

Pristupačno rešenje merenje visina objekata u cilju njihove inspekcije u toku proizvodnje

Marko Barjaktarović, Slobodan Petričević, Novica Janković i Peđa Mihailović

Apstrakt—Inspekcija proizvodnje i uklanjanje defektnih uzoraka postaje neophodna u savremenom poslovanju, usled težnje za isporukom skoro savršenog proizvoda. U radu je predstavljena mogućnost realizacije pristupačnog laserskog skenera, koji ne prelazi petinu cene komercijalnih sistema. Ostvarena brzina skeniranja zavisi od mogućnosti same kamere, jer brzina izdvajanja profila ne prelazi jednu milisekundu, pri čemu se visinska razlika od 1 mm predstavlja sa minimalnom promenom od 30 piksela u slici.

Ključne reči—Lasersko skeniranje; triangulacija; obrada slika; inspekcija proizvodnje.

I. UVOD

Savremeni uslovi poslovanja zahtevaju skoro savršen izgled isporučenih proizvoda. Isporučivanje proizvoda sa defektom ne izaziva nezadovoljstvo samo kod korisnika tog defektnog proizvoda, već se putem društvenih mreža, može preneti i na druge korisnike i rezultovati u privremenom ili čak trajnom gubitku većeg broja potrošača.

Trend smanjenje cena kamera, sočiva, sistema za osvetljenje, kao i računara, doveo je do veće upotrebe sistema za obradu slike u cilju inspekcije proizvoda u industrijskim uslovima (eng. *Machine Vision*), omogućavajući upravi da stekne prednosti na tržištu unapređujući proizvodni proces i kvalitet isporučene robe [1]. U početku su ovi sistemi uglavnom našli primenu u automobilske industriji, ali je sve vidljivije njihovo prisustvo i u drugim proizvodnim granama: proizvodnji čeličnih limova, plastici, tekstilu, papiru, a od skorije i u proizvodnji voća, povrća, sira, mesa [2], pekarskih proizvoda [3], biskvita, testa, konzerviranih proizvoda [4] i drugo.

Pored klasičnih sistema za obradu slike, istaknuto mesto u inspekciji proizvodnje zauzimaju i sistemi za određivanje visine proizvoda i formiranje trodimenzionalne mape uzorka, takozvani laserski skeneri, koji zasnivaju svoj rad na triangulaciji. Korišćenjem laserskih skenera moguće je izvesti 100 % inspekciju i komplikovanih oblika [5], a česta upotreba

Marko Barjaktarović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: mbarjaktarovic@etf.bg.ac.rs).

Slobodan Petričević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: slobodan@etf.bg.ac.rs).

Novica Janković – Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: nolebb@gmail.com).

Peđa Mihailović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: pedja@etf.bg.ac.rs).

je i nedestruktivna analiza varova [6]. Komercijalno dostupni laserski skeneri postali su standardni u automobilske industriji: provera kočionih pločica, očitavanje markera na gumama, merenje rastojanja između vrata i tela automobila, zatim u potrošačkoj elektronici, u ispitivanju šina i pragova u železnici i drugo [7], [8]. Lasersko skeniranje se može upotrebiti i za ispitivanje karakteristika šlaga u prehrambenoj industriji [9]. Nažalost, cena industrijskih laserskih skenera je visoka, i njihova primena je ograničena samo na situacije kada cena finalnog proizvoda omogućava brz povrat investicije.

Realizacija laserskog skeniranja upotrebom industrijske kamere i eksternog lasera (kada laser nije deo laserskog skenera što je slučaj kod komercijalnih proizvoda, slika 1), zahtevaju upotrebu brzih kamera, jer broj profila u sekundi direktno zavisi od broja slika koju kamera može da obezbedi. Tek sa pojavom USB3.0 industrijskih kamera, omogućena je akvizicija nekoliko stotina slika u sekundi bez ulaganja značajnih sredstava.

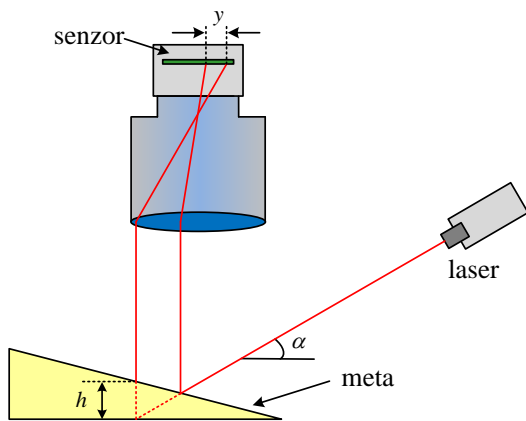


Sl. 1. Industrijski laserski skener. Preuzeto sa www.micro-epsilon.com.

U radu je prikazana mogućnost realizacije laserskog skenera sa brzinom skeniranja i preko 500 profila u sekundi, kao i detekcija razlike nivoa ispod 40 μm , pri čemu cena potrebnih komponenti ne prelazi 20% cena sličnog komercijalnog uređaja. U slučaju da širina proizvodne linije zahteva upotrebu više skenera, ušteda postaje daleko veća, jer se na jedan industrijskih računar može povezati više kamera, standardno četiri.

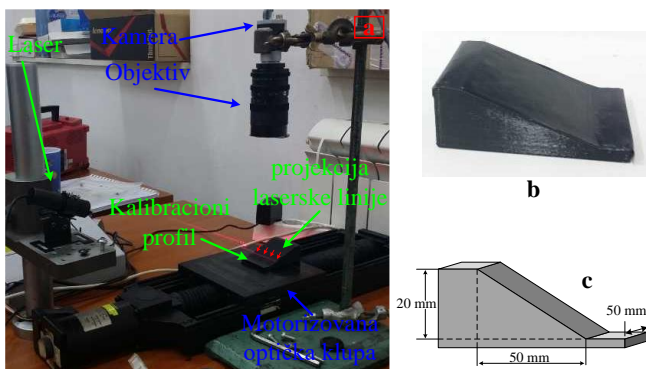
II. METOD

Merenje razlike visina h u odnosu na referentni položaj zasnovano je na pomeranju položaja reflektovanog laserskog zraka sa uzorka na senzoru kamere y , sl. 2.



Sl. 2. Princip rada merenja razlike nivoa na bazi laserske triangulacije.

Određivanje zavisnosti razlike visina h (prema referentnom nivou) na osnovu koordinate y određuje se kalibracijom. Eksperimentalna postavka prikazana je na sl. 3a.



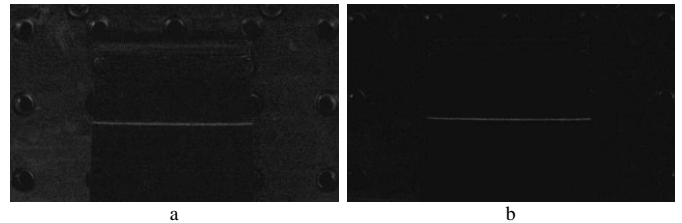
Sl. 3. a) Eksperimentalna postavka. b) Slika kalibracionog profila i c) odgovarajući 3D model.

Laserska linija se projektuje na profil oblika rampe (sl. 3c) koji se nalazi na motorizovanoj optičkoj klupi. Visinska razlika između vrha i podnožja kalibracionog profila iznosi 20mm, a profil je dobijen pomoću 3D štampača, koji po fabričkoj specifikaciji poseduju korak štampanja od $100\mu\text{m}$, zbog čega je preko kose strane zalepljen zategnut papir, u cilju ostvarivanja kontinualnog profila. Da bi se umanjio uticaj spoljašnjeg osvetljenja, na vrhu objektiva je postavljen crveni filter. Razlika u kvalitetu dobijenih slika prikazana je na sl. 4 i primena crvenog filtra omogućava jednostavno pronalaženje položaja laserske linije u slici, pozivom samo funkcije praga, dok je u slučaju kada se crveni filter ne koristi to značajno teže.

Horizontalno rastojanje između početka i kraja rampe iznosi 50 mm, a brzina kretanja motorizovane optičke klupe je postavljena na $100\mu\text{m/s}$.

Za potrebe testiranja korišćena je kolor industrijska kamera proizvođača *Basler* (Nemačka), model acA1920-50gc. Rezolucija kamere iznosi 1920×1200 piksela, a kamera poseduje Ethernet interfejs, odnosno zadovoljava *GigE Vision* standard. U punoj rezolucije kamera može da isporuči do 50

slika u sekundu, ukoliko je dužina ekspozicije manja od 20ms, što je u sprovedenom eksperimentu i bio slučaj. Veći broj slika u sekundi može se ostvariti smanjivanjem dimenzija slike u pikselima.



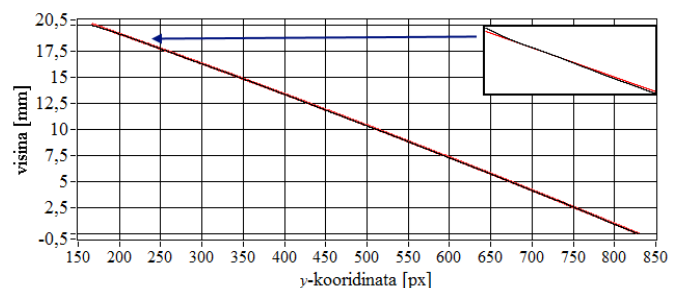
Sl. 4. Slika sa kamere a) bez i b) sa crvenim filtrom.

Laserska linija ostvorena je postavljanjem cilindričnog sočiva u putanju laserskog zraka. Na tržištu su dostupni laserski izvori sa integrisanim cilindričnim sočivom, koji se mogu koristiti i u industrijskim uslovima, a nalaze se u nižem cenovnom rangu.

U eksperimentalnoj postavci korišćen je objektiv promenljive žižne daljine 12.5 mm do 75 mm. Naravno, u namenskoj aplikaciji poželjno je koristiti sočivo fiksne žižne daljine, jer je njegova cena daleko niža. Apertura sočiva postavljena je na minimalnu vrednost (maksimalan F -broj), kako bi se ostvarila što je moguće veća dubina vidnog polja.

III. REZULTATI

Sprovedenjem eksperimenta ustanovljeno je da visinskoj razlici od 20 mm odgovara promena koordinata od 665 piksela u vertikalnom pravcu slike. Pozicija koordinate određuje se kao centar mase nivoa sive u pravcu y ose, pri čemu se u račun uzimaju samo pikseli iznad zadatog praga, odnosno oni koji predstavljaju refleksiju laserskog zračenja. Korišćenje centra mase omogućava lokalizaciju tačke refleksije sa rezolucijom ispod nivoa piksela, za razliku od postupka baziranog na pronalaženju maksimalnog intenziteta sive u vertikalnom pravcu kada se pozicija određuje sa korakom od jednog piksela [10]. Dodatni problem tada predstavlja i mogućnost da slika laserske linije ima širinu veću od jednog piksela.



Sl. 5. Dobijena zavisnost razlike visina od y -koordinate centra mase sive.

Slika 5 prikazuje zavisnost razlike visina od y koordinate izračunatog centra mase u slici sive. Funkcija prenosa nije potpuno linearna, a najmanje odstupanje sume kvadrata u odnosu na izračunate vrednosti daje aproksimacija polinom

trećeg stepena. Razlika visina i odgovarajuća y koordinata prikazane su crnom linijom, dok crvena prava predstavlja vrednosti razlika visina dobijenih aproksimacionom polinomom. Određivanje rezolucije merenja razlike visine, zbog nedostatka odgovarajuće opreme nije sprovedeno, jer bez poznate promene visine iznošenje bilo koje vrednosti nije opravdano. To naravno ne umanjuje mogućnost primene sistema, jer je potrebno ustanoviti da se pri pojavi defekta javlja razlika visina iznad definisanog praga.

U toku izvođenja eksperimenta, brzina kretanja kalibracionog profila je bila vrlo malog intenziteta (0.1 mm/s), a obrada profila je izvršena u *off-line* modu. U proizvodnim uslovima profili se moraju izdvojiti između akvizicije dve slike. Potreban broj profila zavisi od minimalnog defekta koji je potrebno otkriti, kao i od brzine kretanja proizvoda. Kao što je već napomenuto, komercijalno dostupni laserski skeneri ostvaruju maksimalno do 300 profila u sekundi, pri čemu je veličina njihovog matričnog senzora standardno 640 x 480 piksela. Trenutno dostupne kamere, sa USB 3.0 interfejsom, u rezoluciji 800 x 600 piksela i 640 x 480 piksela, mogu obezbediti 510, odnosno 750 slika u sekundi, (npr. modeli acA800-510um i acA640-750um proizvođača *Basler*), odnosno isto toliko profila u sekundi. U slučaju smanjenja korišćenog broj piksela brzina kamera može biti i veća. Međutim, pored akvizicije navedenog broja slika, potrebno ih je i obraditi (odrediti visinu) u realnom vremenu.

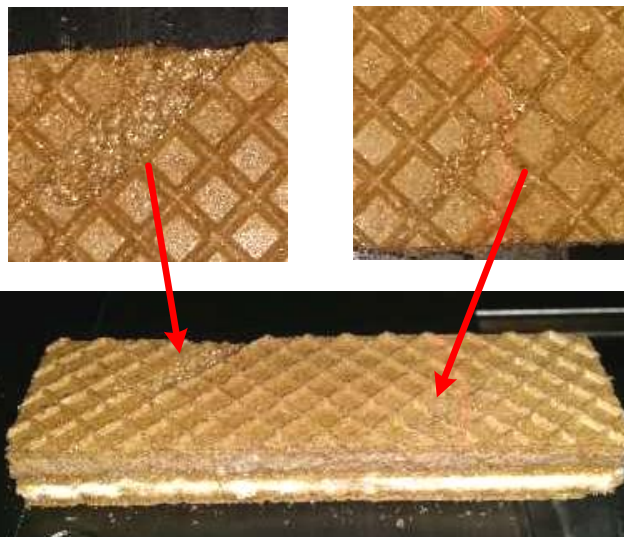
U nastavku eksperimenta, izvršena je simulacija, kako bi se utvrdila ostvarena brzina obrade. Testiranje je vršeno u softverskom paketu LabVIEW i sam algoritam za izdvajanje profila realizovan je direktno u LabVIEW programskom okruženju (LV). Iskorišćena je mogućnost pozivanja eksternog koda, i dve dodatne rutine za određivanje visina su napisane korišćenjem standardnih naredbi programskog jezika C++ (Std-C), kao korišćenjem specijalizovanih funkcija za direktno pozivanje AVX (eng. *Advanced Vector Extensions*) seta instrukcija (C-AVX). Dobijeni rezultati testiranja brzine izvršavanja programskog koda su prikazani u tabeli I, a vrednosti vremena izvršavanja (Δt) su date u ms.

TABELA I
BRZINE IZVRŠAVANJA RUTE ZA IZDVAJANJE JEDNOG PROFILA

Dimenzije slike	Δt LV	Δt Std-C	Δt C-AVX
1920 x 1200	18.92	3.95	0.55
800 x 600	3.68	0.86	0.14
640 x 480	2.42	0.53	0.10

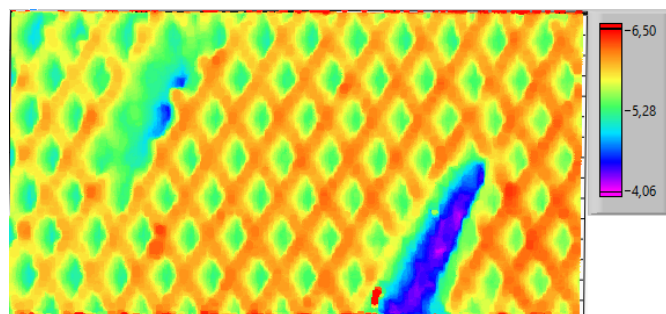
Na osnovu tabele I jasno je da maksimalna brzina izdvajanja profila nije ograničena brzinom obrade slika, već brojem slika koja kamere može da obezbedi u sekundi.

Nakon izdvajanja 3D mape za ispitivani objekat potrebno je utvrditi prisustvo defekata, i na osnovu toga izvršiti klasifikaciju proizvoda. U cilju demonstracije potencijalne primene izabran je vafl koji sadrži nekoliko kora između kojih je nanet fil. Zadatak je utvrditi da li je poslednja kora oštećena. Na sl. 6 prikazan je vafl sa defektom.



Sl. 6. Vafl sa defektima čije je prikaz uvećan.

Rezultat izvlačenja profila je 3D mapa prikazana na slici 7.



Sl. 7. 3D mapa vafla prikazanog na slici 6.

Nakon realizacije mape visina, koja predstavlja sliku u nivoima sive, potrebno je utvrditi da li postoji određen defekt.



Sl. 8. Binarna slika dobije primenom praga na 3D mapu sa sl. 7.

Nakon primene praga na dobijenu 3D mapu, a potom jednostavne morfološke operacije otvaranja, u rezultujućoj binarnoj slici ostaju samo objekti koji predstavljaju defekte, sl. 8. Meranjem dimenzija i broja defekata i upoređivanjem sa zadatim vrednostima, klasifikacija na ispravne i neispravne proizvode se može vrlo brzo obaviti.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan realizacija laserskog skenera u vrlo pristupačnom cenovnom opsegu. Pri poređenju sa komercijalnom dostupnom sistemima, performanse prikazanog rešenja su potpuno uporedive, pa čak i bolje, posebno kada je u pitanju broj ostvarenih profila u sekundi. To omogućava primenu laserskog skeniranja u cilju inspekcije proizvodnje i pri manjim obimima ili nižim cena pojedinačnog proizvoda, što doprinosi povećanje konkurentnosti korisnika.

Iako je sistem realizovan u LabVIEW programskom paketu, finalnog rešenje ne zahteva korišćenje LabVIEW, već se može upotrebiti neko od besplatnih razvojnih C++ okruženja, pri čemu se za komunikaciju sa kamerom (ili kamerama) koristi besplatna biblioteka proizvođača (u slučaju Basler kamere, to je Pylon SDK), a za prikaz slika biblioteka OpenCV.

Nastavak daljeg istraživanja predstavlja realizaciju kalibracionog postupka, kako bi se utvrdila rezolucija merenja razlike visina, kao i dizajn nosača za montiranje na proizvodnoj liniji.

LITERATURA

- [1] R. Santiago-Montero, G. S. Valadéz, H. Sossab, D. A. G. Hernández and M. Ornerlas-Rodríguez, "A study of the associative pattern classifier method for multi-class processes", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 17, no. 5-6, pp. 713-719, May, 2015.
- [2] K. K. Patel, A. Kar, S. N. Jha and Khan M. A., "Machine vision system: a tool for quality inspection of food and agricultural products", *Journal of Food Science and Technology*, vol. 49, no. 2, pp 123-141, Apr., 2012.
- [3] "Food inspection: Vision system inspects, counts bakery products", *Vision System Design*, Jan., 2017.
- [4] A. Wilson, "Vision Software Blends into Food Processing", *Vision System Design*, Jun., 2012.
- [5] H. L. Kwan and P. Hyunpung, "Automated inspection planning of free-form shape parts by laser scanning", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 16, no. 4, pp. 201-210, Aug., 2000.
- [6] Huang W. and Kovacevic R., "A Laser-Based Vision System for Weld Quality Inspection", *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 506-521, Jan., 2011.
- [7] "Applications for 2D/3D Laser scanners", Micro-Epsilon, Dorfbach, Germany.
- [8] "3D Laser Displacement Sensor Applications", Cognex, Natick, Massachusetts, United States.
- [9] P. Liu P. and M. O. Balaban, "Quantification of Visual Characteristics of Whipped Cream by Image Analysis and Machine Vision: Method Development", *Journal of Food Science*, vol. 80, no. 4, pp. 750-758, Feb., 2015.
- [10] Y. Li, J. Zhou, F. Huang and L. Liu, "Sub-Pixel Extraction of Laser Stripe Center Using an Improved Gray-Gravity Method", *Sensors*, vol. 17, no. 4, Apr., 2017.
- [11] C. Lomont, "Introduction to Intel® Advanced Vector Extensions", *White Paper by Intel*, May, 2011.

ABSTRACT

Products inspection and defect item removal became crucial activity in every production process, due to tendency for almost perfect product delivery. Realization of affordable laser scanner is shown, with price less than fifth of commercially available systems. The scanning speed is limited with camera capability and time for one profile calculation is less than millisecond. Additionally, for 1 mm difference in height system provides more than 30 pixels in image.

Affordable solution for height measurement and inspection during production process

Marko Barjaktarović, Slobodan Petričević, Novica Janković i Peđa Mihailović