

# روشهای مدلسازی و مانیتورینگ برای داده های فضایی و تصویری

## چکیده

تحلیل کامپیوتری داده ها به روش سنجش هوشمند باعث تغییر پارادایم در آمار صنعت شده است که در بخش تولید گسسته بکار می رود. فناوریهای نوظهوری (مانند تولید افزوده، تولید در سطح خرد) همراه با راه حل های بازرسی نوین (مانند سیستم های غیرتماسی، توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس) و سنجشگرها با سرعت بالا و چندرشته ای (مانند ویدئوها و تصاویر، سیگنالهای آکوستیک، حرارتی، برق و فشار) برای نسل جدید داده های کلان صنعت راه را هموار کرده اند که به روشهای مدلسازی و مانیتورینگ نوینی برای تولید با نقص سطح صفر می باشد. در این مقاله که از مسائل صنعتی واقعی شروع به بحث می کند، برخی چالشهای اصلی که بخشهای صنعت مربوطه با آن مواجه اند مورد بحث قرار می گیرد. در این مقاله بویژه راه حل های پایدار و مسائل مطرح آتی توضیح داده می شوند.

**کلیدواژه ها:** مانیتورینگ کیفیت به روش آماری، کنترل فرایند به روش آماری، سطوح، اشکال، تصاویر، تولید افزوده، سیگنال، مانیتورینگ پروفایل، داده های عملیاتی

**TarjomeFa.Com**

## مقدمه

هوشمندی و قابلیت دسترسی به کلان داده ها بنا به اتفاق نظری گسترده به محرک های فناوری انقلاب صنعتی چهارم یعنی Industry 4.0 تبدیل شده اند. همانند کلیه انقلابهای صنعتی قبلی، محرک چهارمین انقلاب صنعتی همان نوآوری های فناوری بوده است. نیروهای محرک انقلاب صنعتی اول همان تولید مکانیکی با قدرت آب و بخار بودند، الکتریسیته و خطوط مونتاژ انقلاب صنعتی دوم را بوجود آوردند، و ورود کامپیوترها برای اهداف اتوماسیون باعث تسهیل پیدایش انقلاب صنعتی سوم گردید. پیشرفتهای بینظیر درباره حجم داده ها، قدرت محاسباتی با کامپیوتر و ارتباطات کامپیوتری، شکل های جدیدی از تعاملات انسان با ماشین از طریق واقعیت افزوده، و پیشرفتهای نوظهور در زمینه علوم رباتیک و چاپ سه بعدی باعث هموارسازی راهی به سوی نسل

جدیدتولید دیجیتالی در انقلاب صنعتی چهارم شده است (Brettel, et al, 2014; Baur and Wee, 2015).

انقلاب صنعتی چهارم دربرگیرنده پیشرفتهای فناوری متفاوت گوناگونی می باشد (Rüßmann et al., 2015). شکل 2)، که به رویکردهای نوینی برای تحلیل داده ها نیازمند است (Lee, Bagheri and Kao, 2014, 2015; Wang, Törngren and Onori, 2015; Jazdi, 2014; and 2015). درکل، افزایش حجم داده ها، تنوع و سرعت آنها (یعنی چارچوب کلان داده ها) دربرگیرنده چالشهای متعددی برای آماردانان صنعت و مهندسان کیفیت می باشد (Jones-Farmer, 2015; Megahed and Jones-Farmer, 2016; Steinberg, 2016; Ezell and Hazen, 2014). برای مثال، سیستم های سایبرفیزیکی اتصالی بالا (Lee, Bagheri and 2015; Kao, 2014 and 2015; Jazdi, 2014; Wang, Törngren and Onori, 2015) مبین رشته های متعدد داده های واقعی و مجازی می باشند که باید به طور مناسبی با هم ترکیب شده و تحلیل بشوند. اینترنت سایر-امنیتی و صنعتی برای کارها (Wells et al. 2014, Turner et al., 2015) نیازمند شیوه های جدید مانیتورینگ ابر داده ها و بهینه سازی آنهاست (Aceto et al., 2015). سنجش فراگیر پروسه ها و عملگرهای صنعت (برای طراحی صفحه کاربری های مشترک انسان-ماشین) به حجم عظیمی از داده های تصویری و سیگنال منجر می شود که باید به نحو مناسبی تحت بررسی قرار گیرد.

بحث درباره کلیه تاثیرات انقلاب صنعتی چهارم درباره مدلسازی داده های صنعت، مانیتورینگ و کنترل آنها خارج از بحث این مقاله است. در این مقاله، چالشها و فرصتهای مربوط به مدلسازی و مانیتورینگ داده های کیفیت در محصولات مکانیکی با ارزش افزوده بالا مورد توجه قرار می گیرد. از اینرو، بخشهای صنعت مانند هوافضا، خودروسازی، ابزارسازی، و تولید ابزارهای ماشین آلات به طور تخصصی در نظر گرفته می شوند. بعلاوه، به مرحله تولید در زمان عمر این محصولات بطور تخصصی توجه می شود.

در سرتاسر مقاله، مسائل صنعت واقعی به عنوان نمونه های انگیزشی به طور تخصصی مطرح می گردد. همچنین، توجه ویژه ای به برخی پروسه های جدید تولید (چاپ سه بعدی یا تولید افزوده -AM) و راه حل های جدید مترولوژی حجمی و ابعادی (یعنی سنجشگرهای مترولوژی غیرتماسی، ویدئوهای با سرعت بالا، توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس-CT) مبدول خواهد شد.

برای ساده سازی مطالب، این بحث را در دو بخش اصلی سازماندهی می کنیم. اولین بخش متمرکز بر خصوصیات کیفیت راجع به محصولات است درحالیکه دومین بخش راجع به داده های پروسه است. به طور خلاصه، ما درباره شیوه های مدلسازی و مانیتورینگ محصول و داده های کیفیت پروسه به طور جداگانه بحث خواهیم کرد. تفکیک مطالب به این شکل حالت ساختگی دارد چون معمولاً از دست اندرکاران صنعت خواسته می شود که در آن واحد با رشته داده های محصول و نیز پروسه مواجه شوند و این دو منبع اطلاعاتی را بهم متصل کنند تا بتوانند اقدامات مناسبی را برای پیشبرد پروسه به سمت تولید با نقص سطح صفر تعیین نمایند. این دو بخش با ساختار مشابهی سازماندهی شده است. اول از همه، زمینه صنعت و برخی مثالهای انگیزشی مطرح می شود. بعد از آن، راه حل های موجود برای مدلسازی و مانیتورینگ داده ها به طور مختصری توضیح داده می شود. سرانجام، رهنمودهایی برای تحقیقات آتی در قسمت نتیجه گیری ارائه خواهد شد.

**مدلسازی و مانیتورینگ کیفیت محصول: ترکیب شکل های سطحی و داده های چندسنجش گری**

کیفیت محصولات مکانیکی می تواند به خصوصیات متفاوتی مرتبط باشد: از جمله خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، عملکرد مبتنی بر زمان (برای مثال قابلیت پایداری، قابلیت دوام)، نحوه عملکرد و احتمالاً خصوصیات ظاهر کار از لحاظ زیبایی شناختی. در این بخش، مشخصات طراحی های فنی از جمله تحمل های ابعادی و هندسی مورد توجه قرار می گیرد. دهه های اخیر شاهد تغییرات مهمی در نحوه طراحی و بازرسی ویژگی های کیفیت بوده است. از نقطه نظر طراحی، تحمل هایی که خطاهای شکل یا محل را شناسایی می کنند، بیش از پیش در کنار مشخصات معمولی در زمینه ابعاد (یعنی قطر و طول) قرار می گیرند. شکل 3 یک خلاصه سازی از تحمل های هندسی معمولی را که در طراحی های فنی اجزای مکانیکی بکار می رود نشان می دهد (ASME Y14).

شکل 3- برخی تحمل های هندسی معمول

دلیل اینکه چرا مشخصات هندسی از نقطه نظر کارکرد اهمیت دارد با یک مثال ساده در شکل 4 به تصویر درآمده است. این تصویر نشان دهنده یک پین استوانه ای نصب شده روی یک سوراخ است. در جعبه سمت چپ، پین دارای یک قطر ثابت و یک شکل بی نقص استوانه ای می باشد. در سمت راست، پین یک قطر ثابت ولی یک خطای شکلی شدید (به نام خارج از حالت استوانه ای) دارد. ضمن اینکه شکل پین از الگوی نامی خود فاصله می گیرد (از حالت چپ به حالت راست حرکت می کند)، مسائل کیفیت را می توان در عملیات مونتاژ یا طی عملیات کارکرد در این بخش مونتاژ شده مشاهده کرد. این امر بدان دلیل است که شکاف میان پین و سوراخ در حالت دوم ثابت نمی باشد.

دست کم دو محرک فناوری اصلی وجود دارد که زیربنای توجه زیادی را که به مشخصات هندسی مبذول شده است تشکیل می دهد. اول اینکه پیشرفتهای در فرایند تولید و ساخت باعث افزایش پیچیدگی شکل های قابل حصول تحت هزینه های منطقی گردیده است. شکل 5 نشان دهنده مثالهایی از محصولات تولید شده توسط AM فلزی می باشد. تکنولوژی AM به ما امکان می دهد تا به پیچیدگی رایگانی دست یابیم. در واقع، فناوری AM اشیا را لایه به لایه صرفاً با تغییر ساده جهت مسیر پرتوی انرژی تولید می کند که باعث می شود پودر فلزی ذوب شود. این عملیات ساخت به ما امکان می دهد تا شکلهای پیچیده را به طور رایگان محقق سازیم بدون اینکه نیازی به ابزارآلات و قالب های گران قیمت وجود داشته باشد.

Tarjomefa.Com

#### شکل 4- اثر خطای شکل استوانه ای روی مونتاژ پین-سوراخ

دومین محرک فناوری را که به نفع استفاده از تحمل های هندسی می باشد، می توان در پیشرفتهای اخیر در زمینه فناوری سیستم مترولوژی پیدا نمود. سیستم های غیرتماسی (مانند پیش آمدگی لبه، اسکنرهای لیزری، سیستم مبتنی بر اینترفرومتری) و راه حلهای چندسنجشگری (با اضافه کردن پروب تماسی معمولی و ماشین های اندازه گیری مختصات نوری CMM) تا حد زیادی باعث کاهش زمان کسب و بهبود صحت ابعاد شده است. در مقیاسی متفاوت، اثر مشابه سینرژتیکی یا هم افزایی مشابهی میان فرایندهای پیشرفته ساخت و راه حلهای تازه برای مترولوژی ابعاد در سطح مقیاس خرد برای سطوح مهندسی شده، مشاهده شده است ( Malshe et

al., 2013). هرچند در مقاله حاضر به این مسئله پرداخته نشده است، ساخت سطح و مترولوژی نقش مهمی را در بسیاری حوزه های کاربردی مهندسی در آینده نزدیک ایفا خواهد کرد. در واقع، مهندسی مناسب سطح می تواند تا حد زیادی بر عملکردهای مختلف کارکرد (مانند مقاومت اصطکاک و مقاومت فرسایشی، هیدروفوبیسیته، یکپارچه سازی از نوع osseo-integration، و غیره) اثر بگذارد.

### مدلسازی و مانیتورینگ شکل محصول: چالشهای اصلی و راه حل‌های ممکن

در دهه گذشته، شیوه های مختلف زیادی برای نظارت بر پروفایل هندسی با کاربردهای تخصصی برای مانیتورینگ پروفایل در متون علمی مطرح شده است ( Woodall, 2007, Noorossana et al 2011; Colosimo and Pacella, 2007, 2010, 2011; Colosimo Semeraro and Pacella 2008, Colosimo et al. 2008).

مانیتورینگ سطح نمایانگر یک تحول طبیعی در زمینه مانیتورینگ پروفایل می باشد. ولی مدلسازی و مانیتورینگ سطح دربرگیرنده مسائل ویژه ای است که با مانیتورینگ پروفایل ارتباط چندانی ندارد. بویژه، همبستگی فضایی نقش اصلی را ایفا می کند. همبستگی فضایی اشاره به شیوه ای دارد که تحت آن ناحیه مجاور روی سطح در جهات سه بعدی دارای همبستگی بوده و کاملاً به فرایند ساختی که سطح را تولید کرده مرتبط باشند. در واقع، امضای ساخت یعنی الگوی سیستماتیک که به دلیل این پروسه روی سطح باقی مانده است، باعث القای امضای ساخت می شود، یعنی الگوی سیستماتیک برجای مانده توسط فرایند روی سطح شامل همبستگی های فضایی همانند یک مولفه درونی می باشد. مدلسازی و مانیتورینگ امضای ساخت معمولاً یک شیوه موثر و کارآمد برای مانیتورینگ غیرمستقیم ثبات فرایند می باشد.

اغلب سطوح در طراحی های فنی محصولات مکانیکی شامل سطوح 2.5D می باشند یعنی آنها می توانند به صورت برآمدگی نقاطی که روی فضای اقلیدسی دوبعدی  $E^2$  (صفحه) واقعند در قالب بعد سوم نمایش داده شوند. بعبارت دیگر، الگوی نامی مشاهده شده روی سطح می تواند به سادگی به صورت این معادله ( $z = z(x,y)$ ) مدلسازی بشود. این تعریف علی رغم دستگاه های اقلیدسی مخصوص که در نظر گرفته شده است، صدق می کند. در واقع، استوانه یک سطح 2.5D می باشد وقتی مختصات استوانه ای رت برای مدلسازی سطح در نظر بگیریم.

در مختصات استوانه ای، شعاع سطح به صورت یک دستگاه مختصات  $Z$  عمل می کند درحالیکه محلهای زاویه و ارتفاع به ترتیب به صورت مختصات  $X$  و  $Y$  عمل می کنند.

ما بدون اینکه تعمیم مطالب را از دست بدهیم، این فرض را بنا نهاده ایم که سطحی که با آن کار می کنیم می تواند نتیجه یک یا چند مرحله پیش پردازش باشد. مراحل پیش پردازش معمولی عبارتند از: 1) ثابت یا تراز شامل برگردان چرخشی سطح مشاهده شده برای قرارگیری اش روی یک سیستم مختصات معین. 2) کسر شکل نامی از روی شکل مشاهده شده، که معمولاً برای استفاده از انحراف حاصل شده از سطح نامی به صورت عملکرد پاسخ انجام می گیرد.

شکل 6-الف) یک سطح استوانه ای که با داده های واقعی بازسازی شده است. ب) دستگاه مختصات استوانه ای و ج) یک شبکه بازرسی زاویه دار.

مدلهای نمایش همبستگی فضایی روی سطوح معمولاً برگرفته از آمار فضایی می باشد (Cressie, 2015). وقتی شبکه نمونه گیری بازرسی زاویه ای پذیرفته می شود (شکل 6)، یک مدل اتورگرسیون فضایی با متغیرهای e-اگزوزن (SARX) را می توان بکار برد تا امضای سطح را نشان بدهد (Lesage and Pace, 2009). آقایان Colosimo, Mammarella and Petró, (2008) و Colosimo, et al. (2014) از روش مبتنی بر SARX برای مدلسازی و مانیتورینگ سطوح استوانه ای استفاده کرده اند. در اینجا، اجازه دهید که  $Z_h$  نشانه ابرهای نقطه ای سطح  $h$ ام باشد که یک مدل SARX از درجه دوم با فرمول ذیل مشخص می شود:

$$\begin{aligned} Z_h &= X\beta_h + u_h \\ u_h &= (\alpha_{1h}W^{(1)} + \alpha_{2h}W^{(2)})u_h + \varepsilon_h \\ \varepsilon_h &\sim N(0, \sigma_h^2 I) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن خطوط اول و دوم نمایانگر مدل‌های در مقیاس بزرگ و کوچک به ترتیب می باشد (Cressie, 2015).  $X$  همان ماتریس توابع رگرسیون می باشد.  $W^{(1)}$  و  $W^{(2)}$  اولین و دومین درجه مجاوران ماتریس مجاورت می باشند،  $\beta_h$ ،  $\alpha_{1h}$ ،  $\alpha_{2h}$  و  $\sigma_h^2$  پارامترهای تخمین زده شده است (Colosimo et al, 2004 and 2010).

توابع رگرسیون معمولی برای الگوهای استوانه ای به مدل‌های رگرسیونی از نوع فوریه در جهت زاویه ای روش‌های توابع چندجمله ای یا Chebyshev را در جهت محور  $x$  اضافه کرده اند (شکل 7).

شکل 7- یک شکل در مقیاس بزرگ معمولی از سطوح استوانه ای می تواند با ترکیب توابع چندجمله ای در طول جهت محوری با مدل رگرسیون از نوع فوریه در جهت زاویه ای بدست آید.

در این مورد، ساختار همبستگی فضایی از مدل‌های شبکه ای استفاده می کند که طی آن خودهمبستگی فضایی گسسته بوسیله برخی ضرایب همبستگی ( $\alpha_{1h}, \alpha_{2h}$  در معادله 1) مشتق شده است که به صورت آنالوگ ضرایب همبستگی اتورگرسیون برای مدل‌های سری زمانی عمل می کند. به طور اختصاصی، ماتریسهای مجاورت شطرنجی یا کوپین را می توان برای نمایش خودهمبستگی فضایی رده اول، دوم ( $W^{(1)}$  and  $W^{(2)}$ ) یا رده بالاتر استفاده نمود. یک مثال از ساختار مجاورت مبتنی بر شطرنج در مدل SAR(2) در شکل 8 نشان داده شده است.

شکل 8- مجاورت مبتنی بر شطرنج در مدل SARX: الف) نقطه مرجع (سیاه)، ب) مجاورت رده اول نقطه مرکزی (سیاه)، مجاورت رده دوم نقطه مرکزی (سیاه).

وقتی یک مدل SARX(p) برای امضای تولید استفاده بشود، راهکار مانیتورینگ صرفا می تواند از مانیتورینگ پروفایل تقلید نماید. در واقع، یک چارت کنترلی چندمتغیره را می توان برای مانیتورینگ ضرایب همبستگی تخمین زده شده بکار برد، درحالیکه یک چارت کنترل تک متغیره اضافی باعث مانیتورینگ واریانس باقیمانده می گردد (Colosimo, Mammarella & Petró, 2008; & Colosimo, et al., 2014).

الگوهای نمونه برداری معمولی هنگامی که سیستم تماسی (یعنی CMMهای معمولی) بکار بروند، معمولا کاری عملی است. در واقع CMM می تواند در یک محل معین روی یک شبکه ایده آل باعث مشخص شدن مکان

تماس-پروب بشود که روی سطح واقع است و بعد پروب را به صورت قائمه به سطح ایده آل حرکت بدهد (هندس جانشین) و مختصات نقطه تماس یافته را ذخیره سازی کند.

وقتی سیستم مترولوژی غیرتماسی در نظر گرفته شود، راهکارهای نمونه گیری یکنواخت را دیگر نمی توان پذیرفت. ساختار همبستگی فضایی برای ابرهای نقطه بدون ساختار از طریق پروسه های گاوسی (GP) می تواند مدلسازی

شود (Cressie, 2015; Colosimo *et al.*, 2014, Wand, Wang and Tsung, 2014). در این مورد،

پاسخ مشاهده شده به یک محل معین  $t = (x, y)$  با فرمول ذیل تعیین می شود:

در این حالت، عملیات مانیتورینگ نمی تواند جایگزین مانیتورینگ پروفایل معمولی بشود. در واقع، مقادیر مشابه پارامترهای GP ممکن است به الگوهای سطحی خیلی متفاوتی منجر بشوند. با این حساب، راه حل های متفاوتی برای مانیتورینگ سطح باید طراحی بشود (Colosimo *et al.*, 2014). عملیات مناسب برای مانیتورینگ سطحی مبتنی بر GP با عملیاتی که برای مانیتورینگ پروفایل غیرپارامتری استفاده شده است، مشابه می باشد (Qiu, Zou and Wang, 2010). یک مجموعه نقاط چک پوینت  $(x, y)$  برای مقایسه مقادیر  $Z$  با در نظرگیری نقاط سطح واقعی و مقدار  $Z$  پیشگویی شده بر پایه مدل شاهد استفاده می گردد. این بردار پراکندگی با هدف شناسایی حالات خارج از کنترل، مانیتورینگ می شود. بوضوح، تعداد و محل چک پوینت ها بر عملکرد عملیات تاثیر دارد.

طبق تجربه ما، هر دو شیوه که برای مانیتورینگ سطح بکار می رود (یعنی شیوه مبتنی بر SARX یا GP) می تواند در شناسایی تغییرات الگوی سطح موثر باشد. شکل 9 نشان دهنده متوسط طول اجرا (ARL) به عنوان تابعی از اندازه  $\delta$  در یک انحراف سه لبی از شکل استوانه ای شاهد می باشد. در این شکل شیوه های رقیب عبارتند از:

1) عملیات صنعت با استفاده از چارت کنترل تک متغیره برای مانیتورینگ خطای شکل یعنی ماکزیمم انحراف سطح کنونی از یک هندسه بی نقص.

2) عملیات مانیتورینگ مبتنی بر SARX



3) عملیات مانیتورینگ مبتنی بر GP (با استفاده از یا یک نمونه گیری یکنواخت یا یک نمونه گیری مکعب لاتین هایپر برای تعیین مکان نقاط چک پوینت)

همانگونه که در این مثال نشان داده شده است، شیوه های مانیتورینگ سطح براساس آمار فضایی (روشهای مبتنی بر SARX و GP) می تواند در شناسایی حالات خارج از کنترل 80 تا 40 بار سریعتر از عملیات صنعت بشود.

به عنوان یک محصول جانبی، دانش مربوط به امضای ساخت می تواند مزیت زیادی با خود داشته باشد. برای مثال، مدلسازی امضای ساخت می تواند درباره اثر پارامترهای پروسه روی شکل نهایی تحقیقاتی بنماید.

شکل 9-عملکرد ARL مانیتورینگ سطح با استفاده از عملیات صنعت (مانیتورینگ انحراف ماکزیمم از شکل بی نقص، به نام خارج از استوانه ای بودن)، روشهای مبتنی بر SARX و GP (دومی هم طراحی های یکنواخت و هم مکعب لاتین هایپر را در نظر می گیرد) نمایانگر اندازه خطای سه لپی است که بر سطح کنترل اثر می گذارد.

از نقطه 2.5D تا نقطه 3D: پروسه گاوسی از نوع ژئودسیک

همه مدل‌های ارائه شده در بخش قبلی یک ساختار مشابه را برای توضیح شکل سطح به نام  $z = z(x, y) + noise$  فرض کرده بودند. در این مدل، تنها یک مختصات  $Z$  به صورت متغیر پاسخ تصادفی عمل می کند، درحالیکه دو مختصات دیگر  $(x, y)$  به صورت تعیین کننده در نظر گرفته شده اند. این فرض تنها در برخی شرایط خاص مصداق دارد. به طور کلی، هر نقطه که روی سطح اندازه گیری می شود با یک مختصات سه تایی  $XYZ$  تعریف می شود، که باید به صورت مدل GP چندمتغیره مرکب از سه متغیر تصادفی مدلسازی بشود. این امر بدلیل آنست که تصادفی بودن به دلیل خطای اندازه گیری می باشد.

وقتی مدل‌های GP معمولی برای بازسازی سطح استفاده بشوند، یک فرضیه دوم منجر به در نظر گیری فاصله های اقلیدسی به عنوان محرک های ساختار همبستگی فضایی روی سطح می شود. چندین مدل در ساخت (برای مثال پرس کردن، قالبگیری، نورد و غیره) وجود دارد که تحت آن امضای همبستگی فضایی به احتمال بیشتری

تحت هدایت فواصل از نوع ژئودسیکی (یعنی فواصل اندازه گیری شده در طول سطح) به جای نوع اقلیدسی (شکل 10) قرار می گیرد.

وقتی دو فرضیه قبلی مصداق نداشته باشد، پروسه های گاوسی ژئودسیک یا GGP را می توان برای بازسازی سطح بکار برد (del Castillo, Colosimo and Tajbakhsh, 2015). شیوه GGP روش متناظرسازی پارامتری سازی نزدیک به ایزومتريك یا ISO-MAP را برای مختصات اصلی اجرا می کند. این امر باعث می شود که یک سیستم uv جدیدی را تعریف کنیم که طی آن فواصل اقلیدسی (در فضای جدید) به فواصل ژئودسیکی (در فضای اصلی) مرتبط می شوند. پس در اصل می توان سه مولفه سطح پارامتری را با یک GP چندمتغیره مدل سازی نمود.

با این حساب،  $w \neq w'$  با هم برابر نمی باشد، که بنا به تاکید مقاله (Cressie and Wikle (2015) نیازی به متقارن بودن ندارند. اثبات گردیده است که شناسایی یک کوواریانس متقاطع غیرمتقارن امری دشوار است. روشهایی که به تقارن نیاز دارد شامل مدل Matern چندمتغیره و منطقه بندی همزمان می باشد (Banerjee et al., 2004)، با اینحال در مقاله (Kleijnen and Mehdad (2012 نشان داده است که منطقه بندی همزمان معمولاً نسبت به پیش بینی های جداگانه روش رگرسیون kriging برای هر پاسخ عملکرد بهتری ندارد. بنا به بحث مقاله (Cressie and Wikle (2015، فرضیه تقارن خیلی قوی است، و بویژه برای کاربرد مدل سازی سطحی مقاله ما مصداق دارد. به همین دلایل، یک راه حل ممکن شامل استفاده از GP جداگانه برای تناسب جداگانه با هر مختصات است یعنی با این فرض که  $c^{(w,w')} = \text{diag}(C_x(d), C_y(d), C_z(d))$  در (2) و  $d = w - w'$  برقرار باشند. مقاله (Del Castillo, Colosimo & Tajbakhsh (2015 از روش GGP برای بازسازی سطح شکل آزاد واقعی که طبق شکل 12 استفاده کرده است، که در آن ابر نقطه بوسیله نور ساختار بندی شده بدست می آید. در این حالت، شیوه GGP نسبت به مدل سازی GP معمولی بدلیل نصف شدن خطای پیشگویی مربع میانگین عملکرد بهتر داشته است.

ترکیب داده های چندسنجشگری

نقطه نظر های مختلف و تازه ای برای مدلسازی و مانیتورینگ سطح در زمینه ترکیب داده های چندسنجشگری پدیدار شده است (Hall and Llinas, 1997). این شیوه را می توان به صورت فرایند ترکیب داده ها از چندین منبع (سنجشگرها) تعریف کرد. به نحوی که ارزیابی مترولوژیکی می تواند از همه نوع اطلاعات و داده های سنجشگر موجود بهره مند بشود (Weckenmann *et al.*, 2009).

شکل 13 انواع مختلف سیستم های مترولوژیکی موجود را برای کسب داده های ژئومتریک خلاصه کرده است. این شکل نشان می دهد که داده های سطحی چگونه می توانند با استفاده از هر دو نوع سیستم های تماسی و غیرتماسی بدست آیند. مشخص شده است که اندازه گیری با سنجشگرهای غیرتماسی (برای مثال اسکنرهای لیزر، برآمدگی های لبه، فتوگرامتری) دارای برخی خواص بسیار مطلوب، بویژه از نظر سرعت کسب و هزینه پایین کسب مقدار خیلی زیادی نقاط می باشند. ولیکن، جذابیت این تکنیک ها به دلیل عملکرد مترولوژیکی ضعیفشان تا اندازه ای کم رنگ شده است. به همین دلیل است که سیستم های تماسی کنونی (پروبه های تماسی CMM) همچنان استاندارد فعلی مشخصات مترولوژیکی را در نظر می گیرند.

در چارچوب حاضر، نویسندگان مختلفی تحقیقاتی را روی مزیت های ترکیب مجموعه داده های تماسی و غیرتماسی برای تقویت ثبت سطحی، بازسازی و مانیتورینگ انجام داده اند

(Xia, Ding, and Mallick, 2011; Liu et al. 2016; Senin, Colosimo, Pacella, 2013; )  
(Suriano et al. 2015; Colosimo, Pacella and Senin, 2015, Wang et al., 2017). اغلب این مدلها ریشه در شیوه های مطرح شده توسط Qian et al. (2006) و Qian and Wu (2008) دارند که آزمایشات کامپیوتری و واقعی را برای عملیات متامدلینگ پروسه با هم ترکیب کرده اند.

در این حالت، اولین مرحله در یک مدل GP به منظور بازسازی سطح تنها با استفاده از داده های غیرتماسی HD (تراکم بالا) بکار می رود. سپس مدل مبتنی بر GP در مرحله دوم به منظور تصحیح سطح بازسازی شده HD با استفاده از نقطه داده دارای تراکم پایین LD به عنوان «جذب کننده» استفاده شده است. این مدل دو مرحله ای امکان پیشگویی را در هر جایی با ترکیب اطلاعات فراهم شده بوسیله این دو سنجشگر به شیوه ای ساختاری برای ما فراهم می کند. این امر باعث اعتماد بیشتری به نقاط داده های تماسی (معدود) و اعتماد کمتری به مجموعه (بزرگ) داده های غیرتماسی می شود.

با استفاده از سطح شکل آزاد در شکل 12، که با سیستم های تماسی CMM و همچنین سیستم های غیرتماسی (سبک ساختاری) بازرسی شده است، (Colosimo, Pacella and Senin (2015) به مقایسه عملکرد چهار شیوه مختلف ذیل برای بازسازی سطح پرداختند:

-LD: با استفاده از یک بازسازی مبتنی بر GP ی داده های تماسی با تراکم پایین LD فقط.

-HD: با استفاده از یک بازسازی مبتنی بر GP ی داده های غیرتماسی با تراکم بالا LD فقط.

-ADD: با استفاده از یک بازسازی مبتنی بر GP که از مجموعه داده های تماسی و غیرتماسی ادغام شده به صورت یک پایگاه داده منفرد استفاده می کند که گویی از یک سیستم اندازه گیری یکسان منشا گرفته باشند.

-FUSION: با استفاده از شیوه ترکیب داده های سلسله مراتبی مبتنی بر GP دو مرحله ای که قبلا توضیح داده شده است.

شکل 15 (نقشه خطای ابری) و جدول 1 (فاصله اطمینان روی میانگین خطای پیشگویی بازسازی) نشان دهنده نتایج عملیات بازسازی با استفاده از این چهار شیوه می باشد. روشن است که ترکیب داده ها نمایانگر مزیت های مهمی نسبت به شیوه های موجود دیگر می باشد.

جدول 1- میانگین خطای پیشگویی مربع و فاصله اطمینان هنگامی که داده های منفرد و چندسنجشگری برای بازسازی یک سطح با شکل آزاد در نظر گرفته می شوند (Colosimo, Pacella and Senin, 2015).

### رهنمودهای آتی در مدلسازی داده های محصول

پیشرفتهای فناوریهای ساخت و سیستم های بازرسی احتمالا باعث بسیاری تغییرات برجسته مختلف در آینده نزدیک از جمله تغییرات از سطوح 2.5D به 3D کامل خواهد شد. سایر تغییرات شامل حرکت از سطوح معمولی به سطوح بافت دار و با تقلید از روش زیستی عملیاتی (Malshe et al., 2013)، حرکت از محصولات تک ماده به محصولات چند ماده ای، و حرکت از ساختارهای کاملا فشرده به ساختارهای درجه بندی شده عملیاتی (Miyamoto et al., Eds., 2013) می باشند. روشهای آماری مناسب باید بر این تغییرات از طریق فراهم سازی ابزار مدلسازی مناسب مسلط بشود.

بهبودهای مداوم در سیستم های اندازه گیری به آسانی باعث کاهش زمانهای بازرسی می شود که احتمالا از طریق اشکار شدن خودهمبستگی بین ابرهای نقطه متوالی می باشد. با اینحساب، به روشهای SPC فضایی- زمانی نیاز خواهد بود (Megahed et al, 2012). کاهش بعدگرایی (Pacella and Colosimo, 2016) به عنوان اثری از افزایش اندازه نمونه ابرهای نقطه سطح هرچه بیشتر متداول خواهد شد. ترکیب داده ها بیشتر به یک روش معمولی و طبیعی به جای یک روش قاعده بر استثنا تبدیل خواهد شد چون سیستم های بیشتر و بیشتری با هزینه های کاهش یافته در دسترس قرار خواهند گرفت (Wells et al, 2013). باید به مدلسازی مناسب برای داده های CT اشعه ایکس که در روش مترولوژی ابعادی و حجمی گسترش خواهد یافت، توجه بیشتری مبذول داشت (Kruth, et al. 2011). در واقع، روشهای هندسه های ژئومتری داخلی پیچیده، ساختارهای درجه بندی تخلل و عملیاتی نیازمند بازرسی CT اشعه ایکس هستند تا از تست تخریبی جلوگیری بشود. روشهای اماری برای مدلسازی داده های صوتی به رهگیری نویزگیری داده های CT می پردازد و به تخمین عدم قطعیت کمک می کند. با اینحساب، شیوه های ابداعی در عرصه تحلیل اماری تصاویر بیومدیکال می تواند مفید واقع شود.

### مدلسازی و مانیتورینگ سیگنال پروسه و داده های تصویری: چالشهای اصلی و راه حل ممکن

در سالهای اخیر، فناوریهای سنجشگری و اطلاعاتی که همواره در حال تکامل می باشند، نسل جدیدی از محیط های صنعت غنی از داده ها را شکل داده اند. استفاده از راه حل های تازه سنجش و درون خطی (مانند سیستم های بینایی ماشین، مترولوژی درون خطی غیرتماسی، فناوریهای سنجش اکوستیک، نیرو، حرارتی و غیره) به فرد امکان می دهد تا بین کیفیت و قابلیت ثبات فرایندها و رشته داده های فرکانس بالا ارتباطی برقرار سازد. در این سناریو، باید شیوه هایی را برای نظارت یا کنترل پروسه آماری SPC به طرز مناسبی مجددا طراحی نمود تا روی داده های پروسه (به جای محصول) عمل نماید و مزیت کاملی را از قبال کلیه اطلاعات موجود کسب کند. ما تاکید می کنیم که بکارگیری SPC برای پردازش داده ها می تواند مزیت های برجسته ای بویژه در زمینه اجرای تولید کوتاه مدت داشته باشد. شکل 16 نشان دهنده دو بخش سازنده در یک چرخ دنده فرود هواپیما می باشد (بست فلزی کمانک (a) و محور دستک (b)). این دو بخش سازنده معمولا با نوردی که از یک قطعه توپر

شروع می شود ماشین کاری می گردد و نیازمند چندین ساعت کار است چون این بخشهای سازنده از جنس آلیاژهای تیتانیوم مقاوم به برش ساخته شده اند. در این حالت، مانیتورینگ کیفیت محصول نهایی نشانه شناسایی نقص های احتمالی پروسه با ساعت ها تاخیر می باشد. این امر نهایتا به یک اتلاف زمانی، مواد و انرژی خیلی زیادی معنی می شود.

مشکلی مشابه از ساخت محصول سفارشی ناشی می شود. برای مثال، ایمپلنت های لگن را که با روش ساخت افزوده انجام شده است و در شکل 17 نشان داده شده است، در نظر بگیرید. در این حالت، هر محصول منفردی یک نوع منحصر به فرد است، و هیچ نمونه تک فازی برای طراحی چارت کنترل در دست نیست.

به طور خلاصه، وقتی بخشهای سازنده با چرخه عمر طولانی و ارزش افزوده بالا یا محصولات سفارشی ساخته می شوند، SPC معمولی باید به طرز مناسبی تغییر شکل اصلاحی داده بشود تا بتواند انواع داده های ویژه (بسیاری سیگنالها و تصاویر) را رهگیری کند. لازم بذکر است که اینگونه انواع داده ها گاهی اوقات می توانند کمکی برای تشخیص پروسه بعد از اعلام اخطار باشند (Chiang, Russell and Braatz, 2000). بدون تفصیل زیاد، برخی مسائل اصلی در زمینه SPC برای داده های پروسه درون خطی بعدا خلاصه سازی می شود.

داده های سیگنال-مشخصه بسیاری داده های پروسه وجود الگوهای چرخه ای می باشد (شکل 18). از اینرو، مانیتورینگ پروفایل را می توان به صورت مرجعی در ابداع شیوه های SPC برای داده های سیگنال بکار برد (Jin and Shi, 1999 and 2001; Woodall et al., 2004).

برای سیگنالهای چندمقیاسی پیچیده، می توان مزیت های برجسته ای را با لحاظ روشهای نوین تجزیه سیگنال (مانند تحلیل موجک، تجزیه حالت تجربی) در عملیات مانیتورینگ پروفایل بدست آورد.

شکل 18-مثالهایی از سیگنالهایی که مشخص کننده کیفیت پروسه ساخت پیشرفته می باشند (که در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه *Politecnico di Milano* ابداع شده است): (a) نیروی نوردکاری آلیاژهای تیتانیوم

برای کاربردهای هوافضا، (b) سیگنال گشتاور در ضربه زنی، (c) نیروی دریل کردن با چند مواد و (d) فشار در برش بوسیله فوران آب

همه مراحل پیش پردازش (نویزگیری سیگنال و ثبت سیگنال) به طور معنی داری بر عملکرد عملیات مانیتورینگ اثر می گذارد. بنابراین، شیوه هایی که چارت پیش پردازش و چارت کنترل را با هم ترکیب می کنند می توانند بویژه موثر باشند (Grasso, Menafoglio and Secchi, 2016).

روشهای فارغ از توزیع و شیوه های یادگیری ماشینی را می توان برای ایجاد سیگنالهای کلان داده که فرضیات معمولی در موردشان نقض شده است، بکار برد (Grasso et al., 2015; Weese, et al, 2016).

شیوه های جدید مدلسازی و مانیتورینگ داده های سیگنال چندرشته ای برای رهگیری ماهیت چندمتغیره سنجش درون خطی باید بیشتر ابداع شوند (Paynabar, Jin and Pacella, 2013; Yang and Jin, 2012, Yoon and MacGregor, 2004, Guo, Jin and Hu, 2016).

**داده های تصویری**-داده های تصویری نقش فزاینده ای در مانیتورینگ و کنترل پروسه ایفا می کنند. در واقع، تصاویر نمایانگر منبع داده های قابل استطاعت، سریع و غنی از اطلاعات در بسیاری زمینه های صنعت می باشد. در بخش ساخت، دوربین های عکاسی و دوربین های ویدئویی بیش از پیش برای تحلیل داده های *in situ* (در محل) متداول شده است (که مهندسين معمولاً به آن مانیتورینگ *in situ* می گویند). متأسفانه، وقتی تحلیل داده های تصویری یا ویدئویی آماده می شود، هیچگونه عملیات یکپارچه SPC برای دست اندرکاران وجود ندارد. در سالهای اخیر، بسیاری نویسندگان درباره نیاز به عملیات مناسب SPC جهت داده های تصویری توضیحاتی داده اند

(Megahed, Woodall, and Camelio, 2011; Megahed et al., 2012; Qiu, 2005; Xing and Qiu 2011; Qiu and Mukherjee, 2010, Yan, Paynabar and Shi, 2016).

در این متون، به ویدئوهایی که در آن اصول دینامیک پروسه ساخت در زمان واقعی رئال تایم ثبت گردیده باشد، توجه اندکی اختصاص داده شده است. در بخش بعدی، یک شیوه ممکن برای مانیتورینگ *in situ* در AM فلزی را مورد بحث قرار میدهم.

## سنجش *in situ* از طریق تحلیل داده های ویدئویی-تصویری در ساخت افزوده

AM فلزی نشانه فناوری کلیدی توانمندی برای انقلاب صنعتی چهارم است چون راه را برای شیوه های کاملاً نوین ساخت و کارخانجات دیجیتالی هموار می سازد. جذاب ترین مزیت AM را می توان اینگونه خلاصه سازی کرد: (1) دیجیتالی سازی پروسه های طراحی و تولید، (2) کاهش زمان-به-بازار در مقایسه با سایر فناوریها، (3) تحول در زنجیره عرضه (AM دست کم به طور اساسی می تواند هرگاه و هرجایی که لازم باشد، بخشی را تولید کند)، (4) انعطاف پذیری بالا و آزادی برای راه حل های طراحی نوآورانه (ساختارهای سبک وزن، سطوح کارکردی، مواد نوین)، (5) چرخه عمر بیشتر و پایدارتر برای بخش سازنده به یمن امکان اضافه سازی مواد برای تعمیر محصولات.

علیرغم پیشرفتهای فناوری مداوم و پیوسته در سیستم های AM فلزی، همچنان چالشهای مهمی را باید دنبال کرد. برای دستیابی به صنعت پیشرفته، اولین راه مداخله باید کاهش میزان نقص بالا در فناوریهای AM فلزی کنونی باشد. طبق گفته موسسه ملی استانداردها و فناوری NIST، کیفیت ضعیف پروسه های AM ضروری ترین مسئله ای است که با آن روبرو هستیم: «قابلیت تغییر کیفیت بخش سازنده به دلیل تحمل های ابعادی نامناسب، سختی سطح و نواقص، منجر به محدودیت پذیرش وسیعتر آن برای کاربردهای ارزش بالا یا هدف حیاتی می شود» (Mani, et al., 2015).

شیوه های جدیدی برای AM نقص صفر نشانه یک زمینه تحقیقاتی اولویت دار در زمینه AM فلزی برای مسائل مختلف می باشد:

-پروسه ها خیلی طولانی هستند (چندین روز برای بخشهای با اندازه متوسط طول می کشد)، و مواد هم خیلی گران هستند. این مسئله که در پایان پروسه کشف نماییم یک بخش سازنده دچار نقص شده است، امری به صرفه و قابل قبول نمی باشد.

-بخشهای سازنده که با روش AM تولید شده است، یک مجموعه شکلهای پیچیده و ساختارهای درونی پیچیده را نشان می دهند که اندازه گیری شان به کمک ابزار مترولوژیکی موجود امری دشوار و گران می باشد. پیدا کردن نقص های داخلی کوچک می تواند کاری دشوار یا غیرممکن باشد. با اینحساب، بازرسی های کیفیت بعد از پروسه به تنهایی کافی نمی باشد.



-بخشهای صنعت کلیدی (برای مثال هوافضا و زیست پزشکی) دربرگیرنده کاربردهایی است که نواقصشان قابل تحمل نیستند. با اینحساب، به محض اینکه نواقص طی پروسه بوجود آیند، باید تصحیح بشوند و از آنها اجتناب بشود.

از میان راه حل‌های ممکن که برای دستیابی به AM نقص صفر طراحی شده است، مانیتورینگ پروسه *in situ* بوسیله تحلیل تصویری و ویدئویی یک روش بویژه نویدبخشی می باشد. برای یک بررسی کامل سنجشگرها و راه حل های مانیتورینگ *in situ*، خواننده علاقمند را به مقالات Grasso & Tapia & Elwany, 2014 و Colosimo, 2017 ارجاع می دهیم. در میان راه حل های جمع اوری داده های *in situ*، روش ویدئوهای سرعت بالا با دامنه های مرئی یا مادون قرمز از جالب ترین نوع روشها می باشند.

در مقایسه با روش SPC تصویری (Megahed, Woodall, and Camelio, 2011)، روش SPC ویدئویی-تصویری دارای پیچیدگی دیگری به نام سرعت می باشد. دوم اینکه حالت تحت کنترل که از آن ویدئو تهیه شده است نمایانگر یک پدیده دینامیک است. در مورد ذوب لیزر منتخب (SLM)، این پدیده پردازش لیزری می باشد، یعنی پرتو لیزری در سرعت بالایی روی یک مسیر از قبل تعریف شده برای ذوب پودر فلزی حرکت می کند.

شکل 19 نشان دهنده توالی چارچوب های بدست آمده توسط نمونه گیری فرعی یک ویدئو می باشد که در آن یکی از مثلث های نشان داده شده در شکل 21، به نام مثلث شماره 1 از طریق شیوه SLM ساخته شده است. این ویدئو طی مطالعه تجربی برای مانیتورینگ *in situ* روش AM فلزی در آزمایشگاه AddMe گروه مهندسی مکانیک دانشگاه Politecnico di Milano ضبط شده است. در این مطالعه، برخی شرایط خارج از کنترل منجر به نواقصی روی شکل نهایی مثلث ها شده است. این نواقص اساسا به دلیل برخی نقاط داغ مشاهده شده طی پروسه لیزری است. نقاط داغ محل‌های خاصی از پودر فلزدار هستند که در درجه حرارت بالایی برای مدت زمان طولانی باقی می مانند.

یک شیوه متداول در SPC برای داده های تصویری شامل استفاده از تحلیل محتوایی اصلی PCA می باشد که از طریق باز کردن چارچوب های تصویری با استفاده از پیکسلها به عنوان متغیر (ستونهای ماتریس داده) و چارچوب ها به عنوان نقاط زمانی (ردیف های ماتریس داده) انجام می شود (شکل 20). سپس PC کسب شده

می تواند با استفاده از چارت کنترل چندمتغیره ای مانیتورینگ بشود (Bharati and MacGregor, 1998).  
اقایان Grasso و همکارانش در سال 2016 نشان داده اند که این شیوه در شناسایی نقاط داغ موثر نمی باشد.  
اصول دینامیک پروسه لیزر بر پدیده های نقاط داغ حاکم است و بنابراین نمی گذارد که چارت کنترل مبتنی بر  
PC این شرایط خارج از کنترل را شناسایی نماید.

یک شیوه دیگر به نام PCA در حالت T (Jolliffe, 2002) که از متون علمی درباره تحلیل ژئوفضایی و علوم  
جوی شروع گردید، می تواند مورد استفاده قرار گیرد. شیوه PCA در حالت T روی ماتریس داده های جابجا  
شده ای کار می کند که چارچوب هایش همان مشاهدات (ستون ها) و پیکسلهایی همان نقاط زمانی (ردیف ها)  
باشد. PCA در حالت T می تواند اصول دینامیک مختلفی را برای شدت که در محل های (پیکسل های) مختلف  
چارچوب ثبت شده است، بدست آورد. شکل 22 نشان دهنده مثالی از این الگوهای شدت مختلف می باشد.  
پیکسل های گرفته شده در گوشه های A و B نشان دهنده الگوی شدت تحت کنترل می باشد، درحالی که پیکسل  
گرفته شده در گوشه C (نقطه داغ) نشان دهنده الگوی خارج از کنترل است که مشخصه آن شدتی است که  
برای مدت زمانی طولانی در حد بالایی باقی بماند.

وقتی PCA در حالت T محاسبه شود، PC های حفظ شده در هر محل پیکسل در چارچوب وجود دارد و  
Hotelling T<sup>2</sup> را می توان به عنوان آمار سنتزی برای خلاصه سازی نتیجه PCA استفاده نمود. سرانجام  
اینکه خوشه گیری k میانگین می تواند به صورت یک قانون اخطار استفاده بشود.

شکل 21-a) شکل کمپلکس AM، b) مثالهایی از بخشهای مثلثی مدل CAD برش خورده، c) نواقص  
موضعی در گوشه های تیز این مثلث ها (جزئیات محل غیرتطابقی مثلثها به دلیل نقاط داغ)

شکل 23 نشان دهنده خوشه گیری k میانگین است که بعد از PCA در حالت T در شرایط عدم وجود نواقص  
(سمت چپ) و در حالت وجود نواقص نقطه داغ (سمت راست) بکار برده می شود. در اولین حالت، تعداد بهینه ی  
خوشه ها دو تا می باشد: اولین خوشه نمایانگر زمینه با شدت پایین است، دومین خوشه نمایانگر مسیر اسکن  
گیری لیزر دارای شدت بالا و دارای فرکانس بالا می باشد. وقتی نقص نقطه داغ وجود داشته باشد، یک خوشه

سومی هم ظاهر می شود، که نمایانگر مسیر شدت دارای فرکانس بالا و فرکانس پایین می باشد که ناشی از شرایط ذوب بیش از حد بوده است. به طور خلاصه، تحلیل داده های ویدئویی-تصویری برای کاربردهای SPC به مدلسازی فضایی زمانی نیاز دارد که می تواند اصول دینامیک مختلف و امضاهای فضایی مختلفی را از پدیده های مشاهده شده کسب نماید.

شکل 23-خوشه بندی k میانگین بکار رفته بعد از روش PCA در حالت T وقتی که هیچ نقصی (سمت چپ) مشاهده نشده یا اینکه نواقص نقطه داغ (سمت راست) مشاهده شده است.

### نتیجه گیری ها

در حال حاضر ما در عصر طلایی داده ها برای تولید صنعتی زندگی می کنیم (Steinberg, 2016). عصر طلایی از یک سو از پیشرفتهای اخیر در زمینه فناوریهای ساخت و اندازه گیری و از سوی دیگر از انقلاب فوق العاده ی تحلیل داده های سنجشی و کامپیوتری ناشی شده است. هر دو در قبال هزینه های کاهش یافته ای قابل دسترسی می باشند. این روند از طریق سیاستگزاریهای ملی و بین المللی برای پایدار نگه داشتن انقلاب صنعتی چهارم به منظور تقویت رقابت پذیری صنعت مورد تاکید بیشتری قرار می گیرد. این مقاله که از مسائل صنعت واقعی شروع به بحث کرده است، برخی چالشهای موجود و راه حل های ممکن را برای ساخت در حالت نقص صفر بوسیله مدلسازی و مانیتورینگ محصول و داده های پروسه توضیح داده است. بسیاری رهنمودهای مختلف برای تحقیقات آتی به شرح ذیل می تواند باشد:

-راه حل های چندسنجشگری گسترش خواهد یافت چرا که سنجشگرها ارزان قیمت بوده و فراوانی آنها می تواند به استحکام و پوشش فضایی کمک کند. روشهای تازه برای ترکیب داده ها از انواع منابع مختلف در مقیاسهای مختلف و فراوانی های گوناگون مورد نیاز خواهد بود. فراوانی می تواند احتمالاً به شناسایی قسمتهای بررسی نشده در پروسه های ساخت و اندازه گیری کمک نماید.

-**زمان محاسبات:** زمان محاسبات کوتاه برای عملیات SPC درون خطی به صورت یک محدودیت اجباری عمل خواهد کرد. در واقع، زمانهای محاسباتی طولانی می تواند شیوه های مطرح شده را برای دست اندرکاران صنعت واقعی بلااستفاده نماید.

-**از مانیتورینگ تا کنترل:** داده های پردازش شده که از طریق سنجش *in situ* کسب شده است فرصتهای زیادی را برای حرکت از سمت مانیتورینگ پروسه آماری به سمت کنترل حلقه بسته در اختیار قرار داده است. ترکیب مناسب این دو راه حل احتمالا نسل جدیدی از ابزارآلات را برای ساخت در حالت نقص صفر بوجود خواهد آورد.

-**میزان اخطار اشتباه:** میزان زیاده از حد اخطار کاذب دشمن بزرگ راه حل های SPC است که در کارخانه اجرا می شوند. توجه به نقض فرضیه ها و تست شبیه سازی شده باید برای پایین بردن میزان کل اخطار کاذب مورد تاکید قرار گیرد.

-**کمک به طراحی سنجشگر:** شیوه های جدیدی برای کمک به انتخاب سنجشگر، محل و کالیبراسیون آن مورد نیاز خواهد بود. آمار صنعت نباید تنها روی داده های موجود عمل نماید بلکه از طراحی نمونه گیری هم باید حمایت کند (پوشش فضایی زمانی و خصوصیات آن باید استخراج گردد).

-**کار گروهی چند تخصصی:** راه حلهایی برای مسائل واقعی و آتی بیش از پیش نیازمند مجموعه ای از تخصص ها از رشته آمار گرفته تا پردازش سیگنال و داده های تصویری می باشد. برای این هدف، کار گروهی چند تخصصی باید به عنوان هدف بنیانی آموزش تحقیقات و حرفه ای ترویج گردد.

## References

- ASME Y14.5-2009 - Dimensioning and Tolerancing
- Aceto, G., Botta, A., De Donato, W., & Pescapè, A. (2013). Cloud monitoring: A survey. *Computer Networks*, 57(9), 2093-2115.
- Banerjee, S., Carlin, B.P., and Gelfand, A.E., (2004), Hierarchical modeling and analysis for spatial data, Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press.
- Baur, C., & Wee, D., (2015), Manufacturing's next act, McKinsey&Company.
- Bharati, M. H., & MacGregor, J. F. (1998). Multivariate image analysis for real-time process monitoring and control. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37(12), 4715-4724.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8(1), 37-44.
- Chiang, L. H., Russell, E. L., & Braatz, R. D. (2000). Fault detection and diagnosis in industrial systems. Springer Science & Business Media.
- Colosimo, B. M., & Pacella, M. (2007). On the use of principal component analysis to identify systematic patterns in roundness profiles. *Quality and reliability engineering international*, 23(6), 707-725.
- Colosimo, B. M., Semeraro, Q., & Pacella, M. (2008). Statistical process control for geometric specifications: on the monitoring of roundness profiles. *Journal of quality technology*, 40(1), 1.
- Colosimo, B. M., & Pacella, M. (2010). A comparison study of control charts for statistical monitoring of functional data. *International Journal of Production Research*, 48(6), 1575-1601.
- Colosimo, B. M., & Pacella, M. (2011). Analyzing the effect of process parameters on the shape of 3D profiles. *Journal of Quality Technology*, 43(3), 169.
- Colosimo, B. M., Mammarella, F., & Petro, S. (2010). Quality control of manufactured surfaces. In *Frontiers in Statistical Quality Control 9* (pp. 55-70). Physica-Verlag HD.



Colosimo, B. M., Cicorella, P., Pacella, M., & Blaco, M. (2014). From profile to surface monitoring: SPC for cylindrical surfaces via Gaussian Processes. *Journal of Quality Technology*, 46(2), 95.

Colosimo, B. M., Pacella, M., & Senin, N. (2015). Multisensor data fusion via Gaussian process models for dimensional and geometric verification. *Precision Engineering*, 40, 199-213.

Cressie, N. (2015). *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons.

Cressie, N., & Wikle, C. K. (2015). *Statistics for spatio-temporal data*. John Wiley & Sons.

Del Castillo, E., Colosimo, B. M., & Tajbakhsh, S. D. (2015). Geodesic Gaussian processes for the parametric reconstruction of a free-form surface. *Technometrics*, 57(1), 87-99.

Ding, Y., Zeng, L., & Zhou, S. (2006). Phase I analysis for monitoring nonlinear profiles in manufacturing processes. *Journal of Quality Technology*, 38(3), 199.

Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (2016). *Statistical Shape Analysis: With Applications in R*. John Wiley & Sons.

Ganesan, R., Das, T. K., & Venkataraman, V. (2004). Wavelet-based multiscale statistical process monitoring: A literature review. *IIE transactions*, 36(9), 787-806.

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 238). New York: Springer.

Grasso, M., Pennacchi, P., & Colosimo, B. M. (2014). Empirical mode decomposition of pressure signal for health condition monitoring in waterjet cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(1-4), 347-364.

Grasso, M., Colosimo, B. M., Semeraro, Q., & Pacella, M. (2015). A Comparison Study of Distribution-Free Multivariate SPC Methods for Multimode Data. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(1), 75-96.

Grasso, M., Chatterton, S., Pennacchi, P., & Colosimo, B. M. (2016). A data-driven method to enhance vibration signal decomposition for rolling bearing fault analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 81, 126-147.

Grasso, M., Menafoglio, A., Colosimo, B. M., & Secchi, P. (2016). Using Curve-Registration Information for Profile Monitoring. *Journal of Quality Technology*, 48(2), 99.

Grasso, M., Colosimo, B. M., & Tsung, F. (2016). A phase I multi-modelling approach for profile monitoring of signal data. *International Journal of Production Research*, 1-24.

Grasso, M., Laguzza, V., Semeraro, Q., & Colosimo, B. M. (2017). In-Process Monitoring of Selective Laser Melting: Spatial Detection of Defects Via Image Data Analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(5), 051001..



Grasso, M., & Colosimo, B. M (2017). Process defects and In-situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. Accepted for publication on Measurement Science and Technology.

Grasso, M., Demir, A. G., Previtali, B., & Colosimo, B. M. (2018). In situ monitoring of selective laser melting of zinc powder via infrared imaging of the process plume. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 229-239.

Guo, W., Jin, J. J., & Hu, S. J. (2016, June). Profile Monitoring and Fault Diagnosis via Sensor Fusion for Ultrasonic Welding. In *ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference* (pp. V002T04A028-V002T04A028). American Society of Mechanical Engineers.

Hall, D. L., & Llinas, J. (1997). An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 6-23.

Hazen, B. T., Boone, C. A., Ezell, J. D., & Jones-Farmer, L. A. (2014). Data quality for data science, predictive analytics, and big data in supply chain management: An introduction to the problem and suggestions for research and applications. *International Journal of Production Economics*, 154, 72-80.

Jazdi, N. (2014, May). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In *Automation, Quality and Testing, Robotics, 2014 IEEE International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.

Jin, J., & Shi, J. (1999). Feature-preserving data compression of stamping tonnage information using wavelets. *Technometrics*, 41(4), 327-339.

Jin, J., & Shi, J. (2001). Automatic feature extraction of waveform signals for in-process diagnostic performance improvement. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12(3), 257-268.

Jones-Farmer, L. A., Ezell, J. D., & Hazen, B. T. (2014). Applying control chart methods to enhance data quality. *Technometrics*, 56(1), 29-41.

Klijnen, J., and Mehdad, E., (2012), "Kriging in multi-response simulation including a Monte Carlo Laboratory", CentER Discussion Paper, Tilburg University, Netherlands, <http://ssrn.com/abstract=2060891>.

Kruth, J. P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., De Chiffre, L., & Weckenmann, A. (2011). Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(2), 821-842.

Lesage, J. & Pace, R.K (2009). *Introduction to Spatial Econometrics*, Chapman and Hall/CRC.



Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.

Liu, M., Cheung, C. F., Cheng, C. H., & Lee, W. B. (2016). A Gaussian Process Data Modelling and Maximum Likelihood Data Fusion Method for Multi-Sensor CMM Measurement of Freeform Surfaces. *Applied Sciences*, 6(12), 409.

Malshe, A., Rajurkar, K., Samant, A., Hansen, H. N., Bapat, S., & Jiang, W. (2013). Bio-inspired functional surfaces for advanced applications. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 62(2), 607-628.

Mani, M., et al.. (2015). Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing powder bed fusion processes. NIST Report 8036.

Megahed, F. M., Woodall, W. H., & Camelio, J. A. (2011). A review and perspective on control charting with image data. *Journal of Quality Technology*, 43(2), 83.

Megahed, F. M., Wells, L. J., Camelio, J. A., & Woodall, W. H. (2012). A spatiotemporal method for the monitoring of image data. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(8), 967-980.

Megahed, F. M., & Jones-Farmer, L. A. (2015). Statistical perspectives on "big data". In *Frontiers in Statistical Quality Control 11* (pp. 29-47). Springer International Publishing.

Miyamoto, Y., Kaysser, W. A., Rabin, B. H., Kawasaki, A., & Ford, R. G. (Eds.). (2013). *Functionally graded materials: design, processing and applications* (Vol. 5). Springer Science & Business Media.

Noorossana, R., Saghaei, A., & Amiri, A. (2011). *Statistical analysis of profile monitoring* (Vol. 865). John Wiley & Sons.

Paynabar, K., Jin, J., and M. Pacella, (2013) "Monitoring and Diagnosis of Multichannel Nonlinear Profile Variations Using Uncorrelated Multilinear Principal Component Analysis," *IIE Transactions on Quality and Reliability Engineering*. V45 (11), 1235-1247.

Paynabar, K., Jin, J., and Reed, M. (2014) "Informative Sensor and Feature Selection via Hierarchical Non-Negative Garrote," Accepted by *Technometrics* (online version DOI:10.1080/00401706.2014.947383.)

Pacella, M., & Colosimo, B. M. (2016). Multilinear principal component analysis for statistical modeling of cylindrical surfaces: a case study. *Quality Technology & Quantitative Management*, 1-19.



arjomera.com



Qian, Z., Seepersad, C. C., Joseph, V. R., Allen, J. K., & Wu, C. J. (2006). Building surrogate models based on detailed and approximate simulations. *Journal of Mechanical Design*, 128(4), 668-677.

Qian, P. Z., & Wu, C. J. (2008). Bayesian hierarchical modeling for integrating low-accuracy and high-accuracy experiments. *Technometrics*, 50(2), 192-204.

Qiu, P., Zou, C., & Wang, Z. (2010). Nonparametric profile monitoring by mixed effects modeling. *Technometrics*, 52(3), 265-277.

Qiu, P. (2005). *Image processing and jump regression analysis* (Vol. 599). John Wiley & Sons.

Qiu, P., & Mukherjee, P. S. (2010). Edge structure preserving image denoising. *Signal Processing*, 90(10), 2851-2862.

Repossini, G., Laguzza, V., Grasso, M., & Colosimo, B. M. (2017). On the use of spatter signature for in-situ monitoring of Laser Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing*, 16, 35-48.

Rübmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group, 9.

Senin, N., Colosimo, B. M., & Pacella, M. (2013). Point set augmentation through fitting for enhanced ICP registration of point clouds in multisensor coordinate metrology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), 39-52.

Shao, C., Paynabar, K., Kim, T. H., Jin, J., Hu, J., Spicer, P., Wang, and H., Abell, J., (2013) "Feature Selection for Manufacturing Process Monitoring Using Cross-Validation," *Journal of Manufacturing Systems*, V32 (4), 550-555.

Steinberg, D. M. (2016). Industrial statistics: The challenges and the research. *Quality Engineering*, 28(1), 45-59.

Suriano, S., Wang, H., Shao, C., Hu, S. J., & Sekhar, P. (2015). Progressive measurement and monitoring for multi-resolution data in surface manufacturing considering spatial and cross correlations. *IIE Transactions*, 47(10), 1033-1052.

Tapia, G., & Elwany, A. (2014). A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 060801.



Turner, H., White, J., Camelio, J. A., Williams, C., Amos, B., & Parker, R. (2015). Bad parts: Are our manufacturing systems at risk of silent cyberattacks?. *IEEE Security & Privacy*, 13(3), 40-47.

Wang, J., Pagani, L., Leach, R. K., Zeng, W., Colosimo, B. M., & Zhou, L. (2017). Study of weighted fusion methods for the measurement of surface geometry. *Precision Engineering*, 47, 111-121.

Wang, L., Törnngren, M., & Onori, M. (2015). Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37(Part 2), 517-527.

Weckenmann, A., Jiang, X., Sommer, K. D., Neuschaefer-Rube, U., Seewig, J., Shaw, L., & Estler, T. (2009). Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(2), 701-721.

Wells, L. J., Megahed, F. M., Niziolek, C. B., Camelio, J. A., & Woodall, W. H. (2013). Statistical process monitoring approach for high-density point clouds. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(6), 1267-1279.

Weese, M., Martinez, W., Megahed, F. M., & Jones-Farmer, L. A. (2016). Statistical learning methods applied to process monitoring: An overview and perspective. *Journal of Quality Technology*, 48(1), 4.

Woodall, W. H., Spitzner, D. J., Montgomery, D. C., & Gupta, S. (2004). Using control charts to monitor process and product quality profiles. *Journal of Quality Technology*, 36(3), 309.

Woodall, W. H. (2007). Current research on profile monitoring. *Production*, 17(3), 420-425.

Xia, H., Ding, Y., & Wang, J. (2008). Gaussian process method for form error assessment using coordinate measurements. *IIE Transactions*, 40(10), 931-946.

Xia, H., Ding, Y., & Mallick, B. K. (2011). Bayesian hierarchical model for combining misaligned two-resolution metrology data. *IIE Transactions*, 43(4), 242-258.

Xing, C., & Qiu, P. (2011). Intensity-based image registration by nonparametric local smoothing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33(10), 2081-2092.

Yan, H., Paynabar, K., & Shi, J. (2016). Anomaly detection in images with smooth background via smooth-sparse decomposition. *Technometrics*, (accepted).



Wang, A., Wang, K., & Tsung, F. (2014). Statistical surface monitoring by spatial-structure modeling. *Journal of Quality Technology*, 46(4), 359.

Wells, L. J., Camelio, J. A., Williams, C. B., & White, J. (2014). Cyber-physical security challenges in manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2(2), 74-77.

Turner, Hamilton, et al. "Bad parts: Are our manufacturing systems at risk of silent cyberattacks?" *IEEE Security & Privacy* 13.3 (2015): 40-47. for more details

Yang, Q. and Jin, J. (2012) "Separation of Individual Operation Signals from Mixed Sensor Measurements," *IIE Transactions on Quality and Reliability Engineering*, V44(9), 780-792.

Yin, S., Ding, S. X., Xie, X., & Luo, H. (2014). A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 6418-

Yoon, S., & MacGregor, J. F. (2004). Principal-component analysis of multiscale data for process monitoring and fault diagnosis. *AIChE Journal*, 50(11), 2891-2903.

ترجمه فا



TarjomeFa.Com