

Wykorzystanie skaningu laserowego i chmur punktów na budowie. Część I

dr inż. Paweł Nowak, dr inż. Jerzy Roston, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, mgr inż. Karol Romatowski, STRABAG Sp. z o.o

1. Wprowadzenie

Największym i najważniejszym obecnie wyzwaniem jest optymalizacja czasu pracy i pozyskiwanie danych [1]. Ważne są także aspekty finansowe i jakościowe [2]. Wraz z rozwojem technologicznym metodyka wykonywania prac stała się bardziej przyjazna dla użytkownika, bardziej zautomatyzowana, szybsza i łatwiejsza, a mimo to pozwalająca utrzymać odpowiedni poziom dokładności i jakości [3]. Jedną z najnowszych technologii wchodzących na rynek w Polsce jest skaningu laserowy [4]. Fenomen skanerów laserowych jest spowodowany dokładnością pomiarów, które można zestawić na równi z pomiarami wykonywanymi tradycyjnymi metodami z wykorzystaniem tachimetrów [5]. W niniejszym artykule celem autorów jest pokazanie możliwości wykorzystania skaningu laserowego w projektach inwestycyjnych na terenie budowy.

2. Skaningu laserowy – wyzwania

2.1. Wstęp

Technologia stacjonarnego czy naziemnego skaningu laserowego sprowadza się w dużej mierze do gromadzenia znacznej liczby danych przestrzennych w relatywnie krótkim czasie. Efektem pracy ze skanerem laserowym jest chmura punktów, cechująca się zależnie od ustawień wysoką szczegółowością oraz dokładnością w odwzorowywaniu stanu istniejącego, czyli otoczenia. Chmury punktów są wyjściową dla późniejszych analiz. Chmury punktów mają wiele zastosowań, mogą być wykorzystywane w budownictwie do inwentaryzacji obiektów i miejsc istniejących. Innym zastosowaniem chmur punktów jest tworzenie modeli cyfrowych 2D i 3D, a także wizualizacja 3D miast i budynków, tworzenie wirtualnych wycieczek, tworzenie filmów czy ujęć do celów komercyjnych, wykonywanie przekrojów i rzutów, kartowanie map topograficznych oraz dokumentowanie prac architektonicznych.

Znaczne wysiłki badawcze koncentrują się na zautomatyzowanym monitorowaniu postępu prac budowlanych z wykorzystaniem metody Scan-vs-BIM. Skrót „Scan-vs-BIM”, wprowadzony po raz pierwszy przez Bosché i in. [6], reprezentuje metodę, w której model chmury punktów jest porównywany z modelem BIM. W ostatnich latach zastosowano różne technologie skanowania z różnym skutkiem. Ogólny wniosek jest taki, że wyższa jakość chmury punktów prowadzi do lepszych wyników monitorowania postępu prac budowlanych oraz kontroli jakości wykonywanych prac na terenie budowy. Ze względu na znaczny nakład pracy ekspertów ręczne monitorowanie postępu prac wiąże się z nieproporcjonalnie wysokimi kosztami lub może być nieefektywne. Metody oparte na chmurach punktów, wykorzystujące skanowanie laserowe są uważane za drogie i czasochłonne, jednak ze względu na swoją dokładność skanowanie laserowe coraz częściej znajduje zastosowanie jako metoda pozyskiwania danych. Wciąż jednak poważnym problemem jest konieczność zachowania dokładności oraz odpowiedniej widoczności w zatłoczonych wnętrzach oraz na budowach, gdzie pracują setki osób [6].

2.2. Ograniczenia pomiarów skanerami laserowymi

Intensywność odbicia światła lasera – wśród informacji, jakie można otrzymać ze skanowania laserowego, najważniejszymi są współrzędne mierzonych punktów, które składają się na chmury punktów. Warto jednak zdawać sobie sprawę, że skoro pomiary skanerami odbywają się za pomocą pomiarów wykorzystujących prędkość wiązki lasera, to urządzenia te rejestrują także siłę sygnału. Siła sygnału, który powraca do instrumentu, to intensywność odbicia światła od obiektu. Zazwyczaj, pracując z chmurą punktów, niezależnie od oprogramowania, użytkownik ma możliwość pracy w różnych trybach wyświetlania. Siła odbicia elementów jest widoczna również podczas wyświetlania punktów w trybie monochromatycznym. Intensywność

odbicia jest wtedy reprezentowana różnymi odcieniami skali szarości. Innym sposobem wyświetlania jest kolorowa chmura punktów, gdzie punktom przypisywane są kolory ze skali kolorów RGB. Punkty, od których światło odbija się silnie, mają przypisany kolor niebieski. Przy słabym odbiciu punktom przypisywane są kolory bliżej barwy czerwonej. Czerwony kolor oznacza więc niskie albedo (stosunek odbitego promieniowania do promieniowania padającego).

Na wartość intensywności odbicia wiązki lasera wpływają głównie: rodzaj materiału mierzonego elementu oraz kąt padania wiązki lasera na element skanowany [1, 7, 8]. Rodzaj materiału wpływa na intensywność odbicia przez różną zdolność do odbijania światła oraz rozpraszania przez różne materiały. Dodatkowo wraz ze wzrostem kąta, pod jakim pada wiązka lasera na obiekt, maleje intensywność odbicia. Intensywność odbicia światła jest mniejsza także dla materiałów ciemnych. W przypadku skanowania powierzchni betonowych lub dróg asfaltowych warto zwiększyć gęstość wykonywanych pomiarów na stanowiskach lub zmniejszając odległości pomiędzy stanowiskami pomiarowymi, aby uzyskać odpowiednią jakość skanowania. Najlepiej odbija się laser od powierzchni jasnych, płaskich, bez wyraźnych ostrych i nierównych powierzchni. Nierówne powierzchnie lub ostre krawędzie zwiększają kąt odbicia, a co za tym idzie zmniejszają intensywność odbicia. Ciekawym zastosowaniem chmur punktów, biorąc pod uwagę dużą czułość skanerów laserowych na strukturę powierzchni, zawilgocenie i inne, może być wykorzystanie skanów do sprawdzania zawilgocenia materiałów ceramicznych lub betonowych. Z takiej chmury punktów prawdopodobnie możliwe jest wyciągnięcie informacji na temat wytrzymałości, jakości czy stanu materiału, który został zeskanowany i przedstawiony w formie chmury punktów.

Na jakość wykonywanych pomiarów oraz chmur punktów wpływa także szkło jako materiał oraz błyszcząca powierzchnie, jak na przykład lustra. Zależnie od grubości, przezroczystości, struktury czy poziomu zabrudzenia szyby jakość skanowania może dawać różne efekty. Biorąc pod uwagę szkło jako materiał, który w sposób szczególny odbija światło, a także je załamuje, możemy się spodziewać mniejszych lub większych niedokładności pomiarowych przy skanowaniu okien lub przeszkleń. Powierzchnie błyszczące podczas skanowania mogą dawać błędny wynik, ponieważ podczas padania wiązki lasera na te powierzchnie może dochodzić do odbicia w nieodpowiednim do rejestracji kierunku, co finalnie może powodować przesunięcia w odczytach. Naturalnym rozwiązaniem tego problemu

wyduje się skanowanie w zbliżonym do kąta prostego kierunku, ale nie jest pewne, że to rozwiązanie zapewni bezbłędny pomiar.

Szumy oraz niedostępne dla światła lasera przeszklenie – w trakcie skanowania instrument rejestruje ogromną liczbę danych. Wśród tych danych znajdują się w głównej części informacje o przestrzeni znajdującej się w pobliżu stanowiska pomiarowego i w zasięgu jego widzenia. Jednak część pozyskiwanych danych określa się mianem szumów. Szumy są to punkty, które zostały zarejestrowane przez skaner laserowy, a na skanie nie są pożądane. Są to dane składające się z punktów pomierzonych na różnych obiektach zasłaniających mierzone obiekty. Szumy powstają również w przypadku przemieszczających się podczas pomiaru elementów, pojazdów czy ludzi. Wiązka lasera, która pada na przemieszczający się obiekt, odbija się i wraca do urządzenia. Na skanach powszechnym zjawiskiem jest przesłanianie elementów. Warto pamiętać, że skanery laserowe działają na zasadzie podobnej do ludzkiego oka pod względem możliwości widzenia. To, co jest widoczne i dostępne dla wiązki wypuszczanej z instrumentu, zostanie na skanach uwiecznione. Jeśli jednak dany element zostanie przesłonięty przez inny, to wykonanie kompletnej chmury punktów może wymagać większej liczby stanowisk ze względu na zjawisko martwych pól. Martwe pole na chmurze punktów to obszar, gdzie pomimo występowania w danej przestrzeni elementów nie widać ich na skanie, ponieważ zostały przesłonięte przez inne fragmenty przestrzeni podczas skanowania. Popularnym zabiegiem niwelującym martwe pola jest właśnie odpowiednie przemyślenie, zaplanowanie i dobranie liczby stanowisk pomiarowych. Martwe pola nie zawsze są możliwe jednak do niwelowania poprzez zagęszczenie stanowisk pomiarowych. Skanując wysokie obiekty z niedostępnyymi dachami, musimy spodziewać się występujących martwych stref przy parapetach czy na samym dachu skanowanego obiektu. Wraz ze zwiększaniem się odległości urządzenia od skanowanego obiektu zjawisko martwych pól występuje częściej i na większych obszarach chmur punktów. Martwe pola są również niemożliwe do uniknięcia podczas skanowania elementów znajdujących się w niedużych odległościach od pionowych lub poziomych elementów tarczowych i płytowych. Przykładem mogą być kanały wentylacyjne czy rury kanalizacyjne przebiegające tuż pod stropem. Niemożliwe jest wtedy wykonanie skanów tak, aby chmura przedstawiała kompletne elementy kanałów, kolan czy trójkątów rurowych.

Warunki atmosferyczne i oświetlenie – innymi warunkami uwzględnienia w planowaniu skanowania czynnikami są warunki atmosferyczne oraz oświetlenie skanowanych pomieszczeń czy obiektów. Opady deszczu lub śniegu wpływają niekorzystnie na wykonywane pomiary. Mogą one generować dodatkowe niepożądane szумы na chmurach punktów. W przypadku niewielkich opadów nie jest to czynnik warunkujący jakość skanowania, jednak przy silnych opadach może uniemożliwić wykonanie dokładnych pomiarów. Innym czynnikiem, który może zaburzyć pracę ze skanerem laserowym, jest zbyt niska lub za wysoka temperatura, do której może nie być przygotowany instrument pomiarowy. Wiatr nie powinien wpływać na same pomiary, przy silnych pomiarach wiatru może dojść do sytuacji, w której skaner nie będzie stał stabilnie na stanowisku pomiarowym i nie wykona pomiarów. Ponadto słabe oświetlenie lub brak oświetlenia może być czynnikiem wpływającym na swobodę wykonywania pomiarów. Tutaj chodzi w szczególności o wykonywane zdjęcia, które służą nakładaniu tekstur i przypisywaniu kolorów do poszczególnych punktów chmur. O ile laser poradzi sobie ze słabym oświetleniem, nawet w bardzo ciemnych pomieszczeniach, o tyle zdjęcia będą wykonywały się dłużej niż przy dobrym oświetleniu.

2.3. Czynniki wpływające na dokładność pomiarów naziemnym skanerem laserowym

Gęstość skanowania – podejmując się wykonania chmury punktów obiektu budowlanego, należy wcześniej się zastanowić i przygotować do takiego zadania. Ważnym elementem skanowania jest wybór gęstości skanowania lub inaczej rozdzielczości skanu. Wydaje się, że prawie zawsze większa gęstość skanu oznacza lepszą aproksymację skanowanych powierzchni, a co za tym idzie jakości skanu. Należy jednak pamiętać o tym, że ustalając gęstość skanowania, podejmujemy decyzję, w jakich odległościach znajdować się będą od siebie punkty na skanach. Tutaj warto pamiętać, aby nie wybierać wysokich gęstości przy skanowaniu z niewielkich odległości. Powodem jest negatywny wpływ zjawiska nadmierowej liczby próbkowania. Należy więc pamiętać, aby rozdzielczość skanowania nie była większa niż błąd pomiaru odległości punktów od instrumentu. Naturalne jest zwiększanie gęstości skanu w przypadkach, gdy chcemy uzyskać większą dokładność pomiaru niż podstawowa proponowana przez urządzenie lub w sytuacjach, gdy skanowane obiekty znajdują się w dużych odległościach. Zwiększenie gęstości skanu w takim przypadku zapewni utworzenie większej liczby punktów na chmurze, które przedstawiają dany element [1].

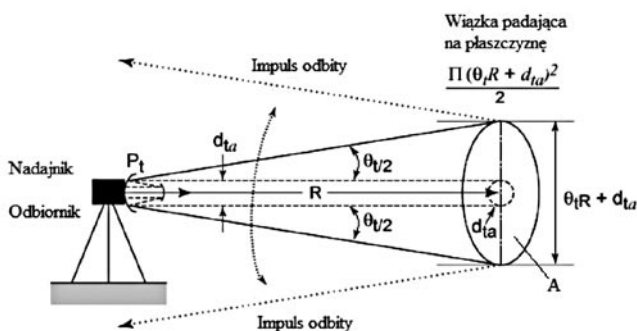
Rozmieszczenie stanowisk – przed podjęciem się sesji skanowania w terenie należy zawsze zaplanować rozmieszczenie stanowisk pomiarowych. Celem wcześniejszego planowania jest optymalizacja czasu pracy i uzyskanie wymaganych dokładności przy najmniejszej możliwej liczbie stanowisk. Niezależnie od tego, czy obiekt poddawany pomiarom będzie skanowany raz czy skanowania będą odbywać się co jakiś czas w celu monitorowania postępu prac, warto znaleźć najlepsze możliwe rozstawienie stanowisk jeszcze przed wyjściem w teren. Stanowiska należy rozmieszczać w taki sposób, aby unikać zjawiska martwych pól i niepotrzebnych szumów. Najlepiej więc, kiedy kolejne skany, z kolejnych stanowisk się ze sobą nakładają i uzupełniają.

Jeśli chodzi o metodologię skanowania, to zawsze należy ją dobierać odpowiednio do zadania. Jednym z rodzajów metodologii pracy ze skanerem jest ustawienie instrumentu w jednym konkretnym miejscu, na stałej pozycji. Celem takiego sposobu pracy może być cykliczne sprawdzanie zmian skanowanego obiektu. Niezmiennność odniesienia pozwala na pracę w tym samym układzie współrzędnych. Ciężko jest jednak wyobrazić sobie pozostawienie skanera w miejscu, w którym nie będzie on przesuwany w trakcie realizacji obiektu budowlanego [1]. Drugim rodzajem pracy jest umieszczanie celów nieruchomych, nieprzesuwalnych. Cele te, punkty georeferencyjne służą do orientacji chmur punktów. Skanowanie odbywa się w taki sposób, aby cele były widoczne na skanach i później z ich pomocą wykonuje się na przykład georeferencję skanów do danego układu współrzędnych. Stanowiska powinny być dobierane tak, aby widziały cele oraz należy mieć na uwadze, że cele nie mogą zostać naruszone ani przesunięte [1]. Najpopularniejszym sposobem pracy jest umieszczanie celów dla każdego kolejnego skanowania. Lokalizacja celów jest określana przez geodetę lub przy wykorzystaniu metod geodezyjnych w zadanym układzie współrzędnych. Metoda ta może powodować powstawanie błędów wyrównania chmur punktów i dowiązań do układu współrzędnych [1]. Czwartym sposobem konfiguracji stanowisk, najnowocześniejszym i rewolucjonizującym w ostatnich latach rynek związany ze skanowaniem laserowym jest „cloud to cloud”. Rejestrowanie chmur punktów z różnych stanowisk bez stosowania punktów referencyjnych czy celów. Orientując do siebie skany, na podstawie algorytmów wybierane są stałe elementy otoczenia występujące na poszczególnych chmurach. W metodzie tej dużą rolę spełniają właśnie wspomniane algorytmy dopasowujące chmury

do siebie. Chmury są dowiązywane na podstawie wspólnych części otoczenia i nakładane na siebie. Wszystkie metody mają swoje plusy i minusy. Należy zaznaczyć, że opisywane metody mogą służyć do pomiarów w tym samym otoczeniu, w różnych cyklicznych okresach roku bądź przedsięwzięcia.

Dywergencja wiązki lasera – należy zwrócić uwagę na dywergencję lasera. Jest to zjawisko kąтового rozchodzenia się wiązki światła. Specyfikacja wiązki laserowej, która wychodzi ze źródła, składa się z dwóch parametrów: wielkość wiązki i jej dywergencji. Wielkość wiązki to wielkość określana średnicą na wyjściu i wyrażana w milimetrach. Dywergencja to rozszerzanie się wiązki wraz ze wzrostem odległości od źródła i wyrażana jest w [mrad].

Promień lasera, padając na powierzchnię lub element otoczenia, przyjmuje kształt okrągły albo eliptyczny i średnica wiązki jest wprost proporcjonalna do odległości między powierzchnią a instrumentem pomiarowym. Mając do czynienia z nieregularnym kształtem, sygnał powracający, rejestrowany przez urządzenie jest średnią impulsów odbitych od elementu [1]. Zjawisko dywergencji pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Dywergencja wiązki lasera [1, 7]

Obszar, który zajmuje na powierzchni rozchodząca się wiązka lasera, jest określony zależnością [1, 7]:

$$A = \pi(\theta/2 \cdot R + d)/2 \quad (1)$$

gdzie:

d – średnica wiązki lasera,

θ – kąt dywergencji w radianach,

R – zakres lasera.

Na jakość pomiarów wpływają wyżej wymienione czynniki oraz wszystkie przeszkody, z jakimi można spotkać się w trakcie pracy w terenie. Wpływ na jakość pomiarów mają skanowane obiekty, materiały, z jakich są wykonane, logistyka pomiarów, a także cechy samych skanerów laserowych, które zależnie od rodzaju skanera, marki czy producenta będą dysponowały różnymi możliwościami.

3. Inwentaryzacja robót zanikowych i zakrywanych

3.1. Ogólne zasady inwentaryzacji

Inwentaryzacja budowlana jest opracowaniem technicznym przedstawiającym aktualny stan danego obiektu. Informacje, które zostają zawarte w inwentaryzacji, są wyłącznie odtworzeniem stanu faktycznego. Inwentaryzacja powstaje poprzez wykonanie pomiarów z natury, na istniejącym budynku. Inwentaryzacje wykonuje się z różnych powodów. Jednym z nich może być wymaganie inwestora, który chce mieć aktualny obraz istniejącego obiektu. Rzeczywisty obraz budynku, to znaczy aktualnej inwentaryzacji, może być przydatny w wielu sytuacjach. Inwentaryzacja może usprawnić proces planowania prac budowlanych czy projektowych, obliczeń powierzchni użytkowej lokalu lub innych przedmiarów. Zakres inwentaryzacji zależy w dużej mierze od potrzeb osoby zlecającej inwentaryzację. Ustala się go każdorazowo przed wykonaniem prac. Może zawierać wszystkie lub część z niżej wymienionych elementów:

- opis techniczny (informacja o tym, z czego budynek jest zbudowany, jaka jest jego lokalizacja, charakterystyczne parametry),
- zwymiarowane rzuty kondygnacji,
- rzut dachu,
- przekroje (z rzędnymi posadzek, wysokościami),
- widoki elewacji,
- dokumentacja fotograficzna obiektu,
- schematyczne wizualizacje pomieszczeń, budynku, elewacji.

Pomiar obiektu w celu wykonania inwentaryzacji polega na zmierzeniu wszystkich danych potrzebnych do jego narysowania. Osoba wykonująca pomiary mierzy: długości, grubości ścian, wysokości pomieszczeń, parapetów, podciągów, belek, wielkości i lokalizacje otworów drzwiowych, okiennych, wnęk, krater wentylacyjnych itp. zależnie od wymagań stawianych inwentaryzacji. Czas pomiaru składającego się na inwentaryzację jest uzależniony od stopnia skomplikowania obiektu. Standardowo, dla lokali mieszkalnych, wynosi on od 15 do 45 minut na mieszkanie przy użyciu tradycyjnych metod. Z pomocą przy inwentaryzacji przychodzi wykorzystanie skanerów laserowych. Dzięki wykorzystaniu skanera laserowego obsługujący skaner jest w stanie dokładnie pomierzyć wszystkie widoczne elementy i geometrię obiektu lub pomieszczenia w granicach od 3 do 12 minut w zależności od rozmiarów i skomplikowania mierzonych elementów otoczenia.

Ogromną zaletą skaningu laserowego przy inwentaryzacji jest również to, że wszystkie wymienione powyżej zakresy inwentaryzacji można wykonać naraz, podczas jednej sesji skanowania. Dodatkowo praca z chmurami punktów może przynieść znacznie więcej korzyści przy wykonywaniu inwentaryzacji obiektów budowlanych. Podczas prac na budowie często dokonuje się inwentaryzacji wykonywanych prac w formie raportów czy protokołów przerobowych, czasami także z załączonymi dokumentacjami fotograficznymi. Wykorzystując skaner laserowy, wykonano inwentaryzację zbrojenia budowlanego płyty fundamentowej, instalacji i wzmocnień z płyt OSB w ścianach gipsowo-kartonowych oraz żelbetowych kanałów wentylacyjnych. Zaprezentowane w artykule przykłady skanowania pochodzą z prac prowadzonych przez firmę STRABAG Sp. z o.o. w trakcie rozbudowy Szpitala Bielańskiego.

3.2. Inwentaryzacja zbrojenia w elementach żelbetowych

Zbrojenie wykonuje się zgodnie z rysunkami konstrukcyjnymi przedstawiającymi sposób wykonania zbrojenia poszczególnych elementów budowlanych. Zbrojenie jest pracą, która niedługo po zakończeniu zostaje zakryta podczas betonowania. Po wykonaniu elementu żelbetowego nie jest możliwe sprawdzenie zbrojenia, otuliny elementu, średnic czy liczby poszczególnych prętów. Pomysł na wykonanie skanowania zbrojenia miał na celu zinwentaryzowanie wykonanych prac oraz możliwość sprawdzenia siatki zbrojeniowej w przyszłości w przypadku niespodziewanych zarysowań elementów konstrukcyjnych. W trakcie prac żelbetowych na budynku szpitala wykonano cztery chmury punktów. Każde skanowanie odbywało się zaraz po zakończeniu prac zbrojarskich i odbiorze prac przez inspektora nadzoru. Wykonywanie stropu żelbetowego na kondygnacji +3 szpitala odbywało się na czterech działkach roboczych. Każda działka robocza była wykonywana innego dnia. Skanowanie okazało się bardzo problematyczne. Największym problemem, z jakim trzeba było sobie poradzić, byli przemieszczający się po placu budowy i działkach pracownicy. Aby uniknąć odkształceń zbrojenia w trakcie wykonywania skanowania, postanowiono wykonywać skanowanie podczas przerwy obiadowej pracowników budowy. Skanowanie zajmowało około 45 minut. Po wykonaniu skanowania od razu przystępowano do betonowania.

Każdą chmurę punktów zgrano bez przerzedzania chmury. Postanowiono wszystkie wykonane chmury połączyć w jeden projekt, aby móc kompleksowo przedstawić zbrojenie całego stropu na kondygnacji.

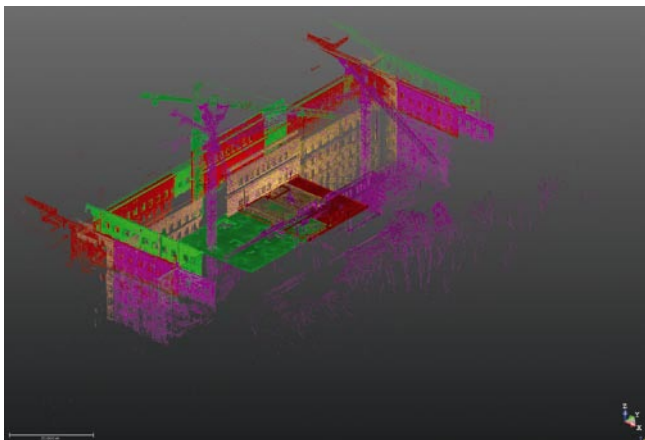
Ze względu na ograniczenia programu Trimble RealWorks (wykorzystywanego do obróbki danych) w kwestii łączenia różnych projektów wykonanych w natywnym pliku, wszystkie cztery projekty wyeksportowano do rozszerzenia „.las”, gdzie każdy projekt składający się z kilkudziesięciu pojedynczych skanów był domyślnie jednym skanem. Dzięki takiemu zabiegowi możliwe było otwarcie wszystkich czterech chmur punktów w postaci jednego wspólnego projektu. Początkowo wyczyszczono chmurę punktów w pliku natywnym w RealWorks i wyeksportowano właściwą chmurę do rozszerzenia „.las”. Ten tok postępowania powtórzono dla wszystkich czterech opracowanych chmur punktów. Na żółto na rysunku 2 widać właściwą chmurę punktów, na szaro zaznaczono część, którą z danej chmury usunięto.



Rys. 2. Czyszczenie chmury punktów – wycięcie fragmentu ze zbrojeniem stropu (opracowanie własne)

Następnym krokiem było dowiązanie chmur punktów do jednego układu współrzędnych, tak aby razem tworzyły kompletny obraz zbrojenia na kondygnacji. Wykorzystano narzędzie Cloud Based Registration. Wszystkie chmury dowiązano do siebie na podstawie wspólnych punktów elewacji istniejącego budynku szpitala. Ze względu na to, że z każdym kolejnym skanowaniem coraz większa część stropu była już wykonana (rys. 3), usuwano otoczenie, pozostawiając jedynie skanowaną działkę roboczą oraz elewację istniejącej części szpitala.

Nasuwano na siebie chmury punktów, a następnie wybierano te same elementy na poszczególnych skanach, aby idealnie nałożyć na siebie kolejne chmury punktów. Finalnie powstała chmura punktów przedstawiająca wszystkie cztery działki robocze wraz z elewacją istniejącego budynku. Efektem wykonanych kroków jest chmura punktów będąca kompletną inwentaryzacją zbrojenia stropu na kondygnacji +3 szpitala (rys. 4).



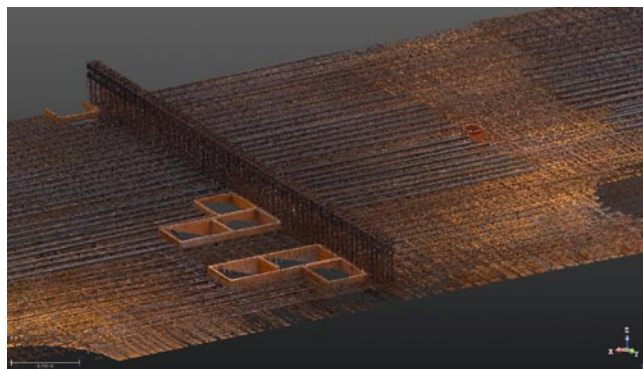
Rys. 3. Wszystkie cztery chmury punktów przedstawiające zbrojenie stropu na kolejnych działkach roboczych (opracowanie własne)



Rys. 4. Uzyskana chmura punktów przedstawiająca zbrojenie całego stropu (opracowanie własne)

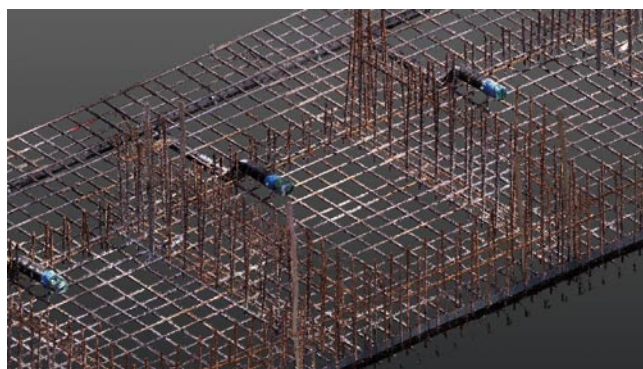
Dokładność wykonanych pomiarów pozwala na rzetelne sprawdzanie liczby prętów użytych do wykonania zbrojenia stropu. Na skanach widać dokładnie także miejsca szczególne w siatce zbrojeniowej, takie jak: dozbrojenia przy podporach i zbrojenie na przebiecie składające się z pionowych bolców dwugłówkowych. Uwiecznione na chmurze punktów zostały także miejsca, w których wykonywano otwory na instalacje wentylacji nad salami operacyjnymi czy na pionowy kanalizacyjny (rys. 5). Utworzone chmury punktów, mimo że stacje pomiarowe znajdowały się w niewielkich odległościach, mniejszych niż 15 metrów, nie dają dokładnego obrazu dolnej siatki zbrojeniowej. O ile siatka górna jest cała widoczna i możliwe jest wykonywanie pomiarów na danym zbrojeniu, o tyle siatka dolna zawiera wiele luk i nie jest kompletna. Wynika to z ograniczeń skanera, który rejestruje wszystko, co odbija wiązkę lasera i wraca do urządzenia w wyniku odbicia. W sytuacji gdy dany element nie jest widoczny dla urządzenia, nie zostaje on zarejestrowany. Problem ten można rozwiązać na dwa sposoby. Pierwszym jest zagęszczenie stacji skanowania w taki sposób, żeby skaner miał dostęp do wszystkich prętów składających się nie tylko na siatkę górną, ale także i dolną zbrojenia.

Taki zabieg jednak spowodowałby znaczne wydłużenie czasu skanowania, co mogłoby odbić się na przestojach w pracy oraz opóźnieniu budowy względem harmonogramu. Innym problemem byłaby odkształcalność siatki zbrojenia i drgania wywoływane przez osobę obsługującą skaner i przemieszczającą się po siatce zbrojeniowej w celu ustawienia skanera na kolejnych stacjach pomiarowych. W przypadku trwałego odkształcenia siatki całe skanowanie nie byłoby miarodajne i nie nadawałoby się do pracy przy modelu powykonawczym.



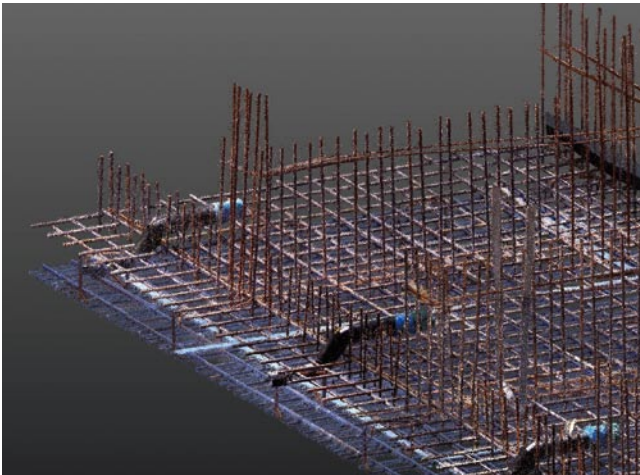
Rys. 5. Siatka zbrojeniowa – zbrojenie nadciągu oraz deskowania przygotowane pod otwory w stropie (opracowanie własne)

Drugim rozwiązaniem, które zastosowano po wyciągnięciu wniosków ze skanowania stropu kondygnacji +3 szpitala, było wykonanie skanowania zbrojenia w dwóch etapach. Na przykładzie zbrojenia płyty fundamentowej stacji transformatorowej, przyklejonej do konstrukcji głównej budynku nowo projektowanego postanowiono wykonać najpierw skanowanie siatki dolnej zbrojenia, a w drugim etapie – siatki górnej. Po wykonaniu przez pracowników zbrojenia dolnego zeskanowano całą siatkę dolną zbrojenia wraz z instalacjami, które miały znaleźć się wewnątrz płyty żelbetonowej. Drugie skanowanie podobnie jak w przypadku zbrojenia na kondygnacji +3 zostało wykonane przed betonowaniem płyty. Tym razem wycięto jednak jedynie siatkę górną (rys. 6).



Rys. 6. Siatka zbrojeniowa górna (opracowanie własne)

Na chmurze punktów widać dokładnie każdy pręt, który został wbudowany w konstrukcję płyty. Tak wykonane dwuetapowe skanowanie zbrojenia daje wiele możliwości. Dzięki wykonanej inwentaryzacji możliwe jest stworzenie modelu powykonawczego 3D, który oprócz geometrii elementów betonowych będzie zawierał również informacje o umiejscowieniu prętów zbrojeniowych (rys. 7).



Rys. 7. Widok zbrojenia płyty stacji transformatorowej (opracowanie własne)

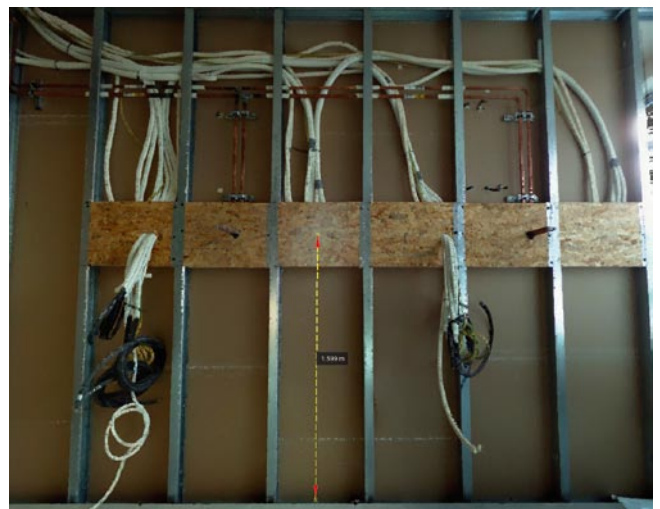
3.3. Inwentaryzacja instalacji i wzmocnień z płyt OSB w ścianach gipsowo-kartonowych

Kolejnym wymiernym pod względem optymalizacji pracy i kosztów pracy na budowie zastosowaniem inwentaryzacji za pomocą skaningu laserowego jest inwentaryzacja instalacji i wzmocnień z płyt OSB w ścianach gipsowo-kartonowych. Na budowie szpitala na kondygnacjach +1, +2 i +3 ściany działowe zostały w większości wykonane z płyt gipsowo-kartonowych. W tych ścianach zaprojektowano instalacje pionowe, trasy kabli zasilających, ale także na tych ścianach założono wykonanie umywalk, ustępów, szafek wiszących, wiszących telewizorów, poręczy ściennych na korytarzach, pochwyty dla niepełnosprawnych i siedzisk dla niepełnosprawnych. Aby poprawnie i przede wszystkim stabilnie zamocować wymienione elementy na ścianach, należało te ściany wzmocnić. Wzmocnienia wykonywano przy użyciu płyt OSB, profili UA, stelaży podtynkowych oraz trawersów montażowych.

Wszystkie te wzmocnienia wykonywano po otwarciu ścian gipsowo-kartonowych. Płyty były mocowane z jednej strony przegrody ściennej, następnie wykonywano wszystkie potrzebne instalacje wewnątrz ścian oraz wzmocnienia pod przyszłe urządzenia i meble. Po wykonaniu wszystkich prac, przed wypełnieniem

ścian wełną i zamykaniem ścian wykonywano skanowanie mające na celu stworzenie inwentaryzacji wszystkich elementów zakrywanych podczas zamykania ścian. Wykonanie takiej inwentaryzacji miało kilka celów, a ostatecznie przyniosło jeszcze więcej korzyści na budowie niż się spodziewano. Chmury punktów pomogły w wykrywaniu kolizji pomiędzy sufitami podwieszanymi i instalacjami. Początkowo opracowano je w celu inwentaryzacji elementów wewnątrz ścian gipsowo-kartonowych.

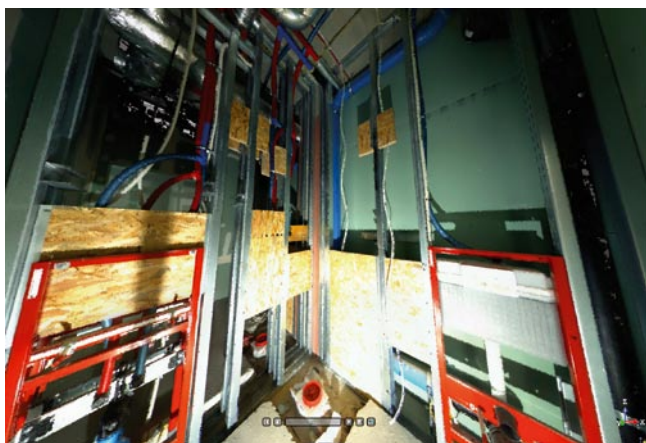
Wykonane chmury punktów przyniosły wiele korzyści na budowie, ale także celem ich opracowania było dostarczenie zamawiającemu informacji, w których konkretnie miejscach znajdują się wzmocnienia i o jakich wymiarach. Taka informacja umożliwi w przyszłości montaż wielu elementów wiszących na ścianach bez uszkodzenia instalacji wewnątrz ścian, a również pozwoli na dokładne znalezienie miejsca w ścianie gdzie swobodnie można zawiesić meble czy urządzenia (rys. 8, 9). Wykonanie wszystkich skanów było zadaniem niezwykle pracochłonnym, ponieważ wymagało bardzo dużej dokładności i dostępu do każdego pomieszczenia na realizowanym obiekcie. Warunki, w jakich wykonywano skanowanie, były dodatkowym utrudnieniem, nie tylko podczas pracy w terenie, ze względu na pracowników na budowie, którzy utrudniali dokładne pomiary wszystkich elementów, ale także na etapie opracowywania oraz czyszczenia chmur punktów (rys. 10). Skanowanie laserowe i uzyskane chmury punktów posłużą do odnalezienia w zamkniętej ścianie miejsc, gdzie znajduje się wzmocnienie do późniejszych prac montażowych. Skany umożliwiają pomiary wysokości wykonania wzmocnień i dokładnego ich umiejscowienia w ścianie gipsowo-kartonowej.



Rys. 8. Pomiar wysokości wzmocnienia na chmurze punktów w ścianie działowej gipsowo-kartonowej (opracowanie własne)



Rys. 9. Inwentaryzacja robót zakrywanych wewnątrz ściany działowej gipsowo-kartonowej (opracowanie własne)



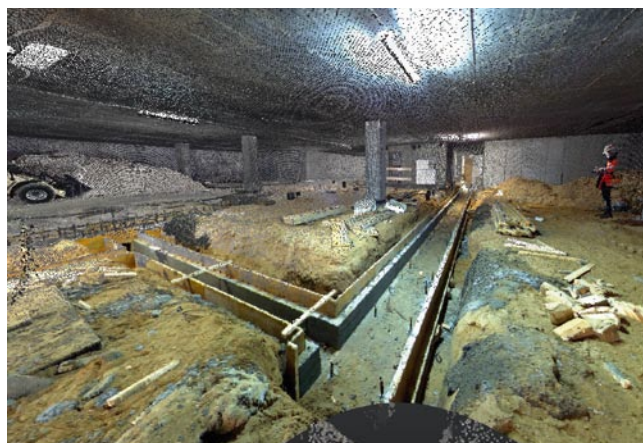
Rys. 10. Chmura punktów – inwentaryzacja wzmocnień pod urządzenia i wyposażenie łazienek (opracowanie własne)

Chmura punktów umożliwia identyfikację prowadzonych instalacji w ścianach i ich tras, co nie zawsze może się wydawać oczywiste i łatwe do wykrycia bez wcześniej wykonanej inwentaryzacji. Dzięki wykonanym skanom oraz zdjęciom za pomocą skanera laserowego uwiecznione zostały wzmocnienia, podejścia kanalizacyjne czy doprowadzenia wody do poszczególnych urządzeń. W celu dokładnej inwentaryzacji skanowano wszystkie kondygnacje szpitala oraz wszystkie pomieszczenia w budynku.

3.4. Inwentaryzacja żelbetowych kanałów wentylacyjnych

Skaning laserowy wykorzystano również podczas prac związanych z wykonywaniem żelbetowych kanałów wentylacyjnych, które zostały zaprojektowane pod

posadzkami kondygnacji podziemnej szpitala. Wykonanie tych prac zaplanowano pod koniec prac żelbetowych ze względu na skomplikowanie robót i czas ich wykonywania. Wykonanie kanałów wiązało się także z pracami, które podlegały zakryciu. W celu wykonania dokumentacji powykonawczej zawierającej dokładne trasy, wymiary oraz lokalizację kanałów żelbetowych wykonywano skanowanie w trakcie prac (rys. 11)



Rys. 11. Chmura punktów – kanały wentylacyjne żelbetowe w trakcie prac ciesielskich (opracowanie własne)

Skanowanie wykonywano dwa razy, aby uchwycić wszystkie kanały na chmurze punktów. Dzięki możliwości wykonywania pomiarów na chmurach punktów w szybki sposób kadra inżynierska zyskała możliwość sprawdzania jakości prac i tras kanałów w późniejszych etapach budowy. Skany wykorzystano do przygotowania rzutów i realizacji dokumentacji powykonawczej dotyczącej zakrytych posadzkami kanałów żelbetowych.

4. Projekt ERASMUS+ CLOEMC V – przełomowe innowacje w zarządzaniu projektami budowlanymi

Projekt CLOEMC V (rys. 12) – którego pełen tytuł brzmi Common Learning Outcomes for European Managers in Construction, Part V – o numerze 2019-1-PL01-KA202-064996 jest realizowany w terminie 01.12.2019–30.09.2022. Promotorem jest Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Polska (www.il.pw.edu.pl), a partnerzy to: Technische Universität Darmstadt, Niemcy (www.tu-darmstadt.de), Universitat Politècnica de València, Hiszpania (www.upv.es), Association of Building Surveyors and Construction Experts, Irlandia (www.aeebc.org), Polskie Stowarzyszenie Menedżerów Budownictwa, Polska (www.psmb.pl) oraz Korporacja RADEX S.A., Polska (www.korporacjaradex.pl).



Rys. 12. Logo i kod QR projektu CLOEMC V (opracowanie własne)

CLOEMC V, jak wskazuje nazwa, jest piątym już wydaniem projektu. Poprzednie fazy były realizowane w latach: CLOEMC IV w 2015–2017, CLOEMC III w 2012–2013, zaś CLOEMC I oraz II w 2009–2011. Warto zaznaczyć, że projekty z numerami I, II i III były powiązane z programem Leonardo da Vinci. W ramach projektu CLOEMC V powstanie siedem nowych podręczników Biblioteki Menedżera Budowlanego (Construction Managers' Library, CML). Zarys każdego z podręczników przedstawiono poniżej.

- M26: Mentoring i coaching w budownictwie – podręcznik ten skupia się między innymi na tzw. umiejętnościach miękkich w zarządzaniu budową [9]. Podręcznik ten obejmuje: techniki mentoringu i coachingu, miękkie aspekty zarządzania, studia przypadków itp. Doświadczenia i badania partnerów [10] pokazują, że istnieje przepaść pokoleniowa między doświadczonymi inżynierami i menedżerami z wieloletnią praktyką a młodymi, nowymi pracownikami pracującymi przy projektach budowlanych. Podręcznik da nowatorskie, wielokulturowe podejście do tematu przekazywania wiedzy.
- M27: Aspekty archeologiczne i ochrony dziedzictwa w budownictwie – w tym podręczniku można znaleźć np. przystępnie przedstawione aspekty prawne związane z dziedzictwem historycznym i pracą archeologów na budowie. W podręczniku autorzy podadzą: regulacje prawne związane z ochroną dziedzictwa narodowego, współpracę z archeologami na terenie budowy, archeologią dla kierowników budowy, opis prac konserwatorskich, innowacyjne podejście budujące most między pracownikami budowlanymi a ekspertami archeologami.
- M28: Przełomowe innowacje w zarządzaniu budową – ten podręcznik jest powiązany głównie z wykorzystaniem branży IT w budownictwie [4, 11]: aplikacje wspomagające i usprawniające pracę menedżera, rozszerzona rzeczywistość (AR). W podręczniku autorzy zaprezentują: definicje przełomowych innowacji, innowacyjne aplikacje IT w budownictwie [4], ochronę danych, Big Data, Rozszerzoną Rzeczywistość [12] itp. Sektor budowlany z trudem nadąża za szybkim rozwojem kadry kierowniczej, narzędziami i metodami informatycznymi. Podręcznik pokaże interesariuszom

sektora budowlanego ogromne możliwości unowocześnienia ich codziennego życia zawodowego.

- M29: Nowoczesna gospodarka o obiegu zamkniętym w budownictwie – szczególnie istotny, jako że w 2018 roku Unia Europejska zaleciła przejście na gospodarkę o obiegu zamkniętym (minimalizującą zużycie surowców i produkcję odpadów do minimum). Podręcznik ten obejmuje aspekty zarządzania projektem i budową, w ramach realizacji planu działania na rzecz gospodarki o obiegu zamkniętym 2018, który został zalecony przez Komisję Europejską.
- M30: Przystępne budownictwo mieszkaniowe – podręcznik porównujący różne szkoły projektowania i stawiania budynków mieszkalnych, a także skupiający się na aspektach związanych z wygodą mieszkania zwłaszcza dla osób starszych i niepełnosprawnych. Ten podręcznik obejmuje następujące aspekty zarządzania projektem i budową, na przykład: porównanie różnych koncepcji projektów mieszkaniowych w zakresie technologii i metod, kosztów, czasu i osiągalnych standardów, strategii renowacji istniejących budynków, możliwości zamieszkania, komfortu, dostępności, zwłaszcza dla osób starszych oraz osób niepełnosprawnych ze specjalnymi potrzebami itp.
- M31: Zrównoważony rozwój społeczny w budownictwie – podręcznik skupiony na społecznym oddziaływaniu budowy i budowli, podający kryteria społeczne, które należy brać pod uwagę w projektach i metody określania wspomnianego wpływu. W podręczniku przedstawiono sposoby oceny wyników społecznych projektów budowlanych, kryteria społeczne, które należy uwzględnić w projektach budowlanych, wskaźniki do oceny wyników społecznych projektów budowlanych, metody ważenia oceny ogólnych wyników społecznych projektu. Celem tej książki jest opracowanie metody, która pomoże firmom budowlanym w ocenie społecznej projektów budowlanych, zgodnie z zaleceniami opublikowanymi przez Komisję Europejską i Program Narodów Zjednoczonych ds. Ochrony Środowiska.
- M32: Zarządzanie kryzysowe – COVID 19 w budownictwie – przygotowanie tego podręcznika wynikało w trakcie prowadzenia prac projektowych CLOEMC V. Partnerzy projektu oraz beneficjenci zwrócili uwagę na brak opracowań związanych z zarządzaniem firmą budowlaną oraz projektem w czasach znacznie utrudnionych przez pandemię. W podręczniku pokazane zostaną nowoczesne sposoby zarządzania w kryzysie, rozwiązywanie konfliktów itp. Projekt CLOEMC pomoże rozwinąć umiejętności podstawowe i przekrojowe, takie jak przedsiębiorczość

(prowadzenie małych i średnich firm budowlanych w całej UE), zarządzanie (lepsze wykorzystanie środków unijnych na projekty budowlane) oraz kompetencje językowe (polska, angielska, niemiecka i hiszpańska wersja podręczników) umożliwi użytkownikom doskonalenie umiejętności językowych) w dziedzinach kształcenia i szkolenia dorosłych [13]. Przejrzysta struktura wiedzy zawarta w Bibliotece Kierowników Budowy (CML) umożliwi opracowanie odpowiednich metod oceny i innowacyjnych metod certyfikacji kierowników budów w UE. Wyniki poprzednich projektów CLOEMC I-IV pomogły już w opracowaniu pierwszych podstaw takich metod przez AEEBC (tytuł EurBE) i PSMB. Projekt będzie promował wykorzystanie zintegrowanego nauczania przedmiotowo-językowego (CLIL) w celu zwiększenia kompetencji językowych wśród uczniów z różnych dziedzin edukacji, ponieważ podręczniki będą powszechnie dostępne (podobnie jak 25 poprzednich) w czterech wersjach językowych. Więcej innowacyjnych i przełomowych rozwiązań można znaleźć w bibliotece Menedżera Budowlanego www.cloemc.vil.pl.edu.pl

5. Podsumowanie

Skaning laserowy jest dobrym, nowoczesnym narzędziem służącym inwentaryzacji powykonawczej. Należy jednak pamiętać o zaobserwowanych in situ ograniczeniach.

Wykonanie chmury punktów przedstawiającej zbrojenie budowlane na całym stropie przy jednym skanowaniu nie jest zazwyczaj możliwe ze względu na technologię wykonywania prac żelbetowych. Możliwe jest jednak połączenie chmur punktów wykonywanych w różnych dniach roboczych, aby ostatecznie opracować kompletny obraz całego zbrojenia stropu żelbetowego. Taka inwentaryzacja zbrojenia może być wykorzystana do analizy w przypadku powstania niespodziewanych zarysowań w celu identyfikacji problemu, który się pojawia. Innym zastosowaniem takiej chmury punktów może być stworzenie modelu powykonawczego elementów żelbetowych wraz z wewnętrznym zbrojeniem.

Chmura punktów umożliwia dokładne pomiary długości prętów, ich średnic, wysokości elementów itp. Tak wykonana chmura punktów jest narzędziem pozwalającym nie tylko na sprawdzenie jakości wykonania danych prac budowlanych, sprawdzenia ich poprawności czy kompletności, ale jest też informacją, która pomimo zakrycia elementów zbrojenia, pozwala w dowolnej chwili do niej wrócić. Skorzystać w celu identyfikacji

przyczyn zarysowań, sprawdzenia spadków instalacji, a także może zostać wykorzystana do stworzenia rzeczywistego bardzo dokładnego modelu powykonawczego i dokumentacji powykonawczej.

Dzięki chmurom punktów w szybki sposób kadra inżynierska ma dostęp do informacji, jak faktycznie przebiegają instalacje, gdzie znajdują się wzmocnienia ścian, z której strony stelaży znajdują się podejścia kanalizacyjne oraz wiele innych informacji, do których nie byłoby dostępu bez wykorzystania skaningu laserowego. Dzięki skanom można również przygotować zestawienia wykonywanych wzmocnień w ścianach w celu rozliczenia z podwykonawcami. Inwentaryzacja w postaci chmury punktów okazała się bardzo pomocna ze względu na dokładność pomiarów i możliwość wykonywania pomiarów odległości na chmurach punktów.

O innych nowatorskich rozwiązaniach stosowanych przez inżynierów i menedżerów budowlanych można przeczytać w pozycjach biblioteki menedżera budowlanego opracowanych w ramach projektów ERASMUS+ CLOEMC oraz w kolejnych artykułach niniejszej serii.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Byzdra A., Bernat M., Chmielecki M., Laskowski P., Orzechowski J., Rzepa S., Ziółkowski P., Zastosowanie naziemnego skaningu laserowego i przetwarzanie danych: inwentaryzacja i inspekcja obiektów budowlanych Wydawnictwo Polskiego Internetowego Informatora Geodezyjnego I-NET. PL & Katedra Geodezji WILiS Politechnika Gdańska, 2016, str. 1–120
- [2] Rosłon J., Książek-Nowak M., Nowak P., Zawistowski J., Cash-flow schedules optimization within life cycle costing (LCC), *Sustainability* 12(19)2020, 8201
- [3] Rosłon J., Materials and Technology Selection for Construction Projects Supported with the Use of Artificial Intelligence. *Materials* 15(4)2022, 1282
- [4] Böde K., Różycka A., Nowak P., Development of a pragmatic IT concept for a construction company. *Sustainability* 12(17)2020, 7142
- [5] Frydrych M., Kacprzak G., Nowak P., Hazard Reduction in Deep Excavations Execution. *Sustainability* 14(2)2022, 868
- [6] Bosché F., Guillemet A., Turkan Y., Haas C. T., Haas R., Tracking the built status of MEP works: Assessing the value of a Scan-vs-BIM system. *Journal of computing in civil engineering* 28(4)2014, 05014004
- [7] Shan J., Toth C. K. (Eds.), *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press, 2018
- [8] Publikacja firmy Trimble, STUDENT GUIDE, Trimble® RealWorks® Software. <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-real-works>, dostęp z dnia 14 kwietnia 2022
- [9] Nicał A. K., Rosłon J., Nowak P., Książek-Nowak M. V., New trends in construction education and training, Gómez Chova L., López Martínez A., Candel Torres I. (red.), IATED Academy, *Edulearn Proceedings*, 2018
- [10] Książek M. V., Nowak P., Diversity management aspects in construction, *Acta Scientiarum Polonorum, Seria Architectura*, 2017
- [11] Książek M. V., Nowak P., Kivrak S., Rosłon J. H., Ustinovichius L., Computer-aided decision-making in construction project development. *Journal of Civil Engineering and Management* 21(2)2015
- [12] Rosłon J., Nowak P., Nicał A. K., Modern approach to education in construction industry, Gómez Chova L., López Martínez A., Candel Torres I. (red.) (red.), IATED Academy, *Edulearn Proceedings*, 2018
- [13] Nicał A. K., Książek M. V., Nowak P., Rosłon J., Foremny A. O., Distance Learning within Management in Construction – Polish, Norwegian and Icelandic Experiences in Blended Learning, *Procedia Engineering*, 2017