



روشی نوین برای بازسازی پروفیل هندسی سطح داخلی لوله در بازرسی با توپک اندازه گیر لیزری

مجید هداوند¹، سعید خدایگان^{2*}، محمد سبحان اسفندیار³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-9567، khodaygan@sharif.edu

چکیده

با پیشرفت فناوری و نیاز به دسترسی به منابع انرژی وجود خطوط لوله مانند خطوط لوله گاز، نفت و آب بسیار حیاتی است. این لوله‌ها با گذر زمان دچار فرسایش و آسیب می‌شوند. با کنترل و پایش مسیرهای خطوط لوله، احتمال ورود خسارات ناگهانی تا حد بسیار زیادی کاهش می‌یابد. فرآیند پیک رانی یکی از موثرترین روش‌ها در پایش و کنترل ابعادی و هندسی مسیرهای خطوط لوله انتقال انرژی است. در این مقاله، الگوریتم جدیدی جهت اندازه‌گیری هندسه داخلی لوله‌های صنعتی در فرآیند پیک رانی پرمبنای استفاده از حسگرهای لیزری ارائه می‌گردد. مطابق با الگوریتم پیشنهادی، اندازه‌گیری ابعادی و هندسی لوله‌ها با دقت بالایی انجام و سپس با تحلیل داده‌های حاصل از شبیه‌سازی لیزری-تصویری از هندسه سطح داخلی لوله مدل دقیقی از آن ایجاد و عیوب موجود در سطح داخل لوله شناسایی می‌گردد. به منظور نمایش توانایی الگوریتم پیشنهادی، یک لوله دارای عیب هندسی مشخص، شبیه‌سازی و بر اساس الگوریتم ارائه شده مورد بررسی و بازرسی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل مورد مقایسه و بحث قرار می‌گیرد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 بهمن 1396
پذیرش: 06 فروردین 1397
ارائه در سایت: 30 فروردین 1397
کلیدواژه‌ها:
پایش خطوط لوله
بازرسی غیرمخرب
لیزر-مینا
حسگر لیزری
پردازش تصویر

A new method for reconstructing the inner profile of the pipe for inspection with the laser-based measuring pig

Majid Hadavand, Saeed Khodaygan*, Mohammad Sobhan Esfandiar

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-9567, Tehran, Iran, khodaygan@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 February 2018
Accepted 26 March 2018
Available Online 19 April 2018

Keywords:

Pipeline monitoring
Non-destructive inspection
Laser-based
Laser sensor
Image processing

ABSTRACT

Along with improvement of technology and need for access to energy resources, existence of pipelines such as gas, oil and water pipes is vital for our lives. These pipes will be eroded and damaged over time. With the prediction of the defects and tracking of pipeline paths, the probability of sudden damages is greatly reduced. In this paper, at first various non-destructive methods of monitoring the pipelines are investigated and it is shown that the laser method is the most comprehensive and non-destructive inspection method and then the background of the chosen method is examined. Also, the hardware aspect of the system and the proper layout of the laser sensors are determined on the system. After that a complete mathematical model and an algorithm is proposed for it which can be used to analyze the data obtained from the simulation of laser sampling creates image of the pipe internal surface and using this method identifies the defects found at the pipe surface. In the fourth section, a pipe with specific geometric deflection is examined based on the proposed method and algorithm and its results show the correctness of the proposed method.

1- مقدمه

و درک درستی از شرایط خطوط لوله وجود دارد. تا با توجه به تشخیص میزان وجود عیوب و محدودیت‌های اقتصادی تصمیم به تعویض یا تعمیر آن گرفته شود.

برای شناسایی و بازرسی خطوط لوله معمولاً از روش‌های غیرمخرب (NDI)¹ مانند روش‌های نشت شار مغناطیسی²، نشر آوایی³، فراصوتی⁴، تست

بسیاری از خطوط لوله، مانند لوله گاز، نفت و آب و... برای زندگی ما مهم و استفاده از آن‌ها غیرقابل اجتناب می‌باشد. این لوله‌ها با گذر زمان دچار فرسایش و خرابی می‌شوند و عدم پیش‌بینی این مهم، خسارت‌های فراوانی را بجا می‌گذارد. تنوع زیادی از عیوب، مانند خوردگی، ساییده‌شدگی، قرشدگی، برآمدگی، انبساط لوله، ترک و... در طول زمان داخل لوله به وجود می‌آید. به همین جهت برای جلوگیری از وقوع خسارت‌های ناگهانی، نیازمند پیش‌بینی

¹ Nondestructive inspection

² Magnetic flux leakage

³ Acoustic Emission

⁴ Ultrasound methods

مانند روش ژوانگ از روش منبع نوری با لیزر دیودی به عنوان تجهیزات استفاده کردند، ولی دوران الگوریتم و روش موثرتری برای تحلیل داده های نمونه برداری شده ارائه کرد و به موجب آن، توانست دقت کار ژوانگ را بهبود ببخشد. در سال 2010 موریتز و همکاران [4] با نصب تعدادی حسگر لیزری تک نقطه بر روی یک پیگ و با داده برداری از سطح داخل لوله و تحلیل داده ها توانستند تصویر هندسه سطح داخل لوله های با قطر کوچکتر از 220 میلی متر به دست آورند.

2- روش پیشنهادی اندازه گیری لیزر- مبنا هندسه داخلی لوله های

صنعتی

روش پیشنهادی در دو گام اصلی ارایه می گردد؛

- 1- فرآیند داده برداری مبتنی بر اندازه گیری لیزر تک نقطه ای از هندسه داخل لوله
 - 2- فرآیند پردازش تصویر بر مبنای داده های استخراجی و بازرسی پروفیل هندسه سطح داخل لوله
- در ادامه جزئیات دو گام اصلی الگوریتم پیشنهادی تشریح می گردد.

2-1- فرآیند داده برداری مبتنی بر اندازه گیری لیزر تک نقطه ای از

هندسه داخل لوله

روش پیشنهادی لیزر- مبنا، بر اساس تعداد مشخصی از حسگرهای لیزری تک نقطه توسعه می یابد. در روش پیشنهادی از چهار حسگر لیزری تک نقطه استفاده می شود. همان طور که "شکل 2" سطح مقطعی از لوله را نشان می دهد، نصب حسگرها به گونه ای می باشد که راستای پرتوهای لیزر موازی سطح مقطع و به سطح داخل لوله خالی از سیال تابیده می شود. از آن جا که وجود سیال با چگالی های مختلفی اثرات متفاوتی در پراش و بازتابش پرتوی لیزر خواهد داشت، الگوریتم پیشنهادی در شرایط خالی بودن لوله قابل استفاده خواهد بود.

در روش پیشنهادی، محور چرخان حسگرها موازی با محور لوله و غیرهم مرکز با آن می باشد. به همین دلیل، زاویه تابش پرتو لیزر به سطح داخلی لوله قائم نخواهد بود. با توجه به مرجع [9]، حسگرهای لیزری تک نقطه، در هر لحظه مجموعه ای از پرتوهای لیزری به صورت یک منشور نورانی به سطح می تابانند و به این موجب می شود، دریافت کننده این حسگرها، توانایی دریافت پرتوهای غیرعمود بر سطح را نیز دارند. حال اگر هرچه زاویه راستای

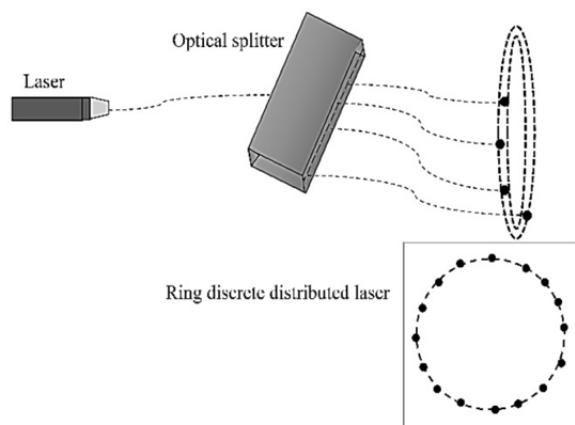


Fig. 1 Inspecting inner surface of pipe by the discrete ring –laser method

شکل 1 واریسی سطح داخلی لوله با روش حلقه گسسته لیزری

جریان گردابی¹ و لیزری استفاده می شود [1]. در بیشتر این روش ها، تجهیزات شناسایی بر روی ربات ها نصب و به داخل لوله انتقال داده می شود که اصطلاحاً به این نوع بازرسی، پیگرانی هوشمند² گفته می شود. باید توجه شود که شناسایی و بررسی همه ی عیوب از طریق روش های بازرسی، فرآیندی پیچیده و پرهزینه خواهد بود. در اکثر بازرسی ها، برای برقراری ایمنی مناسب در خط لوله و به کارگیری از حداکثر ظرفیت خط لوله، معمولاً بازرسی عیوب مهمی چون خوردگی، ترک و عیوب هندسی مانند قرشدگی و برآمدگی از اهمیت خاصی برخوردار می باشد [2-4].

از مهم ترین روش های شناسایی خطوط لوله، روش لیزری می باشد. در این روش نور لیزر به سطح تابیده و با توجه به زاویه بازگشت و یا زمان رفت و برگشت نور فاصله سطح تا حسگر لیزری تعیین می شود. شناسایی با حسگر لیزری با توجه به نوع تابش نور به 2 دسته، تک نقطه و حلقوی تقسیم می شود: در لیزر تک نقطه، نور لیزر در یک زمان خاص تنها در یک نقطه به سطح می تابد و آن نقطه را اسکن، و موقعیت آن را به دست می آورد. در روش حلقه لیزری، نور لیزر در یک لحظه خاص به یک مقطع از سطح لوله می تابد و نقاط این حلقه از سطح داخل لوله اسکن می گردد [4]. این روش سرعت بیشتری نسبت به روش تک نقطه دارد. در پایش لوله با روش لیزری، حسگر های لیزری بر روی پیگ نصب شده و با حرکت آن در طول لوله داده برداری انجام می شود، سپس با تحلیل و پردازش داده های به دست آمده، تصویری از سطح داخل لوله را با سرعت و بازده زیاد می دهد [5]. با توجه به تصویر به دست آمده، عیوب مانند خوردگی، تغییر ضخامت و تغییر شکل مشخص می گردد. از معایب این روش عدم تشخیص ترک و دقت بالا در ساخت سیستم می باشد.

در جدول 1 توانایی روش های پایش لوله بر مبنای معیارهای عملکردی هر یک روش ها ارایه شده است. مطابق با جدول 1، روش شناسایی لیزری نسبت به سایر روش ها، با توجه به سرعت بالای بازرسی و تعیین عیوب رایج عملکرد بهتری دارد. از این رو، این روش مبنای پژوهش حاضر خواهد بود. در سال 1998 ژوانگ و همکاران [6] روش برش اپتیک دایروی³ را برای تعیین پروفیل لوله پیشنهاد دادند، در این روش از منبع نوری با لیزر دیودی⁴ و دستگاه بار جفت شده (CCD)⁵ استفاده کردند. همچنین در سال 2007 نیز وانگ و همکاران [7] با مقایسه روش های شناسایی با لیزر تک نقطه⁶ و روش لیزر حلقوی⁷ نتایجی به دست آوردند که نشان داد روش های تک حلقه دقت بالاتر ولی بازده و سرعت کمتری نسبت به روش های لیزر حلقوی دارند. با تلفیق این دو روش یک روش جدید به نام لیزر حلقوی گسسته به دست می آید. این روش بدین صورت می باشد که نور حاصل از یک منبع لیزری از مجزا کننده عبور می کند و یک حلقه گسسته نورانی تشکیل می دهد. شکل شماتیک این روش در "شکل 1" نشان داده شده است. در این روش با توجه به این که نور لیزر به بخش های زیادی تقسیم می شود، قدرت پرتوهای آن کاهش و احتمال وجود خطا در اندازه گیری های آن افزایش پیدا می کند. از این رو، با این روش تنها لوله های با قطر کوچک مورد بررسی قرار می گیرد. در همان سال دوران و همکاران [8] با روش تشخیص گوشه برای حلقه لیزری- شبکه عصبی برای تشخیص خطا⁸ نقاط مخرب لوله را تعیین کردند. دوران به

¹ Eddy current testing

² intelligent pig

³ Circular optical cutting

⁴ Laser diode light source

⁵ Charge-Coupled device

⁶ Single-spot laser scanning method

⁷ Ring-laser section method

⁸ Edge detection for laser ring: neural network for detect detection

جدول 1 مقایسه روش های پایش لوله بر مبنای معیارهای عملکردی

روش	پیچیدگی نتایج	سرعت بازرسی	خوردگی	تغییر شکل	تغییر ضخامت	ترک
الکترومغناطیس	❖	✓	✓	-	✓	✓
نشر آوایی	✓	-	✓	❖	-	✓
فراصوتی	-	✓	✓	✓	❖	-
تست جریان گردایی	-	✓	✓	✓	✓	✓
اُپتیک	✓	✓	✓	✓	✓	-

✓ بسیار خوب
❖ وابسته به پارامترهای مختلف
- ضعیف

شناسایی و اسکن می کند، داده برداری از طریق 4 لیزر که با زوایای 90 درجه نسبت به یکدیگر بر روی پیگ قرار گرفته اند، به صورت گسسته و با یک نرخ ثابت صورت می گیرد. شماتیک مسیر نقاط اسکن شده از سطح داخل لوله در "شکل 3" نشان داده شده است. نقاط هم رنگ، توسط یک لیزر اسکن شده اند.

در پایش خطوط لوله، سرعت عملیات پیگ رانی اهمیت بالایی دارد. در این بخش سرعت و پارامترهای مهم دیگر تعیین کننده در شناسایی خطوط لوله تعیین می گردد.

تعداد نقاطی که در هر دور 360 درجه، توسط مجموعه لیزرها، اسکن می شود، با توجه به رابطه تعیین می شود:

$$n = \frac{60 n_{laser}}{\omega T_{sample}} \quad (3)$$

برای این که این اطمینان حاصل شود که امکان شبیه سازی پروفیل سطح داخل لوله وجود دارد، می بایست: فاصله طولی بین خطوط مارپیچی نقاط و فاصله محیطی بین این نقاط، برای اطمینان از امکان ساخت تصویر، از داده های اندازه گیری شده تقریباً برابر باشند [4]. به همین جهت:

$$X_{spiral} \approx C_{Res} \quad (4)$$

فاصله طولی بین بین خطوط مارپیچی نقاط اسکن شده:

$$X_{spiral} = V_{crawler} \left(\frac{\omega}{60}\right)^{-1} \frac{1}{n_{laser}} \quad (5)$$

فاصله محیطی بین نقاط اسکن شده:

$$C_{Res} = T_{sample} \left(\frac{\omega}{60}\right) \pi D_{pipe} \quad (6)$$

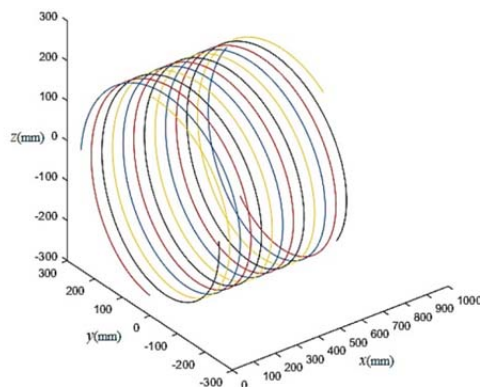


Fig. 3 Spiral paths of scanned points on the inner surface of the pipe
شکل 3 مسیره های مارپیچی نقاط اسکن شده سطح داخلی لوله

پرتو تابیده شده به سطح داخلی لوله نسبت به خط عمود بر آن افزایش یابد، قابلیت اندازه گیری ها کاهش و به طور متناسب، درصد خطا در آن ها افزایش می یابد. با توجه به شرایط هندسی حاکم بر مسئله، بیشترین مقدار زاویه پرتو تابش با راستای عمودی تقریباً برابر 8° می باشد. در این بازه، قابلیت اندازه گیری ها مطلوب می باشد.

مطابق با "شکل 2" و همچنین با استفاده از روابط (1) و (2)، به ترتیب شعاع (R) و زاویه (φ) هر نقطه اسکن شده توسط مجموعه حس گرهای لیزری در مختصات قطبی محاسبه می گردد:

$$R = \sqrt{(R_{laser} + X_{offset})^2 + Y_{offset}^2} \quad (1)$$

$$\phi = \phi_{laser} - \arcsin\left(\frac{Y_{offset}}{\sqrt{(R_{laser} + X_{offset})^2 + Y_{offset}^2}}\right) \quad (2)$$

در رابطه های فوق R_{laser} فاصله نقطه اسکن شده تا لیزر، X_{offset} و Y_{offset} به ترتیب فاصله های طولی و عرضی انحراف از مختصات دستگاه دکارتی می باشد. بنابراین هر نقطه اسکن شده توسط مجموعه لیزری با سه متغیر (X, R, ϕ) تعیین می گردد، که متغیر X طول نقطه اسکن شده در راستای لوله را نشان می دهد.

حال اگر این ربات درون خطوط لوله با سرعت ثابت دورانی و مستقیم در راستای محور لوله حرکت کند، مسیری مارپیچی شکل از سطح داخل لوله را

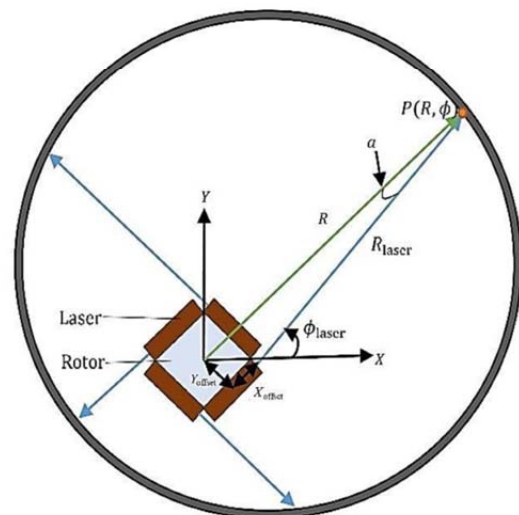


Fig. 2 Position of the robot and the corresponding laser beams relative to the robot base coordinate system in the pipe

شکل 2 موقعیت ربات و پرتوهای لیزر مربوطه نسبت به دستگاه مختصات پایه ربات در لوله

تجربی¹ در این جا عدد 30 استفاده می‌شود، تا داده‌هایی که مقدار آن‌ها از این عدد کمتر باشد حذف شوند.

در "شکل 4" مراحل الگوریتم پیشنهادی جهت پردازش داده‌های لیزری برای نمایش تصویر هندسه سطح داخل لوله نشان داده شده است.

با توجه به این که مقدار شعاع نامی لوله مشخص می‌باشد، اگر شعاع نقطه اسکن شده، خیلی کوچک‌تر یا بزرگتر از مقدار نامی آن باشد، نشان دهنده وجود خطا در اندازه‌گیری می‌باشد. به همین جهت اولین قدم آن است که با یک فیلتر، داده‌های بد و نامطلوب را که مقادیر آن‌ها غیرواقعی و دارای خطا می‌باشد، از بین برده شود. سپس مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مجموعه لیزرها به اعداد 0 تا 255 نگاشت می‌شود.

در مرحله بعد با توجه به حرکت مجموعه، احتمال وجود خطا و نویز به دلیل عدم قطعیت در موقعیت قرارگیری مجموعه در داده‌های اندازه‌گیری شده بسیار زیاد است، برای کاهش این احتمال، از فیلتر کالمن² استفاده می‌شود. در تئوری فیلتر کالمن، برای استفاده از سیستم، دینامیک آن مطابق رابطه (9) تعریف می‌شود.

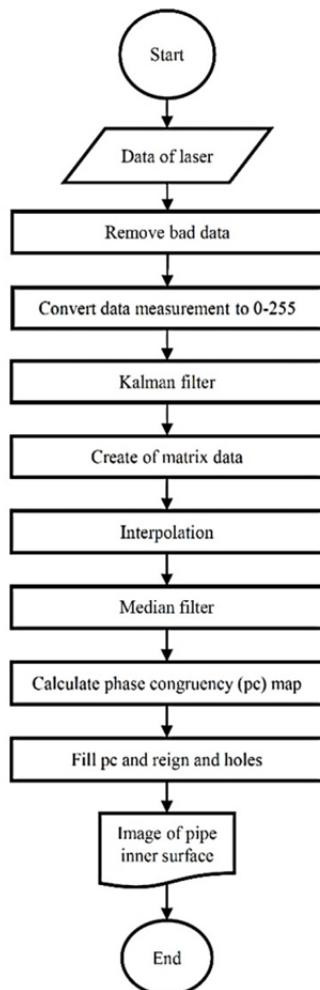


Fig. 4 Flowchart of the proposed algorithm for constructing the profile of inner surface of the pipe

شکل 4 روندنمای الگوریتم پیشنهادی روش ارائه شده در بازسازی پروفیل هندسه سطح داخل لوله

با توجه به روابط (3)، (4) و (5) سرعت خطی سیستم شناسایی برابر است با:

$$v = T_{\text{sample}} n_{\text{laser}} \left(\frac{\omega}{60} \right)^2 \pi D_{\text{pipe}} \quad (7)$$

از پارامترهای مهم دیگر سیستم که نشان‌دهنده دقت و وضوح نتایج می‌باشد، میزان مساحتی از سطح که توسط یک نقطه اسکن شده، شناسایی می‌شود. بنابراین این پارامتر با تقسیم سطح مورد بررسی شده بر تعداد نقاط اسکن شده از سطح و باتوجه به رابطه (8) به‌دست می‌آید.

$$S' = \frac{S}{n_{\text{total}}} = T_{\text{sample}}^2 \left(\frac{\omega}{60} \right)^2 \pi^2 D_{\text{pipe}}^2 \quad (8)$$

هرچه مقدار S' کمتر باشد، دقت نتایج افزایش پیدا می‌کند. به همین جهت در یک لوله خاص هرچه فاصله زمانی داده برداری حس‌گر لیزر و سرعت دورانی سیستم کمتر باشد، وضوح تصویر افزایش پیدا می‌کند. با کاهش سرعت دورانی مجموعه، با توجه به رابطه (7) سرعت پیشروی پیگ به شدت کاهش و در نتیجه زمان پایش خطوط لوله افزایش پیدا می‌کند. به همین جهت برای دستیابی به یک تصویر با وضوح و دقت بالا می‌بایست یک الگوریتم پردازش تصویر مناسب ارائه گردد. به‌طور کلی عوامل مختلفی مانند توان حس‌گرهای لیزری، ابعاد حس‌گرها و همچنین ابعاد محور چرخان حسگر و ... در محدودیت ابعادی بازرسی خطوط لوله تأثیرگذار می‌باشند. متناسب با بررسی عوامل مذکور در این پژوهش، حداقل و حداکثر قطر قابل بررسی در الگوریتم پیشنهادی به ترتیب برابر با 40 و 120 سانتی‌متر می‌باشد.

2-2- فرآیند پردازش تصویر بر مبنای داده‌های استخراجی و بازسازی

پروفیل هندسه سطح داخل لوله

در گام اول الگوریتم پیشنهادی، فرآیند داده برداری مبتنی بر اندازه‌گیری لیزر تک نقطه‌ای از هندسه داخل لوله تشریح گردید. در این گام، فرآیند پردازش تصویر بر مبنای داده‌های استخراجی از گام اول و بازسازی پروفیل هندسه سطح داخل لوله ارایه می‌شود. پس از نصب حس‌گرهای لیزر بروی مجموعه، نور لیزر به سطح داخل لوله تابیده و با روش‌های هندسی فاصله منبع تا سطح جسم بازتابیده شده از آن تعیین می‌شود. باید توجه شود که خروجی‌های لیزر مقادیر پیوسته از ولتاژ یا جریان می‌باشد. بنابراین در ابتدا با تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال داده‌ها رو به‌صورت اعداد گسسته که نشان‌دهنده فاصله منبع لیزری با نقطه اسکن شده می‌باشد، تبدیل می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، موقعیت هر نقطه با سه پارامتر (X, R, ϕ) تعیین می‌شود، حال مجموعه نقاط اسکن شده به‌صورت یک ماتریس، در نرم‌افزار متلب نشان داده می‌شود. بدین صورت که ستون‌ها و ردیف‌های این ماتریس به ترتیب نشان‌دهنده جایگاه نقطه اسکن شده در راستای طول لوله و زاویه لوله می‌باشد. مولفه‌های این ماتریس نشان‌دهنده شعاع نقطه اسکن شده در آن موقعیت می‌باشد. با توجه به آن که مولفه ماتریس تصاویر خاکستری به‌صورت اعداد بین 0 تا 255 می‌باشد، به همین دلیل قبل از ذخیره‌سازی داده‌ها در متلب، داده‌ها با یک نگاشت به اعداد بین 0 تا 255 تبدیل می‌گردند. در این ذخیره‌سازی عدد صفر نشان‌دهنده رنگ مشکی و عدد 255 نشان‌دهنده رنگ سفید می‌باشد، سایر اعداد نیز دارای رنگ‌های مختلف خاکستری می‌باشند.

بزرگی داده به‌دست آمده از حس‌گر به قدرت سیگنال بازتابیده شده از سطح نیز بستگی دارد. اگر سیگنال خیلی ضعیف باشد مقدار اندازه‌گیری شده می‌تواند خطای زیادی داشته باشد. از عوامل ضعف یک سیگنال می‌توان به هندسه، صافی سطح، بازتابندگی سطح و رنگ آن اشاره کرد. برای از بین بردن داده‌هایی که امکان وجود خطا در آن‌ها زیاد است از یک مقدار آستانه

¹ Empirical threshold value

² Kalman filter

- $w_0(x)$: تابع وزن
- $A_{no}(x)$: مقادیر ضرایب سری فوری
- T_0 : جبران تجربی برای نویز
- $\Delta\Phi_{no}(x)$: انحراف فاز

علامت [] نشان دهنده قدرمطلق می باشد. انحراف فاز به صورت معادله (13) به دست می آید:

$$\Delta\Phi(x) = \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x)) - |\sin(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))| \quad (13)$$

به طوری که $\phi_n(x)$ و $\bar{\phi}(x)$ به ترتیب مقدار زاویه فاز محلی و میانگین می باشد. مقدار ثابت ε براساس مدل کانتور فعال LBF و باتوجه به رابطه (14) تعیین می شود:

$$\varepsilon(C, f_1, f_2) = \int_{\Omega} \varepsilon_x^{LBF}(C, f_1, f_2) dx \quad (14)$$

در رابطه فوق ε_x^{LBF} برازش محلی تابع انرژی برای ناحیه Ω به مرکزیت x می باشد. C یک کانتور در ناحیه تصویر Ω می باشد. $f_1(x)$ و $f_2(x)$ دوعددی هستند که شدت تصویر نقاط نزدیک x را نشان می دهند. تابع ε_x^{LBF} به صورت معادله (15) تعریف می شود:

$$\varepsilon_x^{LBF}(C, f_1, f_2) = \lambda_1 \int_{in(C)} K(x-y) |I(y) - f_1(x)|^2 dy + \lambda_2 \int_{out(C)} K(x-y) |I(y) - f_2(x)|^2 dy \quad (15)$$

در عبارت فوق λ_1 و λ_2 ثابت های مثبت و K تابع گوسی می باشد. در حقیقت معادله (16) نشان می دهد، که اگر y به x نزدیک شود، مقدار $k(y-x)$ بزرگتری پیدا می کند، که بر این اساس تاثیر بیشتری در تفاوت شدت می گذارد. براساس تجربه مقادیر λ_1 و λ_2 در معادله فوق برابر 1 و همچنین مقدار انحراف معیار تابع گوسی 3 در نظر گرفته می شود [12]. براساس روند و مراحل ذکر شده، حاشیه هندسه عیوب مشخص می گردد.

3- مطالعه موردی

در این بخش، الگوریتم پیشنهادی جهت شناسایی پروفیل سطح داخلی یک لوله شامل یک آسیب با ابعاد هندسی مشخص به عنوان یک مطالعه موردی، پیاده سازی می شود.

لوله ای به مانند "شکل 5" با طول 2 متر، قطر 500 میلی متر و ضخامت 10 میلی متر مورد بررسی قرار می گیرد. فرض شده است در فاصله 200 میلی متری از ابتدای لوله، در سطح داخلی آن، عیب خوردگی با مشخصات هندسی عمق 5 میلی متر طول 20 میلی متر و قطاعی به زاویه 20 درجه وجود دارد.

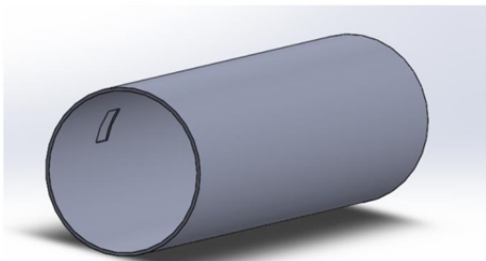


Fig 5 The considered pip with a defect for inspection

شکل 5 لوله مورد بررسی شامل یک عیب برای بازرسی

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k = Hx_k + v_k \end{cases} \quad (9)$$

که در آن w نویز درونی سیستم و v نویز اندازه گیری است. همچنین این دو نویز به صورت یکنواخت و با توزیع گوسی فرض می شوند [1].

پس از تعریف دینامیک سیستم به این صورت، برای تخمین زدن حالت های سیستم از الگوریتم فیلتر کالمن استفاده می شود که در این الگوریتم به کمک حالت اندازه گیری شده قبلی و دینامیک سیستم که به صورت قسمت بالا تعریف شد، تخمینی برای حالت های سیستم در پله زمانی $k+1$ ام پیدا می کند. در واقع این مرحله به این صورت اجرا می شود: حالت های سیستم در زمان k تخمین زده می شوند (بردار x)، حالت های تخمین زده شده وارد دینامیک سیستم می شوند تا مشاهده سیستم به دست آید (بردار z)، سپس به کمک بردار z و الگوریتم فیلتر کالمن حالت های سیستم در زمان $k+1$ تخمین زده می شوند (بردار x) و این پروسه به همین طریق ادامه می یابد. به کمک این تخمین اثر نویزهای w و v کاهش یافته و حالت های سیستم قابل شناسایی خواهند بود.

همان طور که بیان گردید، برای ساخت تصویر پروفیل هندسه سطح داخل لوله یک ماتریس که سطر و ستون آن مختصات نقطه اسکن شده و مولفه آن که نمایش دهنده مقدار هر پیکسل تصویر می باشد، عددی بین 0 تا 255 که فاصله آن تا منبع لیزری را نشان می دهد، تشکیل می شود. تعداد سطر و ستون های این ماتریس به ترتیب از رابطه های (10) و (11) به دست می آید:

$$i = \frac{t}{T_{\text{Sample}}} \quad (10)$$

$$j = \frac{60}{\omega T_{\text{Sample}}} \quad (11)$$

در مرحله بعد برای افزایش وضوح تصویر با میانبایی¹ غیرخطی بین نقاط اسکن شده با روش حداقل مربعات نقاط جدید تعیین می شود [10]. به عبارت دیگر بین هر دو مولفه مجاور در ماتریس تصویر یک داده جدید ساخته شده و موجب می گردد تعداد پیکسل های تصویر 4 برابر گردند.

با توجه به این که همچنان وجود مقادیری نویز در تصویر محتمل بوده و عملیات میانبایی در مرحله قبل این احتمال را نیز افزایش داده است، از فیلتر میانه² که یک فیلتر غیرخطی است استفاده می شود. در این فیلتر تصویر مورد پردازش به مانند یک سیگنال دوبعدی در نظر گرفته می شود. این سیگنال تابعی از دو متغیر مستقل X, Φ به صورت $I(X, \Phi)$ است. که در آن I تابع دامنه شدت می باشد و فیلتر میانه برای مولفه های این ماتریس که مقدار هر پیکسل را نشان می دهد، میانه چند پیکسل اطراف آن را انتخاب می کند تا بدین ترتیب، نویز های نمک فلفلی³ موجود در تصویر کاهش پیدا می کند.

در مرحله بعد با توجه به الگوریتم های برازش باینری محلی⁴ و همبستگی فازی⁵ موجود در مطلب و روش موجه گربر برای تشخیص هندسه حاشیه عیوب موجود در تصویر استفاده می شود [11]. همبستگی فازی (PC) طبق رابطه (12) محاسبه می شود:

$$PC = \frac{\sum_o \sum_n W_o(x) [A_{no}(x) \Delta\Phi_{no}(x) - T_0]}{\sum_o \sum_n A_{no}(x) + \varepsilon} \quad (12)$$

- O : جهت

- n : مقیاس

- ε : مقدار ثابت مثبت

¹ Interpolation

² Median filter

³ Salt and pepper

⁴ Local binary fitting

⁵ Phase congruency

حاشیه عیوب موجود در سطح لوله با روش موجک گربر تعیین می گردد. در "شکل 7"، تصویر حاشیه عیب شبیه سازی شده در سطح لوله نشان داده شده است. طول ضلع هر پیکسل تصویر 7.850 میلی متر می باشد.

"شکل 8" نیز تصویر پروفیل هندسه سطح داخل لوله بعد از پرکردن هندسه داخل حاشیه عیوب به دست می آید. در این تصویر رنگ مشکی نشان دهنده نامی بودن قطر لوله در آن نقطه می باشد و شکل خاکستری مایل به سفید موجود در تصویر، نشان از وجود عیب خطرناکی در آن طول و ابعاد مشخص می باشد. در ماتریس تصویر، عیب موجود در سطح لوله به ترتیب دارای 71، 275 ردیف و ستون از مولفه های تصویر می باشد. با توجه به طول هر پیکسل و ابعاد واقعی عیب لوله می توان بیان داشت، این تصویر به ترتیب 1.065 طول و 0.984 قطاع محیطی عیب را نشان می دهد. با بررسی مقادیر مولفه های تصویر، عیب موجود در تصویر به صورت میانگین عمق 4.8 میلی متری را نشان می دهد. که این مقدار نشان دهنده 0.96 عمق واقعی می باشد.

در جدول 2 ابعاد هندسی اصلی و اندازه گیری شده، لوله و عیب آن و

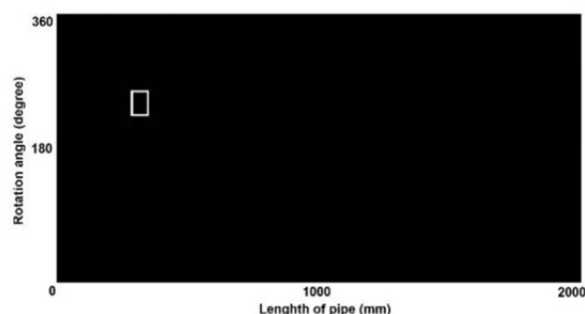


Fig. 7 Determining the boundaries of defects in the pipe

شکل 7 تعیین مرزهای عیب موجود در لوله

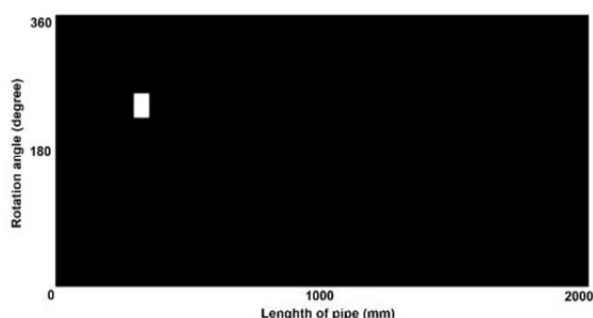


Fig. 8 The final image of the inner surface of the pipe

شکل 8 تصویر نهایی از سطح داخل لوله

جدول 2 مقایسه ابعاد واقعی و اندازه گیری شده

Table 2 Comparison of the actual and measured dimensions

پارامتر هندسی	واقعی (mm)	اندازه گیری شده (mm)	درصد خطا
قطر لوله	500	498.6	0.28
طول لوله	200	1993	0.35
طول عیب	20	21.3	6.5
محیط قطاع عیب	87.3	85.9	1.6
عمق عیب	5	4.8	4

برای شناسایی این لوله با روش از 4 حس گر لیزری با نرخ داده برداری 5 میلی ثانیه استفاده شده است. سرعت دورانی ربات 120 دور بر دقیقه در نظر گرفته می شود.

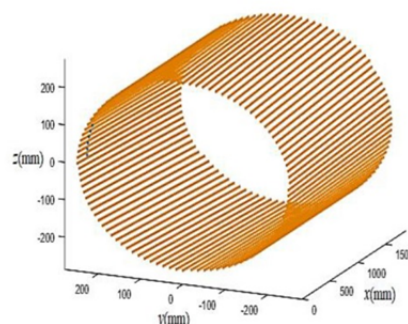
با توجه به اطلاعات داده شده و رابطه (7) سرعت بازرسی، 125.6 میلی متر بر ثانیه می باشد. همچنین باتوجه به طول لوله مورد بررسی، این شناسایی 15.9 ثانیه به طول می انجامد. مجموعه نقاط اسکن شده و موقعیت این نقاط در مسیر پایش لوله در "شکل 6 (الف)" به صورت سه بعدی و در "شکل 6 (ب)" سطح مقطعی از این نقاط نشان داده شده است. در این بررسی هر حس گر تعداد 3184 نقطه و در مجموع 12736 نقطه اسکن شده است.

در ابتدا شعاع نقاط اسکن شده، با توجه به رابطه (1) تعیین می شود، اگر این مقدار به دلیل نویز و خطا مقداری بیش از عدد 260 (قطر خارجی) را نشان بدهد حذف می گردد، سپس تمام نقاط به صورت (X, R, ϕ) مشخص می گردند. حال باتوجه با مشخصه فوق برای نقاط، ماتریس تصویر لوله تشکیل و مولفه های آن نیز با تبدیل به اعداد 0 تا 255 تعیین می گردند.

ابعاد این ماتریس با توجه به روابط (11) و (12)، 100×3184 می باشد. حال برای افزایش تعداد نقاط اسکن شده بین داده ها میانجیایی کرده و ابعاد ماتریس تصویر 2 برابر می گردد. سپس با اعمال فیلتر میانه، خطا و نویزهای موجود در تصویر کاهش پیدا می کند.

اکنون با توجه به الگوریتم ارائه شده در بخش پردازش تصویر، هندسه

(الف)



(ب)

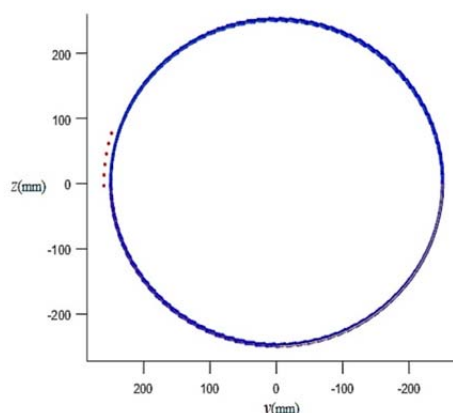


Fig. 6 The scanned points in the pipe inspection; (a) 3D view (b) the cross section of the scanned surface of the pipe

شکل 6 نقاط اسکن شده در بازرسی لوله: (الف) نمای سه بعدی (ب) نمای سطح مقطع سطح اسکن شده لوله

همچنین میزان خطا برای هر یک از این ابعاد نشان داده شده است.

4- نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم جدیدی جهت اندازه گیری پروفیل سطح داخلی لوله های صنعتی و شناسایی عیوب هندسی سطوح داخلی مربوطه با استفاده از مجموعه سیستم چهار حس گر لیزری چرخان به منظور استفاده در فرآیند پیگ رانی ارائه گردید. الگوریتم پیشنهادی به منظور شبیه سازی فرآیند اندازه گیری لیزر- مبنا بر روی یک لوله با ایجاد یک عیب هندسی مشخص پیاده سازی شد. مطابق با نتایج داده برداری از سطح داخلی لوله و پردازش آن ها بر مبنای روش پیشنهادی، پروفیل داخلی لوله استخراج و عیب مربوطه شناسایی گردید. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با ابعاد اصلی لوله و عیب مربوطه، حداکثر خطای حاصل کمتر از 5 درصد را نشان داد که بیانگر دقت بالای روش پیشنهادی است. علاوه بر نتایج کمی، نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم در تصویر سازی سطح داخلی لوله، هندسه و موقعیت عیب موجود در سطوح داخلی لوله را به طور آشکار حاصل گردید. این قابلیت به کاربر این امکان را می دهد تا با توجه به شرایط کاری و سطح حساسیت لوله، جهت رفع عیب، تعمیر و یا تعویض آن بخش از لوله به راحتی تصمیم گیری نماید.

5- مراجع

- [1] L. Zheng, D. Kryz, The use of laser range finder on a robotic platform for pipe inspection, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 31, pp. 246-257, 2012.
- [2] L. Zheng, Y. Kleiner, State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes, *Measurement*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-15, 2013.
- [3] K. Mitsunori, K. Suyama, Inspection robots for gas pipelines of Tokyo Gas, *Advanced Robotics*, Vol. 15, No. 3, pp. 365-370, 2001.
- [4] R. Moritz, C. W. Frey, Rotating optical geometry sensor for inner pipe-surface reconstruction, *Image Processing: Machine Vision Applications III*, Vol. 7538, International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [5] D. Olga, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, Pipe inspection using a laser-based transducer and automated analysis techniques, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8, No. 3, pp. 401-409, 2013.
- [6] Z. Bao Hua, W. Zhang, D. Yin Cui, Noncontact laser sensor for pipe inner wall inspection, *Optical Engineering*, Vol. 37, No. 5, pp. 1643-1648, 1998.
- [7] W. Zhanbin, A new structured-laser-based system for measuring the 3D inner-contour of pipe figure components, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 43, No. 6, pp. 414-422, 2007.
- [8] D. Olga, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, Automated pipe defect detection and categorization using camera/laser-based profiler and artificial neural network, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 118-126, 2007.
- [9] K. Smith, Y. F. Zheng, Accuracy analysis of point laser triangulation probes using simulation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, No. 4, pp. 736-745, 1998.
- [10] L. Zheng, D. Kryz, Processing laser range image for the investigation on the long-term performance of ductile iron pipe, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 23, No. 1, pp. 65-75, 2008.
- [11] K. Peter, Image features from phase congruency, *Videre: Journal of Computer Vision Research*, Vol. 1, No. 3, pp. 1-26, 1999.
- [12] K. Zhang, H. Song, L. Zhang, Active contours driven by local image fitting energy, *Pattern Recognition*, Vol. 43, No. 4, pp. 1199-1206, 2010.