



## هم‌مرجع‌سازی کاملاً خودکار ابرهای نقاط با استفاده از ویژگی‌های سطح

ابوالفضل فورگی نژاد<sup>1</sup>، خلیل خلیلی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، kkhali@birjand.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 آبان 1394

پذیرش: 15 بهمن 1394

ارائه در سایت: 05 اسفند 1394

کلید واژگان:

هم‌مرجع‌سازی کاملاً خودکار

انتحای چتری

همسایگی همگن

شکل موضعی سطح

بردار نرمال سطح

### چکیده

هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط یکی از مهمترین گام‌های اولیه جهت ایجاد مدل رایانه‌ای در مهندسی معکوس محسوب می‌شود. پیچیدگی و بد وضع بودن مساله هم‌مرجع‌سازی، ارائه الگوریتم جامع و کاملاً خودکار این فرآیند را با مشکلات اساسی روبرو کرده است. در این پژوهش روشی برای ارتقا سطح خودکارسازی فرآیند هم‌مرجع‌سازی ارائه شده است. در این روش ابتدا ویژگی‌های مشخصی از سطوح تشکیل دهنده ابرهای نقاط استخراج گردیده و سپس از آنها برای یافتن نقاط متناظر بین دو ابر نقاط استفاده می‌شود. دقت انجام فرآیند هم‌مرجع‌سازی به دقت انتخاب نقاط متناظر در ابرهای نقاط بستگی دارد. ویژگی‌های مورد استفاده در این پژوهش برای تناظریابی، انتحای سطح و شکل موضعی سطح می‌باشند. برای استخراج ویژگی‌ها، انتحای سطح برای هر نقطه از ابر نقاط با استفاده از انتحای چتری محاسبه می‌گردد. همچنین روش جدیدی نیز برای تعیین شکل موضعی سطح ارائه شده است. برای هر نقطه یک عدد شکل که معرف شکل موضعی سطح است با استفاده از مختصات نقاط بدست می‌آید. نقاط متناظر در این روش، نقاطی محسوب می‌شوند که از شکل موضعی و انتحای چتری تقریباً یکسانی برخوردار باشند. هم‌مرجع‌سازی با در نظر گرفتن قید صلیبیت با استفاده از زوج نقاط متناظر انجام می‌شود. نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی در هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط نشان از صحت کارکرد این روش در حل مساله هم‌مرجع‌سازی به شکل کاملاً خودکار دارد.

## Fully automatic registration of point clouds using surface features

Abolfazl Foorginejad, Khalil Khalili\*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\*P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, kkhali@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 November 2015

Accepted 04 February 2016

Available Online 24 February 2016

#### Keywords:

Fully Automatic Registration

Umbrella Curvature

Homogeneous Neighborhood

Local Shape

Surface Normal Vector

### ABSTRACT

Registration of point clouds is a key process in creating a digital model in reverse engineering. Registration is a complex and ill-conditioned problem and these impede fully automatic comprehensive algorithm. In this study a new method to improve automation level is proposed. In this method, at first surface features are extracted from point clouds and then these data are used for detecting correspondence points between point clouds. Registration process accuracy depends on carefully selected corresponding points between point clouds. In present research surface curvature and local shape are used for determining the correct correspondence points. For feature extraction, surface curvature for each point of point clouds is calculated by using umbrella curvature and also a new method for determining local shape is presented. For each point of point cloud a shape number is determined. Determination of shape number is done by neighbors' coordinates of point of concern. In this method, the corrected corresponding points are points that have almost equal umbrella curvature and shape number. Rigidity helps the algorithm to find pairwise points. Analyzing the results shows that the proposed algorithm performs well and has appropriate abilities on fully automatic registration of point clouds.

### 1- مقدمه

با توسعه سریع اسکنرهای سه بعدی لیزری، مدل‌های استخراج شده از ابر نقاط در کاربردهای مختلف مهندسی مانند کنترل کیفیت، مهندسی معکوس، گرافیک رایانه‌ای و ماشین بینایی به شکل وسیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اسکنرهای لیزری سه‌بعدی مدرن با قابلیت اسکن با سرعت‌های بالا و ماشین‌های اندازه‌گیری موقعیت با پروپ‌های تماسی که قادر به اسکن سطوح به شکل پیوسته می‌باشند، به شکل فزاینده‌ای برای جمع‌آوری اطلاعات موقعیت نقاط سطح یک قطعه یا مدل، مورد استفاده قرار می‌گیرند. داده‌های

استخراج شده توسط اسکنرهای مذکور، بدلیل داشتن تراکم بالا ابر نقاط<sup>1</sup> نامیده می‌شوند. با توجه به اینکه مشخصات هندسی سطوح قطعات، به سادگی از تحلیل ابرهای نقاط اسکن شده قابل استخراج است، لذا کاربردهای فراوانی را می‌توان یافت که با تحلیل ابر نقاط و بدون داشتن مدل رایانه‌ای امکان‌پذیر شده است [1]. بخش‌بندی سطوح [2]، بازسازی سطوح [3] و هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط [4] از جمله کاربردهای عمومی این خواص هندسی می‌باشد. کاربردهای دیگری را می‌توان در مباحث گرافیک

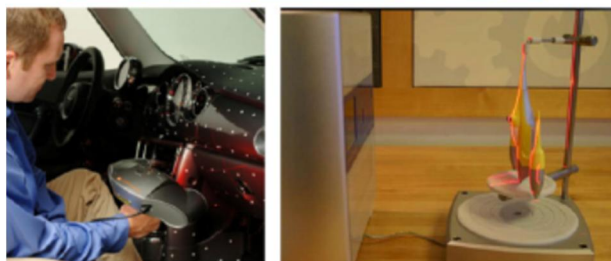
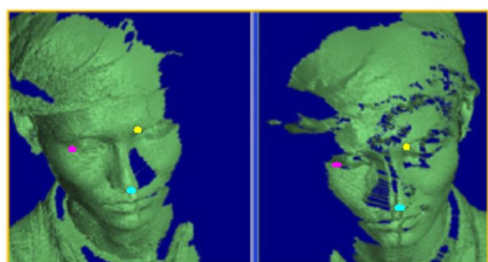
1- Point Cloud

هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط استخراج شده از اجسام صلب معمولاً با استفاده از علائم یا نشانه‌ها و یا توسط میزهای گردان دقیق انجام می‌گیرد. در غیر این صورت از تنظیم اولیه دستی ابرهای نقاط برای نزدیک کردن آن‌ها استفاده می‌شود. هم‌مرجع‌سازی صلب را می‌توان با توجه به میزان تنظیم دستی اولیه به دو دسته کاملاً خودکار [7] و خودکار (یا نیمه خودکار) تقسیم نمود. در روش‌های خودکار هم‌مرجع‌سازی به شکل خودکار صورت می‌پذیرد ولی این روش‌ها نیاز به تنظیم اولیه ابرهای نقاط دارند و در صورت فاصله داشتن ابرهای نقاط از یکدیگر، الگوریتم‌های بکار رفته در هم‌مرجع‌سازی همگرا نخواهند گردید.

در ابتدا به منظور هم‌مرجع‌سازی دو سطح، از میزهای دقیق چرخان و یا قرار دادن نشانگرهایی بر روی سطوح استفاده می‌گردید، الگوریتم‌هایی که قادر به حذف نشانگرها از فرآیند هم‌مرجع‌سازی باشند، به هم‌مرجع‌سازی خودکار معروفند. الگوریتم‌های ارائه شده معمولاً نیاز به دخالت انسان در مواردی مانند تعیین مناطق همپوشان یا تعیین تقریبی نقاط متناظر و مواردی از این دست دارند و شاید در موارد اندکی بتوانند بدون راهنمایی، عمل هم‌مرجع‌سازی را بطور کامل اجرا نمایند و به همین دلیل لغت کاملاً خودکار به ادبیات علمی موضوع هم‌مرجع‌سازی افزوده گردید که نشان‌دهنده انجام فرآیند بدون دخالت و راهنمایی انسان است. پژوهش‌هایی که تا کنون به موضوع کاملاً خودکار کردن فرآیند هم‌مرجع‌سازی پرداخته‌اند فقط یک وضعیت خاص یا هم‌مرجع‌سازی ابر نقاط بر روی مدل رایانه‌ای [7] را مورد بررسی قرار داده‌اند.

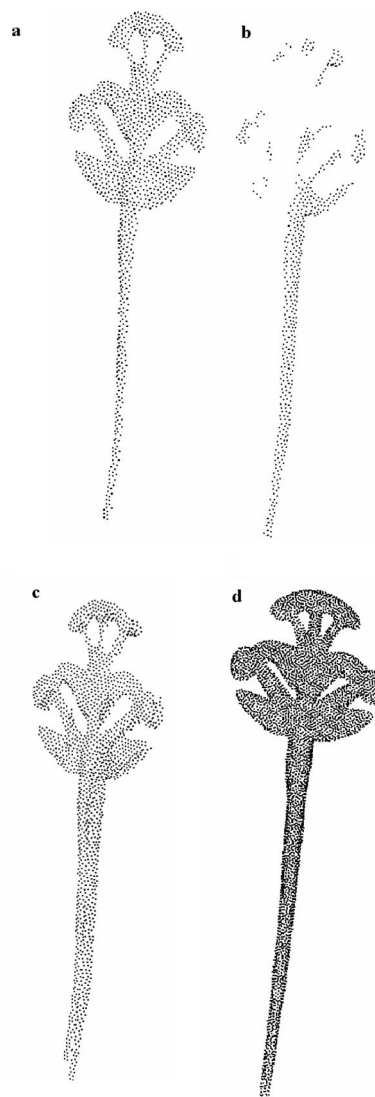
برخی از مواردی که الگوریتم هم‌مرجع‌سازی را از حالت کاملاً خودکار خارج می‌نماید در شکل 2 نشان داده شده است. قسمت بالای شکل 2 وضعیتی را نشان می‌دهد که در آن کاربر با مشخص کردن سه نقطه متناظر بر روی ابرهای نقاط به الگوریتم هم‌مرجع‌سازی در یافتن تخمین اولین کمک می‌نماید. قسمت پایین شکل 2 استفاده از میز گردان دقیق و همچنین استفاده از نشانگرها را در هم‌مرجع‌سازی نشان می‌دهد.

نرم‌افزارهای تجاری به طور معمول از نشانگرهایی که در اسکن‌های متفاوت می‌توانند به طور کاملاً خودکار به عنوان نقاط متناظر شناخته شوند، استفاده می‌نمایند. آکا [9] از نشانگرهای خاص متصل شده بر روی موضوع



**Fig. 2** Where will registration algorithm is fully automatic mode out [8]  
شکل 2 مواردی که باعث می‌شود الگوریتم هم‌مرجع‌سازی از حالت کاملاً خودکار خارج شود [8]

کامپیوتری در مورد رندر کردن مستقیم نقاط، پیدا نمود [5]. اسکن‌های نوری و لیزری به طور کلی با نمونه‌برداری و استخراج ابعاد سه بعدی تعداد بسیار زیادی از نقاط سطوح قطعات، مدل‌های بر پایه نقاط ارائه می‌نمایند. در ابرهای نقاط استخراج شده توسط اسکنرها، رزولوشن فضایی داده‌ها بسیار بالاتر از روش‌های سنتی استخراج داده می‌باشد. از آنجا که اسکنرها دارای یک میدان دید محدود می‌باشند، برای جمع‌آوری داده‌های کلیه سطوح یک شی نیاز به داده‌برداری از جهات مختلف وجود دارد که این داده‌ها در دستگاه‌های مختصات مختلفی با توجه به موقعیت اسکنر نسبت به قطعه بدست می‌آیند. داده‌های استخراج شده برای بازیابی کلیه سطوح یک قطعه باید به یک سیستم مختصات واحد تبدیل گردند. رویه تبدیل مختصات ابرهای نقاط به یک سیستم مختصات، هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط نامیده می‌شود [6]. نمونه‌ای از هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط یک قطعه باستانی جهت تهیه مدل سه بعدی که در آزمایشگاه مهندسی معکوس و اندازه‌گیری دقیق دانشگاه بیرجند اسکن شده است، در شکل 1 نشان داده شده است.



**Fig. 1** a,b- Point clouds from different views c- Point cloud after register point clouds a and b d- Point-based model constructed by 26 point clouds

شکل 1 a,b- دو ابر نقاط از دو زاویه متفاوت c- ابر نقاط حاصل از هم‌مرجع کردن ابرهای نقاط a,b d- مدل ابرنقاط قطعه متشکل از 26 ابر نقاط

مورد مطالعه، به عنوان نشانه استفاده نمود و مختصات سه بعدی نقاط مد نظر خود را با تئودولیت، قبل از فرآیند اسکن مشخص کرد. اطلاعات هندسی (شکل، اندازه، و صفحه‌ای بودن) برای پیدا نمودن نقاط نشانه‌گذاری شده در ابر نقاط به صورت خودکار، با استفاده از همبستگی، آزمون ابعاد و آزمون صفحه‌ای بودن توسط وی مورد استفاده قرار گرفت. گرچه آکا ادعا می‌نماید که فرآیند هم‌مرجع‌سازی را کاملاً خودکار نموده است، اما کاملاً خودکار بودن فرآیند هم‌مرجع‌سازی، با قرار دادن نشانگرها در تناقض است. کیم و همکاران [7] توانستند بدون استفاده از نشانگرها و به شکل کاملاً خودکار، ابرهای نقاط گرفته شده از یک ساختمان در حال احداث را بر روی مدل رایانه‌ای آن بازنشانی نمایند.

به منظور انجام هم‌مرجع‌سازی به صورت خودکار، تلاش‌های زیادی صورت پذیرفته تا استفاده از نشانگرهای مصنوعی در عملیات هم‌مرجع‌سازی حذف گردد. یکی از معمول‌ترین روش‌ها الگوریتم، توسعه یافته توسط بسل و مک کی [10] و چن و مدیونی [11] با نام تکرار نزدیکترین نقطه است. هنگامی که الگوریتم تکرار نزدیکترین نقطه بر روی دو ابر نقاط بکار می‌رود تخمینی از تبدیل لازم برای یکسان‌سازی مختصات بین دو ابر نقاط را ارائه می‌دهد. سپس با تکرار و تصحیح و تغییر نقاط متناظر در دو ابر نقاط اقدام به پیدا نمودن بهترین ماتریس چرخش و انتقال بین ابرهای نقاط می‌نماید، به نحوی که مقدار خطا شامل فاصله بین نقاط متناظر ابرهای نقاط، کمینه گردد. یک نکته کلیدی در استفاده از این روش، نزدیک بودن ابرهای نقاط است و به عبارتی این روش در صورتی که فواصل ابرهای نقاط از یکدیگر زیاد باشد کارایی خود را از دست می‌دهد. بسیاری از الگوریتم‌هایی که بر پایه روش تکرار نزدیکترین نقطه اقدام به هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط می‌نمایند در صورتیکه، دو ابر نقاط دارای همپوشانی نباشند یا استقرار اولیه ابرها نزدیک به یکدیگر نباشند، این الگوریتم‌ها در یافتن نقاط متناظر دارای ضعف بوده و نتیجه دارای دقت کافی نخواهد بود. همچنین اگر چه تعداد قابل توجهی پژوهش بر روی هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط گرفته شده از اسکنرهای لیزری صورت پذیرفته، هنوز روابط مشخصی که نشان‌دهنده رفتار همگرایی با توجه به پارامترهای شرایط اولیه متفاوت و معیارهای خطا باشد، ارائه نگردیده است. در پژوهش‌های بسیاری نشان داده شده است که میزان همگرایی الگوریتم تکرار نزدیکترین نقطه تا حد زیادی به انتخاب نقاط متناظر و تابع فاصله متکی است [12].

به منظور انجام هم‌مرجع‌سازی به صورت خودکار، تلاش‌های زیادی صورت پذیرفته تا استفاده از نشانگرهای مصنوعی در عملیات هم‌مرجع‌سازی حذف گردد. یکی از معمول‌ترین روش‌ها الگوریتم، توسعه یافته توسط بسل و مک کی [10] و چن و مدیونی [11] با نام تکرار نزدیکترین نقطه است. هنگامی که الگوریتم تکرار نزدیکترین نقطه بر روی دو ابر نقاط بکار می‌رود تخمینی از تبدیل لازم برای یکسان‌سازی مختصات بین دو ابر نقاط را ارائه می‌دهد. سپس با تکرار و تصحیح و تغییر نقاط متناظر در دو ابر نقاط اقدام به پیدا نمودن بهترین ماتریس چرخش و انتقال بین ابرهای نقاط می‌نماید، به نحوی که مقدار خطا شامل فاصله بین نقاط متناظر ابرهای نقاط، کمینه گردد. یک نکته کلیدی در استفاده از این روش، نزدیک بودن ابرهای نقاط است و به عبارتی این روش در صورتی که فواصل ابرهای نقاط از یکدیگر زیاد باشد کارایی خود را از دست می‌دهد. بسیاری از الگوریتم‌هایی که بر پایه روش تکرار نزدیکترین نقطه اقدام به هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط می‌نمایند در صورتیکه، دو ابر نقاط دارای همپوشانی نباشند یا استقرار اولیه ابرها نزدیک به یکدیگر نباشند، این الگوریتم‌ها در یافتن نقاط متناظر دارای ضعف بوده و نتیجه دارای دقت کافی نخواهد بود. همچنین اگر چه تعداد قابل توجهی پژوهش بر روی هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط گرفته شده از اسکنرهای لیزری صورت پذیرفته، هنوز روابط مشخصی که نشان‌دهنده رفتار همگرایی با توجه به پارامترهای شرایط اولیه متفاوت و معیارهای خطا باشد، ارائه نگردیده است. در پژوهش‌های بسیاری نشان داده شده است که میزان همگرایی الگوریتم تکرار نزدیکترین نقطه تا حد زیادی به انتخاب نقاط متناظر و تابع فاصله متکی است [12].

## 2- تعیین ویژگی‌های سطح

در پژوهش حاضر به منظور یافتن نقاط متناظر در ابرهای نقاط، از ویژگی‌های قابل استخراج از مختصات نقاط استفاده شده است. ویژگی‌های مقدار انحنای و شکل موضعی سطح در تناظرایی بکار رفته‌اند. این بخش نحوه محاسبه انحنای و تعیین شکل موضعی سطح را بیان می‌نماید. روش‌های تعیین انحنای عموماً از برازش یک سطح بر روی نقطه مورد بررسی و همسایه‌های آن استفاده می‌نمایند اما در پژوهش حاضر از انحنای چتری [13] که مقدار آن تنها از مختصات همسایه‌های نقطه مورد بررسی بدست می‌آید، استفاده شده است. برای تعیین انحنای موضعی در ابرهای نقاط، قبل از هر چیز نیاز به تعیین همسایه‌های نقطه مورد بررسی وجود دارد. روش متداول برای تعیین همسایه‌های یک نقطه در ابر نقاط، نزدیکترین  $k$  همسایه‌ها<sup>2</sup> می‌باشد. بدلیل سادگی اغلب پژوهشگران از این روش در پردازش‌های مختلف ابر نقاط

## 1-2- بردار نرمال

با توجه به اینکه همسایگی همگن و انحنای چتری از اطلاعات بردار نرمال سطح استفاده می‌نمایند، قبل از هر چیز باید در پژوهش حاضر بردار نرمال سطح با استفاده از ماتریس کوواریانس محاسبه گردد. برای یک نقطه دلخواه  $P_i \in S \subset R^3$  بردار نرمال بر اساس مختصات همسایه‌ها، تخمین زده می‌شود. همسایه‌ها با علامت  $N(P_i)$  نشان داده می‌شود و  $N$  به نزدیکترین مجاورت‌های  $k$  متعلق به  $P_i$  اشاره دارد، جایی که  $k$  با توجه به نیاز، انتخابی است. در این پژوهش از تعداد 20 همسایه برای تخمین بردار نرمال سطح استفاده شده است. برای محاسبه بردار نرمال، مرکز  $O_i$  مربوط به  $N(P_i)$  ابتدا محاسبه می‌شود.  $n_i$  بردار نرمال با استفاده از تحلیل اجزای اصلی<sup>3</sup> (PCA) تخمین زده می‌شود. برای اندازه‌گیری بردار نرمال، ماتریس مرتبط کوواریانس  $N(P_i)$  طبق رابطه (1) محاسبه می‌گردد.

$$M_{cov} = \sum_{x_i \in N(P_i)} (X_i - O_i)(X_i - O_i)^T \quad (1)$$

$X_i$  یکی از  $k$  همسایگی نقطه  $P_i$  و  $O_i$  مرکز همسایه‌ها می‌باشد.

در این روش بردار نرمال سطح از محاسبه بردار ویژه مرتبط با کمترین مقدار ویژه ماتریس کوواریانس بدست می‌آید. باید در نظر داشت که با استفاده از ماتریس کوواریانس، راستای بردار نرمال بدست می‌آید و پس از آن باید بردارهای نرمال بدست آمده یکنواخت‌سازی شده تا تمامی بردارهای نرمال در یک جهت سطح قرار گیرند. به منظور یکنواخت‌سازی بردارهای نرمال، نقاط سطح پیمایش می‌گردد و جهت بردار نرمال هر نقطه با توجه به بردار نرمال سطح نزدیکترین نقطه به آن تعیین می‌گردد. در طول پیمایش در صورتیکه ضرب اسکالر بردارهای دو نقطه همسایه کمتر از صفر گردید جهت بردار نرمال نقطه مورد بررسی با ضرب کردن بردار در  $-1$  عکس می‌گردد. شکل 3 نشان‌دهنده بردارهای نرمال سطح ابر نقاطی قبل و بعد از یکنواخت‌سازی می‌باشد.

## 2-2- همسایگی همگن

بدلیل اینکه یک ابر نقاط از تعداد قابل توجهی نقطه تشکیل گردیده و انجام یک عملیات هر چند ساده بر روی تمامی ابر نقاط امری زمانبر محسوب می‌شود، اکثر پژوهش‌گران خطاهای بوجود آمده در اثر نامتوازن بودن همسایه‌ها را در نظر نمی‌گیرند. لذا در این پژوهش تلاش گردید تا از روشی با

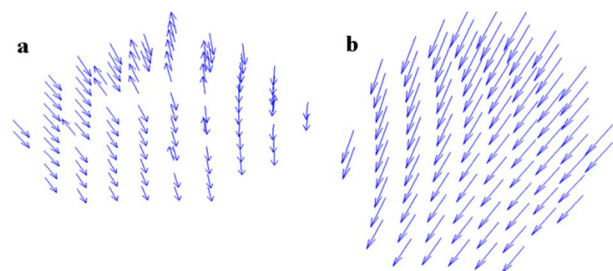


Fig. 3 Normal vectors a-before consistency b-after consistency

شکل 3 بردارهای نرمال a- قبل از یکنواخت‌سازی b- بعد از یکنواخت‌سازی

3- Principal Component Analysis

1- Iterative Closest Point (ICP)

2- k-Nearest Neighbors (k-NN)

$$Pn = (N_i - p) \cdot n \quad (3)$$

$$\text{Position No.} = \begin{cases} 1 & Pn < 0 \\ 0 & Pn = 0 \\ 2 & Pn > 0 \end{cases} \quad (4)$$

پس از تعیین عدد وضعیت برای هر 8 همسایه همگن، شماره شکل سطح با کنار هم قرار گرفتن اعداد وضعیت بوجود می‌آید. شماره‌گذاری همسایه‌های نقطه مورد بررسی باید با توجه به جهت بردار نرمال صورت پذیرد. در این پژوهش به منظور پیاده‌سازی یک روال مشخص برای شماره‌گذاری همسایه‌ها، جهت شماره‌ها در جهت بسته شدن انگشتان دست راست در حالتیکه انگشت شصت بر راستای بردار نرمال منطبق شده است، قرار گرفته است.

در شکل 6 دو نمونه از اشکال سطح و شماره شکل آنها نشان داده شده است. سطوح نشان داده شده در شکل 6 یکی بوده و فقط شماره‌گذاری همسایه‌های همگن آن متفاوت است. با توجه به وضعیت همسایه‌ها برای این سطح شماره شکل 00200020 و شماره شکل 20002000 بدست می‌آید. برای اینکه بتوان سطوح را با یکدیگر مقایسه نمود و سطوح مشابه در یک دسته قرار گیرند، شماره‌های اشکال بدست آمده به نحوی تغییر می‌یابند که

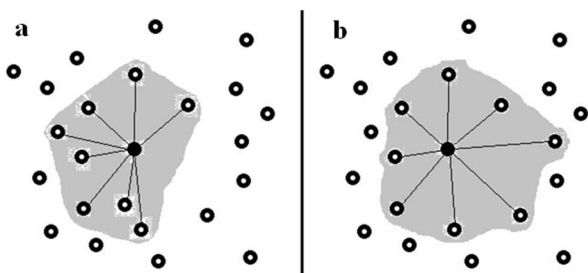


Fig. 4 a-8 nearest neighbors b-8 homogeneous neighbors

شکل 4 a-8 نزدیکترین همسایه b-8 همسایه همگن

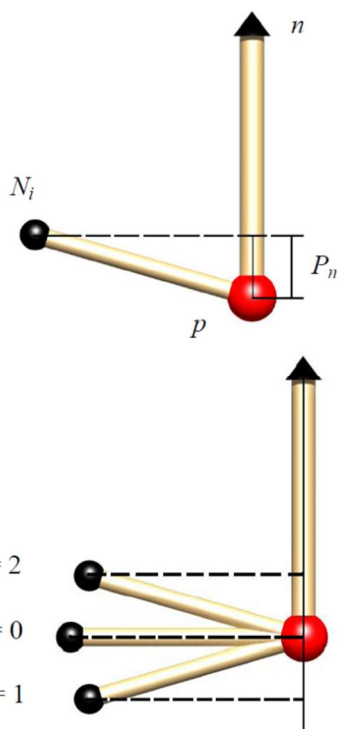


Fig. 5 How to determine the position number

شکل 5 نحوه تعیین عدد وضعیت

حجم محاسبات کم برای انتخاب همسایه‌ها استفاده گردد. بدین منظور از روش تعیین همسایگی همگن استفاده گردید. در روش همسایگی همگن با استفاده از بردار نرمال و مختصات نقطه مورد بررسی صفحه مماس بر سطح بدست می‌آید. تعداد 20 همسایه از نزدیکترین همسایه‌های نقطه مورد بررسی بر روی صفحه مماس تصویر می‌شود و سپس 8 همسایه از این بین به نحوی انتخاب می‌گردند که علاوه بر نزدیک بودن از نظر توزیع نیز یکنواخت باشند. توزیع یکنواخت همسایه‌ها در صورت محاسبه مجدد بردار نرمال به دقت آن می‌افزاید و از طرف دیگر باعث بهبود تخمین انحنای سطح می‌گردد [15]. تفاوت انتخاب همسایه‌ها با استفاده از همسایگی همگن در شکل 4 نشان داده شده است.

### 2-3- انحنا چتری

انحنای سطوح و در نظر گرفتن یک انحنا محلی برای نقاط سطح به عنوان یک ویژگی، راه دیگری را برای حل چالش‌های مرتبط با استخراج داده‌ها از ابرهای نقاط گشوده است. انحنا یک خاصیت هندسی از جزء سطح است و می‌تواند تغییرات شکل سطح را بیان نماید. انحنا نسبت به دوران و جابه‌جایی ناوردا است و تبدیلات جابه‌جایی و دوران تاثیری بر آن ندارد. در پژوهش حاضر روش جدیدی برای تعیین انحنا ابرهای نقاط تعریف گردیده که نیازی به برازش سطح بر روی نقاط نداشته و فقط از مختصات همسایگی‌ها استفاده می‌نماید. این روش جدید علاوه بر ناوردا بودن به تبدیلات جابه‌جایی و دوران نسبت به مقیاس نیز ناوردا بوده و بزرگنمایی تاثیری بر مقدار انحنا محاسبه ندارد. هدف از تخمین انحنا سطح در کار حاضر استفاده از آن در کاربردهای مرتبط با ابرهای نقاط است. برخی از این کاربردها استخراج لبه‌ها، نویزدایی ابر نقاط، بخش‌بندی ابرنقاط، کاهش داده‌ها و هم‌مرجع‌سازی ابر نقاط می‌باشند.

برای محاسبه مقدار انحنا چتری در مرحله اول با استفاده از 20 همسایگی نقطه مورد نظر توسط روش هوپ بردار نرمال سطح بدست می‌آید و پس از آن با تصویر این همسایگی‌ها بر روی صفحه مماس در آن نقطه با روش توضیح داده شده در بخش قبل تعداد 8 همسایه همگن انتخاب می‌شود. بردار نرمال تصحیح شده با استفاده از همسایگی‌های انتخاب شده مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در نهایت مقدار انحنا چتری  $k_{um}$  بر اساس جمع تصاویر بردارهای واحد تفاضل همسایگی‌ها و نقطه مورد بررسی، بر بردار نرمال سطح طبق رابطه (2) بدست می‌آید.

$$k_{um} = \sum_{i=1}^8 \text{ABS} \left( \frac{(N_i - p)}{|N_i - p|} \cdot n \right) \quad (2)$$

$n$  بردار نرمال،  $N_i$  مختصات همسایگی و  $p$  مختصات نقطه مورد بررسی است.

### 2-4- تعیین شکل موضعی سطح

به منظور تعیین شکل موضعی سطوح، برای هر یک از همسایه‌های همگن یک مقدار عددی وضعیت تصویر مشخص می‌شود. مقدار وضعیت تصویر طبق رابطه (3) مشخص می‌شود. در رابطه (3) مبین تصویر بردار تفاضل مختصات همسایگی و مختصات نقطه مورد بررسی، بر روی بردار نرمال می‌باشد. با توجه به مقدار وضعیت تصویر برای هر همسایگی یک عدد وضعیت طبق رابطه (4) مشخص می‌شود. شکل 5 نحوه انتخاب عدد وضعیت را نشان می‌دهد.

مقدار شماره شکل کمیته گردد. در شماره شکل 00200020 در صورتیکه اولین همسایه بر همسایه چهارم منطبق شود و یا شماره‌گذاری از همسایه 4 شروع گردد شماره شکل به 00020002 تغییر می‌یابد که مشخص است کمترین شماره شکلی است که با چرخش حول بردار نرمال ایجاد می‌شود. به همین شکل در صورتیکه در شماره شکل 20002000 اولین همسایه بر همسایه دوم منطبق گردد، شماره شکل به 00020002 تبدیل می‌شود. در هر دو حالت یک شماره شکل بدست می‌آید. بنابراین این روش نسبت به دوران و جابه‌جایی ناوردا محسوب می‌گردد. از طرف دیگر تمامی محاسبات عدد وضعیت و عدد شکل بر اساس راستاها انجام می‌شود، پس می‌توان این روش را نسبت به مقیاس نیز ناوردا محسوب نمود. برخی از اشکال سطح و شماره شکل آنها در شکل شماره 7 نشان داده شده است.

### 3- هم‌مرجع‌سازی

هدف از هم‌مرجع‌سازی، آوردن تصاویر متعدد از یک جسم مورد مطالعه به یک دستگاه مختصات ثابت می‌باشد بطوریکه اطلاعات دریافت شده از جهات مختلف یا از سنسورهای متفاوت یکپارچه گردد. به منظور فرموله کردن این فرآیند،  $F$  نشان‌دهنده فرآیند اسکن،  $I$  ابر نقاط و  $O$  جسم مورد بررسی فرض می‌شود. رابطه (5) می‌تواند نشانگر ارتباط بین پارامترهای مذکور باشد.

$$I = F(O) \tag{5}$$

اگر یک تصویر را قطعه قطعه کرده و قطعات آن از هم جدا شود با استفاده از روش‌های هم‌مرجع‌سازی باید بتوان مانند یک پازل قطعات را به هم چسباند و تصویر اولیه را تشکیل داد. بیان ریاضی که در مورد هم‌مرجع‌سازی بتوان ارائه نمود باید بتواند رابطه بین  $F$  ها را استخراج کند. بطور مشخص، هدف از هم‌مرجع‌سازی یافتن تبدیل صلب  $T$  است که بتواند جفت نقاط متناظر  $(p_i, q_j)$  از سطح دو شکل  $P$  و  $Q$  را بر روی یک نقطه از جسم مورد بررسی قرار دهد. این تبدیل صلب با استفاده از رابطه (6) قابل محاسبه است.

$$E(P, Q) = \iint_{\Omega} d(Tp(u, v), q(f(u, v), g(u, v)))^2 dudv \tag{6}$$

در رابطه فوق  $d$  تابع مورد استفاده جهت اندازه‌گیری فاصله بین دو نقطه می‌باشد. در صورتی که فاصله در رابطه بالا فاصله اقلیدسی فرض شود رابطه (6) به رابطه (7) تبدیل می‌گردد.

$$E(P, Q) = \iint_{\Omega} \|Tp(u, v) - q(f(u, v), g(u, v))\|^2 dudv \tag{7}$$

از این تابع معمولاً به عنوان تابع هزینه در الگوریتم‌های هم‌مرجع‌سازی استفاده می‌شود. برای هم‌مرجع‌سازی مجموعه نقاط با استفاده از فاصله نقطه به نقطه می‌توان این تابع را به شکل گسسته زیر نشان داد.

$$\forall p_i \in P, \exists q_j \in Q \mid e_i = \|Tp_i - q_j\| = 0 \tag{8}$$

در هم‌مرجع‌سازی اگر نقاط متناظر مشخص باشد، یک تخمین مناسب از تبدیل با استفاده از کمیته کردن مقدار خطا بدست می‌آید. در صورتی که تخمین اولیه وجود داشته باشد، امکان انطباق ابرهای نقاط با تبدیل مختصات یک ابر بر دیگری وجود دارد. در این پژوهش با استفاده از ویژگی‌های سطح تلاش گردید تا نقاط متناظر در ابرهای نقاط شناسایی گردد. تناظر یابی نقاط با استفاده از مقدار انحنای چتری و شکل موضعی سطح صورت پذیرفته است. در روش پیشنهادی نقاطی که دارای انحنای نزدیک به هم بوده و از شکل موضعی یکسانی برخوردار باشند، به عنوان نقاط متناظر شناخته می‌شوند. بدیهی است با توجه به حجم بالای نقاط در ابرهای نقاط برای یک نقطه

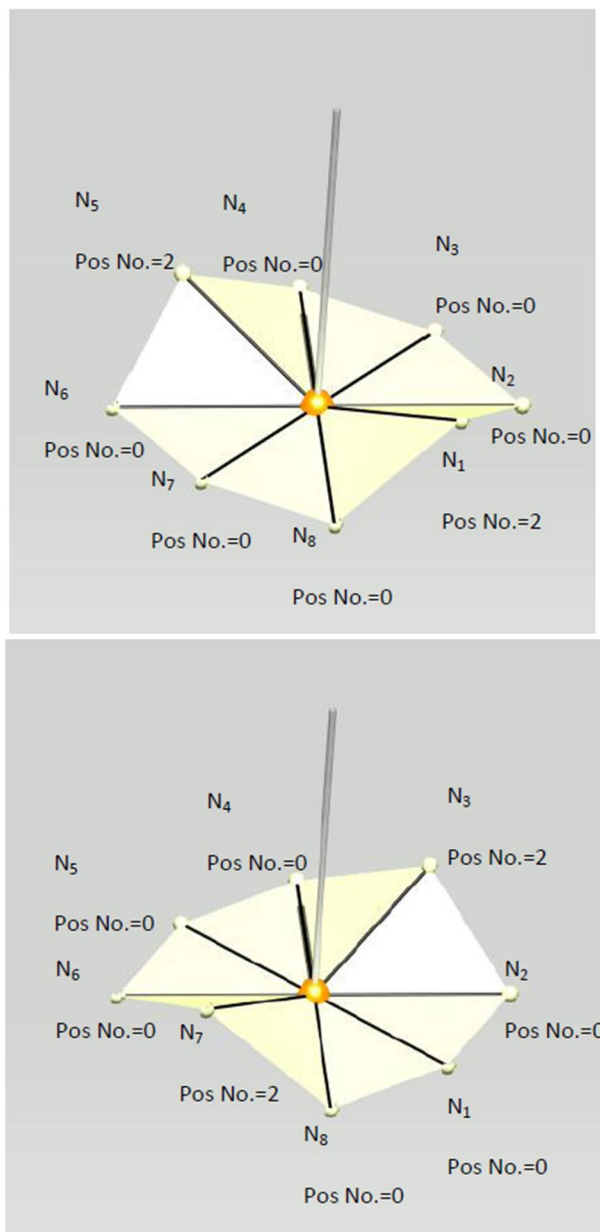


Fig. 6 How to determine the shape number

شکل 6 نحوه تعیین عدد شکل

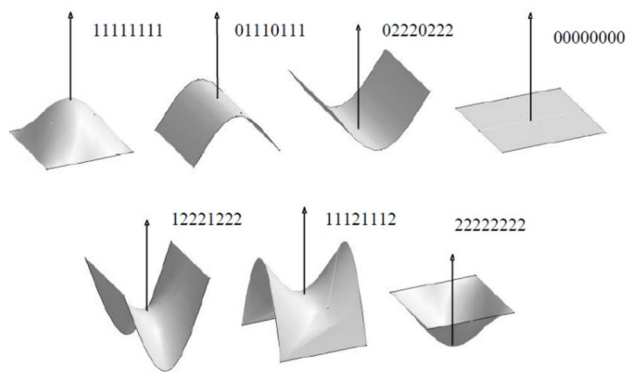


Fig. 7 Some local shapes

شکل 7 برخی اشکال سطح

مشخص، متناظرهای متعددی بدست آید. به منظور کاهش نقاط متناظر، قید

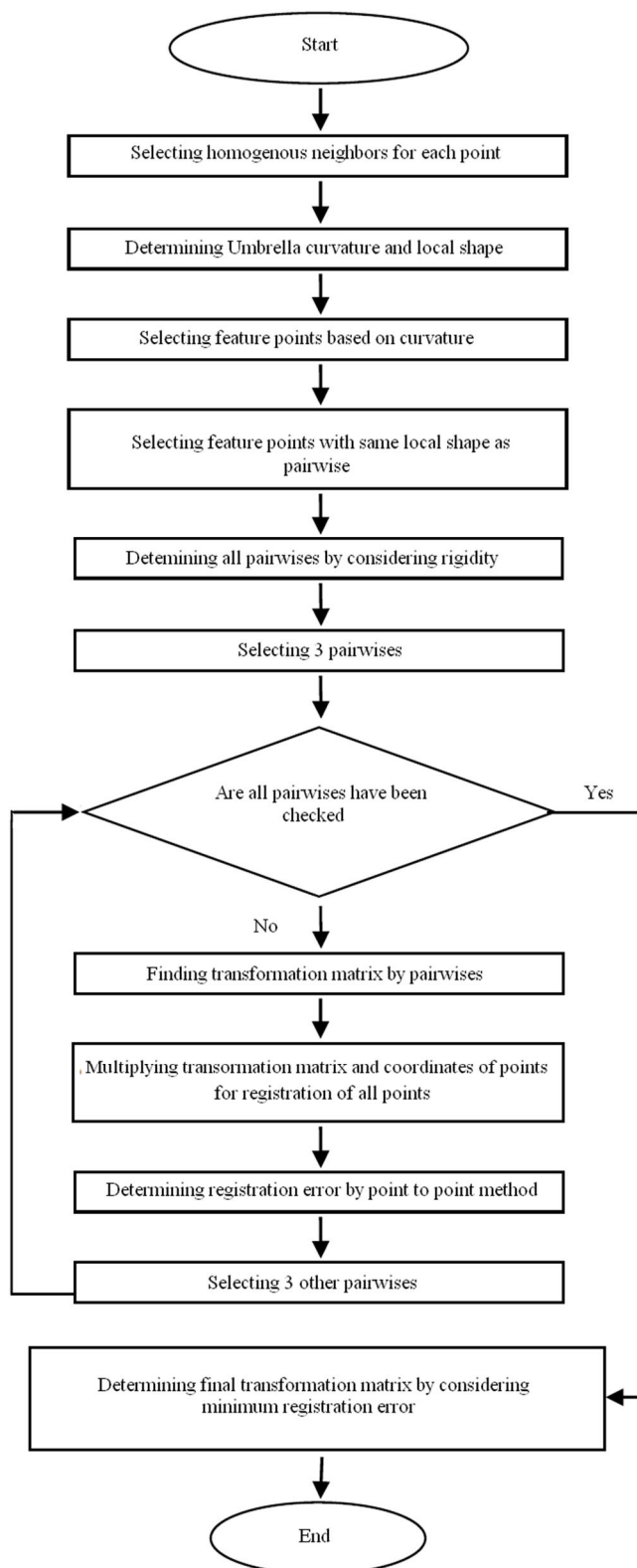


Fig. 8 Fully automatic registration flowchart

شکل 8 روندنمای هم‌مرجع‌سازی کاملاً خودکار

پذیرفته از روش نقطه به نقطه استفاده شد.

شکل 9 دو ابر نقاط از دندان انسان را قبل از هم‌مرجع‌سازی نشان می‌دهد. این ابرهای نقاط از دو اسکن متفاوت بدست آمده و ابر نقاط سمت چپ شامل 247 نقطه و ابر نقاط سمت راست دارای 213 نقطه است.

صلبیت نیز به فرآیند تناظریابی افزوده گردید. با توجه به اینکه برای هم‌مرجع‌سازی دو ابر نقاط نیاز به تعیین سه نقطه متناظر وجود دارد، فواصل نقاط متناظر انتخاب شده در ابر نقاط دوم باید تقریباً با فواصل نقاط در ابر نقاط اول برابر باشند. افزودن قید صلبیت باعث محدود شدن انتخاب‌ها می‌گردد. در مرحله بعد کلیه انتخاب‌های ممکن که نقاط متناظر قید صلبیت را نیز رعایت کرده باشند مورد بررسی قرار می‌گیرد. با داشتن 3 نقطه متناظر، ماتریس تبدیل محاسبه می‌شود. مقدار خطای هم‌مرجع‌سازی با روش نقطه به نقطه و با استفاده از رابطه 8 محاسبه می‌شود. این عمل برای تمام متناظرهای ممکن تکرار می‌شود و در هر مرحله مقدار خطا بدست می‌آید. سه نقطه متناظری که کمترین مقدار خطای هم‌مرجع‌سازی را داشته باشند به عنوان نقاط متناظر شناسایی شده و از ماتریس تبدیل آنها برای هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط استفاده می‌شود. روند نمای روش هم‌مرجع‌سازی پیشنهادی در شکل 8 نشان داده شده است.

#### 4- بحث و نتایج

هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط با استفاده از روش‌های متفاوتی توسط پژوهشگران انجام شده است. روش تکرار نزدیکترین نقطه یکی از معمول‌ترین روش‌ها برای انطباق اشکال مختلف سه بعدی با هندسه‌های متفاوت است. این روش به شکل گسترده‌ای برای هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط بکار می‌رود و تا کنون روش‌های متنوعی بر اساس روش پایه تکرار نزدیکترین نقطه به وجود آمده است [16]. در روش‌های تکراری، با استفاده از یک تخمین اولیه ماتریس تبدیل بین دو ابر نقاط تشکیل می‌شود. سپس در هر بار تکرار با کمینه کردن مقدار خطا، که فاصله بین نقاط است، یک دوران و چرخش جدید پیشنهاد می‌گردد و این فرآیند تا حصول بهترین تبدیل با کمترین مقدار خطا ادامه می‌یابد. از آنجایی که کیفیت هم‌مرجع‌سازی انجام شده با این الگوریتم، به مقدار زیادی وابسته به انتخاب جفت نقاط متناظر از دو مجموعه نقاط می‌باشد، یک مساله کلیدی در روش تکرار نزدیکترین نقطه چگونگی تعریف نزدیکترین نقطه است. به منظور بهبود روش تکرار نزدیکترین نقطه انواع مختلف از این روش با تعریف‌های مختلف از نزدیکترین نقطه توسعه یافته‌اند. بررسی روزینکیوویکز و لیوی [17] در مورد انواع روش‌های تکرار نزدیکترین نقطه منجر به طبقه‌بندی برخی از این روش‌ها گردید. روش‌های تکرار نزدیکترین نقطه بر پایه نحوه تعیین خطای فاصله به دسته‌های نقطه به نقطه، نقطه به صفحه و نقطه به تصویر تقسیم می‌شوند.

خطای فاصله نقطه به نقطه به دلیل عدم مد نظر قرار دادن اطلاعات سطح، قادر به هم‌مرجع‌سازی سطوحی که بر روی هم لغزیده‌اند نمی‌باشد و از طرف دیگر الگوریتم‌هایی که از این روش استفاده می‌نمایند در صورت وجود نویز امکان همگرایی آن‌ها به بهینه‌های محلی افزایش می‌یابد. بر اساس پژوهش‌هایی که بر روی توابع مربع فواصل منحنی‌ها و سطوح انجام پذیرفته است، روش نقطه به نقطه فقط در شرایطی که مجموعه‌های نقاط به طرز مناسبی از حیث جهت تنظیم گردیده و فاصله بین آن‌ها در اثر انتقال باشد جواب‌های مطلوبی می‌دهد. همانگونه که ذکر گردید تخمین اولیه مناسب برای اجتناب از همگرا شدن الگوریتم تکرار نزدیکترین نقطه به بهینه‌های محلی الزامی است که می‌توان از این جمله اینگونه استنباط نمود که ابرهای نقاط در این الگوریتم باید به هم نزدیک باشند. با توجه به مشکلات مذکور در روش‌های هم‌مرجع‌سازی که عموماً مانع از کاملاً خودکار شدن فرآیند می‌شوند، همانگونه که قبلاً توضیح داده شد در این پژوهش روش جدید بر پایه اطلاعات سطح ارائه گردید و تنها برای ارزیابی هم‌مرجع‌سازی صورت

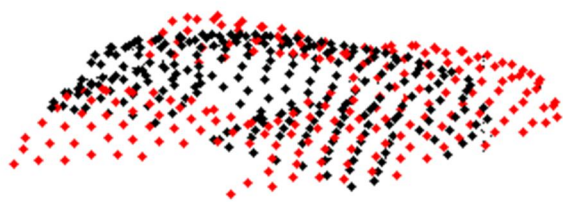


Fig 12. Registered tooth point clouds

شکل 12 ابرهای نقاط دندان هم‌مرجع شده

استفاده از روش پیشنهادی 1.3137 میلی‌متر بدست آمد. مقدار خطا در حالتی که ابرهای نقاط با کمک میز گردان هم‌مرجع شدند، برابر 0.4483 میلی‌متر بدست آمد. میز گردان مورد استفاده از نوع کومت روتاری<sup>1</sup> با قابلیت چرخش حول محور میز و ساخت شرکت اشتین‌بیچلر<sup>2</sup> می‌باشد، که امکان چرخش قطعه حین اسکن با رزولوشن 5 دقیقه را فراهم می‌آورد.

به منظور بررسی کارآمد بودن الگوریتم، دو ابر نقاط بدست آمده از دو اسکن متفاوت از یک نمونه قطعه هیدروفورمینگ شده با استفاده از روش پیشنهادی هم‌مرجع‌سازی شدند. شکل 13 دو ابر نقاط را قبل از هم‌مرجع‌سازی نشان می‌دهد. این ابرهای نقاط از دو اسکن متفاوت بدست آمده و ابر نقاط سمت چپ شامل 2833 نقطه و ابر نقاط سمت راست دارای 2760 نقطه است. میانگین فاصله بین نقاط حدوداً 1 میلی‌متر است. با توجه به روش ارائه شده برای شناسایی نقاط ویژگی، در ابتدا نقاط ویژگی ابرهای نقاط مشخص شدند. از میان نقاط ویژگی با کمک قید صلیبیت، سه جفت نقطه متناظر مشخص می‌شوند. نقاط متناظر منحصر به فرد نبوده و برای ابرهای نقاط بسته به سطوح با انحنا مشابه تعدادی از دسته نقاط متناظر بدست می‌آید. برای ابرهای نقاط نشان داده شده در شکل 13 تعداد 171 دسته نقاط متناظر بدست آمد. برای هر دسته از نقاط متناظر ماتریس تبدیل بدست آمده و عمل هم‌مرجع کردن بر روی ابرهای نقاط اندازه گیری می‌شود. با استفاده از روش نقطه به نقطه میانگین فواصل نقاط بدست می‌آید. کمترین مقدار خطا که میانگین فاصله نقطه به نقطه ابرهای نقاط است با استفاده از روش پیشنهادی برای ابرهای نقاط قطعه هیدروفورمینگ شده 1.9428 میلی‌متر بدست آمد. مقدار خطا در حالتیکه ابرهای نقاط با کمک میز گردان هم‌مرجع شدند، برابر 0.4307 میلی‌متر بدست آمد. اشکال 14 و 15 هم‌مرجع‌سازی انجام شده توسط روش پیشنهادی و با کمک میز گردان را نشان می‌دهند.

### 5- نتیجه گیری

عموم روش‌هایی که برای هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط معرفی گردیده‌اند، نیاز

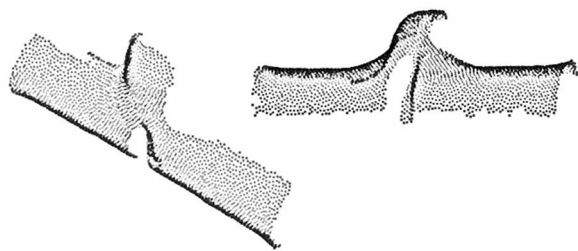


Fig. 13 Hydroforming work piece point clouds

شکل 13 ابرهای نقاط نمونه هیدروفورمینگ شده

1- Comet Rotary  
2- Steinbichler

میانگین فاصله بین نقاط حدوداً 1 میلی‌متر است.

بر اساس روش پیشنهادی در بخش قبلی، ویژگی‌های نقاط هر ابر نقاط بدست آمده و با استفاده از ویژگی‌ها و قید صلیبیت سه جفت نقطه متناظر مشخص می‌شوند. نقاط متناظر منحصر به فرد نبوده و برای ابرهای نقاط بسته به سطوح با انحنا مشابه تعدادی از دسته نقاط متناظر بدست می‌آید. یک دسته نقاط متناظر برای ابرهای نقاط دندان در شکل 10 نشان داده شده است. برای هر دسته از نقاط متناظر، ماتریس تبدیل بدست آمده و عمل هم‌مرجع کردن بر روی ابرهای نقاط اندازه گیری می‌شود. با استفاده از روش نقطه به نقطه میانگین فواصل نقاط بدست می‌آید. در شکل 11 مقدار خطای هم‌مرجع‌سازی برای 22 دسته نقاط متناظر متفاوت نشان داده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده برای خطای هم‌مرجع‌سازی به روش نقطه به نقطه، ماتریس تبدیل مرتبط با کمترین مقدار خطا به عنوان ماتریس تبدیل هم‌مرجع‌سازی انتخاب می‌شود. شکل 12 ابرهای نقاط را پس از هم‌مرجع‌سازی نشان می‌دهد. کمترین مقدار خطا که میانگین فاصله نقطه به نقطه ابرهای نقاط است با

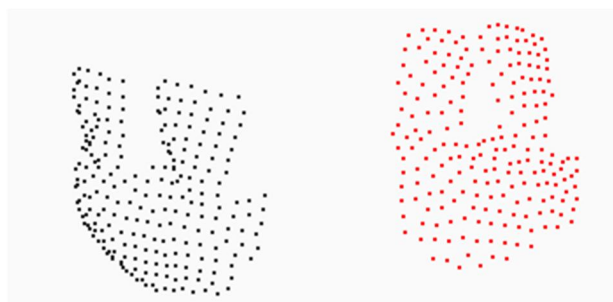


Fig. 9 Tooth point clouds before registration

شکل 9 ابرهای نقاط دندان قبل از هم‌مرجع‌سازی

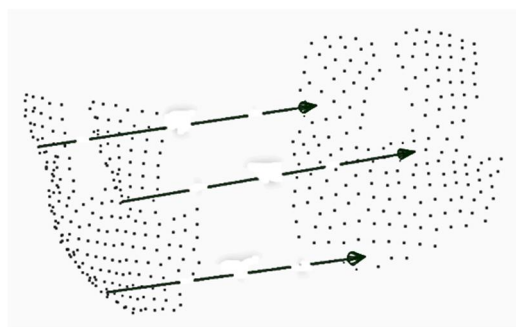


Fig. 10 Pairwise points

شکل 10 دسته نقاط متناظر

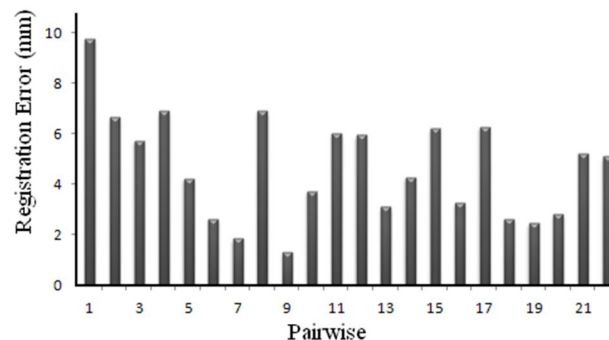


Fig. 11 Registration error tooth point clouds

شکل 11 خطای هم‌مرجع کردن ابرهای نقاط دندان

## 6- مراجع

- [1] D. O. Yang, H. Feng, On the normal vector estimation for point cloud data from smooth surface, *Computer-Aided Design*, Vol. 37, No. 10, pp. 1071–1079, 2005.
- [2] H. Woo, E. Kang, S. Wang, KH. Lee, A new segmentation method for point cloud data, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 2, pp. 167–178, 2002.
- [3] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, W. Stuetzle, Surface reconstruction from unorganized points, *Proceedings of the 19th annual conference on computer graphics and interactive techniques*, New York: ACM, pp.1. 71–80, 1992.
- [4] X. Zexiao, X. Shang, L. Xuyong, A high-accuracy method for fine registration of overlapping point clouds, *Image and Vision Computing*, Vol. 28, No. 4, pp. 563–570, 2010.
- [5] G. Schauler, HW. Jensen, Ray tracing point sampled geometry, *Proceedings of the 11th eurographics workshop on rendering*, London: Springer-Verlag, pp. 319–328, 2000.
- [6] B. He, Z. Lin, Y. F. Li, An automatic registration algorithm for the scattered point clouds based on the curvature feature, *Optics & Laser Technology*, Vol. 46, No. 1, pp. 53–60, 2013.
- [7] C. Kim, H. Son, C. Kim, Fully automated registration of 3D data to a 3D CAD model for project progress monitoring, *Automation in Construction*, Vol. 35, No. 1, pp. 587–594, 2013.
- [8] J. Chen, X. Wu, M. Wang, X. Li, 3D shape modeling using a self-developed hand-held 3D laser scanner and an efficient HT-ICP point cloud registration algorithm, *Optics & Laser Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 414–423, 2013.
- [9] D. Akca, Full automatic registration of laser scanner point clouds, *ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry*, vol.1, No. 1, pp. 330-337, 2003.
- [10] P.J. Besl, N.D. McKay, A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, 1992.
- [11] Y. Chen, G. Medioni, Object modeling by registration of multiple range images, *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No.3, pp. 145-155, 1992.
- [12] G. Tam, Z. Cheng, D. Marshall, R. Martin, X. Sun, P. Rosin, Registration of 3D point clouds and meshes: A survey from rigid to non-rigid, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 19, No. 7, 2013.
- [13] A. Foorginejad, K. Khalili, Point clouds curvature estimation using umbrella curvature, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 227-235, 2015 (in Persian فارسی)
- [14] J. C. Park, H. Shin, B. K. Choi, Elliptic gabriel graph for finding neighbors in a point set and its application to normal vector estimation, *Computer-Aided Design*, Vol. 38, No. 6, pp. 619–626, 2006.
- [15] A. Foorginejad, K. Khalili, Using homogeneous neighborhood in point clouds normal vector calculation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 155-163, 2014. (in Persian فارسی)
- [16] J. Dong, Y. Peng, S.Ying, Z. Hu, LieTrICP: An improvement of trimmed iterative closest point algorithm, *Neurocomputing*, Vol. 140, No. 1, pp.67–76, 2014.
- [17] S. Rusinkiewicz, M. Levoy, Efficient variant of the ICP algorithm. *Proceedings of 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*, Quebec City, Que: IEEE, pp. 145–152, 2001.

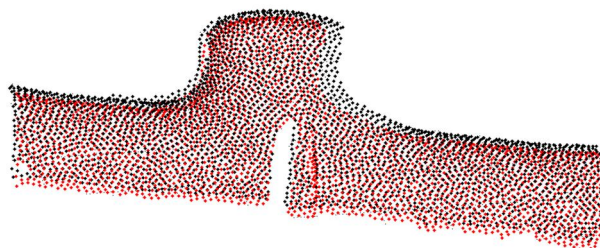


Fig. 14 Registered by using rotary table

شکل 14 هم‌مرجع شده با استفاده از میز گردان

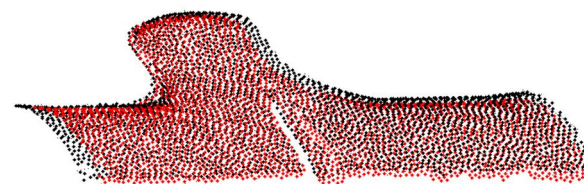


Fig. 15 Registered by proposed method

شکل 15 هم‌مرجع شده توسط روش پیشنهادی

به یک تخمین اولیه مناسب از تبدیل دستگاه‌های مختصات بین ابرهای نقاط دارند. در این پژوهش روشی بر پایه اطلاعات سطح ابر نقاط ارائه گردید که قادر است به شکل کاملاً خودکار هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط را با استفاده از ویژگی‌های سطح انجام دهد. تناظرایی در الگوریتم پیشنهادی با بررسی نقاطی که از مقدار انحنای چتری بیشتری برخوردار بوده و شکل موضعی یکسانی داشتند، انجام گردید و دسته‌هایی از نقاط متناظر با در نظر گرفتن قید صلبیت بین نقاط مشخص شدند. با بررسی خطای هم‌مرجع‌سازی برای این دسته‌های نقاط متناظر، تبدیل مناسب برای هم‌مرجع‌سازی ابرهای نقاط بدست آمد. نتایج حاصل نشان از کاربردی بودن روش پیشنهادی در حل مساله هم‌مرجع‌سازی دارد.