



Gazodizellar silindrlar gilzasi ishchi yuzasini strukturalashgan yorug'lik usulida nazorat qilishning nazariy bog'liqliklari va matematik ifodalari

Musurmanov Ravshan Kurbanmuratovich

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston
Milliy universiteti professori, t.f.d.

Utayev Sobir Achilovich

Qarshi davlat universiteti dotsenti, t.f.f.d.,
Toshkent davlat Transport universiteti mustaqil tadqiqotchisi

Turayev Abdugani Karimovich

Toshkent Irrigatsiya va qishloq xo'jaligini
mexanizatsiyalash muxandislari instituti
Milliy tadqiqotlar universiteti mustaqil tadqiqotchisi
Email: utaev.s@list.ru тел: +99890-517-05-36

ANNOTATSIYA

Gazodizellar silindrlar gilzalari ishchi yuzasini kontaktless optik tizimlar yordamida nazorat qilishda yuqori aniqlikdagi uch o'lchamli modellarini qurish asosida yorug'lik namunalarini proektsiyalash va qayd etish jarayonlarining qat'iy matematik tavsifi yotadi. Strukturallashtgan yorug'lik usuli optik triangulyatsiya tamoyillariga asoslangan bo'lib, bunda tadqiq etilayotgan sirt nuqtalarining fazoviy koordinatalari strukturallashtgan yorug'likning geometrik buzilishlarini tahlil qilish orqali aniqlanadi. Ushbu jarayonni matematik shakllantirish uchun o'lchov tizimining geometriyasini, yorug'lik intensivligi taqsimoti tenglamalarini, shuningdek, faza ma'lumotlarini dekodlash algoritmlarini batafsil ko'rib chiqish talab etiladi. Mazkur maqolada proyeksiyalanadigan chiziqlarning ikki o'lchamli buzilishlarini obyekt sirtining uch o'lchamli (X, Y, Z) koordinatalariga aylantirishni tavsiflovchi asosiy matematik qonuniyatlar va analitik bog'liqliklar keltirilgan.

Kalit so'zlar:

gilza, dvigatel,
kontaktless, optik
tizim, optik
triangulyatsiya.

Теоретические зависимости и математическое описание контроля рабочей поверхности гильзы цилиндров газодизелей методом структурированного света

АННОТАЦИЯ

В основе построения высокоточных трехмерных моделей при контроле рабочей поверхности гильз цилиндров газодизелей с использованием бесконтактных оптических систем лежит строгое математическое описание процессов проецирования и регистрации световых паттернов (структурированных изображений). Метод структурированного света базируется на принципах оптической триангуляции, при которой пространственные координаты точек

Ключевые слова:

Бесконтактные,
гильза, двигатель,
оптические
системы,
оптическая
триангуляция.



исследуемой поверхности определяются путем анализа геометрических искажений структурированной подсветки. Для математической формализации данного процесса требуется детальное рассмотрение геометрии измерительной системы, уравнений распределения интенсивности света, а также алгоритмов декодирования фазовой информации. В данной статье представлены основные математические закономерности и аналитические зависимости, описывающие преобразование двумерных искажений проецируемых полос в трехмерные координаты (X, Y, Z) поверхности объекта.

Theoretical dependencies and mathematical description of gas-diesel cylinder liner working surface inspection using the structured light method

ABSTRACT

The construction of high-precision three-dimensional models during the inspection of the working surface of gas-diesel engine cylinder liners using non-contact optical systems relies on a rigorous mathematical description of the projection and registration of light patterns (structured images). The structured light method is based on the principles of optical triangulation, in which the spatial coordinates of points on the investigated surface are determined by analyzing the geometric distortions of the structured illumination. Mathematical formalization of this process requires a detailed examination of the measurement system geometry, light intensity distribution equations, and phase information decoding algorithms. This paper presents the core mathematical regularities and analytical relationships describing the transformation of two-dimensional distortions of projected fringes into three-dimensional coordinates (X, Y, Z) of the object surface.

Keywords:

Non-contact, cylinder liner, engine, optical systems, optical triangulation.

Kirish: Gazodizellar silindrlar gilzalari ishchi yuzasini kontaktsiz optik tizimlar yordamida nazorat qilishda yuqori aniqlikdagi uch o'lchamli modellarini qurish asosida yorug'lik namunalarini proeksiyalash va qayd etish jarayonlarining qat'iy matematik tavsifi yotadi. Strukturallashgan yorug'lik usuli optik triangulyatsiya tamoyillariga asoslangan bo'lib, bunda tadqiq etilayotgan sirt nuqtalarining fazoviy koordinatalari strukturallashgan yorug'likning geometrik buzilishlarini tahlil qilish orqali aniqlanadi. Gazodizel silindrlar gilzalari ishchi yuzasini Strukturallashgan yorug'lik usuli jarayoni matematik ifodalanishi optik tizim, yorug'lik nuri geometriyasini va (X,Y,Z) koordinatalar ko'rsatkichlarni bog'liqligini aniqlash imkonini beradi. Ushbu jaaryonning matematik ifodalanishi uchta asosiy blokdan iborat bo'ladi: silindrik koordinatalarda triangulyatsiyaning geometrik modeli, signalni shakllantirish matematik modeli va profilni qurish modeli.

Q. Zhang, C. Sun, Y. Changlarning tadqiqotlarida [1] ichki yonuv dvigatellari silindrlar gilzalari ishchi yuzasini aylana strukturallashgan yorug'likka asoslangan uch o'lchamli (3D) nazorat qilish tizimi ishlab chiqilgan. Konussimon qaytargich lazer nurini qaytaradi va radial lazer tekisligini generatsiyalashi keltirilgan bo'lib, bu aylanma strukturallashgan yorug'lik deb ataladi. Zaryadlangan bog'liqlikka ega bo'lgan PZS- kamera gilza ichki yuzasidagi yorug'lik chiziqlarini qayd etishi va sungra nuqtalarning 3D koordinatalari lazerli triangulyatsiya algoritmi yordamida xisoblanishi qayd etilgan. Tadqiqotda taklif etilgan bu tizim ichki diametrlarni nazorat qilishda yahshi samara berishi, absolyut hatolik 3 mkm ni, nuqsonlarni aniqlash hatoligi 0,02 mm bo'lishi



qayd etilgan. Y. Li, X. Zhou, Z. Liularning tadqiqotlarida [2] halqasimon strukturalashgan yorug'lik usulida silindrsimon ichki yuzalarni nazorat qilish masalasi ko'rilgan. Ushbu tadqiqot ishida bu usul yordamida silindrsimon ichki yuzalarni kontaktsiz tasvirga olish masalasi ko'rib o'tilgan. M. Wang, J. Li. R. Yanglar tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda [3] strukturalashgan yorug'likka asoslangan 3D skanerlash yordamida yorug'lik spekllarini kuzatib tasvirga ishlov berish orqali silindrsimon ichki yuza profilini nazorat qilish masalasi ko'rilgan. Tajriba natijalari o'rtacha standart hatolikni 52% kamayishini va ananaviy usullar bilan taqqoslaganda tajriba vaqtini 83% qisqartirish imkoni mavjudligi ta'kidlab o'tilgan. S. A. SHElestov, A. V. Konevlar tomonidan silindrlar gilzalari ishchi yuzasi mikrorelyefini lazerli texnologiyalar yordamida nazorat qilish amalga oshirilgan.

Tadqiqot metodlari: Tadqiqotlar mavjud tadqiqot metodlari asosida amalga oshirilgan, unda strukturalashgan yorug'lik metodini qo'llashning nazariy bog'liqliklari va matematik ifodalaridan foydalanilgan. Olib borilgan tadqiqotlar DAST 25142-82 (ISO 4287), ISO 25178, DAST 8.051-81, DAST 24642-81, (ISO 1101), IEC 62471-2013 standartlari va boshqa meyoriy xuquqiy xujjatlarga asoslanadi.

Tahlil va natijalar: Triangulyatsiyaning silindrsimon koordinatalardagi geometrik modeli tekis yuzalarni skanerlashdan farqli o'laroq, gilza ichki yuzasi matematik modeli (r, φ, z), silindrsimon koordinatalar tizimida quriladi, bu yerda Z - o'q skanerlovchi zondning bo'ylama o'qiga mos bo'ladi.

Xisoblash sxemasining asosiy ko'rsatkichlarini belgilab olamiz:

B - optik bazis (proyektor obyektivining asosiy nuqtalari Or va kamera nuqtalari Os orasidagi masofa);

γ - kamera va proyektorning optik o'qlari orasidagi masofa;

θ_p - proyeksiyalovchi nurning proyektorning optik o'qiga nisbatan chiqish burchagi;

θ_c - nurning kamerada optik o'qiga nisbatan qayd etish burchagi;

Ixtiyoriy R nuqta uchun silindrlar gilzasining ichki deorida triangulyatsiya burchagi OpO_c vektor radiusi - r va z - balandlik koordinatasida parametrik tenglamalar tizimida modellashtiriladi [3, 6-8]:

$$r(O_p, O_c) = B \cdot \frac{\sin(\theta_p) \cdot \cos(\theta_c)}{\sin(\theta_p + \theta_c + \gamma)}, \quad (1)$$

$$z(O_p, O_c) = B \cdot \frac{\sin(\theta_p) \cdot \sin(\theta_c)}{\sin(\theta_p + \theta_c + \gamma)}, \quad (2)$$

Ideal gilzani modellashtirishda radius o'zgarish bo'ladi: $r(\varphi, z) = R_0$.

Istalgan shakldan chetga chiqishlar, ovallik, konuslik geometrik radiusning o'zgarishi funksiyasi sifatida modellashtiriladi.

Optik signal shakllanishining matematik ifodalanishi quyidagicha ifodalanadi [3, 6-8]:

$$r(\varphi, z) = R_0 + \Delta r_{og'ri\tilde{s}h}(\varphi, z) + \Delta r_{g'rad}(\varphi, z) \quad (3)$$

Fazaviy siljish usulidan foydalanilganda (Phase Shifting) proyektor yorug'lik intensivligining sinusoidal taqsimlanishini ta'minlaydi. Yorug'likning N -qadamli algoritmda, (u, v) koordinatalarda taqsimlanishining kamera matritsasida qayd etilishining matematik modeli quyidagi ko'rinishda bo'ladi [3, 6-8]:

$$I_n(u, v) = I'(u, v) + I''(u, v) \cos[\Phi(u, v) + \delta_n] \quad (4)$$

bu yerda: $I_n(u, v)$ - n - kadrda yorug'lik intensivligi;

$I'(u, v)$ - o'rtacha intensivlik;

$I''(u, v)$ - yorug'lik izlari modulyatsiyasi amplitudasi;

$\delta_n = \frac{2\pi n}{N}$ - ($n = 0, 1, \dots, N-1$) fazaning modellanuvchi diskret siljish fazasi;

$\Phi(u, v)$ - gilza relyefi to'g'risida ma'lumot beruvchi izlanayotgan to'la faza.

Ko'p tarqalgan 4- qadamli algoritm uchun ($\delta_n = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$)/

Matritsaning har bir nuqtasida modellashtirish intensivlik farqi nisbati arktangensi orqali amalga oshiriladi [3, 6-8]:

$$\psi(u, v) = \arctan \left(\frac{I_3(u, v) - I_1(u, v)}{I_0(u, v) - I_2(u, v)} \right), \quad (5)$$



$\psi(u, v)$ - ning qiymati $(-\pi, \pi)$ yarimintervalda yotadi.

Faza yoyilmasi va koordinata bog‘lamini modellashtirishda arrasimon shakldagi $\psi(u, v)$ funksiyadan $F(u, v)$ absolyut fazaga o‘tish uchun, fazoviy jarayon moyellashtiriladi [3, 6-8]:

$$\psi(u, v) = \psi(u, v) + 2\pi \cdot k(u, v), \quad (6)$$

bu yerda: $k(u, v)$ - yorug‘lik izi davrining butun soni. Silindrlar gilzasini matematik modellarida k ni aniqlash ko‘p chastotali usulda aniqlanadi. Uzlaksiz faza F va relyefning geometrik siljishi Δr o‘rtasidagi bog‘liqlik optik tizimning sezgirlik koeffitsiyenti- K_{tiz} : orqali modellashtiriladi. K_{tiz} – funksiya modelini obyektivning fokus masofasi va linza distorsiyasini xisobga olib, matematik kalibrlash bosqichida xisoblanadi [3, 6-8]:

$$\Delta r(u, v) = K_{sis}(u, v) \cdot \Phi(u, v) \quad (7)$$

Nuqsonlarni va shakldan og‘ishlarni modellashtirishda nazorat qilish algoritmlarni verifikatsiyalash uchun, gilza matematik modeliga naunaviy geometrik hatoliklar tenglamasini qo‘yiladi:

Ovallik

$$\Delta r_{oval}(\varphi) = A_{oval} \cos(2\varphi + \varphi_0) \quad (8)$$

bu yerda: A_{oval} – ovallik amplitudasi, φ_0 – ellips asosiy o‘qining yo‘nalishi

Konuslik

$$\Delta r_{con}(z) = k_{con} \cdot z \quad (9)$$

bu yerda: k_{con} - gilzaning torayish (kengayish) koeffitsiyenti.

Jadval 1

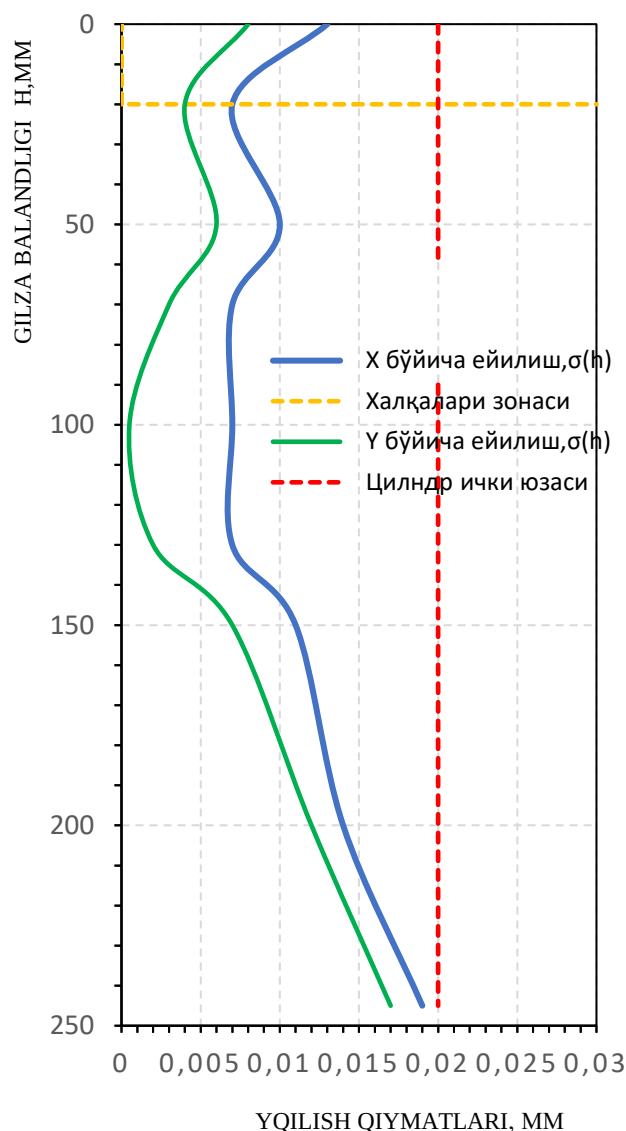
Gilza ovalligining namunaviy taqsimlanishi

Balandlik bo‘yicha kesim	Ovallik ko‘rinishi	sababi
0–15 mm (YUCHN)	Maksimal (0.08–0.12 mm)	Gilza yuqorisida yuqori gaz bosimi va termik deformatsiya
60 mm (o‘rta qismi)	meyorida (0.03–0.05 mm)	Porshen yubkasining yon yuklamasi
115 mm (PCHN)	Minimal (0.01–0.02 mm)	Kam yuklanishlar va porshenning barqarorlashishi

Mahalliy nuqson Gauss funksiyasi orqali “minus” ishorasi bilan modellashtiriladi [3, 6-8]:

$$\Delta r_{nuqs}(\varphi, z) = -H \cdot \exp\left(-\left[\frac{(\varphi - \varphi_d)^2}{2\sigma_\varphi^2} + \frac{(z - z_d)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right), \quad (10)$$

bu yerda: H - tiralish chuqurligi, φ_d , z_d – nuqson markazi koordinatasi, σ – nuqsonning geomterik o‘lchamlari.



Rasm 1. Gazodizel silindrlar gilzasi yeyilish epyurasi

Matematik modelning chiquvchi ma'lumotlari bo'lib, 3D bulut nuqtalarining koordinatalari matritsasi xisoblanadi. Sungra silindrsimon yuzani approksimatsiyalash uchun bu matritsaga eng kichik kvadratlar usulida ishlov beriladi [3, 6-8]:

$$\sum_{i=1}^m [(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 - R_{\text{fit}}^2]^2 \rightarrow \min$$

Gazodizellarda gilza ishchi yuzasi ovalligi notekis taqsimlanadi. Ovallik qiymati yuqori chekka nuqtada yuqori porshen halqasi to'xtagan joyda eng katta qiymatda bo'ladi, asta sekin gilza balandligi bo'yicha pastga qarab kamayib boradi.

Gazodizel silindrlar gilzasi ichki yuzasini skanerlash uchun matritsa pikseli o'lchami (p)= 3,45 mkm = 0,00345 ga teng. Bu sony IMX o'lchash sensori uchun standart qiymat.

Diamteri D=110,00 mm bo'lgan gilza uchun:

$$N_{\text{пик}} = \frac{D_{\text{цил}} \cdot \beta_{\text{опт}}}{2 \cdot p} = \frac{110 \cdot 0,08}{2 \cdot 0,00345} \approx 1275,36 \text{ piksel}$$

Matritsadagi soya halqasi radiusi tahminan 1275 pikselni tashkil etadi.

Soya chegarasining 1 pikselga siljishi $\Delta N_{pix} = 1$, gilza diametrining quyidagi qiymatga o'zgarishiga mos keladi:

$$\Delta D_{\text{мин}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot p}{\beta_{\text{опт}}} = \frac{2 \cdot 0,00345}{0,08} = 0,08625 \text{ mm} = 86,25 \text{ мкм}.$$

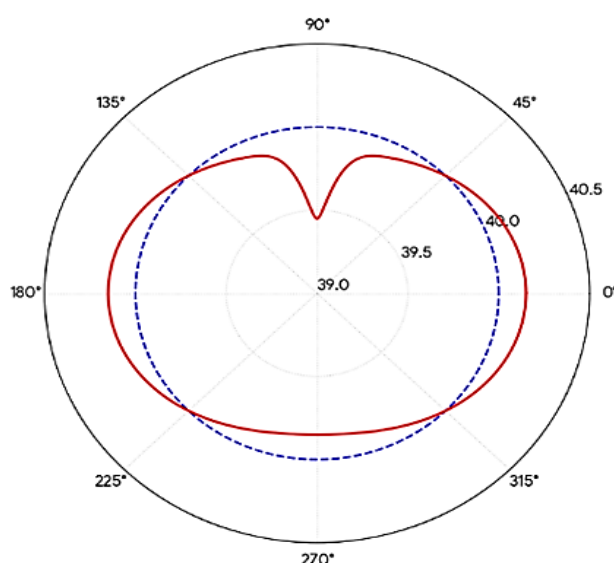
Yorug'lik intensivligi $I(x)$ ning "yorug'lik-soya" o'tishidagi taqsimlanishi Gauss funksiyasi bilan yoki hatolik integrali (ERF) bilan ifodalanadi.

Chegara koordinatalarini 0,05 pikselgacha aniqlikda aniqlash uchun, intensivlik gradiyenti massa markazi matematik modelidan foydalaniladi:

$$N_{\text{subpic}} = \frac{\sum_{i=1}^{k+m} i \cdot |\nabla I_i|}{\sum_{i=1}^{k+m} i \cdot |\nabla I_i|} \quad (12)$$

bu yerda: I_i - i – pikselning o'tish zonasidagi intensivligi;

$\nabla I_i = I_{i+1} - I_{i-1}$ intensivlikning diskret gradiyenti.



— deformatsiyalangan profil; - - - nominal radius, R_0

Rasm 2. Gazodizel silindrlar gilzasining geometrik profili

Subpiksel aniqligi 0,05 piksel bo'lganda, modelning haqiqiy yorug'ligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$D_{\text{haq}} = 86,25 \text{ мкм} \cdot 0,05 \approx 4,3 \text{ мкм}$$

Bu gazodizel silindrlar gilzasi uchun belgilangan qo'yimni to'la qanoatlantiradi ± 5 mkm.

Gazodizel silindrlar gilzalarida ichki yuza yeyilishi bilan bir qatorda yuza geometriyasi o'zgarishi kuzatiladi. Gilza yuzasining h balandlikdagi kesimda ovalligi (Δ_{ov}) bir tekislikda o'lchangan eng katta va eng kichik diametrlar farqi sifatida aniqlanadi:

$$\Delta_{\text{об}}(h) = D_{\text{мак}}(h) - D_{\text{мин}}(h) \quad (13)$$

Gilza ovalligining namunaviy taqsimlanishi jadval 1 da keltirilgan.

Gilza pastki qismida porshenning gilza devoriga beradigan yuklamasi miqdori va termik yuklanishlar miqdori kam.

Gazodizel silindrlar gilzasi ishchi yuzasi geometriyasini chuqur tahlil qilish uchun gilza kesimining uzaytirilgan profilini quramiz. Grafikda matematik modelning uchta tashkil etuvchisi keltirilgan: haqiqiy nominal doira, ummuy ellips deformatsiyasi va mahalliy nuqson.

Xulosalar

1. Gazodizel silindrlar gilzalari ishchi yuzasini nazorat qilishning an'anaviy usullari zarur unumdorlik va ma'lumotlar aniqligini ta'minlab berolmaydi, strukturalashgan yorug'lik metodini



qo‘llash silindrlar gilzalari ishchi yuzasining to‘laqonli 3D modelini shakllantirish orqali ishchi yuza aniqligini ta’minlashga xizmat qiladi

2. Gazodizel silindrlar gilzalari ishchi yuzasini nazorat qilishning nazariy bog‘liqliklari va matematik ifodalari taklif etilgan. Taklif etilgan analitik bog‘liqliklar va fazaviy siljish algoritmlari silindrlar ishchi yuzasi (X,Y,Z) koordinatalarida yoru-lik koordinatalarini olish imkonini beradi

3. Tadqiqotlarda taklif etilgan metodlar va tajriba natijalari D-243 gazodizel silindrlar gilzalari ishchi yuzasi mikrogeometriyasi va geometrik shakl o‘zgarishlarini baholash imkonini beradi

Adabiyotlar:

1. Zhang Q., Sun C., Chang Y. et al. 3D Inner Surface Inspection System based on Circle-structured Light // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 2018. - Vol. 140, No. 11. - Art. 111007.
2. Li Y., Zhou X., Liu Z. A Full-Profile Measurement Method for an Inner Wall with Annular-Structured Light // Sensors. - 2021. - Vol. 21, No. 4. - Art. 1195.
3. Wang M., Li J., Yang R. Three-Dimensional-Scanning of Pipe Inner Walls Based on Line Laser // Sensors. - 2022. - Vol. 22, No. 15. - Art. 5689.
4. Шелестов С. А., Конев А. В. Создание микрорельефа на внутренней поверхности гильзы цилиндра с помощью лазерного излучения // Труды НАМИ. - 2021. - Т. 284, № 1. - С. 12–18.
5. Patent US 2010/0313642 A1. Liner Inspection Tool and Method of Inspecting a Cylinder Liner / General Electric Company; inventors: J. R. Krogmeier, P. T. Potts. — Filed: June 11, 2009; Pub. Date: Dec. 16, 2010
6. Gorthi S. S., Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are // Optics and Lasers in Engineering. - 2010. - Vol. 48, No. 2. - P. 133–140.
7. Zuo C., Feng S., Huang L. et al. Phase shifting algorithms for fringe projection 3D shape measurement: A review // Optics and Lasers in Engineering. - 2018. - Vol. 109. - P. 23–59.
8. Salvi J., Fernandez S., Pribyl T. et al. A state of the art in structured light patterns for 3D shape measurement // Pattern Recognition. - 2010. - Vol. 43, No. 8. - P. 2666–2680.