JIPET

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology
Vol. 15/ No. 59/ Autumn 2024
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/

20.1001.1.23223871.1403.15.59.3.6

Research Article

A 3D Shape Mapping Method Using Eigenspace Clustering Applied on Virtual Clothing

Hamed Fathi, *Ph.D. Student*, Alireza Ahmadyfard, *Associate Professor*, Hossein Khosravi, *Associate Professor*

Faculty of Electrical Engineering- Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
h.hfathi69@shahroodut.ac.ir, ahmadyfard@shahroodut.ac.ir, hosseinkhosravi@shahroodut.ac.ir

Abstract
Virtual clothing try-on can be a great option for the online clothing industry. In this paper, we propose a method to map the 3D model of selected clothes on the customer's 3D model. For this purpose, the point clouds of the customer and mannequin are captured by the Kinect camera. These models are segmented into corresponding parts using surface descriptors to ease the matching. Then, individual parts of the mannequin are mapped on the corresponding parts of the customer. Finally, the color information from the clothes on the mannequin is transformed to the customer's body point cloud. The proposed method has two main advantages over the existing methods. First, no need for an expert to design 3D models in graphic software. Second, any style and texture of clothes can be chosen by the customer. The results of the experiments show the ability of the proposed method compared to existing methods.

Keywords: 3D mapping, curvature descriptors, laplace-beltrami, virtual clothes

Received: 16 April 2022
Revised: 19 May 2022
Accepted: 17 July 2022

Corresponding Author: Dr. Alireza Ahmadyfard

Citation: H. Fathi, A. Ahmadyfard, H. Khosravi,, "A 3D shape mapping method using eigenspace clustering applied on virtual clothing", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 59, pp. 35-52, September 2024 (in Persian).

20.1001.1.23223871.1403.15.59.3.6

مقاله پژوهشی

پرو مجازی از طریق نگاشت سه‌بعدی همراه با بخش‌بندی مدل سه‌بعدی

حامد فتحی، دانشجوی دکتری، علیرضا احمدی‌فرد، دانشیار، حسین خسروی، دانشیار

دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
h.hfathi69@shahroodut.ac.ir, ahmadyfard@shahroodut.ac.ir, hosseinkhosravi@shahroodut.ac.ir

چکیده: پرو مجازی یک گزینه مناسب برای صنعت پوشاک آنلاین است. در این مقاله روشی برای ترسیم مدل سه‌بعدی لباس انتخابی بر روی مدل سه‌بعدی مشتری پیشنهاد می‌گردد. برای وصول به این هدف ابر نقاط مشتری و مانکن توسط دوربین کینکت ثبت می‌شود. برای سهولت تطابق، این مدل‌ها با استفاده از توصیف‌گرهای رویه، به بخش‌های متناظر تقسیم می‌شوند. سپس بخش‌های متناظر از مانکن به مشتری به‌طور جداگانه نگاشت داده می‌شود. درنهایت، اطلاعات رنگ از ابر نقاط لباس به روی ابر نقاط مشتری انتقال می‌یابد. روش پیشنهادی دو مزیت اصلی نسبت به روش‌های موجود دارد. اول اینکه برای طراحی مدل‌های سه‌بعدی در نرم‌افزارهای گرافیکی نیازی به متخصص نیست. دوم اینکه هر بافت لباسی می‌تواند توسط مشتری انتخاب شود. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده توانایی روش پیشنهادی این مقاله در مقایسه با روش‌های موجود است.

کلمات کلیدی: پرو مجازی، توصیف‌گر انحنا، لاپلاس بلترامی، نگاشت سه‌بعدی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱/۲۷
تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۲/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۴/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا احمدی‌فرد
نشانی نویسنده‌ی مسئول: شاهرود- دانشگاه صنعتی شاهرود- دانشکده مهندسی برق-گروه الکترونیک

۱- مقدمه

واقعیت مجازی محیطی است که توسط رایانه‌ها تولید شده و شبیه به دنیای واقعی به نظر می‌رسد. این فناوری، ما را قادر می‌سازد تا فضای مجازی را همچون فضای واقعی تجربه کنیم. برای مثال، با توجه به محدودیت‌های پوشیدن لباس‌های مختلف، واقعیت مجازی به مشتریان کمک می‌کند تا برای انتخاب لباس مورد علاقه خود به‌صورت مجازی چندین لباس را امتحان نمایند. این فناوری مشتریان را از محدودیت‌هایی چون راه رفتن در سالن خرید و انتظار برای رختکن خالی رها کرده و به خریداران و فروشندگان کمک می‌کند تا ضمن رعایت بهداشت، در وقت که عنصری مهم برای دنیای صنعتی و فرا صنعتی است، صرفه‌جویی نمایند. به‌تازگی واقعیت مجازی ابزارهایی به نام پرو مجازی را به دنیای مد معرفی کرده است. پرو مجازی مشکل‌های انتخاب لباس مورد علاقه را به یک لذت تبدیل کرده است. با استفاده از این فناوری، لباس‌های انتخاب شده بر روی بدن مشتری بدون نیاز به پوشیدن آن‌ها روی نمایشگر ظاهر می‌شود. این رختکن هوشمند دارای آینه مانیتور است و مشتری تصویر خود را که با لباس انتخابی پوشانده شده است، مشاهده می‌کند. در این بین گزینه‌های اضافی، روی مانیتور برای انتخاب اندازه، رنگ و انواع لباس‌ها وجود دارد. روش پیشنهادی مقاله حاضر الگوریتمی در حوزه پرو مجازی لباس‌های آستین‌بلند ارائه می‌کند.

در مرجع [۱] برای گرفتن عکس مشتری و پرو لباس مجازی با استفاده از دوربین دوبعدی یک روش الگوریتم دومرحله‌ای ارائه شده که مشتری یک تی‌شرت سبزرنگ با لوگوی قابل تشخیص می‌پوشد. ابتدا آرم روی تی‌شرت تقسیم‌بندی می‌شود و سپس یک لوگوی مجازی مورد علاقه، با لوگوی روی لباسی که شخص قبلاً پوشیده است جایگزین می‌شود. این روش رویه[۱] تی‌شرت را استخراج کرده و با کمک یک رویه مشخص، روی لوگوی واقعی (پارچه مشتری)، لوگوی مورد علاقه را با تغییر شکل به سطح تی‌شرت منتقل می‌کند. برای یافتن رئوس مش، از مرجع‌های [۲] و [۳] استفاده شده است. روشی برای تشخیص مساحت و اندازه لباس افراد با استفاده از دو دوربین در بالای سر و جلوی بدن در مرجع [۴] معرفی شده است. پس از آن، یک مدل لباس تقریباً مانند لباس‌های پوشیده شده، روی بدن قرار می‌گیرد. محدودیت این روش در انتخاب نوع لباس است زیرا فرد تنها می‌تواند لباسی را انتخاب کند که شبیه لباس خودش باشد. این الگوریتم از سه بخش تشکیل شده است: شناخت بدن مشتری، تشخیص جهت مشتری و نگاشت لباس انتخابی بر روی تصویر مشتری. همچنین برای تهیه پایگاه داده، از هشت مرد و زن استفاده کرده‌اند. فرض‌هایی نیز جهت تشخیص ناحیه مشتری در تصویر در نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال، مشتری باید در مقابل یک پرده سبز و یک سطح سفید در زیر آن، بایستد. این الگوریتم جهت فرد را برای درست ظاهر شدن در آینه مجازی در نظر می‌گیرد.

امروزه با پیشرفت روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عمیق[۲] برای بخش‌بندی معنادار تصویر، محققین به استفاده از این روش‌ها روی آورده‌اند. در این رویکرد به‌طورکلی ناحیه لباس مشتری تخمین زده شده و سپس تصویر لباس انتخابی متناسب با تصویر لباس مشتری تغییر شکل داده و به روی تصویر مشتری منتقل می‌شود و درنهایت اصلاحاتی برای بهبود خروجی پرو مجازی صورت می‌گیرد [۱۰-۵]. با اینکه تمامی مقاله‌های این حوزه (دوبعدی) تا حدودی توانسته‌اند خروجی مناسب داشته باشند اما دارای محدودیت‌هایی هستند مانند اینکه فرد پرو کننده به‌طور همزمان نمی‌تواند همه لباس‌ها را بررسی کند. به عبارت دیگر باید به ترتیب پرو مجازی را با لباس‌های مختلف آزمایش کند. از طرف دیگر مقاله‌های این حوزه در پرو لباس طرح‌دار، با بافت غیر ساده و طرح‌دار موفق نبوده و دارای خطای زیاد هستند. مرجع [۱۱] گرچه ایجاد تصاویر رزولوشن بالا را هدف قرار داده است اما این الگوریتم نیز در انتقال الگوها و بافت لباس ضعیف عمل می‌کند. مزیت پرو مجازی سه‌بعدی نسبت به دوبعدی این است که مشتری می‌تواند در نمایشگر تصویر سه‌بعدی خود را مشاهده کرده و همزمان همه جهت‌های مدل سه‌بعدی را برای بررسی لباس مشاهده کند. به این منظور محققان به روش‌هایی که قادر باشند درنهایت مدل سه‌بعدی مشتری به همراه لباس انتخابی را فراهم کنند روی آورده‌اند.

از طرف دیگر مدل‌سازی دنیای سه‌بعدی، با گرفتن ابر نقاط صحنه با استفاده از دوربین کینکت[۳] که توسط شرکت مایکروسافت ارائه شده، تسهیل گردیده است. بر این اساس، برای تصویربرداری سه‌بعدی مؤثر، این دوربین در بینایی ماشین و به‌طور خاص واقعیت مجازی کاربرد دارد. در مرجع [۱۲] روشی برای لباس مجازی پیشنهاد شده که در آن فهرستی در آینه مجازی نمایش داده می‌شود تا کاربر بتواند لباس مورد علاقه خود را از لیست لباس انتخاب کند. پس از آن، تکه لباس انتخاب شده بر روی مدل سه‌بعدی مشتری ظاهر می‌شود و این روش به گونه‌ای عمل می‌کند که مصرف‌کنندگان می‌توانند اندازه‌های مختلف را انتخاب

نمایند. برای ایجاد مدل سه‌بعدی انسان از نرم‌افزار گرافیکی استفاده می‌شود که سازنده انسان[۴] نام دارد و می‌تواند با استفاده از اندازه‌ها و رنگ‌های مختلف پوست، مدلی ایجاد کند. برای به‌دست آوردن اندازه و گرفتن تصویر رنگی از مشتری و ابر نقاط آن، از دوربین کینکت استفاده می‌شود، جهت انتقال لباس به روی مدل مشتری نیز نرم‌افزار گرافیکی یونیتی[۵] به‌کار برده شده و سپس مدل بدن مشتری با لباس انتخاب شده در نرم‌افزار گرافیکی بر روی مانیتور نمایش داده می‌شود. لذا مشتری می‌تواند مدل ایجاد شده را با لباس انتخابی مشاهده کند. تعامل دوربین کینکت با نرم‌افزار گرافیکی (مانند یونیتی) این الگوریتم را قادر می‌سازد تا حرکت فرد را برای مدل سه‌بعدی دنبال کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این روش برای مدل‌سازی لباس در یونیتی به یک گرافیست ماهر نیاز دارد. بنابراین، این روش برای کاربران غیر ماهر مناسب نیست.

سه انتخاب مختلف برای لباس مجازی در مرجع [۱۳] پیشنهاد شده است. لباس مجازی روی مدل سه‌بعدی آواتار[۶]، لباس مجازی روی عکس مشتری و لباس مجازی بر روی مدل سه‌بعدی آواتار با تصویر چهره مشتری. لباس مجازی در انتخاب اول، روی مدل سه‌بعدی مشتری اعمال می‌شود. سپس، آینه مجازی به مشتری نشان می‌دهد که لباس مورد علاقه خود را پوشیده است. در انتخاب دوم، لباس بر روی تصویر دوبعدی مشتری ترسیم می‌گردد. هر دو گزینه اول و دوم از نگاشت سه‌بعدی به دوبعدی استفاده می‌کنند. انتخاب اول و سوم تقریباً یکسان است، به‌جز چهره مشتری که به‌جای چهره مدل (آواتار) روی مانیتور ظاهر می‌شود. همچنین از روش مرجع [۱۴] برای ایجاد لباس مجازی استفاده شده است. در این روش از مجموعه داده سه‌بعدی کیسر[۷] به‌جای استفاده از مدل سه‌بعدی مشتری استفاده شده است. کیسر شامل ابرهای نقاط زنان و مردان در اندازه‌های مختلف چاق، لاغر، بلند و کوتاه‌قامت است. در مرحله بعد، ۲۰ ویژگی از مدل سه‌بعدی مشتری اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس این ویژگی‌ها مدل انتخاب شده اصلاح می‌گردد. قد مشتری، عرض شانه، سینه، کمر، ران، مچ پا، زانو، فک، طول و دور بازو از ویژگی‌های به کار رفته است. یک آواتار مشابه، به‌طور خودکار برای هر مشتری، از پایگاه داده انتخاب می‌شود. برای مطابقت بهتر و مناسب با اندازه مشتری، مدل اصلاح می‌گردد. برای تغییر رنگ پوست مدل، همانند رنگ پوست مشتری، ناحیه صورت با استفاده از مدل شکل فعال[۸] تشخیص داده می‌شود [۱۵]. در مرحله بعد، روش پیشنهاد شده در مرجع [۱۶] برای تنظیم رنگ پوست آواتار روی پوست مشتری به‌کار می‌رود. روش‌های سه‌بعدی که تاکنون بررسی شده از نرم‌افزارهای گرافیکی مانند یونیتی برای انتقال مدل لباس به روی آواتار مشتری استفاده می‌کنند و برای تولید مدل سه‌بعدی لباس روی آواتار به یک طراح گرافیک خبره نیاز است. ضعف اصلی روش‌های بررسی شده تاکنون نیاز به یک طراح گرافیک برای مدل‌سازی لباس است. بنابراین، ساخت یک مدل سه‌بعدی برای لباس مجازی یک کار چالش برانگیز است. به‌طور خلاصه در روش مرجع [۱۳]، یک مدل سه‌بعدی آواتار، با استفاده از تصویر صورت و مدل موی مشتری، ساخته می‌شود. در مرجع [۱۷]، اندازه مشتری از ابر نقاط گرفته شده توسط دوربین کینکت تخمین زده می‌شود. پارامترهای تخمین زده شده عبارتند از: دور سینه، کمر، لگن، ران و زانو. موتور بازی یونیتی می‌تواند لباس‌های سه‌بعدی را به‌صورت مجازی روی تصویر فرد قرار دهد. در مرجع [۱۸] سعی می‌شود حرکت‌های بدن مشتری درحالی‌که لباس را به‌صورت مجازی در خانه می‌پوشد دنبال کند. در مرجع [۱۹] روشی برای ساخت مدل سه‌بعدی لباس با استفاده از تصاویر دوبعدی پیشنهاد شد که در پرو مجازی مورد استفاده قرار گرفته است. روشی برای ایجاد مدل سه‌بعدی لباس با استفاده از اسکنرهای با وضوح بالا (۶۰ فریم در ثانیه) در مرجع [۲۰] ارائه شده است. در مرجع [۲۱] بر اساس یک شبکه یادگیری چند وظیفه‌ای، که به‌طور مشترک هم نقاط کلیدی را پیش‌بینی و هم تصویر لباس را به بخش‌های معنادار بخش‌بندی می‌کند، رویکرد جدیدی برای ایجاد یک مدل سه‌بعدی از مجموعه تصاویر لباس معرفی شده است. این روش در مقایسه با کارهای قبلی تنها به تصاویر دوبعدی لباس از جلو و پشت نیاز دارد که طراح باید در ساخت مدل مشارکت داشته باشد. تمام روش‌هایی که بدون نیاز به طراح گرافیک سعی در ساخت مدل سه‌بعدی لباس دارند، یا حالت پویانمایی داشته [۱۹،۲۰] یا حالت غیرطبیعی [۲۱]. لذا خروجی‌های این روش‌ها با مدل‌های واقعی فاصله زیادی دارد. این امر استفاده از واقعیت مجازی را برای تجارت لباس محدود می‌کند. یک الگوریتم پرو مجازی در مرجع [۲۲] پیشنهاد شده که در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا یک مدل سه‌بعدی از بدن مشتری با استفاده از یک‌طرف و تصویر جلویی مشتری بازسازی می‌شود. در این روش از نگاشت دوبعدی به سه‌بعدی جهت ساخت مدل سه‌بعدی برای بدن مشتری استفاده می‌شود. در مرحله بعد، تصویر لباس انتخابی بر روی مدل سه‌بعدی مشتری ترسیم می‌گردد. این مدل سه‌بعدی ساخته شده از کیفیت مورد انتظار دور است [۲۲]. در مرجع [۲۳] برای فراهم کردن مدل

سه‌بعدی مشتری، به تخمین مدل سه‌بعدی از روی تصویر دوبعدی مشابه مرجع [۲۴] روی آورده‌اند. الگوریتم پیشنهادی مرجع [۲۳] همزمان با تخمین مدل سه‌بعدی، پرو مجازی دوبعدی را اجرا می‌کند و درنهایت خروجی پرو مجازی دوبعدی با مدل سه‌بعدی تخمین زده شده، ترکیب می‌شود. الگوریتم ارائه شده در مرجع [۲۵] نیز روش را برای نگاشت تصویر لباس به روی مدل سه‌بعدی از انسان مجازی پیشنهاد می‌کند که می‌تواند در پرو مجازی سه‌بعدی مورد استفاده قرار بگیرد.

مقاله‌هایی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته‌اند به دو دسته دوبعدی و سه‌بعدی تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌های دوبعدی دارای نتایج دوبعدی هستند که در لباس تغییر شکل داده خطا وجود دارد و تمام جهات مشتری به‌طور همزمان قابل مشاهده نیست. الگوریتم‌های دوبعدی که تاکنون انجام گرفته‌اند از مدل‌های آماده به همراه نرم‌افزارهای گرافیکی برای ساخت لباس مجازی، استفاده کرده‌اند و یا مدل سه‌بعدی را تخمین می‌زنند. در حالت اول خروجی واقع‌گرایانه نبوده و در حالت دوم تخمین مدل سه‌بعدی همراه با خطا است. از طرف دیگر مدل سه‌بعدی تخمین زده شده در مقایسه با مدل سه‌بعدی که توسط اسکنرهای سه‌بعدی مانند دوربین کینکت به‌دست می‌آید، خطای بسیار بیشتری دارد. به همین دلیل در مرجع [۲۶] الگوریتمی پیشنهاد شده که در آن مدل سه‌بعدی مشتری و لباس توسط دوربین کینکت به‌دست می‌آید. آن‌ها هر دو مدل را به قسمت‌های متناظر تقسیم می‌کنند. ناحیه شکم مانکن را به اندازه همتای خود در مدل سه‌بعدی مشتری تغییر اندازه داده و ناحیه سر مانکن به ناحیه سر مشتری منتقل شده است. خروجی این روش به‌طور کامل حالت واقعی را به مشتری القا نمی‌کند زیرا وضعیت بدن مانکن با مشتری متفاوت است. نتیجه این الگوریتم نیز با حالت واقعی پرو کردن هنوز فاصله دارد. با توجه به محدودیت‌های مطالعه‌های قبلی، در این مقاله استفاده از نگاشت سه‌بعدی به سه‌بعدی برای پرو مجازی پیشنهاد شده است. در رویکرد پیشنهادی، ابر نقاط سه‌بعدی لباس به نقاط متناظر روی مدل مشتری نگاشت می‌شود. بنابراین روش پیشنهادی برای ساخت مدل‌های سه‌بعدی لباس، نیازی به نرم‌افزارهای گرافیکی مانند یونیتی ندارد. در این روش مشتری همزمان می‌تواند چندین لباس را پرو کرده و همچنین همزمان مدل سه‌بعدی پرو شده خود را در همه جهت‌ها مشاهده نماید. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. پس از بیان مسئله در این قسمت، در قسمت دوم تئوری مسئله شامل نگاشت سه‌بعدی و لاپلاس بلترامی[۹] ارائه شده است. در قسمت سوم نحوه تهیه داده سه‌بعدی توضیح داده شده و روش پیشنهادی با استفاده از ابزارهای قسمت دوم، تبیین گردیده است. در این قسمت نتایج روش پیشنهادی و نیز مقایسه‌ای با مرجع [۱۱] آوره شده است. در قسمت چهارم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- تئوری مسئله

در این قسمت نگاشت سه بعدی بین دو ابر نقاط و لاپلاس بلترامی اشاره می‌گردد.

۲-۱- نگاشت سه‌بعدی

نگا شت سه‌بعدی بین دو ابر نقاط را می‌توان به‌عنوان یک تبدیل صلب[۱۰] یا غیر صلب[۱۱] در نظر گرفت. در نگا شت صلب، فرض می‌شود که نقاط سه‌بعدی متناظر از دو ابر در معرض چرخش، انتقال و تغییر مقیاس در فضای سه‌بعدی هستند. به‌عنوان مثال، در مرجع [۲۷] از الگوریتم نزدیک‌ترین نقاط تکراری[۱۲] [۲۸] برای تخمین ماتریس چرخش و بردار انتقال برای تطبیق صلب دو ابر نقاط ا ستفاده کردند. ازآنجایی‌که مدل سه‌بعدی م شتری و مدل سه‌بعدی لباس در حوزه تحول غیر صلب قرار می‌گیرند، نگاشت صلب برای نگاشت بین لباس مانکن و بدن مشتری مناسب نیست. در نگاشت غیرصلب، نگاشت بین یک شی و نسخه تغییر شکل یافته آن، هدف یافتن یک نقطه متناظر از ابر نقاط M برای هر نقطه از ابر نقاط N است [رابطه (۱)]. در این سناریو، برای برخی از نقاط هیچ تناظری یافت نمی‌شود.

$$T: M \rightarrow N \qquad (۱)$$

در مرجع [۲۹] روشی به نام نگاشت تابعی[۱۳] [۳۰] را برای نگاشت غیرصلب دو ابر نقاط پیشنهاد شده است. در این نگاشت، از یک جفت تابع f و g برای نگاشت هر نقطه سه‌بعدی به ترتیب به فضای اسکالر، استفاده می‌گردد. فرآیند نگاشت به‌صورت رابطه (۲) نشان داده می‌شود.

$$g : N \rightarrow R, f : M \rightarrow R \quad (۲)$$

سپس، نگاشت بین توابع اسکالر f و g به‌وسیله T_f تعریف می‌شود:

$$T_F : f \rightarrow g \quad (۳)$$

همچنین می‌توان داشت:

$$g = f o T_F^{-1} \quad (۴)$$

با فرض مجموعه‌ای از بردارهای پایه برای نمایش تابع، می‌توان هر تابع را به‌صورت ترکیبی خطی از بردارهای پایه φ_i^M به‌صورت زیر نشان داد:

$$f = \sum_i a_i \varphi_i^M \quad (۵)$$

که در آن α_i ضریب تأثیر بردار پایه در ساخت تابع f را مشخص می‌کند. به‌طور مشابه، تابع g را می‌توان به‌عنوان ترکیب خطی از بردارهای پایه φ_j^N برای N نشان داد:

$$g = \sum_j b_j \varphi_j^N \quad (۶)$$

بنابراین می‌توان معادله‌های (۳) و (۴) را به‌صورت زیر بازنویسی کرد.

$$T_F(f) = T_F(\sum_i a_i \varphi_i^M) = \sum_i a_i T_F(\varphi_i^M) \quad (۷)$$

$$g = T_F(f) = \sum_i a_i T_F(\varphi_i^M) = \sum_i a_i \sum_j C_{ij} \varphi_j^N = \sum_i \sum_j a_i C_{ij} \varphi_j^N \quad (۸)$$

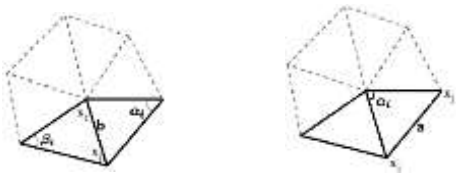
که در آن C_{ij} عنصر ستون iام و سطر jام ماتریس C و مستقل از تابع f است. در حقیقت c_{ij} ضریب تأثیر jام T_f در مبنا φ_j^N است [۳۰]. ماتریس نگاشت C با ابعاد k×k است (که k تعداد توابع پایه است). مقادیر عنصر ماتریس بین صفر و یک است که با کمینه‌کردن تابع هزینه [رابطه (۸)] به‌دست می‌آید [۲۱].

$$C_{opt} = \operatorname{argmin} \|CF - G\|_C^2 + a \|\Delta_2 C - C \Delta_1\|^2 \quad (۹)$$

با داشتن n جفت نقطه متناظر از دو ابر، ماتریس‌های F و G با ابعاد k×n ایجاد می شوند [۲۹]. این نقاط به‌عنوان نقاط مرجع برای تطبیق دو ابر نقاط استفاده می‌گردد. ستون lام F و G به‌ترتیب ضریب‌های پایه برای lامین نقطه از ابر نقاط هستند. ماتریس‌های مورب، Δ_1 و Δ_2 دارای عنصرهای قطری برابر با مقادیر ویژه لاپلاس بلترامی برای دو ابر نقاط هستند [۲۹]. در مرجع [۲۹]، بردارهای ویژه لاپلاس بلترامی به‌عنوان توابع پایه برای هر ابر نقاط استفاده شده است. ماتریس نگاشت نهایی را می‌توان با کمینه کردن معادله (۸) به‌دست آورد. برای یافتن نقطه مربوطه، از ابر نقاط دوم (N)، برای هر نقطه P در ابر اول (M)، ماتریس نگاشت C در بردارهای ویژه φ_{pi}^M ضرب می شود که نتیجه یک بردار k بعدی است. سپس در ماتریس بردارهای ویژه ابر نقاط N، φ^N با ابعاد N×k، نزدیک‌ترین بردار سطری پیدا می‌شود. اندیس این سطر، نقطه متناظر نقطه p است. الگوریتم پیشنهاد شده در مرجع [۲۹] با مشکلاتی روبرو است، ازجمله این‌که، داشتن چندین نقطه متناظر به‌عنوان مرجع تطبیق لازم است. الگوریتم پیشنهاد شده نویسندگان مرجع [۳۱] با تقسیم‌بندی رویه به رویه‌های متناظر و عدم نیاز به نقاط مرجع اولیه، نگاشت سه‌بعدی را معرفی کرده‌اند. در این راستا ابتدا نواحی متناظر دو ابر نقاط با الگوریتم معرفی شده در مرجع [۳۲] پیدا می‌شوند و سپس نگاشت نقاط هر ناحیه از نواحی متناظر توسط الگوریتم مرجع [۳۱] به‌دست می‌آید.

۲-۲- لاپلاس بلترامی

چندین معیار می‌تواند انحنای نقاط روی یک سطح را در فضای سه‌بعدی توصیف کند: انحنای اصلی[۱۴]، انحنای گاوسی[۱۵] و انحنای متوسط[۱۶] [۳۳]. عملگر نرمال انحنای متوسط [۳۴] به‌عنوان عملگر لاپلاس بلترامی تعیین می‌گردد. برای مدل‌سازی هندسی رویه، ماتریس لاپلاس بلترامی به‌وسیله روش کانولوشنال برای توصیف‌گر انحنا متوسط [۳۴] ساخته می‌شود. دو نوع لبه در یک رویه هستند: یال‌هایی در مرز رویه و یال‌های مشترک بین دو مثلث همسایه [شکل (۱)].



(ب) یال مشترک (الف) یال مرزی

شکل (۱): دو نوع لبه در یک رویه

Figure (1): Two types of the edges, (a) Border edge (Type A), (b) Joint edge

L یک ماتریس لاپلاس بلترامی مربعی با ابعاد n×n (n تعداد کل رئوس رویه) است. رابطه بین هر رأس با رئوس دیگر را مشخص می‌کند. رابطه بر اساس زاویه(های) یال، وزن دهی می‌شود. L_{ij} از طریق رابطه (۱۰) مشخص شده است.

$$L_{ij} = \begin{cases} -w_{ik} & i \neq j \\ \sum_k w_{ik} & i = j \end{cases} \qquad (۱۰)$$

w_{ik} وزن کتانژانت یال[۱۷] استاندارد بین دو رأس همسایه i و k است که با یک یال به هم متصل شده‌اند. از آنجایی‌که تعداد رئوس مجاور لبه iام کم است، لاپلاس بلترامی از نوع ماتریس پراکندگی است. $[v_i, v_j]$ نشان‌دهنده یال بین دو رأس همسایه iام و jام از نوع اول است [شکل (۱)]. وزن این دو رأس را می‌توان از طریق رابطه (۱۱) به‌دست آورد.

$$w_{ij} = \frac{1}{2}\cot(a_i) \qquad (۱۱)$$

α_i زاویه مقابل یال $[v_i, v_j]$ است که در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. رابطه (۱۲) برای نوع دوم یال‌ها [شکل (۱-ب)] مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$w_{ij} = \frac{1}{2}\cot(\alpha_i + \beta_i) \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲) نیز، α_i و β_i دو زاویه مقابل یال نوع دوم هستند که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل (۱) می‌توان فهمید، با افزایش α_i و β_i انحنای رویه در نقطه موردنظر افزایش می‌یابد. بازه دو زاویه α_i و β_i بین صفر و ۹۰ درجه است. بنابراین با افزایش انحنا در هر نقطه، وزن‌های زوایای متناظر کاهش می‌یابد و بالعکس. انحنا با توزیع وزن همسایه که برای هر نقطه در ماتریس لاپلاس محاسبه می‌شود، تعریف می‌شود.

۳- روش پیشنهادی: پرو مجازی با استفاده از نگاشت سه‌بعدی به سه‌بعدی

روش‌های قبلی پرو مجازی لباس، یا همیشه نیاز به یک متخصص برای طراحی هر تکه لباس در نرم‌افزار گرافیکی دارند و یا امکان دسترسی همزمان به همه جهات فرد را ندارند. از طرفی مدل‌سازی لباس‌ها با سبک‌ها و بافت‌های مختلف از زوایای متفاوت نیز دشوار است. این چالش‌ها، استفاده از روش‌های قبلی را برای تجارت پوشاک محدود می‌کند. در این مطالعه، روشی برای نگاشت ابر نقاط سه‌بعدی لباس انتخابی بر روی ابر نقاط سه‌بعدی بدن مشتری پیشنهاد می‌گردد. این تکنیک، پرو مجازی را بدون نیاز به مدل‌سازی لباس و مشتریان به‌وسیله نرم‌افزار گرافیکی، انجام می‌دهد و این امکان فراهم می‌شود که بتوان به شکل سه‌بعدی همه جهات فرد را مشاهده کرد.

در روش پیشنهادی، هم ابر نقاط سه‌بعدی و هم‌رنگ نقاط لباس انتخاب شده روی مانکن با استفاده از دوربین کینکت به‌دست می‌آید. از مشتری خواسته می‌شود که روی صفحه چرخشی مقابل دوربین کینکت بایستد. نقاط سه‌بعدی روی سطح بدن او گرفته می‌شود. علاوه بر این، رنگ نقاط ابر مشتری توسط کینکت به دست می‌آید. ابر نقاط استخراج شده آلوده به نقاط پرت و نویز است که باعث ایجاد خطا می‌گردد و در مراحل بعدی پردازش می‌شود. بنابراین، این افزونگی‌ها در مرحله پیش‌پردازش حذف می‌شوند. خروجی این مرحله دو ابر نقاط پاک‌شده از بدن مشتری و لباس انتخابی روی مانکن است. نگاشت سه‌بعدی بین ابرنقاط لباس و بدن مشتری با استفاده از نگاشت سه‌بعدی صلب و غیرصلب انجام می‌شود. سپس رنگ نقاط روی لباس به نقاط مربوطه

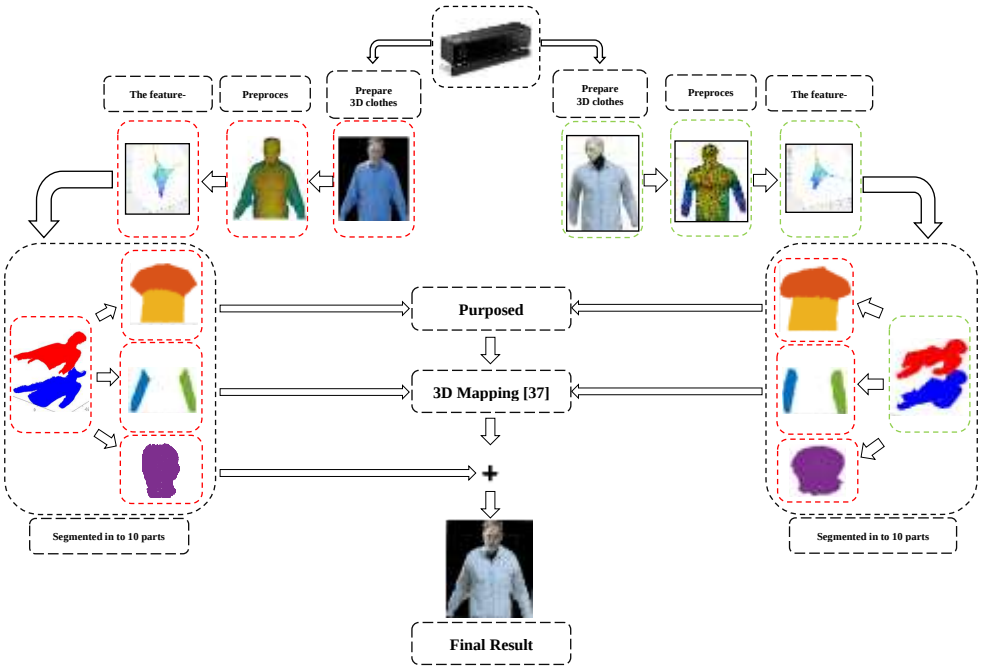
روی بدن مشتری اختصاص می‌یابد. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق فلوچارت ارائه شده در شکل (۲) مدل سه‌بعدی لباس و مشتری به‌طور جداگانه به مختصات جدید ویژگی منتقل می‌شوند. در ادامه هر مدل سه‌بعدی به ۱۰ بخش متناظر تقسیم می‌شود. سپس ناحیه سر و گردن از دو مدل سه‌بعدی لباس و مشتری حذف شده و نگاشت سه‌بعدی نقاط بین ۸ بخش باقیمانده مدل سه‌بعدی لباس و بخش‌های متناظر آن‌ها در مدل مشتری به‌دست می‌آید. در نهایت با استفاده از نگاشت سه‌بعدی، رنگ لباس به روی نقاط مشتری منتقل می‌گردد. در این الگوریتم نیازی به برابر بودن تعداد نقاط مدل سه‌بعدی لباس و مشتری نیست. اگر تعداد نقاط مدل سه‌بعدی لباس از مشتری بیشتر باشد، بدین معنی است که می‌توان برای همه نقاط مشتری تناظری روی مدل سه‌بعدی لباس پیدا کرد. همچنین اگر نقاط مدل سه‌بعدی مشتری بیشتر از لباس باشد، برای تعدادی از نقاط روی مشتری تناظری یافت نمی‌شود. در نتیجه برای هر کدام از این نقاط در الگوریتم نگاشت سه‌بعدی، رنگ نزدیک‌ترین نقطه‌ای که روی مدل سه‌بعدی مشتری بوده و نقطه متناظری روی مدل سه‌بعدی لباس برای آن یافت شده است، تخصیص می‌یابد.

۳-۱- تهیه ابرنقاط

در مرحله اول، ابر نقاط سه‌بعدی لباس و مشتریان با استفاده از دوربین کینکت ثبت می‌شود. برای این منظور یک صفحه گردان برای چرخاندن مانکن پوشیده از لباس انتخابی طراحی گردید. در جلوی صفحه در حال چرخش، کینکت روی سه‌پایه قرار داده شد. سرعت صفحه چرخان طوری تنظیم شده است که دوربین بتواند هم رنگ نقاط و هم ابر نقاط سه‌بعدی لباس را با دقت استخراج کند. به همین ترتیب، هنگامی‌که مشتری برای خرید به فروشگاه می‌رود، از او خواسته می‌شود که روی یک صفحه چرخان بایستد. ابر نقطه سه‌بعدی مشتری و رنگ آن با استفاده از دوربین کینکت ثبت می‌شود [(شکل (۳)]. داده‌های سه‌بعدی گرفته شده از مدل و مشتری باید از قبل پردازش شوند تا نقاط پرت و نویز از هر دو ابر نقطه حذف شود.

۳-۱-۱- پیش‌پردازش

ابر نقاط گرفته شده، آلوده به نقاط پرت است. بنابراین، در مرحله اول ابر نقاط را پاک‌سازی می‌کنیم. از طرفی برای برخی از نقاط روی سطوح گرفته شده بیش از یک داده ثبت شده است. این باعث ایجاد مشکل در هنگام ساخت رویه می‌شود. در مرحله پیش‌پردازش، داده‌های تکرار شده از ابرنقاط حذف می‌گردد.



شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی

Figure. (2): Diagram of the proposed method

(الف) مدل سه بعدی لباس (ب) مدل سه بعدی مشتری اول (ج) مدل سه بعدی مشتری دوم

شکل (۳): مدل سه بعدی لباس و دو مشتری

Figure (3): 3D model of clothes and two customers, a) 3D clothes model, b) first customer model, c) secend customer model

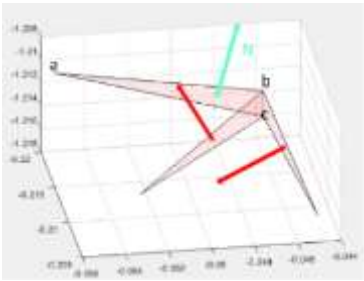
۱-۱-۳- پیش‌پردازش

ابر نقاط گرفته شده، آلوده به نقاط پرت است. بنابراین، در مرحله اول ابر نقاط را پاک‌سازی می‌کنیم. از طرفی برای برخی از نقاط روی سطوح گرفته شده بیش از یک داده ثبت شده است. این باعث ایجاد مشکل در هنگام ساخت رویه می‌شود. در مرحله پیش‌پردازش، داده‌های تکرار شده از ابرنقاط حذف می‌گردد.

در مرحله سوم، یک رویه برای هر ابرنقاط با کمک کتابخانه ابر نقاط[۱۸] ساخته می‌شود. ما یک کد با استفاده از تابع mex در متلب[۱۹] ایجاد کردیم تا کتابخانه ابر نقاط را برای ساخت رویه در متلب فراخوانی کنیم. رویه ساخته شده دارای قطعات اضافی است که باعث ایجاد خطا در پردازش بعدی می‌شود. بنابراین، رویه ساخته شده اولیه نیاز به اصلاح دارد. اول برای حذف نقاطی که روی سطح رویه ابر نقاط قرار ندارند، دوم برای حذف مثلث‌های اضافی و سوم برای حذف رویه‌های فرعی اضافی.

نقاطی که روی سطح اصلی قرار ندارند باید از ابر نقاط حذف شوند. یعنی این نقاط در رویه به‌دست آمده از مدل سه‌بعدی نقشی ندارند و با حذف آن‌ها از ابر نقاط، این نقاط پرت حذف می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، یالی سه مثلث را به هم متصل می‌کند. برخی از نقاط زائد باعث ایجاد این نوع یال در رویه ساخته شده می‌شوند که بیش از دو مثلث را به هم می‌پیوندد. بنابراین، در قسمت دوم، نقاط زائد که مثلث‌های زائد را ایجاد می‌کنند باید از رویه حذف شوند. در یک رویه کاملاً مشخص، هر یال فقط دو مثلث را در رویه به هم وصل می‌کند. اما همان‌طور که در بالا ذکر شد لبه‌هایی وجود دارد که بیش از دو مثلث را به هم متصل می‌کند [شکل (۴)].

بنابراین، پس از تشخیص، مثلث‌های اضافی از رویه حذف می‌شوند. قابل توجه است که برای مشخص کردن مثلث‌های زائد، زاویه بین بردارهای نرمال متناظر با مثلث‌های متصل شده با یک یال در نظر گرفته می‌شود. ما دو مثلث را با حداقل زاویه بین بردارهای نرمال آن‌ها حفظ می‌کنیم. بردار نرمال هر مثلث با حاصل‌ضرب بیرونی دو یال یعنی یال مشترک و یک یال دیگر محاسبه می‌شود. این نکته لازم به ذکر است که در مورد حذف مثلث‌های زائد از سطح رویه، رئوس رویه و ابر نقاط هر دو اصلاح می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، سومین رأس از مثلث اضافه که در یال مشترک نیست باید از لیست ابر نقاط حذف شود (دو رأس از یال مشترک در ماتریس روئوس باقی بماند) و مثلث اضافه نیز از ماتریس رویه حذف گردد. یکی دیگر از مسائلی که باید در نظر گرفته شود این است که رویه متشکل از تعدادی شبکه فرعی غیر متصل است [شکل (۵ -الف)]. در این راستا، زیر رویه‌های ابر نقاط شناسایی شده و تنها زیر رویه با حداکثر تعداد مثلث به‌عنوان بدنه اصلی حفظ می‌شود [شکل (۵ -ب)].



شکل (۴): سه مثلث از رویه که یک یال مشترک دارند

Figure (4): Three triangles that have one common edge with

(الف) رویه ابر نقاط اولیه (ب) رویه اصلاح شده

شکل (۵): رویه ابر نقاط اولیه و اصلاح شده

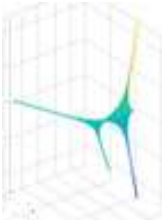
Figure (5): Initial and modified point cloud mesh, a) Initial point cloud mesh, b) modified point cloud mesh

۲-۳- تقسیم‌بندی مدل سه‌بعدی

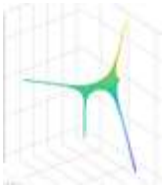
در این بخش، روشی برای تقسیم هر ابر نقاط به بخش‌های معنی‌دار ارائه می‌شود که هر قسمت بخشی از بدن یا لباس مشتری بوده و هدف مطالعه حاضر ارائه نگاشتی بین بخش‌های متناظر بدن و لباس مشتری است. در مرجع [۳۲]، روشی برای یافتن بخش‌های متناظر دو ابر با استفاده از توصیف‌گرهای انحنای رویه، ارائه شده است. دقت این روش به شباهت دو شکل (ابر نقاط) و همچنین تعداد نقاط دو ابر بستگی دارد. نویسندگان مرجع [۳۵] یک تبدیل را به‌وسیله بخش‌بندی مدل‌های سه‌بعدی ارائه می‌دهند که از چندین جهت اسکن شده‌اند. در مرجع [۳۶] نویسندگان از شبکه یادگیری عمیق برای ایجاد یک توصیف‌گر استفاده می‌کنند. نویسندگان مرجع [۳۷] داده‌های سه‌بعدی برچسب‌گذاری شده به همراه ویژگی‌های گروه‌بندی چند مقیاسی و گروه‌بندی با وضوح چندگانه[۲۰] را برای آموزش شبکه استفاده کردند. سپس با توجه به کلاس درخواستی از طبقه‌بند کی راه[۲۱] [۳۶] استفاده کردند. در مرجع [۳۸]، ۱۱ ویژگی از ابر نقاط برای آموزش شبکه عصبی کانولوشنی[۲۲] استخراج شده است. این ویژگی‌ها عبارتند از: چرخش تصاویر[۲۳]، عامل منسجم[۲۴]، امضای هسته حرارتی[۲۵]، تابع قطر شکل[۲۶]، مقیاس ثابت امضای هسته حرارتی[۲۷]، انحنای گوسی، انحنای اصلی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی[۲۸]، فاصله از سطح داخلی[۲۹]، فاصله ژئودزیکی متوسط[۳۰] و شکل زمینه[۳۱].

روش پیشنهادی در مرجع [۳۹] از بردارهای ویژه لاپلاس بلترامی برای ساخت گراف هر مدل استفاده می‌کند. سپس برای یافتن بخش‌های متناظر دو مدل سه‌بعدی، تناظر بین گره‌های دو گراف محاسبه می‌شود. الگوریتم ارائه شده در مرجع [۴۰]، رویکردی برای انتشار اطلاعات در لایه‌ها و مناطق مختلف یک شبکه عصبی کانولوشن پیشنهاد می‌کند که در آن شبکه یو رزنت[۳۲] با دو ویژگی امضاهای هیستوگرام برای سطح و بافت[۳۳] و امضای هسته موج[۳۴] به کار گرفته شده است. در مرجع [۴۱] یک معماری برای بخش‌بندی معرفی شده است، به نام (شبکه عصبی کانولوشن طیفی همزمان[۳۵]) که با سه ویژگی شامل مکان عکس‌برداری، انحنا و بافت محلی آموزش داده می‌شود. در مرجع [۴۲] روشی برای بخش‌بندی اشیاء سه‌بعدی به قطعات برچسب دار با استفاده از معماری شبکه عمیق پیشنهاد شد. نویسندگان مرجع [۴۳] روشی برای بخش‌بندی یک رویه مدل سه‌بعدی با ترکیب تابع خوشه‌بندی مبتنی بر پایداری و امضای هسته حرارتی پیشنهاد کردند. برخلاف روش‌های بررسی شده [۴۳-۳۵] با پیچیدگی بالا، ما از بردارهای ویژه[۳۶] لاپلاس بلترامی برای توصیف سطح رویه و برای بخش‌بندی مدل سه‌بعدی از روش مرجع [۴۴] استفاده می‌کنیم. هر یک از بردارهای ویژه لاپلاس بلترامی نشان‌دهنده نوع خاصی از انحنا است که می‌تواند برای تقسیم‌بندی یک مدل سه‌بعدی به بخش‌های معنادار استفاده شود. لازم به ذکر است که بردارهای مرتبط با اولین مقادیر ویژه[۳۷]، بخش‌هایی با انحنای کم و بردارهای مرتبط با آخرین مقادیر ویژه، بخش‌هایی با انحنای بالا از سطح سه‌بعدی را نشان می‌دهند. بر این اساس، هر نقطه از ابر را می‌توان با استفاده از ویژگی‌های مرتبط با بردارهای ویژه غالب توصیف کرد. بر این اساس، یک ابر نقاط در فضای ویژگی سه‌بعدی جدید با استفاده از بردارهای ویژه غالب لاپلاس بلترامی نشان داده می‌شود. با تجزیه و تحلیل داده‌های سطح، متوجه شدیم که بردارهای ویژه مرتبط با مقادیر ویژه بزرگ‌تر، سطوح را با انحنای بیشتری توصیف می‌کنند. از سوی دیگر، برای بخش‌بندی یک شی سه‌بعدی به اجزای تشکیل‌دهنده، نیازی به توصیف ناهمواری سطح نداریم، بنابراین بردارهای ویژه مرتبط با مقادیر ویژه کوچک مطلوب‌تر هستند. همان‌طور که در مرجع [۴۵] گزارش شده و در این مقاله به‌طور تجربی تأیید گردید، بردارهای ویژه مرتبط با مقادیر ویژه دوم، سوم و چهارم برای نمایش انحنای سطح سه‌بعدی کافی هستند و برای بخش‌بندی

می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. از طرفی بردار ویژه مرتبط با کمترین مقدار ویژه نقش مهمی در توصیف انحنای اشکال سه‌بعدی ندارد. یک ویژگی جالب نمایش در فضای ویژگی پیشنهادی، این است که شکل ابر نقاط در فضای جدید نسبت به وضعیت جسم سه‌بعدی در فضای اصلی تغییر نمی‌کند. برای نشان دادن این مهم در شکل (۶ -ج و ۶ -د)، بدن انسان در دو حالت مختلف نشان داده شده است. نمایش متناظر این اشکال در فضای ویژگی در شکل (۶ -الف و ۶ -ب) به نمایش درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با وجود تفاوت قابل توجه دو شکل در فضای اولیه، در فضای ویژگی، دو شکل بسیار شبیه به هم هستند. شایان ذکر است که شکل ابرها در فضای ویژگی هم برای نگاشت صلب و هم غیرصلب مشابه است. این مهم ما را به بخش‌بندی آسان‌تر هر شکل در فضای ویژگی هدایت می‌کند. بنابراین، اعمال یک روش خوشه‌بندی بر روی چنین اشیایی در فضای ویژگی، بخش‌بندی مشابهی را در فضای اصلی به همراه دارد.



(ب) شکل ابر نقاط دوم در فضای ویژگی



(الف) شکل ابر نقاط اول در فضای ویژگی

(د) شکل ابر نقاط دوم در فضای سه‌بعدی

(ج) شکل ابر نقاط اول در فضای سه‌بعدی

شکل (۶): نمایش دو ابر نقاط تحت تحول غیرصلب در دو فضای ویژگی و فضای سه بعدی

Figure (6): Representation of two point clouds under non-rigid transformation in the eigen-space and 3D space, a) representation of first point cloud in the eigen-space, b) representation of secend point cloud in the eigen-space, c) representation of first point cloud in the 3D space, d) representation of secend point cloud in the 3D space

الگوریتم خوشه‌بندی کی- میانگین[۳۸] روش مناسبی برای خوشه‌بندی نقاط در فضای ویژگی است [۴۴]. پس از برچسب‌گذاری نقاط در فضای ویژگی، نقاط متناظر با هر خوشه در فضای هندسی اصلی بخشی از شیء سه‌بعدی را تشکیل می‌دهند. در مرحله بعد، بخش‌های متناظر از دو شیء داده شده برای تطبیق باید شناسایی شوند. برای این منظور از موقعیت هر قسمت در فضای هندسی اصلی به‌عنوان سرنخ برای یافتن بخش متناظر از جسم دیگر استفاده می‌کنیم. در این مقاله از محور دوم فضای اصلی برای یافتن بخش‌های متناظر استفاده شده است. ازآنجایی‌که استفاده از خوشه‌بندی کی- میانگین روی ابر نقاط شیء در فضای ویژگی، مجموعه‌ای از خوشه‌ها را نتیجه می‌دهد که هر خوشه نشان‌دهنده بخشی از شیء است، برای تعیین خوشه‌های متناظر از دو شی لازم است از محور دوم فضای هندسی اصلی استفاده شود. به‌طور دقیق‌تر، برای هر بخش، نقطه با حداقل مقدار در محور دوم در فضای اصلی را به‌عنوان نشانگر انتخاب می‌کنیم تا بخش متناظر آن را در جسم دیگر پیدا کنیم. شکل (۷) نتایج خوشه‌بندی کی- میانگین اعمال شده بر روی دو ابر نقاط تحت تبدیل غیرصلب را نشان می‌دهد. در این مقاله، داده‌های تحت نگاشت مدل سه‌بعدی مشتری و لباس روی مانکن است که توسط دوربین کینکت ثبت شده است. شکل (۷) نتیجه اعمال الگوریتم بخش‌بندی را بر روی داده‌های واقعی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو شکل سه‌بعدی به‌درستی به بخش‌های مشابه تقسیم شده‌اند.

(الف) **به روی داده شکل (۳ –الف)** (ب) **به روی داده شکل (۳ –ب)**

شکل (۷): نتیجه حاصل از اجرای الگوریتم [۴۴]

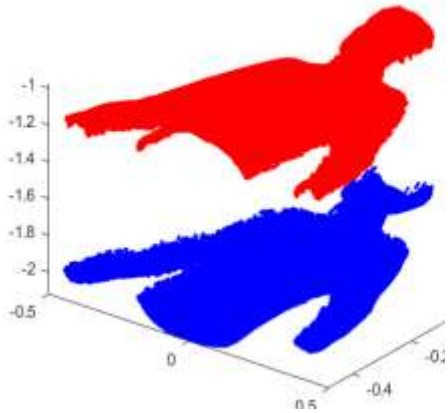
Figure (7): The result of segmentation using the K-means method [44], a) on Figure (3.a), b) on Figure (3.b)

۳-۳- نگاشت بین ابر نقاط لباس و بدن مشتری

در این مرحله نگاشت نقطه به نقطه لازم است تا نقاط لباس بر روی مانکن نگاشت داده شود تا رنگ لباس مدل سه‌بعدی مشتری (ناحیه لباس مشتری) بر اساس لباس انتخابی مشخص گردد. برای نگاشت نقطه به نقطه، بخش‌بندی مدل سه‌بعدی به‌دست آمده توسط الگوریتم [۴۴] مورد استفاده قرار می‌گیرد تا نگاشت روی ناحیه قسمت سر اعمال نشود. در این مقاله از نگاشت غیرصلب پیشنهادی در مرجع [۴۶] برای نگاشت نواحی بازو استفاده شده است. برای افزایش سرعت نگاشت، هر مدل سه‌بعدی به دو قسمت جلو و عقب تقسیم شده و سپس نگاشت برای مناطق متناظر به‌صورت موازی انجام می‌شود. برای جداسازی قسمت جلو از پشت، ابتدا مدل را به‌صورت عمودی به ۲۰ حلقه و سپس هر حلقه به‌صورت افقی به ۲۰ قسمت تقسیم می‌شود. بعد از این دو مرحله، هر تکه از حلقه دارای دو ناحیه نقطه است، یکی متعلق به ناحیه جلو و دیگری متعلق به ناحیه پشت مدل سه‌بعدی. به این ترتیب نقاط بخش جلو و عقب مدل سه‌بعدی از هم جدا می‌شوند که در شکل (۸) بخش‌های جلویی و پشتی مدل سه‌بعدی نشان داده شده است.

هر مدل سه‌بعدی همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است به پنج قسمت تقسیم می‌شود و اکنون قسمت جلویی و پشتی مدل سه‌بعدی به دست آمده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۷) و (۸)، هر مدل ۳ بعدی به ۱۰ بخش تقسیم شده است. با داشتن ۱۰ قسمت برای هر مدل ۳ بعدی، می‌توان الگوریتم‌های نگاشت را برای هر جفت بخش متناظر انجام داد. در این مقاله از نگاشت غیرصلب [۴۶] برای ناحیه بازو و از الگوریتم پیشنهادی در این مقاله برای ناحیه سینه و شکم استفاده شده است. برای مثال، نتیجه نگاشت بین ناحیه جلوی بازوی راست مشتری و قسمت متناظر آن از مانکن، در شکل (۹) نشان داده شده است.

در مرحله بعد، برای نگاشت ناحیه قفسه سینه و شکم، فرض می‌شود که این دو بخش از مدل مانکن و مشتری تحت تحول صلب هستند. برای تخمین ماتریس تبدیل (R) بین این دو ناحیه تحت تحول صلب، لازم است چهار نقطه متناظر به‌عنوان مرجع از بدن مشتری (P1) و لباس روی مانکن (P2) مشخص شود. البته در این نگاشت مقدار عمق برای همه نقاط از دو مدل سه‌بعدی صفر در نظر گرفته شده است(عمق حذف می‌شود). همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، این چهار نقطه به‌عنوان مهم‌ترین نقاط لبه، انتخاب شده‌اند. موقعیت این نقاط روی محور اول و دوم در فضای اصلی به‌عنوان معیار، انتخاب شده است.



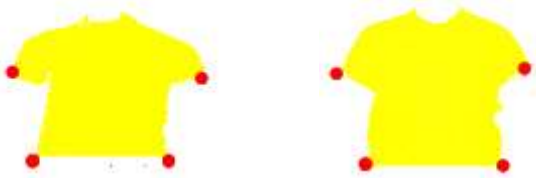
شکل (۸): بخش‌های جلو و عقب مدل سه‌بعدی شکل (۳–الف)

Figure (8): Front and back parts for 3D model Fig. (3-a)

(الف) بخش جلوی ناحیه بازوی راست مشتری (ب) بخش جلوی ناحیه راست مانکن (ج) نتیجه نگاشت سه‌بعدی (الف) و (ب) [۴۶]

شکل (۹): نگاشت بین ناحیه جلوی بازوی راست مشتری و قسمت متناظر آن از مانکن

Figure (9): Mapping between the front area of the customer's right arm and the corresponding part of the mannequin, a) The front of the customer's right arm, b) The front of the mannequin's right arm, c) The result of mapping a on b.



(الف) مشتری (ب) مانکن

شکل (۱۰): چهار نقطه مرجع ناحیه سینه و شکم مشتری و مانکن

Figure (10): The four reference points from the chest and abdominal parts of a) the customer and b) the mannequin.

اکنون ماتریس تبدیل که با چهار نقطه مرجع متناظر مطابقت دارد به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$P1 = R \times P2 \qquad (۱۳)$$

پس از اعمال ماتریس تبدیل به‌دست آمده بر روی نقاط مانکن و اعمال الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی، نواحی سینه و شکم مانکن به بدن مشتری نگاشت می‌شود. در مرحله بعد رنگ نقاط مانکن (لباس) به نقاط مربوطه روی بدن مشتری اختصاص داده می‌شود تا مشتری را با لباس انتخابی روی آینه مجازی نشان دهد. تاکنون نقاط سه‌بعدی مانکن به جز ناحیه سر روی بدن مشتری ترسیم شده است. حال با داشتن نگاشت نقطه به نقطه، رنگ مدل مانکن به نقاط متناظر مدل مشتری منتقل می‌شود. نتیجه نهایی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. عملکرد روش پیشنهادی برای لباس مجازی بر اساس کیفیت بصری نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های پیشین مبتنی بر مدل سه‌بعدی میسر نیست. چراکه در روش‌های پیشین مبتنی بر مدل سه‌بعدی، برخلاف روش پیشنهادی در این مقاله، بدن مشتری به‌صورت یک آواتار در نرم‌افزار گرافیکی مدل می‌شود. لباس نیز توسط نرم‌افزار گرافیکی طراحی و بر روی آواتار قرار می‌گیرد. لذا امکان نگاشت مدل سه‌بعدی ابر نقاط مربوط به لباس‌های این مقاله در روش‌های پیشین و بالعکس وجود ندارد. به همین دلیل جدیدترین روش پرو مجازی دوبعدی برای مقایسه با روش پیشنهادی این مقاله و ارزیابی آن انتخاب شده است.

(الف) نتیجه روش پیشنهادی از نمای جلوی مشتری اول (ب) نتیجه روش پیشنهادی از نمای پشت مشتری اول

(ج) نتیجه روش پیشنهادی از نمای جلوی مشتری دوم (د) نتیجه روش پیشنهادی از نمای پشت مشتری دوم

شکل (۱۱): نتیجه روش پیشنهادی از دو مشتری با لباس انتخابی

Figure (11): Result of the proposed method for virtual clothing of two customers with the selected clothes, a) the result of the proposed method from the front view of the first customer, b) the result of the proposed method from the back view of the first customer, c) the result of the proposed method from the front view of the secend customer, d) the result of the proposed method from the back view of the secend customer

شکل (۱۲): نتایج پرو مجازی با الگوریتم پیشنهادی(حالت اول)، پرو مجازی با الگوریتم [۱۱] (حالت دوم و سوم)

Figure (12): Virtual clothing resuslts using a) the proposed method, b) the method of [11]

(الف) صورت واقعی پرو لباس انتخابی (ب) صورت مجازی پرو لباس انتخابی با روش پیشنهادی

شکل (۱۳): مقایسه خروجی پرو مجازی پیشنهادی با صورت واقعی پرو لباس انتخابی

Figure (13): Comparison between the proposed virtual try on and the real face try on (a) Image of a customer who is really wearing a shirt and (b) result of virtual clothing using the proposed algorithm.

به علت اینکه روش پیشنهادی مقاله در حوزه سه‌بعدی است و پایگاه داده‌ای که در مرجع [۱۱] استفاده شده دوبعدی است، مقایسه در سه حالت انجام شده است.

حالت اول- پرو مجازی مشتری ما با الگوریتم پیشنهادی

حالت دوم- پرو مجازی مشتری ما با کمک الگوریتم مرجع [۱۱]

حالت سوم- پرو مجازی مشتری پایگاه داده مرجع [۱۱] به کمک الگوریتم مرجع [۱۱]

برای حالت اول فقط امکان پرو با لباسی امکان دارد که مدل سه‌بعدی لباس فراهم باشد به همین دلیل امکان ارزیابی الگوریتم پیشنهادی ما با لباس پایگاه داده مرجع [۱۱] وجود ندارد و مشتری نمونه ما پرو مجازی را با سه لباس در سه طرح متفاوت انجام داده و نتایج آن در شکل (۱۲) حالت اول آمده است. در حالت دوم پرو مجازی الگوریتم مرجع [۱۱] با مشتری نمونه ما انجام شده و در حالت سوم با مشتری از مرجع [۱۱] پرو مجازی با الگوریتم مرجع [۱۱] صورت گرفته است. در حالت دوم و سوم، چهار لباس پرو شده است. یک لباس از پایگاه داده مرجع [۱۱] استفاده شده و سه لباس دیگر همان سه لباس حالت اول است. پایگاه داده مرجع [۱۱] فقط شامل لباس‌های زنانه است و به همین دلیل لباس آستین‌بلندی به‌عنوان نمونه انتخاب شده است که بتوان آن را روی نمونه مردانه انداخت. در این مقایسه سعی شده است علاوه بر اینکه الگوریتم پیشنهادی در سه طرح لباس به چالش کشیده شود، با الگوریتم [۱۱] نیز مقایسه صورت گیرد.

الگوریتم مرجع [۱۱] دارای مزیت‌هایی چون استفاده از انواع لباس‌ها برای پرو است و همین موضوع باعث بوجود آمدن مشکل‌هایی شده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، الگوریتم مرجع [۱۱] چه در حالت دوم و چه در حالت سوم نتوانسته است بافت لباس را در پرو حفظ کند و بیشتر سعی در انتقال رنگ لباس داشته است که این ضعف بزرگی محسوب می‌شود. همچنین همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، هرچقدر بافت لباس جزئیات بیشتری داشته باشد ضعف الگوریتم بیشتر محسوس است. از طرفی همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، الگوریتم مرجع [۱۱] حالت یقه لباس را به‌شدت خراب کرده و نمی‌تواند پرو را به‌درستی انجام دهد. به‌طور کلی الگوریتم [۱۱] حتی در لباس‌هایی که از پایگاه داده انتخاب می‌شوند نیز خوب عمل نمی‌کند. به‌طور مثال در شکل (۱۲) در انتقال بافت لباس و نیز حالت یقه ضعیف عمل می‌کند و بافت لباس به جز قسمتی از ناحیه شکم از بین رفته است. در حالی که الگوریتم پیشنهادی توانسته است، سه مدل بافت لباس را به خوبی انتقال دهد و نیز حالت یقه لباس را حفظ کند. در عین حال در حالت کلی خروجی الگوریتم پیشنهادی نتیجه به مراتب بهتری دارد. لازم به ذکر است برخلاف الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم مرجع [۱۱] برای مشتریان مرد کارایی مناسب ندارد.

در مرجع [۱۱] و مقاله‌های دوبعدی این ضعف وجود دارد که برای هر جهت از مشتری به‌صورت جداگانه الگوریتم باید اجرا شود تا فرد بتواند پرو مجازی لباس را بر روی خود در جهات مختلف ببیند. در حالی که در الگوریتم مقاله پیشنهادی ما مشتری بعد از اتمام الگوریتم، یک مدل سه‌بعدی کامل که به‌صورت مجازی لباس را پرو کرده است، در اختیار دارد.

در ادامه همانند مرجع [۲۰]، برای ارزیابی بیشتر، بین نتایج پرو مجازی و تصویر مشتری که لباس انتخابی را پوشیده است، مقایسه‌ای انجام شده است. شکل (۱۳ -الف) تصویری از مشتری است که لباس انتخابی را در واقعیت می‌پوشد. شکل (۱۳ -ب)

نتیجه الگوریتم پیشنهادی برای پرو مجازی را با همان لباس شکل (۱۳ -الف) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده شد، کیفیت سیستم پرو مجازی پیشنهادی با واقعیت قابل مقایسه است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای پرو مجازی پیشنهاد گردید. روش‌های پیشنهادی در زمینه پرو مجازی به روش‌های دوبعدی و سه‌بعدی تقسیم می‌شوند. نتیجه روش‌ها در دسته دوبعدی دور از واقعیت بوده، امکان دسترسی همزمان به همه جهت‌ها وجود ندارد و خواسته‌های مشتری را برآورده نمی‌کند. از طرفی در بعضی از روش‌های موجود در حوزه سه‌بعدی برای تولید مدل‌های سه‌بعدی لباس، همیشه به یک متخصص در زمینه گرافیک نیاز است و علاوه بر این تولید مدل سه‌بعدی لباس با سبک‌ها و بافت‌های مختلف در نرم‌افزارهای گرافیکی چالش بزرگی است. در دیگر روش‌های این حوزه به تخمین مدل سه‌بعدی مشتری می‌پردازند که خروجی این تخمین، کیفیت به‌مراتب کمتری نسبت به زمانی دارد که مدل سه‌بعدی اسکن می‌شود. در این مقاله روشی برای کاهش محدودیت‌های مطرح شده پیشنهاد شده است. برای این منظور با استفاده از دوربین کینکت مدل سه‌بعدی مشتری و لباس انتخابی روی مانکن تهیه می‌گردد. پس از پیش‌پردازش این دو ابر نقاط، شبکه رویه این ابرها ساخته می‌شود. مش‌های ساخته شده با استفاده از بردارهای ویژه لاپلاس بلترامی برای بخش‌بندی توصیف می‌شوند. سطوح ساخته شده برای مشتری و مانکن با استفاده از سه بردار ویژه غالب لاپلاس بلترامی به بخش‌های متناظر در فضای ویژگی جدید تقسیم می‌گردد. ابتدا با استفاده از یک نگاشت سه‌بعدی غیرصلب، نواحی بازوی مانکن و یک نگاشت صلب، نواحی سینه و شکم مانکن بر روی مدل سه‌بعدی مدل مشتری نگاشت داده می‌شوند. سپس رنگ لباس انتخابی روی مانکن بر روی بدن مشتری منتقل می‌گردد. در مدل سه‌بعدی ساخته شده نهایی، مشتری مدل سه‌بعدی خود را درحالی‌که لباس انتخاب شده را پوشیده مشاهده می‌کند. استفاده از روش پیشنهادی سه مزیت دارد. اول اینکه برای تولید مدل سه‌بعدی لباس و مشتری در یک نرم‌افزار گرافیکی نیازی به متخصص ندارد. دوم، نیاز به تخمین مدل سه‌بعدی و پردازش‌های پیچیده نیست. سوم اینکه محدودیتی برای انتخاب مدل، رنگ و بافت لباس وجود ندارد و تنها محدودیت آن در نوع لباس (آستین‌بلند) است.

سپاسگزاری

این مقاله از ر ساله دکتری در دان شگاه صنعتی شاهرود ا ستخراج شده ا ست. نوی سندگان برخود لازم می‌دانند مراتب ت شکر صمیمانه خود را از اساتید و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

[1] A. Hilsmann, P. Eisert, "Tracking and retexturing cloth for real-time virtual clothing applications", Proceeding of the MIRAGE, pp. 94-105, Rocquencourt, France, May 2009 (doi:10.1007/978-3-642-01811-4_9).

[2] B.K.P. Horn, B.G. Schunck, "Determining optical flow", Artificial Intelligence, vol. 17, no. 1-3, pp. 185-203, 1981 (doi:10.1016/0004-3702(81)90024-2).

[3] A. Hilsmann, P. Eisert, "Deformable object tracking using optical flow constraints", Proceeding of the IEEE/CVMP, London, Nov. 2007.

[4] W. Zhang, T. Matsumoto, J. Liu, M. Chu, "An intelligent fitting room using multi-camera perception", Proceeding of the ICIUI, pp. 60-69, Gran Canaria Spain, Jan. 2008 (doi:10.1145/1378773.1378782).

[5] C.W. Hsieh, C.Y. Chen, C.L. Chou, H.H. Shuai, J. Liu, W.H. Cheng, "FashionOn: Semantic-guided image-based virtual try-on with detailed human and clothing information", Proceeding of the ACM/ICM, pp. 275-283, Nice France, Oct. 2019 (doi:10.1145/3343031.3351075).

[6] C. Ge, Y. Song, Y. Ge, H. Yang, W. Liu, P. Luo, "Disentangled cycle consistency for highly-realistic virtual try-on", Proceedings of the IEEE/CVF-CVPR, pp. 16928-16937, 2021.

[7] H. Dong, X. Liang, X. Shen, B. Wu, B.C. Chen, J. Yin, "FW-GAN: flow-navigated warping GAN for video virtual try-on", Proceedings of the IEEE/CVF-ICCV, pp. 1161-1170, Seoul, Korea, 2019.

[8] K.M. Lewis, S. Varadharajan, I. Kemelmacher-Shlizerman, "TryOnGAN: body-aware try-on via layered interpolation", ACM Trans on Graphics, vol. 40, no. 4, pp. 1-10, 2021 (doi:10.1145/3450626.3459884).

[9] K. Li, M. Jin Chong, J. Liu, D. Forsyth, "Toward accurate and realistic virtual try-on through shape matching and multiple warps", ArXiv e-prints, pp. 1–17, Mar. 2020 (doi:10.48550/arXiv.2003.10817).
[10] M.R. Minar, T.T. Tuan, H. Ahn, P. Rosin, Y.K. Lai, "Cp-vton+: clothing shape and texture preserving image-based virtual try-on", Proceedings of the IEEE/CVF-CVPR Workshops, June 2020.
[11] S. Choi, S. Park, M. Lee, J. Choo, "VITON-HD: high-resolution virtual try-on via misalignment-aware normalization", Proceedings of the IEEE/CVF-CVPR, pp. 14131-14140, 2021.
[12] M. Kotan, C. Öz, "Virtual dressing room application with virtual human using kinect sensor", Journal of Mechanics Engineering and Automation, vol. 5, pp. 322-326, 2015 (doi:10.17265/2159-5275/2015.05.008).
[13] M. Yuan, I.R. Khan, F. Farbiz, S. Yao, "A mixed reality virtual clothes try-on system", IEEE Trans on Multimedia, vol. 15, no. 8, pp. 1958 - 1968, Dec. 2013 (doi:10.1109/TMM.2013.2280560).
[14] P. Volino, N. Magnenat-Thalmann, F. Faure, "A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation", ACM Trans on Graphics, vol. 28, no. 4, August 2009 (doi:10.1145/1559755.1559762).
[15] S. Milborrow, F. Nicolls, "Locating facial features with an extended active shape model", Proceedings of the ECCV, pp. 504-513, Heidelberg Berlin, Oct. 2008.
[16] E. Reinhard, M. Adhikhmin, B. Gooch, "Color transfer between images", IEEE Computer Graphics and Applications , vol. 21, no. 5, pp. 34-41, July 2001 (doi:10.1109/38.946629).
[17] S.B. Adikari, N.C. Ganegoda, R.G.N Meegama, "Applicability of a single depth sensor in real-time 3D clothes simulation: augmented reality virtual dressing room using kinect sensor", Advances in Human-Computer Interaction, May 2020 (doi:10.1155/2020/1314598).
[18] K.W. Mok, C.T. Wong, S.K. Choi, L.M. Zhang, "Design and development of virtual dressing room system based on kinect", International Journal of Information Technology and Computer Science, pp. 39-46, Sept. 2018.
[19] S. Yang, Z. Pan, T. Amert, K. Wang, L. Yu, T. Berg, "Physics-Inspired garment recovery from a single-view image", ACM Transactions on Graphics, vol. 37, no. 5, pp. 1-14, Oct. 2018.
[20] G. Pons-Moll, S. Pujades, S. Hu, M.J. Black, "ClothCap: seamless 4D clothing capture and retargeting", ACM Transactions on Graphics, vol. 36, no. 4, pp. 1-15, July 2017 (doi:10.1145/3072959.3073711).
[21] Y. Xu, S. Yang, W. Sun, L. Tan, K. Li, H. Zhou, "3D virtual garment modeling from RGB images", Proceedings of the IEEE/ISMAR, pp. 37-45, China, Oct. 2019 (doi:10.1109/ISMAR.2019.00-28).
[22] C. Li, F. Cohen, "In-home application (App) for 3D virtual garment fitting dressing room", Multimedia Tools and Applications, vol. 80, pp. 5203-5224, Oct. 2020 (doi:10.1007/s11042-020-09989-x).
[23] F. Zhao, Z. Xie, M. Kampffmeyer, H. Dong, S. Han, T. Zheng, T. Zhang, X. Liang, "M3D-VTON: a monocular-to-3D virtual try-on network", Proceedings of the IEEE/CVF-ICCV, pp. 13239-13249, Oct. 2021.
[24] V. Gabeur, J.S Franco, X. Martin, C. Schmid, G. Rogez, "Moulding humans: non-parametric 3D human Shape estimation from single images", Proceedings of the IEEE/CVF-ICCV, pp. 2232-2241, Seoul, Korea, 2019.
[25] A. Mir, T. Alldieck, G. Pons-Moll, "Learning to transfer texture from clothing images to 3D humans", Proceedings of the IEEE/CVF-CVPR, pp.7023-7034, 2020.
[26] H. Fathi, A.R Ahmadyfard, H. Khosravi, "Deformable 3D shape matching to try on virtual clothes via laplacian-beltrami descriptor", Journal of Artificial Intelligence & Data Mining, vol. 10, no. 1, pp. 63-74, Jan. 2022 (doi:10.22044/JADM.2021.10749.2212).
[27] C. Yuan, X. Yu, Z. Luo, "3D point cloud matching based on principal component analysis and iterative closest point algorithm", Proceedings of the ICALIP, pp. 404-408, Shanghai, China , July 2016 (doi:10.1109/ICALIP.2016.7846655).
[28] S. Rusinkiewicz, M. Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm", Proceedings of the 3DIM, pp.145-152, Quebec City, Canada, May 2001 (doi:10.1109/IM.2001.924423).
[29] D. Nogneng, M. Ovsjanikov, "Informative descriptor preservation via commutativity for shape matching", Computer Graphics Forum, vol. 36, no. 2, pp. 259-267, May 2017 (doi:10.1111/cgf.13124).
[30] M. Ovsjanikov, M. Ben-Chen, J. Solomon, "Functional maps: a flexible representation of maps between shapes", ACM Trans on Graphics, vol. 31, no. 4, pp. 1-11, July 2012 (doi:10.1145/2185520.2185526).
[31] J. Ren. A. Poulenard. P. Wonak. M. Ovsjanikov, "Continuous and orientation-preserving correspondences via functional maps", ACM Trans on Graphics, vol. 37, no. 6, pp. 1-16, Dec. 2018 (doi:10.1145/3272127.3275040).
[32] Y. Kleiman, M. Ovsjanikov, "Robust structure-based shape correspondence", Computer Graphics Forum, vol. 38, pp. 7-20, Oct. 2019 (doi:10.1111/cgf.13389).
[33] U. Dierkes, S. Hildebrandt, F. Sauvigny, "Minimal surfaces", Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 53-88 1992.
[34] X. David Gu, R. Guo, F. Luo, W. Zeng, "Discrete laplace-beltrami operator determines discrete riemannian metric", ArXiv e-prints, Oct. 2010 (doi:10.48550/arXiv.1010.4070).
[35] J. Huang, H. Wang, T. Birdal, M. Sung, F. Arrigoni, S.M. Hu, L. Guibas, "MultiBodySync: Multi-body segmentation and motion estimation via 3D scan synchronization", Proceedings of the IEEE/CVF-CVPR, pp. 7108-7118, Nashville, TN, USA, June 2021.

[36] S. Yuan, Y. Fang, "ROSS: robust learning of one-shot 3D shape segmentation", Proceedings of the IEEE/WACV, pp. 1961-1969, Snowmass, CO, USA, March 2020.
[37] C. Zhu, K. Xu, S. Chaudhuri, L. Yi, L.J. Guibas, H. Zhang, "AdaCoSeg: adaptive shape co-segmentation with group consistency loss", Proceedings of the IEEE/CVF-CVPR, pp. 8543-8552, Seattle, WA, USA, June 2020.
[38] D. George, X. Xie, G.K. Tam, "3D mesh segmentation via multi-branch 1D convolutional neural networks", Graphical Models, vol. 96, pp. 1-10, 2018 (doi:10.1016/j.gmod.2018.01.001).
[39] J. Ren, J. Schneider, M. Ovsjanikov, P. Wonka, "Joint graph layouts for visualizing collections of segmented meshes", IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, vol. 24, no. 9, pp. 2546 - 2558, Sept. 2018 (doi: 10.1109/TVCG.2017.2751473).
[40] A. Poulenard, M. Ovsjanikov, "Multi-directional geodesic neural networks via equivariant convolution", ACM Trans on Graphics (TOG), vol. 37, no. 6, pp. 1-14, Dec. 2018 (doi:10.1145/3272127.3275102).
[41] L. Yi, H. Su, X. Guo, L.J. Guibas, "SyncSpecCNN: synchronized spectral CNN for 3D shape segmentation", Proceedings of the IEEE/CVPR, pp. 6584-6592, Honolulu, HI, USA, July 2017.
[42] E. Kalogerakis, M. Averkiou, S. Maji, S. Chaudhuri, "3D shape segmentation with projective convolutional networks", Proceedings of the IEEE/CVPR, pp. 2282-2290, Honolulu, HI, USA, July 2017.
[43] P. Skraba, M. Ovsjanikov, F. Chazal, L. Guibas, "Persistence-based segmentation of deformable shapes", Proceeding of the IEEE/CVPRW, pp. 45-52, San Francisco, CA, USA, June 2010 (doi: 10.1109/CVPRW.20-10.5543285).
[44] R.M. Rustamov, "Laplace-beltrami eigenfunctions for deformation invariant shape representation", Proceedings of the ESGP, pp. 225-233, July 2007.
[45] A. Sharma, "Representation, segmentation and matching of 3D visual shapes using graph laplacian and heat-kernel", Ph.D. Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, Grenoble, France 2012.
[46] A. Myronenko, X. Song, "Point-set registration: coherent point drift", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, no. 12, pp. 2262-2275, Mar. 2009 (doi:10.1109/TPAMI.2010.46).

زیرنویس‌ها

1. Mesh
2. Deep networks
3. Kinect camera
4. Human constructor
5. Unity designer
6. Avatar
7. Civilian american and european surface anthropometry resource project
8. Active shape model
9. Laplace beltrami
10. Rigid
11. Non rigid
12. Iterative closest point
13. Functional mapping
14. Principal curvature
15. Gaussian curvature
16. Mean curvature
17. The weight of the edge cotangent
18. Point cloud library
19. Matlab
20. Multi-Scale grouping (MSG) and multi-resolution grouping (MRG)
21. K-Way
22. Convolutional neural network
23. Spin images
24. Conformal factor
25. Heat kernel signature
26. Shape diameter function
27. Scale invariant HKS
28. Principal component analysis
29. Distance from medial surface
30. Average geodesic distance
31. Shape context
32. U-Resnet

33. Signatures of histograms for surface and texture
34. Wave kernel signature
35. Synchronized spectral CNN
36. Eigenvector
37. Eigenvalue
38. K-means