

Jerzy Bernasik*, Sławomir Mikrut*

AUTOMATYZACJA FOTOGRAMETRYCZNYCH POMIARÓW ODKSZTAŁCEŃ DACHOWYCH DŹWIGARÓW HAL PRZEMYSŁOWYCH

1. Wstęp

Wyznaczanie ugięć dźwigarów dachowych należy do najczęstszych pomiarów w halach przemysłowych. Zastosowanie klasycznej metodyki geodezyjnej często natrafia na rozmaite utrudnienia związane: ze znaczną wysokością hal, z drganiami (jeśli nie wstrzymano produkcji), ruchem rozmaitych środków transportu, z zapyleniem i ograniczeniami czasowymi. Jeśli produkcja jest wstrzymana, pozostają problemy związane z wysokością, zagrożeniami (np. wysokie napięcie), słabym oświetleniem i utrudnionym dostępem.

Po raz pierwszy problem fotogrametrycznego pomiaru hal pojawił się nam w dramatycznych okolicznościach, gdy pękające dźwigary dachowe ogromnej hali odlewni wymusiły na wybitnych ekspertach budowlanych zalecenie wstrzymania produkcji i wymiany dźwigarów oraz pokrycia dachowego. Warunkiem krótkotrwałej zwłoki w wykonaniu rekonstrukcji i ograniczenia zasięgu prac był pomiar deformacji wszystkich dźwigarów. Wobec niemożności niwelacyjnego pomiaru ugięć wszystkich (kilkuset) dźwigarów wysokiej hali, fotogrametryczna metoda jednoobrazowa okazała się zbawienną – tak ze względu na możliwość pomiaru ugięć, jak i optymistyczne rezultaty których dostarczyła. Pomiar ten powtórzono jeszcze dwukrotnie – stosując metodę par czasowych, aby w końcu (dopiero po dwóch latach) przeprowadzić niezbędne prace budowlane w dogodnym, wakacyjnym terminie. Od tego czasu metoda fotogrametryczna była stosowana wielokrotnie i z powodzeniem w halach produkcyjnych i w elektrowniach [1, 2].

Do fotogrametrycznego wyznaczania ugięć dźwigarów dachowych stosujemy metodę jednoobrazową jako szczególnie przydatną do pomiarów przemieszczeń płaskich. Ponieważ metoda jednoobrazowa zakłada stałość współrzędnej Y (prostopadła do płaszczyzny dźwigara), zdjęcia pomiarowe wykonuje się każdorazowo z tych samych stanowisk w taki sposób, aby płaszczyzny klisz były równoległe do płaszczyzny przemieszczeń. Ważne, choć nie niezbędne, jest zachowanie zbliżonej wysokości ustawienia kamery. Ażeby wyeliminować wpływ (mało prawdopodobnego) poziomego wygięcia dźwigara, każdy dźwigar po-

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

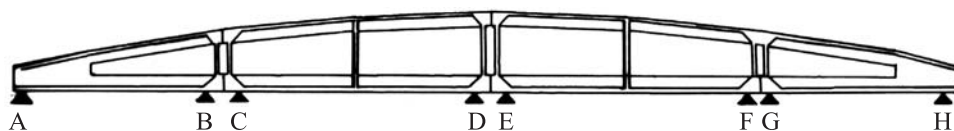
winien być fotografowany z dwóch przeciwległych stron. Tak wykonane zdjęcia umożliwiają określanie wektorów przemieszczeń płaskich, jeśli znane są elementy orientacji wewnętrznej kamery pomiarowej, oraz odległość kamery od mierzonego więzara.

Danymi wejściowymi do obliczeń odkształceń są pomierzone na zdjęciach współrzędne tłowe (zdjęć aktualnych) i przyrosty współrzędnych tłowych w ocenianym okresie (mierzone jako paralaksy czasowe). Pomiar par czasowych wykonuje się na dwóch zdjęciach wykonanych w ten sam sposób, ale w różnym czasie.

W pracach którym poświęcona jest niniejsza publikacja, w odróżnieniu od poprzednio stosowanych analogowych fotogrametrycznych pomiarów, zastosowano – obok metody analogowej – metodę analogowo-cyfrową, stanowiącą bardziej nowoczesny sposób pozyskania i przetworzenia danych pomiarowych, oraz zautomatyzowaną metodę opartą o komputerową analizę zeskanowanych metrycznych zdjęć analogowych. W wersji pomiaru „ręcznego” – metoda analogowo-cyfrowa została oparta o pomiar obrazów cyfrowych w cyfrowej stacji fotogrametrycznej VSD AGH.

Aktualny materiał pomiarowy porównywano ze stanem pierwotnym – sprzed kilku lat. Analogowe jak i analogowo-cyfrowe wyznaczenie zmian ugięcia wykonano metodą par czasowych (pseudostereogramów).

Mając na uwadze budowę i pracę dźwigarów kablobetonowych wykonywano pomiar ugięcia w punktach wskazanych na rysunku 1. Wynika stąd, że punkty kontrolowane obiecano w pobliżu miejsc podparcia więzarów, oraz na końcach elementów składowych każdego dźwigara kablobetonowego. W przypadkach gdy przedstawiony sposób pomiaru nie był możliwy (przesłonięcia przez przewody, czy ograniczone pole widzenia kamery) doprowadzano wyniki do opisanej postaci drogą interpolacji liniowej.



Rys. 1. Rozmieszczenie i oznaczenia miejsc, w których kontrolowano ugięcie więzara kablobetonowego

Zwracano uwagę na możliwość zniekształcenia wyników przez warstwy tynku nakładane w trakcie prac konserwacyjnych wykonywanych w latach 1985–2004: warstwa tynku którym wypełniano szczeliny i pęknięcia może w pewnych wypadkach być wykazywana jako odkształcenie więzara. Dźwigary sfotografowane z jednego z 6 stanowisk przedstawia rysunek 2.

Zdjęcia pomiarowe wykonywano kamerą Photho 19/1318 Zeiss Jena. W trakcie kolejnych (okresowych) pomiarów zachowywano te same elementy orientacji zdjęć – stosowano tę samą kamerę, centrując ją nad tym samym punktem, przy identycznej orientacji (oś zdjęcia równoległa do osi hali), korzystne jest zachowanie podobnej wysokości. Doświadczenie każe sugerować wykonawcom podobnych prac, aby osoba mierząca zdjęcia była wykonawcą prac polowych; wynika to z niedostatków metody jednoobrazowej (nie stereoskopowej). Przydatna jest zarówno wiedza o rozmieszczeniu mierzonych elementów, jak i pewna doza wyobraźni przestrzennej. Niskoczułe płyty TO1 wymagały dosyć długiego czasu naświetlania, bo sztuczne oświetlenie hali wyłączano (jako niekorzystne w tym przypadku).



Rys. 2. Jeden z fotogramów mierzonej hali

2. Analogowe wyznaczanie ugięć aktualnych i okresowych odkształceń dźwigarów

Do analogowego opracowywania zdjęć wykorzystywano precyzyjny stereokomparator Stecometer (C. Zeiss Jena) z przystawką automatyzującą rejestrację. Mierzono pary czasowe umieszczając na lewym nośniku zdjęcie aktualne, a na prawym – fotogram sprzed kilku lat. Rejestrowano współrzędne tłowe (x i z), oraz paralaksy czasowe: podłużne (p) i poprzeczne (q). Znane były odległości do dźwigarów, dokumentacja budowlana oraz stała kamery. Stanowiły one podstawę obliczenia wartości ugięć aktualnych (ΔZ) i przyrostów ugięć (dZ).

Ponieważ pomiar poprzecznej paralaksy czasowej wykonuje się, celując znacznikiem pomiarowym na te same punkty dźwigara odwzorowane na obu zdjęciach, a mierzy się kontury liniowe na których często trudno jest zidentyfikować punkty, najważniejszym elementem pomiaru jest wcześniejsze usunięcie paralaksy podłużnej – najlepiej na pobliskim elemencie punktowym, albo pionowym. Warto wyjaśnić, że w przypadku ścisłego zachowania w trakcie obu pomiarów tej samej orientacji wewnętrznej i zewnętrznej kamer, wystarczyłoby jednokrotne (dla danej pary czasowej) usunięcie paralaksy podłużnej.

Współrzędne tłowe (z) stanowiły podstawę obliczenia ugięć aktualnych (odchyłeń od prostej wyznaczonej przez punkty podparcia dźwigara), zaś pionowe paralaksy czasowe (q) – przyrostów ugięć w okresie między pomiarami.

Aktualne ugięcie każdego dźwigara określano jako rozkład odchyłeń od prostej wyznaczonej przez punkty podparcia dźwigara. Danymi wejściowymi były współrzędne tłowe zdjęcia aktualnego (x i z). Przekształcenie różnic współrzędnych tłowych w odchylenia od

prostej odniesienia (ΔZ) sprowadza się do transformacji współrzędnych tłowych przez obrót i pomnożenia ich przez skalę odwzorowania danego dźwigara

$$\Delta Z = \frac{Y}{c_k} \Delta z \quad (1)$$

Odcięte (X) oblicza się podobnie

$$X = \frac{Y}{c_k} \Delta x \quad (2)$$

Okresowy przyrost ugięcia (odkształcenie) oblicza się na podstawie paralaks czasowych

$$dZ = \frac{Y}{c_k} p \quad (3)$$

gdzie $p = x' - x''$, paralaksa czasowa, jako różnica współrzędnych tłowych na zdjęciu aktualnym i wcześniejszym.

Obliczenia mają za zadanie przekształcenie: współrzędnych tłowych pomierzonych na zdjęciu stanu aktualnego – w wynikowe odchylenia konturu dźwigara od linii prostej (poprowadzonej przez dwa punkty podparcia), zaś poprzecznych paralaks czasowych – w składowe pionowe przemieszczeń kontrolowanych punktów dźwigara.

3. Skanowanie obrazów

Skanowanie wywiera decydujący wpływ na dokładność pomiaru obrazów cyfrowych, dlatego warto poświęcić temu zagadnieniu nieco uwagi.

W pracach fotogrametrycznych przyjęto, że wielkość piksela skanowania waha się w przedziale od kilku do 30 mm. Do celów badawczych w poniższym eksperymencie opracowywane zdjęcia zeskanowano w kilku rozdzielczościach. Celem był określenie wpływu wielkości piksela na wyniki opracowań. Jako formatu zapisu użyto standardowego TIFa, z wielkością Tile 128 i pełnym Overview. Uniknięto metod kompresji stratnej JPEG (stosowanej standardowo w fotogrametrii lotniczej) z racji stosunkowo nie dużych plików oraz obrazu monochromatycznego co dla najwyższej rozdzielczości 7 μm , dawało plik o wielkości 600 MB.

W przypadku opisywanych prac, fotogramy skanowano, stosując rozdzielczości geometryczne: piksel = 7 μm , 14 μm , 21 μm , 28 μm .

Oprogramowanie skanera umożliwia skanowanie w trybie „negatyw-pozytyw”, co pozwala na otrzymanie obrazu prawidłowego (pozytywu) bezpośrednio po skanowaniu. Skanowania dokonano w trybie „density”. Parametry dobrano tak, aby cały zakres histogramu „zmieścił” się w zakresie 0–255. Jest to szczególnie istotne przy użyciu procedur automatycznego śledzenia linii, aby histogram obrazu nie był zbyt „wąski” lub „przycięty” na jednym z końców (nie powinno być lokalnych pików w pobliżu wartości 0 i 255). Do skanowania wykorzystano profesjonalny skaner fotogrametryczny Photoscan TD firmy Intergraph/Zeiss znajdujący się w dyspozycji Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH.

4. Pomiar obrazów cyfrowych

4.1. Pomiar „ręczny”

Cyfrowa metoda stwarza szereg nowych możliwości pomiarowych; rozpatrzona zostanie w wersji pomiaru „ręcznego”, oraz w wersji automatyzującej pomiar obrazów. „Ręczny” pomiar par czasowych wykonano przy wykorzystaniu cyfrowej stacji fotogrametrycznej VSD AGH (autorstwa J. Jachimskiego i J. Zielińskiego). Realizując założenia pomiarowe, opisane w poprzednim rozdziale, mierzono obrazy cyfrowe jako pary czasowe: zdjęcie lewe – stan aktualny, zdjęcie prawe – stan poprzedni lub pierwotny). Opracowano metodykę pomiarową dostosowaną do właściwości VSD, realizującą zasady wypracowane w odniesieniu do stereokomparatora precyzyjnego.

Pomiar rozpoczyna się od przeprowadzenia orientacji wewnętrznej, co umożliwia transformację pikselowych współrzędnych obrazu cyfrowego na współrzędne tłowe. Jako kryterium zadawalającej dokładności transformacji biliniowej przyjmowano $m_{ps} \leq 1,5$ piksela.

Podstawowe funkcje VSD wykorzystywane w trakcie tego pomiaru to:

- powiększenie obrazu (Z),
- sprzęgnięcie („1”),
- tabulator – zmiana mierzonego zdjęcia,
- zmniejszenie skoku kursora („-”),
- zwiększenie skoku kursora („+”),
- kursory \uparrow i \downarrow ,
- centrowanie wokół kursora – znaczka mierzącego (C),
- rejestracja współrzędnych (J).

Kolejne punkty mierzone są – przy wykorzystaniu wspomnianych funkcji VSD – w następujący sposób: w miejscach wskazanych na rysunku 1, na szczególnie punktowym albo pionowym, zidentyfikowanym na obu obrazach, osadzano kursor (spełniający funkcję znaczka pomiarowego), sprzęgano znaczki („1”), przemieszczano się na odpowiednie miejsce klawisza dźwigara (myszką), po czym – po odpowiednim powiększeniu obrazu i zmniejszeniu skoku kursora – osadzano ostatecznie znaczki pomiarowe na zdjęciu prawym i lewym, po czym rejestrowano współrzędne tłowe punktu. Każdy punkt mierzono trzykrotnie (w miejscach sąsiadujących ze sobą). Warto pamiętać, aby kończyć pomiar, gdy wyświetlone są współrzędne tłowe (nie pikselowe); w przeciwnym wypadku nie zostaną one zarejestrowane w pliku wynikowym.

3.2. Zautomatyzowany pomiar na obrazach cyfrowych

Automatycznego pomiaru dokonano przy użyciu oprogramowania „Feature Extraction Software” mającego możliwość automatycznego wykrywania obiektów liniowych, opisanego szczegółowo w rozprawie doktorskiej [3]. Program aktualnie jest modyfikowany do różnych celów.

Po wczytaniu obrazu, program dokonuje automatycznego filtrowania obrazu wejściowego wykorzystując operator filtrujący Laplace'a. Pozwala to na wyznaczenie miejsc przecięcia się ilorazu różnicowego obrazu cyfrowego z osią X , co z kolei pozwala aproksymować miejsca przebiegu linii krawędziowej badanego dźwigara.

Istotą jego działania jest wyszukiwanie na krawędziach obiektów liniowych położenia pikseli granicznych – krawędziowych (miejsc przecięcia) z podpikselową dokładnością.

Po takiej analizie, kolejnym krokiem jest aproksymacja szukanej krawędzi obiektu linią prostą (lub inną krzywą). Po dokonaniu obliczeń statystycznych program wizualizuje wektorem poszukiwaną linię krawędziową. Wizualna ocena pozwala stwierdzić efektywność użytego algorytmu. W przypadku niepowodzenia należy zmienić parametry przeszukiwania (np. szerokość pasa poszukiwania – wyrażona w pikselach czy kierunek przeszukiwania: poziomy lub pionowy).

W tym przypadku program wykorzystano do aproksymacji krawędzi dźwigara, od której obliczono odległość do badanych punktów kontrolnych w podpikselową dokładnością.

Po wykryciu linii krawędziowej (automatycznie) pomierzono odległości do poszczególnych punktów badanego dźwigara. Wyniki podano w podrozdziale 5.

4. Wyniki pomiarów

Pełne opracowanie pomiarowe zawiera informacje o aktualnym stanie wygięć poszczególnych więźarów oraz o okresowych przyrostach ich wygięć (tab. 1 i 2).

Tabela 1. Wielkości aktualnych ugięć dźwigarów 2-21 w poszczególnych punktach – rezultaty fotogrametrycznych pomiarów analogowych

	A	B	C	D	E	F	G	H
2	0	-17	-16	-20	-26	-6	0	0
3	0	-9	-14	-24	-16	-10	-10	0
4	0	-8	-8	-24	-33	-7	0	0
5	0	+8	+3	-13	-22	-27	-28	0
6	0	+1	-7	-24	-17	-11	-19	0
7	0	+9	+7	-4	-4	+7	+8	0
8	0	-2	-1	-7	-14	0	+2	0
9	0	0	-4	-15	-15	+2	-1	0
10	0	+9	+8	-3	-10	-4	-2	0
11	0	-8	-6	-10	-16	-3	+7	0
12	0	-15	-14	-27	-29	-16	-7	0
13	0	-30	-32	-29	-35	-2	+2	0
14	0	-26	-34	-32	-34	-4	+3	0
15	0	-28	-31	-26	-32	-2	-1	0
16	0	-16	-20	-5	-6	-4	+8	0
17	0	-9	-14	-9	-6	-2	-2	0
18	0	-17	-20	-14	-20	-11	-11	0
19	0	-34	-27	-30	-38	-35	-21	0
20	0	-9	-5	-16	-16	-14	-15	0
21	0	-2	-4	+2	-1	-2	+3	0

Przyrosty „ugięć” (zestawione w tabeli 2) świadczą o odkształceniu okresowym więzarów (w latach 1985–2004). Warto zwrócić uwagę, że bezpośrednie wyznaczenie przyrostów ugięć na podstawie paralaks czasowych (którego wyniki zawiera tabela 2) stanowi dokładniejszy sposób wyznaczenia tych wielkości aniżeli porównanie liczbowych wartości ugięć, które jest obarczone wpływem przypadkowych nierówności powierzchni mierzonej krawędzi więzara (efekt nierówności szalunku, betonu lub tynku). W rezultacie, chociaż dokładność określenia ugięć aktualnych (tabela 1) można szacować na poziomie 2 mm, to porównywalność tych wielkości jest ograniczona. Natomiast przyrosty ugięcia podane w tabeli 2 zostały określone z błędami średnimi rzędu $0,5 \pm 1$ mm. Najdokładniej określone zostały ugięcia dźwigarów środkowej części hali; ugięcia dźwigarów skrajnych (2, 3, 19, 20, 21) są określone z niższą dokładnością (około 1,5 raza).

Tabela 2. Odkształcenia okresowe więzarów – przyrosty ugięć dźwigarów 2–21 od roku 1986 do roku 2004, wyznaczone w punktach A–H [mm] – rezultaty fotogrametrycznych pomiarów analogowych

	A	B	C	D	E	F	G	H
2	0	-2	-3	-2	-6	-3	0	0
3	0	-1	-3	-2	-2	-3	-1	0
4	0	-2	-2	-3	-3	-2	-2	0
5	0	-1	-2	-1	-1	0	0	0
6	0	0	-1	0	+1	-1	-1	0
7	0	0	-1	-1	-1	0	0	0
8	0	-1	-2	-3	-4	-2	-2	0
9	0	-2	-5	-5	-5	-3	-4	0
10	0	-2	-3	-5	-5	-4	-4	0
11	0	-2	-2	-4	-4	-4	-3	0
12	0	-1	-2	-4	-3	-4	-4	0
13	0	-2	-2	-3	-4	-1	-2	0
14	0	-3	-3	-4	-5	-2	-1	0
15	0	-2	-2	0	-1	+1	+1	0
16	0	-3	-2	-2	-3	-2	-3	0
17	0	-2	-2	-3	-3	-4	-2	0
18	0	-3	-2	-3	-3	-2	-1	0
19	0	-5	-6	-1	-3	-3	-1	0
20	0	-1	-2	-2	-3	-1	-2	0
21	0	-1	-4	-5	-4	-2	0	0

Wyniki pomiarów zestawione w tabelach 1 i 2 stanowiły podstawę opracowania wykresów ugięć aktualnych oraz wykresów okresowych przyrostów ugięć mierzonych dźwigarów. Przyjęto skalę poziomą 1:150; skale pionowe są zróżnicowane: dla wykresów ugięć aktualnych przyjęto skalę pionową 1:2 zaś dla wykresów przyrostów ugięć okresowych przyjęto skalę 1:1. Nad każdym wykresem podano numer dźwigara; wykresy przedstawiono w widoku od strony więzara 1.

5. Analiza dokładnościowa i wnioski

Analizę dokładności zastosowanych metod przeprowadzono w oparciu o pomiary par czasowych zestawianych z dwóch zdjęć tego samego stanu; dzięki temu znano prawdziwe wartości przemieszczeń – były one równe 0. Tą drogą wyznaczono błędy średnie określenia okresowych odkształceń pionowych, zestawionych w tabeli 2.

Porównanie dwóch metod pomiarowych: analogowej (przy wykorzystaniu stereokomparatora precyzyjnego), oraz cyfrowych – „ręcznej”, z wykorzystaniem stacji fotogrametrycznej, oraz zautomatyzowanej (opartej na programie opracowanym przez dr S. Mikruta) pozwala na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

- jakkolwiek stereokomparator precyzyjny stanowi dosyć wygodne i dokładne narzędzie pomiarowe, pomiar w cyfrowej stacji fotogrametrycznej VSD AGH jest wygodniejszy;
- najważniejsze udogodnienia są związane z łatwością zmiany powiększenia, poruszania się po obrazie, możliwością zmiany szybkości przemieszczania się po obrazie poprzez zmianę skoku kursora, z łatwością zmiany postaci znacznika mierzącego;
- analiza wyników pomiarów na stereokomparatorze precyzyjnym wskazuje, że zmiana pionowego przemieszczenia punktu (z pojedynczego pomiaru) określana jest z odchyleniem standardowym ± 6 mm, analogiczny błąd określony w trakcie „ręcznych” pomiarów na obrazach cyfrowych wyniósł 5,1 mm, natomiast w procedurze zautomatyzowanego pomiaru wyniósł 4 mm; uwzględniając trzykrotny pomiar każdego punktu w metodach „ręcznych”, oraz zwielokrotniony w przypadku automatyzacji, pozwala to ocenić dokładności poszczególnych metod (odpowiednio) jako: 3,5 mm; 3 mm; 2,5 mm. Należy zwrócić uwagę na fakt niskiej jakości obrazów fotograficznych uzyskiwanych w niekorzystnych warunkach oświetleniowych hal przemysłowych, oraz na niejednoznaczną definicję mierzonych punktów obieranych na krawędzi prefabrykatu żelbetowego.

Stosując standardową kamerę o stałej rzędu 200 mm (np. Photheo 19/1318), przy odległościach fotografowania 15÷35 metrów, wyznacza się zmiany ugięć dźwigarów z odchyleniem standardowym rzędu 0,2÷0,5 mm.

Perspektywę osiągnięcia podobnej dokładności na drodze „czysto” cyfrowej, przy zastosowaniu opisanej metodyki, stwarza oferowana przez firmę Rollei kamera cyfrowa o niezwykle interesujących parametrach: powierzchnią matrycę CCD o wymiarach (około) 40x50 mm tworzy 6 000 000 pikseli o wymiarze 6 mm; kamerka ta może być mocowana na lunecie teodolitu, co umożliwia wykonywanie zdjęć o założonej orientacji przestrzennej. Przy zastosowaniu obiektywu o ogniskowej 100 milimetrów, można będzie – na co wskazują wnioski z przedstawionych badań – osiągać w pomiarach ugięć dźwigarów dokładności podmilimetrowe.

Literatura

- [1] Bernasik J.: *Racjonalizacja kontrolnych pomiarów hal fabrycznych*. Warszawa, Przegląd Geodezyjny, Nr 2, 1996

-
- [2] Bernasik J., Mikrut S.: *Fotogrametria inżynierska*. Ośrodek Edukacji Niestacjonarnej AGH 2004, http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/obliczenia_inzynierski
 - [3] Mikrut S.: *Wpływ skanowania i kompresji wg standardu JPEG na automatyczne wykrywanie obiektów liniowych i punktowych na obrazach cyfrowych*. Kraków AGH WGGiŚ, 2003 (rozprawa doktorska)