

JANOWSKI Artur¹
SZULWIC Jakub²

Monitoring wizyjny w systemach zabezpieczenia transportu wodnego. Koncepcja implementacyjna

WSTĘP

Skuteczna i szybka metoda pomiaru przepływu w kanale otwartym to narzędzie umożliwiające teledetekcyjne (bezkontaktowe) i fotogrametryczne (zgeometryzowane) uzyskanie wyników o wielkości przepływu powierzchniowego na otwartych akwenach. Implementacja tej metody może być wykorzystana w systemie bezpieczeństwa transportu wodnego oraz do monitorowania przepływu w pobliżu budowli hydrotechnicznych [6]. Najprostsze rozwiązanie ogranicza się do montażu dwóch skalibrowanych kamer lub aparatów cyfrowych, które w zadanych odstępach czasu rejestrują przepływającą ciecz (np. wodę, ścieki) w przestrzeni wyposażonej w georeferencje. Obrazy cyfrowe są transmitowane do autorskiego systemu fotogrametrycznego, w którym metodami z zakresu widzenia komputerowego i fotogrametrii następuje geometryzacja charakterystycznych obiektów na powierzchni wody (tzw. indykatorów przepływu). Połączenie czasu (epok obserwacyjnych) i współrzędnych uzyskanych dla kolejnych pozycji indykatorów przepływu pozwala na szybką i wystarczająco dokładną ocenę prędkości przepływu a przy znanej charakterystyce kanału otwartego (np. koryta rzeki).

Problematyka pomiaru prędkości i wielkości przepływu jest zagadnieniem szeroko rozważanym w hydrotechnice i ma znaczenie dla oceny warunków oraz bezpieczeństwa transportu wodnego.

Wśród metod pomiaru prędkości przepływu stosowanych w kanałach otwartych znajdują się:

- metoda prędkość-powierzchnia (przy wykorzystaniu młynka hydrometrycznego lub pływaka)
- metoda spadek-powierzchnia,
- metoda rozcieńczenia wskaźnika,
- metody hydrauliczne (spiętrzeniowe i zwężkowe),
- metody ultradźwiękowe,
- metody optyczne (z wykorzystaniem laserowej anemometrii dopplerowskiej lub PIV tj. *Particle Image Velocimetry*),
- metody elektromagnetyczne [4].

Metoda pomiaru przepływu w kanałach otwartych jest zaliczana do metod typu prędkość-powierzchnia. Natomiast metody optyczne opierają się na wykorzystaniu pomiarów laserowych lub rejestracji jednoobrazowych w płaszczyźnie obserwacji. Dodatkowo analiza literatury wskazuje, że techniki obrazowe (zdjęcia i wideo) zyskują na popularności i jakości w analizach przepływu, a nawet modelowania hydraulicznego [5, 8]. Niektóre badania wykazują jednak, że LSPIV (*Large-Scale Particle Image Velocimetry*) ma niski potencjał do pomiaru prędkości [3].

Te dwie metody – typu prędkość-powierzchnia i optyczna – są najbliższe rozwiązaniu zaproponowanemu w artykule. Autorzy wskazują jednak na nowe podejście łączące zdjęcia synchroniczne z metodami fotogrametrii bliskiego zasięgu.

1 PRZEDSTAWIENIE ISTOTY ROZWIĄZANIA

U podstaw problemu leży fakt zmienność położenia elementów na powierzchni cieczy przepływającej przez kanał. Dlatego użycie tradycyjnych metod geodezyjnych (np. skaning laserowy,

¹ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Instytut Geodezji, ul. Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn, e-mail artur.janowski@geodezja.pl

² Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geodezji, ul. Narutowicza 11/12, 80-225 Gdańsk, tel. 58 347 10 12, e-mail jakub.szulwic@geodezja.pl

niesynchroniczna fotogrametria dwuobrazowa, pomiary z użyciem tachimetrów) nie umożliwia dokonania pomiaru położenia punktów na powierzchni ruchomej cieczy. Powodem jest oczywista zmiana położenia mierzonych punktów w czasie wykonywania czynności pomiarowych w ramach pojedynczej epoki.

Metoda prędkość-powierzchnia z wykorzystaniem pływaków przyjmowana jest jako prosta do realizacji i podająca orientacyjne wielkości przepływów. Jednocześnie jest dotychczas przyjmowana jako metoda mniej dokładna w odniesieniu do innych metod pomiaru wielkości przepływów w kanałach otwartych.

W ocenie tej mają znaczenie dwa zasadnicze powody:

1. konstrukcja pływaków, które zasadniczo zawsze podążają za przepływem a nie odwzorowują jego maksymalnej tj. rzeczywistej wartości
2. metoda pomiaru położenia pływaków oparta na pomiarze czasu, w jakim pływak przebywa określony odcinek.

Autorzy skupiają się zatem na zmniejszeniu wpływu drugiego ograniczenia zastosowania metody pływakowej. Wskazują na możliwość użycia synchronicznych aparatów cyfrowych w połączeniu z metodami geometryzacji obrazów z wykorzystaniem metod fotogrametrii bliskiego zasięgu (opracowania stereoskopowe i modelowanie przestrzenne, widzenie komputerowe).

Konstrukcja systemu rejestracyjno-pomiarowego składa się z przynajmniej dwóch aparatów/kamer cyfrowych (przy zaleceniu użycia obiektywów ze stałą ogniskową), urządzenia synchronizacyjnego (dedykowane lub seryjne zapewniające synchronizację jednoczesnego wykonania zdjęć z kamer na poziomie dedykowanym dla danej prędkości przepływu cieczy i oczekiwanej dokładności pomiaru - wg tabeli 1) i systemu transferu danych. Pomiar opiera się na użyciu metod fotogrametrii cyfrowej (z użyciem dedykowanego lub specjalistycznego oprogramowania fotogrametrycznego do opracowania niometrycznych zdjęć cyfrowych) albo z odwołaniem się do metod widzenia komputerowego. Pomiar punktów odniesienia w terenie (długości terenowych bądź określenia współrzędnych terenowych co najmniej dwóch punktów lub co najmniej trzech punktów, jeśli model ma zostać nie tylko wyskalowany, ale spoziomowany i zorientowany do układu terenowego) wykonywany jest standardowo metodami geodezyjnymi.

Dlatego użycie synchronicznych kamer lub aparatów fotograficznych pozwala na rejestrację położenia obserwowanych punktów na powierzchni cieczy (sygnalizowanych naturalnie - przez elementy na powierzchni cieczy lub sztucznie - w postaci pływaków) równocześnie na co najmniej dwóch urządzeniach fotorejestracyjnych (aparaty, kamery). Taki sposób rejestracji umożliwia zastosowanie metod fotogrametrycznych do pomiaru położenia pomierzonych punktów i uzyskiwanie współrzędnych XYZ w układzie przyjętych odniesień przestrzennych.

Układ odniesień przestrzennych jest realizowany lokalnie (np. układ współrzędnych lewej, pierwszej kamery albo układ wyznaczany przez kształt kanału) lub przez odniesienie zewnętrzne (pomiar fotopunktów w układzie terenowym z użyciem pozycjonowania satelitarnego, pomiarów tachimetrem elektronicznym lub skanowania laserowego). Tak powstaje rejestracja z pojedynczej epoki obserwacyjnej, dla której można opracować model przestrzenny, czyli tzw. 3D (wyznaczyć współrzędne XYZ indykatorów).

Następnie wykonywana jest kolejna para/triplet/komplet zdjęć synchronicznych w ustalonym interwale czasowym. Każdy komplet synchroniczny jest odnoszony do tego samego układu współrzędnych, co uzyskuje się albo przez ustawienie aparatów na stabilnych statywach, albo przez dowiązanie do przynajmniej trzech, a optymalnie czterech fotopunktów o znanych współrzędnych XYZ (ewentualnie przy wykorzystaniu państwowego systemu odniesień przestrzennych [6] jako XYH). Analiza położenia indykatorów prędkości przepływu na każdym modelu 3D z danej epoki pomiarowej pozwala wyliczyć prędkość poruszania się indykatora i stąd wykonanie szacunku wielkości przepływu.

Dokładność rejestracji zjawiska przepływu jest zależna od dokładności i skuteczności synchronicznego wykonania zdjęć i została zestawiona w tabeli 1. Założono, że prędkość przepływu nie przekracza 10m/s (36km/h), aczkolwiek nie są to wartości graniczne, dla których metoda może mieć zastosowanie.



Tab. 1. Dobór optymalnej wartości czasu synchronizacji kamer/aparatów (podanej w sekundach) dla uzyskania dokładności przepływu cieczy o określonej prędkości przepływu

| prędkość przepływu | | oczekiwana dokładność pozycjonowania [m] | | | | |
|--------------------|------|--|--------|--------|--------|---------|
| km/h | m/s | 0,001 | 0,01 | 0,1 | 0,5 | 1 |
| 0,4 | 0,1 | 0,0100 | 0,1000 | 1,0000 | 5,0000 | 10,0000 |
| 1,8 | 0,5 | 0,0020 | 0,0200 | 0,2000 | 1,0000 | 2,0000 |
| 3,6 | 1,0 | 0,0010 | 0,0100 | 0,1000 | 0,5000 | 1,0000 |
| 5,4 | 1,5 | 0,0007 | 0,0067 | 0,0667 | 0,3333 | 0,6667 |
| 7,2 | 2,0 | 0,0005 | 0,0050 | 0,0500 | 0,2500 | 0,5000 |
| 9,0 | 2,5 | 0,0004 | 0,0040 | 0,0400 | 0,2000 | 0,4000 |
| 10,8 | 3,0 | 0,0003 | 0,0033 | 0,0333 | 0,1667 | 0,3333 |
| 12,6 | 3,5 | 0,0003 | 0,0029 | 0,0286 | 0,1429 | 0,2857 |
| 14,4 | 4,0 | 0,0003 | 0,0025 | 0,0250 | 0,1250 | 0,2500 |
| 16,2 | 4,5 | 0,0002 | 0,0022 | 0,0222 | 0,1111 | 0,2222 |
| 18,0 | 5,0 | 0,0002 | 0,0020 | 0,0200 | 0,1000 | 0,2000 |
| 19,8 | 5,5 | 0,0002 | 0,0018 | 0,0182 | 0,0909 | 0,1818 |
| 21,6 | 6,0 | 0,0002 | 0,0017 | 0,0167 | 0,0833 | 0,1667 |
| 23,4 | 6,5 | 0,0002 | 0,0015 | 0,0154 | 0,0769 | 0,1538 |
| 25,2 | 7,0 | 0,0001 | 0,0014 | 0,0143 | 0,0714 | 0,1429 |
| 27,0 | 7,5 | 0,0001 | 0,0013 | 0,0133 | 0,0667 | 0,1333 |
| 28,8 | 8,0 | 0,0001 | 0,0013 | 0,0125 | 0,0625 | 0,1250 |
| 30,6 | 8,5 | 0,0001 | 0,0012 | 0,0118 | 0,0588 | 0,1176 |
| 32,4 | 9,0 | 0,0001 | 0,0011 | 0,0111 | 0,0556 | 0,1111 |
| 34,2 | 9,5 | 0,0001 | 0,0011 | 0,0105 | 0,0526 | 0,1053 |
| 36,0 | 10,0 | 0,0001 | 0,0010 | 0,0100 | 0,0500 | 0,1000 |

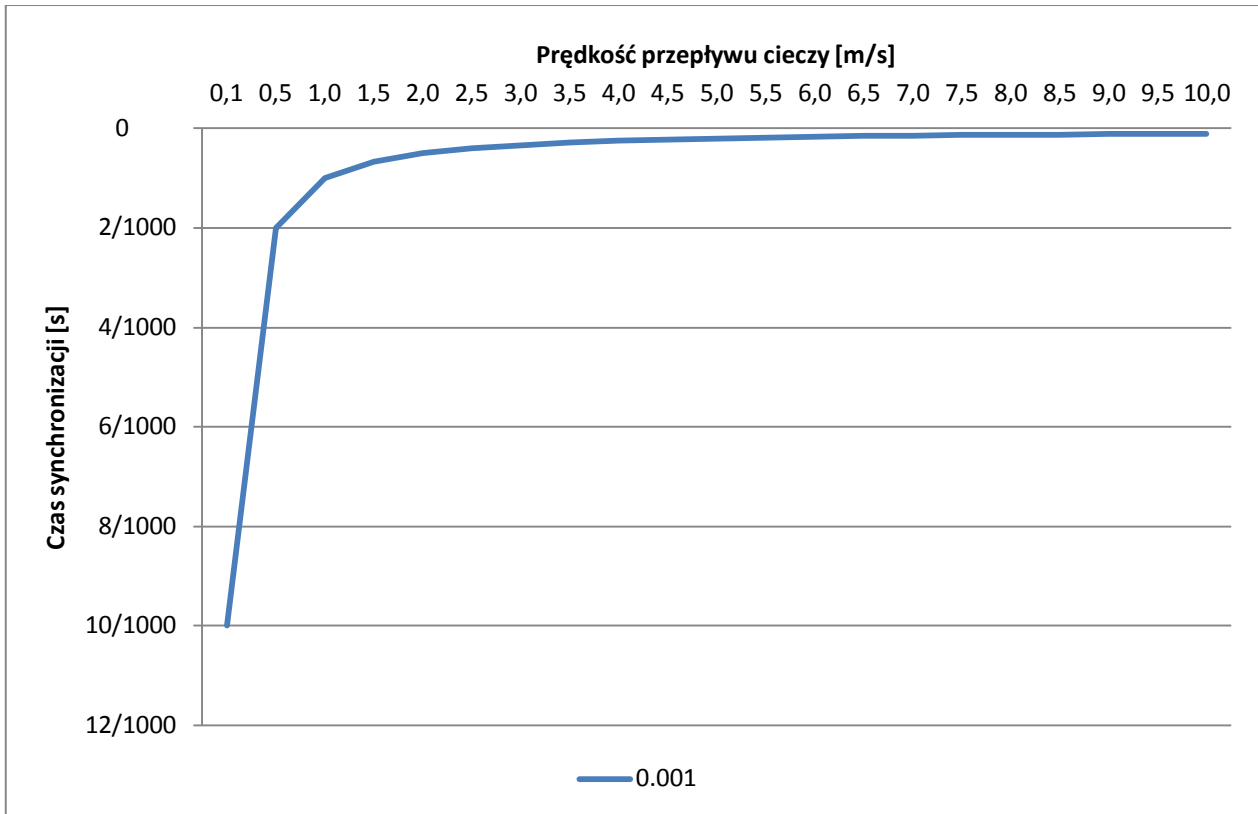
Poniższe wykresy przedstawiają dobór czasu synchronizacji kamer w zależności od oczekiwanej dokładności wyznaczenia terenowych współrzędnych lub odległości określającej położenie indykatorów przepływu w epokach obserwacyjnych. Im większa prędkość przepływu cieczy tym dla zachowania zadanej dokładności pomiaru musi zostać zachowana niższa wartość czasu synchronizacji kamer.

W zaleceniu wynikającym z przeprowadzonych badań i doświadczenia należy wskazać, że:

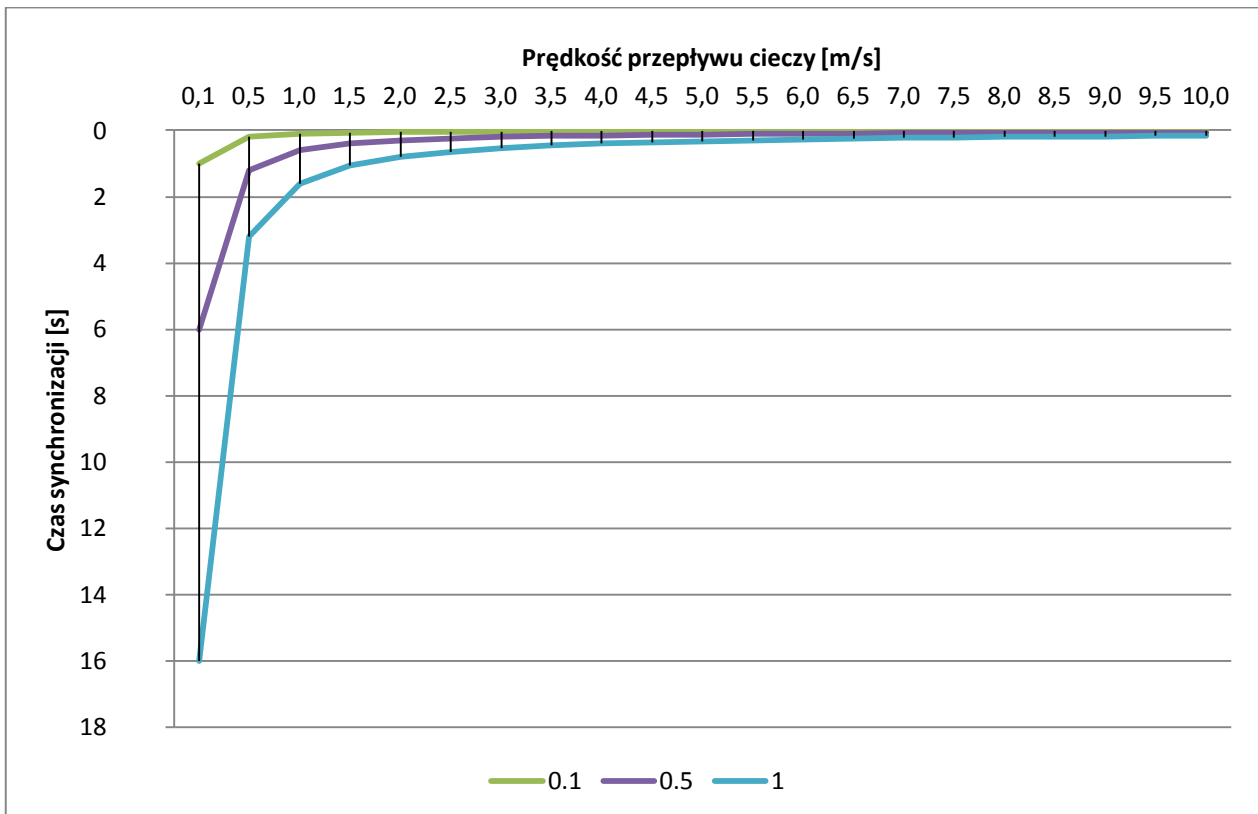
1. czas otwarcia migawki powinien być nie dłuższy niż 1/4 wartości czasu synchronizacji. Dodatkowo warto, by w zasięgu rejestracji znajdowało się urządzenie, które wskaże ewentualne niedokładności synchronizacji (np. stoper wielkości możliwej do zarejestrowania na zdjęciu i ze skokiem czasu mniejszym niż wartość czasu synchronizacji).
2. Przesłona obiektywu powinna być jak największa (np. f/11), by ograniczyć wpływ błędów geometrycznych obiektywów na opracowanie wyników.
3. Wskazane jest, by aparaty niemetryczne były tego samego typu i zostały skalibrowane wcześniej na polu testowym lub przeprowadzona została kalibracja *on-the-job* (możliwa np. przy użyciu łączenia wskazanej metody ze skanowaniem laserowym).

W rozwiązaniu można stosować kamery przemysłowe oraz zestawy w kanonicznym układzie kamer (równoległe osie obiektywów, identyczne ogniskowe kamer), jednak metoda nie narzuca takich rozwiązań.

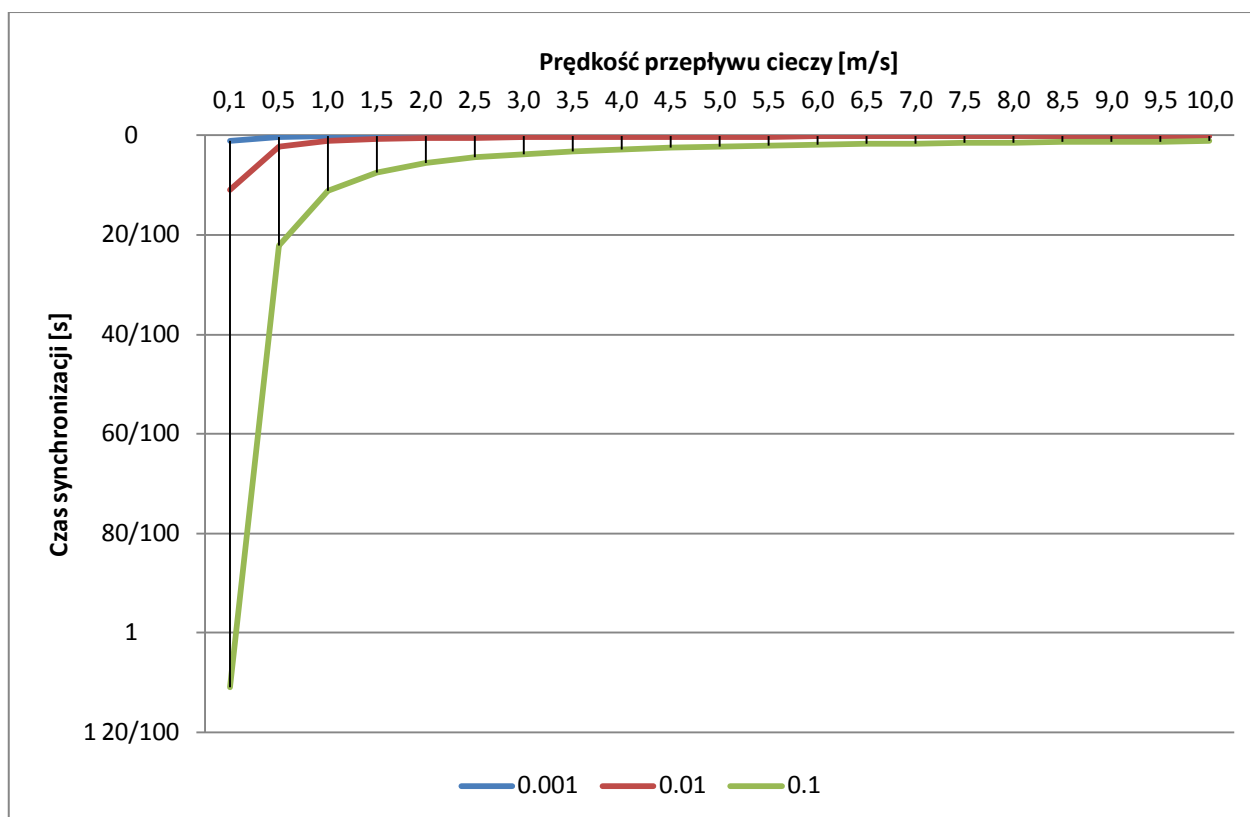




Rys. 1. Przepisanie czasu synchronizacji do prędkości przepływu cieczy dla dokładności pomiaru 0,001 m



Rys. 2. Przepisanie czasu synchronizacji do prędkości przepływu cieczy dla dokładności pomiaru 0,1; 0,5 i 1,0 m.



Rys. 3. Przypisanie czasu synchronizacji do prędkości przepływu cieczy dla dokładności pomiaru 0,001; 0,01 i 0,1 m.

2 PRZEDSTAWIENIE KORZYŚCI WYNIKAJĄCYCH ZE STOSOWANIA ROZWIĄZANIA

Problem pomiaru prędkości cieczy w kanałach otwartych jest zagadnieniem ważnym dla obliczenia wielkości przepływów.

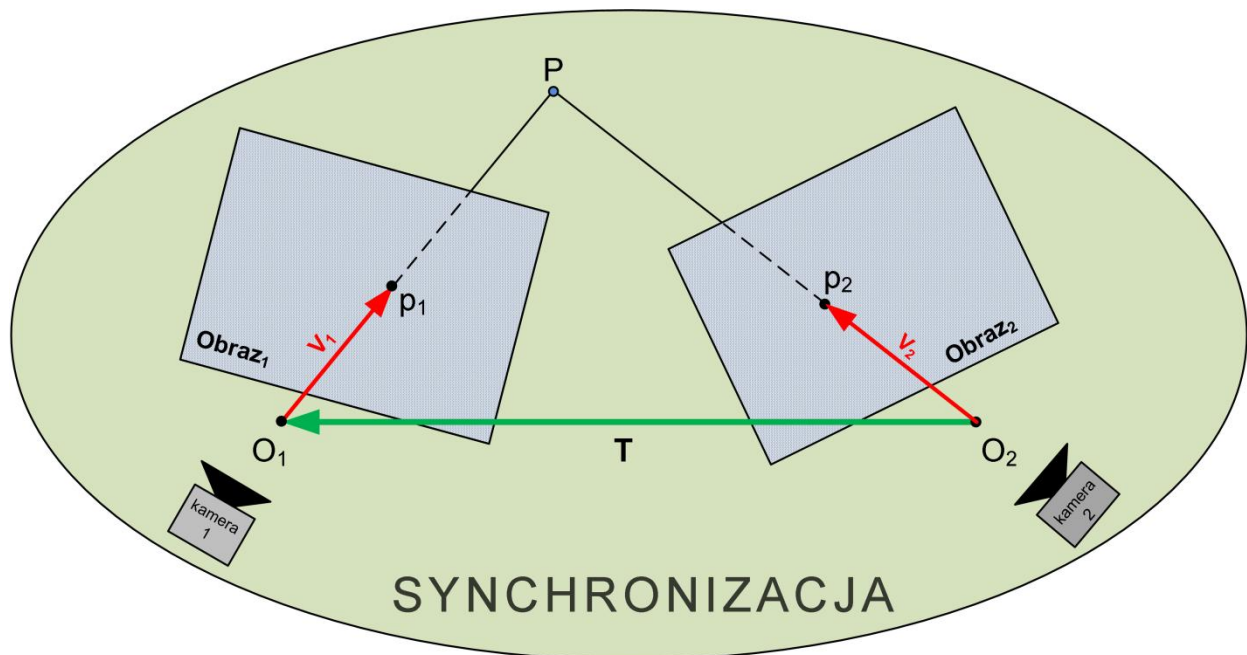
Przedstawiona metoda daje wysokie dokładności wyznaczenia prędkości poruszania się indykatorów przepływu na powierzchni cieczy. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że stosowanie przedstawionej metody w celu uzyskania wyników natężenia przepływu w danym kanale otwartym na poziomie szacunku lepszym niż 5% błędu wymaga wzorcowania z użyciem pływaków dedykowanych do danego zjawiska przepływu. Wiąże się to z analizą krzywych rozkładu prędkości w pionie hydrometrycznym (tachoida).

Przez kanał otwarty można rozumieć zarówno otwarte koryta rzek i kanałów, jak i każdy przewód ze swobodną powierzchnią cieczy. W kontekście zastosowania opisanej metody pojęcie kanału otwartego może być rozszerzone na wody uwolnione w wyniku awarii urządzeń hydrotechnicznych i wody powodziowe. Właśnie w przypadku konieczności szybkiego pomiaru prędkości lub szacowania natężenia przepływu przedstawiona metoda wydaje się szczególnie korzystna.

Dodatkowo metoda ta nadaje się do pomiaru wód wzburzonych, wodospadów i przepływu na progach zwalniających, ponieważ do wyznaczenia prędkości używa się wartości związanych z wektorem przemieszczenia się obiektu (indykatora) w czasie w przestrzeni 3D (współrzędne indykatorów podawane są w wartości XYZ).

Nie bez znaczenia pozostaje sposób opracowania wyników. Zasadniczo można stosować rozwiązania fotogrametryczne i dokonywać pomiarów z wykorzystaniem tradycyjnych programów fotogrametrii cyfrowej. W rozwiązaniach dotyczących zabezpieczenia transportowego oczekiwane jest jednak skierowanie rozwiązania na użycie metod *Computer Vision* (CV, widzenie komputerowe) ze względu na podwyższoną automatykę opracowania numerycznego pomiaru i zmniejszony tym samym czas otrzymania miarodajnego wyniku obserwacji.





Rys. 4. Geometryczna realizacja rejestracji stereoskopowej.

Zastosowanie tradycyjnych metod fotogrametrycznych może służyć do porównania wielkości przepływów na podstawie prac kameralnych wykonywanych poza miejscem badań. Obliczenia te cechują się najwyższą precyzją pomiarową i technologia pozwala na uzyskanie dokładności nawet subpikselowych (w odniesieniu do wielkości danego piksela ze zdjęcia w terenie; problem rozdzielczości terenowej autorzy poruszyli w [1]). Natomiast odwołanie się do technologii widzenia komputerowego może powodować uzyskiwanie wyników pomiarów o mniejszej dokładności (pikselowej), ale umożliwia rozpoznawanie indykatorów przepływu już na miejscu pomiaru oraz uzyskiwania prędkości i wartości przepływu w trybie on-line.

Podczas wykonywania zdjęć stereoskopowych (wg schematu na rysunku 4) dwie kamery rejestrują na swoich płaszczyznach obrazowych ten sam punkt terenowy P. Są to odpowiednio dla kamery1 (ze środkiem rzutów w O1) i kamery2 (ze środkiem rzutów w O2) punkty p1 i p2. Łącząc otrzymane obrazy punktów ze środkami rzutów kamer, które je zarejestrowały, można wskazać wektory V1 i V2. Natomiast przesunięcie środka kamery2 O2 względem środka kamery1 O1 jest wektorem T.

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Układ tych trzech wektorów podczas realizacji synchronicznej ekspozycji dla dwóch kamer leży w jednej płaszczyźnie. Stąd realizacja odtworzenia modelu 3D z wykonanych zdjęć stereoskopowym wykorzystuje podstawowe w CV założenie komplanarności wektorów, co można zapisać za pomocą iloczynu mieszanego:

$$V_1 \cdot (T \times V_2) = 0. \quad (2)$$

Dalsze obliczenia sprowadzają się do standardowego zastosowania algorytmów dla dwóch lub więcej kamer. Założenia teoretyczne i aplikacja informatyczna została przedstawione przez autorów w [2].

WNIOSKI

Przedstawione założenia do systemu monitorowania pomiaru prędkości cieczy i pomiaru przepływów w kanałach otwartych mogą znaleźć zastosowanie w systemach zabezpieczenia transportu wodnego. Miejsca szczególnie ważne i wymagające monitoringu w opisanej technologii to obszary rzek przy zaporach wodnych, miejsca narażone na spiętrzenia oraz ujścia rzek zagrożone cofaniem się wody z akwenów morskich. Ze względu na niskie koszty i łatwość montażu systemu



można go wykorzystać także w okolicy wałów przeciwpowodziowych zagrożonych uszkodzeniem (zerwanie wału lub przelanie wody). W każdym przypadku wyniki pomiarów mogą być upubliczniane z wykorzystaniem sieci internetowej lub tablic informacyjnych. Ponieważ obliczenia mogą być realizowane w trybie on-line i bez udziału człowieka, dlatego rozwiązanie takie może być systemem alarmowym. W każdym z tych przypadków działania systemu przekłada się na bezpieczeństwo żeglugi oraz skuteczność wodnych systemów transportowych. Atutem rozwiązania jest podawanie współrzędnych przestrzennych, przez co monitorowany może być poziom wody i zmiana objętości przepływu.

Streszczenie

W artykule autorzy przedstawiają koncepcję zastosowania własnych badań nad pomiarem prędkości przepływu cieczy do zastosowań praktycznych w pomiarach przepływu wody w kanałach otwartych i rzekach. Jako narzędzie pomiarowe wykorzystują zestaw aparatów synchronicznych, które rejestrują indykatory przepływu znajdujące się na powierzchni analizowanej cieczy. Aparat matematyczny przedstawiony w rozwiązaniu sprowadza się do stosowania metod stereowizji i rozwiązań fotogrametrii cyfrowej lub – w zależności od wymaganej szybkości i dokładności co do uzyskanych wyników – rozwiązań computer vision.

Skuteczna i szybka metoda pomiaru przepływu w kanale otwartym to narzędzie umożliwiające teledetekcyjne (bezkontaktowe) i fotogrametryczne (zgeometryzowane) uzyskanie wyników o wielkości przepływu powierzchniowego na otwartych akwenach. Implementacja tej metody może być wykorzystana w systemie bezpieczeństwa transportu wodnego oraz do monitorowania przepływu w pobliżu budowli hydrotechnicznych. Ze względu na niskie koszty i łatwość montażu systemu można go wykorzystać także w okolicy wałów przeciwpowodziowych zagrożonych uszkodzeniem (zerwanie wału lub przelanie wody). Atutem rozwiązania jest podawanie współrzędnych przestrzennych, przez co monitorowany może być poziom wody i zmiana objętości przepływu.

The image monitoring system for water transport system. Concept, implementation

Abstract

In the paper the authors present a concept of the use of their own research on the measurement of the liquid flow rate for practical use in measurements of water flow in open channels and rivers. As a measurement tool they use a set of synchronous devices that record the flow indicators located on the surface of the analyzed liquid. Mathematical apparatus presented in the solution boils down to the use of stereovision methods and solutions of digital photogrammetry or - depending on the required speed and accuracy concerning the results - computer vision solutions.

Efficient and fast method of flow measurement in an open channel is a tool for remote sensing (non-contact) and photogrammetric (geometrical) achievement of surface size flow results on open water regions. The implementation of this method can be used in the system of water transport safety and to monitor the flow in the vicinity of hydraulic structures. Due to low costs and ease of system installation, it can be used also in the area of levees at risk of damage (broken levee or water overflow). An advantage of this solution is the pass of spatial coordinates, which makes it possible to monitor the water level and flow rate changes.

BIBLIOGRAFIA

1. Janowski A., Misiun C., Szulwic J.: Jakościowa analiza wykorzystania cyfrowej lotniczej kamery fotogrametrycznej w systemach informacji przestrzennej. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, tom 114 Konferencje nr 45, s. 161-168, ISSN 0324-9670, 2005.
2. Janowski A., Szulwic J.: Synchronic digital stereophotography and photogrammetric analyses in monitoring the flow of liquids in open channels. International Conference "Environmental Engineering" (9th ICEE), Selected Papers. eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-457-640-9, Vilnius Gediminas Technical University, Litwa, 2014. DOI: 10.3846/enviro.2014.079
3. Kantoush S.A., De Cesare G., Boillat J.L., Schleiss A.J.: Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling. Flow Measurement and Instrumentation, t. 19, cz. 3-4, lipiec-sierpień 2008, s. 139-144, ISUD 5: The 5th International



- Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 2008. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2007.09.005
4. Michalski A.: Pomiary przepływu wody w kanałach otwartych. Warszawa: Politechnika Warszawska. ISBN 83-7207-466-6, 2004.
 5. Muste M., Xiong Z., Schöne J., Li Z.: Validation and Extension of Image Velocimetry Capabilities for Flow Diagnostics in Hydraulic Modeling. *J. Hydraul. Eng.*, t. 130(3), s. 175–185, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(175)
 6. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie, Dz.U. 2007 nr 86 poz. 579, 2007.
 7. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych, Dz.U. 2012 poz. 1247, 2012.
 8. Szymkiewicz R.: Numerical modeling in open channel hydraulics. *Water Science and Technology Library*, tom 83, ISBN: 978-90-481-3674-2, 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-3674-2.