

Leszek Kolondra

FOTOGRAMETRYCZNE POMIARY PRZEMYSŁOWE I BUDOWLANE Z UWZGLĘDNIENIEM ASPEKTU CAD/CAM*

1. Wstęp

Ponad 30 spośród 108 prac nadesłanych do tej grupy roboczej, można najkrócej streścić jednym zdaniem: automatyzacja pomiarów fotogrametrycznych w przemyśle nadchodzi wielkimi krokami i co najważniejsze w tym, wyeliminowana została dotychczasowa słabość metody - wyniki można uzyskiwać w czasie rzeczywistym.

Referaty poświęcone były bowiem, w przeważającej większości, wykorzystaniu zobrażeń cyfrowych w szerokim zakresie zastosowań w przemyśle - od okrętowego począwszy, poprzez pomiary skomplikowanych instalacji zakładów chemicznych, obiektów kolejowych, na nuklearnych skończywszy, przy czym prawie połowa prac poświęcona była pomiarom obiektów dynamicznych [Chen, Robson, Cooper, Taylor, V; Lee, Faig, V; Geissler, Jahne, V; Hering, Balschbach, Jahne, V; Hommainnejad, V; Knizhnikow, Geinman, V; Mori, Setojima, Akamatsu, Yamana, Yahara, V; Matsumoto, Murakami, Nakagawa, V; Dold, Peipe, V; Robson, Setan, V].

Nowatorskie technologie wymagają nowych rozwiązań sprzętowych i programowych, i takie zostały zaprezentowane [Kochi, Othani, Nakamura, Utiyama, Yamada, Chida, Noma, Ito, Aoki, V; Jones, Chapman, Hamid, Deacon, V; Matsumoto, Murakami, Nakagawa, V; Oksanen, V; Schewe, Moncrieff, Setan, V; Schneider, V; Streilein, V; i odpowiednio Kochi, Othani, Nakamura, Utiyama, Yamada, Chida, Noma, Ito, Aoki, V; Geissler, Jahne, V; Forlani, Guzzetti, Pinto, V; Hering, Balschbach, Jahne, V; Hommainnejad, V; Macklin, Brade, Celentano, Tait, van Lente, V; Matsumoto, Murakami, Nakagawa, V; Dold, Peipe, V; Petran, Krzystek, Bonitz, V; Schneider, V].

Najbardziej zaawansowanym technologicznie metodom rozpoznawania obiektów poświęcone były cztery prace [Heikkinen, V; Huang, Trinder, Donnelly, V; Petran, Krzystek, Bonitz, V; Streilein, V], badaniom modelowym - także cztery [Chen, Robson, Cooper, Taylor, V; Faig, El-Habrouk, Li, Hosny, V; Geissler, Jahne, V; Hering, Balschbach, Jahne, V].

Trzy prace dotyczyły ściśle zagadnień określanych jako fotogrametria podwodna [Geissler, Jahne, V; Hering, Balschbach, Jahne, V; Schewe, Moncrieff, Setan, V].

* Publikację opracowano na podstawie referatów prezentowanych na XVIII Kongresie ISPRS w ramach Komisji Nr V „Techniki bliskiego zasięgu i widzenie maszynowe”

Cztery prace poświęcone były rozważaniom teoretycznym, z uwzględnieniem kwestii stosowalności metod fotogrametrycznych w warunkach trudnych i szkodliwych.

Wykorzystanie zobrażeń cyfrowych pozyskiwanych różnym sprzętem, zorientowane było wielokierunkowo, dla pozyskania informacji o badanych obiektach w sensie:

- cech geometrycznych, usytuowania w przestrzeni (monitoring, inwentaryzacja);
- rozpoznawania kształtów (modelowanie);
- zmian cech geometrycznych (deformacje, odkształcenia);
- dynamika zmian (pomiar prędkości, częstotliwości) dla przeważającej większości aplikacji, jak już wyżej wspomniano, osiąganych w czasie rzeczywistym (lub niemal rzeczywistym).

Próbując scharakteryzować ogół nadesłanych prac na podstawie częstości występowania słów kluczowych, można stwierdzić, że w referatach dominującymi tematami były:

- techniki cyfrowe (digital) z zapisem cyfrowym (CCD, sensor, scanner);
- wykorzystanie technik automatycznej korelacji obrazu (automation, matching, edge detection);
- przestrzenny opis obiektu (3-D, vision, surface measurement).

Niniejsza próba streszczenia prezentowanych prac ukierunkowana jest głównie na konkretne aplikacje przemysłowe, bez zagłębiania się w problemy technologiczne stanowiące podstawowe założenia, które szerzej potraktowane są w dwóch publikowanych równolegle opracowaniach prof. dr. hab. inż. Józefa Jachimskiego oraz dr. inż. Piotra Sawickiego.

2. Przegląd referatów

2.1. Tematy ogólne i teoretyczne

Wprowadzenie do nowoczesnych metod fotogrametrycznych nowych sposobów pozyskiwania danych burzy dotychczasowe zasady projektowania i wykonywania zdjęć (zobrazowań). Autorka Oksanen w swojej pracy stwierdza, że projektowanie sieci zdjęć fotogrametrycznych jest złożonym zadaniem i nie ma stałych reguł postępowania ani najlepszego rozwiązania. Twierdzi, że oprócz wcześniej stawianych kwestii [cytowana praca: *Fraser, 1989*], należy uwzględnić szereg innych warunków (wymagania co do rozdzielczości obrazu, głębi ostrości, oświetlenia, widzialności, rozmieszczenia punktów kontrolnych przy zbieżnych osiach zdjęć i inne).

Dotychczasowe rozwiązania pomocne w tym temacie [cytowana praca: *Mason, 1994*] dawały odpowiedź w wymiarze płaskim - prezentowana praca jest rozwiązaniem przestrzennym 3D. Opracowany program (MMD - Measurement Model Design) pomaga określić a priori dokładności w zależności od parametrów użytego sensora, jego usytuowań i orientacji względem obiektu przy założonych punktach kontrolnych. W wyniku otrzymuje się wizualizację rozkładu błędów przestrzennych (MRSE - Mean Radial Spherical Errors), jakich można się spodziewać przy wszystkich założonych parametrach.

Zagadnienie stosowalności metod fotogrametrycznych jest poruszane kilkakrotnie. Analizują go *Ganci i Shortis [17]* na przykładzie pomiaru elementu pieca (kryza), proponując

uprzednie rozważenie cech definiujących metodologię pomiaru (koszt sprzętu, łatwość jego wykorzystania, potencjalna dokładność, uniwersalność, operatywność wykonawcy, żądania zleceniodawcy, możliwości pracy sprzętu w systemie on-line, czasochłonność) z czynnikami nią rządzącymi (posiadany budżet, wielkość obiektu, wymagana dokładność, lokalizacja obiektu, logistyka, wymagania zleceniodawcy, wymagania „on-line”, wymogi terminowe). Konkludując, autorzy wykazują przewagę zastosowanych rozwiązań opartych na fotogrametrii cyfrowej w stosunku do metod klasycznych.

Najkrótsza praca [Dumont, V] podkreśla zalety metod fotogrametrii cyfrowej w pomiarach wykonywanych w warunkach szkodliwych lub uciążliwych (obiekty nuklearne, podwodne, usytuowane w ekstremalnych temperaturach, w komorach próżniowych lub w pomieszczeniach o ograniczonych rozmiarach itp.). Autor proponuje rozwiązania metodologiczne, ilustrując je odpowiednio.

2.2. Badania modelowe

Pierwsza praca [Chen, Robson, Cooper, Taylor, V] poświęcona jest ocenie trzech różnych metod pozyskiwania danych dla pomiaru i analizy deformacji modelowego obiektu geotechnicznego. Sporo miejsca poświęcono analizie obrazu i wynikom uzyskanym po kompresji zapisu metodą JPEG, dając we wnioskach szereg interesujących spostrzeżeń.

Druga praca [Faig, El-Habrouk, Li, Hosny, V] daje porównanie i ocenę wyników uzyskanych na modelu testowym z wykorzystaniem dwóch źródeł pozyskiwania danych (kamera cyfrowa oraz tradycyjny aparat fotograficzny).

2.3. Fotogrametria przemysłowa

2.3.1.

Autor najobszerniejszej pracy (referat zamówiony) - [Johnson, V], poświęconej praktycznemu wykorzystaniu metod fotogrametrii cyfrowej (DCRP - Digital Close-Range Photogrammetry) w budownictwie okrętowym już w streszczeniu zamieszcza stwierdzenie o przewadze metod fotogrametrii cyfrowej nad tradycyjnymi, zwłaszcza gdy wspólnie z nimi stosuje się techniki modelowania CAD i wizualizacje wyników pomiaru.

Autor dość szczegółowo opisuje zastosowane metody, sprzęt i oprogramowanie ilustrując materiał przykładami.

2.3.2.

Pomiarowi składowych elementów instalacji przemysłowych (rury, przewody, kształtki, kryzy itp.) poświęcone są aż trzy prace [Bosemann, V; Jones, Chapman, Hamid, Deacon, V; Matsumoto, Souda, V]. Stosując do rejestracji takich obiektów różne kamery CCD (lub ich całe zespoły) wraz z niezbędnym do tego oprzyrządowaniem (frame grabber'y, stacje robocze lub PC) i oprogramowaniem, autorzy uzyskują w czasie niemal rzeczywistym informacje o mierzonych obiektach z dokładnością poniżej 1 mm (przy odległościach od obiektu do 4 m).

2.3.3.

Tematyce pomiarów kolejowych poświęcona jest ciekawa praca autorów japońskich [Matsumoto, Murakami, Nakagawa, V] dająca nową propozycję sprzętową (liniowa kamera

CCD) do rejestracji stanu szyn kolejowych i detekcji ich defektów (na przykładzie kolei Shinkansen).

Zastosowana kamera wraz z szybkim transmittersem danych, stacją roboczą UNIX pozwoliła przy „szybkości podróźnej” rzędu 20 km/godz. rejestrować dane z rozdzielczością 0,5 mm/linię. Autorzy narzekają na zbyt długi jeszcze czas opracowania wyników - dane dotyczące odcinka 21 km, zajmujące 55 GBajtów pamięci, opracowuje się 5 dni.

Podkreślają mocno przydatność metody do detekcji zdecydowanej większości defektów szyn.

2.3.4.

Nowy system pomiaru powierzchni proponuje zespół 9 autorów [*Kochi, Othani, Nakamura, Utiyama, Yamada, Chida, Noma, Ito, Aoki, V*] japońskiej korporacji TOPCON. Autorzy podają opis kompletnej linii technologicznej (dwie kamery CCD, na wspólnej bazie, z projektorem rzutującym desen teksturowy, stacją roboczą oraz niezbędnymi dyskami do zapisu danych) wraz z zastosowanymi procedurami kalibracyjnymi i definiującymi mierzoną powierzchnię. Pomiar wykonywany był automatycznie (stereo matching) na stacji roboczej PI-1000. W wyniku uzyskiwano obraz poziomicowy powierzchni, widok perspektywiczny oraz przekroje poprzeczne. Wszystkie wyniki w postaci typowych zbiorów AutoCAD (*.DXF).

Temat pomiaru „trudnych” powierzchni (brak naturalnej tekstury) podejmuje także trójka angielskich autorów [*Singh, Chapman, Atkinson, V*], proponując niecodzienne rozwiązanie. Dla rejestracji ruchu powierzchni stropu piaskowca w kopalni węgla użyli małego, ręcznego laserowego projektora rzutującego regularną siatkę punktów. Projektor (o wymiarach 8 cm długości oraz 1,7 cm średnicy) umieszczono na jednym stanowisku bazowym, zaś kamerę CCD na drugim. Oba urządzenia umieszczone były osiowo na lunetach Geodimetrów, co ułatwiło określenie orientacji zewnętrznej zobrazowania. Autorzy omawiają problemy z poprawną obróbką obrazu cyfrowego (właściwy stopień tresholdingu) podkreślając wpływ kontrastu tła na poprawność celowania na obraz punktów.

We wnioskach znajdujemy stwierdzenie „jednoczesna projekcja wielu wyraźnych sztucznych znaczków sygnalizacyjnych przy użyciu projektora laserowego z siatką dyfrakcyjną zapewnia wysoką dokładność automatycznego pomiaru obiektów pozbawionych naturalnej tekstury powierzchni”.

2.3.5.

Bezzałogowy balon na uwięzi z kamerą video wykorzystali autorzy japońscy [*Mori, Setojima, Akamatsu, Yamana, Yahara, V*] do automatycznego monitoringu ruchu ulicznego. Komputerowa analiza obrazu, matching oparty na korelacji obrazu oraz automatyczne śledzenie ruchomych pojazdów posłużyły do określenia ich położenia oraz wyznaczenia prędkości.

Obliczenia uzupełnia analiza dokładnościowa oraz wnioski, w których oprócz wykazania przydatności metody, autorzy wskazują na pewne trudności w automatycznym rozpoznawaniu ruchomych obiektów (lub wręcz niemożliwość) spowodowane czynnikami zewnętrznymi (opad deszczu, kolor jezdni, samochodu).

2.3.6.

Pomiarowi obiektów dynamicznych w czasie rzeczywistym, poświęcone są co najmniej cztery prace [*Lee, Faig, V; Hommainejad, V; Dold, Peipe, V; Robson, Setan, V*]. Przedmiotem pomiaru były wibracje samochodu, deformacje łopatek wirnika, a także dwa dynamiczne pola testowe.

Dwójka kanadyjskich autorów w pierwszej z prac bada potencjalne możliwości wykorzystania kamery video do rejestrowania szybkich zmian. Do pomiaru użyto amatorskich kamer video, VCR (video cassette recorder) oraz komputera typu PC z transmitterem (video grabber). Sekwencje obrazowe rejestrujące wibracje pędzącego samochodu pozyskiwano z częstotliwością $1/15$ sekundy. Współrzędne obrazowe uzyskiwano korzystając z oprogramowania iDRISI, zaś współrzędne obiektowe po transformacji liniowej (DLT - direct linear transformation) nie wymagającej informacji o usytuowaniu znaczków tłowych. Autorzy pozytywnie oceniają eksperyment, wskazując przy tym na pewne niedoskonałości sprzętowe (synchronizacja częstotliwości VCR'a) zwłaszcza gdyby szybkość zmian badanego obiektu była większa.

Druga z prac opisuje metodę automatycznego śledzenia, w czasie rzeczywistym, obiektu dynamicznego. A. S. *Homainjad* [V] w prezentowanym opisie testu próbuje odpowiedzieć na 3 pytania :

- przy jakiej prędkości system potrafi śledzić obiekt ?
- czy oprogramowanie zdoła uwzględnić w czasie rzeczywistym przemieszczenie systemu wizyjnego względem obiektu ?
- przy jakim zasięgu system jest skuteczny i niezawodny ?

Kolejna praca poświęcona jest testowi i monitoringowi dużych elementów urządzeń technicznych w ruchu. Autorzy twierdzą, że konwencjonalne pomiary stosowane dotąd (oparte głównie na wykorzystaniu czujników naprężeń, libel elektronicznych i czujników rejestrujących odchylenia) dostarczały informacji o deformacjach jedynie w dwóch wymiarach. Proponowane przez nich rozwiązanie, oparte głównie na fotogrametrii cyfrowej, pozwala zdalnie i szybko uzyskać wiarygodne wyniki. Badaniu poddano łopatkę wirnika silnika wiatrowego. Mierzone elementy uprzednio pomalowano matową farbą i na niej zasygnalizowano kilkadziesiąt znaczków. W stabilnym tle umieszczono także znaczki stanowiące osnowę fotogrametryczną, współrzędne których określono przy użyciu stacji Zeiss Elta 2. Rejestrację wykonano, uprzednio skalibrowanymi, 5 kamerami CCD.

Autorzy podają skrótowo proces obróbki danych i uzyskane błędy pomiaru (poniżej 1mm).

Czwarta z prac, zespołu niemieckiego, proponuje trzy sposoby pomiaru obiektów dynamicznych - dwa działające w systemie on-line i jeden w off-line. Pierwszy z nich to gotowy zestaw (V - Stars Digital Close Range Measurement System) do wykorzystania w pomiarach obiektów przemysłowych, zdolny do rejestracji z częstotliwością 2 sekund. Jednej sekundy potrzebuje bowiem użyty sprzęt komputerowy na „zrzut” danych i obliczenie wyników (dla maksimum 50 punktów) rejestrowanych przez dwie kamery (Kodak Megaplus 4.2) z rozdzielczością 2K x 2K pikseli.

Dwa pozostałe omawiane sposoby wykorzystują przy rejestracji pulsujące światło (zarówki lub lasera) i w zależności od warunków i potrzeb dostarczają informacji w trybie off-line lub on-line. Wybór sposobu zależy od ilości obserwowanych punktów, ciągłości w pozyskiwaniu danych i od żądanej dokładności. Zastosowanie oświetlenia laserowego pozwala na uzyskanie wysokiej dokładności, ale tylko dla jednego punktu.

2.3.7.

Pomiary obiektów nuklearnych. Tematyce tej poświęcone są dwie prace [Bethel, Voss, V; Macklin, Brade, Celentano, Tait, van Lente, V]. W pierwszej, dwójka autorów amerykańskich próbuje uporać się z pomiarem osprzętu technicznego (zawory, kłapy) elektrowni jądrowej. Z uwagi na bardzo ograniczoną przestrzeń, w której należało dokonać pomiaru, autorzy uciekają się do rejestracji badanego obiektu drogą pośrednią, poprzez zapis jego odbicia w lustrze. Wykorzystując znajomości kształtów geometrycznych (linie, okręgi) w przestrzeni

obrazowej rozwiązują zadanie podając zastosowane wzory dla zaistniałych przypadków. Wyniki nie spełniły oczekiwań autorów - wymagana dokładność (0,15 mm), przy tego rodzaju urządzeniach, jak wynika z kontrolnego pomiaru klasycznego nie została zachowana. Planowane jest wprowadzenie zmian w organizacji i technologii pomiaru.

W drugiej pracy 5-cio osobowy zespół angielski dzieli się swymi doświadczeniami przy pomiarze JET'a (Joint European Torus) w Culham (Wielka Brytania). JET jest wspólnym przedsięwzięciem państw Unii Europejskiej i Szwajcarii.

Celem jego jest naukowe potwierdzenie wykonalności (na skalę przemysłową) syntezy nuklearnej jako nowego źródła energii. Głównym komponentem JET'a jest toroidalny „kanał” próżniowy o objętości 200 m sześciennych, którego wnętrze jest ciągle modyfikowane. Wszelkie prace instalacyjne, jak również pomiarowe są utrudnione ze względu na zwiększający się poziom promieniowania i obecność wysoko toksycznego pyłu berylowego. Praca opisuje rozwój stosowanych metod przy zwiększających się wymaganiach dokładnościowych. Ostatecznym celem jest opracowanie metody zdalnego pomiaru zapewniającej akceptowalną dokładność, opartej przede wszystkim na videogrametrii.

2.3.8.

Fotogrametria podwodna. Temat ten podejmują 3 zespoły autorów [*Geissler, Jahne, V*; *Hering, Balschbach, Jahne, V*; *Schewe, Moncrieff, Setan, V*]. Dwie pierwsze prace dotyczą rozwiązania bardzo podobnego zagadnienia. Zarówno zespół niemiecki, jak i amerykański, na obiektach modelowych, poddają próbie sprawności specjalnie przygotowany sprzęt (sensory, oświetlenie) oraz oprogramowanie służące do pomiaru lokalizacji, rozmiarów i zagęszczenia małych cząsteczek (pęcherzyków powietrza, gazu) w środowisku ciekłym. Obie, dość obszerne prace wyjaśniają zasady pomiaru rozkładu przestrzennego pęcherzyków opartej na oznaczeniu nieostrości ich obrazu oraz opisują algorytmy pozwalające na śledzenie poszczególnych drobin z określeniem ich prędkości, pozycji i rozmiarów.

Praca ostatnia prezentuje pierwsze wyniki prac nad programem Unii Europejskiej pt. CRAFT. Program dotyczy określenia optymalnego kształtu i wymiarów podwodnych pojemników do hodowli ryb. Ich pojemność, wielkość oczek siatki mają ogólnie rzecz biorąc wielki wpływ na wyniki hodowli.

Do pomiaru użyto kamer CCD oraz zastosowano specjalnie przygotowany program PICTRAN. Autorzy opisują różne problemy, z jakimi można się zetknąć przy stosowaniu metod fotogrametrycznych w środowisku wodnym (wybór sprzętu, kalibracja kamer, technologia pomiaru).

3. Pozostałe prace

Dwie prace słowackich autorów [*Bartos, Gregory, V*; *Cernansky, V*] dotyczą fotogrametrycznych pomiarów zapór wodnych i obiektów im towarzyszącym.

Pierwsza dotyczy pomiaru deformacji wrót śluzę zapory wodnej, druga długookresowych obserwacji wałów kamiennych zapory wodnej. Obie oparte są na „klasycznej” terrofotogrametrii. Do opracowania wyników autorzy stosują oprogramowanie ORIENT oraz SAS (Separate Analytical Solution) w drugiej.

Inna praca, czeskich autorów [*Klimesova, Suk, V*], poświęcona jest metodzie monitorowania dynamiki upraw leśnych przy wykorzystaniu archiwalnych zobrazowań (różnych w czasie oraz pozyskiwanych różnymi sensorami).

Praca autorów rosyjskich [*Knizhnikov, Geinman, V*], daje propozycję określania prędkości spływu wysokogórskich lodowców, na podstawie okresowo wykonywanych zdjęć lotniczych.

Metoda jest rozwiązaniem uproszczonym, adresowanym raczej do geografów i glaciologów, nie wymagającym specjalistycznego instrumentarium (skanowane są odbitki stykowe zdjęć lotniczych, pomiar współrzędnych wykonuje się na obrazie rastrowym monitora) i narzuca szereg ograniczeń (zdjęcia muszą być wykonywane nie rzadziej niż co kilkanaście dni, na obrzeżu zdjęcia musi się znaleźć teren stały, a sam lodowiec musi charakteryzować się dość znaczną prędkością spływu powierzchniowego na dobę).

W niniejszym streszczeniu nie ujęto prac poruszających problem automatycznego rozpoznawania obiektów przy wykorzystaniu metod fotogrametrii cyfrowej.

Z tą tematyką możemy się spotkać w co najmniej 5 opracowaniach [*Heikkinen, V; Huang, Trinder, Donnelly, V; Mori, Setojima, Akamatsu, Yamana, Yahara, V; Petran, Krzystek, Bonitz, V; Streilein, V*]. Problematyka ta ujęta jest także w referatach zgłoszonych do 2 Grupy Roboczej, a częściowo została także ujęta w opracowaniach prof. dr. hab. inż. J. Jachimskiego oraz dr. inż. Piotra Sawickiego, dotyczących referatów 3 Grupy Roboczej V Komisji ISPRiS.

Uwaga

Odsyłacze bibliograficzne z liczbą rzymską odnoszą się do spisu opracowań prezentowanych w czasie Kongresu, który zamieszczony jest na końcu niniejszego zeszytu. Rzymska liczba podana po nazwisku autora określa numer komisji do której należy cytowany tytuł.

Recenzował: dr hab. inż. Jerzy Bernasik