

mgr inż. **Piotr Dronszczyk**¹
dr hab. inż. **Michał Strach**²

Przyjęty/Accepted/Принята: 20.06.2016;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 22.08.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2016;

Zastosowanie technologii skaningu laserowego i termowizji do inwentaryzacji tunelu i znajdujących się w nim urządzeń przeciwpożarowych³

The Use of Laser Scanning Technology and Infrared Thermography to Survey a Tunnel and its Fire Protection Devices

Применение технологии лазерного сканирования и термовидения для инвентаризации туннеля и находящегося в нем противопожарного оборудования

ABSTRAKT

Cel: Celem badań było przedstawienie wyników inwentaryzacji wybranych elementów wyposażenia przeciwpożarowego krakowskiego tunelu szybkiego tramwaju (KST). W pracach doświadczalnych zostały zastosowane nowoczesne techniki pomiarowe 3D ze szczególnym uwzględnieniem skanowania laserowego uzupełnionego o termowizję. W celu ułatwienia korzystania z opracowanych obiektów wszystkie dane zostały udostępnione zdalnie na portalu internetowym.

Metody: Pomiary inwentaryzacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem skanera laserowego 3D – Faro Focus X130. Skaner wykonuje jednocześnie pomiar kąta poziomego i pionowego oraz odległości do danego punktu. Dodatkowo każdy punkt może posiadać atrybut koloru rzeczywistego w modelu przestrzeni barw RGB. Możliwe jest także wyświetlanie chmur punktów wraz z informacją o intensywności odbicia wiązki w skali szarości. Zbiory punktów zarejestrowanych na poszczególnych stanowiskach pomiarowych dają w rezultacie chmurę punktów reprezentującą geometrię obiektu. W ramach badań wykonano uzupełniające pomiary termowizyjne kamerą FLIR S60. W następnej kolejności skalibrowano ze sobą obrazy termowizyjne i połączono je z chmurą punktów uzyskaną ze skanowania laserowego.

Wyniki: Otrzymane wyniki potwierdziły, że metoda skanowania laserowego, uzupełniona o obrazy termowizyjne, pozwala na uzyskanie bogatej informacji przestrzennej o mierzonym obiekcie. Wśród zinwentaryzowanych elementów wyposażenia obiektu można zidentyfikować: przewody prądowe, oświetlenie, rozdzielnie prądowe, przewody wentylacyjne czy też systemy przeciwpożarowe. Do tych ostatnich można zaliczyć: system przeciwdymowy wraz z systemem klap i kanałów.

Wnioski: Wyniki przeprowadzonych badań inwentaryzacyjnych dowodzą, jak bardzo przydatne może być połączenie technologii skanowania laserowego i termowizji. Jest to szczególnie istotne w pomiarach obiektów ważnych z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego. Przestrzenna wizualizacja ułatwia i usprawnia pozyskanie informacji oraz jej dalsze wykorzystanie. Zalety tych połączonych technik to przede wszystkim uzyskanie pełnej informacji o geometrii obiektu i urządzeniach towarzyszących. Cennym uzupełnieniem informacji o obiekcie jest wówczas termowizja, dzięki której można rozpoznać urządzenia czy elementy systemów o różniącej się temperaturze.

Słowa kluczowe: systemy przeciwpożarowe, systemy wentylacyjne, tunel, skanowanie laserowe, termowizja

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

ABSTRACT

Aim: The main aim of the study was to present the results of a survey of a variety of fire-preventive equipment in the Kraków Fast Tram tunnel (KST). Experimental studies involved modern 3D surveying techniques, particularly 3D laser scanning and infrared thermography. In order to facilitate the use of the generated findings, all data have been made available remotely on a web portal.

Methods: Survey measurements were taken using a Faro Focus X130 3D laser scanner. The scanner simultaneously performs vertical and horizontal angle measurements and calculates the distance to a given point. In addition, each point can have a real colour value in RGB space. It is also possible to present point clouds together with the intensity values in grayscale. The collections of points registered at individual vantage points result in a cloud of points representing the geometry of the object. Additional thermal measurements were carried out as part of the study, using a FLIR S60 camera. Finally, thermal images were calibrated and merged with the point cloud obtained from the laser scanning.

¹ Apply Capnor Poland Sp z o.o., Krakow; piotr.dronszczyk@applycapnor.pl;

² AGH w Krakowie / AGH University of Science and Technology, Poland;

³ Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w powstanie artykułu / The authors contributed equally to this article;

Results: The results confirmed that laser scanning, together with thermal, images allows us to obtain detailed spatial information about the surveyed structure. Among the surveyed elements of the structure's equipment the following can be identified: cable trays, lighting, switchboards, ventilation ducts, and fire-protection systems. The latter include a smoke protection system, together with valves and channels.

Conclusions: The results demonstrate the usefulness of combining 3D laser scanning measurements and infrared thermography. This is especially important in the measurement of objects responsible for security and fire safety. Spatial visualisation facilitates and streamlines the acquisition of data and their further use. The primary advantage of combining these two techniques is the acquiring of complete geometrical information on the object and the corresponding devices. Another valuable addition is infrared thermography. It allows the identifying of devices or items in a single system with varying temperatures.

Keywords: fire protection systems, ventilation systems, tunnel, laser scanning, infrared thermography

Type of article: original scientific article

АННОТАЦИЯ

Цель: Целью исследования было представление результатов инвентаризации отдельных элементов противопожарного оборудования Краковского туннеля быстрого трамвая (KST). В экспериментальных исследованиях были использованы современные методы 3D-измерения с особым акцентом на лазерное сканирование, дополненное технологией термовидения. Для того, чтобы облегчить использование разработанных объектов, все данные были опубликованы на веб-портале.

Методы: Инвентаризационные измерения были проведены с помощью лазерного сканера 3D - FARO FOCUS X130. Сканер измеряет одновременно горизонтальный и вертикальный угол и расстояния до заданной точки. Кроме того, каждая точка может иметь фактический цвет модели цветов RGB. Кроме того, можно отобразить облака точек вместе с информацией об интенсивности отражения луча в оттенках серого. Множества точек, зарегистрированных на отдельных измерительных установках, дают в результате облако точек, представляющих геометрию объекта. В рамках исследований были проведены дополнительные измерения термовизионной камерой FLIR S60. Далее были откалиброваны термограммы и соединены с облаком точек, полученных с помощью лазерного сканирования.

Результаты: Полученные результаты подтвердили, что метод лазерного сканирования, дополненный термограммами, позволяет собрать богатую пространственную информацию об измеряемом объекте. Среди инвентаризируемых пунктов оснащения объектов можно выделить: электрические провода, освещение, электрический коммутатор, вентиляционные каналы либо системы противопожарной защиты. Последние могут включать в себя: систему дымоудаления вместе с системой клапанов и каналов.

Выводы: Результаты проведенных инвентаризационных исследований показывают на сколько полезным может быть сочетание лазерной технологии сканирования и термовидения. Это особенно важно в измерениях объектов, с точки зрения пожарной безопасности. Визуализация пространственных данных облегчает и ускоряет получение информации и ее дальнейшее использование. Преимущества комбинированной методики это в основном исчерпывающая информации о геометрии объекта и находящихся в нем устройств. Ценным дополнением информации об объекте является термовидение, которое позволяет идентифицировать устройства или компоненты систем с различной температурой.

Ключевые слова: системы пожарной безопасности, системы вентиляции, туннель, лазерное сканирование, термовидение

Вид статьи: оригинальная научная статья

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich kilkunastu lat doszło do szeregu poważnych incydentów związanych z pożarami w tunelach. Wypadki te spowodowały uszkodzenia konstrukcji budowli i doprowadziły do śmierci świadków tych zdarzeń [1]. Do niebezpiecznych, a nawet katastrofalnych zdarzeń można zaliczyć pożary, które miały miejsce w następujących obiektach: w tunelu drogowym Mont Blanc w 1999 roku, w tunelu Frejus w 2005 roku, w tunelu Gleinalm w 2001 roku, czy też w tunelu Wisłostrada w 2011 roku. Najtragiczniejszym w skutkach był pożar w tunelu drogowym Mont Blanc, w którym zginęło 41 osób. Po tym zdarzeniu tunel został zamknięty na dwa lata z powodu uszkodzenia obudowy na odcinku 900 m. Odbudowa obiektu po tego typu zdarzeniach jest zazwyczaj czasochłonna i kosztowna. Wymaga także zamknięcia tunelu na długi czas. Zdarza się, że pożary w tunelach mają wpływ na uszkodzenia budynków i elementów konstrukcji położonych nad tunelem [2]. Bezpieczeństwo w tunelu jest priorytetowym zagadnieniem uwzględnianym zarówno podczas projektowania obiektu, jak i w trakcie jego eksploatacji. Jednym z podstawowych elementów wpływających na bezpieczeństwo są systemy przeciwpożarowe. Dzieli się je na systemy aktywne i pasywne (tabela 1). Osoby przebywające w zasięgu pożaru są najbardziej narażone na dym oraz toksyczne gazy. Ponad 90% wszystkich ofiar pożarów w budynkach umiera w skutek zatrucia gazami. Z tego powodu stosowane są systemy aktywne służące do odprowadzania dymu i gorąca. Umożliwiają one sprawne usuwanie lub zmniejszenie koncentracji trujących, lotnych związków w zagrożonych obszarach. Do elementów

1. Introduction

Several serious incidences of fires in tunnels have occurred in the last few decades. These accidents caused structural damage and led to the deaths of many of their witnesses [1]. Dangerous, even catastrophic, events included fires that broke out within the following structures: the Mont Blanc Road Tunnel in 1999, the Fréjus Tunnel in 2005, the Gleinalm Tunnel in 2001 and the Wisłostrada Tunnel in 2011. The most tragic of these events was the fire in the Mont Blanc Road Tunnel, which claimed the lives of 41 people. After the incident, the Tunnel was closed for two years due to tunnel casing damage along a 900 m-long section. The reconstruction work following such events is usually time-consuming and expensive. It also necessitates prolonged tunnel closure. Tunnel fires sometimes cause damage to buildings and structural elements located above the tunnel [2]. Safety inside the tunnel is the primary concern at both the design and operational stages. One of the essential safety determinants is the presence of fire protection systems, which are divided into active and passive (Table 1). Persons present within the fire area are the most exposed to smoke and toxic gas. More than 90% of all victims in buildings die of gas poisoning. To prevent this, active systems for smoke and heat extraction are implemented. They effectively extract or reduce the concentration of poisonous volatile compounds in the affected areas. Active systems also include fire sprinklers, water-mist systems, foam systems and smoke protection systems.

Tabela 1. Podział systemów przeciwpożarowych stosowanych w tunelach [3]**Table 1.** The division of fire protection systems in tunnels [3]

Systemy aktywne / Active systems	Systemy pasywne / Passive systems
Grawitacyjne systemy oddymiania / Gravitational smoke extraction systems	Zabezpieczenia drewna / Wood protection
Klapy dymowe i okna oddymiające / Smoke vents and smoke ventilation windows	Zabezpieczenia tras kablowych / Cable tray protection
Systemy oddymiania szybów windowych / Smoke control systems in lift shafts	Zabezpieczenie konstrukcji stalowych / Protection of steel structures
Systemy napędów/ Drive systems	Budowa przegród / Construction of partitions
Systemy blokad drzwi przeciwpożarowych / Locking systems of fire doors	Zabezpieczenia systemów wentylacji / Protection of ventilation systems
Systemy sygnalizacji pożarowej (SSP) / Fire-alarm systems	Zabezpieczenia szczelin i łączeń / Protection of gaps and joints
Dźwiękowe systemy ostrzegawcze (DSO) / Voice alarm systems	Zabezpieczenia rur palnych i niepalnych / Protection of combustible and non-combustible pipes
Stałe urządzenia gaśnicze / Fixed firefighting devices	Zabezpieczenia elewacji betonowych / Protection of concrete facades

systemu aktywnego należą także: zraszacze wodne, urządzenia generujące mgłę wodną, pianowe systemy gaśnicze oraz systemy przeciwdymowe.

Z uwagi na bezpieczeństwo konstrukcji budowli poszczególne elementy składowe systemów aktywnych pełnią rolę drugorzędną w stosunku do systemów pasywnych. Te pierwsze stanowią ostateczną linię ochrony przed uszkodzeniem konstrukcji tuneli. W projektowaniu systemów pasywnych brane są pod uwagę materiały i rozwiązania konstrukcyjne stanowiące bariery ochronne zabezpieczające konstrukcje tuneli przed pożarem. Co ważne, nie wymagają one zewnętrznej aktywacji w przypadku pożaru.

Obiektem poddanym analizie jest tunel tramwajowy o długości nieco ponad 1400 m (ryc. 1). Był on budowany przez 34 lata, a w 2008 roku został ostatecznie ukończony i oddany do użytku. Budowla pozwala na szybkie skomunikowanie dworca PKP w Krakowie z północą i południem miasta, łącząc dwie trasy Krakowskiego Szybkiego Tramwaju od Kurdwanowa aż po Krowodrzą Górkę [4]. Obiekt składa się z odcinków powstałych w różnym czasie i z zastosowaniem zmieniających się technik budowy. Pomimo tego został zrealizowany z uwzględnieniem najwyższych standardów w zakresie szeroko pojętego bezpieczeństwa i trwałości budowlanej. Jest to tunel płytki i pierwszy tego typu obiekt w Polsce. W tunelu działa szereg systemów obsługi. Łączność radiową z tramwajami zapewnia nieekranowany kabel przeciągnięty wzdłuż komór i podłączony do anten umieszczonych przy obu wlotach. W celu zapewnienia bezpieczeństwa ruchu wykorzystywana jest dwustronna samoczynna blokada liniowa. W tunelu działają telefony SOS umożliwiające połączenie z dyspozytorem, a we wschodniej części znajdują się dodatkowo klatki ewakuacyjne. W części zachodniej ich rolę pełnią oba przystanki (ryc. 2). Nad bezpieczeństwem podróżnych, szczególnie w zakresie wentylacji oddymiającej, czuwa system zarządzania infrastrukturą. Na podstawowy system oddymiania składa się 12 rewersyjnych wentylatorów oddymiających o średnicy od 1600 do 2000 mm. Urządzenia zapewniają odprowadzenie dymu i gazów powstających podczas ewentualnego pożaru i zapewniają odpowiednią ilość świeżego powietrza do przewietrzenia tunelu. Tunel wyposażony jest również w elementy pasywnego systemu bezpieczeństwa. Składają się na nie: bierne zabezpieczenie tras kablowych, system wentylacji przeciwdymowej i uszczelnienie przed przenikaniem dymu i gazów [5]. Wspomniane systemy wentylacji, zarówno bytowej jak i pożarowej stanowią ważny element bezpieczeństwa w tunelu. System wentylacji w warunkach normalnej eksploatacji obniża stężenie zanieczyszczeń gazowych i py-

To maintain structural safety, the individual components of active systems are secondary to passive systems. The former represent the final line of defence against structural damage to tunnels. The design process of passive systems takes into account the materials and structural solutions acting as barriers protecting the tunnel structure from fires. Importantly, these systems do not require external activation in the event of a fire.

The analysed structure is a tram tunnel with a length of slightly more than 1400 m (Fig. 1). Its construction took 34 years, and it was completed and opened in 2008. The structure allows quick transport between the train station in Kraków and the northern and southern parts of the city, connecting two routes of the Kraków Fast Tram from Kurdwanów to Krowodrza Górka stops [4]. The structure is composed of sections completed at various times and using various construction techniques. Despite this, the tunnel was built to the highest standards in general safety and durability. It is a shallow tunnel and the first structure of this type in Poland. A number of service systems are in place in the tunnel. Radio communications with trams is facilitated by an unshielded cable running along the chambers and connected to antennae located at both tunnel entrances. Two-way automatic block signalling is used to ensure traffic safety. SOS phones are available inside the tunnel, allowing connection with a dispatcher, and the eastern section also features escape staircases. In the western section this function is served by both stops (Fig. 2). The safety of passengers, particularly with regard to smoke ventilation, is ensured by an infrastructure management system. The basic smoke-extraction system is composed of 12 reversible fans with a diameter of 1,600 to 2,000 mm. The devices extract smoke and gases emitted in a potential fire and supply the sufficient amount of fresh air to ventilate the tunnel. The tunnel is also equipped with passive safety system components. It includes the passive protection of cable ducts, a smoke ventilation system and seals against smoke and gases [5]. These ventilation systems, for both comfort and fire ventilation, constitute an important element of safety in the tunnel. Under normal operating conditions, the ventilation system reduces the concentration of gas and particulate pollutants and maintains the required visibility. During a fire, the ventilation system is responsible for the effective extraction of smoke and heat. This guarantees the evacuation of people from the tunnel and facilitates rescue and firefighting operations. For the ventilation system to fulfil all the above functions, a sufficient flow of air, in terms of speed and direction, must be maintained in the tunnel. To

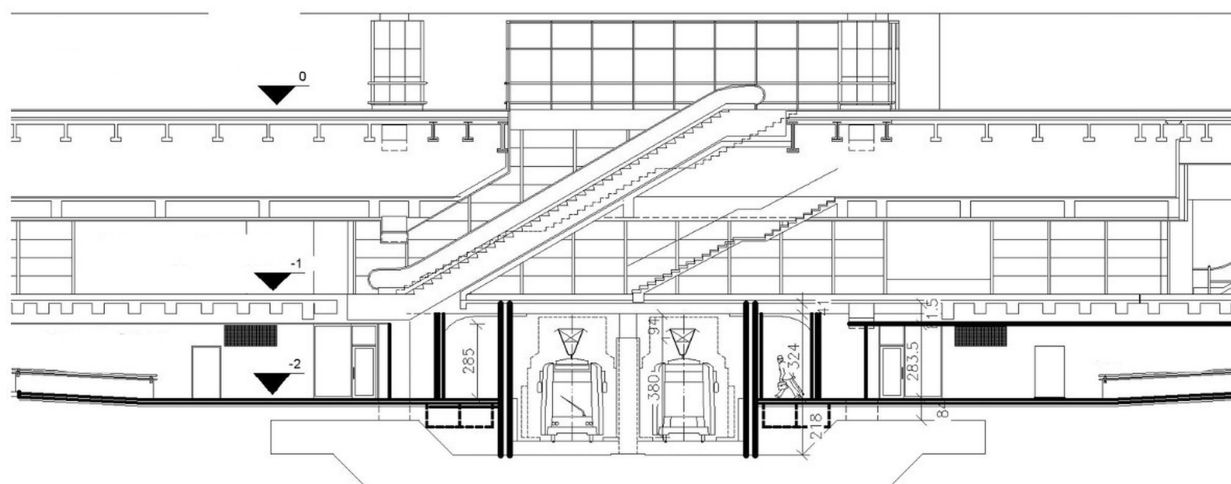


Ryc. 1. Wnętrze tunelu KST, jednokomorowy fragment tunelu

Fig. 1. The interior of a KST tunnel – a single-chamber section

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 2. Przekrój poprzeczny stacji KST „Dworzec Główny” – dane projektowe [4]

Fig. 2. The cross section of a KST tram stop “Dworzec Główny” (Central Station) – design data [4]

łowych oraz zapewnia wymagany zasięg widzialności. W warunkach pożaru system wentylacji odpowiada za skuteczne odprowadzanie dymu i ciepła. Gwarantuje on tym samym możliwość ewakuacji osób znajdujących się w tunelu oraz ułatwia prowadzenie działań ratowniczo-gaśniczych. Aby system wentylacji spełniał powyższe funkcje, należy zapewnić właściwy, pod względem prędkości i kierunku, przepływ powietrza w tunelu. W tym celu projektant posługuje się specjalistycznym oprogramowaniem, w którym uwzględniane są kubatura obiektu, wielkość i przekroje kluczowych elementów. W zależności od specyfiki i gabarytów obiektu dobierana jest moc, wielkość i rozmieszczenie elementów infrastruktury odpowiedzialnej za system wentylacyjny.

2. Metody

W niniejszym artykule oprócz zagadnień teoretycznych, związanych z nowoczesnymi metodami pomiarowymi (skanowanie laserowe i termowizja), przedstawiono także praktyczne wykorzystanie dostępnych narzędzi i aplikacji.

achieve this, designers use specialised software which analyses the structure's volume, and the size and sections of its key elements. The power, size and distribution of the infrastructural elements making up the ventilation system are selected depending on the specific structure and its dimensions.

2. Methods

In addition to theoretical issues connected with modern measurement methods (laser scanning and infrared thermography), this article focuses on the practical usage of the available tools and applications. It draws on information from a number of scientific publications and national legal acts. Furthermore, the authors contributed their experience in the field of measurement methods used for tunnel surveying.

2.1. An analysis of the measurement methods used in measuring the Kraków Fast Tram tunnel.

Engineering verification measurements are performed as the construction progresses. Control measurements are also

W opracowaniu wykorzystano informacje pochodzące z publikacji naukowych oraz krajowych aktów prawnych. Ponadto autorzy oparli się na własnym doświadczeniu związanym z metodami pomiarowymi na potrzeby inwentaryzacji tuneli.

2.1. Analiza metod pomiarowych zastosowanych w pomiarze w tunelu Krakowskiego Szybkiego Tramwaju

Inżynierskie pomiary weryfikacyjne są wykonywane w miarę postępu prac budowlanych obiektu. Ponadto pomiary kontrolne są realizowane okresowo po zakończeniu budowy i w trakcie jego użytkowania w celu sprawdzenia jego stanu technicznego [6-7].

2.1.1. Skanowanie laserowe

Skanowanie laserowe jest bezinwazyjną i bardzo szybką metodą inwentaryzacji. Stosuje się ją w szerokim spektrum prac inżynierskich. W tej metodzie powierzchnia jest mierzona za pomocą wiązki laserowej. Parametrami rejestrowanymi przez skaner są: kąty poziomy i pionowy wiązki lasera, odległość do obiektu i moc sygnału odbitego. W efekcie otrzymywany jest zbiór punktów o określonych współrzędnych przestrzennych. Urządzenie analizuje znajdujące się w przestrzeni pomiarowej obiekty poprzez zbieranie informacji o ich geometrii, kolorze i intensywności odbicia [8]. Pozyskane dane mogą być wykorzystane przy tworzeniu dokumentacji cyfrowej w postaci rysunków dwuwymiarowych lub trójwymiarowych modeli przestrzennych. Dostępne na rynku urządzenia różnią się szybkością działania, zasięgiem czy też sposobem obsługi (tabela 2). Zastosowane w badaniach skanery umożliwiały wykonanie kompletnego pomiaru z pojedynczego stanowiska w ciągu kilku minut. Ich zasięg umożliwiał pomiar do 100 m z jednoczesną rejestracją kolorów rzeczywistych obiektu.

Zaletą skanowania laserowego jest rejestracja bardzo dużej liczby punktów z precyzją kilku milimetrów w stosunkowo krótkim czasie. Metodę można porównać do fotografii, z tą jednak różnicą, że dodatkowo pozyskiwana jest informacja o odległości urządzenia pomiarowego od mierzonych obiektów. Skaner laserowy realizuje pomiar w polu widzenia urządzenia. W związku z tym zazwyczaj niezbędne jest wykonanie pracy z większej liczby stanowisk. Duża szybkość pracy i wysoka dokładność przestrzennego położenia zinventaryzowanych obiektów, a także coraz bardziej przystępne koszty stosowania tej technologii sprawiają, że jest ona coraz częściej wybierana do pomiaru budowli tunelowych [9-10].

performed periodically after the tunnel's completion and during its operation, to verify its technical condition [6-7].

2.1.1. Laser scanning

Laser scanning is a fast and non-invasive surveying method. It is used in a wide range of engineering works. In this method, surfaces are measured using a laser beam. The parameters recorded by the scanner are the horizontal and vertical angle of the beam, distance to object and return signal intensity. This produces a cloud of points with specific spatial coordinates. The device analyses the objects within the measurement space by collecting information on their geometry, colour and signal intensity properties [8]. The obtained data can be used in creating digital documentation in the form of 2D drawings or 3D models. The devices available on the market differ in measurement speed, range and operating methods (Table 2). The scanners used for surveying required several minutes to perform a complete measurement from a single vantage point. Their range allowed surveying up to 100 m while recording the real colours of the object.

The advantage of laser scanning is its capability to record a very large number of points with a precision of several millimetres in a relatively short time. This method can be compared to photography, the difference being that the information obtained relates to the distance of the measurement device from the measured objects. Laser scanners perform measurements within their field of view. Due to this, it is usually necessary to use a number of vantage points to complete the scanning process. The speed and high accuracy of the spatial measurement of surveyed objects, and also the increasing affordability of this technology, make it an increasingly popular choice for surveying tunnel structures [9-10].

2.1.2. Thermal measurements

The laser scanning method in the fire protection infrastructure measurement was supplemented by a thermal camera. Thermographic measurements are another non-invasive and non-destructive technology for obtaining data on physical bodies. This method involves the measurement and recording of the intensity of infrared radiation emitted by physical objects in the temperature ranges encountered under typical conditions (Fig. 3). This technology allows the measurement of object temperatures. Providing an external light source is not necessary.

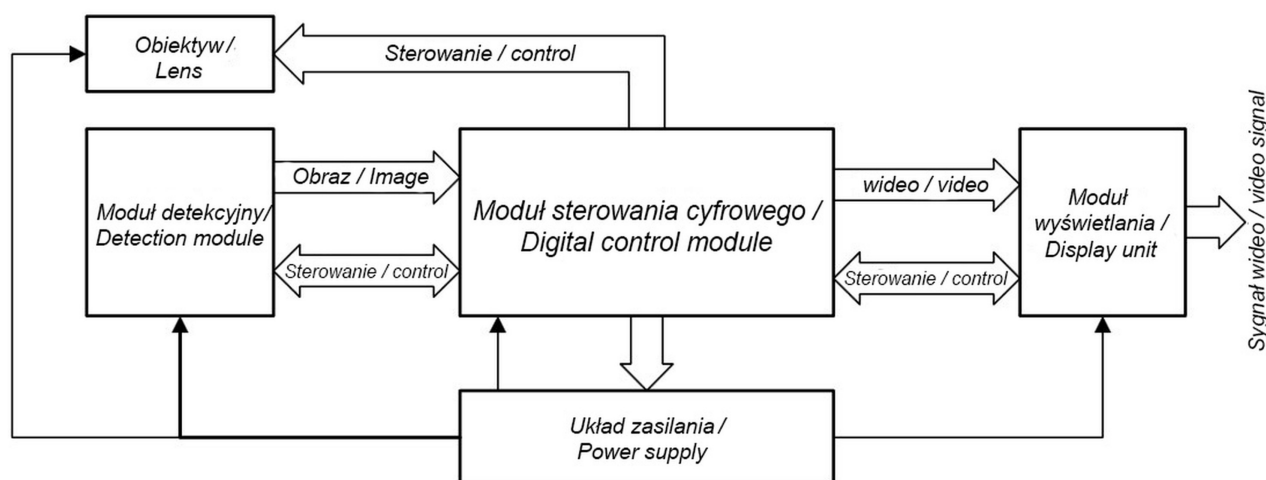
Tabela 2. Parametry skanerów laserowych

Table 2. Laser scanner parameters

Nazwa skanera / Scanner name	Zasięg / Range	Maksymalna prędkość pomiaru / Maximum measurement speed	Kąt widzenia (pionowy / poziomy) / Angle of view (horizontal / vertical)	Błąd pomiaru odległości / Distance measurement error	Błąd współrzędnej punktu / Point coordinate error
Leica C10	1 - 500 m	50 000 punktów / s (points/s)	270 / 360	4 mm	6mm (1-50 m)
Faro Focus X130	0.6 – 130 m	976 000 punktów / s (points/s)	300 / 360	4 mm	N/A
Z+F 5010 C	0.3 – 187 m	1 016 000 punktów / s (points/s)	320 / 360	1 mm	N/A
Riegl VZ400	1.5 – 600 m	122 000 punktów / s (points/s)	100 / 360	N/A	5 mm (1.5-100 m)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 3. Uproszczony schemat działania kamery termowizyjnej [11]

Fig. 3. Simplified diagram of the thermal camera operation [11]

2.1.2. Pomiary termowizyjne

Metoda skanowania laserowego w pomiarach infrastruktury przeciwpożarowej tunelu została uzupełniona poprzez zastosowanie kamery termowizyjnej. Pomiary termowizyjne są bezinwazyjną i nieniszczącą technologią pozyskiwania danych o ciałach fizycznych. W metodzie tej prowadzony jest pomiar i rejestracja natężenia promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekty fizyczne w przedziale temperatur spotykanych w typowych warunkach (ryc. 3). Technologia umożliwia pomiar temperatury obiektów. Nie ma także konieczności oświetlania ich zewnętrznym źródłem światła.

Sposób pracy i uzyskane wyniki zależą od modelu kamery termowizyjnej. Urządzenia różnią się między innymi rozdzielczością pozyskanych obrazów, zakresem rejestrowanych temperatur czy sposobem obsługi. Zależnie od spektralnego zakresu pracy, kamery termowizyjne dzieli się najczęściej na średniofalowe MWIR (zakres pracy $3\div 5\ \mu\text{m}$) i długofalowe LWIR ($8\div 14\ \mu\text{m}$).

Diagnostyka aparatami termowizyjnymi pozwala na badanie i analizę:

- instalacji i urządzeń elektrostatycznych, rozdzielni elektrycznych, sieci przemysłowych [12],
- stanu izolacji termicznej rurociągów i sieci ciepłowniczych, wykrywanie wycieków i nieszczelności,
- chłodni przemysłowych, przechowalni i magazynów z instalacją chłodzenia,
- linii produkcyjnych i procesów technologicznych oraz wykrywanie usterek maszyn i urządzeń,
- środowiska m.in. poprzez analizowanie emisji pyłów, zrzutu ciepłej wody i ścieków, lokalizowanie ognisk pożarowych,
- zagrożeń związanych z możliwym samozapłonem (składowanie węgla, zbóż itp.) [13],
- stanu kominów i in [14].

3. Dyskusja nad metodami i wynikami

Niniejszy artykuł prezentuje praktyczne możliwości zastosowania metody skanowania laserowego (ryc. 4a) w inwentaryzacji elementów tunelu Krakowskiego Szybkiego Tramwaju. W sposób szczególny potraktowano wyposażenie przeciwpożarowe w obiekcie. Z tego powodu prace badawcze poszerzono o technologie pomiarów termowizyjnych (ryc. 4b). Wybór drugiej techniki pomiarowej był szczególnie przydatny ze względu na możliwości diagnozowania potencjalnych źródeł zagrożenia pożarowego.

The working methods and obtained results depend on the thermal camera model. Thermal imaging devices differ in terms of, i.e., the resolution of obtained images, the range of recorded temperatures and the method of use. Depending on their spectral range, thermal cameras are usually divided into MWIR (mid-wave infrared, $3\div 5\ \mu\text{m}$ range) and LWIR (long-wave infrared, $8\div 14\ \mu\text{m}$).

Thermal imaging allows the study and analysis of:

- electrostatic systems and devices, electrical switchboards and industrial networks [12],
- the condition of thermal insulation of piping and heat networks, detecting leaks,
- industrial cold stores, storage rooms and warehouses with cooling systems,
- production lines and technological processes, detecting machine and device faults,
- the environment, by, i.e., analysing the emission of particulates, the inputs of hot water and wastewater, locating fire centres etc.,
- hazards connected with potential self-combustion (storage of coal, grain etc.) [13],
- the condition of chimneys and other objects [14].

3. Methods and results overview

This article presents the practical ways of using the laser scanning method (Fig. 4a) in the surveying of elements of the Kraków Fast Tram tunnel. Particular attention was given to the structure's fire protection system. For this reason, the research work was extended to cover thermographic measurement technologies (Fig. 4b). The choice of the second surveying technique was particularly useful, due to its capability of identifying potential fire hazards.

3.1. Field work

The first site survey was performed thanks to the cooperation of the Apply Capnor Poland Company and the AGH University of Science and Technology in Kraków. The surveying work was conducted in November 2014 along the entire length of the tunnel. The measurements took 20 hours and involved nearly 200 scanner vantage points. The resulting point clouds were aligned with the Polish national coordinate system using GPS technology. The second survey stage was completed in April 2016. Its objective was to supplement the data collected previously with details of the fire infrastructure. The selected elements were smoke extraction channels, cable duct locations and switchboards that represented potential

3.1. Prace terenowe

Pierwszy pomiar inwentaryzacyjny został zrealizowany dzięki współpracy firmy Apply Capnor Poland oraz AGH w Krakowie. Prace wykonano w listopadzie 2014 roku na całej długości tunelu. Pomiar przeprowadzono w ciągu 20 godzin i wykonano go na niespełna 200 stanowiskach skanera. Pozy-skane chmury punktów przetransformowano do państwowe-go układu współrzędnych wyznaczonego za pomocą techniki GPS. Drugi etap pomiarów został zrealizowany w kwietniu 2016 roku. Jego celem było uzupełnienie wcześniej zebranych danych o szczegóły związane z infrastrukturą przeciwpożarową. Wytypowano następujące elementy: kanały przeciwdymowe, lokalizację tras kablowych i skrzyń rozdzielczych mogących stanowić źródło potencjalnego pożaru oraz inne drobne elementy wyposażenia tunelu mające wpływ na jego bezpieczne użytkowanie. Jednoznaczna przestrzenna iden-tyfikacja wspomnianego wyposażenia z pewnością byłaby przydatna dla służb odpowiedzialnych za utrzymanie i moni-toring obiektu. Pomiary uzupełniające zrealizowano w trak-cie przerwy eksploatacyjnej tunelu w godzinach od 00:00 do 4:00. Wytypowanych zostało 26 stanowisk skanera laserowe-

fire hazards, and other small elements of tunnel equipment affecting its safety. A clear spatial identification of the listed equipment would definitely be useful for the services respon-sible for the facility's maintenance and monitoring. Addition-al measurements were conducted during the non-operational period in the tunnel between midnight and 4 a.m. 26 laser scanner vantage points were selected (Fig. 4a). The scan was supplemented by 97 thermograms showing objects with high-er temperatures relative to their surroundings (Fig. 5).

3.2. Office work

3.2.1. Processing the point cloud

The office work was divided into several stages. The first stage involved the calculation and alignment of the coordinates of the points in the photogrammetric control network (refer-ence points) plotted inside in the tunnel. The network made it possible to transform all point clouds into the common National Coordinate System. In addition, the network served as a basis for conducting an independent audit of the quality and accuracy of links between all point clouds in the tunnel.



a)

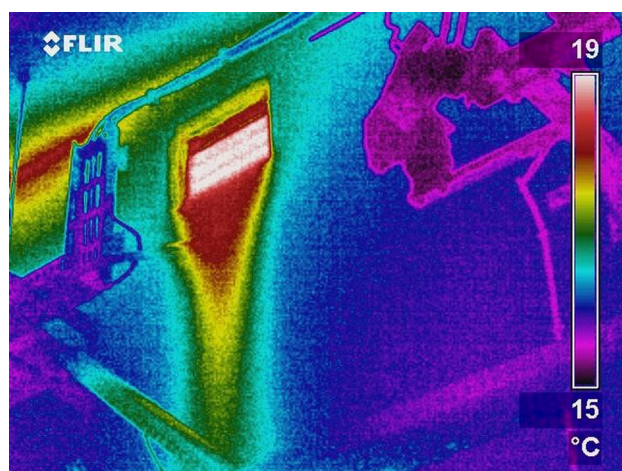


b)

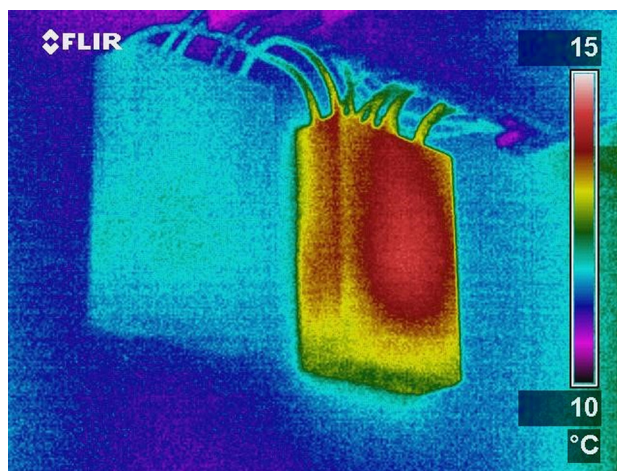
Ryc. 4. Zastosowane urządzenia pomiarowe a) skaner laserowy FARO Focus X130 i b) kamera termowizyjna FLIR S60
Fig. 4. The measuring devices used: a) a FARO Focus X130 Laser Scanner and b) a FLIR S60 thermal imaging camera

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



a)



b)

Ryc. 5. Termogramy obiektów o podwyższonej temperaturze w stosunku do otoczenia
a) wylot systemu wentylacyjnego i b) elektryczna skrzynia rozdzielcza
Fig. 5. Thermograms of objects with a higher temperature relative to the surrounding conditions
a) a ventilation system outlet and b) an electrical box

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

go (ryc. 4a). Pomiar uzupełniono o 97 termogramów przedstawiających obiekty wyróżniające się temperaturą wyższą od otaczających obiektów (ryc. 5).

3.2. Prace kameralne

3.2.1. Opracowanie chmury punktów

Prace kameralne zostały podzielone na kilka etapów. W pierwszym z nich przeprowadzono obliczenie i wyrównanie współrzędnych punktów osnowy fotogrametrycznej (punktów referencyjnych) założonej w tunelu. Osnowa umożliwiła przeprowadzenie transformacji wszystkich chmur punktów do wspólnego, państwowego układu współrzędnych. Dodatkowo osnowa była podstawą do przeprowadzenia niezależnej kontroli jakości i dokładności połączenia wszystkich chmur punktów w tunelu.

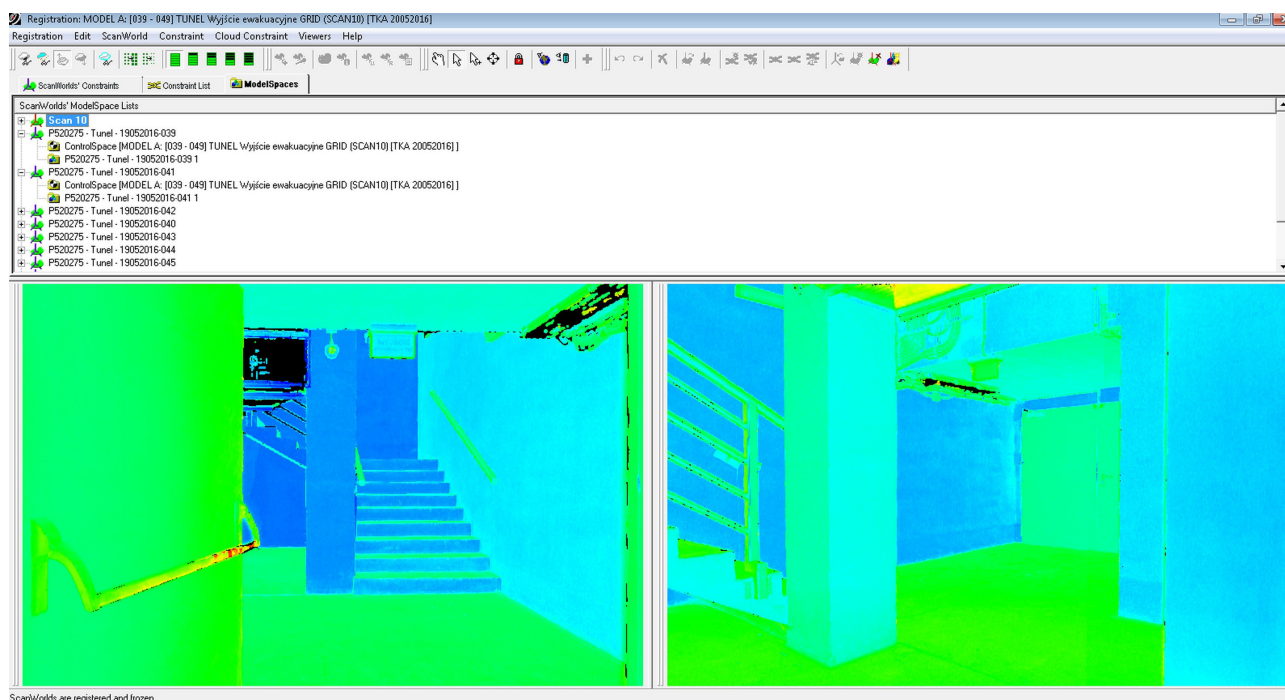
W kolejnym etapie prac dokonano połączenia stanowisk skanera w układzie lokalnym, a następnie przeprowadzono transformację do zewnętrznego układu referencyjnego. Opracowanie zrealizowano w aplikacji Register w oprogramowaniu Cyclone firmy Leica Geosystems (ryc. 6). W ramach optymalizacji procesu obliczeniowego, zastosowano wszystkie dostępne metody łączenia skanów: tarcza do tarczy, skan do skanu oraz płaszczyzna do płaszczyzny.

Po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń uzyskano chmurę punktów zawierającą dodatkowo parametr intensywności odbicia, który może być zaprezentowany w skali szarości lub innej gradacji kolorystycznej. Każda z chmur, zarejestrowana skanerem laserowym FARO Focus 3D, zawiera około 11 mln punktów. Całkowita chmura wraz ze skanami uzupełniającymi utworzyła bazę danych o liczebności przekraczającej 2,7 mld punktów, zajmując około 24 GB przestrzeni dyskowej. Moduł Cyclone Register dostarcza szczegółowych raportów z wykazem o jakości danych i informacją o średnim błędzie kwadratowym połączeń pomiędzy chmurami punktów. Otrzymana z rejestracji chmura dla całego obiektu charakteryzowała się błędem wynoszącym 1 mm dla

The next stage involved combining the scanner vantage points within the local coordinate system, and then their transformation into the external reference system. The data were processed in the Register application forming part of the Cyclone software by Leica Geosystems (Fig. 6). All available methods of combining scans, i.e. target-to-target, scan-to-scan and plane-to-plane, were employed to optimise the computing process.

After performing the necessary calculations, a point cloud was derived containing an additional parameter of signal intensity, which can be presented in grayscale or in another gradient. Each cloud, recorded with the FARO Focus 3D laser scanner, contained about 11 million points. The whole cloud, along with the supplementary scans, formed a database of more than 2.7 billion points, taking up about 24 GB of disk space. The Cyclone Register module provides detailed reports, including data quality information and information on the root mean square error of the alignment between point clouds. The cloud obtained from the registration process for the whole structure had an error of 1 mm for active connections and 29 mm for inactive connections. Furthermore, the transformation of the local coordinate system of the point cloud into the National Coordinate System resulted in a root mean square error of 5 mm. This processing resulted in a complete representation of the structure. This allows any spatial analysis to be performed with regard to geometry, i.e. a virtual tour of the structure and orientation. This point cloud can also form the basis for all kinds of design work.

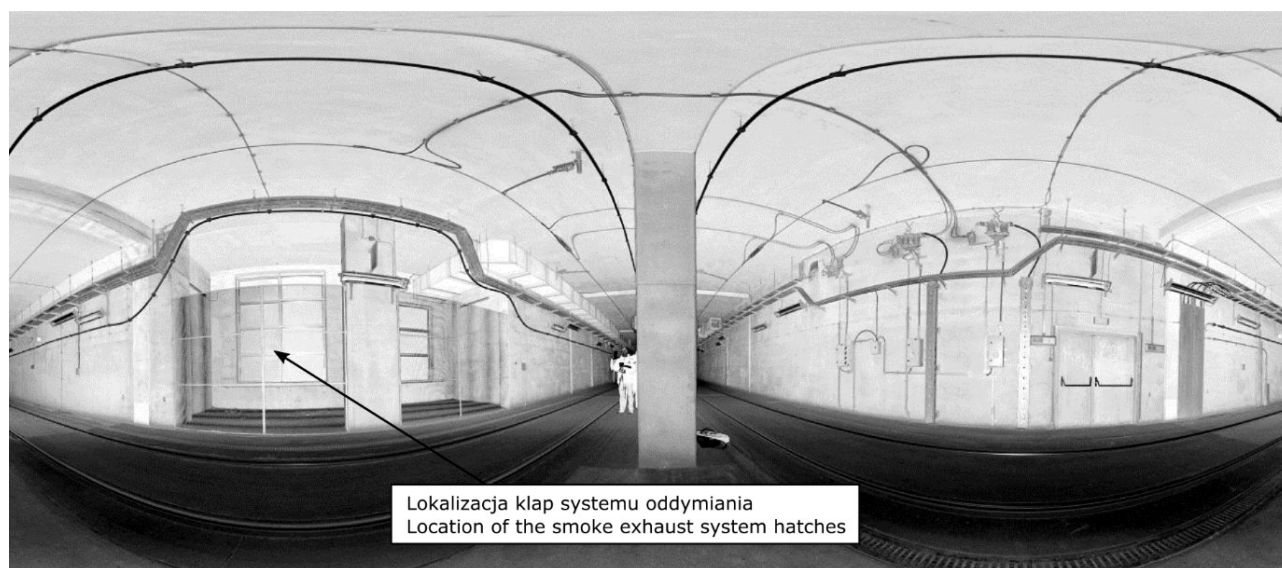
The figures below show the possible modes of viewing the point cloud. Figures 7 and 8 demonstrate a single position, which allows the detailed imaging of even the small details of the tunnel. Fig. 9 shows the complete point cloud representing the whole tunnel. It can be useful in both detailed and general orientation within the structure, but also for conducting large-scale research.



Ryc. 6. Łączenie chmur punktów w aplikacji Cyclone, widok okna modułu Register
Fig. 6. Combining point clouds in the Cyclone application, a view of the Register module window

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

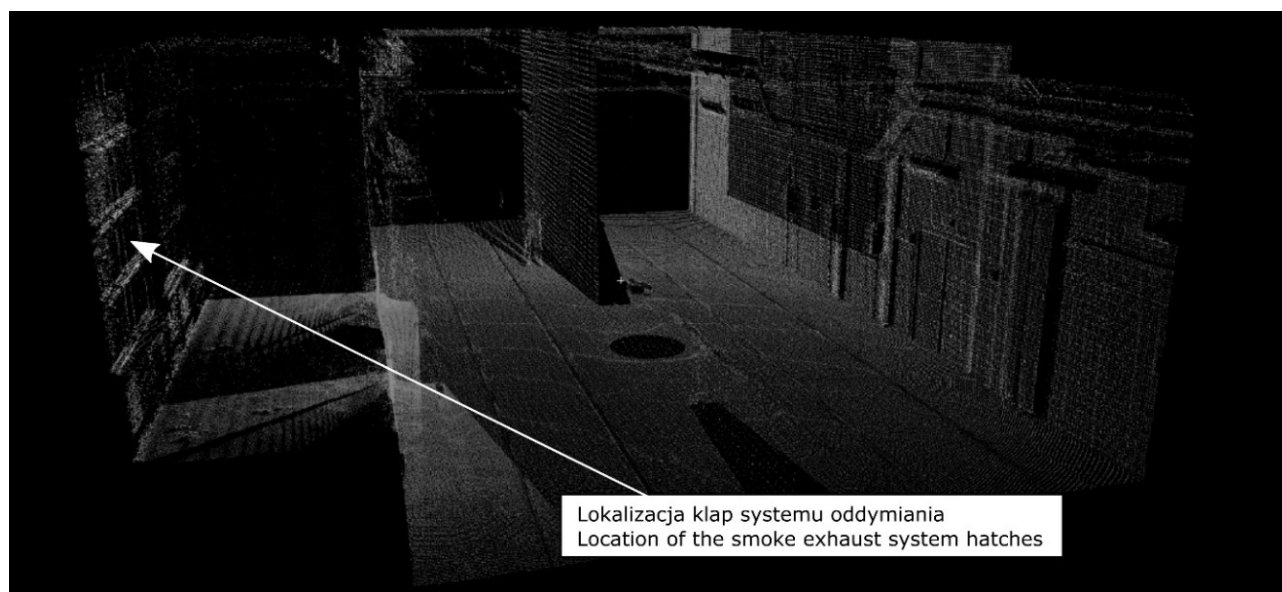


Ryc. 7. Widok płaski chmury punktów pojedynczego stanowiska skanera w skali szarości przedstawiający fragment tunel KST (klapy systemu oddymiania po lewej stronie)

Fig. 7. Flat view of the point cloud from a single scan vantage point in grayscale from the KST tunnel (smoke dampers on the left side)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 8. Widok perspektywiczny chmury punktów pojedynczego stanowiska skanera w skali szarości przedstawiający fragment tunel KST (klapy systemu oddymiania po lewej stronie)

Fig. 8. Perspective view of the point cloud from a single scan vantage point in grayscale from the KST tunnel (smoke dampers on the left side)

Źródło: Opracowanie własne.

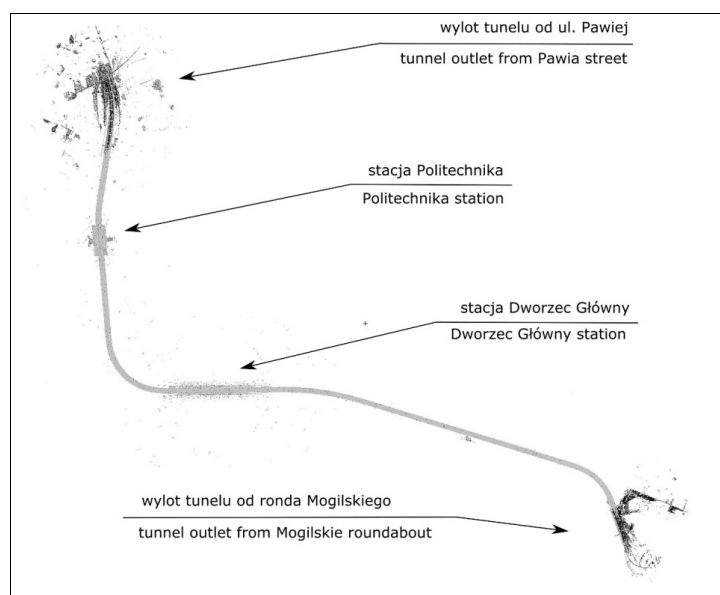
Source: Own elaboration.

połączeń aktywnych oraz 29 mm dla połączeń nieaktywnych. Ponadto transformacja lokalnego układu współrzędnych chmury punktów do państwowego układu współrzędnych dała średni błąd kwadratowy równy 5 mm. Tak przygotowany materiał reprezentuje kompletny obraz obiektu. Pozwala na wykonanie dowolnej analizy przestrzennej w zakresie geometrii, wirtualnego poruszania się po obiekcie czy orientacji w terenie. Chmura punktów może być także bazą dla wszelkich prac projektowych.

Prezentowane poniżej ryciny ukazują sposoby prezentacji chmury punktów. Na rycinie 7 i 8 zobrazowane jest pojedyncze stanowisko, na którym możliwe jest szczegółowe zobrazowanie nawet niewielkich detali tunelu. Na rycinie 9 znajduje się kompletna chmura punktów reprezentująca cały

3.2.2. Preparing thermal images and aligning them with the point cloud

The cloud, composed of millions of points with specific spatial coordinates, represents rich material for analysis. It was decided to supplement the research with thermal imaging data. An additional parameter was the colour representation of various temperature levels within the camera's frame. Figure 10 presents an example of the identified elements of tunnel equipment with higher temperatures. Numerous thermograms were taken during field studies with supplementary laser scans (Fig. 11 and 12). The data was later aligned to obtain the spatial representation of objects along with a thermal information overlay (Fig. 13).



Ryc. 9. Widok z góry z chmury punktów. Przedstawia cały zakres skanowania od Ronda Mogińskiego aż po ul. Kamienną
Fig. 9. Top view based on the point cloud. It presents the whole scanned area from the Mogińskie Roundabout to Kamienna Street

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

tunel. Może być ona użyteczna zarówno w kompleksowej i ogólnej orientacji na obiekcie ale także do prowadzenia wielkoskalowych badań.

3.2.2 Opracowanie obrazów termowizyjnych i połączenie ich z chmurą punktów

Chmura, złożona z milionów punktów o określonych współrzędnych przestrzennych, stanowi bogaty materiał analityczny. W badaniach postanowiono poszerzyć informacje o dane pochodzące z kamery termowizyjnej. Dodatkowym parametrem była kolorystyczna reprezentacja różnych poziomów temperatur w rejestrowanym kadrze kamery. Na rycinie 10 został zaprezentowany przykład zidentyfikowanych elementów wyposażenia tunelu o podwyższonej temperaturze. W trakcie badań terenowych wykonano liczne zdjęcia termograficzne oraz uzupełniające je pomiary skanerem laserowym (ryc. 11 i 12). Następnie połączono te dane, uzyskując przestrzenną reprezentację obiektów wraz z nałożoną informacją o ich rozkładzie termicznym (ryc. 13).

W pracach kameralnych przeprowadzono kalibrację obrazów termowizyjnych z kamery FLIR S60 do stanowisk skanera, z których pomierzono wybrane obiekty. Kalibracja wymagała zdefiniowania punktów transformacji zewnętrznej obrazu. Konieczne było wskazanie co najmniej sześciu punktów wspólnych pomiędzy termogramem a chmurą punktów. W ten sposób uzyskano lokalizację przestrzenną i kompletną informację geometryczną dla widma termicznego badanych obiektów.

3.2.3 Opracowanie przestrzennego modelu 3D

W trakcie dalszych prac wykonano modele przestrzenne 3D elementów systemu przeciwpożarowego oraz urządzeń towarzyszących. Pomiary termowizyjne wskazały miejsca o podwyższonej temperaturze. Te z kolei mogły być potencjalnym źródłem pożaru. Dla wyselekcjonowanych obiektów przygotowano modele 3D (ryc. 14). W pracach zastosowano dedykowaną aplikację Cyclone firmy Leica. Narzędzie służy do pracy na chmurach liczących miliony punktów. Umożliwia budowę przestrzennych obiektów bryłowych (ryc. 15). Otrzymany w ten sposób model może być przekonwertowany do dowolnego środowiska CAD, m.in. oprogramowania firm: Autodesk, Bentley, Intergraph i innych.

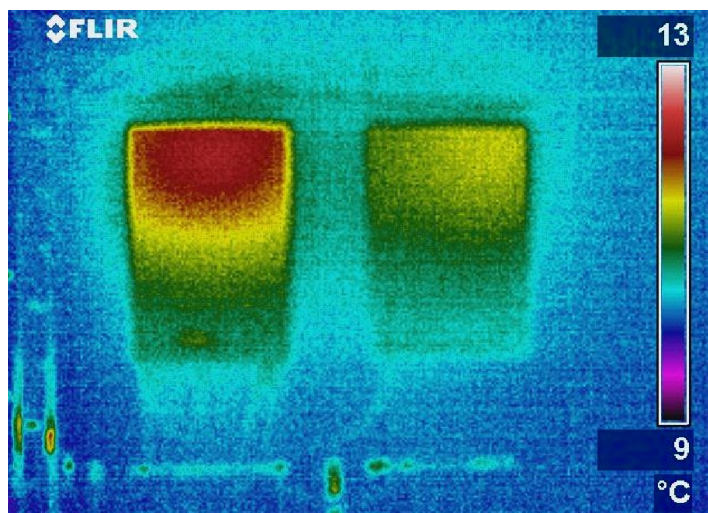
The office work also involved the calibration of thermograms from the FLIR S60 camera with the scanner vantage points used to measure the selected objects. This calibration required defining the external transformation points of the image. This required at least six shared points between the thermogram and the point cloud to be indicated and resulted in obtaining the spatial location and complete geometric information for the thermal spectrum of the surveyed objects.

3.2.3. Producing a 3D model

Further work included the production of 3D models of elements in the fire protection system and related devices. Thermal measurements allowed the identification of locations with elevated temperatures, representing potential fire hazards. 3D models were produced for the selected objects (Fig. 14). Leica's dedicated application, Cyclone, was used in the processing. This tool is designed for working with clouds made up of millions of points. It allows the construction of 3D solids (Fig. 15). The resultant model can be converted to any CAD environment, e.g. Autodesk, Bentley, Intergraph and other software suites.

Point-cloud based 3D models can be created manually from scratch or with partial assistance from the application. In recent years a number of algorithms and applications allowing the automatic creation of geometric elements have been released. These are usually confined to the modelling of a limited selection of elements, such as piping, or require additional corrections and data verification [15]. Regardless of the point cloud generalisation method, it is important to realise that this procedure involves the simplification and reduction of information. This has both its advantages and drawbacks, depending on the industry or expected outcome. A 3D model and its parameters has a number of valuable advantages over a point cloud, including:

- Less complex geometry of the represented objects,
- Faster rendering in CAD applications,
- Much smaller file size,
- Greater compatibility with CAD applications,
- Spatial analysis capabilities for processing in specialised engineering systems (e.g., explosion analysis, flow analysis and performance studies).

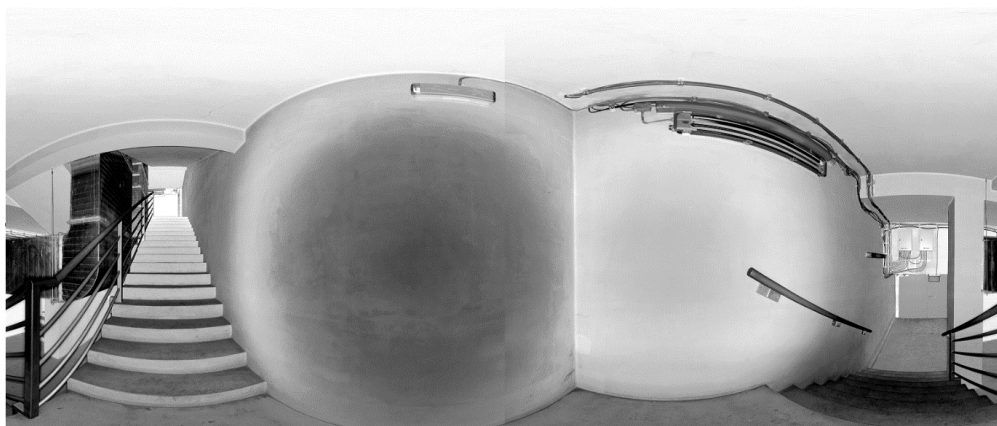


Ryc. 10. Widok termogramu (dwie skrzynie elektryczne, gdzie ta po lewej stronie jest wyraźnie cieplejsza)

Fig. 10. Thermogram view (two electrical boxes, the one on the left is substantially warmer)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

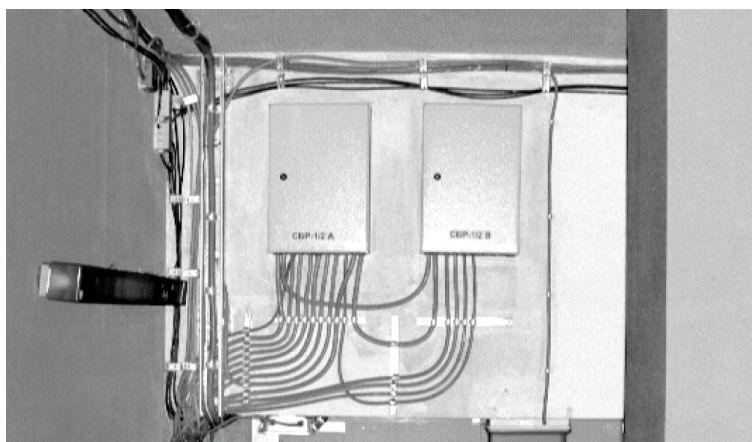


Ryc. 11. Widok płaski chmury punktów pojedynczego stanowiska skanera w skali szarości przedstawiający fragment tunel KST (klatka schodowa systemu ewakuacji wraz z systemem wentylacji po lewej i skrzyniami elektrycznymi po prawej stronie)

Fig. 11. Flat view of the point cloud from a single scan vantage point in grayscale from the KST tunnel (a staircase in the evacuation system and the ventilation system on the left and electrical boxes on the right side)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

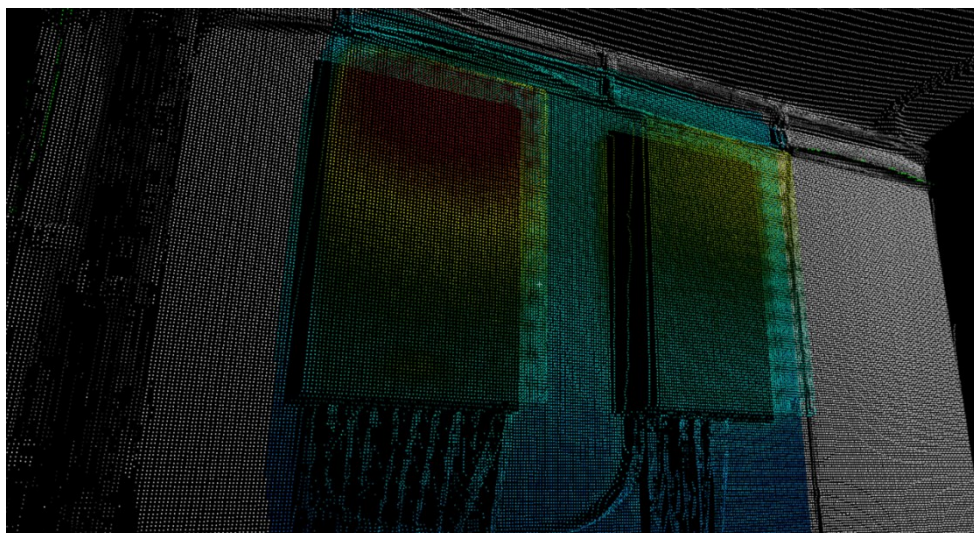


Ryc. 12. Widok elektrycznych skrzyń rozdzielczych z chmury punktów w skali szarości (powiększenie skanu zaprezentowanego na Ryc. 11, na podstawie termogramu skrzynia po lewej stronie wyraźnie cieplejsza)

Fig. 12. View of electrical switchboards together with point clouds in grayscale (a zoomed image of the items presented in Figure 11, based on a thermogram, box on the left substantially warmer)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 13. Obraz przedstawiający chmurę punktów wraz ze skalibrowanym termogramem

Fig. 13. Image from a point cloud together with a calibrated thermogram

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Przygotowanie modelu 3D w oparciu o chmurę punktów może być realizowane w pełni manualnie lub też z częściowym wspomaganie ze strony aplikacji. W ostatnich latach pojawiły się algorytmy i aplikacje umożliwiające automatyczne tworzenie elementów geometrycznych. Są one zwykle ograniczone do modelowania wąskiego zakresu elementów, takich jak orurowanie lub też wymagają dodatkowej pracy w zakresie korekt i weryfikacji danych [15]. Niezależnie od sposobu generalizacji chmury punktów należy mieć świadomość, że jest to procedura związana z uproszczeniem i zmniejszeniem informacji. Takie postępowanie może być zarówno zaletą, jak i wadą – w zależności od branży lub oczekiwanego efektu. Model 3D i jego parametry w porównaniu do chmury punktów ma kilka cennych walorów, do których należy zaliczyć:

- mniej skomplikowana geometria reprezentowanej przestrzeni,
- płynniejsze działanie w aplikacjach CAD,
- znacznie mniejszy rozmiar na dysku,
- większa kompatybilność z aplikacjami CAD,
- możliwość wykonywania analiz przestrzennych w specjalistycznych systemach inżynierskich (np. analizy wybuchów, analizy przepływów i wydajności systemów).

3.2.4. Publikacja danych online

Na podstawie kompletnej chmury punktów, uzupełnionej o skalibrowane termogramy oraz modele 3D elementów tunelu i jego wyposażenia, przygotowano dane do publikacji. Publikacją określa się proces eksportu danych w formacie pozwalającym na ich udostępnianie i współdzielenie przez internet, a także umieszczenie ich na specjalnym serwerze dostępnym online. Dzięki temu potencjalni użytkownicy uzyskują wygodny dostęp do dokumentacji trójwymiarowej. Ponadto mogą wspólnie pracować na tych samych danych. Możliwe jest również współdzielenie dodawanych komentarzy, wykonywanie zgrubnych pomiarów przestrzennych z użyciem przeglądarki i ich dalsze udostępnianie czy zapisywanie w pamięci systemu. Narzędzie to jest także łatwe i wygodne w użytkowaniu. Część funkcjonalności jak na przykład wirtualne wycieczki i zdjęcia sferyczne z ulic są podobne do udostępnianych obecnie przez Google i inne firmy (ryc. 16) [16]. Jest jednak jedna istotna różnica. W rozwiązaniach wirtualnych firmy Google nie ma możliwości wykonywania pomiarów na obrazach sferycznych w przeciwieństwie

3.2.4. On-line data publication

The complete point cloud, together with calibrated thermograms and 3D models of the tunnel elements and its equipment, served as the basis for publication data. Publication is the process of exporting data in a format that allows on-line presentation and sharing, and also uploading on a dedicated on-line server. This is a convenient way of accessing 3D documentation for potential users. This also allows teams to work on the same set of data. Other features include posting comments, performing rough spatial measurements in the browser and their further sharing or saving in the system memory. The tool is easy and user-friendly. Some of its functions, such as virtual tours and spherical panoramas of streets are similar to those provided by Google and other companies (Fig. 16) [16]. However, there is an important difference. Google's virtual solutions do not allow measurements on spherical images, a feature available in online point cloud viewing tools (Fig. 17).

Figures 16 and 17 present published scans in grayscale. Rough measurements can be performed on them, and comments and other markers can be added directly on the displayed images. To view the data and to take advantage of the system's features, you only need a computer with a web browser, an Internet connection and an assigned log-in and password. Publishing colour point clouds and combinations of three-dimensional models and scans are also possible, as shown in Fig 18.

On-line data sharing and exchange brings a number of new opportunities. Above all, it allows the visualising of results and information on any Internet-enabled device. It is also possible to display spherical panoramas by means of virtual reality devices, or VR headsets, which convert and display the image for each eye individually. This is possible with a smartphone with an additional headset. This solution immerses the user in the virtual environment and allows an even greater insight into the collected data.

4. Summary and conclusions

In measurements of long structures, the time required to perform the task and the costs involved play an important role. Access to the surveyed structure is often restricted. This is related to the long distance to the object, the mutual occlu-

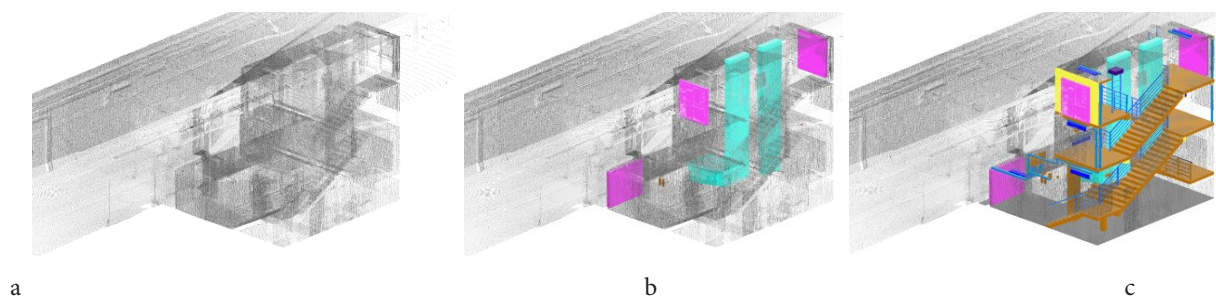
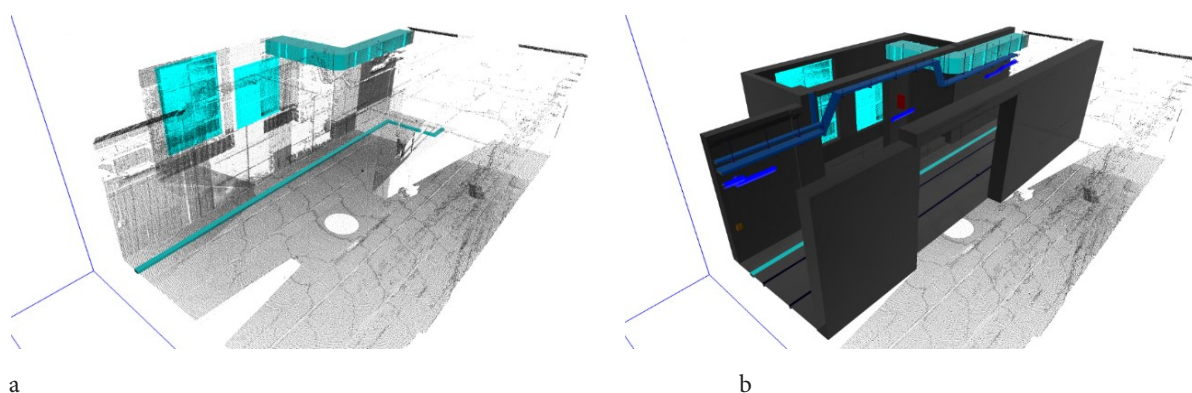


Fig. 14. Zestaw widoków perspektywicznych prezentujących klatkę ewakuacyjną: a) samą chmurę punktów, b) chmurę punktów z zamodelowanym system wentylacji i drzwi, c) chmura punktów oraz model wraz z schodami i podestami

Fig. 14. A set of perspective views showing the escape route: a) point cloud only, b) point cloud with a modelled ventilation system and escape doors, c) point cloud with a 3D model of the staircase and floor)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 15. Zestaw widoków perspektywicznych prezentujących fragment tunelu z systemem klap przeciwdymowych: a) chmura punktów z zamodelowanym system wentylacji i klap przeciwdymowych, b) model uzupełniony o ściany, podłogę wraz z torami i systemem odwodnienia oraz elementami tras eklektycznych i oświetlenia.

Fig. 15. A set of perspective views showing a part of the tunnel with smoke dampers: a) point cloud with a ventilation system and smoke damper models, b) a 3D model featuring walls, floor, rails, drain system, cable routes and lights)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

do możliwości, jakie niosą ze sobą narzędzia do przeglądania online chmur punktów (ryc. 17).

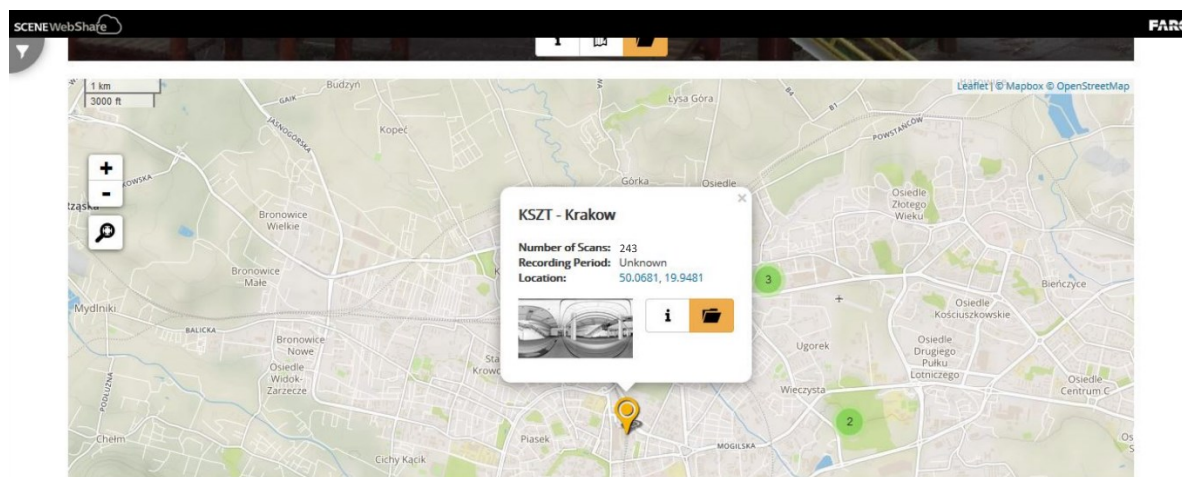
Na rycinach 16 i 17 zaprezentowano publikacje skanów w odcieniach szarości. Możliwe jest prowadzenie na nich zgrubnych pomiarów, a także dołączanie komentarzy czy innych oznaczeń wprost na wyświetlanych obrazach. Wgląd do danych i możliwość zastosowania poszczególnych funkcji wymaga dostępu do komputera z przeglądarką internetową, dostępem do internetu, a także nadanym loginem i hasłem. Istnieje także możliwość publikacji kolorowych chmur punktów oraz kombinacji modeli trójwymiarowych wraz ze skanami, jak to zostało przedstawione na rycinie 18.

Udostępnienie i wymiana danych przez internet stwarza szereg nowych możliwości. Przede wszystkim pozwala na wizualizację wyników i informacji na dowolnym urządzeniu posiadającym dostęp do internetu. Istnieje także możliwość wyświetlania prezentowanych widoków sferycznych na urządzeniach wirtualnej rzeczywistości, tj. okularach wirtualnych, w których obraz jest odpowiednio konwertowany i wyświetlany dla każdego oka niezależnie. W tym celu możliwe jest wykorzystanie smartfona wyposażonego w odpowiedni zestaw soczewek okularowych. Korzystając z takiego rozwiązania, użytkownik zyskuje wrażenie przebywania wewnątrz wirtualnego środowiska i może jeszcze pełniej spożytkować zebrane informacje.

sion of objects or the lack of illumination. There are also occasional safety considerations relating to performing measurements of live wires or objects in operation. These difficulties are connected with surveys of transport routes, tunnels and utilities. Ground-based laser scanning is increasingly being used in surveying such objects and structures. This modern method offers non-contact, quick, high-resolution and accurate measurements.

One application of laser scanning is the evaluation of the technical condition, structure and geometry of transport tunnels which require periodic surveying. The data obtained from the scan can also be used to identify, survey and assess the technical condition and determine the geometric parameters of fire protection system components in tunnels. Thermal imaging is an excellent companion to spatial point clouds. Images obtained from thermal vision cameras show the potential short circuit and fire hazards in real time. The transformation of thermograms into a point cloud allows the construction of 3D models and the generation of databases for facility and fire protection infrastructure management.

The capability of the presented technologies to create a detailed map of the surveyed structure make a virtual technical inspection of the analysed facility equally useful to real field visits. The advantages of this technology include saved time and funds and safety and ease of work. It is possible to



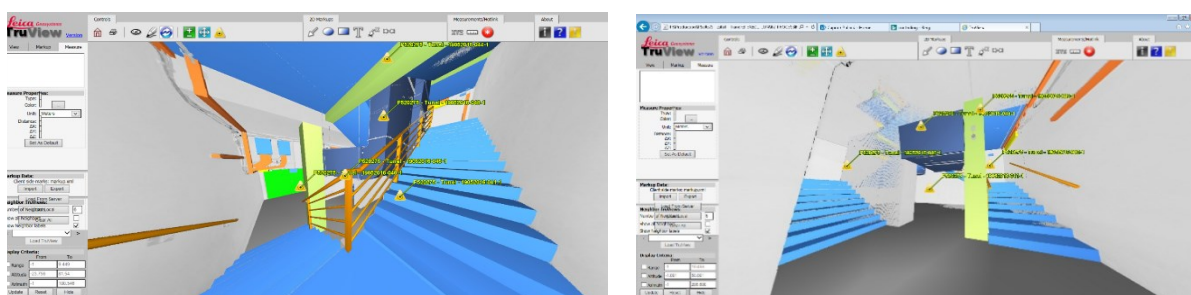
Ryc. 16. Widok z portalu internetowego – mapa ze zlokalizowaną publikacją skanowania laserowego z tunelu [17]

Fig. 16. A view of the web portal – the location of tunnel laser scanning publication on the map [17]



Fig. 17. Widok z portalu internetowego – pojedynczy skan z okolic przystanku Dworzec Główny. Na widoku zaznaczone pomiary oraz adnotacje [17]

Fig. 17. A view of the web portal – a single scan from the Dworzec Główny Station. There are measurements and annotations marked on the view [17]



Ryc. 18. Widoki z portalu internetowego – pojedyncze skany z ewakuacyjnej klatki schodowej wraz z modelem trójwymiarowym.

Na widokach zaznaczone pomiary oraz adnotacje wykonane poprzez przeglądarkę.

Fig. 18. A view of the web portal – single scans from the escape staircase, together with a 3D model. There are measurements and annotations made by the web browser

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

4. Podsumowanie i wnioski

W pomiarach obiektów liniowych dużą rolę odgrywa czas potrzebny do zrealizowania zadania i związane z nim koszty. Często dostęp do inwentaryzowanego obiektu jest ograniczony. Jest to związane ze: znaczną odległością do obiektu, wza-

eliminate or reduce the number of field visits to the required minimum. However, data relevance should be taken into account. Point clouds, as with all other survey results, represent the state as at the time of measurement. For this reason, any presentation of results should include a time reference. Another issue to be considered in working with point clouds is

jemnymi przesłonięciami lub brakiem oświetlenia. Zdarzają się także problemy związane z bezpieczeństwem i odnoszą się do pomiaru przewodów pod napięciem lub obiektów w trakcie eksploatacji. Wspomniane niedogodności występują w trakcie pomiarów tras komunikacyjnych, tuneli i uzbrojenia terenu. W inwentaryzacji wymienionych obiektów coraz częściej stosowana jest technologia naziemnego skaningu laserowego. Za wyborem tej nowoczesnej metody przemawia bezdotykowy, szybki, wysokorozdzielczy i precyzyjny pomiar obiektów.

Jednym z zastosowań skaningu laserowego jest ocena stanu technicznego, konstrukcji i geometrii tuneli komunikacyjnych, które wymagają okresowych pomiarów inwentaryzacyjnych. Pozyskane w trakcie pomiaru dane można także zastosować do: rozpoznania, inwentaryzacji, oceny stanu technicznego i wyznaczenia parametrów geometrycznych elementów tworzących systemy przeciwpożarowe w tunelach. Znakomitym uzupełnieniem przestrzennych chmur punktów jest obraz termowizyjny. Zarejestrowane za pomocą kamer termowizyjnych obrazy termalne obiektów ukazują na bieżąco potencjalne miejsca zwarć i pożaru. Transformacja termogramów do chmury punktów umożliwia budowę modeli 3D i tworzenie baz danych do zarządzania obiektem i infrastrukturą przeciwpożarową.

Możliwości prezentowanych technologii w detalicznym odwzorowaniu inwentaryzowanego obiektu sprawiają, że wirtualna wizyta techniczna w analizowanym obiekcie staje się konkurencyjna w porównaniu do bezpośrednich wizyt terenowych. Wśród atutów proponowanej technologii jest oszczędność czasu i nakładów finansowych oraz bezpieczeństwo i komfort pracy. Możliwe jest wyeliminowanie lub zredukowanie do niezbędnego minimum wizyt terenowych. Należy mieć jednak na uwadze aktualność danych. Chmura punktów, podobnie jak każdy inny wynik inwentaryzacji, jest aktualna w chwili wykonywania pomiaru. Z tego powodu prezentacja wyników powinna być odniesiona w czasie. Kolejnym zagadnieniem, na które należy zwrócić uwagę w trakcie pracy na chmurach punktów jest ich znaczny rozmiar i potrzebna do archiwizacji przestrzeni dyskowa. Obsługa tak dużych zbiorów danych pociąga za sobą konieczność posiadania wydajnych komputerów i specjalistycznego oprogramowania.

Artykuł opracowano w ramach badań statutowych nr 11.11.150.005 w 2016 roku na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, AGH w Krakowie.

Literatura / Literature

- [1] Lacroix D., *New French recommendations for fire ventilation in road tunnels*, [in:] *9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta, Italy 1997.
- [2] Sztarbała G., *Oddziaływanie wiatru na przepływ powietrza w tunelach drogowych wentylowanych naturalnie*, „Budownictwo i Architektura” 2013, 12, 157-164.
- [3] Rozporządzenie MSWiA z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (Dz. U. 2010 Nr 109, poz. 719).
- [4] Ryż K., *Wybrane zagadnienia konstrukcyjno-technologiczne budowy pierwszego w Polsce Tunelu Tramwajowego*, „Górnictwo i Geoinżynieria” 2009, 3(1), 338-346.
- [5] Promat International NV; 33 [dok. elektr.] <http://www.promat-tunnel.com/en/references/pl%20-%20tram%20tunnel> [dostęp: 15.06.2016].
- [6] Jong-Suk Y., Myung S., Lee J.S., Kyu-sung L., *Feature extraction of a concrete tunnel liner from 3D laser scanning data*, “NDT & E International” 2009, 42(2), 97-105.
- [7] Miah M.S., Uus M.A., Liatsis P., Roberts M.S., Twist M.S., Hovens M.M., Nardoni M.G. *NDT, Sensor Fusion: Optimisation of NDT Sensor Data Processing Strategies for Road Infrastructure Inspection*, [electr. doc.], https://blogs.city.ac.uk/fp7-rpbhealtec/files/2016/01/RPB_HealTec_UTSG_2016-1-2668woq.pdf [accessed: 15.06.2016].
- [8] Lemmon T., *Tank inspection and calibration with 3D laser scanning*, 2011, 2-3, [electr. doc.], https://www.trimble.com/oil-gas-chemical/pdf/3DLaserScanning_TankInspectionAndCalibration_Whitepaper_18953_Oct11_ENG_LR.pdf [accessed: 15.06.2016].
- [9] H. Chen, C. Ulianov, R. Shaltout, *3D Laser Scanning techniques for the inspection and monitoring of railway tunnels*, “Transport problems” 2015, 10, 2-3.
- [10] Strach M., *Nowoczesne techniki pomiarowe w procesie modernizacji i diagnostyce geometrii torów kolejowych*, „Rozprawy, Monografie” 2013, t. 285.
- [11] Madura H., Sosnowski T., Bieszczad G., *Termowizyjne kamery obserwacyjne – budowa, zastosowania i krajowe możliwości realizacji*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2014, 90(9), 5-8.
- [12] Łaciok Ł., Rybiński J., Szajewska A., *Wykorzystanie kamery termowizyjnej podczas gaszenia pożaru zakładu produkcyjnego*, BiTP Vol. 30 Issue 2, 2013, pp. 75-80.
- [13] Lewińska P., *Integracja Numerycznego Modelu Terenu z powierzchniowym rozkładem temperatury*, rozprawa doktorska, AGH w Krakowie, 2016.
- [14] Balaras C.A., Argiriou A.A., *Infrared thermography for building diagnostics*, “Energy and Buildings” 2002, 34(2), 171-183.
- [15] Rabbani, T., *Automatic Reconstruction of Industrial Installations*, “Publication on Geodesy of the Netherlands Geodetic Commission”, Vol. 62, Phd thesis, TUDelft, Delft, the Netherlands 2006.
- [16] Google Inc.; serwis internetowy, <https://www.google.pl/maps/streetview/> [dostęp: 15.06.2016].
- [17] Apply Capnor Poland Sp. z o.o.; serwis internetowy <https://applycapnor.websharecloud.com> [dostęp: 15.06.2016].

Artykuł został przetłumaczony ze środków MNiSW w ramach zadania:

Stworzenie anglojęzycznych wersji oryginalnych artykułów naukowych wydawanych w kwartalniku „BiTP. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza – typ zadania: stworzenie anglojęzycznych wersji wydawanych publikacji finansowane w ramach umowy 935/P-DUN/2016 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

* * *

mgr. inż. Piotr Dronszczyk – menedżer operacyjny w firmie Apply Capnor Poland. Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska oraz Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej na tej samej uczelni. Obszary zainteresowań naukowych: nowoczesne techniki pomiarowe, skanowanie laserowe, fotogrametria, wysokorozdzielcza fotografia sferyczna, rzeczywistość wirtualna oraz rzeczywistość rozszerzona, wsparcie projektowania inżynierskiego, big data.

Piotr Dronszczyk, M.Sc. Eng. – Operations Manager at Apply Capnor Poland. Graduated from the AGH University of Science and Technology in Kraków, the Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering and the Faculty of Physics and Nuclear Technology. Scientific interests: modern survey techniques, laser scanning, photogrammetry, high-resolution spherical photography, virtual reality and augmented reality, engineering design support, big data.

dr hab. inż. Michał Strach – zatrudniony w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa. Zainteresowania: wykorzystanie nowoczesnych technologii pomiarowych w geodezji inżyniersko-przemysłowej, autorskie systemy pomiarowe i przyrządy do diagnostyki nawierzchni szynowej, zastosowanie skanerów laserowych, instrumentów typu Total Station, systemów GPS/GNNS w pomiarach i projektowaniu obiektów inżynierskich ze szczególnym uwzględnieniem tras szynowych.

Michał Strach, Ph.D. – employed at the AGH University of Science and Technology in Kraków at the Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering, Geodetic Engineering and Construction Department. Interests: the use of modern survey technologies in geodetic engineering, customised survey systems and devices for rail surface diagnostics, the application of laser scanners, Total Station instruments, GPS/GNNS systems in surveying and designing engineering structures with particular focus on rail routes.