

ZASTOSOWANIE SKANERA LASEROWEGO 3D DO ODTWARZANIA GEOMETRII ZŁOŻONYCH OBIEKTÓW NA PRZYKŁADZIE BLOKU ENERGETYCZNEGO

APPLICATION OF 3D LASER SCANNING TO RECONSTRUCTION OF COMPLEX GEOMETRY ON EXAMPLE OF POWER BOILER STRUCTURE

Artur Iluk – Katedra Konstrukcji i Badań Maszyn, Politechnika Wroclawska

W artykule przedstawiono metodę rekonstrukcji rzeczywistej geometrii złożonych obiektów z użyciem technologii skanowania laserowego. Metodę przedstawiono na przykładzie skanu jednego z najbardziej złożonych geometrycznie obiektów technicznych, jakim jest blok energetyczny dużej elektrowni węglowej. W pracy zamieszczono przykładowe skany zarówno laserowe jak i optyczne. Przedstawiono możliwości i wyniki skanowania, omówiono również możliwości wykorzystania tego typu informacji.

In the paper, the reconstruction method of the complex structure geometry with the use of fast 3D laser scanner was presented. The reconstruction was carried out on example of the difficult environment of the power boiler structure of the coal power plant. The examples of the reconstruction results was shown as the laser scans and the corresponding optical images. The advantages and limitations of the method were presented and discussed.

Wstęp

Złożone systemy techniczne, do jakich należą bloki energetyczne elektrowni węglowych, podlegają w czasie eksploatacji ciągłej modernizacji. Wprowadzanie zmian konstrukcyjnych jako przeciwdziałanie powtarzającym się awariom, a nawet remonty nominalnie nie zmieniające postaci geometrycznej konstrukcji, wprowadzają rosnącą z biegiem czasu liczbę zmian w stosunku do dokumentacji projektowej.

Przygotowywanie projektów nowych elementów, które muszą być wmontowane w istniejącą konstrukcję, wymaga znajomości nie tyle geometrii nominalnej, co aktualnego stanu. Projektowanie w oparciu wyłącznie o dokumentację kotła może spowodować kolizję nowych podzespołów ze zmienionym w stosunku do dokumentacji faktycznym stanem konstrukcji.

Praktycznie, każdorazowo projekty muszą obejmować etap inwentaryzacji aktualnego stanu konstrukcji, dokumentacja nominalna musi być weryfikowana na drodze wizji lokalnych oraz pomiarów rzeczywistej geometrii. Powodem są nie tylko zmiany, ale również ograniczona dokładność montażu elementów bloku.

W prezentowanym artykule przedstawiono metodę inwentaryzacji rzeczywistego stanu geometrii złożonych konstrukcji z użyciem szybkiego skanera laserowego 3D. Skanery tego typu są używane do odwzorowywania kształtu terenu [1, 2] czy też geometrii budowli [3]. Metodę przedstawiono na przykładzie bloku energetycznego, który geometrycznie jest bardzo złożonym obiektem technicznym ze względu na duże upakowanie poszczególnych podsystemów bloku. Metoda ta jest jedną z niewielu metod masowej akwizycji danych o geometrii złożonych obiektów technicznych.

Do konkurencyjnych metod można zaliczyć na przykład metody fotogrametryczne, umożliwiające odwzorowanie geometrii na podstawie dużej liczby zdjęć wykonanych z różnych kierunków, czy też metody odtwarzające geometrię z użyciem jednej (ang. *Structure From Motion – SFM*) [4, 5] lub dwóch ruchomych kamer i oprogramowania do analizy stereometrycznej obrazów [6, 7]. Metody oparte na fotogrametrii wymagają

jednakże dobrych warunków oświetleniowych, zaś dokładność odwzorowania geometrii obiektu jest stosunkowo niska. Uzyskanie wysokiej dokładności odwzorowania wymaga umieszczenia na obiekcie znaczników i użycia wzorców kalibracyjnych, co utrudnia, lub nawet uniemożliwia akwizycję danych w trudnych warunkach. Przedstawiona w artykule metoda oparta na skanowaniu laserowym jest pozbawiona tych wad.

Metoda

Skanowanie z użyciem skanera laserowego jest jedną z najszybszych metod akwizycji danych o geometrii. W prezentowanym przykładzie wykorzystano ultraszybki skaner laserowy 3D ScanStation P20 przedstawiony na rysunku 1.

Dokładność pojedynczego pomiaru wynosi około 1 mm w osi wiązki laserowej, dokładność pomiaru pozycji kątowej w obu płaszczyznach obrotu wynosi 8 sekund kątowych.



Rys. 1. Skaner laserowy 3D ScanStation P20 firmy Leica



Rys. 2. Widok tarczy/znacznika wykorzystywanego do łączenia skanów

Skaner jest w stanie określić pozycję do 1 mln punktów na sekundę w obszarze o promieniu 120 m. Skanowany jest obszar o kącie 360 stopni w płaszczyźnie poziomej i 270 stopni w płaszczyźnie pionowej. Z punktu widzenia użycia w hali kotłowni bloku energetycznego, gdzie może występować silne zapylenie i wysokie temperatury powietrza, bardzo istotna jest szczelność konstrukcji skanera na poziomie IP53 oraz zdolność do pracy w temperaturze do 50 °C.

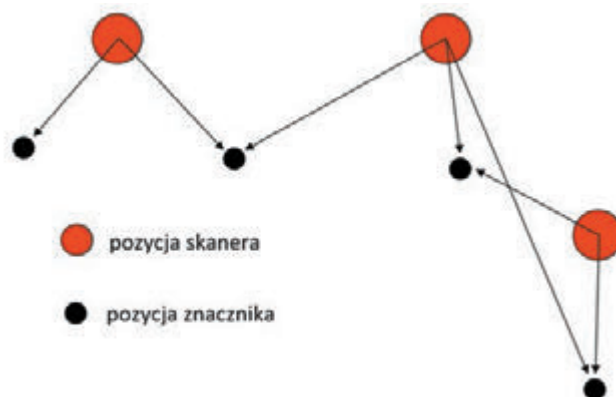
Procedura skanowania geometrii polega na wykonywaniu pojedynczych skanów pełnego pola widzenia skanera kolejno z wybranych punktów na obszarze skanowanego obiektu.

Wynikiem pojedynczego skanu jest chmura punktów rozmieszczona w przestrzeni względem aktualnej pozycji skanera. Pozycja każdego punktu chmury jest precyzyjnie zorientowana względem kierunku pionowego z dokładnością do jednej sekundy kątowej, dzięki dynamicznemu pomiarowi odchylenia osi skanera od pionu. Pozwala to wykonywać pomiary nawet przy niewielkich ugięciach podłogi, co w przypadku stosunkowo podatnego, kratownicowego podłoża występującego na bloku energetycznym jest niezwykle istotne.

W przypadku gęstej zabudowy przestrzeni skanowanego obiektu ograniczającej pole widzenia, w celu odtworzenia geometrii możliwie dużej liczby elementów konieczne jest wykonanie skanów z wielu pozycji. Skan 3D nie zawiera informacji o bardziej oddalonych obiektach, które były przesłonięte obiektami położonymi bliżej skanera.

Precyzyjne łączenie poszczególnych skanów wymaga określenia co najmniej dwóch punktów wspólnych na sąsiednich skanach. Pozycja tych punktów musi być precyzyjnie określona, wykorzystywane są w tym celu specjalne tarcze (znaczniki) umieszczane w polu widzenia skanera. Konstrukcja tarczy umożliwia obrót znacznika w dwóch płaszczyznach bez zmiany położenia punktu centralnego, dzięki czemu można ją skierować w stronę skanera po zmianie punktu skanowania. Widok znacznika przedstawiono na rysunku 2.

Wykorzystanie dwóch lub większej liczby wspólnych punktów w połączeniu z precyzyjnie wyznaczonym kierunkiem pionowym pozwala jednoznacznie połączyć chmury punktów



Rys. 3. Schemat metody łączenia kolejnych skanów

z poszczególnych skanów. Schemat łączenia skanów przedstawiono na rysunku 3.

Dzięki łączeniu skanów, istnieje duże prawdopodobieństwo, że obiekty niewidoczne z jednej pozycji skanera będą widoczne na jednym ze skanów sąsiednich.

Oprócz wykonania skanu laserowego, istnieje możliwość wykonania za pomocą urządzenia ScanStation P20 zdjęcia sferycznego skanowanej przestrzeni. Skaner wykonuje kilkadziesiąt zdjęć w paśmie światła widzialnego, do każdego zdjęcia jest przypisana orientacja przestrzenna osi optycznej aparatu w momencie jego wykonywania. Zdjęcia są następnie automatycznie łączone w zdjęcie sferyczne. Na tym etapie następuje usunięcie zniekształceń geometrycznych zdjęć i mapowanie ich na powierzchnię sferyczną. Ze względu na fakt, że oś optyczna aparatu fotograficznego pokrywa się ze środkiem skanu laserowego, możliwe jest mapowanie zdjęcia optycznego na skan laserowy. Każdemu z punktów skanu laserowego przypisywany jest oprócz, jego współrzędnych w przestrzeni, również odczytany ze zdjęcia kolor obiektu rzeczywistego w danym punkcie. Uzyskany w ten sposób kolorowy skan przestrzenny bardzo ułatwia interpretację i rozpoznanie poszczególnych elementów obiektu.

Przykład zastosowania

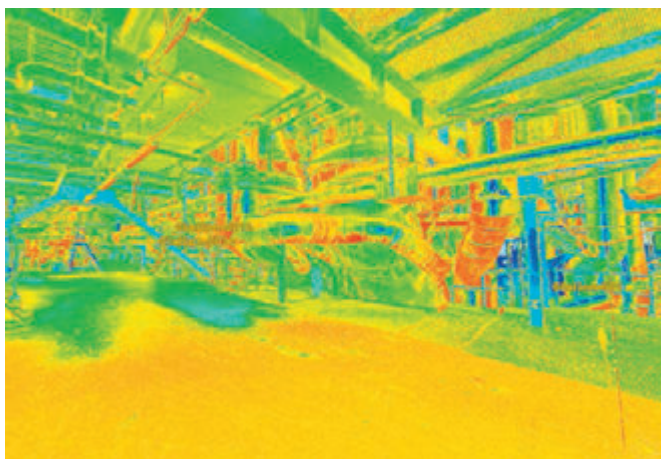
Przykład chmury punktów będącej wynikiem skanu laserowego przedstawiono na rysunku 4. Kolory punktów odpowiadają jakości odbicia wiązki laserowej, od najwyższej (kolor niebieski) do najniższej (kolor czerwony).

Na rysunku 5 przedstawiono przykład fragmentu zdjęcia sferycznego wykonanego z tej samej pozycji, co skan na rysunku 4. Zdjęcie to powstało w wyniku połączenia kilkunastu oddzielnych ujęć wykonanych przy różnej orientacji aparatu w azymucie i elewacji.

Po wykonaniu skanu, możliwe jest jego oglądanie z każdego miejsca w przestrzeni. Na rysunku 6 przedstawiono chmurę punktów w rzeczywistych kolorach widzianą z innego miejsca, niż punkt skanowania. Widoczne są braki w geometrii obiektów spowodowane brakiem widoczności z punktu skanowania.

Odtworzenie otoczenia jednego kotła wymagało wykonania ośmiu skanów sferycznych z punktów rozmieszczonych wokół kotła. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe rozmieszczenie punktów skanowania wokół komory paleniskowej kotła energetycznego.

W środowisku hali kotłowni kluczowy jest odpowiedni wybór kolejnych pozycji skanera, które powinny pozwolić na odwzo-



Rys. 4. Przykład skanu laserowego blok K1 widok od strony rur nawrotu cyklonów pozycja SW-001

rowanie maksymalnej liczby powierzchni elementów bloku energetycznego z jak najmniejszą liczbą stanowisk skanowania. Liczba punktów wynikała przede wszystkim z wymogu widzialności przynajmniej dwóch wspólnych znaczników referencyjnych z każdej pary sąsiednich punktów skanowania.

Przeciętny czas wykonania pojedynczego skanu wynosił około 10 minut. Wykonanie dodatkowo kompletu zdjęć w celu nadania punktom chmury rzeczywistych kolorów jest bardziej czasochłonne, wymaga około 25 minut. Czas ten zależy od warunków oświetleniowych, przy słabym oświetleniu zdjęcia wymagają długich czasów naświetlania, co wydłuża czas akwizycji.

Łączenie skanów wykonano z użyciem oprogramowania Leica Cyclone. Oprogramowanie to dokonuje pozycjonowania punktów skanowania i orientacji skanów względem siebie, minimalizując sumaryczne błędy pozycjonowania metodą najmniejszych kwadratów. Maksymalny błąd względnego pozycjonowania punktów skanowania wyniósł w analizowanym przypadku 3 mm.

W trakcie realizacji prac dokonano akwizycji 280 milionów punktów trójwymiarowych odwzorowujących powierzchnie obiektów na hali kotłowej. Na rysunku 8 przedstawiono widok chmur punktów w okolicy bloku K-1.



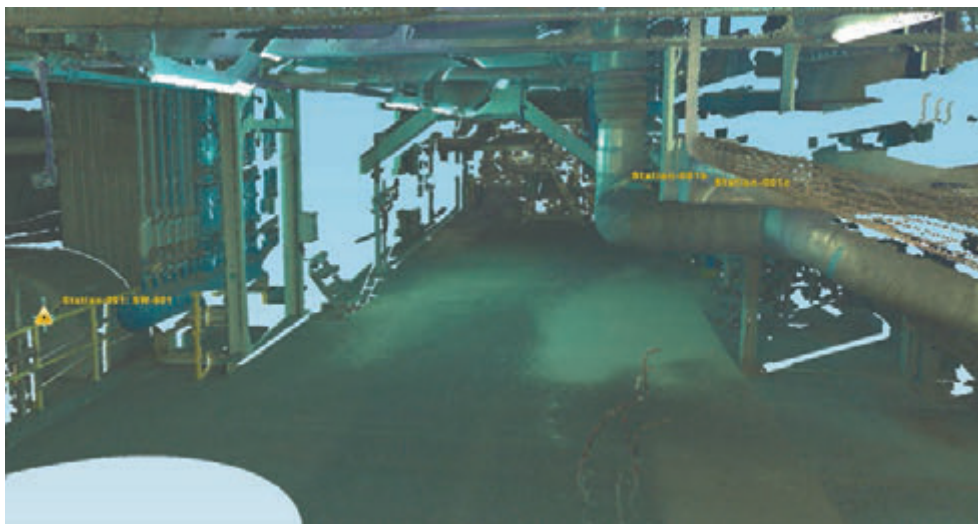
Rys. 5. Widok zdjęcia sferycznego wykonanego z tej samej pozycji SW-001, co skan na rysunku 4

Na bazie chmury punktów możliwe jest automatyczne odtworzenie geometrii obiektów. Na rysunku 9 pokazano skan zbiornika na popiół położonego pomiędzy blokami K-1 i K-2. Według dokumentacji, zewnętrzna powierzchnia zbiornika jest powierzchnią walcową o przekroju kołowym. Oprogramowanie umożliwia automatyczne wpasowanie powierzchni walcowej w chmurę punktów odwzorowujących jego powierzchnię.

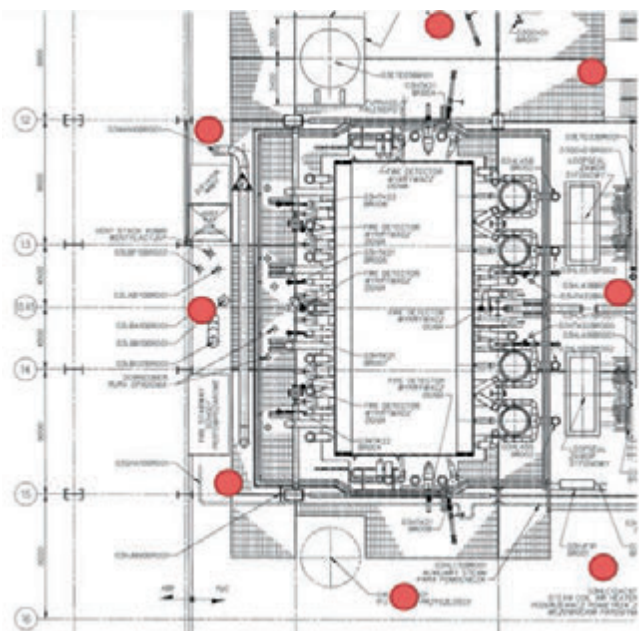
Operacja ta realizowana jest w dwóch etapach. W pierwszej fazie następuje wydzielenie grupy punktów reprezentujących powierzchnię zbiornika. Podstawą jest wskazanie kilku punktów należących do powierzchni zbiornika. Program sukcesywnie wyszukuje sąsiednie punkty budując spójną grupę punktów.

W drugiej fazie program dopasowuje geometrię idealnego cylindra do wyselekcjonowanej grupy punktów. Wszystkie parametry geometryczne, łącznie z położeniem i orientacją osi walca oraz jego średnicą wyznaczone są poprzez minimalizację średniej odległości punktów skanu od idealnej geometrii metodą najmniejszych kwadratów.

Możliwe jest wówczas odczytanie rzeczywistej pozycji osi cylindra względem punktu skanowania, odchylenie osi od kierunku pionowego, średniej średnicy oraz kontrola odchylenia



Rys. 6. Widok kolorowego skanu 3D innego punktu niż punkt skanowania SW-001



Rys. 7. Rozmieszczenie punktów usytuowania skanera podczas skanowania otoczenia komory paleniskowej

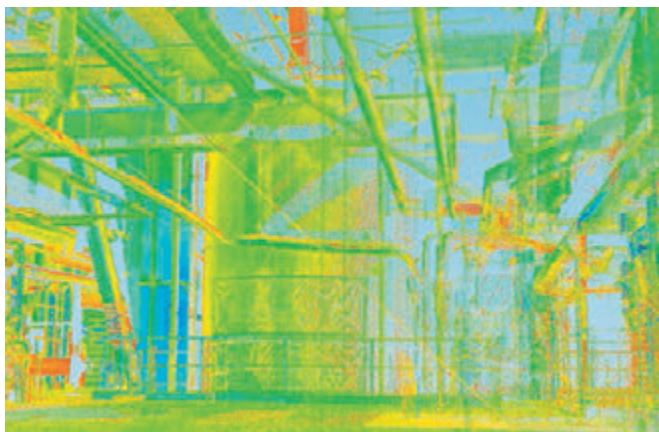
kształtu powierzchni cylindra od idealnej geometrii. Przykładowe parametry geometrii cylindra odwzorowującego zbiornik na popiół zestawiono w tabeli 1.

Widok geometrii zbiornika wpassowanej w chmurę punktów przedstawiono na rysunku 10. Położenie zbiornika na tle globalnej chmury punktów pokazano na rysunku 11.

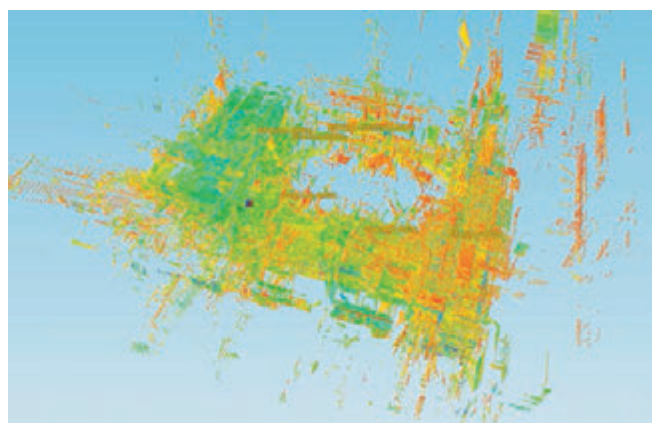
Na bazie chmury punktów możliwe jest odtworzenie rzeczywistej geometrii bardziej złożonych obiektów znajdujących się w polu widzenia, takich jak na przykład rurociągi. Widoczność

Tab. 1. Przykładowe parametry geometrii cylindra odwzorowującego zbiornik na popiół

Parametry geometryczne	
początek osi (X, Y, Z)	-19,158; -26,918; -2,959 m
kierunek osi (X, Y, Z)	-0,0401; 0,0050; 0,9992
średnica	4,298 m
wysokość	6,923 m
Jakość dopasowania	
odchylenie standardowe	0,004 m

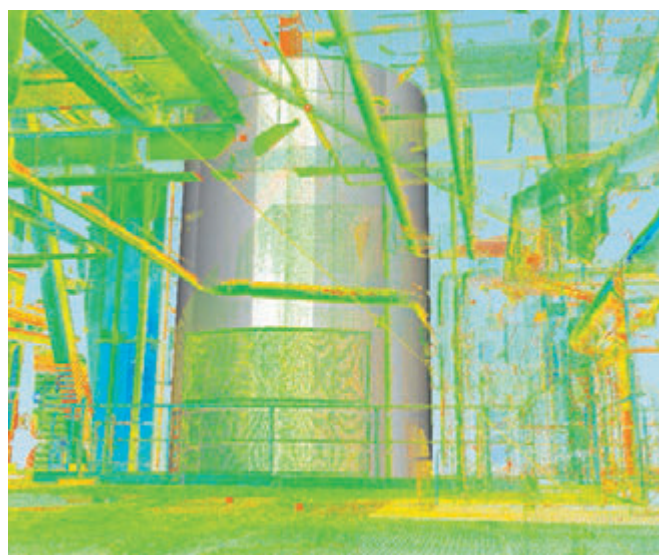


Rys. 9. Skan zbiornika na popiół, blok K-2

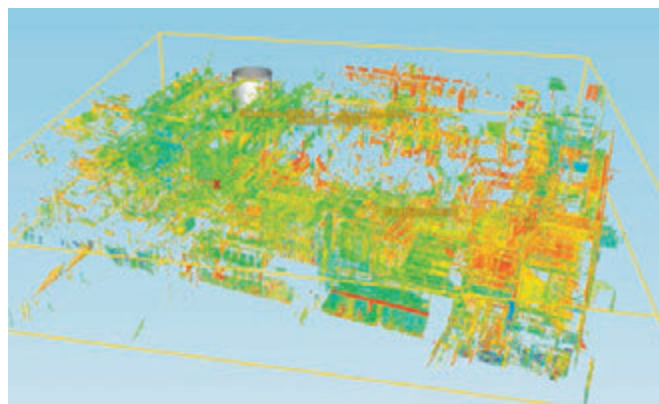


Rys. 8. Widok połączonych chmur punktów odwzorowujących powierzchnie obiektów na hali kotłowni, blok K-1. Widoczna na rysunku pusta przestrzeń w środku to obszar komory paleniskowej

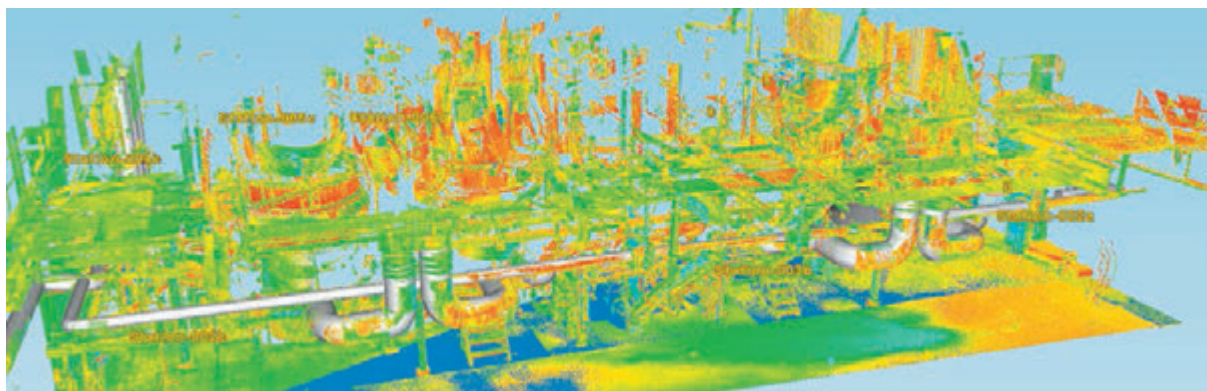
całej powierzchni rurociągu nie jest wymagana, wystarczająca jest widoczność około połowy obwodu. Istnieje możliwość uwzględnienia w geometrii grubości izolacji, która zostanie odjęta od promienia odtworzonego rurociągu. Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono przykładowo fragmenty geometrii rurociągów odtworzone na podstawie skanu.



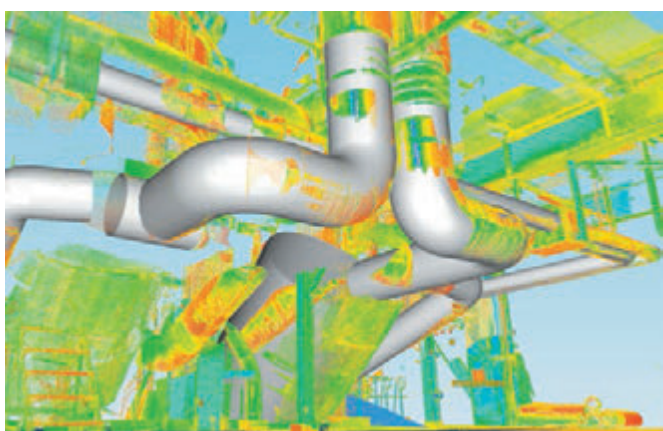
Rys. 10. Geometria zbiornika na popiół odtworzona na podstawie chmury punktów, blok K-2



Rys. 11. Położenie zbiornika na popiół na skanie bloku K-1



Rys. 12. Fragmenty rurociągów zidentyfikowane na podstawie skanu



Rys. 13. Fragmenty rurociągów zidentyfikowane na podstawie skanu, zbliżenie

Oprócz odtwarzania geometrii obiektów, możliwy jest bezpośredni pomiar odległości na chmurze punktów. Na rysunku 13 pokazano przykładowo pomiary odległości wykonane poprzez wybranie dwóch punktów z chmury. Pomiary takie można wykonywać z użyciem skanu laserowego bez kolorów rzeczywistych, jednak wykorzystanie rzeczywistych kolorów znacznie ułatwia wybór odpowiednich punktów.

Wnioski

W ramach realizacji badań wykonano wstępny skan laserowy 3D geometrii obiektów na hali kotłów bloku energetycznego elektrowni węglowej. Przedstawiona metoda umożliwia inwentaryzację i odtworzenie geometrii złożonych obiektów technicznych w trudnych warunkach, takich jak zapylenie, wysoka temperatura, czy duży stopień upakowania różnych obiektów w skanowanej przestrzeni. Całościowe odwzorowanie wymaga wykonania skanów z wielu pozycji oraz precyzyjnego ich połączenia.

W ramach prób zeskanowano fragment hali kotłów o wielkości około 90 na 30 m, zawierający dwie komory paleniskowe. Praktyczną dokładność pozycjonowania obiektów na skanie można oszacować na około 3 mm, co do większości zastosowań jest wystarczające. Czas trwania całego procesu akwizycji chmur punktów wynosi kilka godzin.

Skan odzwierciedla rzeczywistą geometrię wszystkich obiektów w chwili skanowania. Stan ten może być różny od stanu według dokumentacji ze względu na:

- modyfikacje konstrukcji nienaniesione na dokumentacji powykonawczej,



Rys. 14. Pomiary odległości obiektów wykonane bezpośrednio na chmurze punktów

- niedokładności montażu - skan odwzorowuje geometrię z dokładnością do około 1-2 mm, jest to więc dokładność znacznie większa od praktycznie osiąganego dokładności montażu elementów kotła,
- stanu termicznego bloku – przemieszczenia termiczne elementów kotła mogą być o dwa rzędy większe niż dokładność skanu,
- zmiany geometrii w wyniku trwałych odkształceń powstałych w wyniku eksploatacji lub awarii.

Przedstawione wyniki wskazują na możliwość udokumentowania stanu konstrukcji kotłów za pomocą techniki skanowania laserowego z dokładnością pozwalającą na używanie tego typu skanów do różnych celów, jak np.:

1. Ocena możliwości montażu nowych elementów konstrukcji kotła energetycznego. Skan pozwala w tym przypadku ocenić rzeczywiście dostępną przestrzeń w stopniu znacznie bardziej wiarygodnym niż dostępna dokumentacja techniczna.
2. Ocena rzeczywistej dokładności montażu elementów kotła podczas remontów i modernizacji.
3. Ocena skutków awarii. Porównanie geometrii odtworzonej na podstawie skanu przed i po zdarzeniu w analogicznym stanie cieplnym bloku pozwala na precyzyjne określenie trwałych zmian geometrii elementów konstrukcji.

Skany tego typu należałoby lokalnie odtwarzać po istotnych zmianach struktury obiektu, takich jak na przykład modernizacje, czy montaż nowych instalacji.

Odtworzenie pełnej geometrii konstrukcji bloków energetycznych na podstawie skanów jest raczej niewskazane, ze względu na ogromną pracochłonność tego zadania. Znacznie bardziej celowe jest wykonywanie tylko możliwie szczegółowych, wielostanowiskowych skanów konstrukcji bloków do celów dokumentacyjnych. Na podstawie istniejących skanów, zorientowanych w stosunku do punktów referencyjnych, można w razie potrzeby lokalnie odtworzyć interesującą geometrię w danym rejonie na potrzeby projektu modernizacyjnego, remontowego lub w celu oceny skutków awarii. Skanowanie laserowe z użyciem szybkiego skanera laserowego pozwala zgromadzić bardzo dużą ilość takich informacji w stosunkowo krótkim czasie i z całkowicie wystarczającą dokładnością.

Istotnym ograniczeniem metody jest czas trwania akwizycji chmur punktów, który sprawia, że możliwe jest skanowanie obiektów statycznych. W przypadku obiektów w stanach nieustalonych, np. obiektów drgających, błędy skanowania są powiększane o przemieszczenia elementów struktury w trakcie procesu akwizycji. Podobnie błędy wprowadzane są przez zmiany temperatury obiektu, jeśli termiczne zmiany geometrii są porównywalne z dokładnością skanowania. Powoduje to konieczność wykonywania procesu akwizycji w możliwie stabilnych warunkach pracy obiektu. Pomimo tej wady, przedstawiona metoda pozwala na uzyskanie bardzo użytecznych informacji, trudnych do zdobycia innymi metodami.

Literatura

- [1] M. Yakar, H. M. Yilmaz, and O. Mutluoglu, "Performance of Photogrammetric and Terrestrial Laser Scanning Methods in Volume Computing of Excavation and Filling Areas," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 387–394, Nov. 2013
- [2] G. Gigli, S. Morelli, S. Fornara, and N. Casagli, "Terrestrial laser scanner and geomechanical surveys for the rapid evaluation of rock fall susceptibility scenarios," *Landslides*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, Dec. 2012
- [3] J. Kościuk, "Modern 3D scanning in modelling, documentation and conservation of architectural heritage," *Wiadomości Konserw.*, pp. 82–88, 2012
- [4] J. Weng, T. S. Huang, and N. Ahuja, *Motion and Structure from Image Sequences*. Springer, 2012
- [5] D. Derlukiewicz, J. Karliński, and A. Iluk, "The operator protective structures testing for mining machines," *Solid State Phenom.*, vol. 165, pp. 256–261, 2010
- [6] N. Karpinsky and S. Zhang, "Holovideo: Real-time 3D range video encoding and decoding on GPU," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, no. 2, pp. 280–286, Feb. 2012
- [7] C. Brailon, C. Pradalier, K. Usher, J. L. Crowley, and C. Laugier, "Occupancy grids from stereo and optical flow data," in *Experimental Robotics*, Springer, 2008, pp. 367–376

