



روش جدید نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات مجهز به پراب تماسی

جواد زحمتی¹، حسین امیرآبادی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، hamirabadi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 اردیبهشت 1395

پذیرش: 20 تیر 1395

ارائه در سایت: 24 مرداد 1395

کلید واژگان:

بازرسی

سطوح با فرم آزاد

استراتژی های نمونه برداری

بهینه سازی

ماشین اندازه گیری مختصات

چکیده

سطوح با فرم آزاد، به شکل وسیعی در کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می گیرند. این سطوح، سطوحی پیچیده بدون تقارن محوری می باشند به همین دلیل بازرسی چنین سطوحی به وسیله ماشین های اندازه گیری مختصات مجهز به حسگر (پراب) تماسی، نیازمند استراتژی نمونه برداری مناسبی می باشد. استراتژی نمونه برداری یکی از عوامل اصلی ایجاد خطا روی هندسه جایگزین می باشد. در ماشین های اندازه گیری مختصات استراتژی نمونه برداری تعداد نقاط نمونه (اندازه نمونه) و موقعیت (نحوه توزیع) این نقاط را روی سطح تعیین می کند. بنابراین، نقاط نمونه باید توسط استراتژی های متناسب با سطح و با در نظر گرفتن ویژگی های سطح، روی سطح توزیع شوند. اغلب استخراج چنین اطلاعاتی (تعداد و نحوه توزیع نقاط نمونه روی سطح) به دلیل ماهیت پیچیده سطوح با فرم آزاد، با مشکلاتی روبرو می باشد. در کار حاضر برای اولین بار یک استراتژی نمونه برداری تطبیق پذیر با استفاده از الگوریتم بهینه ساز توده ذرات جهت نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد، پیشنهاد شده است. استراتژی پیشنهادی با دو استراتژی رایج نمونه برداری از سطح، مقایسه و انحراف بین هندسه جایگزین و مدل CAD، استخراج شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد در روش پیشنهادی انحراف بین هندسه جایگزین و مدل CAD، دو تا سه برابر (بسته به تعداد نقاط نمونه) کمتر از روش های مرسوم می باشد، بنابراین اثر بخشی بالای روش پیشنهادی را نسبت به سایر روش ها، نشان می دهد.

New sampling method of free-form surfaces on coordinate measuring machine equipped with contact probe

Javad Zahmati, Hossein Amirabadi*

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

* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 April 2016
Accepted 10 July 2016
Available Online 14 August 2016

Keywords:
Inspection
Free-form Surfaces
Sampling Strategies
Optimization
Coordinate Measuring Machine

ABSTRACT

Free-form surfaces are widely used in engineering applications. These surfaces are complex and without rotational symmetry; and for this reason they are inspected using the coordinate measuring machines equipped with contact sensor which require a suitable sampling strategy. Sampling algorithms are one of the most important factors of error creation in the accuracy of substitute geometry. In coordinate measuring machines, the sampling strategy involves the estimation of the number of sample points (sample size) and identification of their positions (how they are distributed) on the surface. Thus sample points should be distributed on the surface using sampling strategies that are appropriate for the surface. Often it is difficult to establish such pieces of information (number and the way of distributing the points on the surface) owing to the complex nature of free-form surfaces. In the present work, for the first time a new adaptive sampling strategy by particle swarm optimization algorithm (PSO) for sampling from free-form surface is proposed. The proposed strategy was compared with two conventional strategies and the deviation between substitute geometry and CAD model is extracted. The simulation results showed that in the proposed method the deviation between substitute geometry and CAD model is less than conventional methods by 2 to 3 times (depending on the number of points). Therefore, the high efficiency of the proposed method over other methods is concluded.

1- مقدمه

الزامی می باشد. در صنعت بازرسی قطعات دارای سطوح با فرم آزاد، به دو روش تماسی² و غیر تماسی³ صورت می پذیرد [1]. علی رغم پیشرفت روش های غیر تماسی در سال های اخیر، روش های تماسی هنوز هم جایگاه ویژه ای در فرآیند تولید دارند و عملیات بازرسی را با دقت بالاتری نسبت به روش های

امروزه تولید قطعات دارای سطوح با فرم آزاد¹ در صنایع مختلف از جمله هوافضا، اتومبیل سازی، قالب سازی، پزشکی و غیره کاربرد فراوانی یافته است. با توجه به ترانس های دقیق این قطعات، متعاقباً تضمین کیفیت آنها نیز

² Contact method

³ Non-Contact method

¹ Free-form surfaces

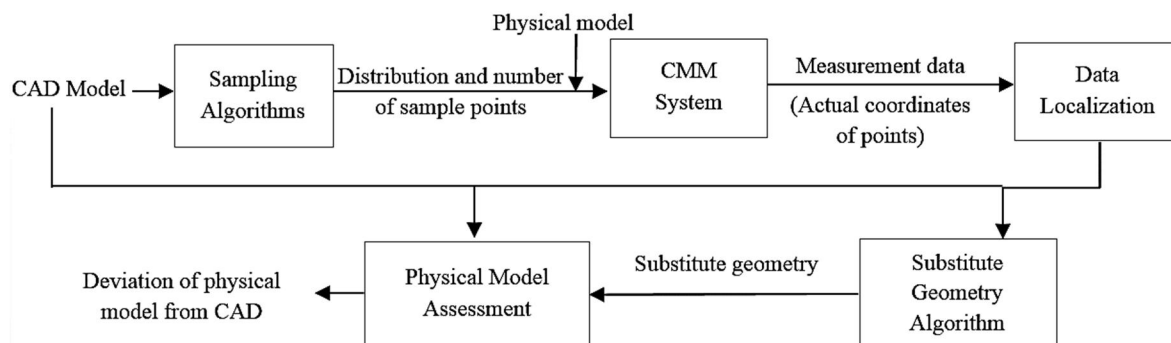


Fig. 1 free-form inspection procedure on CMM [3]

شکل 1 روند بازرسی سطوح با فرم آزاد به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات [3]

نظر گرفته نمی شود، بنابراین برای ایجاد هندسه دقیق تر باید تعداد نقاط نمونه روی سطح افزایش یابد؛ این امر سبب افزایش زمان و هزینه بازرسی می شود. از جمله این استراتژی های، استراتژی های نمونه برداری با توزیع یکنواخت⁵، تصادفی⁶، همرفلی⁷ را می توان نام برد.

2- استراتژی های نمونه برداری تطبیق پذیر⁸ در استراتژی های نمونه برداری تطبیق پذیر، هندسه جایگزین از دقت بالاتری نسبت به استراتژی های نمونه برداری کورکورانه (در تعداد نقاط نمونه برابر) برخوردار می باشند. در این استراتژی ها فرآیند توزیع نقاط نمونه برداری روی سطح، با تعداد نقاط نمونه محدودی آغاز می شود، سپس تا رسیدن به برخی معیارها (یعنی، انحراف هندسی محاسبه شده تغییر چندانی نداشته باشد و یا رسیدن اندازه نمونه بیشینه) افزودن نقاط نمونه روی سطح، ادامه می یابد. از آنجاییکه در بازسازی سطوح با فرم آزاد، بیشترین انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD در نواحی با انحنای بیشتر می باشد، این استراتژی ها جهت توزیع نقاط نمونه بیشتر روی این نواحی تمرکز دارند؛ این بدین معناست که استراتژی های نمونه برداری تطبیق پذیر روش هایی هستند که به پیدا کردن نواحی با احتمال خطای بیشتر، کمک می کند و به لحاظ دقت و زمان بازرسی نسبت به استراتژی نمونه برداری کورکورانه اثربخشی بالاتری دارند.

شانون [6] اولین و ساده ترین روش نمونه برداری، را که روش نمونه برداری یکنواخت است، معرفی کرد. از این روش به دلیل پیاده سازی آسان، به عنوان روش نمونه برداری پیش فرض در بسیاری از ماشین های اندازه گیری مختصات امروزی استفاده می شود.

در سال 1964 تئوری توالی همرفلی⁹ مطرح شد [7]. برای اولین بار وو و همکاران [8] از این توالی، در نمونه برداری از سطوح استفاده کردند.

کیم و رامان [9] با ارائه چهار استراتژی نمونه برداری، نحوه توزیع نقاط نمونه را روی سطوح بررسی کردند. آنها استراتژی های نمونه برداری با توزیع یکنواخت، نمونه برداری تصادفی، نمونه برداری با استفاده از توالی همرفلی و نمونه برداری با استفاده از توالی هالتون-زارمبا¹⁰، را برای توزیع نقاط روی سطوح بکار گرفتند. نتایج بررسی های آنها نشان داد، افزایش تعداد نقاط نمونه تا یک مقدار مشخص، سبب بالا رفتن دقت سطح بازسازی شده¹¹ می شود.

در روش های یاد شده، نمونه برداری از سطوح بدون توجه به پیچیدگی سطح انجام می شود. این در حالی است که، در فرآیند نمونه برداری سطوح با

غیرتماسی انجام می دهند [2]. در روش تماسی فرآیند بازرسی سطوح به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات دارای پراب تماسی به شکل نقطه به نقطه انجام می شود. در مرحله بعد این نقاط جهت بازسازی مدل قطعه ماشین کاری شده مورد استفاده قرار می گیرند. در نهایت این مدل با مدل CAD مقایسه شده و انحراف مدل قطعه ماشین کاری شده نسبت به مدل CAD گزارش می شود [3]. در شکل 1 روند بازرسی سطوح با فرم آزاد به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات نمایش داده شده است.

از آنجاییکه ماشین های اندازه گیری مختصات، سطح را نقطه به نقطه اندازه گیری می کنند، به همین دلیل بازدهی نسبتاً پایین تری در مقایسه با روش های نوری دارند [4]. به خصوص در سطوح با فرم آزاد که نیازمند سرعت و دقت اندازه گیری بالایی هستند. الگوریتم های نمونه برداری یکی از عوامل مهم ایجاد خطا به روی دقت هندسه جایگزین هستند، بنابراین جهت افزایش راندمان ماشین اندازه گیری مختصات در فرآیند نمونه برداری از سطح باید بتوان با حداقل نقاط نمونه¹، هندسه جایگزینی² ایجاد کرد که کمترین انحراف هندسی را نسبت به مدل CAD، داشته باشد. لازم به ذکر است عملیات نمونه برداری از سطح قبل از انجام بازرسی قطعه شبیه سازی و خطای مربوط به آن کمینه می شود که این خطا مجزا از خطاهای ساخت و اندازه گیری می باشد. الگوریتم های نمونه برداری نحوه توزیع نقاط نمونه را روی سطح تعیین می کنند و تأثیر مستقیم روی دقت هندسه جایگزین ایجاد شده از مدل CAD دارند [5]. از آنجاییکه این الگوریتم ها خطای خاص خود را دارند در این پژوهش به بررسی عددی این الگوریتم ها پرداخته شده است؛ ما از الگوریتم بهینه ساز توده ذرات³ (معروف به الگوریتم پرندگان) جهت به دست آوردن بهترین توزیع نقاط نمونه روی یک سطح با فرم آزاد، استفاده نموده ایم. در الگوریتم پیشنهادی نقاط با استفاده از هوش جمعی به نحوی روی سطح حرکت می کنند که انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD کمینه شود. لازم به ذکر است، در کار حاضر الگوریتم توده ذرات برای اولین بار در فرآیند نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد به کار گرفته شده است.

تا کنون استراتژی های زیادی در زمینه نحوه توزیع نقاط نمونه روی سطوح با فرم آزاد، ارائه شده است. در مجموع استراتژی های نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد به دو دسته کلی تقسیم می شوند [5]:

1- استراتژی های نمونه برداری کورکورانه⁴:

در این استراتژی ها، به هنگام توزیع نقاط نمونه روی سطح پیچیدگی سطح در

⁵ Uniform sampling strategy

⁶ Random sampling strategy

⁷ Hammersley sampling strategy

⁸ Adaptive sampling strategies

⁹ Hammersley sequence

¹⁰ Halton- Zaremba sequence sampling

¹¹ Reconstructed surface

¹ Sample points

² Substitute geometry

³ Particle Swarm Optimization Algorithm (PSOA)

⁴ Blind sampling strategies

از استراتژی‌های پیشنهادی بسته به ویژگی سطوح مورد بازرسی روی سطوح خاصی پاسخگو خواهند بود.

اوبیدنت و رامان [14] سه الگوریتم ابتکاری برای توزیع نقاط روی تکه سطح پیشنهاد دادند. آنها نقاط با میانگین انحنای گوسی بیشینه، متوسط و مینیمم هر تکه سطح را به عنوان نقاط بحرانی در نظر گرفتند. در الگوریتم اول، سه نقطه اول مربوط به هر تکه سطح در نقاط بحرانی آن تکه سطح موقعیت-دهی می‌شد، سپس نقاط نمونه بعدی در تکه سطح‌هایی با تراکم نقاط کمتر قرار می‌گرفت. در الگوریتم دوم نقاط اولیه مطابق با الگوریتم اول توزیع می‌شدند، سپس نقاط باقی‌مانده بر اساس اندازه تکه سطح‌ها روی سطح موقعیت-دهی می‌شد. الگوریتم سوم ابتدا نقاط نمونه را بر اساس نسبت انحنای گوسی متوسط تکه سطح توزیع کرده سپس نقاط نمونه بعدی را بر اساس نسبت تکه سطح توزیع می‌کرد.

راجاماهون و همکاران [15] دو استراتژی جدید توزیع نقاط نمونه بر اساس مساحت یکنواخت سطح و همچنین بر پایه نقاط برجسته⁵ ارائه دادند. یو و همکاران [16] با در نظر گرفتن تفاوت هندسی موجود بین مدل CAD و مدل ماشین کاری شده (بدلیل وجود خطاهای متفاوت در فرآیند ماشین کاری)، یک استراتژی نمونه برداری تطبیق پذیر بر اساس مدل خطای فرم⁶ جهت بازرسی سطوح با فرم آزاد توسط ماشین اندازه گیری مختصات معرفی کردند. آنها در نظر گرفتند که نواحی با انحنای گوسی بیشتر خطای فرم بیشتری در فرآیند ماشین کاری دارند بنابراین، با اضافه کردن این خطای فرم به مدل CAD، یک مدل خطای فرم ایجاد و نهایتاً نقاط نمونه برداری را از روی این مدل استخراج کردند. این استراتژی نمونه برداری با دو روش شناخته شده نمونه برداری یکنواخت و نمونه برداری بر اساس متوسط انحنای گوسی تکه سطح مقایسه شد، نتایج حاصل از آزمایشات دقت بیشتر روش پیشنهادی آنها را اثبات کرد.

پونیاوسکا [17] روشی جدیدی جهت بازرسی قطعات مشابه دارای سطوح با فرم آزاد به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات پیشنهاد داد. در روش پیشنهادی ایشان ابتدا قطعه اول با توزیع 625 نقطه با فواصل مساوی روی دستگاه اندازه گیری مختصات بازرسی گردید؛ در مرحله بعد مدل انحراف⁷ قطعه ماشین کاری شده که حاوی خطاهای سیستماتیک⁸ و خطای تصادفی⁹ ایجاد شد. سپس اجزای تصادفی از مدل انحراف حذف، تا نهایتاً به مدل سطح قطعه¹⁰ (مدل ماشین کاری شده) برسد.

در نهایت در مدل سطح قطعه نواحی بحرانی (نواحی با انحراف بیشتر) شناسایی شدند و در قطعات بعدی فقط نقاط بحرانی مشخص شده، مورد بازرسی قرار گرفتند. از جمله محاسن این سیستم عبارتند از:

- 1- برازش سطح از روی نقاط اندازه گیری در قطعات بعدی نیاز نیست.
- 2- بازرسی تمام سطح در قطعات بعدی ضرورت ندارد (فقط نواحی با احتمال خطای بیشتر بازرسی می‌شود).

موضوع اصلی بیشتر تحقیق‌های صورت گرفته پیدا کردن بهترین نحوه توزیع نقاط نمونه روی سطح می‌باشد. این توزیع باید به نحوی باشد که هندسه جایگزین ایجاد شده از این نقاط تا حد ممکن به مدل CAD نزدیک باشد. بیشتر تحقیق‌ها با توجه به ویژگی‌هایی سطح همانند انحنا و اندازه تکه سطح-ها، بهترین توزیع نقاط روی سطوح با فرم آزاد را بدست آورده‌اند. اشکالات

فرم آزاد به دلیل پیچیدگی بالای این سطوح، توزیع نقاط نمونه باید به نحوی باشد که هندسه جایگزین حاصل از برازش این نقاط کمترین انحراف را از مدل CAD داشته باشد. همین امر باعث شد پژوهشگران با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی مانند انحنا و اندازه تکه سطح¹ سطوح با فرم آزاد، روش‌های جدیدی برای نمونه برداری از این سطوح به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات ارائه دهند. این روش‌ها با عنوان استراتژی‌های نمونه برداری تطبیق پذیر جهت نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد شناخته می‌شوند که با توجه به ویژگی‌های سطح، نحوه توزیع نقاط را روی سطح به دست می‌آورند.

چو و کیم [10] استراتژی نمونه برداری بر اساس انحنای متوسط سطح را پیشنهاد دادند. آنها سطح را به زیر بخش‌های (با شبکه منظم) تقسیم و این زیر بخش‌ها را بر اساس انحنای متوسطشان رتبه بندی کردند سپس، نقاط نمونه در بخش‌هایی که انحنای بیشتری دارند، توزیع شدند. در نهایت روش پیشنهادیشان را با استراتژی‌های نمونه برداری با توزیع یکنواخت مقایسه کردند. نتایج اثر بخشی توزیع نقاط بر اساس انحنا را نشان داد.

پاک و همکاران [11] سه استراتژی نمونه برداری یکنواخت، نمونه برداری وابسته به انحنا و نمونه برداری ترکیبی را پیشنهاد دادند. استراتژی توزیع یکنواخت نقاط را در وسط شبکه سطح قرار می‌داد، استراتژی نمونه برداری وابسته به انحنا از انحنای نرمال² استفاده کرده و نقاط را در نواحی با انحنای نرمال بیشتر، موقعیت دهی می‌کرد. روش ترکیبی نقاط نمونه را با یک نسبت تعریف شده توسط کاربر بین روش‌های توزیع وابسته به انحنا و یکنواخت، توزیع می‌کرد. نتایج نشان داد، هندسه جایگزین ایجاد شده توسط استراتژی پیشنهادی آنها نسبت به استراتژی نمونه برداری یکنواخت، دقت بالاتری دارد. اینسورد و همکاران [12] سه معیار را جهت نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد پیشنهاد کردند؛ معیار اول: معیار طول وتر که بیشترین انحراف وتر را بین خطی که از اتصال دو نقطه حاصل می‌شود و مدل CAD را تعیین می‌کرد؛ این معیار باعث می‌شد در الگوریتم نمونه برداری نواحی که انحنای بیشتری دارند، خطای وتر بیشتری نسبت به مدل CAD ایجاد کنند، بنابراین نقاط بیشتری در این نواحی توزیع می‌شد. معیار دوم: معیار کمترین تعداد نقاط نمونه که بیشترین فاصله مجاز بین دو نقطه که در همسایگی هم هستند را تعیین و نقاط نمونه را بر این اساس توزیع می‌کنند و در نهایت معیار سوم: معیار نمونه برداری بر اساس پارامتری کردن³ است که در این معیار، تعداد نقاط نمونه برداری لازم در هر بخش از سطح، توسط کاربر تعیین می‌گردد.

الکات و همکاران [13] چند استراتژی نمونه برداری جدید بر اساس ویژگی‌های سطح ارائه دادند. آنها سطوح با فرم آزاد را با توجه به بردار گرگی به تکه سطح‌هایی تقسیم کردند، سپس متوسط انحنای گوسی⁴ را برای هر تکه سطح به دست آوردند. استراتژی نمونه برداری اول متناسب با اندازه (مساحت) تکه سطح نقاط نمونه را روی سطح توزیع می‌کرد. استراتژی نمونه برداری دوم بر اساس متوسط انحنای گوسی تکه سطح، نقاط نمونه را روی سطح توزیع می‌کرد؛ بدین صورت که، ابتدا تکه سطح‌ها را بر اساس متوسط انحنای گوسی‌شان رتبه بندی کرده سپس تکه سطح با رتبه بالاتر، سهم بیشتری از نقاط نمونه را می‌گرفت. استراتژی نمونه برداری سوم نیز ترکیبی از دو استراتژی اول بود. آنها استراتژی پیشنهادی خود را با دو استراتژی مرسوم نمونه برداری یکنواخت در فضای پارامتریک و کارترین، مقایسه نمودند. شبیه سازی‌ها روی مدل‌ها با پیچیدگی مختلف انجام شد و نتایج نشان داد هر کدام

⁵ Dominant point

⁶ Form error model (FEM)

⁷ Deviation model

⁸ Systematic errors

⁹ Random error

¹⁰ Product Surface Model (PSM)

¹ Patch size

² Normal curvature

³ Parameterization

⁴ Mean gaussian curvature

شود. لازم به ذکر است کلیه برنامه‌ها و مراحل نمونه برداری از سطح توسط هر کدام از استراتژی‌های نمونه برداری در نرم افزار متلب اجرا شده است. در شکل 3 روند کلی نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد در نرم افزار متلب، آورده شده است.

1-3- استراتژی‌های مرسوم

1-1-1-3 استراتژی نمونه برداری یکنواخت در فضای کارترین

در این استراتژی، نقاط نمونه برداری با فواصل مساوی در جهت محورهای x و y توزیع می‌شوند. فاصله بین نقاط نمونه در جهت هر محور وابسته به بزرگی سطح مورد بررسی و تعداد نقاط در جهت آن محور است [5].

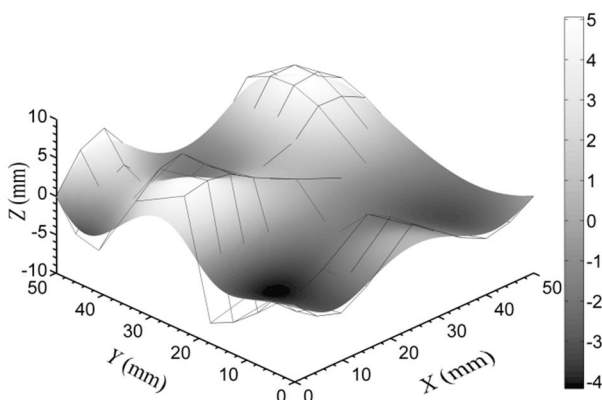


Fig. 2 Sample CAD model with its control polygon (mm)
شکل 2 مدل CAD نمونه به همراه چند ضلعی نقاط کنترلی (میلیمتر)

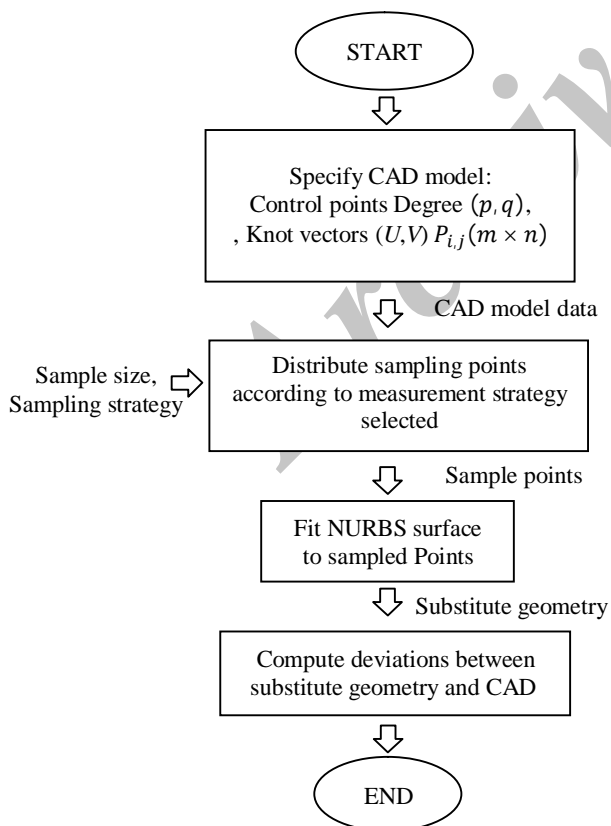


Fig. 3 Main flowchart of sampling strategies

شکل 3 گردش کار اصلی استراتژی‌های نمونه برداری

اصولی استراتژی‌های حاضر این است که نه تنها نیازمند محاسبات پیچیده برای به دست آوردن چنین ویژگی‌هایی می‌باشند بلکه استراتژی‌های موجود روی سطوح با پیچیدگی‌های مختلف جواب‌های متفاوتی می‌دهند و نمی‌توانند بهترین توزیع نقاط را برای یک سطح خاص به دست آورند. از این رو در تحقیق حاضر، با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز توده ذرات بهترین توزیع نقاط نمونه روی سطوح با فرم آزاد، استخراج شده است؛ همچنین، استراتژی پیشنهادی با استراتژی‌های نمونه برداری توزیع یکنواخت در فضای پارامتریک و توزیع یکنواخت در فضای کارترین مقایسه گردید.

2- رویه نریز

رویه‌های نریز¹ به علت پشتیبانی توسط اکثر سیستم‌های CAD/CAM و استانداردهای تبادل اطلاعات (IGES, STEP) به عنوان هندسه مدل سازی اصلی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [18]. در رابطه (1) معادله رویه نریز نمایش داده شده است. رویه نریز با استفاده از $(n+1) \times (m+1)$ نقطه کنترلی تعریف می‌شود. رویه نریز با درجات (k, l) در فضای پارامتریک (u, v) تعریف می‌شود.

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} w_{i,j} P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} w_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}$$

$$0 \leq u \leq u_{\max}, 0 \leq v \leq v_{\max}$$

$$U = \{0, \dots, 0, u_{k+1}, \dots, u_{r-k-1}, 1, \dots, 1\}$$

$$V = \{0, \dots, 0, v_{l+1}, \dots, v_{s-l-1}, 1, \dots, 1\}$$

(1)

در رابطه (1) نقاط کنترلی هستند که شبکه کنترلی دو سویه را شکل می‌دهند، $w_{i,j}$ وزن‌ها و $N_{i,k}(u)$ و $N_{j,l}(v)$ توابع پایه بی اسپلاین تعریف شده در بردارهای گره‌ای به ترتیب در جهات U و V می‌باشند. مقدار $N_{i,k}(u)$ توسط روابط بازگشتی (2) تعیین می‌شود.

$$N_{i,k}(u) = (u - u_i) \frac{N_{i,k-1}(u)}{u_{i+k-1} - u_i} + (u_{i+k} - u) \frac{N_{i+1,k-1}(u)}{u_{i+k} - u_{i+1}}$$

$$N_{i,1} = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (2)$$

برای مدل سازی سطح از نرم افزار متلب² استفاده شد. بدین صورت که ابتدا سطح با فرم آزاد مورد نظر (مدل CAD) در محیط شکل³ نرم افزار کتیا⁴ طراحی و با فرمت IGES ذخیره گردید؛ سپس نقاط کنترلی و بردارهای گره‌ای سطح از فایل IGES استخراج شد. در مرحله بعد به کمک کد نوشته شده رویه نریز در محیط M-file نرم افزار متلب و نقاط کنترلی و برداری‌های گره‌ای، مدل CAD در نرم افزار متلب دوباره بازسازی گردید.

در شکل 2 سطح نریز نمونه تعریف شده به همراه چند ضلعی نقاط کنترلی، در نرم افزار متلب نمایش داده شده است.

داده‌های استفاده شده برای طراحی سطح نمونه:

درجه سطح (k, l) : 5 و 5

تعداد نقاط کنترلی $((n+1) \times (m+1))$: 9×9

3- استراتژی‌های نمونه برداری

در این بخش ابتدا استراتژی‌های نمونه برداری موجود و استراتژی‌های نمونه برداری پیشنهادی تشریح خواهد شد؛ سپس، نمونه برداری از مدل تعریف شده در بخش قبل "شکل 2" توسط هر کدام از این استراتژی‌ها انجام می‌-

¹ NURBS surfaces

² MATLAB

³ Shape

⁴ CATIA

با داشتن مقادیر u و v در فضای پارامتریک متعاقباً موقعیت x و y و z متناظر با این مقادیر با داشتن معادلات سطح از روی مدل CAD به دست می آید.

$$u_i^* = u_{\min} + (i - 1) \frac{u_{\max} - u_{\min}}{(N_u - 1)} ; i = 1, \dots, N_u \quad (5)$$

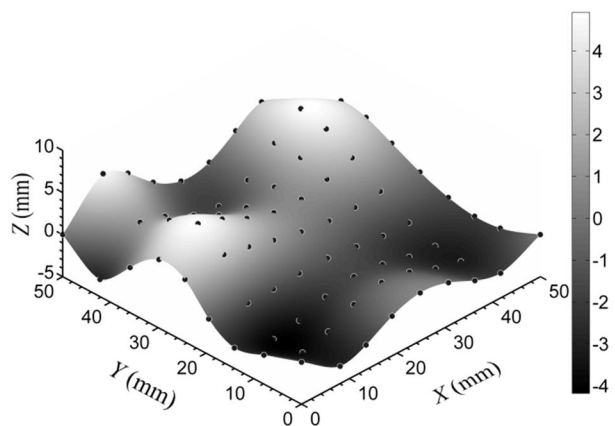
$$v_j^* = v_{\min} + (j - 1) \frac{v_{\max} - v_{\min}}{(N_v - 1)} ; j = 1, \dots, N_v \quad (6)$$

در این استراتژی ابتدا 81 نقطه با توزیع یکنواخت در فضای پارامتریک روی مدل CAD توزیع گردید؛ در مرحله بعد به روش حداقل مربعات¹ رویه نرئز از روی این نقاط برازش و هندسه جایگزین بازسازی شد. نهایتاً انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD به دست آمده است. در شکل 5 نحوه توزیع نقاط نمونه به همراه هندسه جایگزین و مدل انحراف نمایش داده شده است.

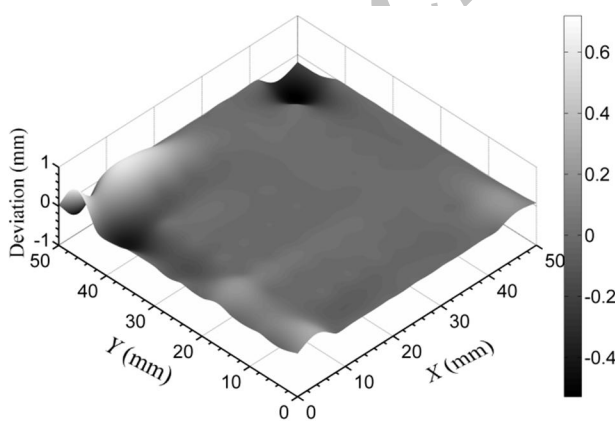
3-2- استراتژی پیشنهادی

3-2-1- الگوریتم توده ذرات (پرندگان)

کندی، روانشناس اجتماعی و ابرهات، مهندس برق، در سال 1995 برای اولین بار بر اساس شبیه سازی رفتار پرندگان برای یافتن غذا، الگوریتمی قوی برای بهینه سازی، به نام الگوریتم بهینه سازی توده ذرات² (PSO) معرفی کردند [19].



(الف) (a)



(ب) (b)

Fig. 5 a) Substitute geometry with sample points (mm), b) deviation from CAD model in uniform sampling strategy in parametric space (mm)

شکل 5 الف) هندسه جایگزین به همراه نقاط نمونه (میلیمتر)، ب) انحراف از مدل CAD در استراتژی نمونه برداری یکنواخت در فضای پارامتریک (میلیمتر)

بنابراین، موقعیت های (x_i^*, y_i^*) مربوط به نقاط نمونه، با استفاده از روابط (3) و (4) محاسبه می شود.

با داشتن موقعیت x و y مربوط به یک نقطه موقعیت z متناظر آن از روی مدل CAD به دست می آید.

$$x_i^* = x_{\min} + (i - 1) \frac{x_{\max} - x_{\min}}{(N_u - 1)} ; i = 1, \dots, N_u \quad (3)$$

$$y_j^* = y_{\min} + (j - 1) \frac{y_{\max} - y_{\min}}{(N_v - 1)} ; j = 1, \dots, N_v \quad (4)$$

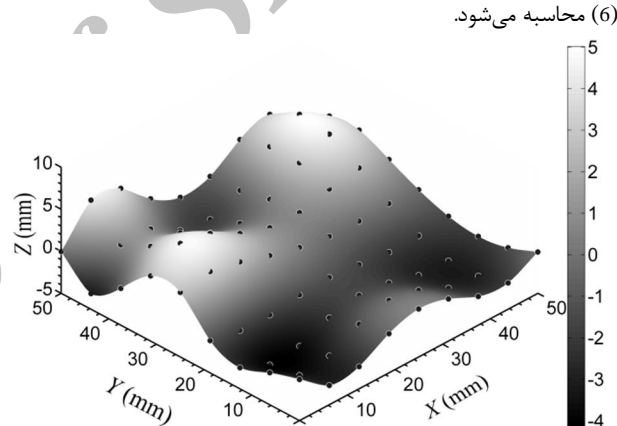
در این استراتژی ابتدا 81 نقطه با توزیع یکنواخت در فضای کارترین روی مدل CAD توزیع گردید؛ در مرحله بعد به روش حداقل مربعات¹ رویه نرئز از روی این نقاط برازش و هندسه جایگزین بازسازی شد. نهایتاً انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD به دست آمده است. در شکل 4 نحوه توزیع نقاط نمونه به همراه هندسه جایگزین و مدل انحراف نمایش داده شده است.

3-1-2- استراتژی نمونه برداری یکنواخت در فضای پارامتریک

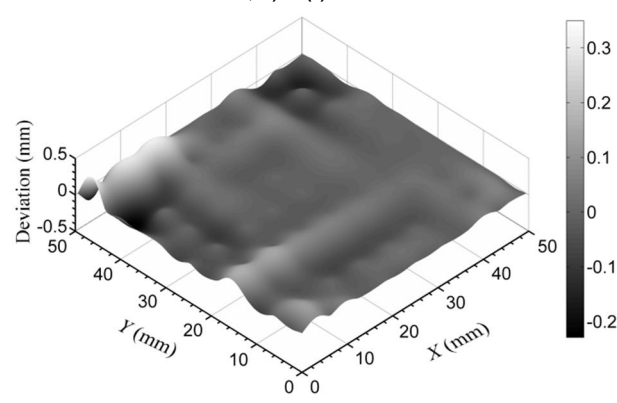
در این استراتژی، نقاط نمونه برداری با فواصل مساوی در جهات پارامتریک u و v توزیع می شوند. فاصله بین نقاط در امتداد هر جهت پارامتریک وابسته به بازه پارامتر و تعداد نقاط در آن جهت است [5].

بنابراین، مقادیر (u_i^*, v_i^*) متناظر با نقاط نمونه، با استفاده از روابط (5) و

(6) محاسبه می شود.



(الف) (a)



(ب) (b)

Fig. 4 a) Substitute geometry with sample points (mm), b) deviation from CAD model in uniform sampling strategy in Cartesian space (mm)

شکل 4 الف) هندسه جایگزین به همراه نقاط نمونه (میلیمتر)، ب) انحراف از مدل CAD در استراتژی نمونه برداری یکنواخت در فضای کارترین (میلیمتر)

² particle swarm optimization algorithm

¹ Least square method

از رابطه (7) می توان نتیجه گرفت که هر ذره به هنگام حرکت 3 پارامتر اساسی زیر را در نظر می گیرد:

- 1- جهت حرکت قبلی خود
 - 2- بهترین موقعیتی را که در آن قرار داشته است
 - 3- بهترین موقعیتی را که توسط کل جمع تجربه شده است
- در شکل 6 گردش کار الگوریتم توده ذرات نمایش داده شده است.

3-2-2- استراتژی نمونه برداری با استفاده از الگوریتم توده ذرات
موقعیت نقاط نمونه، تأثیر مستقیم به روی دقت سطح بازسازی شده (هندسه جایگزین) دارد و از آنجاییکه هندسه جایگزین باید تا حد امکان به سطحی که قرار است توسط ماشین اندازه گیری مختصات پراب شود، نزدیک باشد، بنابراین موقعیت نقاط نمونه روی سطح باید به نحوی باشد که انحراف هندسه جایگزین از مدل واقعی را کمینه کند؛ از این رو در اجرای الگوریتم های نمونه برداری هندسه جایگزین باید انحراف کمتری نسبت به مدل CAD داشته باشد. در این پژوهش الگوریتم بهینه ساز توده ذرات جهت به دست آوردن بهترین موقعیت و توزیع نقاط نمونه به روی سطح، به کار گرفته شده است. همچنین این الگوریتم با توابع بازسازی سطح، نمونه برداری و برازش

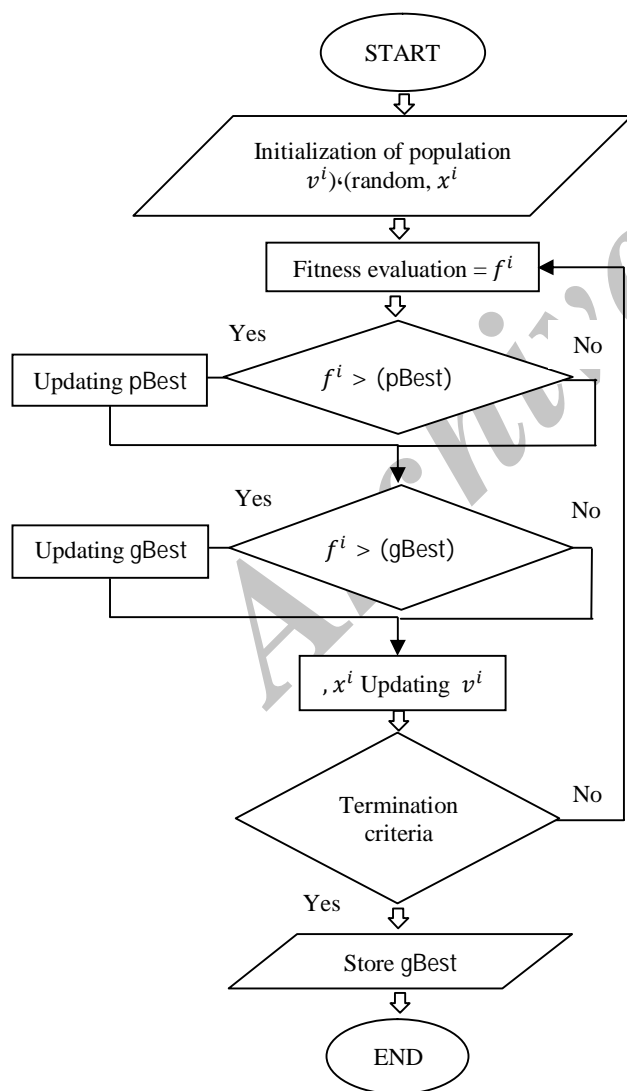


Fig. 6 Flowchart of particle swarm algorithm [20]

شکل 6 گردش کار الگوریتم توده ذرات [20]

در الگوریتم PSO، تعدادی از موجودات وجود دارند، که ذره نامیده می شوند و در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه کردن (کمینه یا بیشینه کردن) مقدار آن را دارند، پخش شده اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی اش و بهترین محلی که قبلا در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می کند. همه ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله به پایان می رسد. این مراحل چندین بار تکرار می شوند تا به جواب بهینه همگرا شوند. در واقع گروه ذرات که کمینه یک تابع را جستجو می کنند، مانند دسته های از پرندگان عمل می کنند که به دنبال غذا می گردند.

هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار d بعدی تشکیل شده است؛ d ، بعد فضای جستجو می باشد. برای ذره i ام این سه بردار عبارتند از: x^i موقعیت فعلی ذره، v^i سرعت حرکت ذره و $x^{i,best}$ بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده است. x^i مجموعه ای از مختصات است که موقعیت فعلی ذره را نمایش می دهد. در هر مرحله ای که الگوریتم تکرار می شود، x^i به عنوان یک جواب برای مسئله محاسبه می شود. اگر این موقعیت بهتر از جواب های قبلی باشد، در $x^{i,best}$ ذخیره می شود. f^i مقدار تابع هدف در x^i و $f^{i,best}$ مقدار تابع هدف در $x^{i,best}$ است که هر دو از عناصر تشکیل دهنده هر ذره به حساب می آیند. ذخیره کردن مقدار $f^{i,best}$ برای انجام مقایسه های بعدی، ضروری است. اما ذخیره کردن مقدار f^i ضروری نمی باشد. در هر تکرار x^i و v^i جدیدی به دست می آید و هدف از اجرای الگوریتم، بهتر کردن $x^{i,best}$ و احتمالاً x^i است. الگوریتم PSO چیزی فراتر از یک مجموعه ذرات است. هیچ کدام از ذرات قدرت حل هیچ مسئله ای را ندارند، بلکه حل مساله در قالب ارتباط و تعامل ذرات با همدیگر شکل می گیرد. در واقع برای گروه ذرات، حل مسئله، یک مفهوم جمعی است که از رفتار تک تک ذرات و تعامل میان آن ها بوجود می آید. بهترین موقعیتی که توسط همه ذرات پیدا شده است، به صورت $x^{g,best}$ نشان داده می شود که با مقایسه مقادیر $f^{i,best}$ به ازای همه ذرات و از میان $x^{i,best}$ ها انتخاب می شود. مقدار تابع در $x^{g,best}$ ، به صورت $f^{g,best}$ نشان داده می شود. در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت ها و سرعت های تصادفی ایجاد می شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله $k+1$ از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می شوند. اگر منظور از x_j مولفه j ام از بردار x باشد، آن گاه توسط رابطه بازگشتی (7) سرعت و توسط رابطه (8) موقعیت ذرات به هنگام می شود [20].

$$v_j^i[k+1] = w v_j^i[k] + c_1 r_1 (x_j^{i,best}[k] - x_j^i[k]) + c_2 r_2 (x_j^{g,best}[k] - x_j^i[k]) x_j^i[k+1] \quad (7)$$

$$x_j^i[k+1] = x_j^i[k] + v_j^i[k+1] \quad (8)$$

در روابط فوق، w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعداد تصادفی در بازه $[0,1]$ با توزیع یکنواخت است. همچنین c_1 و c_2 ضرایب یادگیری هستند. r_1 و r_2 باعث می شوند که نوعی گوناگونی در جواب ها به وجود بیاید و به نوعی جستجوی کامل تری روی فضا انجام پذیرد. c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می باشد.

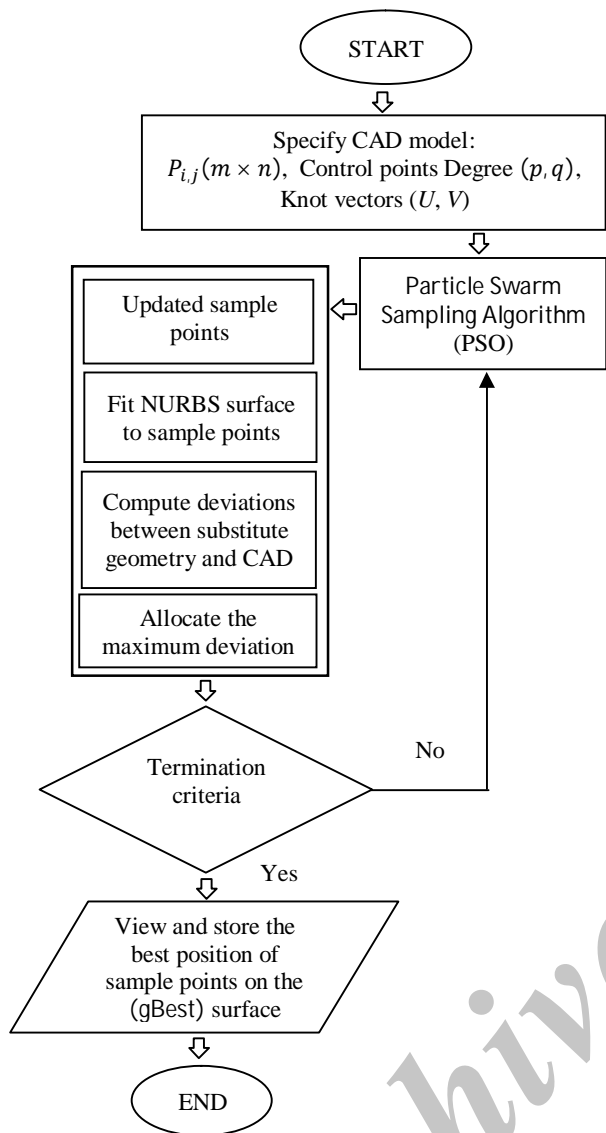


Fig. 7 Flowchart of sampling strategy by particle swarm algorithm

شکل 7 گردش کار استراتژی نمونه برداری با استفاده از الگوریتم توده ذرات

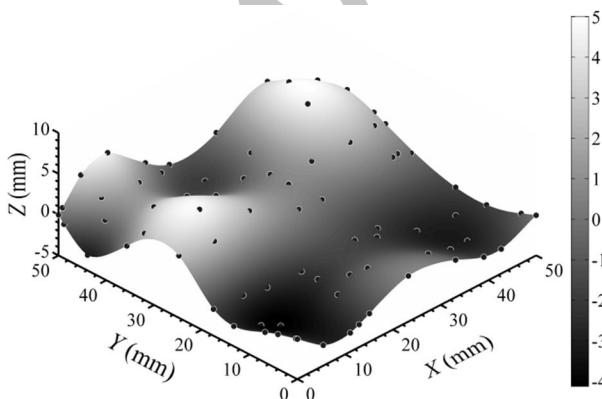


Fig. 8 Substitute geometry with sample points in sampling strategy by particle swarm algorithm (mm)

شکل 8 هندسه جایگزین به همراه نقاط نمونه در استراتژی نمونه برداری با استفاده از الگوریتم توده ذرات (میلیمتر)

سطح یکپارچه گردیده است. کمینه کردن بیشینه انحراف بین سطح بازسازی شده از نقاط نمونه (هندسه جایگزین) و مدل CAD، به عنوان تابع هدف بهینه سازی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است فرآیند نمونه برداری، برازش سطح و محاسبه بیشینه انحراف بین هندسه جایگزین و مدل CAD، در هر تکرار الگوریتم بهینه ساز شبیه سازی و اجرا می شود.

در استراتژی پیشنهادی موقعیت های (x, y, z) نقاطی که قرار است روی سطح توزیع شوند، به عنوان پاسخ مساله بهینه سازی در نظر گرفته شده است. بنابراین، نقاط نمونه (81 نقطه) به عنوان مجموعه ذرات در نظر گرفته شد. همچنین، انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD به عنوان تابع هدف، تعریف شده است. هدف کمینه کردن بیشینه انحراف هندسی بین دو مدل می باشد، بنابراین الگوریتم بهینه ساز باید به دنبال توزیعی باشد که این انحراف را کم کند؛ در همین راستا ابتدا نقاط (ذرات) به شکل تصادفی در فضای جستجو توزیع شده سپس موقعیت آنها با توجه به بهترین موقعیت ذره و بهترین موقعیت مجموع ذرات، آنقدر تغییر می کند تا شرایط توقف برقرار شود. در شکل 7 گردش کار الگوریتم نمونه برداری با استفاده از توده ذرات نمایش داده شده است.

پارامترهای استفاده شده در الگوریتم نمونه برداری با استفاده از توده ذرات:

تعداد ذرات: 81 (برابر تعداد نقاط نمونه)

جمعیت: 25

تعداد تکرار: 3000

ضریب اینرسی (w) : 0.5-0

ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره (c_1) : 2

ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع (c_2) : 2

قابلیت رسیدن به بهینه کلی خوب در تکرارهایی اول و همگرایی سریع الگوریتم یک مزیت برای الگوریتم توده ذرات محسوب می شود، این در حالی است که در تکرارهای نهایی برای رسیدن به دقت های بالاتر بهتر است الگوریتم قابلیت جستجوی محلی قوی تری را دارا باشد؛ بنابراین برای جلوگیری از نوسان ذرات در نزدیکی بهینه کلی، در این پژوهش مقدار w به شکل خطی با تکرار کاهش می یابد. مقدار w در هر تکرار از رابطه بازگشتی (9) بدست می آید.

$$w = w_1 - \frac{\text{iter} - 1}{\text{Miter} - 1} (w_1 - w_2) \quad (9)$$

در "رابطه بازگشتی (9)" عدد تکرار جاری و Miter عدد بیشینه تکرار مجاز اجرای الگوریتم می باشد؛ w_1 و w_2 به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی ضریب اینرسی می باشد.

فرآیند نمونه برداری از سطح نمونه تعریف شده در بخش 2 با پارامترهای تعریف شده در این بخش اجرا گردید. شکل 8 هندسه جایگزین حاصل از برازش نقاط نمونه برداری (81 نقطه) و نحوه توزیع نقاط نمونه برداری روی سطح با استفاده از الگوریتم بهینه ساز توده ذرات، نمایش داده شده است. نکته قابل توجه در "شکل 8" این است که نقاط نمونه (ذرات) با استفاده از هوش جمعی، نواحی بحرانی همانند نواحی با انحنای زیاد و لبه های شکل را پیدا می کنند. در شکل 9 انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD، نمایش داده شده است. همانطور که در "شکل 9" مشاهده می شود، در استراتژی نمونه برداری پیشنهادی میزان انحراف تا حدود سه برابر نسبت به استراتژی نمونه برداری یکنواخت کاهش یافته است. در شکل 10 مقادیر تابع هدف برای 3000 تکرار، با استفاده از الگوریتم توده ذرات نمایش داده شده است.

پارامتریک و استراتژی پیشنهادی، با تعداد نقاط نمونه مختلف اجرا گردید. جدول 1 نتایج مقایسه انحراف به دست آمده حاصل از اجرای استراتژی‌های نمونه‌برداری یکنواخت و پیشنهادی با تعداد نقاط مختلف را، نمایش می‌دهد. شکل 13 نمودار مربوط به نتایج به دست آمده در "جدول 1" را نمایش می‌دهد.

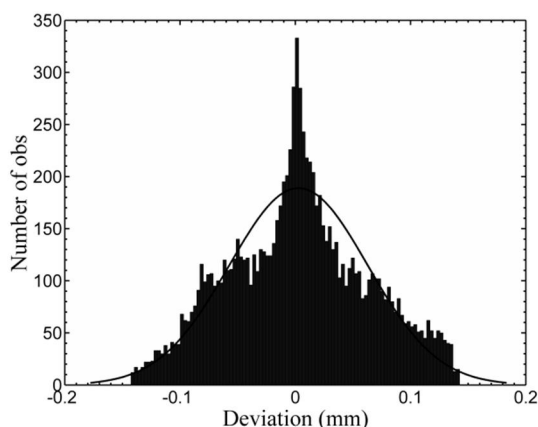


Fig. 11 Geometric deviations probability distribution obtained from the proposed sampling strategy

شکل 11 توزیع احتمال انحراف هندسی حاصل از استراتژی نمونه‌برداری پیشنهادی

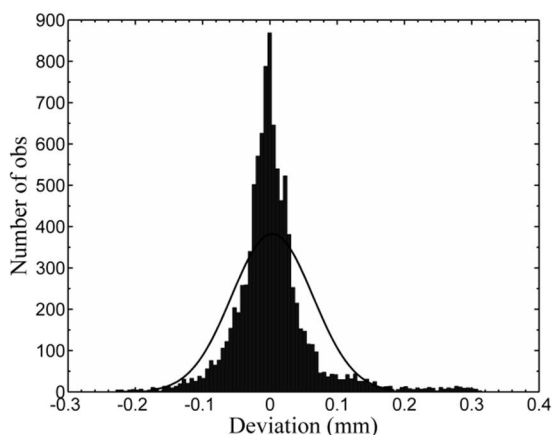


Fig. 12 Geometric deviations probability distribution obtained from sampling strategy with uniform distribution in Cartesian space

شکل 12 توزیع احتمال انحراف هندسی حاصل از استراتژی نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت در فضای کارترین

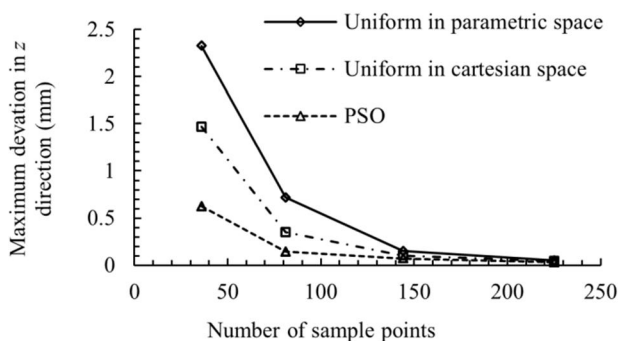


Fig. 13 Influence of the number of sample points on maximum deviation in sampling strategies

شکل 13 تأثیر تعداد نقاط نمونه روی انحراف بیشینه در استراتژی‌های نمونه‌برداری

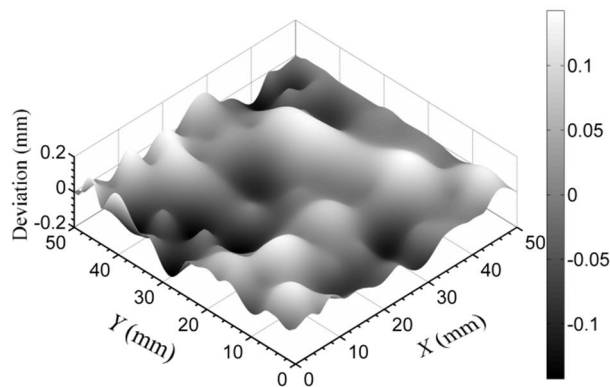


Fig. 9 Substitute geometry deviation from CAD model in sampling strategy by particle swarm algorithm (mm)

شکل 9 انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD در استراتژی نمونه‌برداری با استفاده از الگوریتم توده ذرات (میلیمتر)

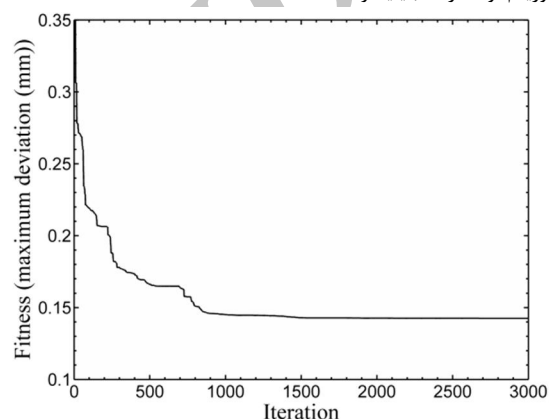


Fig. 10 Optimizing processes by particle swarm algorithm

شکل 10 فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم توده ذرات

4- تحلیل نتایج

چنان که از انحرافات هندسی مربوط به هر یک از استراتژی‌های مرسوم و پیشنهادی پیداست، استراتژی پیشنهادی از دقت بالاتری جهت نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد برخوردار است. در شکل 11 توزیع احتمال انحراف هندسی حاصل از استراتژی نمونه‌برداری توده ذرات و شکل 12 توزیع احتمال انحراف حاصل از استراتژی نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت در فضای کارترین نمایش داده شده است. آنچه‌آنکه در "شکل 11" و "شکل 12" نشان داده شده است، استراتژی نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت نقاط در فضای کارترین، پراکندگی بیشتری نسبت به استراتژی پیشنهادی دارد. همچنین، در استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت، انحراف هندسی در برخی نواحی از سطح تمرکز دارد و این بدین معناست که الگوریتم‌های موجود جهت توزیع نقاط نمونه پیچیدگی سطح را در این نواحی در نظر نمی‌گیرند؛ برای رفع چنین عیبی در این استراتژی‌ها، باید تعداد نقاط نمونه به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. این در حالی است که استراتژی پیشنهادی با تعداد نقاط نمونه برابر، دقت بالاتری دارد و انحراف هندسی بین دو مدل را به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

در ادامه شبیه‌سازی با تعداد نقاط مختلف روی سطح نمونه، انجام شد. در این شبیه‌سازی سه استراتژی توزیع یکنواخت در فضای کارترین و

جدول 1 مقایسه بین استراتژی نمونه برداری پیشنهادی و استراتژی های نمونه برداری یکنواخت با تعداد نقاط مختلف

Table 1 Comparison between the proposed strategy and uniform sampling strategies with different sample size

استراتژی های نمونه برداری پیشنهادی		استراتژی های نمونه برداری یکنواخت		توزیع یکنواخت در فضای پارامتریک		تعداد نقاط نمونه
توزیع با استفاده از الگوریتم توده ذرات (PSO)	توزیع یکنواخت در فضای کارترین	انحراف بیشینه (mm)	زمان (ثانیه)	انحراف بیشینه (mm)	زمان (ثانیه)	
2035	0.6234	561	1.4667	612	2.3249	36
2147	0.1425	470	0.3496	502	0.7188	81
2355	0.07269	382	0.1026	395	0.1497	144
2562	0.03125	529	0.04467	541	0.05146	225

5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تأثیر تعداد و نحوه توزیع نقاط نمونه در فرآیند نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد، مورد بررسی قرار گرفت. با شبیه سازی استراتژی نمونه برداری به عنوان یکی از عوامل مهم تأثیرگذار روی دقت هندسه جایگزین و همچنین با تحلیل داده های آماری به دست آمده از اعمال استراتژی های نمونه برداری، ثابت شد استفاده از الگوریتم بهینه ساز توده ذرات به عنوان یک استراتژی نمونه برداری تطبیق پذیر اثربخشی بالاتری نسبت به روش های مرسوم دارد و بسته به تعداد نقاط نمونه، تا حدود سه برابر (در تعداد نقاط نمونه کمتر) انحراف هندسی را کاهش می دهد.

در حقیقت در استراتژی نمونه برداری با استفاده از توده ذرات، ذرات (نقاط نمونه) با استفاده از هوش جمعی و تجارب شخصی به شکلی روی سطح توزیع می شوند که انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD را کمینه کنند و این قابلیت روش توده ذرات، همان انتظاری است که از استراتژی های تطبیق پذیر داریم.

همچنین همانطور که در "شکل 13" نمایش داده شد، افزایش تعداد نقاط نمونه روی سطح، تا محدوده مشخصی باعث کاهش بیشینه انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD می شود و بعد از این محدوده به دلیل تراکم زیاد نقاط روی سطح تغییر چندانی در نتایج مشاهده نمی شود و انحراف به دست آمده از الگوریتم های نمونه برداری با توزیع یکنواخت و الگوریتم پیشنهادی به هم نزدیک می شوند.

در مجموع مزایای استراتژی نمونه برداری با استفاده از الگوریتم بهینه ساز توده ذرات، عبارتست از:

1. عدم نیاز به محاسبات پیچیده برای تعیین موقعیت نقاط نمونه
2. قابلیت تطبیق با هر سطح با هر نوع پیچیدگی
3. قابلیت پیدا کردن نواحی از سطح که احتمال ایجاد خطای بیشتری روی هندسه جایگزین دارند با استفاده از هوش جمعی
4. کمینه کردن انحراف بین هندسه جایگزین و مدل CAD، دو تا سه برابر (بسته به تعداد نقاط نمونه) بیشتر از روش های مرسوم.
5. استراتژی پیشنهادی می تواند در ایجاد مدل واقعی قطعه ماشین کاری شده در قطعاتی که تیراژ تولید بالایی دارند استفاده شود؛ در این قطعات یک بار می توان الگوریتم نمونه برداری توده ذرات را روی مدل پیاده سازی نمود سپس از توزیع به دست آمده هر زمان که نیاز باشد می توان جهت بازرسی قطعات مشابه و رسیدن به مدل خطای ماشین کاری استفاده نمود.

6- مراجع

- part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty, *Computer-Aided Design*, Vol. 43, No. 4, pp. 345-355, 2011.
- [3] E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt, Metrology of freeform shaped parts, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 2, pp. 810-835, 2007.
- [4] R. J. Hocken, P. H. Pereira, *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Second Edition, pp. 81-92, New York: Taylor & Francis Group, 2013.
- [5] G. Moroni, S. Petrò, Coordinate Measuring Machine Measurement Planning, in *Geometric Tolerances*, Springer London, pp. 111-158, 2011.
- [6] C. E. Shannon, Communication in the presence of noise Proc, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Xplore Digital Library*, Vol. 37, No. 1, pp. 10-21, 1949.
- [7] J. M. Hammersley, D. Handscomb, Monte Carlo methods, *Wiley*, pp. 25-42, 1964.
- [8] T. C. Woo, R. Liang, C. C. Hsieh, N. K. Lee, Efficient Sampling for Surface Measurement, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 5, pp. 345-354, 1995.
- [9] W. S. Kim, S. Raman, On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, No. 3, pp. 427-443, 2000.
- [10] M. Cho, K. Kim, New inspection planning strategy for sculptured surfaces using coordinate measuring machine, *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 427-444, 1995.
- [11] H. Pahk, M. Jung, S. Hwang, Y. Kim, Y. Hong, S. Kim, Integrated precision inspection system for manufacturing of moulds having CAD defined features, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 198-207, 1995.
- [12] I. Ainsworth, M. Ristic, D. Bruijic, CAD-Based Measurement Path Planning for Free-Form Shapes Using Contact Probes, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 23-31, 2000.
- [13] D. F. Elkott, H. A. Elmaraghy, W. H. Waguih, Automatic sampling for CMM inspection planning of free-form surfaces, *International Journal of Production Research*, Vol. 40, No. 11, pp. 2653-2676, 2002.
- [14] S. M. Obeidat, S. Raman, An intelligent sampling method for inspecting free-form surfaces, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 11, pp. 1125-1136, 2009.
- [15] G. Rajamohan, M. S. Shunmugam, G. L. Samuel, Practical measurement strategies for verification of freeform surfaces using coordinate measuring machines, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 18, No. 2, pp. 209-222, 2011.
- [16] M. Yu, Y. Zhang, Y. Li, D. Zhang, Adaptive sampling method for inspection planning on CMM for free-form surfaces, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 19, pp. 1967-1975, 2012.
- [17] M. Poniatowska, Deviation model based method of planning accuracy inspection of free-form surfaces using CMMs, *Measurement*, Vol. 45, No. 5, pp. 927-937, 2012.
- [18] L. Piegl, W. Tiller, *The NURBS Book*, Second Edition, pp. 117-138, Florida, America: Springer, 1997.
- [1] T. Varady, R. R. Martin, J. Cox, Reverse engineering of geometric models an introduction, *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
- [2] M. Mahmud, D. Joannic, M. Roy, A. Isheil, J.-F. Fontaine, 3D

[20] E. G. Talbi, *Metaheuristics*, First Edition, pp. 240-254, New Jersey: Wiley, 2009.

[19] J. Kennedy, R. C. Eberhart, Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia: The Institute of Electrical and Electronics Engineers journals, pp. 1942-1948, 1995.

Archive of SID