استخوان نیز تغییر شکل دهند.

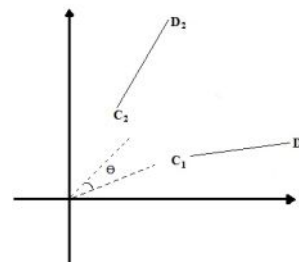
با توجه به تبدیلاتی که به هر یک از استخوان‌های شکل هدف اعمال می‌شود، مثلث‌های بخش‌بندی شده به آن استخوان در شکل هدف نیز همان تغییر شکل را خواهند داشت. بخش‌بندی مثلث‌های شکل هدف به استخوان‌ها بر اساس نزدیک‌ترین فاصله اقلیدسی مرکز مثلث‌ها نسبت به استخوان‌ها به دست می‌آید. این بخش از الگوریتم توسط سه گام زیر تکمیل می‌شود:

- (۱) محاسبه تغییرات بین استخوان‌های حالت پایه و حالات تغییر یافته مرجع.
- (۲) انتقال این تغییرات به استخوان‌های متناظر در اسکلت حالت پایه هدف.
- (۳) بهینه‌سازی بخش‌های گسسته یا هم‌پوشانی یافته.

۲-۳-۱- تغییرات استخوانی در شکل مرجع

با داشتن اسکلت حالت پایه شکل مرجع و اسکلت تغییر یافته شکل مرجع، ماتریس تبدیل برای استخوان‌های مرجع به دست می‌آید. اگر یک استخوان در موقعیت C_1D_1 (حالت پایه) باشد و C_2D_2 موقعیت تغییر یافته استخوان در نظر گرفته شود، ماتریس تبدیل بین استخوان‌های متناظر حالت پایه و حالت تغییر یافته مرجع با روابط توضیح داده شده در زیر محاسبه می‌شود. با داشتن ماتریس تبدیل می‌توان بردارهای جابه‌جایی، انتقال و چرخش را برای هر استخوان و گره اتصال مربوطه به دست آورد. با توجه به شکل (۱۳)، استخوان C_1D_1 را انتقال می‌دهیم تا C_1 روی مرکز قرار گیرد. این بردار جابه‌جایی با T_{S_1} نشان داده می‌شود؛ سپس C_1D_1 به طور ساعت‌گرد حول مرکز به اندازه θ درجه چرخانده می‌شود تا در جهت استخوان C_2D_2 قرار گیرد. زمانی که C_1 روی C_2 قرار می‌گیرد، بردار جابه‌جایی T_{S_2} است. این عملیات را می‌توان با رابطه زیر نشان داد:

$$q = R(p + T_{S_1}) + T_{S_2} \quad (9)$$

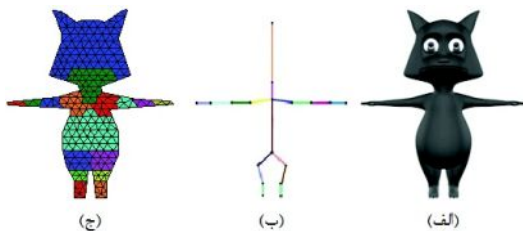


(شکل-۱۳): موقعیت اولیه و نهایی یک استخوان.

اقلیدسی به یک استخوان وابسته شده و بخش‌بندی برای مثلث‌ها انجام می‌گیرد. شکل (۱۵)، نتیجه حاصل از این بخش‌بندی را نشان می‌دهد. با توجه به این بخش‌بندی، هر کدام از مثلث‌ها به پیروی از استخوان متناظر مربوطه، چرخش، انتقال و جابه‌جایی پیدا می‌کنند. در این بخش، به چگونگی تغییر شکل مثلث‌ها بر اساس استخوان‌ها می‌پردازیم. برای این منظور، باید رئوس هر یک از مثلث‌ها با کمک رابطه زیر جابه‌جا و چرخش یابند:

$$O' = M_i O \quad (15)$$

به طوری که در رابطه (۱۵)، O رئوس مثلث قبل از جابه‌جایی و تغییر بوده و O' رئوس مثلث پس از جابه‌جایی و تغییر است. ماتریس M_i بیان‌گر میزان چرخشی است که به این رئوس اعمال می‌شود. ماتریس M_i بیان‌شده در این رابطه، طبق گرادیان تغییر شکل معرفی‌شده در بخش اسکلت‌بندی بر اساس حرکت به دست می‌آید.



شکل-۱۵: بخش‌بندی شکل هدف بر اساس نزدیک‌ترین فاصله اقلیدسی مرکز مثلث‌ها به استخوان‌ها. (الف): شکل شخصیت هدف. (ب): اسکلت شکل هدف. (ج): شکل بخش‌بندی شده بر اساس اسکلت‌بندی.

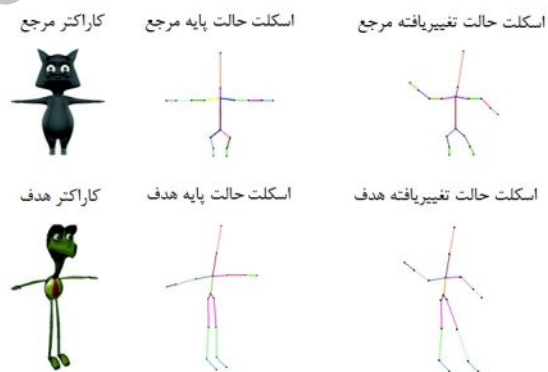
اگر هر مثلث به صورت صلب همانند استخوان مربوطه تغییر یابد، در این شرایط در محل مفاصل، مثلث‌ها دچار شکستگی و یا هم‌پوشانی می‌شوند. این هم‌پوشانی بین مثلث‌ها به علت حرکات ناهماهنگ دو استخوان مجاور اتفاق می‌افتد. در شکل (۱۶)، نمونه‌ای از شکل منتهی به اثر تغییر شکل استخوان‌ها و گسسته شدن رئوس مثلثی نشان داده می‌شود.

برای جلوگیری از پیش‌آمدن موارد بالا باید یک هماهنگی بین رئوس مثلث‌های مجاور به وجود آورد. به طوری که اتصالات اولیه مش نیز حفظ شوند. برای رسیدن به این هدف از روش بهینه‌سازی و حفظ اتصالات رئوس تمامی مثلث‌ها (سامنر و پوپویک، ۲۰۰۴) استفاده می‌کنیم تا هم هماهنگی بین اتصالات حفظ شود و هم هر مثلث طبق تبدیلی که به استخوان مربوطه‌اش اعمال شده، تغییر

ماتریس M_i توسط رابطه (۱۳) از تغییرات استخوان‌های حالت پایه و تغییر یافته شکل مرجع به دست می‌آید. این ماتریس به عنوان توصیف‌گر تغییرات به استخوان‌های متناظر حالت پایه شکل هدف، منتقل شده و باعث تغییر شکل استخوان‌های متناظر در شکل هدف و سپس مثلث‌های وابسته به هر استخوان می‌شود. ماتریس M_i با رابطه زیر به شکل هدف منتقل می‌شود:

$$V = M' U + T' \quad (14)$$

در رابطه بالا، U نقاط روی استخوان حالت پایه هدف بوده و M_i توصیف‌گر تغییرات استخوان‌ها حاصل از قاب‌های شکل مرجع (شامل تغییر مقیاس و چرخش استخوان‌ها) است. T' بردار جابه‌جایی استخوان‌های شکل مرجع است که از رابطه (۱۱) به دست می‌آید و V نقاط استخوانی تغییر یافته شکل هدف است. بدین ترتیب، تمام تغییرات استخوان‌های مرجع به استخوان‌های متناظر حالت پایه هدف، انتقال یافته و استخوان‌های تغییر یافته هدف به وجود می‌آیند. شکل (۱۴) نمونه‌ای از انتقال تغییرات به استخوان‌های شکل هدف را نشان می‌دهد. پس از تغییر شکل استخوان‌های شکل هدف، مثلث‌های وابسته به هر استخوان باید تغییر شکل داده و شکل‌های نهایی را تشکیل دهند. این مسئله در بخش بعدی توضیح داده می‌شود.



شکل-۱۴: انتقال تغییرات استخوان‌های شکل مرجع به استخوان‌های شکل هدف.

۲-۳-۳- بهینه‌سازی

پس از به دست آوردن تبدیلات لازم برای استخوان‌های هر قاب، باید بتوانیم این تغییرات را به مثلث‌های وابسته هر استخوان اعمال کنیم تا آن‌ها نیز حرکتی مانند استخوان متناظر خود داشته باشند. همان‌طور که در قبل نیز بیان کردیم، هر کدام از مثلث‌ها با توجه به نزدیک‌ترین فاصله

گذاشته می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مزایا و معایب سامانه مطرح می‌شوند و سرانجام در مورد کارایی کلی سامانه در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها نتیجه‌گیری انجام می‌گیرد. تصاویر به کار رفته در این الگوریتم، شخصیت‌های کارتونی و پویانمایی هستند که شکل (۱۷) مجموعه‌ای از این شخصیت‌ها را نشان می‌دهد.



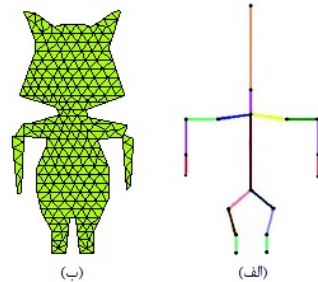
۳-۱- تناظریابی اسکلت

در این بخش، توانایی الگوریتم در مورد تناظریابی اسکلت بین شکل مرجع و هدف بررسی می‌شود. همان‌طور که در قبل نیز اشاره شد، برای تناظریابی بین اسکلت مرجع و اسکلت هدف، نمرات کسب‌شده برای موقعیت مکانی و زاویه‌ای گره‌ها با هم مقایسه شده و گره‌هایی که بالاترین نمرات را برای تناظر به‌دست می‌آورند، به‌عنوان گره‌های متناظر از اسکلت مرجع و هدف انتخاب می‌شوند. بنابراین، طبق موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از هر گره، موقعیت مکانی گره‌ها نسبت به هم و ترکیب نتایج حاصل از این دو گام برای گره‌ها نمره صادر شده و مطابق با این نمرات، تصمیم‌گیری در مورد گره‌های متناظر نهایی انجام می‌گیرد. جدول (۲)، نتایج عددی حاصل از این نمره‌ها را برای جفت‌های متناظر از اسکلت‌های اسب و شتر، اسب و بز، اسب و گوزن، پلنگ سیاه و گربه وحشی، پلنگ سیاه و شیر، پلنگ سیاه و گرگ بیان می‌کند.

الگوریتم پیشنهادی ارائه‌شده برای تناظریابی اسکلتی بین شکل‌ها، پیچیدگی محاسباتی زیادی را شامل نمی‌شود. فرض کنید، m_i بیان‌گر تعداد تمام گره‌های موجود در اسکلت (شامل گره‌های اتصالی اصلی، گره‌های اتصالی و گره‌های انتهایی) و N بیان‌گر تعداد گره‌های موجود در هر گروه باشد، زمان لازم برای محاسبه کوتاه‌ترین فاصله میان گره‌ها با رابطه $O(m_i \log m_i)$ به‌دست‌آمده و فاصله ژئودزیکی نیز با رابطه $O(N m_i \log m_i)$ محاسبه می‌شود. در این صورت، زمان لازم برای محاسبه مجموع طول اسکلت‌های متصل‌شده به هر گره با رابطه $O(N^2 m_i \log m_i)$ به‌دست می‌آید، به این

شکل دهد. برای این منظور طبق (سامنر و پوپویک، ۲۰۰۴) یک تابع خطا برای بیان تفاضل تغییرات واقعی مثلث و تغییری که به استخوان مربوطه‌اش اعمال شده به کار می‌رود. این تابع با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$E = \sum_{i=1}^n (\|M_i - M_i'\|_F^2) \quad (۱۶)$$



(شکل-۱۶): شکل گسیخته‌شده مش مثلثی در اثر تغییر شکل استخوان‌ها. (الف): استخوان تغییر یافته. (ب): مش گسسته‌شده.

در رابطه (۱۶)، n تعداد مثلث‌های موجود در مش بوده و M_i ماتریس تبدیل واقعی اعمال‌شده به مثلث i ام توسط رابطه (۱۵)، $M = O' O^{-1}$ است. M_i' ماتریس تبدیل اعمال‌شده به استخوانی است که می‌خواهیم مثلث وابسته به آن استخوان نیز از این تبدیل پیروی کند. M_i' توسط رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. F نرم فروبنیوس است. با کمینه‌سازی E می‌توان بهترین نتیجه را برای تقریب تغییرات به‌دست‌آورد، درحالی‌که اتصالات مش نیز حفظ می‌شوند. متغیرهای کمینه‌سازی، مختصات رئوس مثلث‌های تغییر شکل یافته هستند. برای حل کردن مسئله بهینه‌سازی مطرح‌شده، گرادین E برابر صفر قرار داده می‌شود. در این صورت مسئله بهینه‌سازی در رابطه (۱۶) تبدیل به دو مسئله خطی مستقل می‌شود، که یکی از این مسائل مختصات X جدید برای مثلث‌های تغییر یافته را محاسبه و دیگری مختصات Y جدید برای مثلث‌های تغییر یافته را محاسبه می‌کند. روش حل این مسئله مطابق با روش ارائه شده توسط (سامنر و پوپویک، ۲۰۰۴) است.

۳- نتایج پیاده‌سازی

در این بخش، کارایی الگوریتم پیشنهادی و کیفیت نتایج حاصل از این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از الگوریتم در دو بخش تناظریابی اسکلت و انتقال تغییرات بررسی شده و توانایی سامانه در مورد انتقال حرکت برای شخصیت‌های متنوع کارتونی به صورت کیفی به نمایش

۳-۳- مقایسه با الگوریتم‌های دیگر

همان‌طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، روش (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) بر مبنای تغییرات رئوس در محل مفاصل ردیابی شده در طی یک سکانس پویانمایی است. در صورتی که ردیابی مفاصل در هر قاب، نادرست انجام شود در نهایت، شکل‌های نادرستی برای شخصیت هدف تولید می‌شوند. در شکل (۲۰)، ردیف‌های دوم و سوم بیان‌گر نتایج نادرست حاصل از این روش برای شخصیت‌های شتر و بز هستند؛ ولی روش (لی و همکاران، ۲۰۱۳) بر مبنای تغییرات لبه‌مثلث-های مش است. این روش فقط زمانی می‌تواند تغییرات ایجاد شده در شخصیت مرجع را به شخصیت هدف منتقل کند که این تغییرات با روش AIAP در شخصیت مرجع تولید شده باشند. بنابراین، این الگوریتم برای انتقال تغییرات ایجاد شده در شخصیت مرجع با روش‌های متفاوت قابل استفاده نیست. نتیجه حاصل از این الگوریتم برای شخصیت گوزن در شکل (۲۰) نشان داده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج کیفی به‌دست آمده از الگوریتم‌های دیگر حرکات مطلوبی را ارائه نمی‌دهند. علت این امر آن است که الگوریتم (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) ابتدا محل مفاصل را در قاب‌های متوالی از شخصیت مرجع ردیابی کرده و سپس با استفاده از ردیابی، تغییرات شخصیت مرجع را به شخصیت هدف منتقل می‌کند. این ردیابی با استفاده از رنگ بافت و موقعیت مکانی مفاصل انجام می‌گیرد و از آنجا که در نواحی هم‌پوشانی‌یافته از مفاصل که رنگ بافت به‌درستی تجزیه نمی‌شود، خطای زیادی در اثر آن تولید می‌شود. از طرف دیگر، طبق الگوریتم (لی و همکاران، ۲۰۱۳) چون تغییرات در شخصیت‌های مرجع توسط روش AIAP ایجاد نشده‌اند، گوزن نتوانسته حرکات اسب را به‌درستی دنبال کند. در نهایت، طبق نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی کیفیت بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. چون روش پیشنهادی نسبت به تغییرات از قبل ایجاد شده در شخصیت مرجع مقاوم بوده و تغییرات را به‌طور مستقل از ساختار شخصیت مرجع به شخصیت هدف منتقل می‌کند. الگوریتم پیشنهادی به‌علت استفاده از الگوریتم تناظریابی اسکلت، مشکلات جابه‌جایی مفاصل و ردیابی نادرست مفاصل را در قاب‌های متوالی ناشی از الگوریتم (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) نداشته و به‌طور جداگانه می‌تواند در هر قاب، تغییرات مفاصل را در اسکلت مرجع بیان کند. تناظریابی اسکلت فقط

علت که این عملیات مابین هر یک از جفت‌گره‌های هر گروه انجام می‌شود. زمان لازم برای محاسبه موقعیت زاویه‌ای گره‌ها با رابطه $O(N^2)$ به‌دست می‌آید.

۲-۳- انتقال تغییرات

در این بخش، ابتدا نتایج الگوریتم پیشنهادی برای انتقال تغییرات از شخصیت مرجع به شخصیت هدف نشان داده می‌شوند؛ سپس نتایج این الگوریتم با روش‌های دیگر مقایسه می‌گردند. اطلاعات ساختاری شخصیت‌ها در جدول (۳) موجود است.

(جدول-۲): نتایج تناظریابی برای اسکلت‌های متنوع بر اساس گام‌های نخست و دوم و ترکیب هر دو گام.

ترکیب دو گام	گام اول	گام دوم	تناظریابی اسکلت
٪۸۵.۴	٪۸۴.۵	٪۸۲.۷	اسب و بز
٪۸۸.۸	٪۸۶.۸۹	٪۸۳.۲	اسب و شتر
٪۸۱	٪۷۹.۵	٪۷۰.۱	اسب و گوزن
٪۸۳	٪۸۲.۵	٪۸۱.۸۵	پلنگ سیاه و گربه
٪۸۶.۵	٪۸۴.۸۸	٪۸۲.۹	پلنگ سیاه و شیر
٪۸۵.۸۷	٪۸۳.۹۸	٪۸۱.۵۴	پلنگ سیاه و گرگ

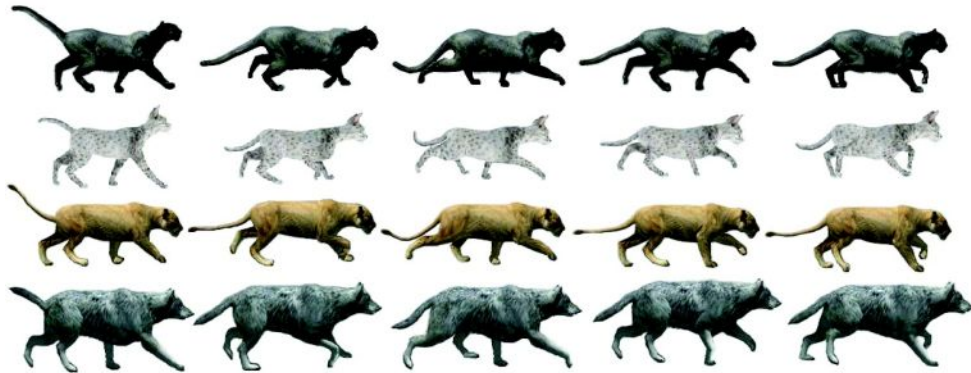
(جدول-۳): تعداد مثلث‌ها و استخوان‌ها در مدل مش تشکیل شده.

مدل	تعداد مثلث	تعداد استخوان
اسب	۵۰۴	۲۴
شتر	۶۱۲	۲۵
بز	۴۶۷	۲۶
گوزن	۴۸۵	۲۷
پلنگ سیاه	۳۳۱	۱۹
شیر	۳۵۲	۱۸
گربه	۲۹۵	۱۹
گرگ	۳۶۰	۱۹

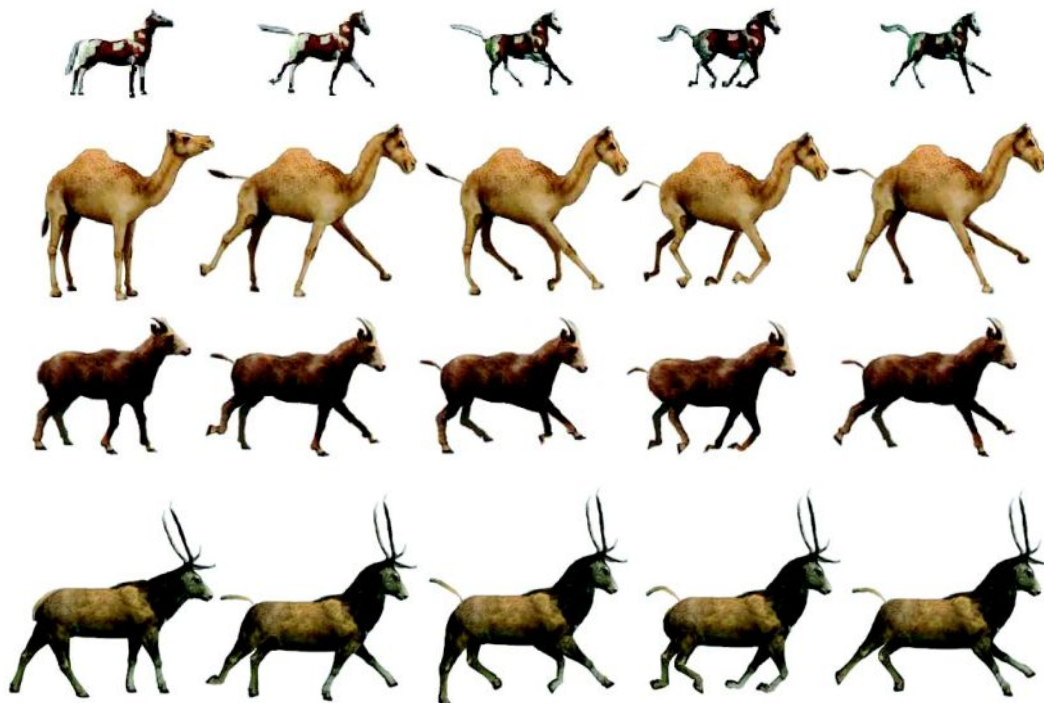
شکل (۱۸)، انتقال حرکات ناشی از اندام‌های پلنگ سیاه به سایر شخصیت‌ها مانند گربه، شیر و گرگ را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۹)، انتقال حرکات ناشی از اندام‌های اسب به سایر شخصیت‌ها مانند شتر، بز و گوزن را نشان می‌دهد. در ادامه، نتایج الگوریتم پیشنهادی در بخش انتقال تغییرات با نتایج الگوریتم‌های ارائه شده توسط (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) و (لی و همکاران، ۲۰۱۳) مقایسه می‌شوند. در نهایت، با توجه به نتایج به‌دست آمده، توانایی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بیان می‌شود.

انجام می‌شود، درحالی‌که در روش (لی و همکارن، ۲۰۱۳) نیاز به تناظریابی بین تک‌تک مثلث‌های مش شخصیت‌های متفاوت است. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی برای تناظریابی تا حدودی توانسته مشکلات الگوریتم‌های ارائه‌شده توسط (لی و همکارن، ۲۰۱۳) و (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) را برطرف کند.

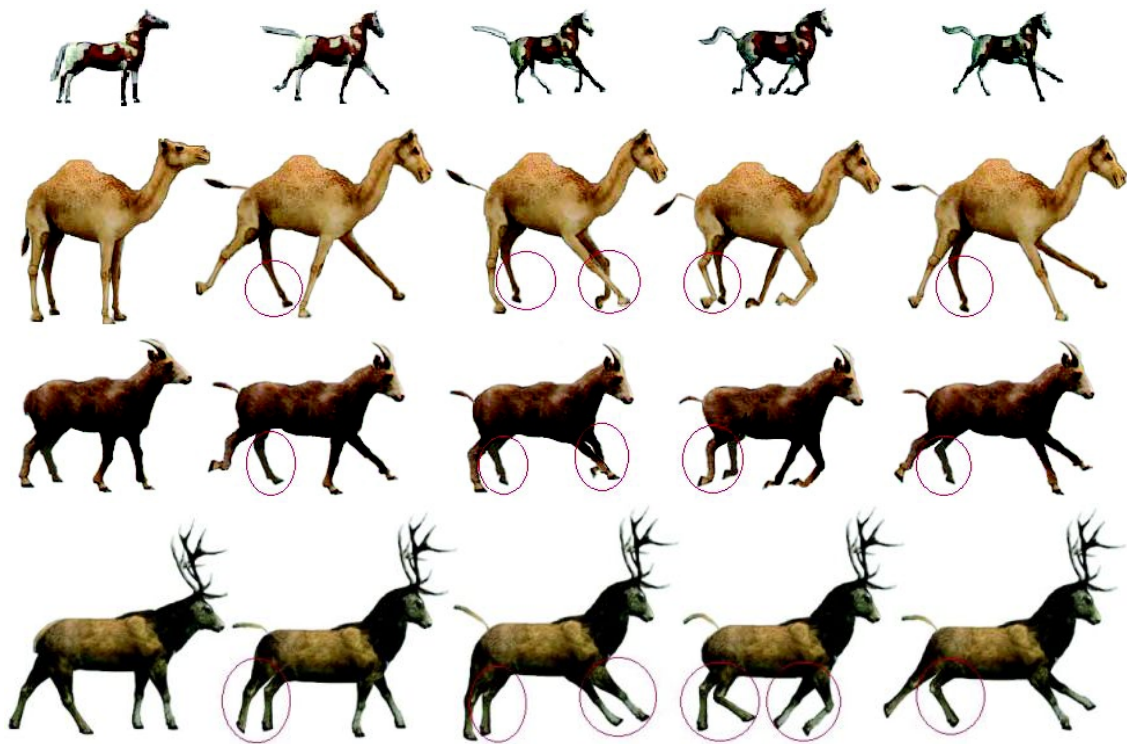
در مورد حالت پایه شکل مرجع و هدف انجام گرفته و در همهٔ قاب‌ها عملیات تناظریابی انجام نمی‌شود. این تناظریابی نسبت به رنگ بافت مفاصل مقاوم بوده و مشکلات ردیابی را ندارد. استفاده از انتقال تغییرات توسط اندام‌های اسکلتی شخصیت‌ها باعث شد تا الگوریتم ارائه‌شده نسبت به تعداد مثلث‌های ایجادشده در مش‌بندی حساس نباشد. در این الگوریتم، تناظریابی بین تعدادی از استخوان‌های شخصیت‌ها



(شکل-۱۸): انتقال تغییرات از حرکات ناشی از اندام‌های پلنگ سیاه به اندام‌های گربه، شیر و گرگ توسط الگوریتم پیشنهادی. نخستین ردیف، سکانس پویانمایی از حرکات پلنگ سیاه است. نخستین تصاویر از سمت چپ در تمامی ردیف‌ها بیان‌گر حالت پایهٔ تصاویر می‌باشند. بقیهٔ تصاویر بیان‌گر تصاویر حالت تغییر یافتهٔ شخصیت‌ها هستند که در اثر انتقال تغییرات از اندام‌های پلنگ سیاه به‌دست می‌آیند.



(شکل-۱۹): انتقال تغییرات از حرکات ناشی از اندام‌های اسب به اندام‌های شتر، بز و گوزن توسط الگوریتم پیشنهادی. نخستین ردیف، سکانس پویانمایی از حرکات اسب است. نخستین تصاویر از سمت چپ در تمامی ردیف‌ها بیان‌گر حالت پایهٔ تصاویر هستند. بقیهٔ تصاویر بیان‌گر تصاویر حالت تغییر یافتهٔ شخصیت‌ها می‌باشند که در اثر انتقال تغییرات از اندام‌های اسب به‌دست می‌آیند.



شکل-۲۰: انتقال تغییرات از حرکات ناشی از اندام‌های اسب به اندام‌های شتر، بز و گوزن توسط الگوریتم (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) و (لی و همکاران، ۲۰۱۳) نتایج حاصل از الگوریتم (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) برای شخصیت‌های شتر و بز نشان داده شده است. به حرکات پاهای این دو شخصیت توجه نمایید که با حرکت پاهای اسب مشابه نیستند. نتیجه حاصل از الگوریتم (لی و همکاران، ۲۰۱۳) برای شخصیت گوزن نمایش داده می‌شود. حرکات پاهای گوزن با حرکات پاهای اسب یکسان نیستند.

گره‌های متناظر در نظر گرفته می‌شود و با کمک نمرات حاصل از این دو گام و ترکیب نتایج آنها، گره‌های متناظر نهایی انتخاب می‌شوند. پس از به‌دست‌آوردن استخوان‌های مرجع و هدف، تمام حرکات و تغییرات اسکلت‌های شکل مرجع به اسکلت‌های متناظر در شکل هدف منتقل می‌شوند. با توجه به حرکت و جابه‌جایی هر یک از اندام‌های اسکلتی در شکل هدف، مثلث‌های وابسته هر استخوان نیز همان حرکت و جابه‌جایی را تعقیب می‌کنند. نتایج به‌دست‌آمده، بیان‌گر توانایی الگوریتم در انتقال صحیح تغییرات به شخصیت‌های متفاوت هستند. الگوریتم ارائه‌شده، به‌صورت مستقل از نوع تغییرات در شخصیت مرجع، می‌تواند هرگونه تغییر شکلی را به شخصیت هدف منتقل کند. از محدودیت‌های این روش این است که، دو شخصیت به‌کار گرفته‌شده در این الگوریتم، ساختار آناتومی مشابهی دارند تا طبق الگوریتم تناظریابی، ارتباط دقیقی بین اندام‌های آنها به‌دست‌آید. وقتی دو شکل، ساختار آناتومی مشابهی دارند انتقال حرکت بین آنها باعث ایجاد حرکات طبیعی و واقعی

۴- نتیجه‌گیری

انتقال تغییرات این امکان را به‌وجود می‌آورد که تغییرات در هر سطحی بدون دخالت پویانما یا طراح در مدت زمان کوتاهی به شخصیت‌های جدید منتقل شوند. البته این سامانه باید بتواند هر نوع تغییر شکل را به مدل‌های طراحی‌شده با دست یا پویانمایی شبیه‌سازی‌شده توسط رایانه اضافه کند. انتقال تغییرات می‌تواند به پایگاه‌های داده بر اساس ساختار اسکلتی نیز اعمال شده و حرکات ناشی از یک اسکلت را به اسکلت شخصیت‌های متنوع انتقال دهد. در مقاله ارائه‌شده، پس از به‌دست‌آوردن ساختار اسکلتی شخصیت مرجع و هدف به تناظریابی بین استخوان‌های دو شکل می‌پردازیم. توسط الگوریتم تناظریابی اسکلت، ارتباط بین اجزای اسکلت شکل مرجع و اسکلت شکل هدف به‌دست‌می‌آید. این الگوریتم بر اساس موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج‌شده از گره‌ها و مجموع طول استخوان‌های متصل‌شده به گره‌ها تناظریابی را انجام می‌دهد. به‌طوری‌که در هر یک از این مراحل نمره‌ای برای

Sederberg TW., Gao P., Wang G., Mu H. (1993), "2-d shape blending: an intrinsic solution to the vertex-path problem", In Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 15-8.

Sumner R. W. and Popovi'c J. (2004), "Deformation transfer for triangle meshes", ACM Transactions on Graphics (TOG), 23(3):399-405.

Sumner R. W., Zwicker M. (2005), Gotsman C. and Popovi'c J., "Mesh-based inverse kinematics", ACM, Transactions on Graphics (TOG), 24(3):488-495.

Sykora D., et al. (2005), "As-Rigid-As-Possible Image Registration for Hand-drawn Cartoon Animations", Proceedings of the 7th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering, pp. 25-33.



لیدا اصغریان دوره کارشناسی خود

را در سال ۱۳۸۹ در رشته مهندسی برق الکترونیک در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز گذرانده و مدرک کارشناسی ارشد را در سال ۱۳۹۳ در رشته مهندسی برق مخابرات از

دانشگاه صنعتی سهند تبریز اخذ کرده است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان پردازش تصویر، بینایی کامپیوتر و شناسایی الگو است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

L_asgharian@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 پژوهشی 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

می‌شود؛ ولی در کارهای آینده به دنبال روشی برای انتقال حرکت بین شخصیت‌هایی با ساختار آناتومی متفاوت هستیم.

۵- مراجع

Alexa M., Cohen-OR D. and Levin D. (2000), "As-rigid-as-possible shape interpolation", Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 157-164.

Bai X., Latecki L. J. and Liu W. Y. (2007), "Skeleton pruning by contour partitioning with discrete curve evolution", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 29(3):449-462.

Barr A. H. (1984), "Global and local deformations of solid primitives", In ACM Siggraph Computer Graphics, 18(3):21-30.

Celikcan, U., Yaz, I.O. and Capin, T. (2015), "Example-Based Retargeting of Human Motion to Arbitrary Mesh Models", In Computer Graphics Forum, 34(1):216-227.

Le, B.H. and Deng, Z. (2014), "Robust and accurate skeletal rigging from mesh sequences", ACM Transactions on Graphics (TOG), 33(4):84.

Lee T. Y., Wang Y. S. and Chen T. G. (2006), "Segmenting a deforming mesh into near-rigid components", The Visual Computer, 22(9-11):729-739.

Li G., Yang L., Wu S., Tan W., Chen X. and Xian C. (2013), "Planar shape interpolation using relative velocity fields", Computers & Graphics, 37(5):364-375.

Mzoughi O., Yahiaoui I., Boujemaa N. (2012), "Alignment of 2D objects for shape interpretation", In Image Analysis for Multimedia Interactive Services (WIAMIS), 13th International Workshop on IEEE, pp. 1-4.

Noh J., and Neumann U. (2001), "Expression cloning", In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM, pp. 277-288.

Pan J. and Zhang J. J. (2011), "Sketch-based skeleton-driven 2D animation and motion capture", In Transactions on edutainment VI. Springer Berlin Heidelberg, 6758:164-181.

Ruppert J. (1995), "A delaunay refinement algorithm for quality 2D mesh generation", Journal of algorithms, 18(3):548-585.

Sederberg TW., Greenwood E. (1992), "A physically based approach to 2d shape blending", ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 26(2):25-34.