

## DETEKCIJA NIVOVA VODE U LABORATORIJSKIM REZERVOARIMA PRIMENOM TEHNIKA OBRADJE SLIKA

Dušan MARJANOVIĆ, Ivana VIĆANOVIĆ, Robert LJUBIČIĆ  
Budo ZINDOVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ  
Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet

### REZIME

Određivanje i praćenje promena nivoa vode u laboratorijskim uslovima primenom tradicionalnih mernih metoda opterećeno je raznim nedostacima: tačnost, frekvencija uzorkovanja, inertnost mernog uređaja i osetljivost na spoljne faktore. U cilju prevazilaženja navedenih nedostataka predlaže se alternativna metoda, zasnovana na tehnikama obrade slika iz video zapisa laboratorijskog eksperimenta. Pored opisa metodologije i njene primene na model vodostana pri brzim oscilacijama nivoa, ovaj rad prikazuje i poređenje dobijenih rezultata merenja sa dve tradicionalne metode: (1) ultrazvučno merenje udaljenosti, i (2) merenje pritiska u tački. Pokazano je da je predložena metoda uporedive tačnosti, da ima niži nivo šuma i da je manje osetljiva na uticaj spoljnih faktora. Zbog svega navedenog, prikazana metoda može se koristiti kao adekvatna alternativa klasičnim mernim tehnikama u laboratorijskim uslovima.

**Ključne reči:** merenje nivoa, tehnike obrade slika, vodostan, fizički model

### 1. UVOD

Pouzdana merenje hidrauličkih veličina ključan je deo svakog eksperimentalnog istraživanja. Poznavanje i praćenje dubina, u laboratorijskim rezervoarima i kanalima, važno je za adekvatnu analizu posmatranih hidrauličkih procesa. Čak i najjednostavniji vidovi merenja, kao što je praćenje promena nivoa u rezervoarima, opterećeni su problemima oko izbora adekvatne merne tehnike, posebno kod eksperimenata sa brzim promenama nivoa.

Alternativa tradicionalnim metodama merenja (merni lenjiri i igle, ultrazvučno merenje, elektrokapacitivni senzori,

senzori pritiska, i dr.) predstavljena u ovom radu, zasnovana je na analizi pojedinačnih slika iz video zapisa eksperimenta. Takav pristup je neinvazivan i može imati visoku frekvenciju uzorkovanja. Takođe, uz odgovarajuće predprocesiranje „sirovih“ slika, otporan je na promene spoljnih faktora.

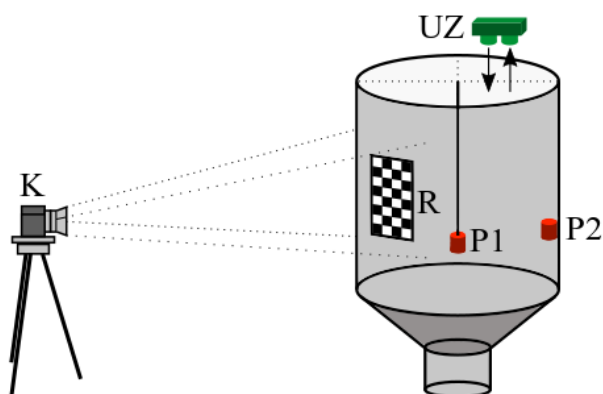
Prvi primeri primene obrade slika u cilju hidrauličkih ispitivanja bili su zasnovani na različitim tehnikama segmentacije [1]–[4], koje zahtevaju visok nivo kontrole nad spoljnim uticajima kao što su osvetljenje i kontrast. Stoga je primena takvih metoda izuzetno ograničena u realnim laboratorijskim uslovima. Naprediji pristupi raznoliki su u pogledu primenjenih metodologija. Detekcija ivica metodama kao što je *Canny edge detection* [5] pruža kvalitetnije rezultate od tehnika binarizacije, ali je teško primenljiva na veće oblasti snimanja i podložna je prekomernim „lažnim detekcijama“ (eng. *false positives*). U pogledu praćenja nivoa u rezervoarima, posebno pogodna može biti metoda detekcije pravih linija zasnovana na *Hough transformaciji* [6], [7].

Metod prikazan u ovom radu zasnovan je na analizi polja vertikalnih gradjenata intenziteta boje [8], [9]. Ovakav pristup, zajedno sa odgovarajućom fazom predprocesiranja, pogodan je za primenu u realnim laboratorijskim uslovima sa jakim vizuelnim šumom (zaprļanost površina, prskanje vode, zadržavanje kapljica na snimanim površinama, prostorne i vremenske razlike u osvetljenju, i dr.), ne zahteva kalibraciju parametara detekcije u zavisnosti od brzine promene i opsega merenja nivoa, i robusan je u pogledu osetljivosti na nivo osvetljenja, ugao i razdaljinu snimanja. Osim toga, ovaj rad pokazuje da je metoda visoke tačnosti.

## 2. METODOLOGIJA

### 2.1. Fizički model

Na Slici 1 prikazana je šema vodostanske instalacije korišćene u ovom istraživanju. Ceo sistem se sastoji od rezervoara sa približno konstantnim nivoom (za održavanje graničnog uslova), vodostana sa prigušivačem i cevovoda sa regulacionim zatvaračima uzvodno i nizvodno od vodostana. Na nizvodnom kraju instalacije nalazi se rezervoar sa trougaonim Tomsonovim prelivom za merenje protoka.



Slika 1. Skica eksperimentalne postavke

Na Slici 1 prikazan je položaj mernih mesta. Na mernim mestima P1 (na vertikalnoj osi vodostana) i P2 (na zidu vodostana) postavljeni su Van Essen TD-Diver DI801 senzori pritiska. Rezolucija senzora je 0,2 cm vodenog stuba, a deklarirana tačnost  $\pm 0,5$  cm, sa maksimalnim opsegom merenja od 10 m. Interval uzorkovanja iznosio je 0,5 s.

Na mernom mestu UZ postavljen je ultrazvučni senzor nivoa HC-SR04, kojim se upravljalo pomoću Arduino Uno mikrokontrolera. Prosečna frekvencija uzorkovanja iznosila je 43 Hz. Deklarirana merna neizvesnost jednog podatka iznosi  $\pm 0,3$  cm [10].

Na mernom mestu K postavljena je digitalna kamera Sony DSC-RX10 M2. Rezolucija snimanja iznosila je 3840x2160 piksela (4K) sa 29,97 snimaka u sekundi. Pravougaona oblast snimanja, dimenzija 10x40 cm (ŠxV), podeljena je na dva dela: u desnom delu postavljen je raster za ortorektifikaciju (oznaka R na Slici 1), a u levom delu je proziran zid vodostana na kom se detektuje nivo slobodne površine. Rezolucija očitavanja nivoa zavisi od rezolucije video snimka i udaljenosti kamere, i u eksperimentima je iznosila

0,25 mm. Interval uzorkovanja jednak je brzini snimanja kamere i iznosi 29,97 Hz.

### 2.2. Merenje nivoa tehnikama obrade slike

Metodologija određivanja nivoa vode iz video snimaka odvija se u 4 faze:

- priprema podataka: razdvajanje video snimka na pojedinačne slike, kalibracija kamere;
- detekcija rastera i odabir kontrolnih tačaka za ortorektifikaciju;
- filtriranje svake slike u cilju smanjenja šuma i smanjenja lažnih detekcija;
- određivanje nivoa vode iz analize polja gradjenata intenziteta boje filtrirane slike.

U fazi pripreme podataka najznačajniji korak predstavlja određivanje tzv. unutrašnjih parametara kamere (kalibracija kamere) koji su posledica nesavršenosti izrade njene optike i senzora. Ovi parametri su jedinstvena karakteristika konkretne kamere i uključuju: žižnu daljinu, poziciju optičkog centra kamere i koeficijente tangencijalne i radijalne distorzije. Svi unutrašnji parametri kamere određeni su upotrebom Camera Calibration App iz programskog paketa MATLAB® [11]. Pomoću tako određenih parametara mogu se dobiti slike sa uklonjenom distorzijom koje se koriste u daljem procesu detekcije.

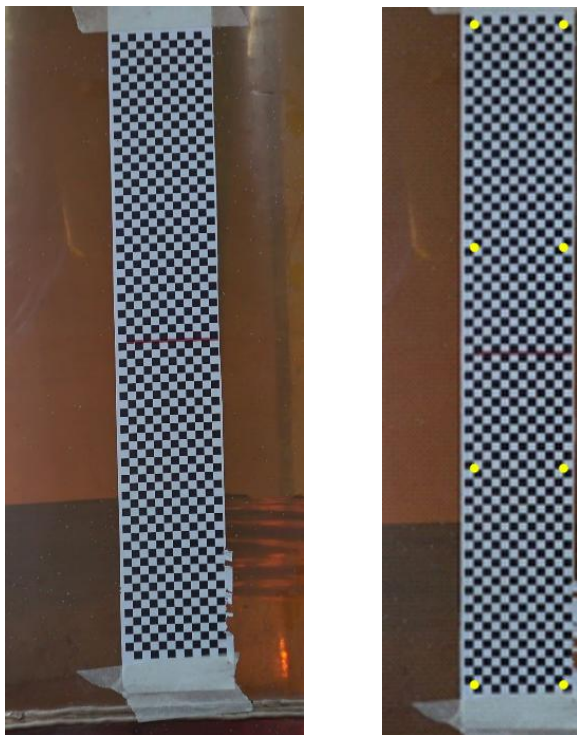
Pri snimanju, položaj i orijentacija kamere u odnosu na oblast snimanja u opštem slučaju su proizvoljni. Zbog toga što položaj oblasti snimanja u odnosu na kameru nije ortogonalan (Slika 2), potrebno je odrediti funkciju preslikavanja koordinatnog sistema same kamere u koordinatni sistem oblasti snimanja, odnosno transformisati perspektivnu projekciju iz video zapisa u ortogonalnu. Taj postupak sprovodi se pomoću rastera sa poznatim položajem u prostoru (oznaka R na Slici 3). Dimenzije kvadratnog polja na rasteru iznosile su 5x5 mm. Postupkom homografske (perspektivne) transformacije [12], koristeći poznat položaj odabranih tačaka na rasteru i njihovih odgovarajućih pozicija na slici, moguće je odrediti matricu preslikavanja ta dva koordinatna sistema. Celokupan postupak naziva se ortorektifikacija i omogućava jednostavniju detekciju i očitavanje nivoa sa obrađenih slika.

Originalne slike opterećene su pristustvom šuma koji je delimično posledica spoljnih faktora sredine (zaprļjanost u oblasti snimanja, osvetljenost prostorije, i dr.), a delimično kvaliteta same kamere. Poželjno je, pre faze detekcije nivoa, u što većoj meri ukloniti takav

šum, vodeći računa da se očuvaju karakteristični oblici važni za određivanje nivoa – prvenstveno horizontalna linija koja predstavlja nivo vode u vodostanu. U ovom radu primenjena je metoda bilateralnog filtriranja [13].



Slika 2. Originalna slika iz video zapisa



Slika 3. Raster za ortorektifikaciju.

Levo: oblast merenja nivoa sa originalne slike;  
Desno: ortorektifikovana oblast merenja sa položajem kontrolnih tačaka

Faza detekcije nivoa započinje transformacijom originalne slike u boji u neki od odgovarajućih jednocanalnih prikaza. Pogodni jednocanalni prikazi su: *grayscale* (spektar sive boje), pojedinačni kanali crvene (R), zelene (G) ili plave boje (B), L kanal CIELab

formata, ili slični. Najjednostavnija je konverzija originalne slike u boji (RGB) u spektar sive boje (*grayscale*) pomoću izraza [14]:

$$Y(x, y) = 0,2126R(x, y) + 0,7152G(x, y) + 0,0722B(x, y), \quad (1)$$

gde je  $Y(x,y)$  nova vrednost intenziteta piksela na poziciji definisanoj koordinatama  $x$  i  $y$ , a  $R(x,y)$ ,  $G(x,y)$  i  $B(x,y)$ , redom, odgovarajuće vrednosti intenziteta crvene, zelene i plave boje iz originalne slike.

Procena pozicije nivoa na slici može se dobiti odgovarajućom analizom polja gradijenata inteziteta piksela. Efikasan način za parcijalnu aproksimaciju 2D gradijenta (prvog izvoda), predstavlja tzv. *Sobel-Feldman* operator [8]. Ovaj operator podrazumeva diskretnu linearnu konvoluciju posebno konstruisane matrice  $K$  sa originalnim jednocanalnim prikazom slike  $Y$ . Odgovarajućom konstrukcijom matrice konvolucije mogu se dobiti horizontalni ( $x$ ) ili vertikalni ( $y$ ) gradijenti. Imajući u vidu da je linija nivoa na slikama vizuelno horizontalna karakteristika, adekvatna pretraga za njom podrazumeva određivanje polja apsolutnih vrednosti vertikalnih gradijenata:

$$G_y = |K_y * Y|, \quad (2)$$

gde je  $K_y$  je matrica konvolucije za gradijente u vertikalnom pravcu, čiji se koeficijenti određuju prema izrazu:

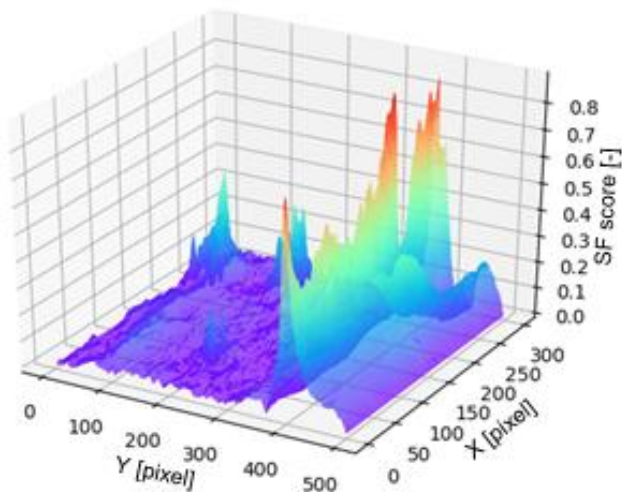
$$k_y(x, y) = \frac{\Delta y}{|\Delta x^2 + \Delta y^2|},$$

$$\Delta x = i - \frac{n_x + 1}{2}, \quad (3)$$

$$\Delta y = j - \frac{n_y + 1}{2},$$

gde su  $i$  i  $j$  indeksi u matrici  $K_y$ , a  $n_x$  i  $n_y$  širina i visina matrice koje moraju biti neparne. Iz izraza (3) zaključuje se da  $K_y$  u opštem slučaju može biti proizvoljnih dimenzija. Originalan pristup sa matricom dimenzija  $3 \times 3$  [8] nepogodan je iz razloga visoke osetljivosti na lokalne promene intenziteta, što dovodi do prekomernog broja lažnih detekcija nivoa. Kao iskustveno pravilo, dimenzije matrice trebalo bi da odgovaraju realnim dimenzijama od 2–3 cm u horizontalnom pravcu, dok je vertikalnom pravcu poželjno da dimenzija bude 2 do 3 puta veća kako bi se u što većoj meri smanjio broj lažnih detekcija, a prednost pri detekciji dala horizontalnim linijama [9].

Veličina matrice  $K$  jedini je kalibracioni parametar ove metode. Primer rezultata određivanja polja gradijenata dat je na Slici 4, gde vrednosti na  $z$  osi odgovaraju verovatnoći detekcije linije nivoa na datoj poziciji na slici.



Slika 4. Primer polja gradijenata u okolini nivoa vode [9]

Nakon određivanja polja gradijenata  $G_y$ , procena položaja nivoa vode na poziciji  $x$  na slici,  $W(x)$ , određuje se pretragom položaja maksimalnih vrednosti iz pojedinačnih kolona  $C$  iz  $G_y$ :

$$W(x) = \arg \max_{C \in G_y} (C(x)). \quad (4)$$

Kao merodavni nivo koristi se položaj linije nivoa najbliži samom rasteru  $R$ . U slučaju prisustva lažnih detekcija nakon primene izraza (4), kvalitet procene linije nivoa može se poboljšati naknadnim filtriranjem nekom od pogodnih metoda:  $3\sigma$  filter, *median* filter, Savitzky-Golay filter [9].

### 2.3. Opis eksperimenata

U ovom istraživanju obavljeno je 5 eksperimenata od kojih će u ovom radu biti prikazana 2 reprezentativna primera. U svim eksperimentima promene nivoa u vodostanu izazvane su naglim i potpunim zatvaranjem zatvarača nizvodno od vodostana. U dva opisana eksperimenta variran je početni nivo vode u vodostanu, regulacijom položaja dva zatvarača – neposredno uzvodno i nizvodno od položaja vodostana u sistemu.

## 3. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dva reprezentativna eksperimenta sa oscilacijama nivoa u vodostanu usled naglog i potpunog zatvaranja zatvarača neposredno nizvodno od vodostana.

Za potrebe ortorektifikacije korišćeno je 8 kontrolnih tačaka (Slika 3 desno), čiji je položaj na rasteru poznat. Njihova pozicija na slici određena je na osnovu proizvoljne slike iz video zapisa, uz opravdanu pretpostavku da su pomeranja same kamere u toku eksperimenta mala i da se mogu zanemariti. Homografska ortorektifikacija obavljena je metodom najmanjih kvadrata, uz naknadnu minimizaciju grešaka reprojeckije Levenberg-Marquardt metodom [15], čime je obezbeđeno da greška reprojeckije u zoni rastera bude manja od 2 piksela, odnosno 0,5 mm.

Senzori pritiska kalibrisani su za stanje kad je protok u sistemu jednak nuli, pri čemu je usvojeno da je kota nivoa u vodostanu  $Z_0 = 0$  cm. Oba senzora postavljena su tako da uvek budu ispod nivoa vode, i istovremeno sat vremena pre početka prvog eksperimenta uronjeni u vodu kako bi se omogućila adekvatna temperaturna kompenzacija.

Kalibracija ultrazvučnog senzora obavljena je merenjem tri poznata nivoa u vodostanu, na osnovu čega je određena brzina zvuka u vazduhu u toku eksperimenta, koja je iznosila 351,5 m/s.

Eksperiment 1 izveden je sa protokom od 5,5 L/s, pri čemu je uzvodni zatvarač bio delimično zatvoren, i oscilacije u vodostanu su značajno prigušene. Cilj eksperimenta 1 bio je upoređivanje nivoa šuma i tačnosti u uskom opsegu nivoa oko ravnotežnog položaja, primenom mernih metoda: (K) merenje kamerom uz obradu slika, (UZ) merenje nivoa ultrazvukom, (P1) merenje pritiska u osi vodostana, odnosno (P2) merenje pritiska uz zid vodostana.

Slika 5 prikazuje promene nivoa u vodostanu u toku prvog eksperimenta. Uočava se dobar trend svih zabeleženih nivoa u ovoj prikazanoj razmeri, sa manjim razlikama koje se primećuju tek u kasnijim periodama (4. perioda, nakon 100 s). Ultrazvučni senzor sadrži naj snažniji šum koji može biti naknadno filtriran, ali to u ovom radu nije primenjeno.

Slike 6 i 7 prikazuju zabeležene nivoe u toku prve i četvrte periode oscilacija. U ovoj razmeri uočljivije su razlike između rezultata pojedinačnih metoda, koje su u

granicama do 4 mm. Metoda detekcije nivoa tehnikama obrade slika sadrži najmanje šuma, i njeni rezultati adekvatno prate trend zabeležen pomoću ostalih metoda. Najveće razlike uočavaju se između rezultata dobijenih na osnovu dva senzora pritiska. Senzor P1, koji je pozicioniran na vertikalnoj osi vodostana, pokazuje veća odstupanja od rezultata ostalih metoda. Njegovo „ponašanje“ može se opravdati samom pozicijom – pošto se nalazi u osi vodostana, a samim tim iznad otvora prigušivača – podložniji je dejstvu dinamičkih pritiska od senzora P2, koji je pozicioniran uz zid. Ovaj efekat najizraženiji je prilikom faze pražnjenja vodostana, odnosno u okolini lokalnih minimalnih vrednosti nivoa. Ultrazvučni senzor pokazuje veće nivoe od ostalih metoda u toku čitavog eksperimenta, što se može pripisati visokoj osetljivosti samog senzora i njegovoj mernoj neizvesnosti. Poklapanje donje anvelope vrednosti koje beleži ultrazvučni senzor sa ostalim metodama bolje je od njegovog lokalnog preseka.

Kod svih razmatranih metoda uočava se trend povećanja šuma sa smanjivanjem amplitude oscilacija u toku kasnijih perioda eksperimenta (slike 6 i 7), tako da se odnos signala i šuma smanjuje. Međutim, metoda obrade slika manje je podložna ovom efektu, dok je kod ultrazvučnog senzora on najizraženiji.

Slika 8 prikazuje spektrograme rezultata iz različitih metoda merenja, dobijene na osnovu Furijeove analize diskretne vremenske serije prvog eksperimenta. Sve četiri razmatrane metode pokazuju dominantnu frekvenciju  $f = 0,0348$  Hz, odnosno prosečnu periodu oscilovanja od 28,75 s. Metoda merenja nivoa ultrazvukom prikazuje veće amplitude u posmatranom rasponu frekvencija, iako se dominantna frekvencija poklapa sa ostalim metodama.

Eksperiment 2 izveden je pri protoku od 10,3 L/s, pri čemu je uzvodni zatvarač bio potpuno otvoren. Cilj ovog eksperimenta je da se ispituju performanse razmatranih metoda pri većem opsegu oscilacija nivoa u vodostanu.

Slike 9–11 prikazuju, redom, zabeležene nivoe u toku celog drugog eksperimenta, u toku prve i četvrte periode. Rezultati drugog eksperimenta potvrđuju sve zaključke iz prvog. Iako sve merne metode prate globalni trend oscilacija nivoa u vodostanu, najveće razlike javljaju se između rezultata dobijenih na osnovu senzora pritiska i preostalih metoda. Posebno je značajno asimetrično odstupanje senzora pritiska od

ravnotežnog nivoa u vodostanu prikazano na slikama 7 i 11 – lokalni minimumi su izraženiji od neposrednih prethodnih lokalnih maksimuma. Ovaj fenomen može biti uzrokovan osetljivošću senzora pritiska na promene temperature vode u toku eksperimenta, izazvane odgovarajućim promenama temperature vazduha ili heterogenošću temperature vode u laboratorijskoj instalaciji tokom dugotrajnih eksperimenata. Slika 12 prikazuje spektrogram drugog eksperimenta, gde je uočljiva ista dominantna frekvencija kao u prvom ( $f = 0,0348$  Hz).

Tabele 1 i 2 prikazuju poređenje tačnosti razmatranih mernih metoda za nekoliko vremenskih preseka u toku eksperimenata. Odabrani trenuci u kojima se vrši poređenje su: (A) neposredno pre zatvaranja nizvodnog zatvarača, (B) prva pozitivna amplituda, (C) prva negativna amplituda, dok su slike (D), (E) i (F) odabrane nasumično za svaki eksperiment, pod uslovom da su zabeležene nakon trenutka (C). Greška čitanja određena je kao:

$$\varepsilon_i = \left| Z_i - Z_{ref} \right|, \quad (5)$$

gde je  $Z_i$  čitanje na osnovu razmatrane merne metode a  $Z_{ref}$  referentni rezultat merenja nivoa, određen vizuelno na osnovu odgovarajućih slika iz video zapisa.

Analiza tačnosti u tabelama 1 i 2 pokazuje da su metode obrade slika i merenja nivoa ultrazvukom višestruko tačnije od merenja pritiska. Rezultati metode obrade slika ukazuju i na sistematsku grešku od približno 0,2 cm koja bi se mogla ukloniti post-eksperimentalnom kalibracijom, ali to u ovom radu nije učinjeno kako bi se očuvala analitička nepristrasnost. Na osnovu rezultata, može se oceniti da neizvesnost određivanja nivoa pomoću metode obrade slika na primeru eksperimenta sa vodostanom iznosi  $\pm 0,2$  cm.

U tabeli 3 prikazani su i statistički pokazatelji tačnosti mernih metoda:  $R^2$ , i nagibi i odsečci regresionih pravih ( $Z_{ref} = a \times Z_i + b$ ) dobijenih u odnosu na referentne rezultate. Metoda obrade slika pokazuje najveću vrednost  $R^2$  u oba eksperimenta. Međutim, metoda merenja nivoa ultrazvukom prikazuje manje sistematske greške u odnosu na preostale metode, koje odražavaju  $a$  i  $b$  bliži referentnim vrednostima od 1 i 0, redom. Ova zapažanja ukazuju na dva važna zaključka u vezi metode obrade slika:

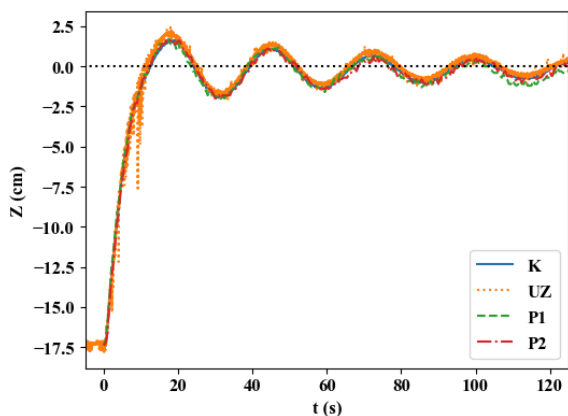
1. da je ona manje podložna slučajnim greškama od preostalih razmatranih metoda;



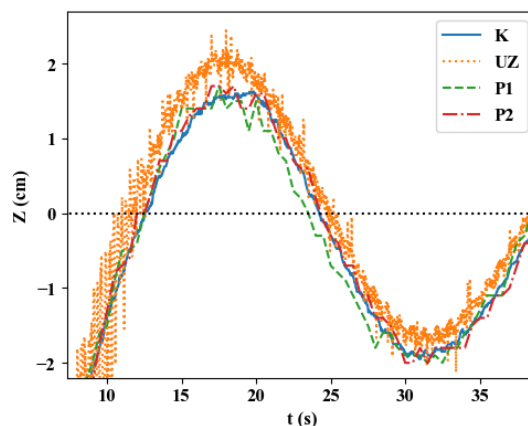
- da postoji prostor za smanjenje sistematskih grešaka koje mogu nastati bilo u procesu ortorektifikacije, bilo u procesu same detekcije nivoa.

Interesantan je i fenomen oscilovanja nagiba nivoa u samom vodostanu u trenucima naglih promena. Naime, validnost pretpostavke da je nivo u vodostanu u svakom trenutku horizontalan umanjuje se sa uvećanjem brzine promene nivoa. Međutim, usled niskog intenziteta šuma u vremenskoj seriji koja je dobijena na osnovu metode obrade slika, putem diskretne Furijeove analize moguće je odrediti frekvenciju ovih oscilacija u eksperimentima kao 1,223 i 1,221 Hz, redom, koje odgovaraju periodi oscilovanja od 0,82 s (Slika 13). Senzori pritiska, sa maksimalnom frekvencijom uzorkovanja od 2 Hz ne mogu detektovati oscilacije sa frekvencijom većom od polovine sopstvene frekvencije od 1 Hz, te nisu korišćeni u analizi ovog fenomena.

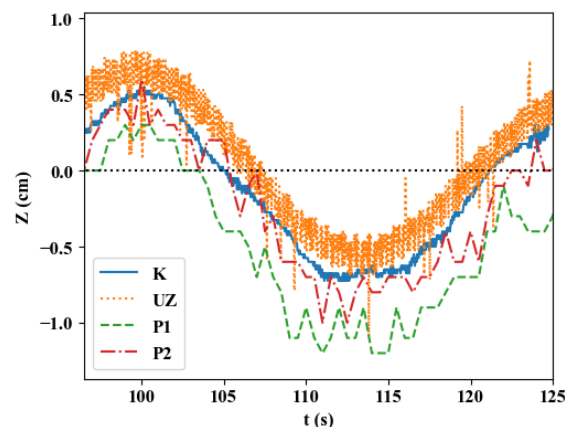
Treba napomenuti da predložena metodologija zahteva veću računarsku snagu i prostor za skladištenje podataka u odnosu na ostale pristupe. Dok se ultrazvučnim sensorima može upravljati čak i jednostavnim mikrokontrolerima, tehnologija obrade slika je znatno zahtevnija usled kompleksnosti geometrijskih transformacija u toku ortorektifikacije i kasnijeg određivanja i analize polja gradijenata. Međutim, ceo proces detekcije nivoa je efikasno automatizovan, uključujući i detekciju kontrolnih tačaka sa rastera za ortorektifikaciju [9], uz efikasnu paralelizaciju računskog procesa korišćenjem računara sa više procesorskih niti.



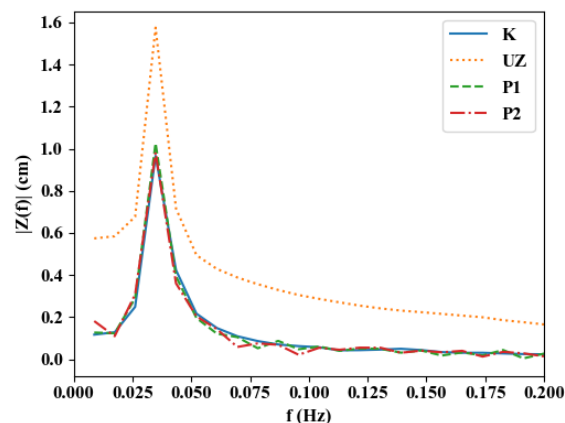
Slika 5. Zabeleženi nivoi u vodostanu u toku prvog eksperimenta



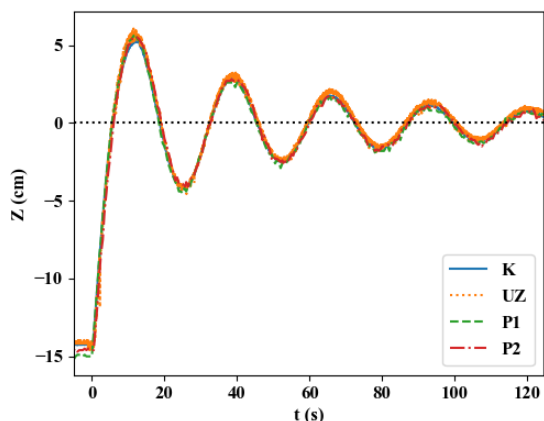
Slika 6. Zabeleženi nivoi u toku prve periode prvog eksperimenta



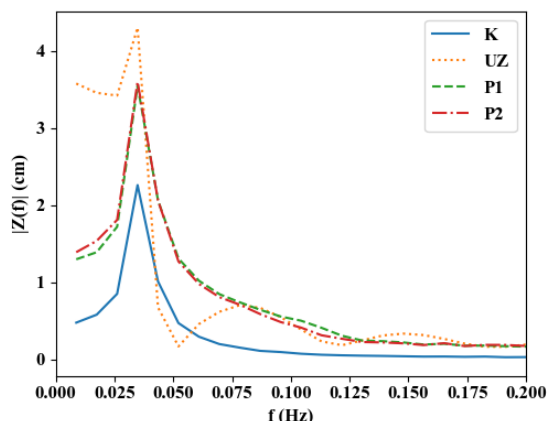
Slika 7. Zabeleženi nivoi u toku četvrte periode prvog eksperimenta



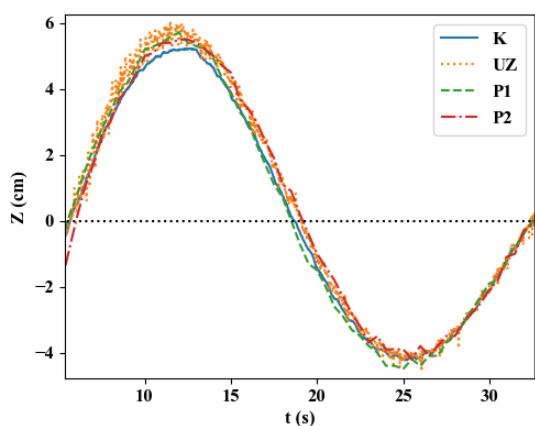
Slika 8. Spektrogrami prvog eksperimenta



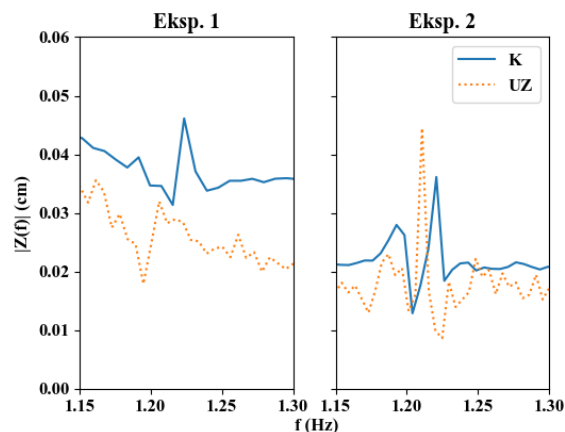
Slika 9. Zabeleženi nivoi u vodostanu u toku drugog eksperimenta



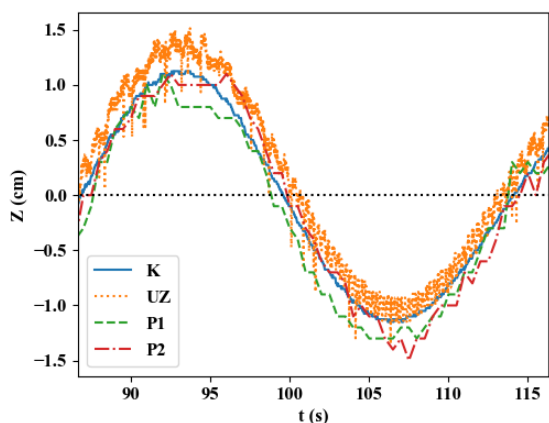
Slika 12. Spektrogrami drugog eksperimenta



Slika 10. Zabeleženi nivoi u toku prve periode drugog eksperimenta



Slika 13. Uočena frekvencija oscilovanja nagiba nivoa vode u vodostanu u oba eksperimenta



Slika 11. Zabeleženi nivoi u toku četvrtre periode drugog eksperimenta

#### 4. ZAKLJUČCI

Na osnovu istraživanja prikazanog u radu, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- metoda obrade slika je po tačnosti uporediva sa ostalim prikazanim (klasičnim) metodama merenja nivoa;
- u odnosu na razmatrane klasične metode, najmanje je osetljiva na promene spoljnih faktora kao što su temperatura, atmosferski pritisak, vlažnost vazduha, i dr.;

Tabela 1. Poređenje tačnosti izmerenih vrednosti u toku prvog eksperimenta

Slika	Vizuelno	Kamera K		Ultrazvuk UZ		Senzor pritiska P1		Senzor pritiska P2	
	$Z_{ref}$ (cm)	Z (cm)	$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> )	Z (cm)	$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> )	Z (cm)	$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> )	Z (cm)	$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> )
A	-17.40	-17.40	0.00	-17.40	0.00	-17.00	0.40	-17.40	0.00
B	1.80	1.60	0.20	1.80	0.00	1.40	0.40	1.50	0.30
C	-1.80	-1.90	0.10	-1.60	0.20	-1.80	0.00	-1.90	0.10
D	1.20	1.10	0.10	1.22	0.02	1.00	0.20	1.20	0.00
E	-1.10	-1.10	0.00	-1.06	0.04	-1.30	0.20	-1.20	0.10
F	0.20	0.00	0.20	0.19	0.01	-0.30	0.50	0.00	0.20
		$\Sigma$	<b>0.10</b>	$\Sigma$	<b>0.05</b>	$\Sigma$	<b>0.28</b>	$\Sigma$	<b>0.12</b>

Tabela 2. Poređenje tačnosti izmerenih vrednosti u toku drugog eksperimenta

Slika	Vizuelno	Kamera K		Ultrazvuk UZ		Senzor pritiska P1		Senzor pritiska P2	
	$Z_{ref}$ (cm)	Z (cm)	$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> )	Z (cm)	$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> )	Z (cm)	$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> )	Z (cm)	$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> )
A	-14.30	-14.25	0.05	-14.12	0.18	-14.70	0.40	-14.90	0.60
B	5.40	5.20	0.20	5.68	0.28	5.40	0.00	5.40	0.00
C	-4.00	-4.20	0.20	-4.02	0.02	-3.90	0.10	-4.40	0.40
D	2.60	2.40	0.20	2.43	0.17	2.40	0.20	2.20	0.40
E	-2.40	-2.45	0.05	-2.23	0.17	-2.30	0.10	-2.40	0.00
F	1.00	0.83	0.17	0.75	0.25	0.40	0.60	0.60	0.40
		$\Sigma$	<b>0.15</b>	$\Sigma$	<b>0.18</b>	$\Sigma$	<b>0.23</b>	$\Sigma$	<b>0.30</b>

Tabela 3. Statistički pokazatelji tačnosti mernih metoda, masnim brojevima označeni su najbolji rezultati u kolonama

Metoda	Prvi eksperiment			Drugi eksperiment		
	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$
K	<b>0.99991</b>	1.008	0.123	<b>0.99993</b>	1.013	0.155
UZ	0.99988	<b>0.999</b>	<b>-0.046</b>	0.99910	<b>1.006</b>	<b>-0.020</b>
P1	0.99956	1.041	0.272	0.99838	0.990	0.146
P2	0.99981	1.009	0.142	0.99926	0.978	0.250

- jednom određeni unutrašnji parametri konkretne kamere su invarijantni – potrebno ih je odrediti samo jednom, dok spoljni parametri ostaju konstantni ukoliko se položaj kamere ne menja;
- jedini kalibracioni parametar detekcije nivoa putem analize polja gradijenata su dimenzije matrice Sobel-Feldman operatora,  $K$ . Ovaj parametar ne zavisi od opsega merenja i brzine promene nivoa, kao ni osvetljenosti u toku eksperimenta, te se merenje na jednoj eksperimentalnoj instalaciji obavlja korišćenjem iste matrice  $K$ ;
- postoji prostor za unapređenje sistematskog odstupanja, koje može biti posledica ili postupka predprocesiranja, ili samog postupka detekcije nivoa kroz analizu polja gradijenata;
- predložena metoda zahtevnija je u pogledu računarskih resursa zbog kompleksnosti geometrijskih transformacija i analize gradijenata u velikom broju slika.



## 5. ZAHVALNICA

Ovo istraživanje podržano je od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kao deo projekata tehnološkog razvoja TR37010 i TR37009.

## LITERATURA

- [1] M. Mossa and U. Tolve, "Flow Visualization in Bubbly Two-Phase Hydraulic Jump," *J. Fluids Eng.*, vol. 120, no. 1, p. 160, 1998.
- [2] J. M. Lennon and D. F. Hill, "Particle Image Velocity Measurements of Undular and Hydraulic Jumps," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 132, no. 12, pp. 1283–1294, 2006.
- [3] D. B. Bung, "Non-intrusive detection of air–water surface roughness in self-aerated chute flows," *J. Hydraul. Res.*, vol. 51, no. 3, pp. 322–329, Jun. 2013.
- [4] J. D. Nóbrega, H. E. Schulz, and D. Z. Zhu, "Free surface detection in hydraulic jumps through image analysis and ultrasonic sensor measurements," *Hydraul. Struct. Soc. - Eng. challenges Extrem.*, no. June, pp. 1–8, 2014.
- [5] K. Viriyakijja and C. Chinnarasri, "Wave Flume Measurement Using Image Analysis," *Aquat. Procedia*, vol. 4, no. Icwrcoc, pp. 522–531, 2015.
- [6] S. B. Parasuraman, H. S. Eikaas, K. M. Tan, P. R. Predictive, and W. Quality, "Enhanced water-level detection by image processing," no. October 2015, 2012.
- [7] I. Hasan, T. Hies, E. Jose, R. Duester, M. Sattler, and M. Satzger, "An Effective Camera Based Water level recording Technology for Flood Monitoring," in *INTERPAEVENT*, 2016, pp. 290–295.
- [8] I. Sobel, "An Isotropic 3x3 Image Gradient Operator," no. February 2014. 2015.
- [9] R. Ljubičić, I. Vićanović, B. Zindović, R. Kapor, and L. Savić, "Image processing for hydraulic jump free-surface detection," in *38th IAHR World Congress*, 2019.
- [10] "Product User's Manual – HC-SR04 Ultrasonic Sensor," Johor, Malaysia., 2013.
- [11] MathWorks, "Camera Calibrator," 2019. .
- [12] E. Dubrofsky, "Homography Estimation," University of British Columbia, 2009.
- [13] C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images," in *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271)*, 1998, pp. 839–846.
- [14] IEC, "Amendment 1 Multimedia systems and equipment-Colour measurement and management-Part 2-1: Colour management-Default RGB colour space-sRGB," Geneva, Switzerland, 1999.
- [15] D. W. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, Jun. 1963.

## WATER LEVEL DETECTION IN LABORATORY TANKS USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

by

Dušan MARJANOVIĆ, Ivana VIĆANOVIĆ, Robert LJUBIČIĆ  
Budo ZINDOVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ

University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering

### Summary

Detecting and tracking water level in laboratory conditions using traditional measurement methods is hindered by various deficiencies: accuracy, sampling frequency, measuring inertia, and sensitivity to external conditions. To overcome the aforementioned shortcomings, an alternative method is proposed based on the image processing techniques using experimental video data. Aside from the description of methodology and its application on the experimental surge tank with rapid changes of water level, this paper also presents a comparison with two traditional measurement methods:

(1) ultrasonic distance measurement, and (2) pressure measurement. The paper demonstrates that the proposed image processing method is highly accurate, has lower signal noise and is less sensitive to external factors when compared to selected traditional methods. Hence, it can be used as an advanced alternative to classic laboratory measurement techniques.

Keywords: water level measurement, image processing techniques, surge tank, physical modeling

Redigovano 17.10.2019.