

**ANALIZA DEFORMACJI POWIERZCHNI ELEMENTÓW BUDOWLANYCH
NA PODSTAWIE ZDJĘĆ CYFROWYCH**

**ANALYSIS OF SURFACE DEFORMATION OF CONSTRUCTION ELEMENT
WITH A USAGE OF IMAGE-BASED MATCHING**

Dorota Zawieska, Krzysztof Bakula, Piotr Podlasiak

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria bliskiego zasięgu, numeryczny model powierzchni obiektu, matching, deformacje, modelowanie

STRESZCZENIE: Celem niniejszego artykułu jest analiza deformacji powierzchni elementów budowlanych (fragmentów blachy) poddawanych różnym obciążeniom, opracowanych na podstawie zdjęć cyfrowych. Badaniom podlegało 32 fragmenty blach, do rekonstrukcji których wykorzystano zdjęcia wykonane cyfrowym aparatem niemetrycznym, a opracowanie wykonano na stacji cyfrowej Z/I Imaging z wykorzystaniem modułu z funkcją matchingu. Wizualizację deformacji powierzchni wykonano w porównaniu do teoretycznej, nieodkształconej powierzchni blachy w programie ArcGIS 9.3. Dzięki temu możliwe było uzyskanie wartości odkształcenia w dowolnym punkcie powierzchni badanego obiektu. Opracowane modele i analiza deformacji pozwoliła na ocenę, wykonaną przez inżynierów budowlanych, mechanizmów plastycznych zniszczenia blach czołowych o zróżnicowanej grubości, wysokości i zmiennym stopniu zbrojenia płyty stropowej. Pozwoliło to na wysnucie wniosków związanych z ich projektowaniem i wyznaczeniem nośności samych węzłów stalowych i zespolonych w konstrukcjach szkieletowych. Stalowe węzły, których powierzchnie blach czołowych poddane zostały modelowaniu, były uprzednio poddane deformującym obciążeniom doświadczalnym w Laboratorium Konstrukcji Budowlanych Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Celem opracowania fotogrametrycznego wykonanego w Zakładzie Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej była rekonstrukcja i modelowanie zdeformowanych powierzchni blach czołowych oraz odpowiednia wizualizacja uzyskanych wyników.

1. WPROWADZENIE

Ze względu na różnorodność aplikacji, fotogrametria bliskiego zasięgu ma charakter interdyscyplinarny. Istnieją ściśle powiązania nie tylko z technikami pomiarowymi takimi jak skaning laserowy czy optyczny, ale także z podstawowymi dziedzinami nauki, takimi jak matematyka, fizyka, informatyka czy biologia. Nauka ta wiąże się również ściśle z grafiką komputerową, fotografią cyfrową i środowiskiem CAD (Luhmann *et al.*, 2006). Obecnie fotogrametria bliskiego zasięgu znajduje wiele zastosowań w różnych dziedzinach, m.in. w archeologii, architekturze, przemyśle, budownictwie, kryminalistyce czy medycy-

nie. Jej podstawą jest tworzenie komputerowe wirtualnych kształtów obiektów – trójwymiarowe modelowanie.

Jednym z zastosowań fotogrametrii bliskiego zasięgu jest wykorzystanie w pomiarach inżyniersko–budowlanych. Pomiarom fotogrametrycznym podlegają elementy budowlane w celu określenia wielkości odkształceń oraz oceny odstępstw od przyjętych norm wytrzymałościowych stosowanych w budownictwie (Bernuzzi *et al.*, 1991, Barcewicz, Giżejowski, 2011).

Celem niniejszego referatu jest prezentacja analizy deformacji powierzchni elementów budowlanych – blach czołowych o zróżnicowanej grubości i wysokości – poddawanych różnym niszcącym obciążeniom, przeprowadzonym w laboratorium Zakładu Konstrukcji Budowlanych Wydziału Inżynierii Lądowej PW i opracowanych na podstawie zdjęć cyfrowych w Zakładzie Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej PW. Szczegółowy opis elementów próbnych oraz stanowiska badawczego pod kątem wymagań budowlanych przedstawiono natomiast w pracy doktorskiej (Barcewicz, 2010). Pomiarom fotogrametrycznym podlegało 32 fragmenty blach czołowych, do rekonstrukcji których wykorzystano zdjęcia wykonane cyfrowym aparatem niemetrycznym, a opracowanie wykonano na stacji cyfrowej Z/I Imaging. Wizualizację deformacji powierzchni wykonano w odniesieniu do teoretycznej, nieodkształconej powierzchni blachy w programie ArcGIS 9.3.

2. METODYKA MODELOWANIA 3D

Pojęcie „modelowanie 3D” ma kilka interpretacji, które można określić w dwóch definicjach (Bujakiewicz i inni, 2004):

- a) opis kształtu obiektu poprzez określenie jego szkieletu i jeśli jest to niezbędne, stworzenie tekstury obiektu dla wybranych powierzchni konstrukcji;
- b) ustalenie kształtu obiektu poprzez wygenerowanie Numerycznego Modelu Powierzchni Obiektu (*ang. DSM – Digital Surface Model*), czyli opisanie jego powierzchni poprzez dużą liczbę punktów.

W niniejszym artykule, w celu wyznaczenia kształtu badanej powierzchni próbki, wykorzystywana jest metoda generowania chmury punktów 3D z wykorzystaniem zdjęć cyfrowych. Ogólnie definiując, można stwierdzić, że trójwymiarowe modelowanie obiektów jest to kompletny proces, rozpoczynający się od pozyskania danych, a kończący na wirtualnym modelu 3D na ekranie komputera. Pozyskiwanie danych 3D na podstawie zdjęć cyfrowych w wykorzystywanym systemie, polega na realizacji odpowiednich etapów opracowania. W pierwszym etapie pracy, system powinien skalibrować aparat lub uwzględnić dane z kalibracji aparatu, następnie powinien wyznaczyć elementy orientacji zewnętrznej zdjęć. W kolejnym etapie realizowany jest proces dopasowywania zdjęć (*ang. matching*). W zależności od wykorzystywanej stacji fotogrametrycznej, czy opracowanego algorytmu w danym systemie, zazwyczaj porównywane są dwa lub kilka kolejnych zdjęć, w celu wyznaczenia odpowiadających sobie, pod względem wartości radiometrycznych pikseli, dzięki czemu znajdują się punkty homologiczne. Następnie, na podstawie wcześniej określonych informacji o orientacji zewnętrznej zdjęć, obliczane jest położenie pikseli w trójwymiarowej przestrzeni. Rezultatem jest wygenerowana gęsta chmura punktów 3D, opisująca kształt mierzonego obiektu. Aby powiódł się taki proces dopasowywania, konieczne jest, aby opracowywana powierzchnia miała zróżnicowaną teksturę. Na dokładność wyznaczenia tych

punktów, wpływają głównie: rozdzielczość obrazu stosowanego aparatu, odległość fotografowania oraz rodzaj tekstury lub wzoru na jego powierzchni.

Obecnie, wiele cyfrowych stacji fotogrametrycznych wyposażonych jest w narzędzia do automatycznej orientacji bloku zdjęć w oparciu o niesygnalizowane punkty wiążące – funkcja *matching (ang.)*. Działają one głównie dla klasycznej konfiguracji bloku zdjęć lotniczych. Orientacja zdjęć bazuje na wykorzystaniu fotogrametrycznego wyrównania wiązek z wykorzystaniem równań kolinearności oraz ręcznie lub automatycznie mierzonych punktów wiążących. Inne moduły, stacji fotogrametrycznych, umożliwiają generowanie chmury punktów 3D, a następnie DSM, na podstawie dwóch zorientowanych zdjęć. Moduły te, mogą być wykorzystywane również dla opracowania zdjęć bliskiego zasięgu dla geometrii zbliżonej do przypadku normalnego.

3. REKONSTRUKCJA I MODELOWANIE POWIERZCHNI ELEMENTÓW BUDOWLANYCH – BLACH CZOŁOWYCH

3.1. Opis eksperymentu

W celu rekonstrukcji kształtu badanych powierzchni blach czołowych wykonano stereogramy dla 32 próbek. Zdjęcia wykonano kamerą niemetryczną Canon EOS 30D z obiektywem 35 mm. Aby opracować mierzone powierzchnie w określonym układzie referencyjnym, próbki zostały umieszczone w specjalnej konstrukcji szkieletowej, Konstrukcją tą stanowi stabilna rama w kształcie nieregularnego czworoboku, na której zamocowane są bolce o różnych długościach. Na ich górnych powierzchniach znajdują się sygnały koliste, o powierzchniach matowych, wykonane z dokładnością rzędu 0.1 ± 0.2 mm. (Rys. 1). Ponieważ blachy posiadały słabą naturalną teksturę (metaliczne, lekko skorodowane powierzchnie), płaszczyzny blachy pokropkowano flamastrem, a w niektórych przypadkach, w celu wyeliminowania odblasków zmatowiono kredą. Do oświetlenia poszczególnych próbek wykorzystano rozproszone światło halogenowe. Odległość fotografowania dla wszystkich zdjęć wynosiła 1.2 m, a stosunek głębi ostrości do odległości fotografowania – 1:60. Dla wszystkich modeli stereoskopowych zachowano jak najkorzystniejszy stosunek bazowy, zarówno dla dokładności opracowania jak i samego procesu korelacji obrazu, rzędu $1:4 \div 1:5$. Ostatecznie skala zdjęć wyniosła 1:140, a wielkość piksela $6.4 \mu\text{m}$.



Rys. 1. Przykładowy stereogram (model EZ10) wykonany cyfrowym aparatem niemetrycznym Canon 350D z obiektywem 35mm. Próbkę blachy umieszczono wewnątrz konstrukcji szkieletowej stanowiącej zewnętrzny układ referencyjny

W celu wyznaczenia elementów orientacji wewnętrznej zastosowanego aparatu cyfrowego wykonano jego kalibrację na przestrzennym polu testowym. Wykorzystany test kalibracyjny składa się z metalowej płyty o wymiarach 50 cm × 50 cm, z sygnalizowanymi punktami, umieszczonymi na bolcach (prostopadłych do płyty) o różnej długości. Trójwymiarowe rozmieszczenie punktów testu jest przystosowane do kalibracji aparatu z krótszych (50–70 cm) i dłuższych (100–160 cm) odległości fotografowania. W celu wyeliminowania zniekształceń obrazu spowodowanych dystorsją, wykorzystano wyniki kalibracji i przetworzono wykonane zdjęcia.

3.2. Opracowanie stereogramów

Wykonane stereogramy zostały opracowane na stacji cyfrowej Z/I Imaging (Intergraph) w module ISDM. Orientacja wzajemna została wykonana z wykorzystaniem funkcji automatycznej korelacji obrazów. Uzyskano subpikselową dokładność na punktach pasowania oraz poniżej 1.5 mm na punktach kontrolnych. Wartość błędu sigma nie przekroczyła rozmiaru piksela (6.4 μm) dla każdego modelu (Tab. 1).

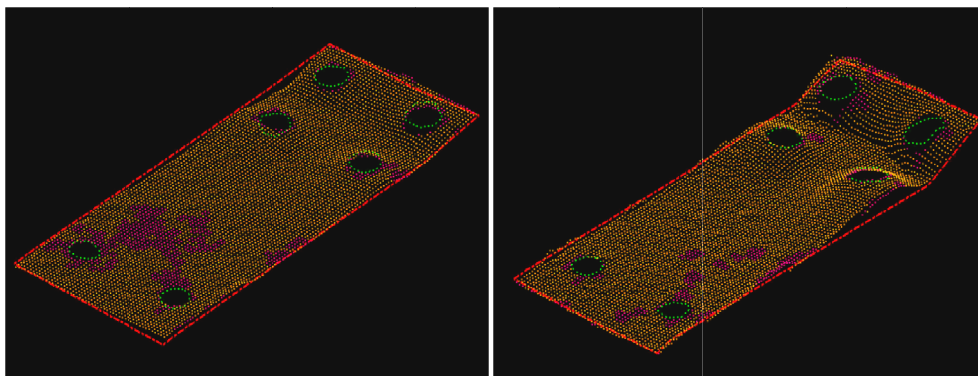
Do orientacji bezwzględnej wykorzystano punkty ramy o znanych współrzędnych. Wszystkie modele zostały opracowane w tym samym układzie referencyjnym. Pomiarom w każdym modelu podlegało 5 punktów osnowy i 3 punkty kontrolne.

Tab. 1. Przykładowe wyniki orientacji wzajemnej i bezwzględnej dla opracowywanych stereogramów

Model	Orientacja wzajemna		Orientacja bezwzględna – punkty osnowy			Orientacja bezwzględna – punkty kontrolne		
	sigma [μm]	$P_{y_{\max}}$ [μm]	m_x [mm]	m_y [mm]	m_z [mm]	m_x [mm]	m_y [mm]	m_z [mm]
ES1a	2.0	6.3	0.33	0.23	0.60	0.17	0.36	0.98
ES1b	1.4	3.5	0.44	0.44	0.37	0.66	0.30	1.44
ES2	2.4	5.4	0.29	0.24	0.59	0.68	0.73	1.37
ES3	2.7	6.1	0.32	0.35	0.95	0.44	0.35	0.59
ES4	2.6	6.1	0.52	0.45	0.76	0.09	0.38	0.48
EZ1	2.6	6.9	0.31	0.35	0.07	0.38	0.25	0.84
EZ2	1.4	4.8	0.68	0.50	0.82	0.34	0.20	0.98
EZ3	2.3	6.5	0.56	0.28	0.53	0.22	0.22	1.09
EZ4	3.2	8.4	0.50	0.52	0.92	0.32	0.53	0.79
EZ5	2.2	6.2	0.40	0.18	0.97	0.69	0.30	1.14
EZ6	2.1	5.3	0.27	0.25	0.42	0.16	0.27	0.44
EZ7	2.3	4.9	0.41	0.12	0.48	0.37	0.24	0.82
EZ8	2.7	7.2	0.31	0.32	0.42	0.22	0.26	0.35
EZ9	3.1	7.5	0.19	0.38	1.16	0.35	0.21	1.27
EZ10	2.7	6.4	0.37	0.26	0.49	0.38	0.33	0.94
EZ11	3.7	9.4	0.35	0.12	0.25	0.28	0.51	0.90
EZ12	2.4	6.3	0.41	0.32	0.49	0.17	0.15	0.95

3.3. Automatyczne generowanie chmury punktów 3D

Do automatycznego generowania chmury punktów 3D opisujących kształt badanych próbek blach wykorzystano również stację cyfrową Z/I ImageStation. Automatyczna korelacja obrazów została wykonana w module ISAE. Pliki *dgn*, w których stereoskopowo zostały określone obszary opracowania oraz obszary wyłączeń (miejsca skręceń śrubami blach tworzących stalowe węzły) zostały stworzone w programie *Microstation*. Wygenerowano punkty 3D z oczkiem siatki 3 mm z dokładnością współrzędnej Z - 0.5 mm (Rys. 2).

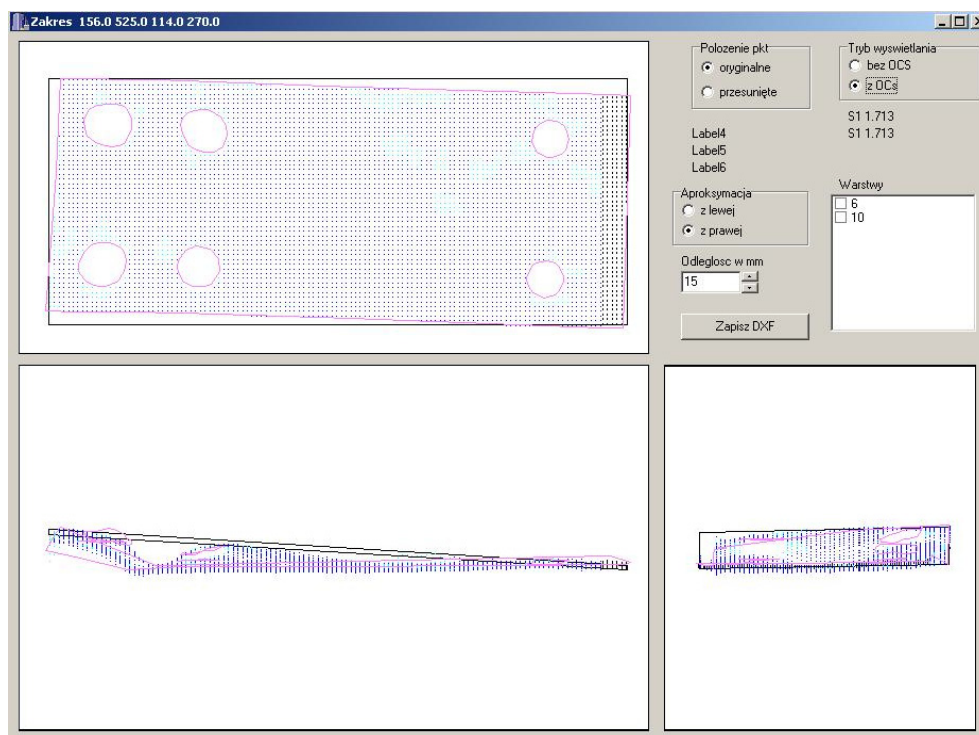


Rys. 2. Wynik matchingu obrazów stereogramu uzyskany za pomocą programu ImageStation Automatic Elevation

3.4. Utworzenie teoretycznej płaszczyzny – nieodkształconej

Odształcenia powinny być wyznaczone w odniesieniu do kształtu elementu konstrukcyjnego przed obciążeniem. Przed wykonywaniem zdjęć, na każdej próbce zaznaczano linię w odległości 15 mm od krawędzi próbki. Zgodnie z konsultacją specjalistów od konstrukcji budowlanych, część blachy położona pomiędzy krawędzią próbki a tą linią nie ulegała odkształceniom i może posłużyć do wyznaczenia teoretycznego położenia płaszczyzny (przed odkształceniem) dla całej powierzchni blachy (Rys. 3). W celu wyznaczenia prawidłowych deformacji, odkształcenia każdej próbki powinny być określone w odniesieniu do tej płaszczyzny oraz obliczane jako różnica współrzędnej Z pomiędzy numerycznym modelem powierzchni danej próbki a płaszczyzną nieodkształconą.

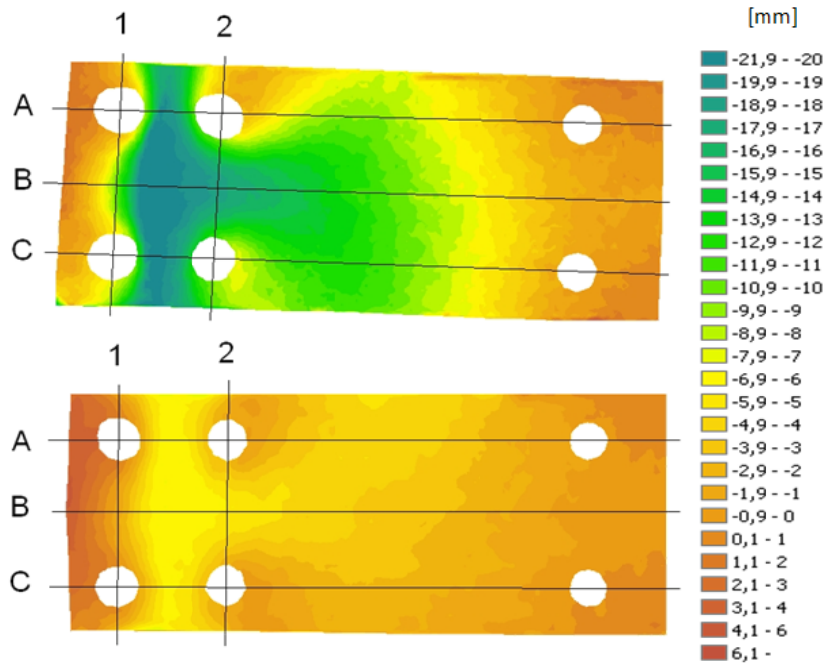
Wygenerowanie tej płaszczyzny i przekształcenie danych do nowego układu współrzędnych wykonywane było w autorskim programie opracowanym specjalnie dla tego zadania. Program importował dane w formacie *dxf* (utworzonego na podstawie danych z automatycznej korelacji obrazów cyfrowych z pliku *dgn*) a następnie aproksymował płaszczyzną nieodkształconą część próbki. Współrzędne punktów były korygowane w odniesieniu do płaszczyzny teoretycznej i zapisywane w nowym pliku *dxf* przeznaczonym do dalszej analizy. Program umożliwiał interaktywny podgląd podczas przetwarzania (Rys. 3).



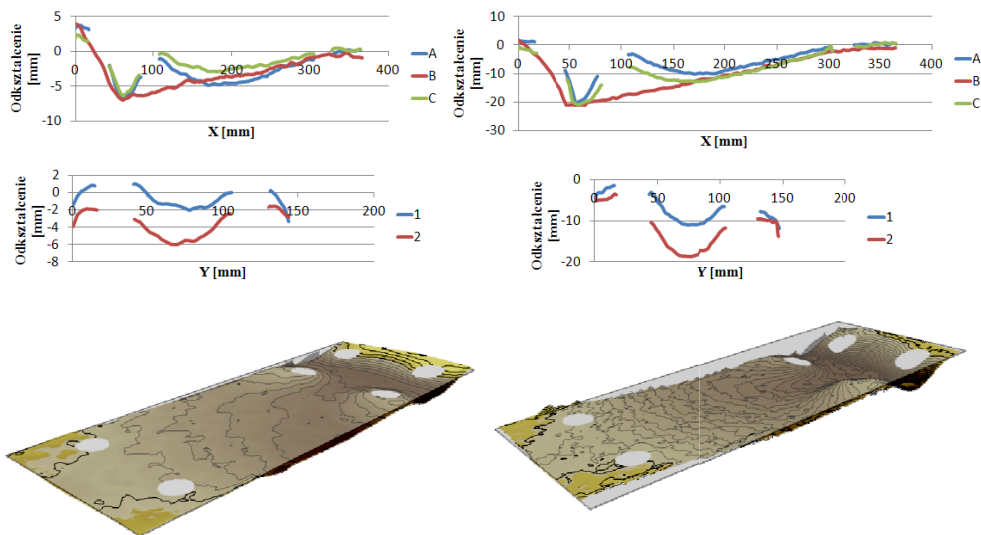
Rys. 3. Wyznaczanie teoretycznej płaszczyzny nieodkształconej – dla jednej z próbek

3.5. Wizualizacja odkształceń

Wizualizację wyników opracowano w programie *ArcGIS 9.3* z użyciem rozszerzeń *Spatial Analyst* i *3D Analyst*. Dla każdej z próbek utworzono numeryczny model odkształconej powierzchni, której deformacje zostały określone w odniesieniu do wyznaczonej teoretycznie, nieodkształconej płaszczyzny. Rysunki 4 i 5 prezentują wizualizację odkształceń badanych powierzchni próbek blach uzyskanych z matchingu obrazów cyfrowych w postaci warstwic i barwnej skali. Wyniki przedstawiono również w postaci przekrojów w formie numerycznej i graficznej oraz w rzucie perspektywicznym utworzonej powierzchni odkształceń badanych próbek z nałożeniem półprzezroczystej teoretycznej płaszczyzny. Wyznaczone odkształcenia w postaci graficznej i numerycznej zostały opracowane dla wszystkich badanych próbek. Uzyskane wyniki w postaci numerycznej, stanowiły dane wyjściowe do specjalistycznej oceny wytrzymałości badanych próbek, wykonanych przez specjalistów od konstrukcji budowlanych.



Rys. 4. Przedstawienie odkształceń blach czołowych dla próbek EZ10a i EZ10b z użyciem palety barw wraz z rozmieszczeniem przekrojów podłużnych i poprzecznych



Rys. 5. Utworzone przekroje i wizualizacje w rzucie perspektywicznym dla próbek EZ10a i EZ10b, będącymi opracowaniami obróbki danych z matchingu obrazów cyfrowych

4. PODSUMOWANIE

Celem przeprowadzonych pomiarów fotogrametrycznych było określenie rozkładu i wielkości maksymalnych krzywizn odkształconych blach czołowych na podstawie zdjęć cyfrowych. Otrzymane wyniki wykazały dużą przydatność wykorzystania metod fotogrametrycznych dla rekonstrukcji i przestrzennego modelowania odkształconych powierzchni blach. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, jaką dokładność można uzyskać przy pomiarze powierzchni elementu budowlanego. Na podstawie pomiarów punktów kontrolnych osnowy uzyskano dokładność powyżej 1.5 mm w procesie przestrzennego modelowania i analizy odkształceń elementów budowlanych. Wizualizację 3D badanych próbek przedstawiono w rzucie perspektywicznym, w formie warstwicy oraz przekrojów w postaci graficznej i numerycznej (Zawieska *et al.*, 2011). Uzyskane wyniki zostały wykorzystane do przeprowadzenia analiz porównawczych z zaleceniami normowymi (Barcewicz, Gizejowski, 2011).

5. PODZIĘKOWANIA

Praca niniejsza powstała w ramach Porozumienia o współpracy naukowej i badawczej pomiędzy Wydziałami Inżynierii Lądowej oraz Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej. Autorzy składają serdeczne podziękowania prof. dr hab. Marianowi Gizejowskiemu oraz dr inż. Wioletcie Barcewicz za pomoc w realizacji badań.

6. LITERATURA

Barcewicz W., 2010. Sztywność, nośność i zdolność do obrotu pewnej klasy węzłów w konstrukcjach stalowych ze stropami zespolonymi. Praca doktorska, Politechnika Warszawska.

Barcewicz W., Gizejowski M., Analiza deformacji blach czołowych w węzłach stalowych i zespolonych z wykorzystaniem fotogrametrii cyfrowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* Nr 276, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Zeszyt 58 nr 3/2011/II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011, str. 193–200.

Bernuzzi C., Zandonini R., Zanon P., 1991. Rotational Behaviour of End Plate Connections. *Costruzioni Metalliche* nr 2/1991, s. 74–103.

Bujakiewicz A., Kowalczyk M., Podlasiak P., Zawieska D., 2004. Modelling and Visualization of Three Dimensional Objects using Close Range Imagery, *Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XX Congress of ISPRS, Istanbul, Vol. Part B5. p. 442.

Luhmann T., Robson S., Kyle S., Karley I., 2006. *Close Range Photogrammetry – Principles, techniques and applications*. Dunbeath: Whittles Publishing;

Zawieska D., Podlasiak P., Bakula K., 2011. Rekonstrukcja i modelowanie powierzchni elementów blachy. Raport w ramach pracy statutowej Nr 504/G/1082/410/0, Warszawa.

**ANALYSIS OF SURFACE DEFORMATION OF CONSTRUCTION ELEMENT
WITH A USAGE OF IMAGE-BASED MATCHING**

KEY WORDS: close-range photogrammetry, digital surface model (DSM), matching, deformation, modelling

SUMMARY: The aim of this paper is the analysis of surface disfigurement for construction elements such as fragment of end-plates, which were subjected to various, deforming loads, with a usage of image-based matching. 32 pieces of end-plates were a subject of experiment where digital images from non-metric camera were used. The project was performed on Z/I Imaging workstation with a usage of the module equipped with image matching option. Visualization of surfaces deformation was shown in respect to theoretical, non-deformed plane in ArcGIS 9.3. software. Thus it was possible to obtain deformation values at any point on the surface for object of interest. Creation of digital surface models and analysis of their deformations allowed for the assessment (made by construction engineers) of deformation mechanisms for end-plates with different thickness, height and with varying reinforcement ratio of the concrete slab. This research helped to draw a conclusion concerning design and load capacity assignment for steel joints and composite skeletal construction. Before steel joints with their end-plates were subject of photogrammetric modeling, they had been disfigured by experimental loads in laboratory of Department of Building Construction in Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology. Such plates were a subject of photogrammetric reconstruction in Department of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, where digital surface model of mentioned objects were reconstructed and presented in graphic and numerical formats.

dr inż. Dorota Zawieska
e-mail: dorotaz8@wp.pl
telefon: 222347694

mgr inż. Krzysztof Bakula
e-mail: k.bakula@wp.eu
telefon: 222347694

dr inż. Piotr Podlasiak
e-mail: ppodlasiak@wp.pl
telefon: 222347694