

AUTOREFERAT

**przedstawiający dorobek i osiągnięcie naukowe, w szczególności
określone w art. 16 ust. 2 Ustawy**

dr inż. Piotr Gołuch

Institut Geodezji i Geoinformatyki
Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław
piotr.goluch@upwr.edu.pl

Wrocław, 2019



1. Imię i nazwisko

Piotr Gołuch

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- **Stopień naukowy doktora nauk technicznych** w zakresie geodezji i kartografii, specjalność fotogrametria i teledetekcja, nadany 3 grudnia 2002 r. przez Radę Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej we Wrocławiu.

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Generowanie numerycznego modelu terenu dla symulacji przepływu wody w dolinie rzeki.*

Promotorem w przewodzie doktorskim był: dr hab. inż. Andrzej Świątkiewicz, prof. nadzw.

Recenzentami w przewodzie doktorskim byli:

- 1) Prof. dr hab. inż. Andrzej Majde (Politechnika Śląska w Gliwicach)
- 2) Prof. dr hab. inż. Romuald Kaczyński (Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie)
- 3) Prof. dr hab. inż. Laura Radczuk (Akademia Rolnicza we Wrocławiu)

- **Tytuł zawodowy magister inżynier** geodezji, uzyskany po złożeniu egzaminu i obronie dyplomowej pracy magisterskiej w dniu 12 lipca 1990 r. na Wydziale Melioracji Wodnych, oddział Geodezji Urzędzeń Rolnych Akademii Rolniczej we Wrocławiu; studia ukończone z wynikiem bardzo dobrym.

Tytuł pracy magisterskiej: *Teledetekcyjne badanie powierzchniowego uwilgotnienia gleb z zastosowaniem numerycznej transformacji zdjęć lotniczych.*

Promotor pracy magisterskiej: dr inż. Andrzej Świątkiewicz

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Uczelnia: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
(do 2006 r. Akademia Rolnicza we Wrocławiu)

- 1990 – 1991 asystent stażysta
- 1991 – 1999 asystent
- 1999 – 2002 wykładowca
- 2003 – do chwili obecnej adiunkt

Wydział: Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji
(od 1991 r. do 2000 r. Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska
do 1991 r. Wydział Melioracji Wodnych)

Jednostka organizacyjna: Instytut Geodezji i Geoinformatyki
(do 2006 r. Katedra Geodezji i Fotogrametrii)

- Dodatkowo w okresie od styczeń 1993 r. do grudnia 1994 r. byłem zatrudniony w Instytucie Geodezji i Fotogrametrii Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie na stanowisku asystenta naukowego (w wymiarze 3/4 etatu) w projekcie badawczym 6010.917.

P. Gołuch

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

„Zastosowanie fotogrametrii jednoobrazowej w precyzyjnych pomiarach 3D wzajemnego położenia elementów monitorowanego obiektu”

b) Publikacja stanowiąca osiągnięcie naukowe (autor, rok wydania, tytuł publikacji, nazwa wydawnictwa, recenzent wydawniczy)

Jako osiągnięcie naukowe stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej wskazuję monografię naukową (dzieło opublikowane w całości):

Gołuch Piotr, 2019. *Zastosowanie fotogrametrii jednoobrazowej w precyzyjnych pomiarach 3D wzajemnego położenia elementów monitorowanego obiektu*. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Monografie CCXX, stron: 208, ISBN 978-83-7717-311-4, DOI: 10.30825/1.9.2019.

Recenzent wydawniczy: Prof. dr hab. inż. Edward Osada (Dolnośląska Szkoła Wyższa, Wrocław)

c) Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wprowadzenie

Z geometrii rzutowej oraz znanych fotogrametrycznych zasad wiemy [Butowtt i Kaczyński 2003; Kurczyński 2014; Kraus 2007; Piasecki 1973; Sitek 1991; Świątkiewicz 1983], że jednemu punktowi na zdjęciu może odpowiadać nieskończenie wiele punktów terenowych. Wiemy również, że nie ma możliwości zrekonstruowania obiektu przestrzennego na podstawie tylko jednego zdjęcia. W celu wyznaczenia przestrzennego położenia punktów na obiekcie wykonujemy pomiary fotogrametryczne na co najmniej dwóch, odpowiednio wykonanych zdjęciach, czyli na stereogramie.

Z zasad geometrii rzutowej wiemy także, na co w swojej pracy zwrócili uwagę Luhmann et al. [2011], że pozyskanie trójwymiarowej informacji o obiekcie pomiarowym z pojedynczego obrazu jest możliwe tylko wtedy, gdy dostępne są dodatkowe informacje geometryczne o tym obiekcie. Jednym z takich przykładów jest przetwarzanie terenowego obiektu płaskiego po zdefiniowaniu płaszczyzny na zarejestrowanym obrazie tego obiektu (metoda płaskich przekształceń rzutowych). Innym przykładem może być sytuacja, gdy znane są orientacje wewnętrzna oraz zewnętrzna pojedynczego zdjęcia i posiadamy zbudowany model geometryczny powierzchni mierzonego obiektu. W takim przypadku punkt przecięcia promienia rzutującego z modelem obiektu pozwala wyznaczyć szukane współrzędne 3D mierzonego obiektu.

W pracy została zaprezentowana metoda określenia wzajemnego przestrzennego położenia elementów mierzonego obiektu na podstawie pomiarów fotogrametrycznych przeprowadzonych tylko na jednym zdjęciu tego obiektu. Jest to zagadnienie możliwe do zrealizowania przy spełnieniu odpowiednich warunków. Na podstawie pomiarów wykonanych na jednym zdjęciu możliwe jest wyznaczenie wzajemnego przestrzennego zachowania się, tj. przesunięcia w trzech kierunkach: X , Y i Z , jak również wyznaczenia kątów obrotów:

ω (omega), φ (fi) i κ (kappa) całego monitorowanego obiektu, ale również wyodrębnionych jego elementów. Zaprezentowana w pracy autorska metoda pomiarów fotogrametrycznych i prototyp urządzenia, nazwanego „szczelinomierzem fotogrametrycznym 3D” przeznaczone są głównie do pomiarów przemieszczeń na badanym obiekcie w ramach prowadzonego monitoringu.

Przedstawiony zestaw pomiarowy można zastosować m.in. w pomiarach odkształceń i przemieszczeń jako uzupełnienie klasycznych metod pomiarów [Armer 2001; Ćmielewski 2007; Kamiński et al. 2008; Lazzarini i in. 1977; Ogundare 2016; US Army Corps of Engineers 2018]. W przypadku klasycznych geodezyjnych metod pomiarów na badanym obiekcie stabilizuje się w punktach kontrolnych znaki pomiarowe. W zależności od liczby punktów pomiarowych i ich rozmieszczenia można metodami geodezyjnymi wyznaczyć przesunięcia poziome i/lub pionowe oraz obroty elementów monitorowanego obiektu. Geodezyjne metody pomiarowe z zastosowaniem tachimetrów i niwelatorów pozwalają, na podstawie obserwacji kątowych i liniowych, wyznaczyć współrzędne X, Y, H punktów pomiarowych w przyjętym stałym kartezjańskim układzie odniesienia. Oprócz klasycznych pomiarów geodezyjnych na obiektach realizuje się także pomiary względne oparte o metody fotogrametryczne [Barazzetti i Scaioni 2009; Bernasik i Mikrut 2003; Bösemann 2016; Clarke et al. 1994; Djunaedi 2003; Fraser 1982, 1984, 1988, 1992, 1993, Gołuch et al. 2012, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b, 2016a; Luhmann 2010; Maas i Hampel 2006; Nishiyama et al. 2015; Sawicki 2002, 2008; Uffenkamp 1993; Valença et al. 2013] i fizykalne [Berkovic i Shafir 2012; Bishop 2002; Webster i Eren 2014]. Metody geodezyjne umożliwiają uzyskanie dokładności pomiarów na poziomie milimetrycznym i dziesiątych części milimetra, natomiast fotogrametryczne i fizykalne metody względne na poziomie setnych i tysięcznych części milimetra.

Dla niewielkich obiektów lub na ich wydzielonych elementach często istnieje konieczność wykonania precyzyjnych pomiarów o dokładnościach poniżej dziesiątych części milimetra. Wtedy można zastosować znane pomiary interferometryczne, przemysłowe pomiary maszynowe, precyzyjne metody geodezyjne oraz precyzyjne pomiary fotogrametryczne. Niniejsza praca w swym założeniu nawiązuje do precyzyjnych pomiarów fotogrametrycznych, a w szczególności do opracowań z zakresu fotogrametrii jednoobrazowej.

Dokonując przeglądu literatury przedmiotu, można znaleźć bardzo wiele przykładów zastosowania metod fotogrametrycznych w pomiarach przemieszczeń. Można również spotkać rozwiązania zbliżone (pod względem zastosowanej podstawowej aparatury pomiarowej) do koncepcji zaproponowanej w niniejszej pracy. Jednak rozwiązania te [Barazzetti i Scaioni 2009; Nishiyama et al. 2015] w przypadku pomiarów na pojedynczych zdjęciach, ostatecznie odnoszą się do wyznaczenia tylko przemieszczeń 2D. Ciekawym rozwiązaniem związanym z pomiarem geometrii kół pojazdu względem karoserii podczas jazdy jest rozwiązanie komercyjne, zaprezentowane przez firmę AICON [Aicon 2015; Bösemann 2016]. W rozwiązaniu tym każde z kół pojazdu ma zamocowaną specjalną tarczę (kontrolowaną) z przestrzennie naniesionymi znakami kodowymi. Ponadto na błotniku każdego z kół pojazdu przymocowane są tarcze kodowe, które realizują układ odniesienia dla tarcz kontrolowanych. Do karoserii samochodu przymocowane są na sztywnej konstrukcji w sąsiedztwie kół cztery kamery. Każda z kamer podczas ruchu pojazdu rejestruje położenie tarczy kontrolowanej z tarczami odniesienia. Zgodnie ze specyfikacją [Aicon 2015] system ten pozwala wyznaczyć położenie poszczególnych kół w układzie 3D w stosunku do karoserii podczas ruchu pojazdu w czasie rzeczywistym z dokładnością dla wartości pomiarów liniowych około ± 0.1 mm i kątowych $\pm 0.015^\circ$. Częstotliwość wykonywania zdjęć może wynosić nawet do 490 Hz.

Koncepcja autorskiej metody określania przestrzennego położenia obiektu lub jego elementów realizowana jest na podstawie zasad fotogrametrii jednoobrazowej i bazuje na

znanej w fotogrametrii procedurze przestrzennego wcięcia wstecz, z dodatkowo nałożonymi warunkami w procesie pomiarowo-obliczeniowym. W przypadku zastosowania w pomiarach kamery niometrycznej pierwszym koniecznym do zrealizowania etapem opracowania jest proces jej kalibracji. Natomiast **podczas właściwych prac pomiarowych**, w danym czasie pomiaru t_i , realizowanym w ramach prowadzonego monitoringu, **tylko jedną skalibrowaną kamerą rejestruje się obrazy, na podstawie których określa się**, zgodnie z założeniami opracowanej koncepcji, **przestrzenne wzajemne położenie sygnalizowanych (za pomocą tarcz pomiarowych) elementów monitorowanego obiektu**. W rozwiązaniu fotogrametrycznym metodą przestrzennego wcięcia wstecz (ang. *space resection*), na podstawie parametrów geometrycznych zdjęć, wyznaczonych podczas kalibracji kamery, dokonuje się rekonstrukcji wiązki promieni rzutujących (czyli odtwarza się rzut środkowy), a następnie na podstawie znajomości położenia co najmniej 3 fotopunktów, zlokalizowanych na obiekcie terenowym (w układzie współrzędnych obiektu) i na zdjęciu (w układzie współrzędnych tłowych), określa się elementy orientacji zewnętrznej danego zdjęcia, czyli położenie liniowe (X_s, Y_s, Z_s) i kątowe (ω, φ i κ) zdjęcia w układzie współrzędnych XYZ mierzonego obiektu. Ten sposób opracowania znany jest w fotogrametrii pod nazwą „metoda wiązki” i jest opisany m.in. przez [Bernasik i Mikrut 2003; Butowtt i Kaczyński 2003; Ghosh 2005; Gołuch 1997; Kurczyński 2014; Kraus 2007; Luhmann 2009; Luhmann et al. 2011; Maas 1997; Maas i Hampel 2006; Rinner i Burkhardt 1972; Sawicki 2002; Sitek 1991].

W zależności od charakteru obiektu (jego klasy bezpieczeństwa) i od wymagań, jakie są zapisane w normach branżowych, a z drugiej strony od rodzaju zachodzących na tym obiekcie zmian, pomiary, z zastosowaniem zaprezentowanej w pracy autorskiej aparatury pomiarowej, można wykonywać w formie ciągłego monitoringu [Armer 2001; Gołuch et al. 2012; Maas i Hampel 2006; Nishiyama et al. 2015; Ogundare 2016; Valença et al. 2013; US Army Corps of Engineers 2018].

Monografia liczy 208 stron i podzielona jest na 9 zasadniczych rozdziałów. Pierwszy rozdział jest to wprowadzenie. W rozdziale 2 monografii przedstawiłem cel, zakres i tezę pracy. Natomiast w dalszej części monografii można wyróżnić 2 części.

W pierwszej części (rozdziały 3 i 4) zamieszczone są podstawy teoretyczne zagadnień podjętych w pracy. Są to znane zagadnienia teoretyczne związane z tematem rozprawy. I tak w rozdziale 3 przedstawiłem geometryczne podstawy opracowań fotogrametrycznych oraz model matematyczny, który określa zależności między współrzędnymi punktów na zarejestrowanym obrazie (przestrzeń 2D) a współrzędnymi tych punktów w układzie zewnętrznym (przestrzeń 3D). W zastosowaniach fotogrametrycznych tę zależność geometryczną definiują: równanie kolinearności oraz przekształcenia rzutowe.

W rozdziale 3.5 szczegółowo przedstawiłem siedem różnych sposobów opisu rotacji w przestrzeni ortokartezjańskiej między dwoma układami 3D. Zdecydowałem się szczegółowo zaprezentować poszczególne formy opisujące rotację w przestrzeni 3D, gdyż m.in. procedury pomiarowo-obliczeniowe, w zastosowanym w pracy oprogramowaniu, opierają się na formule rotacji Rodrigues’a oraz wektorze Gibbs’a. Pomiary na obrazach i obliczenia przeprowadziłem z wykorzystaniem ogólnie dostępnego pakietu programów „*Camera Calibration Toolbox for Matlab*” [Bouguet 2015; Zhang 1999], który został przeze mnie zmodyfikowany i przystosowany do zrealizowania postawionego w pracy celu.

W rozdziale 4 zwróciłem uwagę na czynniki wpływające na dokładność opracowania fotogrametrycznego oraz przedstawiłem sposób oszacowania dokładności pomiarów liniowych i kątowych realizowanych metodą fotogrametryczną.

Część druga monografii zawiera: opis autorskiej koncepcji pomiarów względnych oraz zrealizowane przeze mnie prace badawczo-doświadczalne (rozdział 5), perspektywy związane

z dalszymi pracami badawczymi (rozdział 6), jak również podsumowanie i wnioski wynikające z przeprowadzonych prac eksperymentalnych (rozdział 7).

W rozdziale 5 w sposób kompleksowy zaprezentowałem autorską koncepcję realizacji pomiarów wzajemnego położenia elementów monitorowanego obiektu w przestrzeni 3D z wykorzystaniem fotogrametrii jednoobrazowej. W rozdziale 5.1 zostały wyjaśnione zależności matematyczne określające wzajemne powiązania lokalnych kartezjańskich układów współrzędnych poszczególnych przyrządów i instrumentów pomiarowych, a zarazem sposób realizacji obliczeń zgodnie z zaproponowaną koncepcją pomiarów.

Weryfikację założeń koncepcji dokonałem w oparciu o wyniki laboratoryjnych i terenowych prac badawczych. Laboratoryjne prace badawcze zostały zrealizowane jako trzy eksperymenty pomiarowe (rozdziały 5.2÷5.4 pacy) w laboratorium Instytutu Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Natomiast terenowe prace badawcze zrealizowałem jako eksperyment czwarty (rozdział 5.5), który przeprowadziłem w podziemiach Laboratorium Geodynamicznego Centrum Badań Kosmicznych (LG CBK) w Książu koło Wałbrzycha.

W rozdziale 6 przedstawiłem oryginalne opracowania aparatury pomiarowej, którą zamierzam zastosować w ramach kontynuowanych w przyszłości pracach badawczo-rozwojowych.

Cel

Głównym celem pracy było opracowanie metody oraz zestawu przyrządów pomiarowych umożliwiających fotogrametryczne opracowanie pojedynczych zdjęć, rejestrowanych w ramach prowadzonego monitoringu, w celu wyznaczenia przemieszczeń w przestrzeni 3D zachodzących na obiektach przyrody nieożywionej i obiektach inżynierskich.

Postawiony cel zrealizowałem w procesie badawczym, który obejmował:

- teoretyczne analizy zagadnień fotogrametrycznych związanych z treścią pracy;
- opracowanie koncepcji pomiaru przestrzennych przemieszczeń z wykorzystaniem naziemnej fotogrametrii jednoobrazowej – podsumowaniem były projekty przyrządów pomiarowych;
- laboratoryjne badania testowe z użyciem wykonanych prototypów przyrządów pomiarowych;
- aplikację prototypu przyrządu na obiekcie terenowym.

Do oceny dokładności wyników pomiarów zrealizowanych w warunkach laboratoryjnych zastosowałem dwa kryteria. Pierwsze kryterium dotyczyło dokładności wewnętrznej wyników pomiarów (precyzja) i oparte było o wartości błędów średnich uzyskanych z pomiarów wielokrotnych, które zostały wykonane opracowanymi prototypami przyrządów pomiarowych. Drugie kryterium związane było z dokładnością zewnętrzną otrzymanych wyników pomiarów (wiarygodność i niezawodność). Otrzymane wyniki odniosłem do pomiarów referencyjnych wykonanych znaną metodą, gwarantującą lepszą lub porównywalną dokładność obserwacji. W pomiarach referencyjnych zastosowałem: stoliki mikrometryczne, precyzyjne libelle elektroniczne i geodezyjne precyzyjne instrumenty kątomiercze.

Natomiast w przypadku terenowych prac testowych do oceny dokładności wyników pomiarów przyjęto wartości średnie z pomiarów wielokrotnych oraz wyniki otrzymane w ramach rozwiązania sieci terratriangulacyjnej zdjęć.

Według przyjętego założenia opracowane rozwiązania przyrządów pomiarowych powinny się charakteryzować odpowiednią funkcjonalnością i nieskomplikowanym użytkowaniem, a zastosowanie ich w pomiarach miało umożliwić:

- osiągnięcie wysokich dokładności pomiarowych na obiekcie na poziomie setnych części milimetra;
- określenie położenia przestrzennego (przesunięcia i obroty) mierzonego obiektu lub jego wydzielonych elementów na podstawie pomiarów fotogrametrycznych na pojedynczym zdjęciu w danym czasie pomiarowym t_i .

Ponieważ celem prezentowanej metody pomiarów fotogrametrycznych jest uzyskanie dokładności pomiarów liniowych na poziomie setnych części milimetra i kątowych na poziomie setnych części mm/1 m, w trakcie realizacji pomiarów należy mieć na uwadze szereg czynników, do których można zaliczyć m.in.:

- panujące warunki środowiskowe na obiekcie (oświetlenie, temperatura i wilgotność powietrza);
- minimalną i maksymalną odległość fotografowania tarcz pomiarowych;
- odpowiednie rozlokowanie tarcz pomiarowych na obiekcie;
- wielkość tarcz oraz liczba i rozmieszczenie sygnałów pomiarowych na powierzchni tarczy (metryczność położenia i wielkości sygnałów pomiarowych);
- rodzaj materiału, z którego wykonana jest tarcza pomiarowa (współczynnik rozszerzalności termicznej, odporność na wilgoć, sztywność, płaskość);
- parametry techniczne kamery, w tym dobór układu optycznego.

Metoda precyzyjnych pomiarów 3D wzajemnego położenia elementów monitorowanego obiektu z wykorzystaniem fotogrametrii jednoobrazowej

W pracy zaprezentowałem metodę pomiarów fotogrametrycznych i zrealizowany w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki prototyp urządzenia, nazwany „szczelinomierzem fotogrametrycznym 3D” przeznaczony do monitorowania zachodzących przemieszczeń na badanym obiekcie.

Zaprojektowany i opracowany zestaw pomiarowy można z powodzeniem zastosować do pomiarów przemieszczeń względnych występujących na obiektach inżynierskich i przyrody nieożywionej. Pierwszą koncepcję urządzenia, jego zasadniczą budowę i wstępne wyniki otrzymane w ramach laboratoryjnych prac eksperymentalnych, po raz pierwszy zaprezentowałem w formie referatu w listopadzie 2012 r. [Gołuch et al. 2012], a następnie opublikowałem w 2013 r. [Gołuch et al. 2013]. W pracach tych zostały przedstawione wstępne wyniki prowadzonych badań. Wykazałem w nich potencjał zaprezentowanej metody pomiaru.

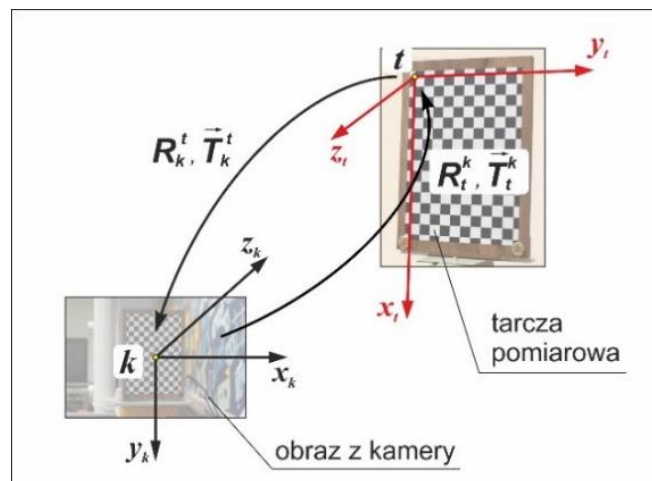
Zaprezentowana koncepcja pomiarów z użyciem szczelinomierza fotogrametrycznego 3D pozwala określić przestrzenne wzajemne położenie (przesunięcia w 3 kierunkach oraz obroty wokół trzech osi) jednego lub kilku wyodrębnionych i odpowiednio zasygnalizowanych elementów mierzonego obiektu na podstawie fotogrametrycznego opracowania pojedynczego metrycznego lub semimetrycznego zdjęcia, czyli z zastosowaniem zasad fotogrametrii jednoobrazowej.

Przedstawiona autorska metoda umożliwia zastąpienie lub uzupełnienie pomiarów geodezyjnych (tachimetrycznych) i względnych (realizowanych metodami fizykalnymi) metodą z wykorzystaniem naziemnej fotogrametrii jednoobrazowej. W zaproponowanej metodzie fotogrametrycznej, w celu określenia przestrzennego zachowania się elementu obserwowanego obiektu w badanym okresie czasu, zamiast minimum 3 geodezyjnych

sygnałów pomiarowych, przypadających na jeden mierzony element, stosuje się jedną, odpowiednio zaprojektowaną wielopunktową tarczę pomiarową.

Zaprojektowana fotogrametryczna tarcza pomiarowa jest tarczą pasywną o płaskiej powierzchni. Na tarczy naniesionych jest N punktów pomiarowych, które zlokalizowane są w węzłach czarno-białej szachownicy o liczbie n_x na n_y pól. Wymiary pojedynczego pola wynoszą d_x na d_y mm. Parametry fotogrametrycznej tarczy pomiarowej, w tym jej wymiar, liczba pól i wymiary pojedynczego pola zależą od warunków panujących na obiekcie, zastosowanego sprzętu pomiarowego i oprogramowania wykorzystanego do opracowania zdjęć. Z uwagi na geometrię fotogrametrycznego przestrzennego wcięcia wstecz należy dążyć do sytuacji, w której tarcze pomiarowe odfotografowują się na maksymalnym obszarze rejestrowanego zdjęcia.

Elementy składowe aparatury pomiarowej odpowiednio rozmieszczone na badanym obiekcie mają zdefiniowane swoje lokalne kartezjańskie układy współrzędnych. Na rysunku 1 przedstawione zostały lokalne układy współrzędnych tarczy pomiarowej t i kamery elektronicznej k . Są to ortogonalne układy prawoskrętne. Początek kartezjańskiego układu współrzędnych tarczy pomiarowej t znajduje się w górnym lewym narożniku mierzonej siatki „szachownicy”, oś x_t skierowana jest w dół (wzdłuż kolumny siatki), oś y_t skierowana jest w prawo (wzdłuż wiersza siatki), natomiast oś z_t jest prostopadła do płaszczyzny $x_t y_t$ i skierowana jest w stronę kamery. Wykorzystana do wykonania zdjęć kamera ma również zdefiniowany swój lokalny, kartezjański układ współrzędnych. Początek układu współrzędnych kamery k zlokalizowany jest w środku rzutów zdjęcia. Punkt ten jest tożsamy z punktem głównym obrazowym układu optycznego. Oś x_k układu współrzędnych kamery skierowana jest w prawo (wzdłuż wierszy obrazu cyfrowego), oś y_k skierowana jest w dół (wzdłuż kolumny obrazu cyfrowego), a oś z_k pokrywa się z osią optyczną kamery k i skierowana jest w stronę fotografowanego obiektu.



Rys. 1. Definicja lokalnych układów współrzędnych tarczy pomiarowej t i kamery k oraz zachodzące relacje kąto-liniowe między tymi układami

Oznaczenia: R_k^t i T_k^t - elementy orientacji zewnętrznej zdjęcia (kąto-liniowe położenie kamery k) wyznaczone w lokalnym układzie współrzędnych tarczy t ,

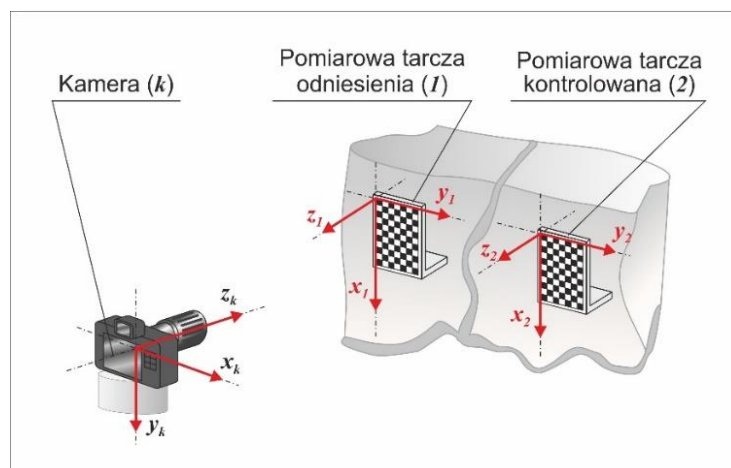
R_t^k i T_t^k - kąto-liniowe położenie tarczy t w lokalnym układzie współrzędnych kamery k (obliczone na podstawie elementów orientacji zewnętrznej zdjęcia).

Na rysunku 1 przedstawiłem również wzajemne kąto-liniowe powiązanie między układami współrzędnych tarczy pomiarowej t i kamery elektronicznej k . Macierz R_k^t i wektor

translacji \vec{T}_k^t są to elementy orientacji zewnętrznej zdjęcia wyznaczone w lokalnym układzie współrzędnych tarczy t . Natomiast macierz R_t^k i wektor \vec{T}_t^k – określają kąto- liniowe położenie tarczy t w lokalnym układzie współrzędnych kamery k - wielkości te oblicza się na podstawie wyznaczonych elementów orientacji zewnętrznej zdjęcia.

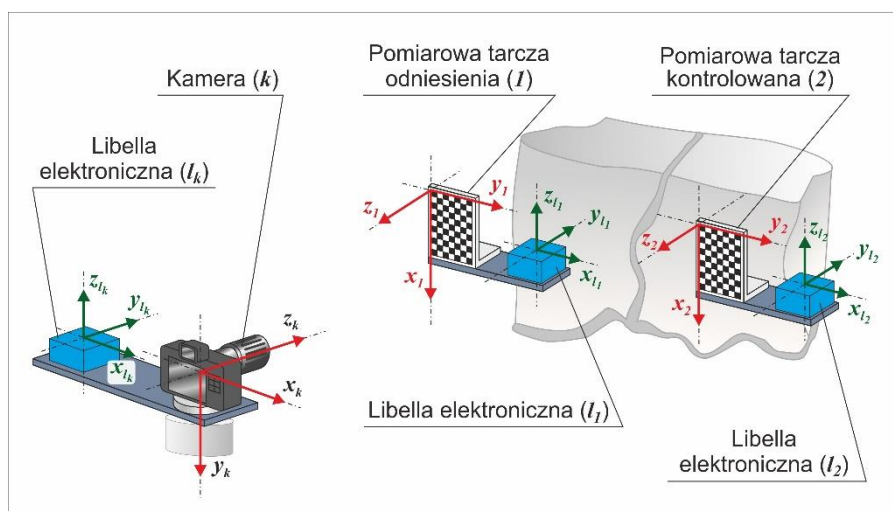
W zależności od charakteru mierzonego obiektu, jego uwarunkowań technicznych, panujących na tym obiekcie warunków środowiskowych, jak również celu realizowanego pomiaru dobiera się odpowiedni zestaw aparatury pomiarowej, którą następnie należy w prawidłowy sposób rozmieścić na monitorowanym obiekcie. Aparatura pomiarowa może być zestawiona w różnej konfiguracji. W skład minimalnego zestawu pomiarowego, tworzącego szczerinierz fotogrametryczny 3D, który można zastosować do badania przemieszczeń względnych poszczególnych elementów obiektu (rys. 2) metodą fotogrametryczną, zgodnie z opracowaną koncepcją, wchodzi:

- elektroniczna kamera pomiarowa (k) (metryczna lub niometryczna),
- autorskie fotogrametryczne tarcze pomiarowe: tarcza odniesienia (**1**) i co najmniej jedna tarcza kontrolowana (**2**).



Rys. 2. Przykład minimalnego zestawu aparatury pomiarowej na monitorowanym obiekcie w celu realizacji pomiarów względnych

Minimalny zestaw pomiarowy, który jest zaprezentowany na rysunku 2, można powiększyć o jedną, dwie lub trzy libelle elektroniczne (l_1 , l_2 i l_k), których głównym celem jest kontrola stałości położenia poszczególnych elementów aparatury podczas prowadzonych pomiarów (rys. 3). W przypadku braku zachowania stałości położenia aparatury (np. kamery) wyniki obserwacji zarejestrowane libellą można uwzględnić w procesie obliczeniowym. Libelle elektroniczne powinny być połączone na sztywno z poszczególnymi przyrządami i instrumentami pomiarowymi. Na rysunku 3 zaprezentowano rozmieszczenie kompletnej aparatury pomiarowej, którą można zastosować na monitorowanym obiekcie w trakcie realizacji pomiarów względnych.



Rys. 3. Przykład kompletnej aparatury pomiarowej, którą można zastosować na monitorowanym obiekcie w celu realizacji pomiarów względnych

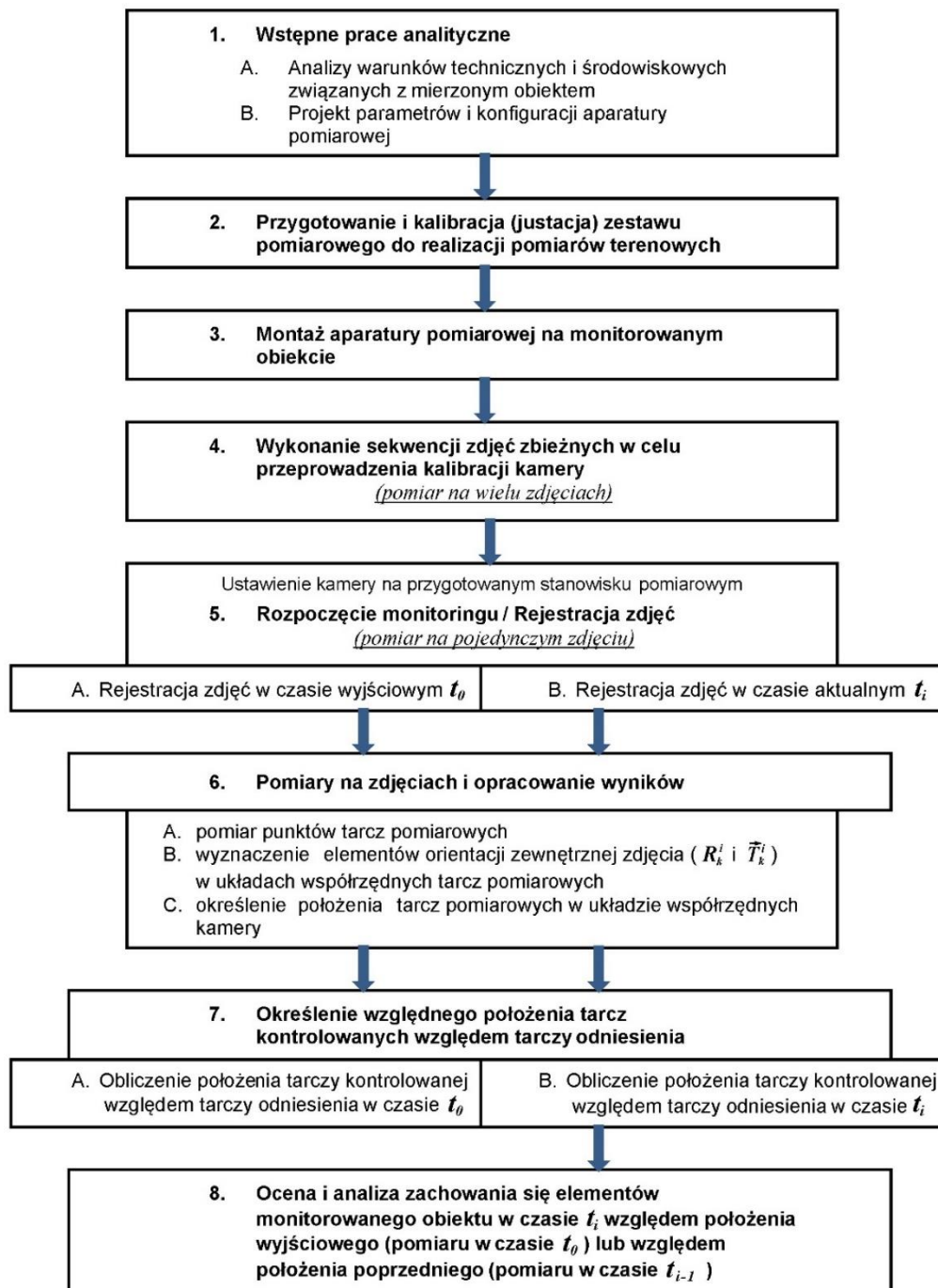
Schemat realizacji pomiarów względnych, na przykładzie fotogrametrycznego monitoringu obiektu, zgodnie z opracowaną przeze mnie metodą pomiaru, zilustrowałem na rysunku 4.

Zgodnie z przedstawioną metodą w **pierwszym etapie** należy przeprowadzić szczegółowe rozpoznanie obiektu pomiarowego. W ramach prac analitycznych należy zidentyfikować uwarunkowania techniczne i środowiskowe panujące na obiekcie, które mają wpływ zarówno na dobór i rozmieszczenie aparatury pomiarowej na obiekcie, jak również na możliwą do uzyskania dokładność pomiaru. Po zapoznaniu się ze specyfiką obiektu można przejść do zaprojektowania konfiguracji zastosowanej aparatury i do zaplanowania rozmieszczenia tej aparatury na mierzonym obiekcie.

W ramach **drugiego etapu** należy skompletować zestaw pomiarowy na podstawie opracowanego w pierwszym etapie prac projektu aparatury kontrolno-pomiarowej. Jest to czas wykonania tarcz pomiarowych o odpowiednim kształcie i wymiarach oraz zestawów mocująco-ustawczych tych tarcz (lub tarcz i libell elektronicznych) do elementów mierzonego obiektu. W przypadku zastosowania libell elektronicznych należy poszczególne elementy zestawu pomiarowego skalibrować, czyli określić wzajemne kątowno-liniowe powiązanie lokalnych układów współrzędnych tych zespołów pomiarowych (libelli i tarczy pomiarowej lub libelli i kamery cyfrowej) ze sobą. Kalibrację zestawu pomiarowego przeprowadza się po wzajemnym powiązaniu libell z poszczególnymi przyrządami i instrumentami pomiarowymi. Kalibrację należy wykonać w warunkach laboratoryjnych, na odpowiednich stabilnych stanowiskach pomiarowych, wykorzystując do tego dwuosiowy stolik mikrometryczny. Przykładowy sposób kalibracji zestawu tarcza pomiarowa / urządzenie kątomiercze został opisany w rozdziale 5.4 pracy (w opisanym przykładzie instrumentem kątomierzczym był tachimetr, natomiast tym urządzeniem może być także libella elektroniczna). Jeżeli do prac pomiarowych będzie użyta kamera niemetryczna, to kamerę taką należy poprawnie skalibrować. Na tym etapie opracowania można wykonać kalibrację kamery w warunkach laboratoryjnych. Natomiast w przypadku zastosowania półprofesjonalnych kamer cyfrowych preferowane jest wykonanie kalibracji kamery na obiekcie, w etapie czwartym zaproponowanego schematu prac.

Po skompletowaniu sprzętu pomiarowego należy dokonać prawidłowego montażu aparatury pomiarowej na obiekcie (**etap 3**). Warunkiem prawidłowego montażu jest sztywne połączenie tarcz pomiarowych z elementami mierzonego obiektu w dostosowaniu do warunków

pomiarowych. W ramach tego etapu należy przygotować stanowisko kamery elektronicznej. W zależności od panujących warunków na obiekcie i od charakteru badań wybiera się jeden z trzech wariantów mocowania kamery na obiekcie (na statywie przyściennym, na słupie obserwacyjnym, na statywie geodezyjnym lub statywie fotograficznym).



Rys. 4. Schemat blokowy prowadzenia fotogrametrycznego monitoringu obiektu według opracowanej autorskiej metody pomiaru

W przypadku wykonywania kalibracji kamery na obiekcie pomiarowym z wykorzystaniem procedur samokalibracji należy przed rozpoczęciem właściwego monitoringu wykonać sekwencję zdjęć zbieżnych (**etap 4 prac**) przy ustalonej wartości ogniskowania układu optycznego kamery (tej samej, przy której będzie realizowany monitoring obiektu). W tym celu można wykorzystać niezależną tablicę kalibracyjną lub, jeżeli nie posiadamy niezależnej tablicy

kalibracyjnej, osadzone na elementach mierzonego obiektu tarczy pomiarowe. Na zarejestrowanych obrazach wykonuje się pomiary fotogrametryczne, w wyniku których otrzymujemy parametry kalibracji kamery. Podstawą obliczeń parametrów kalibracji kamery (elementów orientacji wewnętrznej wraz z dodatkowymi parametrami) jest zasada wielokrotnego kątownego wcięcia w przód.

Po zakończeniu procesu pozyskiwania zdjęć do kalibracji należy ustawić kamerę na odpowiednio przygotowanym stanowisku pomiarowym. Od tego momentu można rozpocząć monitoring badanego obiektu (**etap 5**), czyli wykonać rejestrację zdjęcia (sekwencji pojedynczych zdjęć) tarcz pomiarowych w czasie t_0 . W zależności od dynamiki zachodzących przemieszczeń elementów badanego obiektu określa się interwał pomiędzy obserwacjami, jak również należy ustalić liczbę zdjęć (jedno lub sekwencja zdjęć), które wykonuje się w czasie t_0 i kolejnych czasach pomiaru t_i . W przypadku jeżeli przemieszczenia zachodzące na obiekcie nie następują w sposób dynamiczny (nie jest to proces szybkozmienny), należy w ramach jednego cyklu pomiarowego wykonać kilka zdjęć, dzięki czemu przeprowadzony zostanie wielokrotny, niezależny pomiar tarcz na różnych zdjęciach o tej samej orientacji, co przyczyni się do podniesienia dokładności fotogrametrycznego pomiaru.

Fotogrametryczne opracowanie wykonanych zdjęć (**etap 6**) w czasach t_0 i t_i przebiega w sposób analogiczny. Na podstawie pomiarów wykonanych na zdjęciach pomiarowych określa się, na drodze fotogrametrycznego przestrzennego wcięcia wstecz, położenie kamery (k) w lokalnych układach współrzędnych poszczególnych tarcz pomiarowych: tarczy odniesienia (**1**), a następnie tarczy kontrolowanej (**2**). Na tym etapie, w celu podniesienia dokładności pomiaru, wykorzystany jest w procedurze obliczeniowej warunek lokalizacji punktów pomiarowych na jednej płaszczyźnie (warunek współpłaszczyznowości punktów pomiarowych [Bouguet 2015, Zhang 1999]). W drugim etapie obliczeniowym, korzystając ze znanych formuł matematycznych i otrzymanych wyników pomiarów fotogrametrycznych z pierwszego etapu, dokonuje się transformacji odwrotnej lokalnych układów współrzędnych tarcz pomiarowych (**1**) i (**2**) do układu współrzędnych kamery (k) (rys. 2). Na tej podstawie określa się położenie poszczególnych tarcz pomiarowych w układzie współrzędnych kamery (k). Jednoczesna rejestracja i następnie pomiar na jednym zdjęciu tarcz pomiarowych (**1**) i (**2**) pozwala zintegrować lokalne układy współrzędnych poszczególnych tarcz pomiarowych z układem współrzędnych kamery (k).

W kolejnym kroku (**etap 7**) wyznacza się wzajemne położenie tarcz pomiarowych względem siebie.

W ostatnim kroku (**etap 8**), na podstawie wyznaczonego wzajemnego położenia tarcz pomiarowych w czasach t_0 i t_i określa się położenie poszczególnych tarcz pomiarowych wyznaczone w czasie t_i w odniesieniu do położenia tarczy pomiarowej, przyjętej jako tarczy odniesienia, w czasie pomiaru t_0 . Jest to etap, w którym przeprowadza się ocenę i analizę zachowania się elementów monitorowanego obiektu w czasie t_i względem położenia wyjściowego (pomiaru w czasie t_0) lub względem położenia poprzedniego (pomiaru w czasie t_{i-1}).

Przedstawiona metoda monitoringu elementów obiektu wymaga użycia co najmniej dwóch tarcz pomiarowych – jednej tarczy odniesienia (**1**) i co najmniej jednej tarczy kontrolowanej (**2**). W szczególnym przypadku, jeżeli jest to wystarczające z uwagi na zakres prowadzonych prac, można prowadzić monitoring jednego elementu obiektu z użyciem tylko jednej tarczy pomiarowej względem kamery pomiarowej (k). W takim przypadku musimy mieć pewność, że stanowisko kamery, jak również sama kamera (k) zachowują stałość. Ocenę stałości stanowiska kamery można przeprowadzić przy zastosowaniu dodatkowych przyrządów pomiarowych i instrumentów geodezyjnych, np. libelli elektronicznej.

W zależności od charakteru obiektu i potrzeb realizacji badań pomiary z wykorzystaniem zaproponowanej aparatury można wykonywać przede wszystkim w ramach realizowanego monitoringu ciągłego. Wyniki terenowych pomiarów (czyli rejestrowane obrazy) można transmitować przewodowo lub bezprzewodowo do centralnej jednostki obliczeniowej. Przedstawiony zestaw pomiarowy przeznaczony jest do obserwacji przemieszczeń względnych, natomiast po spełnieniu pewnych dodatkowych warunków, może stanowić również komponent pomiarowy podczas obserwacji przemieszczeń bezwzględnych (rozdział 6 pracy).

W zależności od warunków panujących na badanym obiekcie i w jego bezpośrednim sąsiedztwie kamerę można ustawić w następujący sposób:

- na statywie przyściennym,
- na słupie obserwacyjnym,
- na statywie geodezyjnym lub statywie fotograficznym.

Umieszczenie kamery na statywie przyściennym lub słupie obserwacyjnym jest głównie dedykowane do monitoringu ciągłego.

Panujące na obiekcie warunki środowiskowe mogą mieć istotny wpływ na wyniki pomiarów fotogrametrycznych. Odnosi się to szczególnie do drugiego i trzeciego przypadku ustawienia kamery, gdzie odległość fotografowania (przy odpowiednim doborze układu optycznego kamery) może niekiedy wynosić kilka lub kilkanaście metrów. Jest to oczywiście skrajny przypadek, gdyż na podstawie rozważań z rozdziału 4.2 pracy wiemy, że wykonując zdjęcia kamerą z dłuższą ogniskową, przy porównywalnej skali zdjęcia (zakresie pomiaru na zdjęciu), z mniejszą dokładnością wyznacza się kąty pochylenia w kierunkach podłużnym (ω) i poprzecznym (φ) do płaszczyzny zdjęcia. W przypadku pierwszego sposobu ustawienia kamery na statywie przyściennym wpływ warunków środowiskowych, z uwagi na niedużą odległość fotografowania, może być pominięty. Należy zawsze mieć na uwadze, że przy większych odległościach fotografowania warunki środowiskowe mogą w znaczącym stopniu zmniejszyć dokładność pomiarów fotogrametrycznych (co zostało opisane w rozdziale 3.6.3.3 pracy).

Biorąc pod uwagę rozmieszczenie aparatury kontrolno-pomiarowej podczas prowadzonych prac eksperymentalnych (eksperymenty od 1 do 4 opisane w rozdziałach 5.2÷5.5 pracy), dla aparatury pomiarowej określono następujące lokalne kartezjańskie układy współrzędnych (rys. 3):

- układ współrzędnych kamery (k): $x_k y_k z_k$,
- układ współrzędnych pomiarowej tarczy odniesienia (1): $x_1 y_1 z_1$,
- układ współrzędnych pomiarowej tarczy kontrolowanej (2): $x_2 y_2 z_2$,
- układ współrzędnych libelli elektronicznej (l_k) związanej z kamerą elektroniczną (k): $x_{l_k} y_{l_k} z_{l_k}$,
- układ współrzędnych libelli elektronicznej (l_1) związanej z tarczą odniesienia (1): $x_{l_1} y_{l_1} z_{l_1}$,
- układ współrzędnych libelli elektronicznej (l_2) związanej z tarczą kontrolowaną (2): $x_{l_2} y_{l_2} z_{l_2}$.

W rozdziale 5 pracy szczegółowo opisałem zależności matematyczne określające wzajemne powiązania lokalnych kartezjańskich układów współrzędnych poszczególnych przyrządów i instrumentów pomiarowych. Przedstawiłem zasadę określenia zarówno kąтового położenia układów współrzędnych między sobą (na podstawie znanych macierzy obrotu), jak również opisałem zasadę wyznaczenia liniowego przesunięcia między układami współrzędnych, czyli sposób określenia wektora translacji między tymi układami.

Na podstawie zarejestrowanych wskazań libell elektronicznych kontroluje się stałość położenia kamery elektronicznej (k) i poszczególnych tarcz pomiarowych oraz można

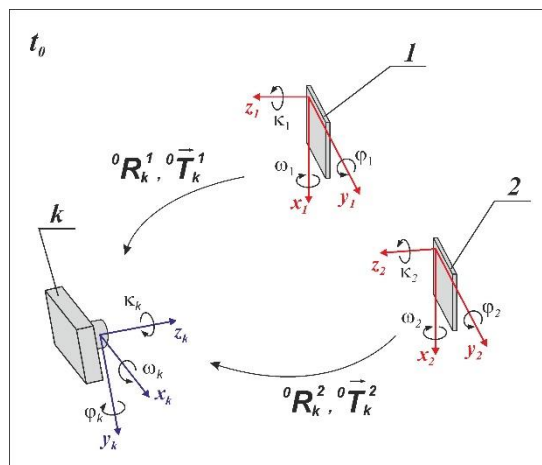
stwierdzić, czy dana tarcza pomiarowa doznała przemieszczenia, czy też zachowała stałość położenia. Tym samym można określić, który element mierzonego obiektu doznał przemieszczenia i jaka jest jego wartość.

W związku z tym w oparciu o wykonane zdjęcia w czasach t_0 i t_i określa się wzajemne przemieszczenia tarcz pomiarowych (elementów obiektu), natomiast na podstawie zarejestrowanych wskazań libell elektronicznych połączonych z tarczami pomiarowymi można określić położenie elementów obiektu (tarcz pomiarowych) względem linii pionu wyznaczonej przez libelle elektroniczne.

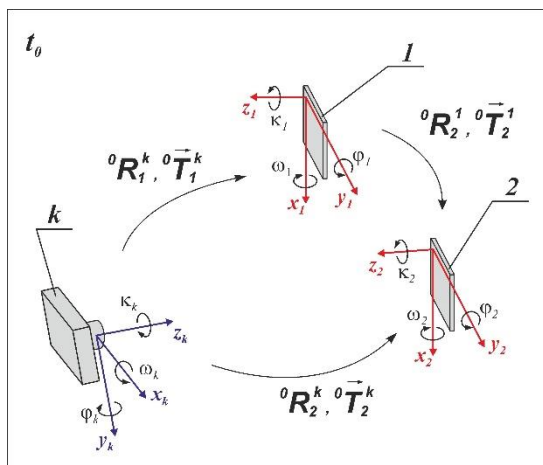
Połączona z kamerą libella elektroniczna (l_k) pozwala sprawdzić stałość położenia kamery elektronicznej w trakcie realizacji pomiarów, a w przypadku niezachowania stałości kamery, wprowadzić ewentualne poprawki podczas opracowania wyników pomiarów fotogrametrycznych na wykonanym zdjęciu w czasie pomiaru aktualnego t_i .

Na rysunkach 5÷7 zostały zaprezentowane przykładowe wzajemne powiązania zdefiniowanych lokalnych układów współrzędnych poszczególnych przyrządów i instrumentów pomiarowych. Na rysunku 5 przedstawiłem w sposób schematyczny powiązania matematyczne zachodzące między lokalnymi układami współrzędnych: tarcz pomiarowych (**1**) i (**2**) z lokalnym układem współrzędnych kamery elektronicznej (k). Przedstawione na tym rysunku macierze ${}^0R_k^1$ i ${}^0R_k^2$ oraz wektory translacji ${}^0\bar{T}_k^1$ i ${}^0\bar{T}_k^2$ są wynikiem przeprowadzonych pomiarów fotogrametrycznych punktów tarcz pomiarowych na zarejestrowanych obrazach w czasie t_0 . Określają one elementy orientacji zewnętrznej zdjęcia wyznaczone w lokalnych układach współrzędnych tarczy odniesienia (**1**) i tarczy kontrolowanej (**2**). Obliczenia elementów orientacji zewnętrznej dokonuje się niezależnie, w przedstawionym przypadku dwukrotnie, w pierwszym kroku pomiarowo-obliczeniowym względem tarczy odniesienia (**1**), a w drugim kroku pomiarowo-obliczeniowym w nawiązaniu do układu współrzędnych tarczy kontrolowanej (**2**).

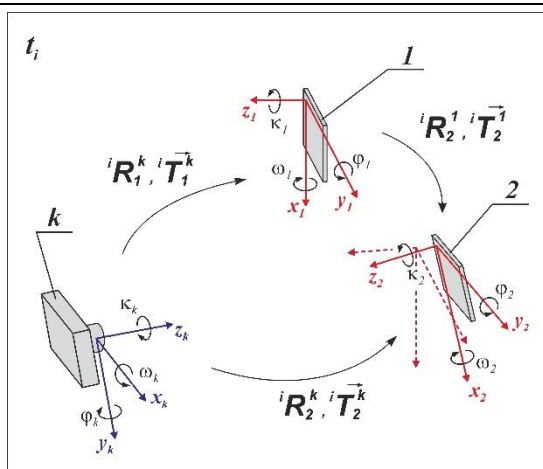
Rysunki 6 i 7 przedstawiają wzajemne zależności pomiędzy lokalnymi układami współrzędnych tarcz pomiarowych (**1**) i (**2**) i kamery (k) w czasach t_i (gdzie i to kolejne czasy pomiaru, począwszy od czasu zerowego: $i = 0, 1, 2, \dots$). Macierze ${}^iR_1^k$ i ${}^iR_2^k$ oraz wektory translacji ${}^i\bar{T}_1^k$ i ${}^i\bar{T}_2^k$ określają kąto- liniowe położenie tarcz: odniesienia (**1**) i kontrolowanej (**2**) w lokalnym układzie współrzędnych kamery (k). Wielkości te oblicza się na podstawie wyznaczonych (w pomiarze fotogrametrycznym) elementów orientacji zewnętrznej zdjęcia.



Rys. 5. Elementy orientacji zewnętrznej zdjęcia wyznaczone w lokalnych układach współrzędnych tarcz: odniesienia (**1**) i kontrolowanej (**2**) w czasie t_0



Rys. 6. Ilustracja wzajemnych zależności między lokalnymi układami współrzędnych poszczególnych elementów zestawu pomiarowego w czasie t_0



Rys. 7. Ilustracja wzajemnych zależności między lokalnymi układami współrzędnych poszczególnych elementów zestawu pomiarowego w kolejnym czasie t_i

W toku prowadzonych obliczeń ostatecznie wyznacza się wzajemne położenie tarczy kontrolowanej (2) względem tarczy odniesienia (1). Wzór (1) przedstawia macierz obrotu ${}^iR_2^1$ opisującą kątowe relacje między tarczami pomiarowymi, natomiast wzór (2) określa zachodzące relacje liniowe ${}^iT_2^1$ w dowolnym czasie pomiaru i .

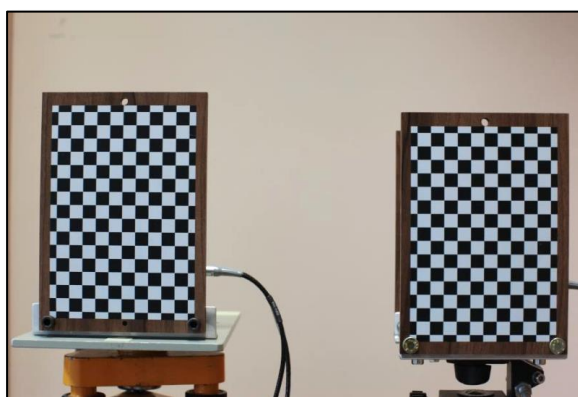
$${}^iR_2^1 = {}^iR_1^k \cdot {}^iR_2^k = ({}^iR_1^k)^{-1} \cdot {}^iR_2^k \quad (1)$$

$$\begin{aligned} {}^iT_2^1 &= {}^iT_1^k + {}^iR_1^k \cdot {}^iT_2^k \\ {}^iT_2^1 &= -({}^iR_1^k)^{-1} \cdot {}^iT_1^k + ({}^iR_1^k)^{-1} \cdot {}^iT_2^k \\ {}^iT_2^1 &= ({}^iR_1^k)^{-1} \cdot (-{}^iT_1^k + {}^iT_2^k) \\ {}^iT_2^1 &= {}^iR_1^k \cdot (-{}^iT_1^k + {}^iT_2^k) \end{aligned} \quad (2)$$

W ramach prac badawczych przeprowadziłem trzy niezależne eksperymenty w laboratorium Instytutu Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (IGiG UPWr) (rozdziały 5.2÷5.4 pracy). Badania testowe wykonałem również na obiekcie terenowym Książ (rozdział 5.5). Do realizacji poszczególnych eksperymentów badawczych zastosowałem instrumenty i przyrządy pomiarowe w różnych konfiguracjach. Opracowanie wyników pomiarów zostało przeprowadzone zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 4, a uzyskane wyniki pomiarów i obliczeń zostały przedstawione i omówione na koniec każdego z eksperymentów.

Celem badań testowych wykonanych w ramach pierwszego eksperymentu była wstępna weryfikacja założeń opracowanej metody fotogrametrycznej pomiaru przemieszczeń względnych. Częstkowe wyniki zrealizowanych prac eksperymentalnych przedstawiłem w publikacjach [Gołuch et. al. 2012 i 2013]. Uzyskane w eksperymencie 1 wysokie dokładności testowych pomiarów fotogrametrycznych, które były zgodne z przeprowadzonymi wstępnymi analizami dokładności, skłoniły mnie do realizacji dalszych prac badawczych.

W tym celu zaprojektowałem i wykonałem prototypy nowych tarcz pomiarowych (rys. 8) o większym formacie niż te, które zastosowałem w eksperymencie 1. Obraz tarczy pomiarowej, w postaci czarno-białej szachownicy, nadrukowano bezpośrednio na płaskiej i gładkiej płycie HPL o grubości 8 mm. Druk wykonano za pomocą plotera przemysłowego AGFA Jeti 1224 HDC w technologii UV, z rozdzielczością 1200 dpi. Wykonana tarcza pomiarowa ma wymiary 125 mm x 180 mm, a nadrukowany obraz szachownicy zawiera 150 czarno-białych pól (10 x 15) o wymiarach 10.00 mm na 10.00 mm. Dodatkowo na obwodzie pełnych pól szachownicy znajdują się czarno-białe prostokątne pola o szerokości 5 mm. Na tak zaprojektowanej i wykonanej tarczy można zidentyfikować 176 regularnie rozmieszczonych punktów pomiarowych.

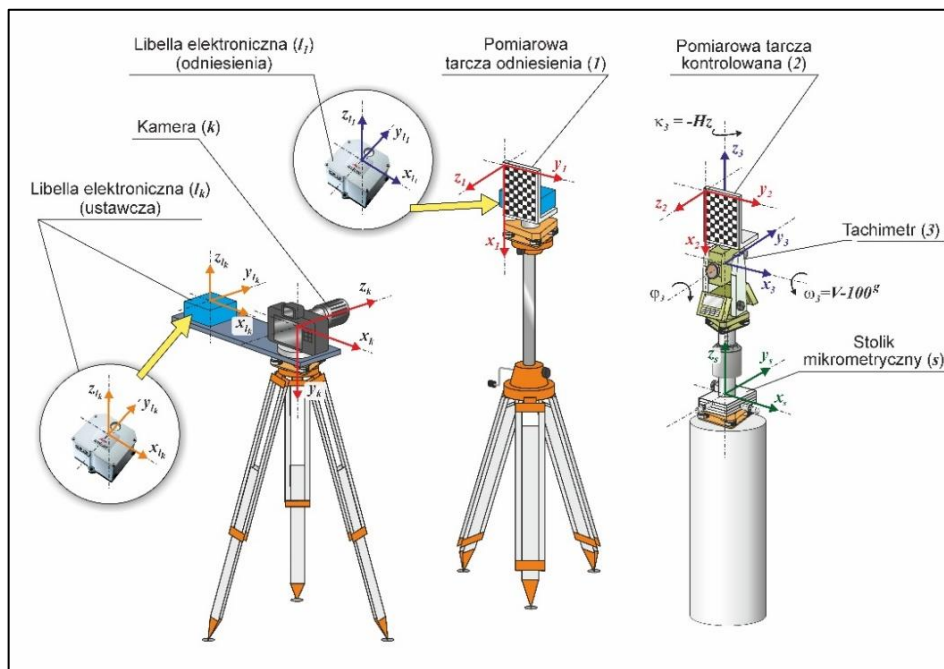


Rys. 8. Przykładowy obraz zarejestrowanych tarcz pomiarowych podczas realizacji eksperymentu 2

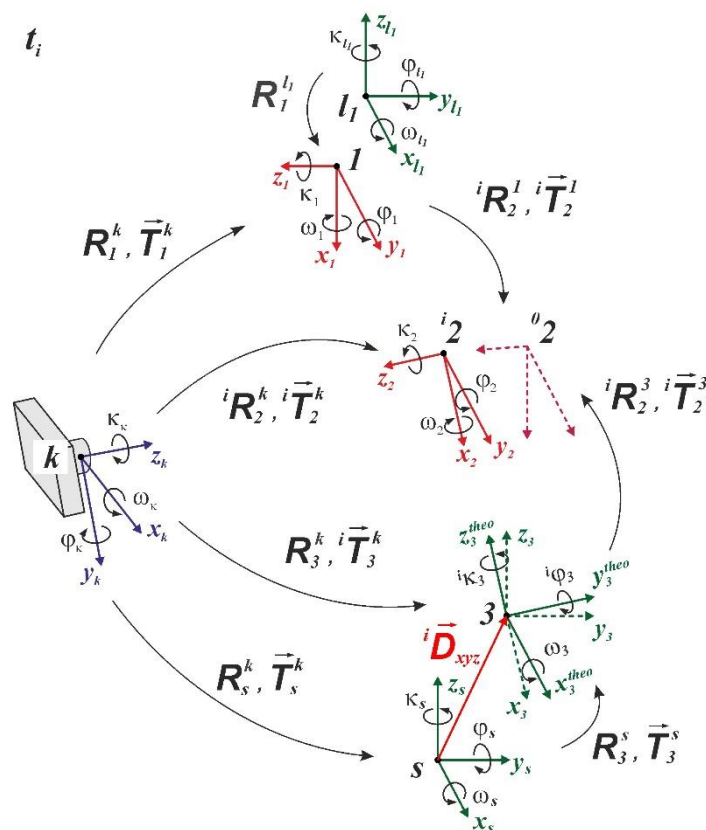
Badania testowe, które stanowiły eksperyment 2, wykonałem również w laboratorium Instytutu Geodezji i Geoinformatyki UP we Wrocławiu. Głównym celem tych badań było ustalenie możliwych do uzyskania dokładności względnych pomiarów kątowych przy użyciu nowych tarcz pomiarowych. Tarcze te planowałem zastosować w pomiarach przemieszczeń na rzeczywistym obiekcie terenowym (eksperyment 4). Osiągnięte wyniki z prac pomiarowo-obliczeniowych wykonanych w ramach drugiego eksperymentu wykazały, że zwiększenie wymiarów tarcz pomiarowych (zarazem zwiększenie ilości punktów pomiarowych) oraz lepsza jakość wykonanych tarcz pomiarowych wpłynęły znacząco na poprawę dokładności pomiarów fotogrametrycznych. Otrzymana w tym eksperymencie dokładność pomiaru wartości kątowych na pojedynczym zdjęciu dla nieruchomej tarczy odniesienia (**1**) nie przekracza $\pm 32^{\text{cc}}$, natomiast dla przemieszczanej tarczy kontrolowanej (**2**) nie przekracza wartości $\pm 58^{\text{cc}}$. W przypadku wartości liniowych dokładność pojedynczego pomiaru jest na poziomie ± 0.014 mm. Uzyskane dokładności fotogrametrycznych pomiarów kątowych i liniowych były zgodne z dokładnościami otrzymanymi w ramach przeprowadzonej wstępnej analizy dokładności.

W monografii opisałem również trzecie laboratoryjne badania testowe (eksperyment 3). Głównym celem tych badań była kompleksowa weryfikacja założeń opracowanej metody. Schematyczne rozmieszczenie aparatury pomiarowej oraz powiązania lokalnych kartezjańskich

układów współrzędnych aparatury pomiarowej wykorzystanej w eksperymencie 3 zilustrowałem na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Schemat rozmieszczenia aparatury pomiarowej w eksperymencie 3 wraz z oznaczonymi lokalnymi układami współrzędnych kartezjańskich



Rys. 10. Schemat wzajemnego powiązania lokalnych kartezjańskich układów współrzędnych aparatury pomiarowej wykorzystanej w eksperymencie 3

Na podstawie analizy rozmieszczenia aparatury pomiarowej (rys. 9) można zauważyć, że podczas realizacji eksperymentu 3 konfiguracja zestawu pomiarowego, a zarazem zależności zachodzące pomiędzy lokalnymi kartezjańskimi układami współrzędnych aparatury pomiarowej są złożone. W rozdziale 5.4 monografii szczegółowo zaprezentowałem przebieg tego eksperymentu, łącznie z ideą wykorzystania dwuosiowego stolika mikrometrycznego 2D do przeprowadzenia justacji zestawu: tarcza pomiarowa – geodezyjny instrument kątomierczy. Zastosowanie stolika mikrometrycznego do przesunięcia tarczy kontrolowanej (2) o zadaną odległość D_{xyz} pozwoliło wyznaczyć kątową orientację lokalnych układów współrzędnych wykorzystanego zestawu pomiarowego. Zrealizowane laboratoryjne badania testowe w ramach eksperymentu 3 potwierdziły wysoką dokładność fotogrametrycznych pomiarów zarówno wielkości kątowych, jak i liniowych.

Czwarty eksperyment, który opisałem w monografii (rozdział 5.5), to prace badawczo-doświadczalne na obiekcie terenowym Książ. Głównym celem tych prac była weryfikacja koncepcji precyzyjnych pomiarów wzajemnego położenia elementów monitorowanego obiektu z wykorzystaniem fotogrametrii jednoobrazowej podczas monitoringu okresowego i sprecyzowanie kroków w kierunku prowadzenia dalszych prac pomiarowych na terenie podziemnych korytarzy w Laboratorium Geodynamicznym Książ [Kaczorowski et al. 2015].

Pomiary fotogrametryczne na obiekcie Książ wykonano w 3 cyklach pomiarowych. Każdy cykl pomiarowy obejmował wykonanie kilku zdjęć tarcz pomiarowych w celu wyznaczenia parametrów kalibracji aparatu. Następnie zarejestrowano od 2 do 3 zdjęć w celu przeprowadzenia właściwych pomiarów przemieszczeń. Zdjęcia wykonałem aparatem Canon 5D Mark II [Canon 2008], który również był użyty w trakcie badań laboratoryjnych.

Prace zrealizowane na obiekcie Książ nie były prowadzone w tak dogodnych warunkach pomiarowych, jakie miały miejsce podczas prac laboratoryjnych. charakteryzowały się:

- brakiem stałego stanowiska kamery podczas realizacji cykli pomiarowych;
- koniecznością wykonywania zdjęć tarcz pomiarowych z różnych stanowisk kamery, w związku z tym prace pomiarowe nie miały charakteru monitoringu ciągłego;
- zastosowaniem w pracach pomiarowych kamery cyfrowej, która wymagała przed wykonaniem zdjęć pomiarowych w każdym cyklu, realizacji procedury kalibracyjnej (za każdym razem inne ogniskowanie aparatu);
- zmiennymi warunkami oświetleniowymi podczas rejestracji zdjęć w poszczególnych cyklach pomiarowych
- znacznym oddaleniem tarcz pomiarowych względem siebie, co było uzależnione od panujących lokalnych warunków geologicznych na badanym uskoku.

Na podstawie zrealizowanych prac badawczych na obiekcie Książ można sformułować następujące wnioski:

- Wyniki otrzymane z prac pomiarowo-obliczeniowych wykazały, że można uzyskać wysokie dokładności wyznaczenia wzajemnego kąto- liniowego położenia tarcz pomiarowych na podstawie pomiarów fotogrametrycznych podczas monitoringu okresowego, stosując wzajemne powiązanie zdjęć w sieć terratriangulacyjną i następnie rozwiązując tę sieć metodą wiązki (klasyczne fotogrametryczne pomiary wielostanowiskowe na wielu zdjęciach). Jest to zgodne z zaprezentowanymi analizami w rozdziale 4 monografii.
- Uzyskane wyniki z prac pomiarowo-obliczeniowych wykonanych zgodnie z autorską metodą pomiarów wykazały wysoką wewnętrzną dokładność wyznaczenia wzajemnego kąto- liniowego położenia tarcz pomiarowych. Dokładność ta jest na poziomie setnych części milimetra i jest zgodna z dokładnością uzyskaną w ramach przeprowadzonych wstępnych analiz dokładności. Stąd nasuwa się wniosek, że uzyskanie wysokich dokładności pomiarów jest możliwe podczas prowadzenia monitoringu ciągłego.

- Wyznaczenie wzajemnych zależności kątowno-liniowych położenia tarcz pomiarowych zgodnie z przedstawioną koncepcją jest o rząd dokładności gorsza w odniesieniu do dokładności uzyskanych w warunkach laboratoryjnych i waha się w granicach od ± 0.16 mm do ± 0.47 mm dla wartości liniowych i w granicach od $\pm 0.0767^{\circ}$ do $\pm 0.1209^{\circ}$ dla wartości kątowych, przy czym błędy określenia składowej wektora translacji (m_{TZ}) i błędy kątów m_{ω} i m_{φ} mają większe wartości od pozostałych wyznaczanych wielkości, co jest zgodne z przedstawionymi zagadnieniami w rozdziale 4. Uzyskane wyniki obliczeń potwierdziły przewidywane przed eksperymentem dokładności.
- W celu uzyskania wysokich dokładności pomiarów fotogrametrycznych realizowanych w ramach prowadzonego monitoringu na obiekcie Książ należy:
 - umiejscowić kamerę na wybudowanym słupie obserwacyjnym zlokalizowanym w sąsiedztwie szczelinomierzy fotogrametrycznych lub na statywie przyściennym;
 - do wykonania zdjęć zastosować wcześniej skalibrowaną kamerę. Do kalibracji kamery wykorzystać odpowiednią liczbę zdjęć wykonanych przy ustalonych parametrach fotografowania.
 - zmodyfikować sposób mocowania tarcz pomiarowych na skrzydłach uskoków wtórnych w taki sposób, aby tarcze pomiarowe były zamocowane do sztywnej konstrukcji wysięgników przytwierdzonych do istniejących już na skrzydłach uskoków kotew. Tarcze pomiarowe po zamocowaniu na wysięgnikach powinny: znajdować się blisko siebie, wypełniać w maksymalnym stopniu kadr zdjęcia i być zlokalizowane centralnie względem osi kamery;
 - tarcze pomiarowe oświetlić odpowiednio dobranym światłem rozproszonym (odpowiednia intensywność i lokalizacja źródeł światła, aby nie było cieni i odbłyśków na fotografowanych tarczach).

Podsumowanie

W monografii została zaprezentowana i zweryfikowana w warunkach laboratoryjnych i terenowych autorska metoda wyznaczenia wzajemnego przestrzennego położenia elementów mierzonego obiektu na podstawie pomiarów fotogrametrycznych przeprowadzonych tylko na jednym zdjęciu. Rozwiązanie to jest głównie dedykowane do pomiarów przemieszczeń na badanym obiekcie w ramach prowadzonego monitoringu ciągłego. Opracowana metoda pomiarów fotogrametrycznych, w przeciwieństwie do znanych z literatury fotogrametrycznych metod pomiarów realizowanych na jednym zdjęciu (2D), pozwala wyznaczyć położenie elementów mierzonego obiektu w przestrzeni (3D), tj. przesunięcia w trzech kierunkach: X , Y i Z , jak również kąty obrotów: ω (omega), φ (fi) i κ (kappa).

W przypadku wykonywania prac pomiarowych na obiekcie w ramach prowadzonego monitoringu należy:

- kamerę umieścić na stabilnym stanowisku, którym może być słup obserwacyjny, statyw przyścienny, ewentualnie statyw, gdy pomiar realizowany jest w krótkim okresie czasu (np. kilka / kilkadziesiąt godzin).
- tarcze pomiarowe oświetlić światłem rozproszonym o odpowiedniej intensywności i lokalizacji źródeł światła, tak aby nie występowały cienie na tarczach pomiarowych;
- tarcze pomiarowe mocować na badanym obiekcie w taki sposób, aby były blisko siebie, wypełniały w maksymalnym stopniu kadr zdjęcia i były zlokalizowane centralnie względem osi kamery.

Realizacja prac w ramach monitoringu okresowego nie zawsze umożliwia spełnienie wszystkich ww. warunków. W takich przypadkach, w celu osiągnięcia wysokiej dokładności wyników pomiarów fotogrametrycznych, należy zastosować klasyczne rozwiązania

fotogrametryczne, polegające na wzajemnym powiązaniu zdjęć i rozwiązaniu sieci terratriangulacyjnej metodą niezależnych wiązek.

Istotą zaprezentowanej metody pomiarów fotogrametrycznych jest wyznaczenie przemieszczeń w przestrzeni trójwymiarowej elementów obiektu reprezentowanych przez tarcze pomiarowe. Pomiar fotogrametryczny przeprowadzany jest na sekwencji pojedynczych zdjęć pomiarowych zarejestrowanych w kolejnych krokach czasowych. W celu sprawdzenia dokładności i niezawodności zaproponowanej metody pomiarów zostały przeprowadzone badania eksperymentalne w warunkach laboratoryjnych i na obiekcie terenowym. Opracowałem i wykonałem fotogrametryczne tarcze pomiarowe, które są elementem zestawu aparatury pomiarowej.

Przeprowadzone eksperymentalne prace laboratoryjne miały za zadanie określenie dokładności pomiarów fotogrametrycznych na sekwencji zdjęć wykonanych dla dwóch tarcz pomiarowych w różnym ich wzajemnym położeniu. Drugim celem badawczym było określenie dokładności parametrów geometrycznych charakteryzujących wzajemne ustawienie w przestrzeni tarcz pomiarowych.

Na podstawie przeprowadzonych prac badawczo-eksperymentalnych i analiz dokładności można wysnuć następujące wnioski:

1. Błąd powtarzalności wyznaczonych metodami fotogrametrycznymi wielkości kątowych położenia tarcz pomiarowych w dogodnych warunkach oświetleniowych (przy odległości pomiaru 0.65 m) wyniósł od $\pm 7''$ do $\pm 37''$ (średnio $\pm 22''$, co wynosi $\pm 0.035\text{mm}/1\text{m}$), natomiast błąd wyznaczonych wielkości liniowych mieścił się w granicach od $\pm 0.014\text{ mm}$ do $\pm 0.026\text{ mm}$ (średnio był na poziomie $\pm 0.018\text{ mm}$).
2. Wyznaczone średnie błędy względnych położzeń tarcz pomiarowych dla parametrów kątowych przy odległości pomiaru około 0.65 m wahały się w granicach od $\pm 6''$ do $\pm 64''$ (średnio $\pm 35''$ co daje $\pm 0.055\text{ mm}/1\text{m}$), natomiast średnie błędy parametrów liniowych (ΔX , ΔY , ΔZ) wyniosły od $\pm 0.008\text{ mm}$ do $\pm 0.029\text{ mm}$ (średnio dla poszczególnych składowych wektora translacji to ok. $\pm 0.016\text{ mm}$).
3. Średni błąd pomiaru przesunięcia tarcz pomiarowych w odniesieniu do referencyjnych przesunięć zadanych śrubami mikrometrycznymi m_d wyniósł $\pm 0.02\text{ mm}$.
4. W przypadku występowania na obiekcie niedogodnych warunków pomiarowych (np. nieodpowiednie oświetlenie) dokładność pomiaru może być nawet o rząd dokładności gorsza.
5. Zamontowanie zespołu fotogrametrycznych tarcz pomiarowych na elementach kontrolowanego obiektu umożliwia prowadzenie monitoringu ciągłego zachodzących przestrzennych zmian w czasie oraz pozwala określić bieżący stan obiektu badań – monitoring ten z powodzeniem może być prowadzony z wykorzystaniem tylko jednej kamery pomiarowej.
6. Opracowane przyrządy i instrumenty pomiarowe mogą być zestawione w różnych konfiguracjach, w dostosowaniu do warunków panujących na obiekcie badań. Zaprezentowany w pracy zestaw pomiarowy jest dedykowany do pomiarów przemieszczeń względnych 3D (zarówno liniowych jak i kątowych) występujących na kontrolowanym obiekcie. Zestaw ten może być również zastosowany do pomiarów przemieszczeń bezwzględnych po uzupełnieniu go o dodatkowe przyrządy i instrumenty geodezyjne.

Zaprezentowana w pracy fotogrametryczna metoda pomiarów może mieć następujące zastosowanie:

- w przemyśle maszynowym do oceny wzajemnego położenia: elementów maszyn, podzespołów maszyn, urządzeń przemysłowych lub produkcyjnych linii technologicznych.

W tym przypadku warunkiem zastosowania tej metody jest możliwość zamocowania tarcz pomiarowych do wyodrębnionych elementów mierzonych podzespołów;

- w badaniu zachowania się budowli inżynierskich (np. obiektów: mostowych, hydrotechnicznych, itp.);
- jako pochyłomierze fotogrametryczne podczas monitoringu geodezyjnych stanowisk obserwacyjnych,
- w instrumentoznawstwie geodezyjnym do kalibracji pomocniczego osprzętu geodezyjnego np. przy ocenie stałości ustawienia łat pomiarowych,
- przy integracji pomiarów fotogrametrycznych z pomiarami geodezyjnymi w celu wyznaczania przemieszczeń bezwzględnych.

Literatura

- Aicon, 2015: Vehicle Dynamics. Non-contact high-speed monitoring of wheel and engine motions. Measure the advantage. AICON 3D System GmbH, Biberweg, Braunschweig, Germany.
- Armer G.S.T (Ed.), 2001: Monitoring and Assessment and Structures. Spon Pres, Taylor & Francis Group, ss. 167.
- Barazzetti L., Scaioni M., 2009: Crack measurement: Development, testing and applications of an automatic image-based algorithm. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64, No. 3, s. 285-296, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.02.004.
- Berkovic G., Shafir E., 2012: Optical methods for distance and displacement measurements. Advances in Optics and Photonics 4, 441–471, <https://doi.org/10.1364/AOP.4.000441>.
- Bernasik J., Mikrut S., 2003: Fotogrametria inżynierska. (skrypt akademicki w wersji elektronicznej, recenzowany) Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków, ss. 93.
- Bishop R. (Editor), 2002: The Mechatronics Handbook. CRC Press, Boca Raton, Florida, ss. 1272.
- Bouguet J. Y., 2015: Camera Calibration Toolbox for Matlab, Computer Vision Research Group, California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, CA, USA https://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, October 2015.
- Bösemann W., 2016: Industrial photogrammetry - accepted metrology tool or exotic niche. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B5, 15-24, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-15-2016.
- Butowtt J., Kaczyński R., 2003: Fotogrametria. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, ss. 353.
- CANON, 2008: Canon EOS 5D Mark II – Instrukcja obsługi. Canon Europa N.V., Amstelveen, The Netherlands.
- Clarke T.A., Ellis T.J., Robson S., 1994: High accuracy 3-D measurement using multiple camera views. IEE Colloquium Digest No. 1994/054.
- Ćmielewski K., 2007: Zastosowanie technik światłowodowych i laserowych w precyzyjnych pomiarach kształtu i deformacji obiektów inżynierskich. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu nr 551, Rozprawy CCXLVI, Wrocław, ss. 242.
- Djunaedi I., 2003: Close range photogrammetry for precision engineering. Design and Application of Technology, s. 194-199.
- Fraser C.S., 1982: Optimization of Precision in Close-Range Photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.48, No 4, s. 561-570.
- Fraser C.S., 1984: Network Design Considerations for Non-Topographic Photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 50, No. 8, s. 1115-1126.
- Fraser C.S., 1988: State of the art in industrial photogrammetry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. XXVII(V), Kyoto, s. 166-181.
- Fraser, C.S., 1992: Photogrammetric measurement to one part in a million. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 58, No. 3, s. 305-310.
- Fraser, C.S., 1993: A resume of some industrial applications of photogrammetry. ISPRS Journal

- of Photogrammetry and Remote Sensing, 48 (3), s. 12-23.
- Ghosh S., 2005: Fundamentals of computational photogrammetry. Concept Publishing Company, New Delhi-110059, ss. 254.
- Gołuch P., 1997: Powiązanie metod przestrzennego wycięcia wstecz i przekształceń rzutowych w analitycznym opracowaniu stereogramu pomiarowego. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, s. Geodezja i Urządzenia Rolne, Vol. XIV No. 324, Wrocław.
- Gołuch P., Ćmielewski K., Kuchmister J., Kowalski K., 2012: The possibility of using close-range mono-photogrammetry in measuring relative displacements of rock blocks. 13th Czech-Polish Workshop "On Recent Geodynamics of the Sudety Mts. and Adjacent Areas", Wrocław-Pawłowice, Poland, November 22-24, 2012 (referat).
- Gołuch P., Ćmielewski K., Kuchmister J., Kowalski K., 2013: The possibility of using close-range mono-photogrammetry in measuring relative displacements of rock blocks. Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 10 No. 4 (172), Prague, Czech Republic 2013, s. 411-420.
- Gołuch P., Ćmielewski K., Kuchmister J., 2014a: Zastosowanie metody fotogrametrycznej do określenia odchyłki położenia osi badanego elementu od nominalnego kierunku. XIX Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe "Zdalne metody pomiarowe dla potrzeb modelowania 3D", Poznań - Wąsowo, 18-19.09.2014 (poster, materiały konferencyjne), s. 15.
- Gołuch P., Kuchmister J., Ćmielewski K., Kowalski K., 2014b: Measurements of deviations from circularity of rotating parts of the machine by using fibre signalling based on the example of the lathe spindle. Acta Scientiarum Polonorum, s. Geodesia et Descriptio Terrarum, Vol. 13 No. 1-2, Wrocław, s. 23-36.
- Gołuch P., Ćmielewski K., Kuchmister J., 2015a: Precyzyjne pomiary prostoliniowości prowadnic z wykorzystaniem fototachimetru elektronicznego i metody autorefleksyjnej. VIII Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformacyjne "Współczesne technologie geoinformacyjne w modelowaniu przestrzeni", Warszawa-Serock, 17-18 września 2015 r. (poster, materiały konferencyjne), s. 28.
- Gołuch P., Ćmielewski K., Kuchmister J., 2015b: Precise measurements of rock blocks movements with the use of Leica Nova MS50 MultiStation and autoreflection method. 16th Czech-Polish Workshop "On Recent Geodynamics of the Sudety Mts. and Adjacent Areas", Srebrna Góra, Poland, November 5-7, 2015 (poster, materiały konferencyjne), s. 22.
- Gołuch P., Ćmielewski K., Kuchmister J., 2016a: Zastosowanie zmodyfikowanej metody autorefleksyjnej w precyzyjnych pomiarach inżynierskich. XX Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe "Fotogrametria dla geoinformacji", Wrocław, 19-21 września 2016 r. (poster, materiały konferencyjne), s. 47.
- Kaczorowski M., Gołuch P., Kuchmister J., Ćmielewski K., Zdunek R., Borkowski A., 2015: Integrated tectonic studies: a new concept explored in the Geodynamic Laboratory of the Space Research Center in Książ. Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 12 No. 2 (178), Prague, Czech Republic, s. 169-179, doi: 10.13168/AGG.2015.0012.
- Kamiński W., Bojanowski K., Dumalski A., Mroczkowski K., Trystuła J., 2008: Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego ScanStation firmy Leica w badaniach deformacji obiektów budowlanych. Czasopismo Techniczne z.2-Ś. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, s. 139-147.
- Kraus K., 2007: Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans. Walter de Gruyter, Berlin-New York, ss. 459.
- Kurczyński Z., 2014: Fotogrametria. PWN, Warszawa, ss. 696.
- Lazzarini T. i in., 1977: Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia, PPWK, Warszawa, ss. 638.
- Luhmann T., 2009: Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 64, s. 275-284., doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.01.002.
- Luhmann T., 2010: Close range photogrammetry for industrial applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, ISSN: 0924-2716, Vol. 65, Iss. 6, s. 558-569, doi: doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003.
- Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., 2011: Close Range Photogrammetry. Principles, techniques and applications. Whittles Publishing, Dunbeath, UK, ss. 510.

- Maas H.-G., 1997. Dynamic photogrammetric calibration of industrial robots. In: Videometrics V. In: SPIE Proceedings Series, vol. 3174.
- Maas H.-G., Hampel U., 2006: Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 72, No. 1, s. 39–45.
- Nishiyama S., Minakata N., Kikuchi T., Yano T., 2015: Improved digital photogrammetry technique for crack monitoring. Advanced Engineering Informatics, Vol. 29, Iss. 4, s. 851-858, ISSN 1474-0346, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.05.005>.
- Ogundare J.O., 2016: Precision surveying: the principles and geomatics practice. Wiley, Hoboken, New Jersey, ISBN 978-1-119-10251-9.
- Piasecki M. B., 1973: Fotogrametria lotnicza i naziemna. PPWK, Warszawa, ss. 694.
- Rinner K., Burkhardt R, (Eds.), 1972: Photogrammetrie. Band IIIa/1-3. Handbuch der Vermessungskunde. Jordan/Eggert/Kneissl - J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, ss. 2321.
- Sawicki P., 2002: Fotogrametryczne systemy do pomiaru punktów w bliskim zasięgu. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 12., s. 345-359.
- Sawicki P., 2008: Średnioformatowa lustrzanka cyfrowa Mamiya ZD (21.3 MP) – nowy sensor wizyjny do aplikacji bliskiego zasięgu. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 18b, s. 559-568.
- Sitek Z., 1991: Fotogrametria ogólna i inżynierska. PPWK, Warszawa-Wrocław, ss. 757.
- Świątkiewicz A, 1983: Fotogrametria, Wyd. III, PWN, Warszawa, ss. 335.
- Uffenkamp, V., 1993: State of the art of high precision industrial photogrammetry. Proceedings, 3rd International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA 93), Annecy, France, September 28-October 1, s. II/153-II/165.
- US Army Corps of Engineers, 2018: Engineering and design: Structural deformation surveying. Manual No. 1110-2-1009. Department of the Army, US Army Corps of Engineers Washington, DC.
- Valença J., Dias-da-Costa D., Júlio E., Araújo H., Costa H., 2013: Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing. Measurement 46 (2013), s. 433–441, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.07.019>.
- Webster J.G., Eren H., (Eds.), 2014: Measurement, Instrumentation, and Sensors. Handbook. Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. CRC Press, Taylor & Francis Group, ss. 1606.
- Zhang Z., 1999: Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In International Conference on Computer Vision (ICCV), s. 666–673.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

- 1) Autorstwo bądź współautorstwo 169 prac twórczych (w tym 142 po uzyskaniu stopnia doktora):
 - a) 7 artykułów w czasopismach z listy JCR (w tym 7 po uzyskaniu stopnia doktora);
 - b) 39 artykułów w czasopismach z listy „B” MNiSW (w tym 27 po uzyskaniu stopnia doktora);
 - c) rozdziały w 6 monografiach (w tym 3 po uzyskaniu stopnia doktora);
 - d) 3 artykuły w czasopismach międzynarodowych spoza listy MNiSW (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora);
 - e) 1 artykuł w czasopiśmie branżowym spoza listy MNiSW (po uzyskaniu stopnia doktora);
 - f) 15 wygłoszonych referatów na konferencjach międzynarodowych (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora);
 - g) 31 wygłoszonych referatów na konferencjach krajowych (w tym 21 po uzyskaniu stopnia doktora);
 - h) współautorstwo 49 referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych – bez wygłoszenia (w tym 47 po uzyskaniu stopnia doktora);
 - i) 1 przyznany patent na wynalazek (po uzyskaniu stopnia doktora);

- j) 12 zgłoszonych wniosków do Urzędu Patentowego RP o udzielenie patentów na wynalazki (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora);
 - k) 5 zgłoszonych wniosków do Urzędu Patentowego RP o udzielenie prawa na wzór użytkowy (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora).
- 2) Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne: 9 osiągnięć (w tym 8 po uzyskaniu stopnia doktora).
 - 3) Opracowanie lub udział w opracowaniu 45 raportów końcowych z realizacji projektów, ekspertyz i prac zawartych w punktach II.J.2, II.J.3, III.M oraz III.Q.9 *Załącznika 4*, w których byłem kierownikiem lub głównym wykonawcą.
 - 4) Udział w 20 krajowych projektach badawczych (w tym 16 po uzyskaniu stopnia doktora), jako kierownik, główny wykonawca lub wykonawca.
 - 5) Nagrody za działalność naukową: 10 nagród (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora), w tym 6 Nagród JM Rektora Akademii Rolniczej / Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu i 1 nagroda międzynarodowa (czasopisma Measurement / Elsevier).
 - 6) Uczestnictwo w 2 programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych (w tym 1 po uzyskaniu stopnia doktora).
 - 7) Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych: 5 razy (w tym 3 po uzyskaniu stopnia doktora).
 - 8) Otrzymane nagrody i wyróżnienia (za wzorowe, wyjątkowo sumienne wykonywanie obowiązków zawodowych) inne niż wymienione w pkt II.K *Załącznika 4*: 17 nagród (w tym 16 po uzyskaniu stopnia doktora).
 - 9) Udział w konsorcjach i sieciach badawczych: 1 (po uzyskaniu stopnia doktora).
 - 10) Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami, innymi niż wymienione w pkt II.J *Załącznika 4*: 7 projektów (w tym 5 po uzyskaniu stopnia doktora).
 - 11) Osiągnięcia dydaktyczne – kilkadziesiąt działań m.in.:
 - a) prowadziłem lub prowadzę zajęcia (wykłady i ćwiczenia) dla studentów kierunków Geodezja i Kartografia, Inżynieria Środowiska, Budownictwo, Gospodarka Przestrzenna i Ochrona Środowiska – na studiach stacjonarnych (dziennych), jak i niestacjonarnych (zaocznych); moje średnie obciążenie w ostatnich latach to ok. 450 godzin dydaktycznych w ciągu roku akademickiego;
 - b) byłem wykładowcą i prowadzącym warsztaty z zakresu fotogrametrii cyfrowej na Studiach Podyplomowych: razem 18 edycji (w tym 15 po uzyskaniu stopnia doktora).
 - 12) Osiągnięcia w zakresie popularyzacji nauki – kilkadziesiąt działań m.in.:
 - a) wygłoszenie referatu zamawianego z okazji Światowego Dnia Systemów Informacji Geograficznej GISDay na Wydziale Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Akademii Rolniczej we Wrocławiu w 2004 roku;
 - b) prowadzenie warsztatów z zakresu fotogrametrii dla uczniów Techników Geodezyjnych i Liceów Ogólnokształcących: ogółem 34 spotkania (w tym 18 razy po uzyskaniu stopnia doktora).
 - 13) Opieka naukowa nad studentami – kilkadziesiąt działań m.in.:
 - a) Opiekun roku na studiach inżynierskich i magisterskich kierunku geodezja i kartografia: 2 razy po 5 lat;
 - b) Promotor 101 prac dyplomowych (41 magisterskich, 60 inżynierskich);

- c) Recenzent 73 prac dyplomowych (magisterskich i inżynierskich) na kierunku geodezja i kartografia, których opiekunami byli inni pracownicy wydziału;
 - d) Promotor 2 prac dyplomowych realizowanych w ramach Studiów Podyplomowych;
 - e) Członek dyplomowych komisji egzaminacyjnych na kierunku geodezja i kartografia: razem ponad 60 razy;
 - f) Od 2007 roku prowadzę zajęcia dla studentów zagranicznych przebywających na Uczelni (w ramach programów ERASMUS i ERASMUS+) z przedmiotów: *Digital Photogrammetry* (łącznie 47 studentów) oraz *Photogrammetry and Remote Sensing* (łącznie 29 studentów);
 - g) Czynne uczestniczenie w pracach Studenckiego Koła Naukowego Geodetów (m.in. jako opiekun naukowy w realizowanych projektach);
 - h) Opieka naukowa nad studentami z zagranicy przyjeżdżającymi na staż: 1 student.
- 14) Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego: 1 doktorant.
- 15) Zagraniczne staże: 8 razy.
- 16) Ekspertyzy wykonane na zamówienie: 4 (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora).
- 17) Udział w zespołach eksperckich i konkursowych – ogółem 9 razy (w tym 8 po uzyskaniu stopnia doktora).
- 18) Recenzje artykułów naukowych: 22 (w tym 15 recenzji dla czasopism zagranicznych wyróżnionych w JCR) – (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora).
- 19) Uczestnictwo w krajowych projektach realizowanych we współpracy z podmiotami zewnętrznymi: ogółem 22.
- 20) Sprawuję opiekę nad *Pracownią fotogrametryczną* (od 1990 r.) oraz od 2004 r. nad *Pracownią fotogrametrii cyfrowej* w KGiF / IGiG UPWr.
- 21) W 3 kadencjach (2008-2012; 2012-2016 i obecnie 2016-2020) byłem i jestem członkiem Wydziałowej Komisji Wyborczej na Wydziale Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji UPWr; pełniona przeze mnie funkcja to Zastępca Przewodniczącego Komisji.
- 22) Sumaryczna liczba punktów MNiSW za publikacje (łącznie z publikacją stanowiącą osiągnięcie naukowe): 529 (w tym 491 po uzyskaniu stopnia doktora).
- 23) Sumaryczny *Impact Factor*: 4.957 (w tym 4.957 po uzyskaniu stopnia naukowego doktor).
- 24) Liczba cytowań publikacji:
- a) według bazy *Web of Science (WoS)*: 6 (w tym 6 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora),
 - b) według bazy *Scopus*: 5 (w tym 5 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora),
 - c) według bazy *Google Scholar*: 103 (w tym 102 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora).
- 25) Indeks Hirscha:
- a) według bazy *Web of Science (WoS)*: 1 (w tym 1 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora),
 - b) według bazy *Scopus*: 1 (w tym 1 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora),
 - c) według bazy *Google Scholar*: 6 (w tym 6 po uzyskaniu stopnia naukowego doktora).

Szczegółowy opis powyższych osiągnięć znajduje się w części II. i III. *Załącznika 4*.

Wrocław, 23.04.2019 r.

