

WYZNACZENIE PIONOWOŚCI KOMINA Z ZASTOSOWANIEM SKANOWANIA LASEROWEGO

Izabela Piech, Bogusława Kwoczyńska✉, Szymon Łukaszewicz

Katedra Geodezji Rolnej, Katastru i Fotogrametrii, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie
ul. Balicka 253a, 30-198 Kraków, **Polska**

ABSTRAKT

W artykule przedstawiono aspekty wyznaczenia pionowości komina w oparciu o pomiary fotogrametryczne. Pomiary wykonano z wykorzystaniem skanera LeicaGeosystems, modelu Scan Station P40. Zakres prac obejmował pozyskanie i połączenie chmur punktów, a następnie opracowanie na ich podstawie modelu 3D.

Połączenie pojedynczych skanów wykonano z wykorzystaniem kul o średnicy 15 cm z dokładnością na poziomie 0,005 m. Pomiary wykonano z trzech stanowisk, po to, aby uzyskać maksymalną ilość informacji o badanym obiekcie. Modelowanie pozyskanych danych przeprowadzono w środowisku oprogramowania MicroStation.

Słowa kluczowe: pionowość komina, naziemny skaning laserowy, orientacja skanów, dokładność skanowania, model 3D, budowle wieżowe, pomiary odkształceń

WPROWADZENIE

„Naziemny skaning laserowy (ang. *Terrestrial Laser Scanning*) jest stosunkowo nową techniką pomiaru. Jego działanie opiera się na wysyłaniu wiązki laserowej oraz rejestrowaniu odbicia w trybie fazowym bądź impulsowym. Wracając do skanera, wiązka niesie ze sobą informacje dotyczące wartości odbicia sygnału od powierzchni obiektu (np. budynku). Za jej pomocą jesteśmy przede wszystkim w stanie zmierzyć kąt oraz odległość do skanowanego obiektu. Produkty otrzymywane w wyniku TLS to:

- chmura punktów o współrzędnych x, y, z ,
- *intensity image* (czyli czarno-białe zdjęcie zarejestrowane przez detektor lasera).

Pomiary TLS wykonuje się w celu uzyskania precyzyjnego trójwymiarowego modelu obiektu, a na

potrzeby użytkowników wytwarzane są następujące produkty:

- trójwymiarowe modele w postaci chmury punktów pozwalające na wykonanie pomiarów, generowanie przekrojów i wizualizacje obiektów,
- rysunki inwentaryzacyjne (rzuty, przekroje i widoki wytworzone na bazie zarejestrowanej chmury punktów),
- trójwymiarowe, wektorowe modele budynków, obiektów przemysłowych i inżynierskich,
- modele obiektów o nietypowych kształtach (w tym tzw. inżynieria odwrotna), badanie deformacji” (Falkowski i in. 2011).

Zastosowanie skanerów 3D jest bardzo szerokie. Wykorzystuje się je w takich dziedzinach jak archeologia (dokumentacja wykopalisk), kryminalistyka (dokumentacja miejsca zbrodni), architektura

✉rmkwozy@cyf-kr.edu.pl

(inventaryzacja zabytków), leśnictwo (szacowanie drzewostanu), geodezja (pomiar topografii terenu, dróg), inżynieria lądowa (dokumentacja instalacji przemysłowych), inżynieria przemysłowa (w przemyśle samochodowych oraz maszynowym do wyznaczania profili przedmiotów na potrzeby szybkiego prototypowania, a także do kontroli jakości wykonanych elementów).

Niezwykle intensywny rozwój technologii od początku obecnego stulecia zaowocował wieloma innowacjami, również w dziedzinie geodezji i kartografii, a w szczególności w zakresie fotogrametrii i teledetekcji. Oprócz ewolucji znanych już form pomiarów, jak przejście ze zobrażeń analogowych na cyfrowe, pojawiły się też nowe metody pozyskiwania danych przestrzennych, jak techniki satelitarne czy skaning laserowy będący przedmiotem prezentowanego opracowania. Upowszechniający się skaning laserowy w różnych postaciach (skaning naziemny, lotniczy, satelitarny) stał się nowym narzędziem, które rozszerzyło dotychczasowe możliwości pomiarowe, jak również znalazło zastosowanie poza branżą geodezyjną, np. w budownictwie, archeologii, konserwacji zabytków czy medycynie. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów odchyień pionowości komina przemysłowego będącego częścią Krakowskich Zakładów Przemysłu Nieorganicznego „Bonarka” i Fabryki Supertomasyny „Bonarka” na podstawie danych pozyskanych ze skaningu naziemnego. W tym celu 28 kwietnia 2016 r. wykonano pomiar na trzech stanowiskach, wykorzystując skaner Leica P40.

SKANING NAZIEMNY

Obecnie naziemny skaning laserowy znajduje zastosowanie w wielu różnych dziedzinach inżynierii (Abmayr i in. 2005). Stosowany jest z powodzeniem do tworzenia trójwymiarowych modeli miast, kontroli produktów, a także do bezinwazyjnej inspekcji obiektów inżynierskich (Kędzierski i in. 2008). Dziedziną, w której wykorzystuje się również skaner laserowy jest inventaryzacja przemysłowa. Znajduje on zastosowanie w monitoringu przewodów napowietrznych,

mostów, tuneli czy kominów. Budowa obiektów przemysłowych ściśle wiąże się z ich monitorowaniem i sprawdzaniem czy czynniki zewnętrzne wpływające na dany obiekt nie prowadzą do dewastacji.

W pracach pomiarowych związanych z wyznaczeniem pionowości obiektów wysmukłych stosuje się różne metod. Jedną z nich jest metoda fotogrametryczna (Dumalski i in. 2013). Oś trzonu komina ma być pionową linią prostą. W praktyce rzeczywista oś komina odbiega od pionowej linii prostej i może ulegać przemieszczeniom i odkształceniom w czasie eksploatacji. Wielkości przemieszczeń pionowych konstrukcji wyznaczane są metodami geodezyjnymi na podstawie okresowych obserwacji reperów zastabilizowanych na fundamencie. Sprawdzenie osiadania fundamentów ma na celu wykrycie ich nierównomiernego osiadania będącego przyczyną przechylenia się trzonu komina. Trzon komina może się odkształcać również z powodu innych przyczyn niezależnie od nierównomiernego osiadania fundamentów. Badanie kształtu osi komina jest możliwe poprzez obserwacje geodezyjne lub fotogrametryczne (Wróbel i in. 2012). Proces powstawania trójwymiarowego modelu na podstawie danych pozyskanych z pomiarów skanerem składa się z dwóch głównych etapów. Pierwszy polega na rejestracji laserowej, a drugi obróbce uzyskanych danych. Jeśli chodzi o wybór odpowiedniego skanera potrzebnego do wykonania konkretnego zadania, to warto wziąć pod uwagę jego zasięg i dokładność pomiaru. Najistotniejsza jest kwestia wyboru oprogramowania do obróbki uzyskanych danych. Przed przystąpieniem do skanowania należy dokładnie rozpoznać obiekt oraz zakres skanowania. Skaner powinien być zorientowany w układzie współrzędnych. Zatem korzysta się z punktów o znanych współrzędnych lub zakłada się własny układ lokalny. Używa się do tego tarcz bądź kul. W celu orientacji instrumentu należy określić położenie przynajmniej trzech kul. Po zarejestrowaniu przez instrument punktów stabilizacyjnych określa się zakres poziomy oraz pionowy pomiaru, dokładność, a następnie wykonuje pomiar. Chcąc uzyskać trójwymiarowy model chmury punktów, należy połączyć ze sobą wszystkie skany wykonane z różnych stanowisk. Należy wykorzystać

rozłożone kule tworzące układ lokalny dla skanera, posłużą one do dokładnego dopasowania skanów. Większość programów dostarczanych do skanera potrafi automatycznie rozpoznawać punkty referencyjne i łączyć skany w jedną chmurę punktów. Gdy chmura punktów jest już złożona, warto zadbać o odpowiednią jej orientację względem globalnego układu współrzędnych. Pomiary wykonano, używając skanera LeicaScanStation P40. Dostarcza on najwyższej jakości danych 3D i zobrazowania HDR z szybkością 1 mln punktów na sekundę, w odległości do 270 m od skanera.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BUDOWLI WIEŻOWYCH

W budownictwie przyjęto ogólny warunek, bez którego obiekt nie może być zaliczany do kategorii budowli wieżowych:

$$h/b_{max} \geq 5 \quad (1)$$

gdzie:

h – wysokość budowli,

b_{max} – maksymalna szerokość budowli.

Definicja ta nie jest w pełni ścisła, ponieważ nie obejmuje rodzajów budowli tradycyjnie zaliczanych do budowli wieżowych, takich jak chłodnie kominowe czy silosy. Z drugiej strony, słupy i maszty, choć spełniają warunek ze wzoru (1), zaliczają się do zupełnie innej grupy budowli. Jeszcze inną grupę stanowią maszty antenowe na odcciągach, ze względu na odmienny sposób ich konstrukcji.

Najwięcej wznosi się kominów przemysłowych. Materiałem, z którego się je buduje, jest żelbet, rzadziej stal. Współcześnie projektuje się cztery rodzaje kominów:

- kominy zbieżne,
- kominy cylindryczne jedнопrzewodowe,
- kominy wieloprzewodowe cylindryczne,
- kominy o innym przekroju, nieulegającym zmianie wraz z wysokością.

Kolejnym rodzajem budowli wieżowych, które są wznoszone na potrzeby przemysłu, są chłodnie kominowe. Zalicza się je do największych przemysłowych

budowli monolitycznych. Mają kształt bryły obrotowej uzyskanej przez hiperboloidę jedнопowłokową.

Trzecią grupę budowli wieżowych stanowią wieże telewizyjne. Ich znaczne wysokości są uwarunkowane tym, że zasięg telekomunikacyjny wzrasta wraz wysokością.

Ciążar własny budowli jest ściśle związany z technologią budowy oraz materiałem, z którego ona powstaje. Przez pojęcie ciężaru rozumie się ciężar trzonu lub powłoki, wykładziny żaroodpornej oraz innych urządzeń dodatkowych. Zastosowanie odpowiedniej technologii w konstrukcji fundamentów decyduje o stateczności budowli.

Rodzaj podłoża, na którym ma być zbudowana konstrukcja wieżowa, jest kolejnym determinantem zastosowania określonego rodzaju fundamentów. Budowle wieżowe są szczególnie narażone na oddziaływanie gruntu, ponieważ konstrukcja ważąca wiele ton ma swój punkt podparcia zlokalizowany na bardzo małej przestrzeni. Wyróżnić można dwa rodzaje posadowienia – bezpośrednie i pośrednie. W posadowieniu pośrednim wykorzystuje się różnego rodzaju dodatkowe elementy konstrukcyjne wspomagające trwałość fundamentów. Posadowienie bezpośrednie nie posiada takich elementów.

Budowle wieżowe o dużych wysokościach są w dużym stopniu narażone na działanie wiatru. Struga wiatru nie jest jednolita i występują w niej tzw. porywy.

Dla kominów o wysokości większej niż 100 m współczynnik działania porywów wiatru $\beta = 2,0$. Z kolei dla kominów, których wysokość przekracza 100 m, współczynnik β wyznacza się na podstawie normy „Obciążenia w obliczeniach...” (PN-77/B-02011). Wartość współczynnika działania porywów wiatru zależy od wartości, które charakteryzują własności dynamiczne komina. Należą do nich częstotliwość drgań własnych i logarytmiczny dekrement tłumienia.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na odkształcenia budowli wieżowych są oddziaływania termiczne. Promienie słoneczne ogrzewają ściany boczne budowli w nierównomierny sposób ze względu na pozorny ruch Słońca po nieboskłonie. Skutkiem takiego nagrzewania jest różnica temperatur powierzchni

ścian dochodząca nawet do 30°C. Prowadzone są badania, w których udowadnia się, że działanie promieni słonecznych wpływa na przesuwanie się punktów konstrukcji budowli nawet o kilka centymetrów. Z punktu widzenia skali makroskopowej można stwierdzić, że budowla zakreśla zamkniętą krzywą w ciągu doby. Cechą charakterystyczną jest opóźniona zmiana toru poruszania się, biorąc pod uwagę występowanie ograniczonej przewodności termicznej materiałów, z których powstała budowla (Przewłocki i in. 1990).

ZAŁOŻENIA DOTYCZĄCE POMIARU KOMINÓW

Badania przemieszczeń są prowadzone w celu określenia wektorów zmian położenia danych punktów. Mogą to być zarówno punkty pojedyncze, jak i ich większe zbiory traktowane jako bryła sztywna nieulegająca żadnego rodzaju przemieszczeniom czy też odkształceniom. Do otrzymania pożądaných wyników należy wykonać trzy etapy prac: projektowe, pomiarowe i obliczeniowe. W celu prowadzenia szczegółowej dokumentacji pomiary należy wykonywać w stałych odstępach czasu. Pomiar inwentaryzacyjny staje się pomiarem wyjściowym, do którego będą porównywane kolejne pomiary.

Pomiary odkształceń i przemieszczeń dostarczają niezwykle cennych informacji dla budowniczych ze względu na duże obciążenie kosztami, którymi obarczeni są inwestorzy w razie niespodziewanej katastrofy budowlanej. W przypadku kominów największym zagrożeniem jest osiadanie fundamentów. Należy jednak zwrócić też uwagę na problemy takie jak zmiany poziomu wody gruntowej czy nadmierne obciążanie konstrukcji. Geodeci i inżynierowie budowlani mają wspólny cel, którym jest niedopuszczenie do przekroczenia przez budowlę krytycznych wartości (Wolski i Toś 2008).

PRACE BADAWCZE CHARAKTERYSTYKA KOMINA CENTRUM HANDLOWEGO „BONARKA” W KRAKOWIE

Zakłady Chemiczne „Bonarka” (dawniej Krakowskie Zakłady Przemysłu Nieorganicznego „Bonarka” i Fabryka Supertomasyny „Bonarka”) były pierwszym zakładem w Polsce, który po II wojnie światowej rozpoczął produkcję sztucznego nawozu supertomasyny. Obecnie w tym miejscu powstało jedno z największych centrów handlowych w Polsce – „Bonarka City Center”, otwarte w 2009 r. Fabryczny komin nie został jednak wyburzony i teraz stanowi element ozdobny zabudowy centrum. Komin ma 105 m wysokości i trzy galerie kontrolne. Posiada również pasy i kontrolki ostrzegawcze. Zbudowany jest z cegły i żelbetowego płaszczka.

POMIAR KOMINA

Pomiar komina przebiegał w warunkach dużego nasłonecznienia i delikatnego wiatru. Punkty pomiarowe wybrano za pomocą wizji lokalnej. Do zorientowania poszczególnych stanowisk wobec siebie użyto kul o średnicy 15 cm. Pomiary wykonano z trzech stanowisk, po to, aby uzyskać maksymalną liczbę informacji o badanym obiekcie. Zasięg skanowania był ograniczony kątowno do budowli wieżowej komina, w celu osiągnięcia jak największej dokładności i rozdzielczości pozyskiwanych danych. Dzięki temu zabiegowi znacznie ograniczono czas pomiaru. Z każdego ze stanowisk wykonano ponadto zdjęcia obrazujące komin z różnych perspektyw. Pomiar przeprowadzono skanerem firmy LeicaGeosystems – modelem Scan Station P40. Można nim sterować za pomocą wbudowanego w bok instrumentu panelu dotykowego, jak również kontrolera lub tabletu. Zintegrowana kamera z opcją powiększania umożliwia dokładne określenie położenia tarcz celowniczych. Dzięki niej można wykonać także zdjęcia badanego obiektu i nałożyć je na chmurę punktów w postaci tekstur. Po zakończeniu pomiarów dane poddano obróbce.

OPRACOWANIE WYNIKÓW

Opracowanie pozyskanych danych odbyło się w programie LeicaCyclone.

Pierwszym etapem pracy było połączenie pozyskanych skanów w całość.

Rejestracja, bo tak nazywa się ten proces, odbywa się na podstawie pomiaru sygnałów pochodzących od kul rozstawionych wokół obiektu pomiarowego. Program oferuje automatyczny sposób łączenia skanów, w wyniku którego otrzymujemy pełny raport z całej operacji. Maksymalny błąd połączenia chmury punktów wyniósł 0,005 m. W większości przypadków błąd ten osiąga wartość 0,001–0,003 m. Wartość błędu wektora przesunięcia dla osi x , y , z charakteryzuje się podobnymi wartościami. Średni błąd dla wszystkich powiązań wyniósł 0,0026 m. Wartość ta świadczy o tym, iż proces łączenia przebiegł prawidłowo, a wynikowa chmura punktów jest spójna i dokładna (tabela 1):

Status: VALID Registration

Mean Absolute Error:

for Enabled Constraints = 0.003 m (dla aktywnych powiązań)

for Disabled Constraints = 0.000 m

Date: 2016.05.13 09:22:58

Database name: Komin_2

ScanWorlds

Station-001: SW-001 (Leveled)

Station-002: SW-002 (Leveled)

Station-003: SW-003 (Leveled)

Constraints

Parametry transformacji dla poszczególnych stanowisk – wektor przesunięcia i macierz oraz kąt obrotu wokół osi z (pozostałe dwie osie mają elementy macierzy zerowe, gdyż skan jest oznaczony jako spoziomowany) są następujące:

ScanWorld Transformations

Station-001: SW-001 (Leveled)

translation: (0.000, 0.000, 0.000) m

rotation: (0.0000, 1.0000, 0.0000): 0.000 deg

Station-002: SW-002 (Leveled)

translation: (-51.553, -24.235, -0.080) m

rotation: (0.0000, 0.0000, 1.0000):114.851 deg

Station-003: SW-003 (Leveled)

translation: (-106.712, 28.359, -0.229) m

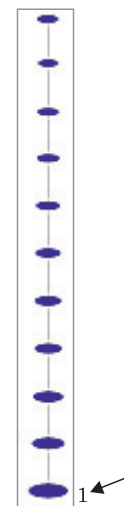
rotation: (-0.0000, -0.0000, -1.0000): 80.365 deg

Następnym krokiem w obróbce danych jest czyszczenie chmury punktów. Filtracja chmury punktów z obszarów sąsiadujących oraz szumów, czyli punktów niemających żadnego zastosowania, jest procesem umożliwiającym pokazaniem tylko interesujących elementów, jak również zoptymalizowanie całej przestrzeni roboczej. Do usuwania zbędnych punktów istnieją wbudowane filtry umożliwiające w dużej części przyspieszenie tego procesu. W opracowaniu wykorzystano narzędzia oprogramowania Leica Cyclone. Chmurę punktów oczyszczono z danych, które w dalszej obróbce nie będą już potrzebne (rys. 1).



Rys. 1. Oczyszczona chmura punktów

Fig. 1. Cleared cloud point



Rys. 2. Płaszczyzny z osią główną

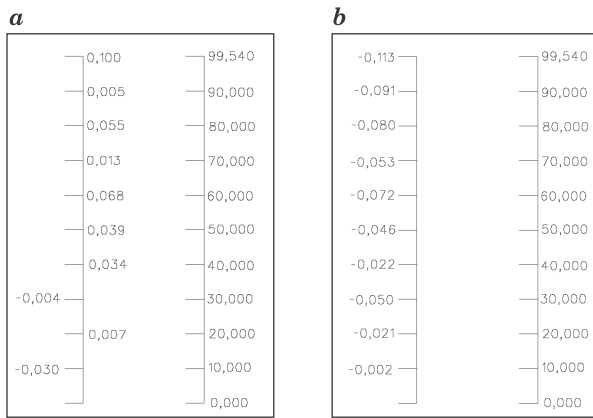
Fig. 2. Plane with main axis

W celu wyznaczenia odchylenia od pionowości komina wyrysowano płaszczyzny z dziesięciometrowym skokiem (rys. 2). Płaszczyznę położoną najbliżej fundamentów obrano za zerową. Przez środek płaszczyzny komina poprowadzono oś, od której badano wychylenia, tzw. oś główną (rys. 2). Z kolei przez pozostałe płaszczyzny poprowadzono krzywą, która pokazuje stopień odchylenia (rys. 3). Wartości z minusem oznaczają odchylenia na lewo od osi głównej,

Tabela 1. Pełny raport z przebiegu łączenia skanów

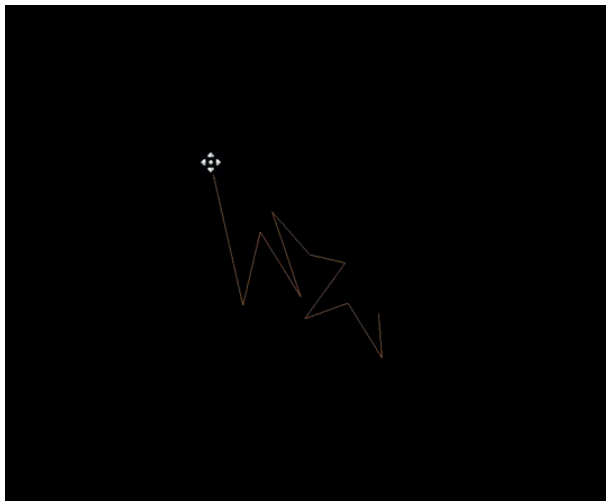
Table 1. Full scan report

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type Status	Weight	Error	Error Vector	Horz	Vert
k3	station-001: SW-001 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.001 m	(0.001, 0.000, 0.000) m	0.001 m	0.000 m
k4	station-001: SW-001 (leveled)	station-002: SW-002 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.005 m	(-0.001, 0.000, 0.005) m	0.001 m	0.005 m
k4	station-001: SW-001 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.003 m	(0.001, 0.000, 0.003) m	0.001 m	0.003 m
k5	station-001: SW-001 (leveled)	station-002: SW-002 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.003 m	(0.000, 0.001, -0.002) m	0.001 m	-0.002 m
k5	station-001: SW-001 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.003 m	(-0.002, 0.001, 0.000) m	0.003 m	0.000 m
k2	station-001: SW-001 (leveled)	station-002: SW-002 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.002 m	(0.001, -0.001, 0.001) m	0.001 m	0.001 m
k2	station-001: SW-001 (leveled)	Station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.001 m	(-0.001, 0.001, -0.001) m	0.001 m	-0.001 m
k1	station-001: SW-001 (leveled)	station-002: SW-002 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.004 m	(0.000, -0.001, -0.004) m	0.001 m	-0.004 m
k1	station-001: SW-001 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.003 m	(0.001, -0.001, -0.002) m	0.002 m	-0.002 m
k2	station-002: SW-002 (Leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.003 m	(-0.001, 0.001, -0.002) m	0.002 m	-0.002 m
k7	station-002: SW-002 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.002 m	(0.000, -0.001, 0.001) m	0.001 m	0.001 m
k6	station-002: SW-002 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.001 m	(0.001, 0.000, 0.001) m	0.001 m	0.001 m
k1	station-002: SW-002 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.002 m	(0.001, 0.000, 0.002) m	0.001 m	0.002 m
k5	station-002: SW-002 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.003 m	(-0.003, 0.000, 0.002) m	0.003 m	0.002 m
k4	station-002: SW-002 (leveled)	station-003: SW-003 (leveled)	coincident: sphere – sphere On	1.0000	0.003 m	(0.002, 0.000, -0.003) m	0.002 m	-0.003 m



Rys. 3. Szkic wychyleń: *a* – osi YZ [m], *b* – osi XZ [m]
 Fig. 3. Sketch of axis tilt: *a* – the YZ [m], *b* – the XZ [m]

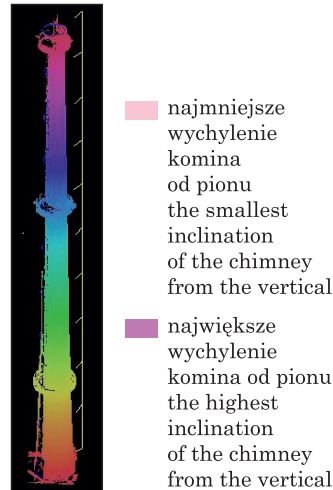
natomiast inne na prawo od niej. Wartości te podane są w metrach. Na rysunku 4 przedstawiono rzut z góry i pokazano, jak zachowuje się krzywa odchyień od osi głównej. Zaznaczony punkt jest początkiem krzywej. Jest to bardzo ciekawe, zważywszy na fakt, że patrząc dopiero z góry na cały komin najlepiej można dostrzec odchylenia.



Rys. 4. Szkic osi wychyleń XY [m]
 Fig. 4. Sketch of the axis of swing XY [m]

Chmura punktów, jako zbiór wielu milionów pojedynczych punktów tworzący pewien fragment obszaru o dużym natężeniu elementów, nie zawsze jest czytelna bez uprzednich zabiegów pomagających urealnić jej odbiór. Kolorowa chmura punktów

pozwała w prosty sposób uatrakcyjnić i uwypuklić przedstawiony na niej obszar wraz z obiektami. Nałożenie rzeczywistych kolorów odbywa się na podstawie dopasowania zdjęcia (tekstury) do chmury punktów. Na rysunku 5 przedstawiono wzrost odchylenia od pionu komina za pomocą intensywności kolorów. Jak widać, im bardziej wzrasta wysokość komina, tym bardziej odchyła się on od pionu. Po przygotowaniu całej chmury punktów można było przejść do tworzenia modelu w programie MicroStation firmy Bentley. Opracowanie wymagało ręcznej wektoryzacji wszystkich elementów, co jest zadaniem niezwykle czasochłonnym. Finalnym efektem było stworzenie modelu 3D komina, co obrazuje rysunek 6.



Rys. 5. Wizualizacja odkształceń
 Fig. 5. Visualization of deformations



Rys. 6. Model 3D komina
 Fig. 6. 3D chimney model

WNIOSKI

Naziemny skanowanie laserowe TLS dostarcza ogromnej liczby danych wykorzystywanych w pomiarze pionowości komina. Z uwagi na czas i dokładność pomiaru wykorzystanie skanerów laserowych wydaje się najlepszym rozwiązaniem. Pomiar odbywający się często w trudnych warunkach terenowych przemawia za szybkim skanowaniem kilkudziesięciu tysięcy punktów na sekundę. Z rozwojem technologii skanerów laserowych współpracuje rynek software'owy. Ogromna liczba danych do przetworzenia

wymaga zastosowania wydajnościowych silników sterujących pracą oprogramowania. Na rynku pojawiają się specjalistyczne aplikacje wykorzystywane w różnych branżach np. w archeologii, budownictwie czy w górnictwie. Takie podejście wymaga zastanowienia się, jakie funkcje ma spełniać dany program, aby jak najefektywniej zaprezentować efekty końcowe. W przedstawionym opracowaniu wykorzystano oprogramowanie Leica Cyclone zapewniające użytkownikom chmur punktów najszerszy zestaw opcji do opracowania projektów skanowania laserowego z inżynierii, budownictwa, geodezji i z innych dziedzin z nimi związanych.

Budowle wieżowe są integralną częścią naszego środowiska. Konieczne jest ich monitorowanie oraz pomiary ich odkształceń i przemieszczeń. Jednym z kluczowych warunków geometrycznych, które powinny spełniać budowle wysmukłe, jest warunek pionowości ich osi. Wszelkie odstępstwa od tego warunku mogą wynikać z następujących czynników: błędów wykonawstwa budowlanego i geodezyjnego na etapie budowy, działania spalin i czynników atmosferycznych, które powodują osłabienie konstrukcji, nierównomierności osiadań podłoża gruntowego pod fundamentami, parcia wiatru, gradientu termicznego (jednostronne ogrzewanie trzonu komina przez promienie słoneczne). Urbanizacja coraz to nowych środowisk będzie niosła za sobą budowę kolejnych budowli wieżowych oraz konieczność ich pomiarów, stąd wykorzystanie skanerów laserowych do tego typu pomiarów stanie się coraz powszechniejsze.

Analizując otrzymane i opracowane wyniki, można wnioskować, że komin odchyła się wraz ze wzrostem wysokości, tam gdzie ogrzewają go promienie słoneczne.

Biorąc pod uwagę wartości odchylenia, można stwierdzić, że nie są duże i nie zagrażają konstrukcji komina.

PIŚMIENNICTWO

- Abmayr, T., Hartl, F., Reinkoster, M., Frohlich, C. (2005). Terrestrial Laser Scanning – applications in cultural heritage conservation and civil engineering. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* XXXVI(5/W17).
- Dumalski, A., Hejbudzka, K., Łata, P., Zienkiewicz, M. (2013). Klasycznie czy nowoczesnie? Technologia skanowania laserowego w badaniu pionowości obiektów wysmukłych (Classic or modern? Laser scanning technology in the study of the verticality of slender objects). *Nowa Geodezja w Praktyce* 9, 11–19.
- Falkowski, P., Parzyński, Z., Uchański, J., Uchański, Ł. (2011). Standardy i metadane (Standards and metadata). *Dodatek miesięcznika Geodeta (Appendix of the monthly Geodeta)* 11(198), 8–12.
- Kędzierski, M., Walczykowski, P., Fryškowska, J. (2008). Naziemny skaning laserowy drogowych obiektów inżynierskich (Terrestrial laser scanning of engineering road objects). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18a, 211–220.
- Przewłocki, S., Kamińska-Czyż, K., Pękalski, M., Gmyrek, J., Janusz, W., Gocał, J., Nowicki, J., Prószyński, W. (1990). *Geodezja inżynierska (Engineering geodesy)*, t. I. Wydawnictwo PPWK, Warszawa.
- Wolski, B., Toś, C. (2008). *Geodezja inżynierska-budowlana (Engineering and construction surveying)*. Wydawnictwo PK, Kraków, www.leica-geosystems.pl, dostęp: 4.03.2017.
- Wróbel, A., Wróbel, A., Kędzierski, M. (2012). Termografia w pomiarach inwentaryzacyjnych kominów przemysłowych – cz. I (Thermography in the measurement of industrial chimneys – part. I), *Serwis internetowy inżynierbudownictwa.pl (Internet service engineer.pl)*, dostęp: 4.03.2017.

DETERMINATION OF THE VERTICALITY OF THE CHIMNEY ON THE BASIS OF PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENTS

ABSTRACT

The article presents aspects of determining the verticality of a chimney based on photogrammetric measurements. The measurements were made using the LeicaGeosystems Scan Station P40 scanner. The scope of the work involved gathering and combining point clouds and then developing a 3D model based on them.

Combinations of single scans were made using spheres with a diameter of 15 cm with an accuracy of 0.005 m. The measurements were made from three stations to obtain the maximum amount of information about the examined object. Modeling of the acquired data was performed in the MicroStation software environment

Key words: Chimney vertical, terrestrial laser scanning, scan orientation, scanning accuracy, 3D model, tower structures, deformation measurements

