

# 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 می‌بخشنند. 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 دو بعدی به شخصیت جدید ارائه و روش نوبنی 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، بیان گر میزان چرخش، جابه جایی و تغییر مقیاس هر یک از استخوان‌های شکل مرجع هستند. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و نمایش نتایج حاصل از آن، از شخصیت‌های پویانمایی دو بعدی استفاده شده است. نتایج بدست آمده بیان گر توانایی الگوریتم در تولید شکل‌های با کیفیت و با حرکات طبیعی واقعی هستند. الگوریتم پیشنهادی نسبت به تنوع شخصیت‌های مرجع مقاوم بوده و می‌تواند انواع تغییرات را به شخصیت‌های دیگر منتقل کند.

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

## ۱- مقدمه

امروزه با گسترش صنعت پویانمایی و بازی‌های رایانه‌ای نیاز به نرم‌افزارهایی که به طور خودکار و بدون دخالت پویانماها<sup>۱</sup>، سکانس‌های پویانمایی<sup>۲</sup> را برای شخصیت‌های متنوع طراحی می‌کنند، به طور کامل محسوس است. فرآیند پویانمایی با مرحله مدل‌سازی از شکل شخصیت در فضای دو بعدی 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. یکباره نقاط کنترلی

<sup>1</sup> Animators

<sup>2</sup> 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 زمان بر محسوب می‌شود. به طوری که با داشتن یک تغییرشکل تولید شده برای یک شی می‌توان با اختصاص درست پارامترهای حرکتی به شی دیگر، آن را نیز همانند شی نخست تغییر داد. منظور از پارامترهای حرکتی، پارامترهایی هستند که برای هر حرکت خاص، تغییرات مناسبی را در شکل به وجود می‌آورند. در صورتی که بتوان پارامترهای حرکتی را برای شکل‌های مختلفی از شخصیت‌ها تطبیق داد، عملیات زمان بر کنترل محل مفاصل برای هر شکل خاص کاهش می‌یابد. در این مقاله، به دنبال روشهای

می‌تواند بیان گر روابط تغییردهنده باشد. گرادیان تغییر، بیان گر چرخش صلب و کشیدگی در جسم بوده و می‌تواند هر نوع تغییرات وسیع را برای انتقال نشان دهد. (بار، ۱۹۸۴) از گرادیان تغییرات برای به دست آوردن مقادیر جدید مماس و نرمال بردارها بر روی مدل‌های هندسی استفاده کرد. گرادیان تغییر در یک نقطه مخصوص می‌تواند با محاسبه مشتقات جزئی در نقطه مورد نظر به دست آید. البته، این روش دارای محدودیت‌هایی در بیان تغییرات در نواحی شامل خمیدگی و چرخیده شده است. (سامنر و پاپوویک، ۲۰۰۴) از گرادیان تغییرات مثلث‌های شکل پایه مرجع و شکل تغییریافته مرجع برای انتقال تغییرات در مدل‌های سه‌بعدی استفاده کردند. در این روش، تناظریابی بین هریک از مثلث‌های مش مرجع و هدف انجام می‌شود؛ ولی محاسبه تغییرات برای تک تک مثلث‌های مش هدف، عملیاتی زمان بر 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 داخل مش در محاسبات قرار نمی‌گیرند. در این شرایط، گرادیان تغییر توسط بردار لبۀ مثلث‌های مرزی مش پایه و مش تغییریافته محاسبه می‌شود. از دیگر روش‌ها برای تغییردادن شکل می‌توان به روش‌های درون‌یابی اشاره کرد. در این زمینه می‌توان روش ارائه شده توسط (سدربرگ و همکاران، ۱۹۹۳، ۱۹۹۲) را مطرح کرد. آن‌ها دو شکل چندضلعی با ساختار یکسان را به عنوان 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 قطع شده لبه‌ها است. روش دیگری نیز توسط (آلکسا 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 بلوک‌بندی شده، ترکیبی از بهینه‌سازی محلی را با روش "تا حد امکان صلب بودن"<sup>۱</sup> (ARAP) ارائه دادند. این روش برای اخذ حرکت شیء دوبعدی مناسب بوده، ولی نمی‌تواند تغییرات وسیع و محل‌های واقع شده در ناحیه کور را کنترل کند. (بن و ژانگ، ۲۰۱۱) روشی برای انتقال حرکت بر اساس ردبایی مفاصل در طول یک سکانس پویانمایی ارائه

<sup>۱</sup> As-Rigid-As-Possible

برای آسان‌تر کردن فرآیند پویانمایی‌سازی با الگوریتم‌های مناسب هستیم. این الگوریتم باید بتواند با اطلاعات کسب شده از حرکت اجزای یک شخصیت، شخصیت دیگری را به حرکت درآورد؛ به طوری که روش‌های زمان بر 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 ایجاد شده در شخصیت مرجع مقاوم بوده و بتواند هر نوع تغییر را منتقل کند؛ بنابراین، در الگوریتم پیشنهادی سعی بر این است که سامانه مقاومی نسبت به تغییرات از قبل ایجاد شده 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 خارج شده از گره‌ها و مجموع طول استخوان‌های متصل شده به گره‌ها برای تناظریابی بین دو شکل ارائه شده است؛ به طوری که در هریک از این مراحل نمره‌ای برای گره‌های متناظر در نظر گرفته می‌شود و درنهایت 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. درنتیجه، 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؛ درنتیجه، افزودن این بردارها به شخصیت دیگر هیچ چرخشی را نشان نمی‌دهند. گرادیان تغییر نیز





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 (به طور متوسط برابر سی استخوان برای هر شکل) انجام می‌شود و همانند روش‌های قبلی نیازی به تناظریابی بین هریک از مثلث‌های مش دو شکل (به طور 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 می‌بردارند. 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 خطأ در هر قاب باعث می‌شود تا در قاب‌های پایانی مقادیر بالایی از خطأ حاصل شود. به این علت که مقادیر خطأی هر قاب جمع شده و در نهایت، مقدار زیادی خطأ 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 گیرد، چون هر نوع خطأی منجر به ردیابی نادرست می‌شود. از دیگر روش‌های اخیر ارائه شده برای انتقال تغییرات در شکل‌های دو بعدی به روش (لی و همکاران، ۲۰۱۳) می‌توان اشاره کرد. در این روش، شکل تغییریافته 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 تغییریافته تعریف می‌شود. مؤلفه‌های غیر هماندازه شکل بر اساس دو بردار عمود به دست می‌آیند. یکی از این دو بردار، بردار لبه بوده و دیگری بردار از مشتقات بردار لبه است. این الگوریتم، ابتدا با روش "تا حد امکان هماندازه بودن"<sup>۱</sup> (AIAP) و درون‌یابی لبه‌های انفرادی، شکل مرجع را تغییر می‌دهد و اطلاعات تغییریافته 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 وجود هم‌پوشان، شکل‌های نادرستی تولید می‌شوند که این وجوده 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

<sup>۱</sup> 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 تغییریافته شکل مرجع ( $S'$ ) بدست می‌آیند. این تغییرات از طریق جابه‌جایی، چرخش و تغییر مقیاس استخوان‌های حالت پایه مرجع و حالت تغییریافته مش مرجع محاسبه می‌شوند. تغییرات کسب شده به حالت پایه مش هدف ( $T$ ) با ساختاری متفاوت، منتقل شده و حالت تغییریافته مش هدف ( $T'$ ) به وجود می‌آید.



## ۱- پیش‌پردازش

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

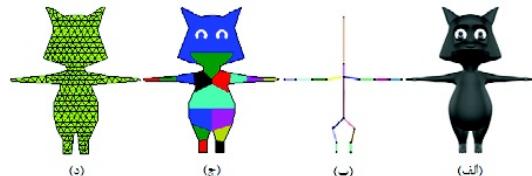
دو مرحله بین گره‌های اسکلت مرجع و هدف انجام می‌گیرد. در مرحله نخست، موقعیت زاویه‌ای اسکلت‌های خارج شده از هر گره محاسبه شده و در مرحله دوم، مجموع طول اسکلت‌های منصل شده به هر گره بدست می‌آیند. روش پیشنهادی مستقل از ترتیب گره‌ها بوده و نیازی به استخراج ترتیب بین گره‌ها نیست. بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱) ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی، حالت پایه شکل مرجع، حالات تغییریافته شکل مرجع و حالت پایه شکل هدف را به عنوان ورودی دریافت می‌کند؛ سپس در مرحله پیش‌پردازش، 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 بخش‌بندی بر اساس حرکت، اسکلت‌های ثانویه برای حالت پایه و حالات تغییریافته 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 تغییریافته شکل مرجع، این تغییرات به استخوان‌های متناظر در شکل پایه هدف منتقل می‌شوند. زمانی‌که، 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 نزدیک‌ترین فاصله تا استخوان‌های مجاورشان بخش‌بندی شوند، تا مطابق با تغییرات استخوان‌های هم‌جوارشان تغییر شکل دهند. در اثر تغییر شکل مستقل هر یک از بخش‌های مثلثی در مناطق مفصلی، شکل هدف دچار شکستگی و یا هم‌پوشانی می‌شود. برای جلوگیری از این عوامل، عملیات بهینه‌سازی در مرحله نهایی به مثلث‌های گسیخته شده و یا هم‌پوشانی یافته در محل مفاصل اعمال می‌شود تا شکل تغییریافته 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) پیش‌پردازش (استخراج مش دو بعدی و اسکلت مفاصل دقیق).
- (۲) تناظریابی بین اسکلت‌های استخراج شده از شکل‌های مرجع و هدف.

فصل نهم



مثلث های دیگر در ارتباط است؛ در حالی که در مش های چندضلعی تعداد لبه های مشترک زیادتر است. در این شرایط تحلیل وجهه چندضلعی دشوارتر است. در الگوریتم پیشنهادی برای تشکیل مش دو بعدی شکل، علاوه بر استخراج لبه و تعییه یک چندضلعی روی لبه، اسکلت تمامی اندامها را استخراج می کنیم و سپس باستگی اصلاح چندضلعی روی لبه شکل را نسبت به هریک از استخوان های اسکلت با استفاده از کمترین فاصله اقلیدسی به دست می آوریم. برای هریک از اصلاح چندضلعی، در راستای عمود بر استخوان متناظرش نمونه برداری انجام می دهیم. تمامی نمونه های داخل شکل انتخاب شده و مختصات آن ها به عنوان ورودی به سامانه مثلث سازی (روپرت، ۱۹۹۵) وارد می شوند. خروجی این سامانه، رئوس مثلث ها و وجهه متناظر می باشند. شکل (۳) نمونه ای از مراحل این فرآیند را نشان می دهد.

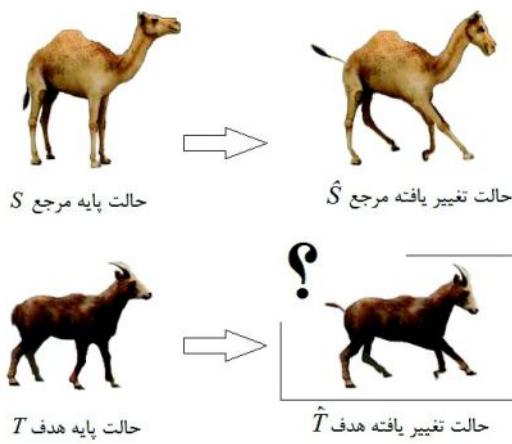


(شکل-۳): تشکیل مش دو بعدی با روش نمونه برداری. (الف):  
شکل اصلی. (ب): اسکلت. (ج): بخش بندی بر اساس اسکلت (لبه  
مشکل با رنگ سیاه در اطراف شکل است). (د): شکل  
مش بندی شده.

• **اسکلت بندی بر اساس حرکت**  
برای انتقال تغییرات از یک سکانس پویانمایی به سکانس دیگر، ابتدا باید تغییرات مفاصل را در هر قاب به دست آوریم؛ سپس با انتقال این تغییرات به مفاصل شخصیت دیگر باعث حرکت آن شویم.

برای این منظور، می توان اسکلت شکل را توسط الگوریتم استخراج اسکلت در هر قاب به دست آورد؛ ولی این الگوریتم هیچ گونه اطلاعاتی در مورد محل مفاصل در اختیار ما قرار نمی دهد. برای به دست آوردن محل مفاصل در قاب های متولی از بخش بندی بر اساس حرکت استفاده می شود. این روش مبتنی بر گرادیان تغییر شکل<sup>۱</sup> بوده و از تغییرات ایجاد شده بین دو مثلث مجاور از مش دو بعدی در طی سکانس پویانمایی استفاده می کند. بنابراین، با کمک بخش بندی می توانیم اسکلتی با مفاصل دقیق در هر قاب به دست آوریم. الگوریتم بخش بندی بر اساس حرکت بر مبنای الگوریتم ارائه شده توسط (لی و همکاران، ۲۰۰۶)

نشان دادن تغییرات از آن ها استخراج کنیم. در الگوریتم پیشنهادی، تغییرات با استفاده از اندام های اسکلتی محاسبه شده و با انتقال به استخوان ها و مثلث های شکل هدف باعث تغییر شکل آن می شوند. بنابراین، در این مرحله مش دو بعدی برای شکل های مرجع و هدف به همراه اسکلتی با مفاصل دقیق برای شکل های مرجع کسب می شوند.



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

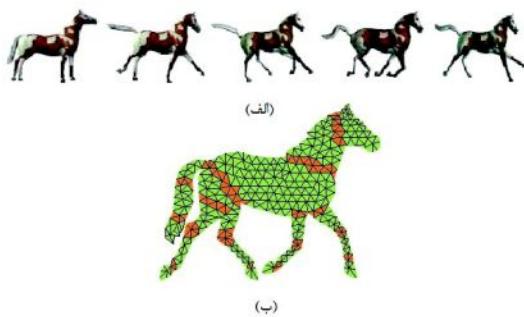
#### • **تشکیل مش دو بعدی**

روش های مختلفی برای بیان هندسی شکل وجود دارند. ولی روش مطلوب با توجه به مزایا، معایب و کاربری بر اساس نیاز انتخاب می شود. مش های مثلثی یکی از رایج ترین روش های به کار رفته برای توصیف هندسه شکل است. چون به راحتی توسط سامانه های شناخته شده (روپرت، ۱۹۹۵) قابل پیاده سازی بوده و پردازش تغییرات برای هر مثلث سریع تر از پردازش تغییرات برای تک تک نقاط شکل انجام می گیرد. یک مش مثلثی مجموعه ای 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 دو بعدی بوده و هر وجه از یک مجموعه با سه رأس تشکیل می شود که بیان کننده چگونگی اتصال رأس ها برای به وجود آوردن یک مثلث است. ساختار هر مش بسته به تعداد رئوس، وجود و اتصالات آن ها در نظر گرفته می شود. در الگوریتم پیشنهادی، مش های مثلثی به عنوان مناسب ترین روش بیان هندسه شکل در نظر گرفته می شوند. این روش دارای دو مزیت بر مش های چندضلعی می باشد. نخست این که، هر وجه در مش مثلثی تعداد یکسانی رأس دارد که فرآیند پیاده سازی را آسان تر می کند. دوم این که، هر مثلث با سه لبه با

<sup>۱</sup> Deformation gradient

سال ۱۳۹۵ شماره ۲ پیاپی ۲۸

همسايه وجود دارد. مناطق مرزی در محل های به وجود می آيند که تغييرات زيادي بين دو وجه حاصل می شود. اين مناطق، وجه دیگر را به محل های جداگانه ای در اطراف مرز دسته بندی می کنند. مناطق مرزی به عنوان مناطق مفصلی در نظر گرفته می شوند. شکل (۴) نمونه ای از مناطق مفصلی استخراج شده از يك سکانس حرکتی را نشان می دهد. با توجه به مفاصل کسب شده، به تصحیح مدل اسکلتی به دست آمده از الگوریتم استخراج اسکلت (بای و همکاران، ۲۰۰۷) می بردازیم و مفاصل دقیقی را برای هر شکل از سکانس پویانمایی تعیین می کنیم.



(شکل ۴): استخراج مناطق مفصلی. (الف): سکانسی از حرکت یک اسب. (ب): مناطق مفصلی استخراج شده با رنگ نارنجی نشان داده می شوند.

برای تصحیح مکان مفاصل، ابتدا با الگوریتم استخراج اسکلت، اسکلت شکل و مختصات محل تقاطع اسکلت ها را در مفاصل اولیه به دست آوریم؛ سپس با توجه به مختصات مناطق مفصلی به دست آمده از سکانس حرکتی به تصحیح مختصات مفاصل قبلی می بردازیم. بدین صورت که مکان مفاصل حاصل از اسکلت استخراج شده را به مکان نزدیک ترین مفاصل حاصل از بخش بندی حرکتی منتقل می کنیم. همچنین، برای خطوط اسکلتی که در قبل هیچ مفصلی برای آنها در نظر گرفته نشده بود، در این مرحله، مفصل تعیین می کنیم. درواقع برای خطوط اسکلتی که از مناطق مفصلی عبور می کنند، مفصلی در آن مختصات در نظر می گیریم. شکل (۵)، اسکلت تصحیح شده را برای شکل اسب نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، در قسمت (الف)، تعداد محدودی از مفاصل ( نقاط زرد رنگ ) و در قسمت (ب) تعداد بیشتری از مفاصل با مکان دقیق نمایش داده می شوند.

برای مدل های سه بعدی است. روابط دو بعدی این الگوریتم در ادامه توضیح داده می شوند.

گرادیان تغییر شکل (سامنر و پوپوویک، ۲۰۰۴) بخش غیرقابل انتقال ماتریس آفین<sup>۱</sup> است که می تواند تغیيرات ایجاد شده بین حالت اولیه شکل مرجع و حالت تغییریافته 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 تغییریافته ( $i=1, \dots, 3$ ) باشند، تبدیل غیرقابل انتقال (گرادیان تغییر شکل) بین این دو مثلث می تواند توسط رابطه زیر حاصل شود:

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

در حالی که در مش دو بعدی  $O = [v_2 - v_1 \ v_3 - v_1]$  بوده و  $O' = [v'_2 - v'_1 \ v'_3 - v'_1]$  است. بنابراین، برای هر حالت تغییریافته  $t$  در سکانسی از اینیمیشن می توان تغییرات گرادیانی را برای هر وجه  $f_i$  تعیین کرد. توسط تبدیل  $(F_i^t)$  می توان تغییرات ایجاد شده بین وجه حالت پایه مش  $(f_i^t)$  و وجه حالت تغییریافته مش  $(f_i)$  را پیدا کرد. تفاضل گرادیان تغییر شکل بین دو وجه همسایه  $f_i$  و  $f_j$  توسط ماتریس تفاضلی  $(F_i^t - F_j^t)$  بیان می شود. نرم فرووبنیوس این تفاضل بیان گر فاصله تغییرات بین این دو وجه است.علاوه براین، فاصله به دست آمده با تقسیم به فاصله ژئودزیک<sup>۲</sup> بین مراکز وجههای همسایه  $f_i$  و  $f_j$  نرمالیزه می شود. در این صورت می توان تغییرات مثلث های کوچک را نیز با این روابط بیان کرد. بدون نرمالیزه کردن فقط تغییرات مثلث های بزرگ تر نشان داده می شوند. 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 بزرگ ترین فاصله را به عنوان  $D_{ij}$  انتخاب می کند.  $D_{ij}$  برای ارزیابی میزان تغییرات بین این دو وجه در همه فریم های اینیمیشن به کار می رود. بنابراین، فاصله مورد نظر با رابطه زیر به دست می آید:

$$D_{ij} = \max \left( \frac{\|F_i^t - F_j^t\|_F^2}{geo(f_i, f_j)} \right) \quad \forall t \in N \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $N$  بیان گر سکانسی از همه حالت پویانما است. اگر هر دو وجه، گرادیان تغییر شکل مشابهی داشته باشند، فاصله تغییرات بین آنها نیز کوچکتر می شود؛ ولی اگر فاصله بزرگ تر شود، یعنی تغییرات زیادی بین وجههای

<sup>1</sup> Affine transformation

<sup>2</sup> 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.

### ۱-۲-۱- برچسبزنی گره‌ها

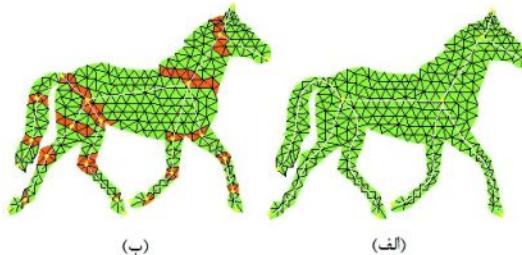
ابتدا دایرة معنی دار از زوایا (دایره مثلثاتی) را می‌سازیم که هر بخش آن بیان گر زاویه‌ای مشخص است؛ سپس به مرکز گره‌های اسکلت شکل مرجع و اسکلت شکل هدف، این دوایر رسم می‌شوند. تعداد محل تقاطع خطوط اسکلتی با دوایر مثلثاتی محاسبه شده و گره‌هایی که دوایر محیطی آن‌ها فقط در یک نقطه با خطوط اسکلتی قطع پیدا می‌کنند، به عنوان گره‌های انتهایی<sup>۱</sup>، گره‌هایی که دوایر محیطی آن‌ها در دو نقطه با خطوط اسکلتی قطع پیدا می‌کنند، به عنوان گره‌های اتصالی<sup>۲</sup> و گره‌هایی که دوایر محیطی آنها در بیشتر از دو نقطه با خطوط اسکلتی قطع پیدا می‌کنند، به عنوان گره‌های اتصالی اصلی<sup>۳</sup> برچسب زده می‌شوند. نمونه‌ای از گره‌های انتهایی، اتصالی و اتصالی اصلی در شکل (۷) نشان داده می‌شوند. گره‌های اتصالی اصلی با برچسب A، گره‌های اتصالی با برچسب C و گره‌های انتهایی با برچسب E مشخص می‌شوند.

پس از مشخص شدن برچسب هریک از گره‌های شکل مرجع و هدف به تناظریابی بین دو شکل می‌پردازیم. برای رسیدن به این منظور، ابتدا به تناظریابی بین گره‌های اتصالی اصلی برداخته 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 تنۀ 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 تنۀ اصلی به شاخه‌ها و سپس به زیرشاخه‌ها باعث افزایش دقت الگوریتم می‌شود.

<sup>1</sup> End node

<sup>2</sup> Connection node

<sup>3</sup> Junction node



(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 صحیح شده.

### 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 سلیقۀ پویانما انجام گیرد. در این بخش، الگوریتم تناظریابی بین اسکلت شکل مرجع و شکل هدف توضیح داده می‌شود. نمودار جریانی الگوریتم تناظریابی اسکلتی در شکل (۶) نشان داده می‌شود.

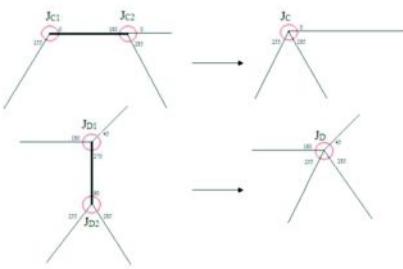


(شکل-۶): بلوك دیاگرام الگوریتم پیشنهادی برای تناظریابی اسکلتی.

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،



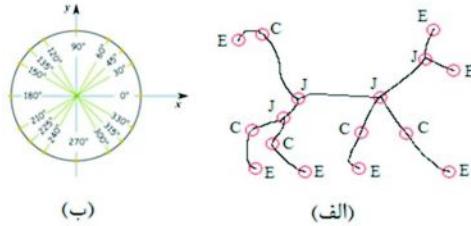
دایره محاسبه می کنیم؛ سپس فاصله مکانی گره های اتصالی اصلی را نسبت به هم محاسبه کرده و گره هایی که در همسایگی هم هستند، به عنوان گره های مجاور انتخاب می کنیم. موقعیت زاویه ای خطوط اسکلتی خارج شده از گره های مجاور مقایسه شده و خطوط اسکلتی که در موقعیت زاویه ای با اختلاف  $180^\circ$  درجه نسبت به هم واقع شده اند، به عنوان خطوط اسکلتی مشترک بین دو گره مجاور در نظر گرفته می شوند. درنهایت، دو گره اطراف این خطوط با یک گره برچسب زده می شوند. شکل (۹)، موقعیت زاویه ای خطوط اسکلتی بین گره های مجاور را نشان می دهد.



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

## ۲-۲-۳- تناظریابی گره ها

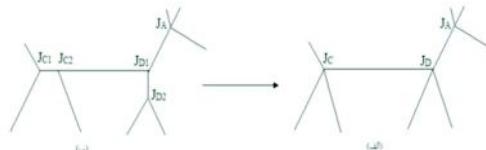
قبل از به کار گیری الگوریتم مورد نظر باید هر دو اسکلت در یک حالت و وضعیت قرار گیرند. برای رسیدن به این هدف می توان از روش تجزیه مؤلفه های اصلی (PCA) برای شکل های دوبعدی (مزوگی و همکاران، ۲۰۱۲) استفاده کرد و هر دو اسکلت را در یک جهت غالب قرار داد. عملیات تناظریابی برای هر گره در دو مرحله انجام می گیرد. در گام نخست، موقعیت زاویه ای استخوان های خارج شده از هر گره نسبت به زوایای دایره مثلثاتی تعیین شده در گرهی که این استخوان ها به آن وصل هستند، محاسبه شده و دو گره متناظر از اسکلت مرجع و اسکلت هدف بر اساس پیشینه مقدار تابع احتمال زاویه ای انتخاب می شوند. در گام دوم، مجموع طول استخوان های متصل به گره ها، سنجیده شده و دو گره متناظری که کمترین فاصله را برای تابع انرژی معرفی شده در بخش بعد نتیجه می دهند، به عنوان گره های متناظر گام دوم در نظر می گیریم. درنهایت، نتایج حاصل از



(شکل-۷): برچسبزنی گره ها. (الف): اسکلت با گره های برچسب زده شده. (ب): دایره مثلثاتی.

## • حذف گره های تکراری

در بعضی موارد، در اثر الگوریتم استخراج اسکلت و نیز ساختار شکل برای ناحیه مشخصی از شکل، اسکلت های متنوعی استخراج می شود. با این که این اسکلت ها از لحظه ساختار کلی بسیار شبیه هم هستند، ولی از لحظه ساختار محلی مانند تعداد گره ها متفاوتند. اکثر این گره های تکراری در همسایگی یکدیگر قرار گرفته و بیان گر یک ناحیه هستند؛ ولی در نظر گرفتن این گره ها به طور مجزا موجب تولید نتایج نادرست در تناظریابی می شود. شکل (۸) نمونه ای از گره های تکراری در اسکلت استخراج شده را نشان می دهد.



(شکل-۸): حذف گره های 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) می شود.

برای ازبین بردن خطای این گره ها به دنبال تبدیل برچسب چند گره به یک گره هستیم. همانند شکل (۸) که توسط روش ارائه شده، اسکلت (ب) با دو گره تکراری به اسکلت (الف) بدون گره تکراری تبدیل می شود. فرض کنید، تناظریابی در مورد گره های اتصالی اصلی انجام می شود، ولی تعداد این گره ها 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 گره ها در اسکلت هدف بیشتر است، ابتدا دوایری بر روی گره های اتصالی اصلی اسکلت شکل هدف تعییه کرده و موقعیت زاویه ای خطوط اسکلتی خارج شده از این گره ها را در نواحی قطع شده با لبه

فصل نهم



اگر مجموعه گرههای شکل مرجع را با  $\mathcal{S}$  و مجموعه گرههای شکل هدف را با  $\mathcal{T}$  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 دایرة تعییه شده 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:

$$\delta_\theta = \max P(t_j | s_i) \quad (4)$$

در رابطه بالا،  $P(t_j | s_i)$  بیان گر تابع احتمال شرطی بین گرههای اسکلت مرجع و هدف است. تناظر زاویه‌ای بین گرههای مرجع و هدف با  $\delta_\theta$  مشخص می‌شود. تابع احتمال شرطی مطابق با زوایای گرهها با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P(t_j | s_i) = \frac{p(t_j) \cap p(s_i)}{p(s_i)} = \frac{p(\theta_{t_j} \cap \theta_{s_i})}{p(s_i)} \quad (5)$$

$$p(\theta_{t_j} \cap \theta_{s_i}) = \frac{N(\theta_s = \theta_t)}{\psi_{s_i}}$$

در رابطه بالا،  $p(\theta_s = \theta_t)$  بیان گر اشتراک موقعیت

زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده 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  $\mathcal{S}$  است. توجه داشته باشید که  $(\theta_{t_j} \cap \theta_{s_i})$  به ترتیب بیان گر تابع احتمال زاویه‌ای برای گرههای اسکلت شکل مرجع و هدف هستند. در این رابطه،  $N(\theta_s = \theta_t)$  بیان گر تعداد گرهها با موقعیت زاویه‌ای مشترک بین گرههای مرجع و هدف و  $\psi_{s_i}$  بیان گر تعداد استخوان‌های خارج شده از گره  $s_i$  اسکلت مرجع است. برای به دست آوردن موقعیت‌های زاویه‌ای مشترک بین گرههای مرجع و هدف از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\delta_\theta = \arg \min_\delta \sum_{(s_i, t_j) \in \delta} |\theta_{s_i} - \theta_{t_j}| \quad (6)$$

در این رابطه،  $\delta = (s_i, t_j)$  بیان گر مجموعه متناظری از گرههای مرجع و هدف است که تناظرهای این مجموعه توسط رابطه (۶) مورد آزمایش قرار می‌گیرند. تناظرهایی که موجب کمینه‌سازی این رابطه می‌شوند، به عنوان گرههای متناظر از این مرحله شناخته می‌شوند. این گرههای متناظر، موقعیت‌های زاویه‌ای مشترک دارند. مراحل کسب جفت‌های متناظر بر اساس موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده از گرهها در الگوریتم (۱) ارائه شده است. با توجه به مقادیر تابع احتمال گرههایی بین جفت‌گرههای متناظر، نمره‌ای به این جفت‌گرههای اختصاص داده می‌شود، که توسط این نمرات، جفت‌گرههای متناظر این گام شناسایی می‌شوند. بالاترین

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

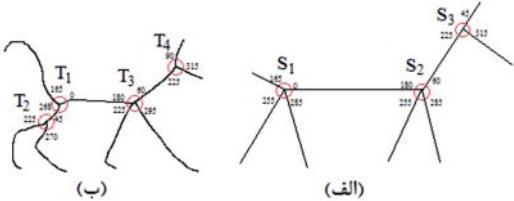
### • گام نخست: موقعیت زاویه‌ای استخوان‌ها نسبت به زوایای دایره مثبتانی

همان‌طور که در قبل نیز مطرح شد، ابتدا به تناظریابی 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 دایرة معنی‌دار از زوایا را به مرکز گرههای اتصالی اصلی در اسکلت‌های شکل مرجع و هدف تعییه کرده و محل تقاطع خطوط اسکلتی خارج شده از هر گره را با لبه دوا بر متناظر در هر دو شکل به طور مجزا به دست می‌آوریم. با استفاده از مختصات محل تقاطع خطوط اسکلتی با لبه دایره می‌توان امتداد زاویه‌ای خطوط اسکلتی خارج شده از هر گره را با رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_d - y_0}{x_d - x_0} \quad (3)$$

در رابطه بالا،  $(x_0, y_0)$  مختصات مرکز دایرة تعییه شده بر روی گره است و  $(x_d, y_d)$  مختصات محل تقاطع خطوط اسکلتی با لبه دایره است.  $\theta$  بیان گر میزان زاویه‌ای است که خطوط اسکلتی در امتداد آن از گره خارج می‌شوند.

با توجه به این که موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های متنصل 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 خارج شده از آن‌ها موقعیت زاویه‌ای مشتابه دارند، باعث کمینه‌سازی رابطه معرفی شده می‌شوند و به عنوان گرههای متناظر این مرحله انتخاب می‌شوند. گرههایی که اسکلت‌های خارج شده از آن‌ها زوایای متفاوتی دارند، باعث بیشینه شدن مقدار رابطه (۶) می‌شوند.



(شکل ۱۰): موقعیت زاویه‌ای خطوط اسکلتی بر روی دایره مثلاً (زاویا بر حسب درجه هستند). (الف): شکل مرجع با گره‌های اتصالی اصلی با برچسب . (ب): شکل هدف با گره‌های اتصالی اصلی با برچسب .  
.  $T$

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

#### • گام دوم: مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌ها

در این گام، تناظریابی بین جفت‌گرهای اسکلت شکل مرجع و هدف بر اساس مجموع طول استخوان‌های متصل شده به گره‌ها انجام می‌شود. در این بخش نیز با توجه به میزان تناظر کسب شده بین دو گره، نمره‌ای به جفت‌گرهای 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 کسب شده 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 به طور تقریبی با هم برابر بوده و موجب کمینه‌سازی رابطه (۷) می‌شوند، به عنوان دو گره متناظر در نظر گرفته می‌شوند. مقایسه مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌های مرجع و هدف توسط رابطه 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 به دست آورده است.

#### الگوریتم ۱

تناظریابی بر اساس موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده 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 انتخاب شده  $C' = (S_{candid}, T_{candid})$

از تناظرهای اولیه موجود در  $\delta$   $(S_i, T_j) \in \delta$ ، جفتسی به عنوان نامزد انتخاب می‌شود تا موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده از این گره‌ها با روابط زیر محاسبه شوند.

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

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

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

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

در این روابط،  $\theta_{Si}$  جهت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده از گره  $S_i$  است و  $\theta_{Tj}$  جهت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده از گره  $T_j$  است.

۵- اگر:

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

۶- اگر:

$$|\theta_{S_{candid}} - \theta_{T_{candid}}| < |\theta_{Si} - \theta_{Tj}|$$

۷- آنگاه:

جفت کاندید  $(S_{candid}, T_{candid})$  را در مجموعه  $\delta_0$  قرار دهد.

۸- اتمام حلقه

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

۹- برگردان  $\delta_0$

فصل نهم



غیر این صورت، اگر رابطه (۷) بیشترین مقدار خود را نتیجه دهد، کمترین نمره برای جفت‌گره متناظر در نظر گرفته می‌شود. مراحل کسب جفت‌های متناظر بر اساس مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌ها در الگوریتم (۲) ارائه شده است.

**• گام سوم: ترکیب نمرات گام‌های نخست و دوم**  
پس از بدست آوردن نمرات برای گام‌های نخست و دوم باید نتایج هر دو گام با هم ترکیب تا گره‌های نهایی انتخاب شوند. مجموع نمرات هر دو گام طبق رابطه  $w_{total} = \eta w_1 + \gamma w_2$ ، نتیجه نهایی را تشکیل می‌دهند. در این رابطه،  $w_1$  نمرات گام نخست و  $w_2$  نمرات گام دوم است. نمرات دو گام با وزن‌های یکسان ۱ و ۲ با هم جمع می‌شوند.

## الگوریتم ۲

متناظریابی بر اساس مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌ها

۱- ورودی :  $(S_i, T_j) \in \delta$

۲- خروجی :  $(S_i, T_j) \in \delta''$

۳- مقداردهی اولیه :  $\min D = 50$

۴- حلقه :

برای هر جفت نامزد انتخاب شده  $C' = (S_{candid}, T_{candid})$  از تناظرها اولیه موجود در  $\delta$   $(S_i, T_j) \in \delta$ ، جفتی به عنوان نامزد انتخاب می‌شود تا مجموع طول استخوان‌های متصل به این گره‌ها 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  $s_{il}$  گره‌های فرعی متصل به گره اصلی  $S_i$  است و  $T_{jm}$  گره‌های فرعی متصل به گره اصلی  $T_j$  می‌باشد.

۵- اگر:

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

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

۶- اگر:

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

۷- آنگاه:

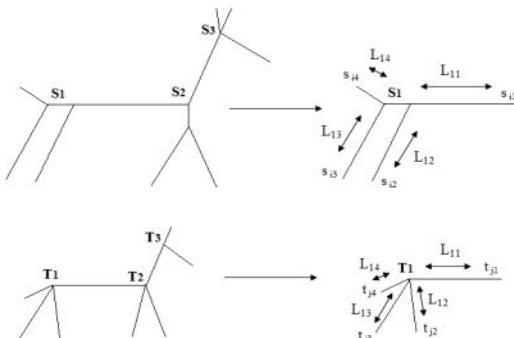
جفت نامزد  $(S_{candid}, T_{candid})$  را در مجموعه  $\delta$  قرار بده.  
۸- اتمام حلقه

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

۹- برگردان  $\delta$

در رابطه بالا، گره‌های اصلی اسکلت شکل مرجع با  $(S_1, S_2, S_3)$  و گره‌های اصلی اسکلت شکل هدف با  $(T_1, T_2, T_3)$  برچسب زده می‌شوند. در این رابطه می‌توان بیان کرد که  $S_i \in S$  پوده و  $T_j \in T$  است.

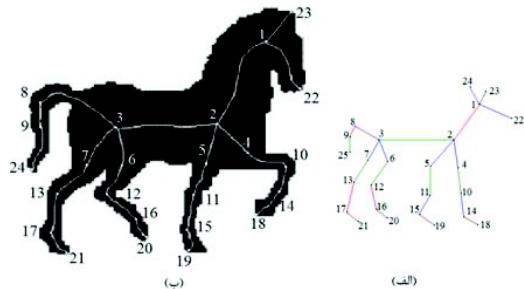
در رابطه (۷)،  $\delta$  مجموعه‌ای از تمامی جفت‌گره‌های اصلی متناظر بین گره‌های مرجع و هدف  $(S_i, t_j) \in \delta$  است. اگر گره‌های فرعی اسکلت شکل مرجع با برچسب  $(S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4})$  و گره‌های فرعی اسکلت شکل هدف با  $(t_{j1}, t_{j2}, t_{j3}, t_{j4})$  بیان شوند، می‌توان  $(S_{iL}, t_{jm})$  را مجموعه‌ای از جفت‌گره‌های فرعی متصل به گره‌های اصلی مرجع و هدف مربوطه  $(S_i, t_j) \in \delta$  در نظر گرفت. توجه داشته باشید که جفت‌های متناظر بیان شده برای  $\delta$ ، گره‌های فرعی خارج شده از گره اصلی مرجع  $S_i$  و گره اصلی هدف  $T_j$  هستند؛ بنابراین، می‌توان بیان کرد که گره‌های فرعی  $S_{iL}$  به گره‌های  $t_{jm}$  متصل و گره‌های فرعی  $t_{jm}$  به گره‌های اصلی  $T_j$  متصل هستند.  $\delta$  مجموعه نهایی از جفت‌گره‌های متناظر بین گره‌های مرجع و هدف کسب شده از گام دوم است.



(شکل-۱۱): مجموع طول استخوان‌های متصل به گره‌ها. اسکلت شکل مرجع در ردیف بالا و اسکلت هدف در ردیف پایین قرار گرفته است. همچنین از سمت چپ به راست گراف‌های جداسازی شده اسکلت‌ها نشان داده می‌شوند. در این گراف‌ها، گره‌های اصلی با  $(S_1, S_2, S_3, T_1, T_2, T_3)$  و گره‌های فرعی با  $(s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, s_{i4}, t_{j1}, t_{j2}, t_{j3}, t_{j4})$  برچسب زده می‌شوند.

در این گام با توجه به جفت‌های متناظر فرضی در نظر گرفته شده ( $\delta'$ )، الگوریتم فاصله زئودزیکی بین گره‌های اصلی و فرعی (طول هریک از استخوان‌های مرجع و هدف) را محاسبه کرده و سپس مقادیر به دست آمده را توسط رابطه (۷) مقایسه می‌کند. اگر فاصله محاسبه شده برای طول استخوان‌های خارج شده از دو گره مرجع و هدف یکسان باشد، رابطه (۷) کمینه مقدار خود را نتیجه می‌دهد. در این شرایط، بالاترین نمره برای دو گره متناظر ثبت می‌شود. در

در رابطه بالا،  $W$  میزان نمره به دست آمده بین دو گره متناظر از اسکلت شکل مرجع و اسکلت شکل هدف است. به طوری که  $W$  میزان بالاترین نمره در نظر گرفته شده است. این میزان معادل پنج در نظر گرفته می‌شود.  $N_i$  بیان گر گره‌های متناظر موجود در اسکلت مرجع و اسکلت هدف بوده و  $N$  بیان گر تعداد کل گره‌های موجود در اسکلت مرجع است. همچنین  $n$  بیان گر تعداد کل تناظرهای به دست آمده 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 به صورت مستقل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.



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

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

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

### ۲-۳-۲- انتقال تغییرات بین اسکلت‌های متناظر شکل مرجع و هدف

برای اینکه طبق الگوریتم ارائه شده، 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 تغییریافته 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.

### • تناظریابی برای گره‌های اتصالی و انتهایی

پس از اتمام مراحل بیان شده برای گره‌های اتصالی اصلی، تناظریابی بهترتبه در مورد گره‌های اتصالی و گره‌های انتهایی انجام می‌شود. پس از مشخص شدن تناظر شده گره‌های اصلی، الگوریتم در مسیر خطوط اسکلتی خارج شده از گره‌های اصلی به دنبال نزدیک‌ترین برچسب 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 تئه اصلی درخت به شاخه‌ها و سپس به زیر شاخه‌ها اعمال شده و این کار باعث کاهش خطای می‌شود. به این علت که پس از مشخص شدن 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 به دست نیامد، این گره در مرحله انتقال تغییرات، ماتریس تبدیل گرده مجاوری را دریافت می‌کند که با استخوانی به آن وصل شده است.

### ۲-۳-۳- مزایای الگوریتم تناظریابی پیشنهادی

مهمنترین 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 به طور 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 به طور کامل یکسان نیستند، نمایش داده می‌شوند. در جدول (۱) نیز می‌توان درصد نتایج الگوریتم برای گام‌های متفاوت را مشاهده کرد.

معیار ارزیابی برای تناظر کسب شده 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 (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 می شود:

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

درنهایت، بردار جابه جایی نیز با رابطه زیر به دست می آید:

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

اگر از قاب پایه به هر قاب تغییر یافته، تغییر مقیاسی در طول استخوان ها صورت گیرد، باید این تغییر مقیاس را نیز در نظر گرفت. پارامتر مقیاس را با  $\alpha$  نشان می دهیم که بیان گر تغییر طول استخوان به اندازه  $\alpha$  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 می کنیم:

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

در این رابطه،  $\beta$  پارامتر مقیاس در جهت عمود بر استخوان است. به طور معمول مقدار  $\beta$  برابر یک و یا برابر مقدار  $\alpha$  در نظر گرفته می شود. البته مقادیر دیگر نیز می توانند انتخاب شوند. درنهایت، 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 می شود:

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

با استفاده از رابطه بالا می توان ماتریس تبدیل را برای هریک از استخوان های تغییر یافته شکل مرجع در طی قاب های متواالی به دست آورد. در بخش بعد، هر یک از این ماتریس های تبدیل به استخوان های متناظر در شکل هدف (به دست آمده از عملیات تناظریابی) منتقل می شوند.

## ۲-۳-۲- تغییرات استخوانی در شکل هدف

پس از به دست آوردن تغییرات استخوانی در شکل مرجع که برای هریک از قاب ها به دست آمده (بین هریک از قاب های حالت تغییر یافته و قاب حالت پایه مرجع)، این تغییرات باید به استخوان های متناظر در شکل هدف منتقل شوند. از بخش قبل می دانیم که هر کدام از استخوان های مرجع و هدف در تنازع یک به یک با یکدیگر هستند. بنابراین، هر کدام از تغییرات به دست آمده به استخوان ها و گره های متناظر در حالت پایه هدف، منتقل شده و باعث تغییر استخوان های شکل هدف می شوند. بعد از تغییر شکل استخوان ها باید مثلث های وابسته به هر استخوان نیز تغییر شکل دهند.

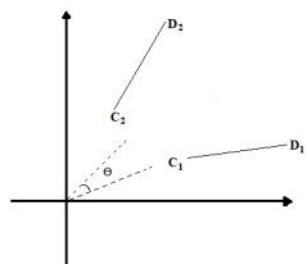
با توجه به تبیاناتی که به هریک از استخوان های شکل هدف اعمال می شود، مثلث های بخش بندی شده به آن استخوان در شکل هدف نیز همان تغییر شکل را خواهد داشت. بخش بندی مثلث های شکل هدف به استخوان ها بر اساس نزدیک ترین فاصله اقلیدسی مرکز مثلث ها نسبت به استخوان ها به دست می آید. این بخش از الگوریتم توسط سه گام زیر تکمیل می شود:

- ۱) محاسبه تغییرات بین استخوان های حالت پایه و حالات تغییر یافته مرجع.
- ۲) انتقال این تغییرات به استخوان های متناظر در اسکلت حالت پایه هدف.
- ۳) بهینه سازی بخش های گسسته یا هم پوشانی یافته.

## ۲-۳-۲- تغییرات استخوانی در شکل مرجع

با داشتن اسکلت حالت پایه شکل مرجع و اسکلت تغییر یافته شکل مرجع، ماتریس تبدیل برای استخوان های مرجع به دست می آید. 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 استخوان های متناظر حالت پایه و حالت تغییر یافته مرجع با روابط توضیح داده شده در زیر محاسبه می شود. با داشتن ماتریس تبدیل می توان بردارهای جابه جایی، انتقال و چرخش را برای هر استخوان و گره اتصالی مربوطه به دست آورد. با توجه به شکل (۱۳)، استخوان  $C_1D_1$  را انتقال می دهیم تا  $C_1$  روی مرکز قرار گیرد. این بردار جابه جایی با  $T_{S_1}$  نشان داده می شود؛ سپس  $C_1D_1$  به طور ساعت گرد حول مرکز به اندازه  $\theta$  درجه چرخانده می شود تا در جهت استخوان  $C_2D_2$  قرار گیرد. زمانی که روی  $C_1$  قرار می گیرد، بردار جابه جایی  $T_{S_2}$  است. این عملیات را می توان با رابطه زیر نشان داد:

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

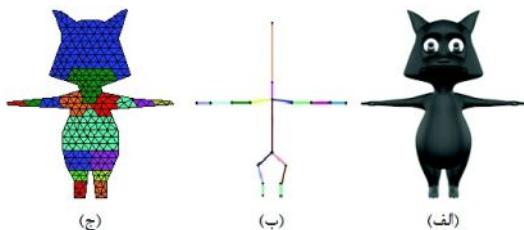


(شکل-۱۳): موقعیت اولیه و نهایی یک استخوان.

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 جایه‌جایی 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 جایه‌جا و چرخش یابند:

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

به طوری که در رابطه (۱۵)،  $O$  رئوس مثلث قبل از جایه‌جایی و تغییر بوده و  $O'$  رئوس مثلث پس از جایه‌جایی و تغییر است. ماتریس  $M_i$  بیان‌گر میزان چرخشی است که به این رئوس اعمال می‌شود. ماتریس  $M_i$  بیان شده در این رابطه، طبق گردایان تغییر شکل معروفی شده 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.

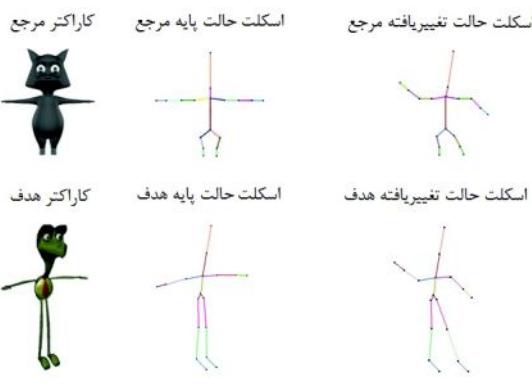
اگر هر مثلث به صورت صلب همانند استخوان مربوطه تغییر باید، در این شرایط در محل مفاصل، مثلث‌ها دچار شکستگی و یا همپوشانی می‌شوند. این همپوشانی بین مثلث‌ها به‌علت حرکات ناهماهنگ دو استخوان مجاور اتفاق می‌افتد. در شکل (۱۶)، نمونه‌ای از شکل منتجه بر اثر تغییر شکل استخوان‌ها و گسترشدن رئوس مثلثی نشان داده 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 پوپوپیک، 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 تغییریافته 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 استخوان‌ها بر این منظور، باید رئوس هر یک از مثلث‌ها با کمک رابطه زیر جایه‌جا و چرخش یابند:

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

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 جایه‌جایی استخوان‌های شکل مرجع است که از رابطه (۱۱) به دست می‌آید و  $V$  نقاط استخوانی تغییریافته شکل هدف است. بدین ترتیب، تمام تغییرات استخوان‌های مرجع به استخوان‌های متناظر حالت پایه هدف، انتقال یافته و استخوان‌های تغییریافته 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.



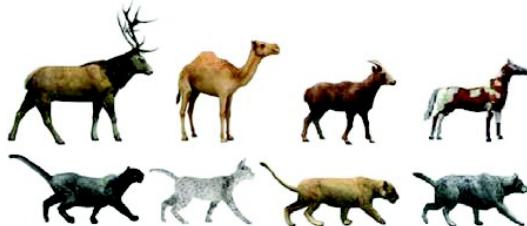
(شکل ۱۶): انتقال تغییرات استخوان‌های شکل مرجع به استخوان‌های شکل هدف.

### ۳-۳-۲- 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

فصل نهم

گذاشته می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، مزایا و معایب سامانه مطرح می‌شوند و سرانجام در مورد کارآیی 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.



(شکل-۱۷): مجموعه‌ای از شکل‌های دو بعدی.

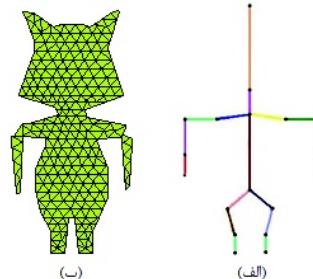
### ۳-۱- تناظریابی اسکلت

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 کسب شده برای موقعیت مکانی و زاویه‌ای گره‌ها با هم مقایسه شده و گره‌هایی که بالاترین نمرات را برای تناظر به دست می‌آورند، به عنوان گره‌های متناظر از اسکلت مرجع و هدف انتخاب می‌شوند. بنابراین، طبق موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده 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، تضمیم گیری 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 ارائه شده برای تناظریابی اسکلتی بین شکل‌ها، پیچیدگی محاسباتی زیادی را شامل نمی‌شود. فرض کنید،  $m_i$  بیان گر تعداد تمام گره‌های موجود در اسکلت شامل گره‌های اتصالی اصلی، گره‌های اتصالی و گره‌های انتها (ی) و  $N$  بیان گر تعداد گره‌های موجود در هر گروه باشد، زمان لازم برای محاسبه کوتاه‌ترین فاصله میان گره‌ها با رابطه  $O(m_i \log m_i)$  به دست آمده و فاصله ژئودزیکی نیز با رابطه  $O(Nm_i \log m_i)$  محاسبه می‌شود. در این صورت، زمان لازم برای محاسبه مجموع طول اسکلت‌های متصل شده به هر گره با رابطه  $O(N^2 m_i \log m_i)$  به دست می‌آید، به این

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

$$E = \sum_{i=1}^n (\|M_i - M'_i\|_F^2) \quad (16)$$



(شکل-۱۶): شکل گسیخته شده مش مثلثی در اثر تغییر شکل استخوان‌ها. (الف): استخوان تغییریافته. (ب): مش گستته شده.

در رابطه (۱۶)،  $n$  تعداد مثلث‌های موجود در مش بوده و  $M_i$  ماتریس تبدیل واقعی اعمال شده به مثلث  $i$  است.  $M'_i = O' O'^{-1}$  است.  $M'_i$  ماتریس تبدیل اعمال شده به استخوانی است که می‌خواهیم مثلث وابسته به آن استخوان نیز از این تبدیل پیروی کند.  $\bar{M}_i$  توسط رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. نرم فربونیوس است. با کمینه‌سازی  $E$  می‌توان بهترین نتیجه را برای تقریب تغییرات به دست آورد، در حالی که اتصالات مش نیز حفظ می‌شوند. متغیرهای کمینه‌سازی، مختصات رئوس مثلث‌های تغییر شکل یافته هستند. برای حل کردن مسئله بهینه‌سازی مطرح شده، گرادیان  $E$  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 تغییریافته را محاسبه و دیگری مختصات  $Y$  جدید برای مسئله مطابق با روش ارائه شده توسط (سامنر و پوپوویک، ۲۰۰۴) است.

### ۳- نتایج پیاده‌سازی

در این بخش، کارآیی 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. درصورتی که ردیابی مفاصل در هر قاب، نادرست انجام شود درنهایت، 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 لبه مثلف-های مش است. این روش فقط زمانی می‌تواند تغییرات ایجادشده 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 ایجادشده 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 به دست 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 متواالی 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 هم‌پوشانی یافته از مفاصل که رنگ بافت به درستی 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 به درستی دنبال کند. درنهایت، طبق نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی کیفیت بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. چون روش پیشنهادی نسبت به تغییرات از قبل ایجادشده در ساختار مرجع مقاوم بوده و تغییرات را به طور مستقل از ساختار شخصیت مرجع به شخصیت هدف منتقل می‌کند. الگوریتم پیشنهادی به علت استفاده از الگوریتم تناظریابی اسکلت، مشکلات جابه‌جایی مفاصل و ردیابی نادرست مفاصل را در قاب‌های متواالی ناشی از الگوریتم (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) نداشته و به طور جداگانه می‌تواند در هر قاب، تغییرات مفاصل را در اسکلت مرجع بیان کند. تناظریابی اسکلت فقط

علت که این عملیات مابین هر یک از جفت‌گرهای هر گروه انجام می‌شود، زمان لازم برای محاسبه موقعیت زاویه‌ای گره‌ها با رابطه  $O(N^2)$  بدست 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 دوم	گام اول	تناظریابی اسکلت
%۸۵.۴	%۸۲.۷	%۸۴.۵	اسپ و بز
%۸۸.۸	%۸۲.۲	%۸۶.۸۹	اسپ و شتر
%۸۱	%۷۰.۱	%۷۹.۵	اسپ و گوزن
%۸۳	%۸۱.۸۵	%۸۲.۵	پلنگ سیاه و گربه
%۸۶.۵	%۸۲.۹	%۸۴.۸۸	پلنگ سیاه و شیر
%۸۵.۸۷	%۸۱.۵۴	%۸۳.۹۸	پلنگ سیاه و گرگ

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

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

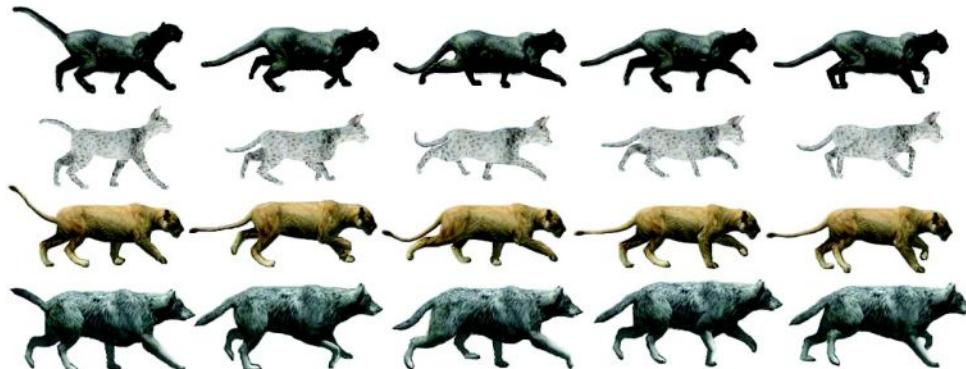
شکل (۱۸)، انتقال حرکات ناشی از اندام‌های پلنگ سیاه به سایر شخصیت‌ها مانند گربه، شیر و گرگ را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۹)، انتقال حرکات ناشی از اندام‌های اسب به سایر شخصیت‌ها مانند شتر، بز و گوزن را نشان می‌دهد. در ادامه، نتایج الگوریتم پیشنهادی در بخش انتقال تغییرات با نتایج الگوریتم‌های ارائه شده توسط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

فصل نهم

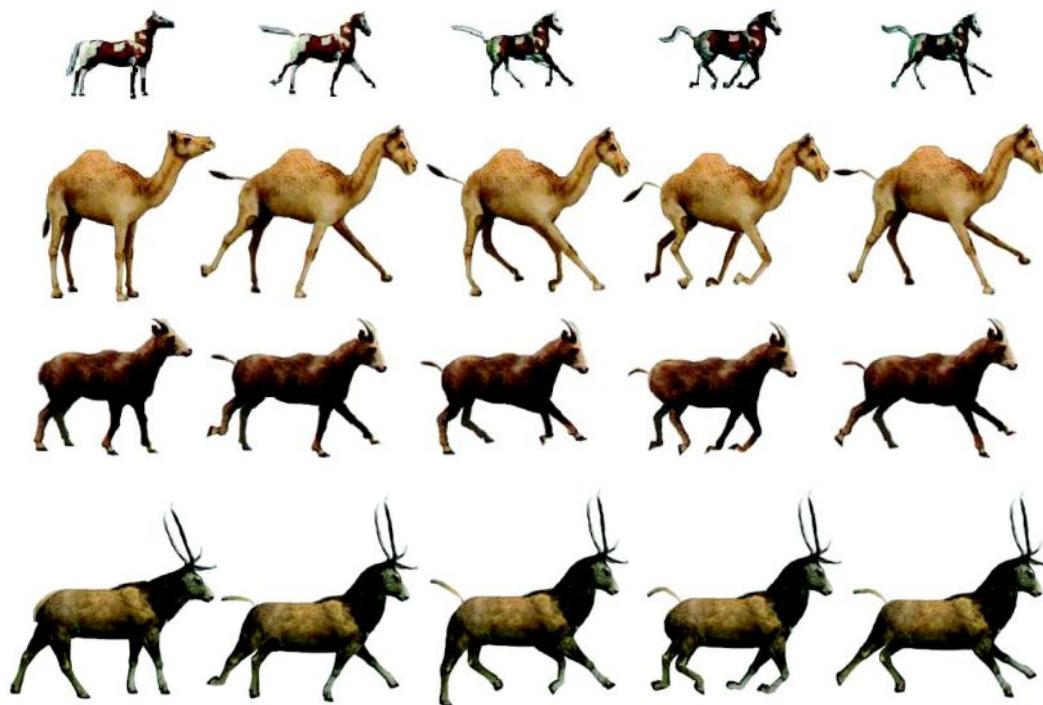


انجام می‌شود، در حالی که در روش (لی و همکارن، ۲۰۱۳) نیاز به تناظریابی بین تک‌تک مثلث‌های مشخصیت‌های متفاوت است. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی برای تناظریابی تا حدودی توانسته مشکلات الگوریتم‌های ارائه شده توسط (لی و همکارن، ۲۰۱۳) و (پن و ژانگ، ۲۰۱۱) را برطرف کند.

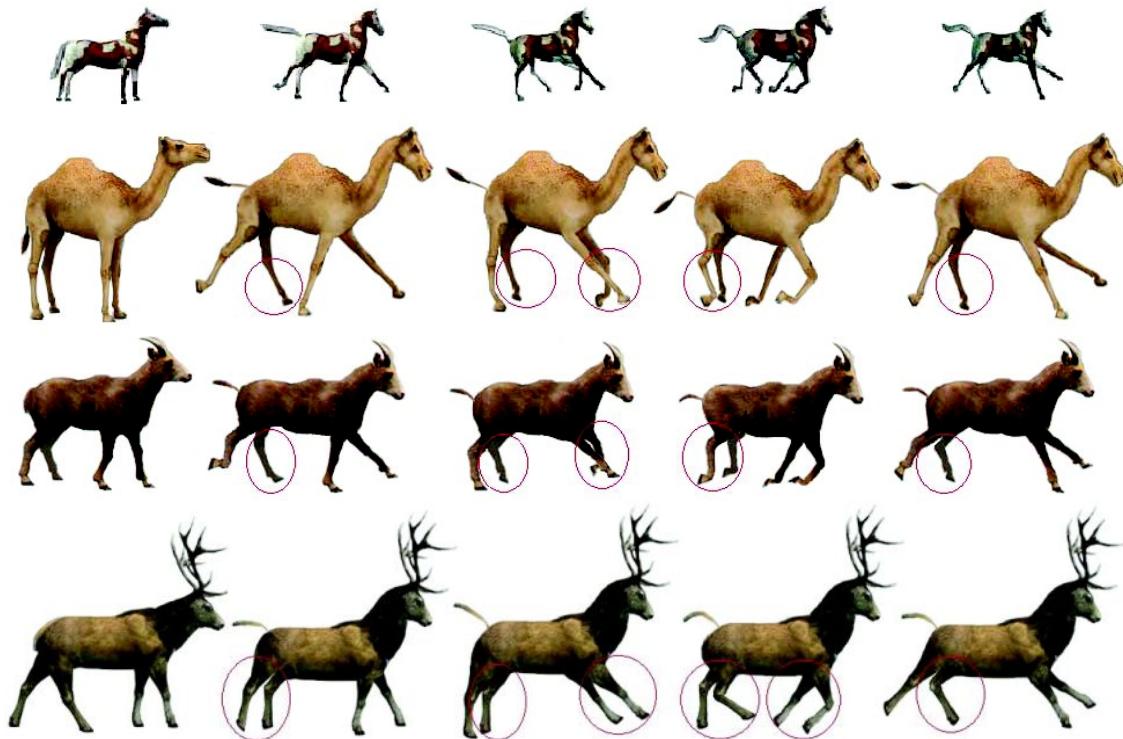
در مورد حالت پایه شکل مرجع و هدف انجام گرفته و در همه قاب‌ها عملیات تناظریابی انجام نمی‌شود. این تناظریابی نسبت به رنگ بافت مفاصل مقاوم بوده و مشکلات ردیابی را ندارد. استفاده از انتقال تغییرات توسط اندام‌های اسکلتی شخصیت‌ها باعث شد تا الگوریتم ارائه شده نسبت به تعداد مثلث‌های ایجادشده در مشبندي حساس 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 بیان گر حالت پایه تصاویر می‌باشند. بقیه تصاویر بیان گر تصاویر حالت تغییریافته شخصیت‌ها هستند که در اثر انتقال تغییرات از اندام‌های پلنگ سیاه به دست 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 بیان گر حالت پایه تصاویر هستند. بقیه تصاویر بیان گر تصاویر حالت تغییریافته شخصیت‌ها می‌باشند که در اثر انتقال تغییرات از اندام‌های اسب به دست می‌آیند.



(شکل-۲۰): انتقال تغییرات از حرکات ناشی از اندام‌های شتر، بز و گوزن توسط الگوریتم توسط (بن و ژانگ، ۲۰۱۱) و (الی و همکاران، ۲۰۱۳) نتایج حاصل از الگوریتم (بن و ژانگ، ۲۰۱۱) برای شخصیت‌های شتر و بز نشان داده است. به حرکات پاهای این دو شخصیت توجه نمایید که با حرکت پاهای اسب مشابه نیستند. نتیجه حاصل از الگوریتم (الی 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 به دست آوردن استخوان‌های مرجع و هدف، تمام حرکات و تغییرات اسکلت‌های شکل مرجع به اسکلت‌های متناظر در شکل هدف منتقل می‌شوند. با توجه به حرکت و جایه‌جایی هر یک از اندام‌های اسکلتی در شکل هدف، مثلث‌های وابسته هر استخوان نیز همان حركت و جایه‌جایی را تعقیب می‌کنند. نتایج به دست آمده، بیان گر توانایی الگوریتم در انتقال صحیح تغییرات به شخصیت‌های متفاوت هستند. الگوریتم ارائه شده، به صورت مستقل از نوع تغییرات در شخصیت مرجع، می‌تواند هر گونه تغییر شکلی را به شخصیت هدف منتقل کند. از محدودیت‌های این روش این است که، دو شخصیت به کار گرفته شده در این الگوریتم، ساختار آناتومی مشابهی دارند تا طبق الگوریتم تناظریابی، ارتباط دقیقی بین اندام‌های آن‌ها به دست آید. وقتی دو شکل، ساختار آناتومی مشابهی دارند انتقال حرکت بین آن‌ها باعث ایجاد حرکات طبیعی و واقعی

#### ۴- نتیجه‌گیری

انتقال تغییرات این امکان را به وجود 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 طراحی شده با دست یا پویانمایی شبیه‌سازی شده 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 ارائه شده، پس از به دست آوردن 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 به دست می‌آید. این الگوریتم بر اساس موقعیت زاویه‌ای استخوان‌های خارج شده از گره‌ها و مجموع طول استخوان‌های متصل شده به گره‌ها تناظریابی را انجام می‌دهد. به طوری که در هر یک از این مراحل نمره‌ای برای

فصل نهم

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 Popović 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 Popović 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 رایانمۀ ایشان عبارت است از:

L\_asgharian@sut.ac.ir



**حسین ابراهیم نژاد** مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را بهترتبی 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 هیئت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه صنعتی سهند است.

نشانی رایانمۀ 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.

