

IRT 3000

INOVACIJE • RAZVOJ • TEHNOLOGIJE

119–120 NOVEMBER–DECEMBER

November–december • 119–120 (10/2021)
Letnik 16 • Cena 5 € • ISSN 1854-3669



Tehnologija stružnega
frezanja za bolj
učinkovito letenje

Robotska proteza čuti okolico

Bionika, njen razvoj in
povezave z industrijo

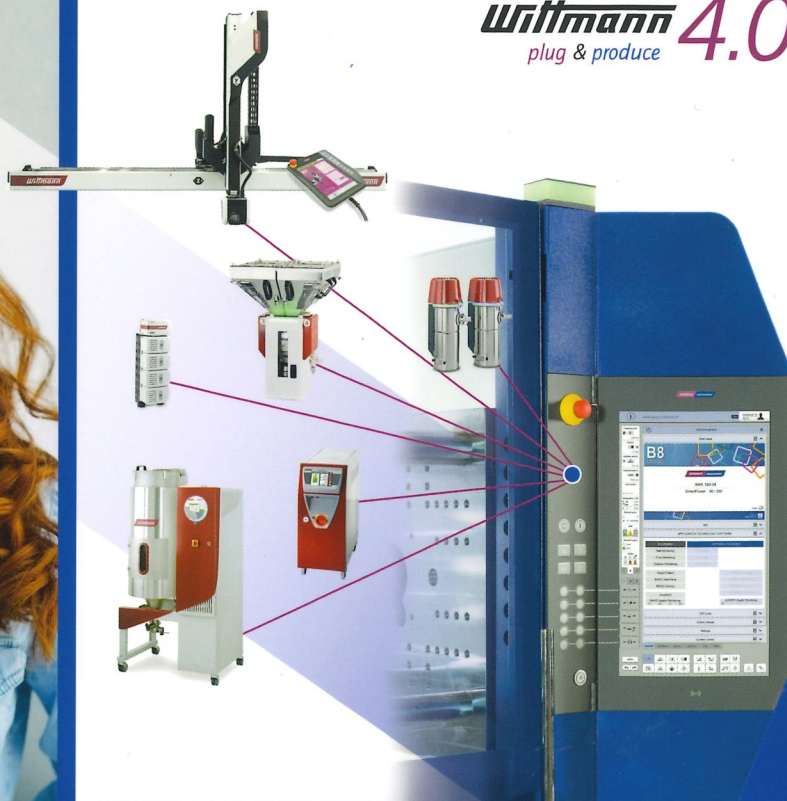
Wittmann

Battenfeld

enjoy
INNOVATION



Wittmann 4.0
plug & produce



www.wittmann-group.com

www.robos.si

ABB

ARBURG

BTS
COMPANY

CELADA
1838

CNC
pro

Elektrospoji
Zemljilno. Povzorni.

ENGEL
be the first

FANUC

FUCHS

HALDER
SLOVENIJA

Hoffmann
Group

KMS
www.kms.si

KUKA

Lesnik
www.lesnik.si

MiniTec
THE ART OF SIMPLICITY

OLMA

OMEGA
AIR

SCHUNK

Siming
www.siming.si
CNC center

TECOS SI
TEC

Teximp

topoMATIKA

TotalEnergies

TROAX

Tungaloy

VIAL
AUTOMATION

vist

WALTER

» Merjenje razdalje z visoko ločljivostjo s pomočjo interferometričnih metod

Matej Tovornik
ddr. Denis Donlagić

Zahteve po merjenju razdalje z visoko ločljivostjo se pojavljajo na najrazličnejših zahtevnih področjih, kot so polprevodniška industrija, kovinsko predelovalna industrija, medicina, proizvodnja optičnih naprav, litografija, vesoljska industrija, letalska industrija in raziskovalne ustanove.

Dolžina je ena izmed osnovnih merskih veličin in jo glede na tehnološki napredek pogosto želimo meriti z visoko ločljivostjo, da lahko izdelamo kompleksne produkte ali produkte majhnih dimenzij. Meritve dolžine z visoko ločljivostjo so pogosta zahteva v nadzoru zahtevnih tehnoloških procesov.

Optične merilne metode za merjenje majhnih dolžin in premikov ponujajo visoko ločljivost in točnost in so velikokrat izbira povsod tam, kjer dosežemo zmogljivostne omejitve klasičnih električnih senzorjev. Uporabljamo jih lahko tudi v okoljih s povečanim elektromagnetnim vplivom, v okoljih izpostavljenim radiofrekvenčnim motnjam, v korozivnih okoljih, ekstremnih temperaturah, visokih tlakih, visokih napetosti, vakuumu, radioaktivnih in eksplozijsko ogroženih okoljih.

Dejstvo je, da uporabljamo optične metode za doseganje najvišjih merilnih ločljivosti. Eden takšnih skrajnih primerov je LIGO (observatorij gravitacijskega valovanja z laserskim interferometrom) za detekcijo gravitacijskih valov. LIGO lahko detektira spremembe poti, ki ustreza 1/10000 premera protona.

Za zagotavljanje visoke ločljivosti pri optičnih merilnih metodah tudi ni treba miniaturizirati merilnega sistema.

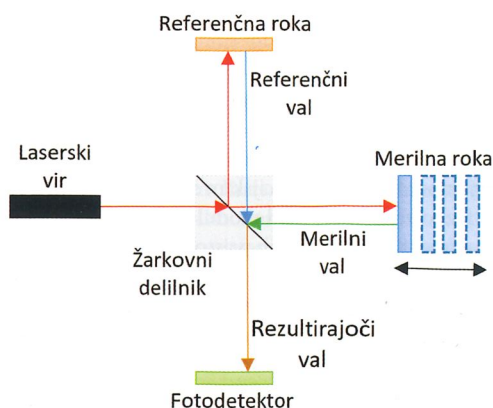
Interferometri

Osnovna optična naprava, ki omogoča zaznavanje zelo majhnih sprememb dolžine, je interferometer. Obstaja več možnih izvedb interferometrov [1]. Verjetno najbolj znan in in zgodovinsko pomemben je Michelsonov interferometer. Osnovni princip merjenja je razvil James Clerk Maxwell leta 1875, sistem pa je sestavil Albert Abraham Michelson leta 1881. Širšo uporabnost pa so pridobili interferometri šele z razvojem in miniaturizacijo koherentnih (laserskih) virov.

Osnovna konfiguracija Michelsonovega interferometra je prikazana na sliki 1.

Svetlobni vir je običajno koherenten in polariziran. Koherenten vir je vir, ki seva približno enofrekvenčno, sinusno elektromagnetno (optično) valovanje. V večini primerov danes kot vire svetlobe v interferometrih uporabljamo frekvenčno stabilne laserje ali laserske diode. Laserski snop se na žarkovnem delilniku razdeli v dva valova. En val je referenčni, drugi pa merilni.

Referenčni val potuje do referenčnega zrcala in se odbije nazaj proti žarkovnemu delilniku. V tej točki je izjemnega pomena, da je pot referenčnega snopa vedno konstantna ne glede na zunanje vplive (temperatura). Zato je referenčno zrcalo pogosto nameščeno na stranico žarkovnega delilnika (slika 2).



» Slika 1:
Michelsonov
interferometer.

Merilni val potuje od žarkovnega delilnika do merjenega objekta in se odbije nazaj proti žarkovnemu delilniku. Na delilniku se referenčni in merilni snop združita (interferirata) ter skupaj tvorita rezultirajoči val. Rezultirajoči val potuje do fotodetektorja, kjer izmerimo njegovo moč.

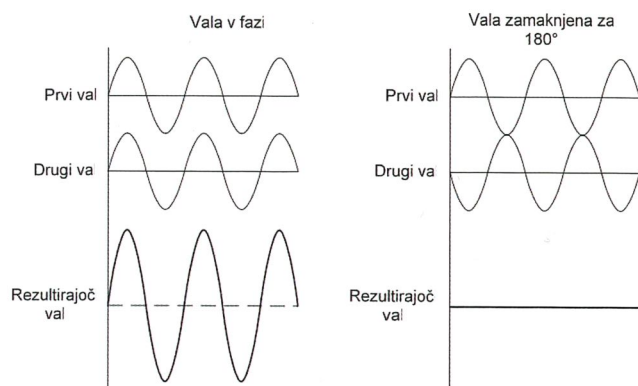


» Slika 2: Senzorska
glava merilnega sistema z
žarkovnim delilnikom.

Interferometrija temelji na principu seštevavanja valovanj oziroma superpozicije. Pri tem je treba upoštevati, da je svetloba, ki jo seva koherenten laserski vir (približno), sinusno elektromagnetno valovanje. Amplituda rezultirajočega – seštetega vala ni odvisna le od velikosti amplitud posameznih valov, temveč tudi od fazne razlike med obema valoma. Če sta valova v fazi, se njuna amplituda sešteje, če pa sta med sabo zamaknjena za 180° , pa se odšteje in ima rezultirajoči val takrat najnižjo optično moč, ki je v primeru seštevavanja valov z enakimi amplitudami lahko tudi nič (Slika 3).

Kadar spremenimo poti, po kateri potuje merilni val, le za polovico valovne dolžine svetlobnega vira (torej vala zmanjšamo za fazni kot 180°), to že povzroči maksimalno možno spremembo v amplitudi seštetega vala. Sodobni sistemi za detekcijo seveda omogočajo razločitev zelo majhnih sprememb v svetlobnem toku, kar pomeni, da lahko z interferometrom zaznamo spremembe

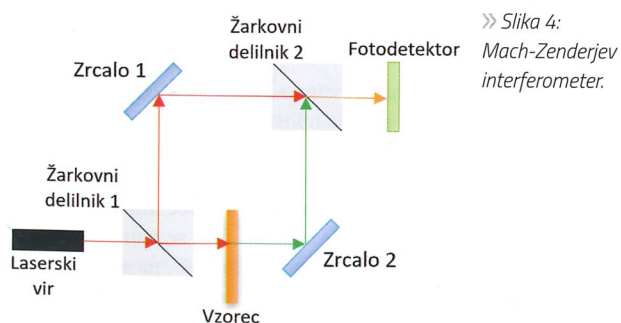
poti, ki so bistveno manjše od valovne dolžine svetlobe. Zaznavanje sprememb poti v subnanometriškem področju je zato v primeru uporabe interferometrov precej neposredno.



» Slika 3: Interferenca oz. seštevaje valovanj [2].

Zgoraj opisan princip predstavlja najpreprostejši princip za uporabo interferometra v razločevanju oziroma merjenju dolžine. Obstaja niz bolj kompleksnih metod, s katerimi lahko sklepamo na dolžino interferometra brez neposrednega merjenja optične moči. Na primer: možno je vpeljati periodično modulacijo poti v referenčni roki (npr. z mehansko modulacijo poti), kar povzroči periodično modulacijo moči na detektorju. Pridobljen izhodni signal nato primerjamo v fazi z modulatorskim signalom in merimo namesto moči fazno zakasnitev med modulatorskim signalom in signalom na detektorju. Podobnih pristopov, s katerimi razločimo spremembo poti iz interferenčnih optičnih signalov, je veliko, odvisni pa so predvsem od načinov in ciljev, ki jih želimo doseči z interferometrom. Prav razvoj sodobnih opto-elektronskih komponent in sistemov omogoča razvoj novih različnih metod in postopkov, s katerimi lahko učinkovito gradimo in učinkovito uporabljamo interferometre v naprednih merilnih sistemih za merjenje razdalj.

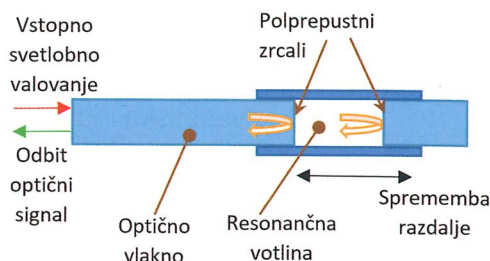
Poleg zgoraj opisanega Michelsonovega interferometra poznamo tudi druge vrste interferometrov. Značilna predstavnika sta npr. Mach-Zenderjev in Fabry-Pérotov interferometer, osnovi princip delovanja pa je enak. Mach-Zenderjev interferometer vsebuje dve zrcali in dva žarkovna delilnika [1]. Snop laserskega vira se na prvem žarkovnem delilniku razdeli na dva vala, ki potujeta po ločenih poteh do zrcal in se nato združita na drugem žarkovnem delilniku (Slika 4). Rezultirajoči val detektira fotodetektor. Vzorec vnaša v sistem spremembo poti vala, kar zaznamo na fotodetektorju.



» Slika 4: Mach-Zenderjev interferometer.

Fabry-Pérotov interferometer je interferometer sestavljen iz dveh vzporednih zrcal, ki sta razmaknjena za določeno razdaljo [1]. Če sta zrcali visoko odbojni, pride do seštevaja množice valov, ki se odbijajo med zrcali, kar omogoča meritev premikov s še višjo ločljivostjo (tako dobimo Fabry-Pérotov resonator). Zračno oz.

merilno rezo lahko spreminjamo od nekaj mikrometrov do več centimetrov. Fabry-Pérotove interferometre je mogoče konfigurirati v zelo kompaktne in raznovrstne merilne naprave. Možno jih je, na primer, zgraditi na vrhu optičnih vlaken, kar omogoča meritev različnih fizikalnih parametrov, pri katerih se merjena veličina prevede v majhen premik. Takšen primer so npr. optični senzorji tlaka, kjer pred vrh vlakna namestimo membrano, ki se upogiba pod vplivom okoliškega tlaka (vrh vlakna in membrana tako tvorita par zrcal). Slika 5 predstavlja primer optičnega vlakenskega Fabry-Pérotovega interferometra, ki se uporablja za merjenje raztezkov. Strukturo pritrdimo na merjen objekt; če se ta raztegne, spremeni razdaljo med zrcali, kar izmerimo na že opisani način.

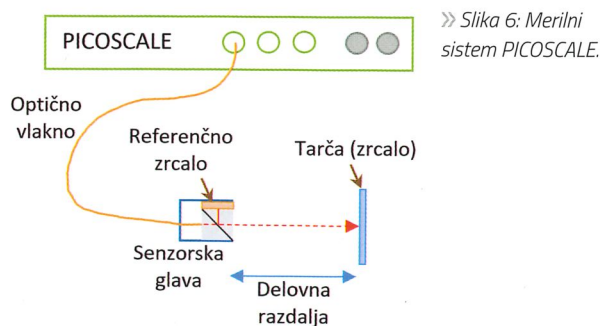


» Slika 5: Fabry-Pérotov interferometer v optično vlakenski izvedbi.

Primeri merilnih sistemov na osnovi optičnih interferometrov

Komercialno dobavljivi brezstični merilni sistemi so primerni za industrijska in laboratorijska okolja. V glavnem z njimi merimo razdalje in vibracije.

Primer tovrstnega merilnega sistema je izdelek PICOSCALE proizvajalca SmarAct, ki temelji na Michelsonovem interferometru in je namenjen mikropozicioniranju. Merilni sistem za merjenje razdalje PICOSCALE je sestavljen iz signalnega razločevalnika, ki je z optičnim vlaknom povezan s senzorsko glavo (slika 6). Na eno opto-elektronski razločevalnik so lahko povezane do tri senzorske glave, kar omogoča sočasno merjenje treh različnih razdalj. Senzorske glave imajo nazivne delovne razdalje 10 mm do 1000 mm in so primerne za različne aplikacije [3]. Meritve razdalje je možno izvajati med senzorsko glavo in merjenim objektom, ki je lahko kovinski, plastičen, steklen ali ga lahko definira celo površina tekočine, npr. vode. V primeru večjih razdalj je mogoče namestiti na merjen objekt retroreflektor, ki zniža potrebo po natančni poravnavi in optični kvaliteti površine objekta.



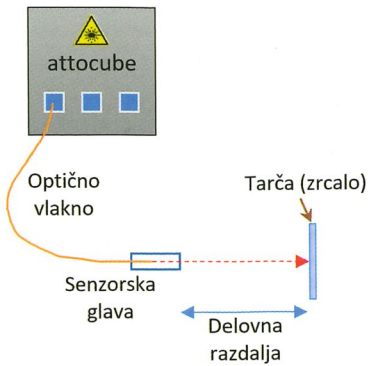
» Slika 6: Merilni sistem PICOSCALE.

Merilni sistem lahko npr. uporabljamo pri nastavitvah in vodenju triosnih linearnih vodil, pri zaprtostančnih sistemih pozicioniranja v ekstremnih okoljih, pri monitoringu vibracij na oseh strojev in za skenirno vibrometrijo. Izvajanje meritev v ekstremnih okoljih je preprosto izvedljivo zaradi senzorske glave, ki ne vsebuje elektronskih in temperaturno občutljivih komponent.

Interferometer PICOSCALE zagotavlja delovanje v pikometr-

skem področju ($1/100000 \mu\text{m}$); njegova ločljivost je 1 pm , maksimalni merilni doseg en meter [3]. Proizvajalec je definiral, da mora znašati refleksija tarče več kot 4% .

Naslednji primer je merilnik razdalje proizvajalca Attocube systems AG. Izdelan je na osnovi Fabry-Pérotovega interferometra, kar omogoča izvedbo preproste senzorske glave s kolimatorjem ali lečo in s tem stabilnejše meritve (slika 7). Merilni sistem omogoča merjenje razdalji do 5 m z ločljivostjo do 1 pm , ob tem pa zanaša najvišja hitrost premika tarče 2 m/s [4]. Hitrost vzorčenja je 10 MHz . Dejstvo je, da moramo pri faktorju ločljivosti zmeraj upoštevati pogoje obratovanja in nastavitvev.



» Slika 7: Merilni sistem attocube.

Pri tem merilnem sistemu moramo paziti na poravnavo med senzorsko glavo in merjenim objektom, da imamo zagotovljeno paralelnost ($\pm 2 \%$) in zadosten povraten odboj od objekta. Pri prostorsko omejenih aplikacijah lahko po naročilu proizvajalec zmanjša velikost glave na premer $1,2 \text{ mm}$, kar pa pri konkurenčnih senzorskih glavah z žarkovnim delilnikom ali elektronskimi komponentami ni mogoče. Za zagotavljanje največje merilne negotovosti ponuja proizvajalec okoljsko kompenzacijsko enoto (ECU), ki meri temperaturo, vsebnost vlage in zračni tlak ter kompenzira zunanje vplive na merjenje. S to kompenzacijsko enoto kompenziramo nihanja lomnega količnika zraka, ki neposredno vpliva na merjen rezultat. Z lokalnim merjenjem okoljskih parametrov lahko dosežemo razred točnosti, ki presega $\pm 1 \text{ ppm}$.

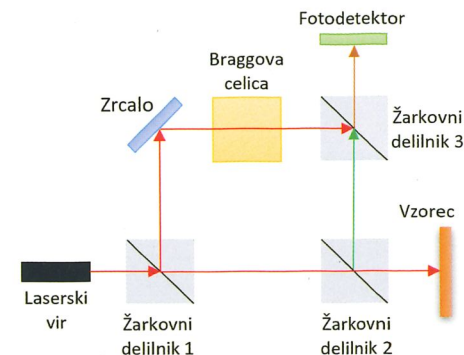
Omenjeno opremo najdemo v aplikacijah, kot so koordinatne meritve pozicioniranja, detekcijo vibracij, pri sinhrotronskih pospeševalnikih, pogonskih tehnologijah, pri kalibracijah orodij in v polprevodniški industriji.

Podjetje Canon je leta 2004 izdelalo merilnik visoke ločljivosti model DS-80, ki združuje Michelsonov interferometer s 650 nm polprevodniškim laserjem v ohišju dimenzij $47 \times 32 \times 19 \text{ mm}$ [5]. Merilnik zagotavlja neprekinjeno zaznavanje malih premikov v različnih izdelkih in aplikacijah. Brezstični senzor razdalje zagotavlja ločljivost $0,08 \text{ nm}$ pri frekvenci vzorčenja 50 Hz (na voljo je tudi različica s 100 Hz in 500 Hz vzorčenjem). Merilno območje je $\pm 50 \mu\text{m}$, nelinearnost pa je manjša od $\pm 0,02 \%$ na celotnem merilnem dosegu. Model tipa A ima delovno razdaljo 10 mm , tip B pa $2,5 \text{ mm}$. Mikrolaserski interferometer je idealna rešitev za proizvajalce zvočnikov, polprevodniških rezin, trdih diskov, merjenje odstopanj pri izdelavi ležajev in linearnih vodil.

Tipična aplikacija interferometrov je merjenje hitrosti in vibracij (vibrometrija). Z napredkom polprevodniške industrije se z leti dvigujejo frekvence vzorčenja v merilnih sistemih. Hitro signalno procesiranje omogoča zanesljivo merjenje hitrih sprememb poti po času in kot rezultat pridobimo hitrost. Najpomembnejša prednost laserske vibrometrije pred pospeškometri je ta, da merjenje izvajamo brezstično. Na ta način odpravimo povraten vpliv, ki ga sicer povzročimo z namestitvijo pospeškometra, ki ima končno maso in lahko s tem vpliva na dinamične lastnosti merjenca. Interferometrija tako omogoča meritev majhnih vibracij na delih z zelo majhno maso in dimenzijami. Prednost pred pospeškometri pa je tudi enostavna montaža in vgradnja na težko dostopnih mestih.

Slika 7 prikazuje princip delovanja vibrometra proizvajalca Polytec. Laserski snop se v tem primeru razdeli na dva valova. Merilni val potuje skozi žarkovni delilnik 1 in 2, se odbije od

vzorca in potuje nazaj proti žarkovnemu delilniku 2. Nato se val v žarkovnem delilniku 2 odbije pod kotom 90° in potuje do žarkovnega delilnika 3, kjer interferira z referenčnim valom iz Bragrove celice. Nato rezultirajoč val zaznamo na fotodetektorju. Bragova celica je akustično-optični modulator vzbujan s frekvenco 40 MHz . V optični sistem je vgrajena z namenom določitve smeri gibanja tarče, saj se pri približevanju in oddaljevanju vzorca drugače tvori enak interferenčni vzorec.



» Slika 7: Osnovne komponente za izvedbo laserske vibrometrije.

Merjenje vibracij lahko izvajamo v eni ali več točkah (skenirna vibrometrija) ter na ta način analiziramo načine, na katere nihajo večje površine. Pri manjših površinah uporabljamo motorizirana linearna vodila po dveh oseh, da lahko premikamo senzorsko glavo nad merjeno površino. V praksi senzorsko glavo namestimo na pozicionirni sistem linearnih vodil z nanometrsko ločljivostjo, ki slonijo na piezzo aktuatorjih.

Laboratorijski vibrometer proizvajalca Polytec, model Vibro-One, omogoča npr. brezstično merjenje vibracij s frekvenco do 3 MHz [6]. Merilnik je univerzalen in omogoča poleg merjenja vibracij tudi merjenje hitrosti, razdalje in pospeškov. Maksimalna hitrost, ki jo lahko izmerimo, znaša $\pm 12 \text{ m/s}$. Pri največji ločljivosti hitrosti lahko dosežemo točnost $\pm 0,001 \text{ m/s}$. Razdalja, ki jo lahko izmerimo, znaša $\pm 200 \text{ mm}$. Pri najvišji ločljivosti lahko v merilnem dosegu $\pm 10 \text{ nm}$ dosežemo ločljivost $0,3 \text{ pm}$. Za doseganje najvišjih ločljivosti je treba izbrati opcijsko opremo.

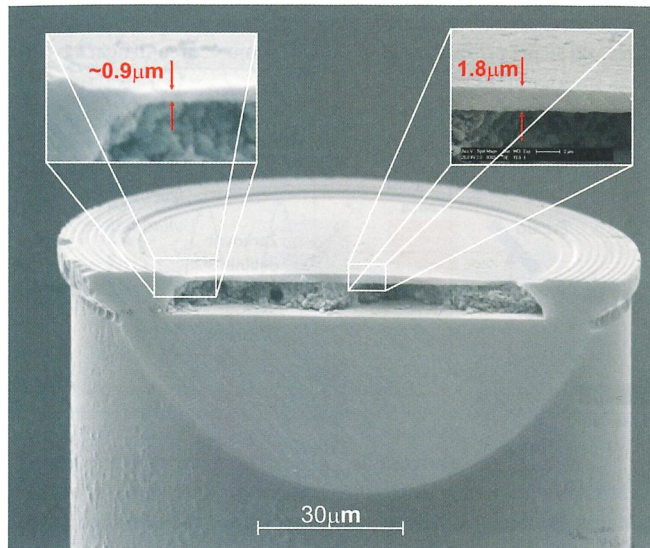
Laserska vibrometrija se uporablja v širokem spektru aplikacij, npr. pri načrtovanju MEMS naprav (mikroelektromehanski sistemi), žičnih pritrjevanjih – bondiranje, pri motorjih – aktuatorji na osnovi zvočnih tuljav, pri ultrazvočnih pretvornikih, mikrozvočnikih, slušnih aparatih, akustofluidnih napravah, pri identifikaciji šumnih virov za mikroskopijo [3] itd.



» Slika 8: Mikrooptični senzor raztezka.

V industrijski merilni praksi je velikokrat treba poseči po namenskih rešitvah in tu interferometrija ni izjema. Na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru v Laboratoriju za elektrooptične in senzorske sisteme razvijamo mikrooptične senzore na osnovi optičnih vlakenskih Fabry-Pérotovih interferometrov že vrsto let. Z njimi lahko merimo majhne spremembe v razdaljah, ki jih posredno uporabimo tudi za meritve drugih fizikalnih parametrov, kot so temperatura, tlak, raztezek, lomni količnik in rotacija v najrazličnejših aplikacijah in okoljih. Vsi izdelani senzori so narejeni iz optičnih vlaken (silicijevega stekla) in imajo premere okoli $125 \mu\text{m}$. Slika 8, 9 in 10 kažejo nekaj primerov, in sicer senzor raztezka, senzor tlaka in temperaturni

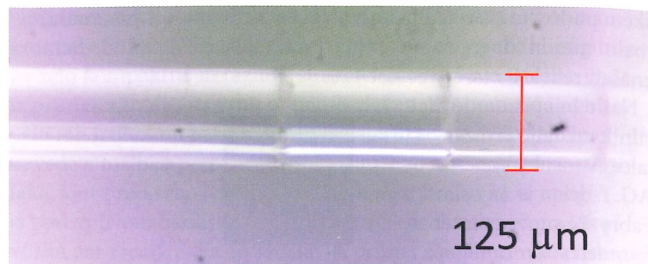
senzor. Vsi trije temeljijo na merjenju spremembe razdalje med polprepustnima zrcaloma (pri temperaturnem senzorju se razdalja med zrcaloma spreminja predvsem zato, ker se s temperaturo spreminja lomni količnik vlakna).



» Slika 9: Mikrooptični senzor tlaka (membranski).

Sklep

Optične interferometrične metode zagotavljajo visoke ločljivosti in omogočajo točne meritve razdalj ter z razdaljami povezanih fizikalnih veličin. Izjemno visoka ločljivost nam omogoča meritve na objektih in okoljih, ki jih sicer z drugimi metodami ne moremo meriti.



» Slika 10: Mikrooptični senzor temperature na osnovi Fabry-Pérotovega interferometra.

Z razvojem novih tehnologij prodirajo optične metode na najrazličnejša področja tehnike, proizvodnih tehnologij, medicine, gradbeništva, vesoljske industrije. S povečevanjem ponudnikov opreme skozi leta upadajo cene merilnih sistemov, kar odpira vrata na nova področja.

Viri

- [1] E. Hecht, Optics, Harlow : Pearson, 2017
- [2] M. Njegovec, Temperaturni senzor s Fabry-Perotovim interferometrom : diplomska naloga univerzitetnega študijskega programa, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2008
- [3] Katalog: PICOSCALE Motion and Vibration Measurement - Metrology Brochure, SmarAct GmbH, 2020
- [4] Podatkovni list: Interferometrični merilnik razdalje Attocube IDS3010, Dosegljivo: <https://www.attocube.com/en/products/laser-displacement-sensor/displacement-measuring-interferometer>
- [5] Canon interferometer, Dosegljivo: <https://news.thomasnet.com/fullstory/micro-laser-interferometer-fits-in-tight-spaces-458875>
- [6] Podatkovni list: Polytec - VibroOne, Dosegljivo: <https://www.polytec.com/int/vibrometry/products/single-point-vibrometers/vibroone>
- [7] vibrometry/products/single-point-vibrometers/vibroone

» Strokovne rešitve za transfer tekočin v industriji

Proces transferja industrijskih tekočin in plinov, predvsem tistih, ki imajo agresivne lastnosti, zahteva skrben premislek in pozornost do detajlov v vseh fazah, da se zagotovi varno in dosledno delovanje.

Cevi in konektorji, ki se uporabljajo za te aplikacije, morajo biti najvišje kakovosti, da so operaterji in okolje zaščiteni pred nenamernim izpustom tekočin ali plinov. Poleg varnostnih vidikov v okolici procesa transferja je pomembno optimizirati pretok, da se tako doseže največja produktivnost ob najnižjih stroških.

Področja uporabe:

Logistika tekočin

Transfer tekočin, plinov in goriva

- na ladje in z njih
- v železniške cisterne in iz njih
- v cestne cisterne in iz njih
- v katerokoli vrsto rezervoarjev in iz njih



Kemična industrija

- logistika kemikalij, plinov in goriva, kurilnega olja
- aplikacije za transfer tekočin znotraj obrata



- razdelilne in mešalne postaje
- aplikacije pri pakiranju proizvodov

Farmacevtska industrija

- vhodna logistika in mešanje



Offshore in pomorstvo

- logistika tekočin za oskrbo offshore platform
- aplikacije na naftnih ploščadih
- transfer z naftne ploščadi na ladjo
- transfer z ladje na kopno
- transfer z ladje na ladjo
- polnjenje ladij z gorivom
- skladiščenje nafte



Rafinerija

- logistika nafte in proizvodov
- skladiščenje nafte
- aplikacije za transfer tekočin znotraj obrata
- razdelilne in mešalne postaje
- aplikacije pri pakiranju proizvodov



Druge industrije

- logistika tekočin pri oskrbi s pomožnim materialom
- aplikacije za transfer tekočin znotraj obrata



» www.staubli.com