

Wykorzystanie danych skaningu laserowego do modelowania 3D fortów obronnych na przykładzie Fortu Prusy w Nysie

Andrzej Borkowski, Małgorzata Jarząbek-Rychard,
Przemysław Tymków, Grzegorz Józków

3D Modeling of
the Prussian Fortress
in Nysa Using Laser
Scanning Data

Słowa kluczowe: naziemny i lotniczy skaningu laserowego, modelowanie 3D, forty obronne

Wstęp

Tradycyjnym obszarem zastosowań technologii skaningu laserowego, a zwłaszcza lotniczego, jest budowa numerycznych modeli terenu (NMT). W ostatnich latach, wraz z rozwojem technologii skanowania i wzrostem jej dostępności poszerzają się również istotnie obszary zastosowań, a liczba zrealizowanych projektów z wykorzystaniem technologii skanowania rośnie lawinowo. Produktem skanowania laserowego jest olbrzymia, o bardzo dużej rozdzielczości, liczba danych (punktów) w przestrzeni 3D. Trójwymiarowa, wysokorozdzielcza chmura punktów jest również nośnikiem informacji o różnych charakterystykach krajobrazowych przestrzeni. Fakt ten zauważono stosunkowo wcześniej. W pracy [Sheppard 2004] można znaleźć dyskusję dotyczącą potencjału i możliwości wykorzystania technologii skaningu laserowego w planowaniu przestrzennym i architekturze krajobrazu.

W obszarach tych może być wykorzystana zarówno technologia lotniczego skanowania laserowego (*Airborne Laser Scanning*, ALS), jak i technologia naziemnego skanowania laserowego (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS). Z punktu widzenia odbiorcy końcowego, obydwie tech-

nologie są źródłem takich samych danych o różnej na ogół rozdzielczości. Dostarczają one przestrzenną chmurę punktów o współrzędnych {x, y, z}. Wykorzystując ALS, można pozyskać informacje trudno dostępne z powierzchni terenu, np. o dachach budynków czy obszarach zalesionych. TLS z kolei dobrze nadaje się do skanowania powierzchni słabiej widocznych z pułapu lotniczego, np. elewacji budynków.

Odpowiednie połączenie danych z obydwu sensorów daje niemal kompletną informację geometryczną o skanowanej przestrzeni.

Forty obronne lub inne tego typu obiekty militarne to na ogół budowle rozległe, będące kombinacją obiektów budowlanych i ziemnych, obejmujące spore obszary, o utrudnionym dostępie. Ponadto obiekty te porośnięte są nierzadko bujną roślinnością czy wręcz „ukryte” w terenach zalesionych. Do ich inwentaryzacji i pomiaru szczególnie dobrze nadają się technologie ALS i TLS. Promień laserowy ma bowiem duże możliwości penetracyjne przestrzeni zagęszczonej roślinnością i dzięki temu otrzymuje się dostatecznie gęstą chmurę punktów zawierającą informacje o obiektach skanowanych, ukrytych pod szatą roślinną. Chmura taka, sama w sobie, może być źródłem informacji o stanie skanowanych obiektów, w szczególności zaś o parametrach geometrycznych obiektów. W praktyce, posługiwanie się chmurą punktów jest mocno ograniczone ze względu

Key words: terrestrial and airborne laser scanning, 3D modeling, fortress

Introduction

Traditionally, laser scanning technology – and especially airborne systems – have been applied through digital elevation models (DEM). In recent years, the development and increased availability of scanning technology has led to a significantly wider range of applications and a rapidly growing number of completed projects that relied on laser scanning data. The final product of LiDAR measurements are a huge number of data points in a 3D space with a very high resolution. This 3D, high-resolution point cloud is also a source of information on different spatial characteristics of landscapes. Attention was drawn to this fact from a relatively early stage in this research. A discussion of the potential opportunities for using laser scanning technology in urban planning and landscape architecture can be found in the work of [Sheppard 2004].

From this perspective, airborne laser scanning (ALS) and terrestrial laser scanning (TLS) can also be used. From the point of view of the end users, both of these technologies are sources of the same data with varying resolution. Both technologies provide a point cloud of spatial coordinates {x, y, z}. With the use of ALS it is possible to obtain information which would be difficult to obtain from the

ground, for example, the information about roofs of buildings or in areas that are heavily forested. TLS, on the other hand, works well for scanning surfaces that are not very visible from the air, such as the facades of buildings. The right combination of data from both sensors can provide comprehensive geometric information about a scanned area.

Historic fortresses and other similar military sites are usually spread across a large area with building structures that are both above and below ground over large areas that are difficult to gain access to. These sites are often covered over with abundant vegetation or even secluded in heavily forested areas.

ALS and TLS technology are particularly well suited for taking an inventory and measuring these sites. The laser beam is well able to penetrate dense vegetation and results in a sufficiently dense point cloud which contains information about scanned sites that are hidden under vegetation. The point cloud in itself can be a source of information on the state of scanned sites, especially the geometric parameters. In practice, opportunities for using point clouds are very limited due to the huge size of the data sets. 3D vector models are built from point clouds of sites filling in the scanned area.

This paper deals with the issues involved in the 3D modeling of historic fortresses by looking at the Prussian Fort in Nysa. The modeling of this site is part of broader work

done by the authors for geo-portal "Opolskie in the Internet" (www.mapy.opolskie.pl). Unlike other fortresses in Nysa, which were modeled only using ALS data, modelling of the Prussian Fortress was done with both TLS and ALS data. The process described in the paper focuses on modelling this type of military facility, while highlighting the potential opportunities for using laser scanning in landscape architecture.

Material and methods

The Prussian Fortress

Located at the crossroads of several trading routes, the city of Nysa had an extensive defense system almost from the beginning of its existence. For more than 150 years – officially until 1903 – Nysa was a defensive fortress (www.twierdzanyasa.com). During this period the fortification system was extensively developed, occupying an area of several hundred acres. About 60% of the fortifications have survived to the present day, with a total area of approximately 230 hectares. A large part of the surviving structures are at the Prussian Fortress, which is situated on a hill on the north bank of the Nysa Kłodzka river. The fortress was designed to protect the city against attack from the north. It was built between 1743–1745, in the shape of a five-pointed star, inside of which was a pentagon of two-

na olbrzymie rozmiary zbioru danych. Na podstawie chmury punktów budowane są wektorowe modele 3D obiektów wypełniających skanowaną przestrzeń.

W niniejszej pracy przedstawiono problematykę budowy modelu 3D fortów obronnych, na przykładzie Fortu Prusy w Nysie. Modelowanie tego obiektu jest fragmentem szerszych prac wykonanych przez autorów na potrzeby geoportalu „Opolskie w Internecie” (www.mapy.opolskie.pl). W odróżnieniu od pozostałych fortów obronnych w Nysie, które modelowano na podstawie danych ALS, modelowanie Fortu Prusy wykonano, opierając się na danych TLS i ALS.

Zwrócono przy tym uwagę na specyfikę modelowania tego typu obiektów militarnych. Jednocześnie podkreślono potencjał i możliwości wykorzystania skanowania laserowego w architekturze krajobrazu.

Materiał i metody

Fort Prusy

Nysa jako miasto zlokalizowane na przecięciu licznych szlaków handlowych miała rozbudowany system obronny niemal od początku istnienia. Przez ponad 150 lat – formalnie do roku 1903 – Nysa była twierdzą obronną (www.twierdzanysa.com). W okresie tym system fortyfikacji był intensywnie wzmacniany i rozbudowywany, zajmując powierzchnię kil-

kuset hektarów. Zachowane do czasów obecnych około 60% fortyfikacji zajmuje łączną powierzchnię 230 ha. Elementem zachowanego systemu obronnego jest Fort Prusy, zlokalizowany na wzgórzu na północnym brzegu Nysy Kłodzkiej. Fort miał za zadanie zabezpieczać miasto przed ostrzałem od strony północy. Zbudowany został w latach 1743–1745 na planie pięcioramiennej gwiazdy, wewnątrz której wznosił się pięciobok dwukondygnacyjnych kazamatów. Od zewnątrz i z góry kazamaty osłonięto nasypem ziemnym. Wewnątrz, na dziedzińcu, zlokalizowany jest budynek studni. Mury kazamatów i studni są ceglane. Fort uzupełniają fosy oraz rozbudowany system podziemnych chodników. Przedmiotem skanowania i modelowania były tylko elementy zewnętrzne fortu. Część ziemna fortyfikacji porośnięta jest intensywnie roślinnością krzewiastą i lasem.

Skanowanie laserowe

Do modelowania 3D fortu wykorzystano połączoną chmurę punktów pochodzących zarówno z lotniczego, jak i naziemnego skaningu laserowego.

ALS został wykonany na zlecenie Urzędu Marszałkowskiego w Opolu, przez firmę MGGP Aero, z wykorzystaniem systemu Lite Mapper bazującego na skanerze Riegl LMS-Q680i. Skanowanie wykonano z nominalną rozdzielczością 6 punktów na metr kwadratowy, ale

ze względu na wspólne pokrycie sąsiednich skanów sięgające 50% rozdzielczość wynikowej chmury punktów kształtuje się na poziomie 12 punktów na metr kwadratowy. Dostarczone ostateczne współrzędne punktów podano w układzie PUWG1992, a wysokości w systemie wysokość i normalnych. Chmurę punktów ALS z obszaru zainteresowania przedstawia rycina 1.

TLS wykonano skanerem ScanStation C10 firmy Leica wraz z osprzętem i programem Cyclone 8.0. Na potrzeby skaningu założono na dziedzińcu obiektu punkty osnowy pomiarowej techniką GNSS z wykorzystaniem systemu ASG-EUPOS. Do pomiaru wykorzystano odbiornik Trimble R6. Współrzędne punktów wyznaczono z precyzją wewnętrzną na poziomie trzech centymetrów, w układzie współrzędnych PUWG1992 i obowiązującym w Polsce systemie wysokości normalnych. Punkty osnowy posłużyły do georeferencji i połączenia poszczególnych skanów. Skanowanie wykonano ze stanowisk swobodnych, z orientacją na tarcze pomiarowe ustawione na punktach osnowy. Rozdzielczość skanowania na obiekcie (średnia odległość pomiędzy punktami na powierzchni ściany) wyniosła od 2 mm do 2 cm. Połączenie i transformację skanów wykonano w programie Cyclone 8.0. Osiągnięto dokładność spasowania skanów na poziomie poniżej jednego centymetra – zarówno dla składowych poziomych, jak i wysokościowych. Uzyskaną

storey casemates. From the outside and from above the casemates were shielded by a natural embankment. Inside the fort there is an enclosed well in the courtyard. The casement walls and walls around the well are brick. The fortress has a moat and an extensive system of underground walkways. Scanning and modeling was done only on the exterior elements of the fortress. The part of the fortification which is below ground is densely covered with shrubs and forest vegetation.

Laser scanning

3D modeling of the fortress was done from a combined point cloud of both airborne and terrestrial laser scanning data. ALS was performed at the request of the Marshal's Office in Opole by MGGP Aero, using the Lite Mapper system with the Riegl LMS-Q680i scanner.

Scanning was carried out with a nominal resolution of 6 points/m², but due to the 50% joint cover of adjacent scans, the resulting resolution of the final point cloud is 12 points/m². The final point coordinates were input into the PUWG1992 coordinate system, and the height information was stored in a normal height system. The ALS point cloud of the studied area is shown in Figure 1.

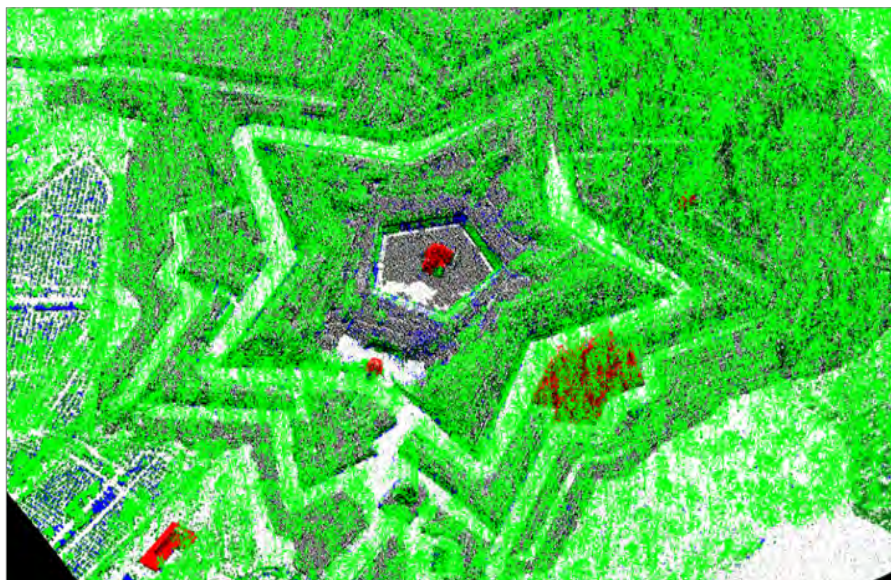
The TLS measurement was performed with a Leica ScanStation C10 scanner with accessories and Cyclone 8.0 software. For scanning, a geodetic control network was set up in the

Ryc. 2. Chmura punktów TSL pokolorowana intensywnością odbicia promienia laserowego

Fig. 2. TSL point cloud, colored by the intensity of the laser beam reflection

Ryc. 1. Chmura punktów ALS Fortu Prusy, ze wstępną klasyfikacją punktów: kolor niebieski – punkty powierzchni terenu, kolor zielony – punkty będące odbiciami od roślinności, kolor czerwony – punkty sklasyfikowane jako odbicia od budynków

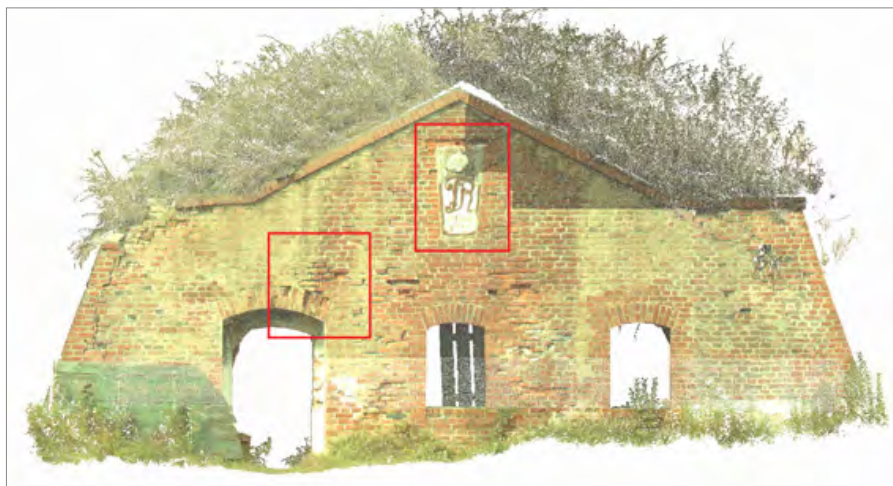
Fig. 1. ALS point cloud of the Prussian Fortress with the initial classification of data: points on the terrain surface (blue), points reflected from vegetation (green), points classified as reflections from buildings (red)



courtyard with the GNSS technique and using ASG- EUPOS. Measurements were taken by a Trimble R6 receiver. Point coordinates were determined with a three-centimeter degree of internal precision, in the PUWG1992 coordinate system and the applicable Polish system of normal height. Control points were used for georeferencing and combining the

individual scans. Scanning was done from a free-standing position pointed toward the measuring target set over the warp points. The scan resolution of the site (the average distance between the points on the surface of the wall) ranged from 2 mm to 2 cm. Matching and converting scans was done in Cyclone 8.0 software.





Ryc. 3. Chmura punktów TSL pokolorowana RGB, reprezentująca ścianę frontową budynku studni

Fig. 3. TSL point cloud (RGB colorized), representing the front wall of the well building



Ryc. 4. Fragment muru z widocznymi ubytkami (po lewej) i zwornik (po prawej) nad wejściem do budynku studni. Korespondujące fragmenty zaznaczono na rycinie 3

Fig. 4. Part of a wall with visible defects (left) and jumper (right) over the entrance to the well building. Corresponding parts are marked in Figure 3

chmurę punktów TLS, obejmującą dziedziniec wewnętrzny fortu, przedstawia rycina 2. Ponadto na potrzeby realistycznych modeli 3D wykonano wysokorozdzielcze zdjęcia cyfrowe.

Obydwie chmury punktów są źródłem cennych informacji, nie tylko geometrycznych o skanowanym obiekcie. Na rysunku 1 dobrze widać cały układ architektoniczny fortu, wraz z otaczającymi fosami oraz sukcesję lasu. Rycina 3 przedstawia pokolorowaną RGB chmurę punktów reprezentującą ścianę frontową budynku studni. Możemy tutaj zauważyć, że gęstość punktów skaningu jest na tyle duża (skanowano z rozdzielczością 2 mm), że tworzą one jednolitą ciągłą powierzchnię zdjęcia. Jednocześnie przy tym poziomie szczegółowości możemy dokładnie, również w sensie metrycznym, ocenić stan muru i jego ubytki. Fakt ten jeszcze wydatniej zilustrowano na rycinie 4, przedstawiającej fragment muru wokół zwornika i nad wejściem do budynku studni. Na rysunku tym zilustrowano również metryczność chmury punktów skaningu laserowego.

Modelowanie

Trójwymiarowy model fortu Prusy wykonano na podstawie połączonej chmury punktów pochodzącej z lotniczego i naziemnego skaningu laserowego. Model wykonany został manualnie, z wykorzystaniem dostępnego oprogramowania oraz własnych rozwiązań

The level of accuracy attained for matched scans was within one centimeter for both horizontal and altitudinal components. The resulting TLS point cloud, showing the inner courtyard of the fort, is depicted in Figure 2. In addition, high-resolution digital photos were taken in order to achieve realistic 3D models.

Both point clouds contain valuable information not only on the geometric features of the scanned site. The entire architectural structure of the fort can be seen in Figure 1, along with the surrounding moat and encroaching forest. Figure 3 shows the colored RGB point cloud representing the front wall of the well building. The density of scanning points is large enough (scanned with a resolution of 2 mm) to form a single continuous surface image. At the same time, this level of detail makes it possible to accurately assess the condition of the wall and existing cavities. This is even more apparent in Figure 4, which shows parts of the wall around the keystone and above the entrance to the well building. This figure also illustrates the metric features of the laser scanning point clouds.

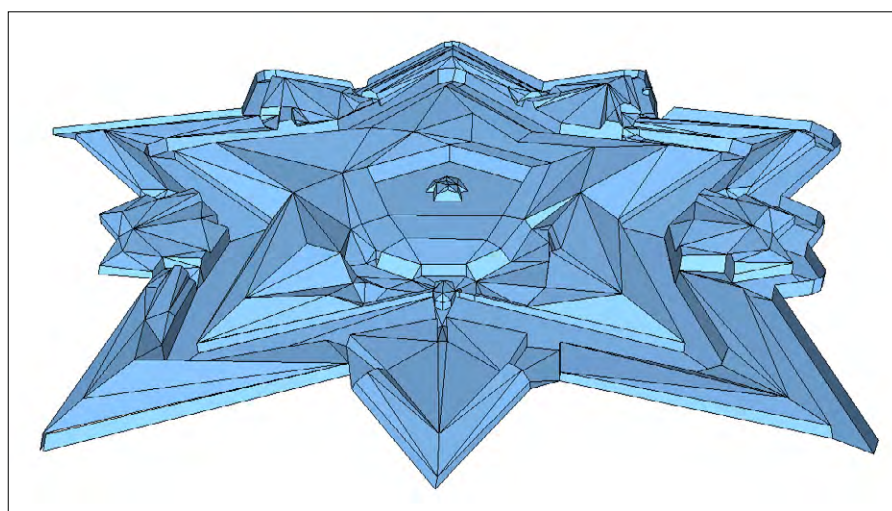
Modeling

The 3D model of the Prussian fortress was performed from the combined point clouds of airborne and terrestrial laser scanning data. The model was manually done using available software and the authors' own algorithms. In order to make it

easier to subsequently add texturing, all elements of the site were approximated by planes. The modeling process presented here was a pilot project on the use of laser scanning to model fortresses. For this reason, the generation of the site required intensive manual effort that would not be required for future applications. Currently, work is being done to automate this modeling process, drawing on previous work with the computerization of building 3D models [Jarzabek-Rychard 2012].

The modeling process can be divided into two main parts: geometric reconstruction and texturing. 3D geometric reconstruction was done with Cyclone 7.1 with the aim of approximating the 3D point clouds based on planes. The work begins with depicting several points lying on the same flat element, for example a wall structure. Using the results of

the algorithms developed for a rising plane [Jarzabek-Rychard, Borkowski 2010, Vosselman, Maas 2010] the data set is extended to all points on the selected surface. Then, the set is used to find the best fitting plane. This process of representing point groups by planes is sequentially repeated for all elements of the site. This makes it possible to model the edges as the intersection of neighboring planes, and then to cut or extend them to the plane surfaces. The final stage of geometric construction is to run a topological correction. Since each point in the 3D space is uniquely determined by the intersection of three planes, the vertices in which more planes align have several variants of location. The most common method of correction is to accept the position of a point that is determined by the three largest planes and to remove the remaining points so they intersect at the same



Ryc. 5. Model wektorowy 3D Fortu Prusy

Fig. 5. 3D vector model of the Prussian Fortress

algorytmicznych. Ze względu na łatwość późniejszego nakładania tekstur wszystkie elementy obiektu aproksymowane zostały płaszczyznami. Przedstawione w niniejszym artykule modelowanie było projektem pilotażowym, dotyczącym wykorzystania skaningu laserowego w modelowaniu fortów; dlatego rekonstrukcja obiektu wymagała dużego nakładu pracy manualnej. Nakład ten będzie w przyszłości w znacznym stopniu ograniczony – autorzy prowadzą prace mające na celu automatyzację procesu modelowania. Wykorzystane tutaj będzie doświadczenie autorów związane z automatyzacją procesu budowy modeli 3D [Jarząbek-Rychard 2012].

Proces budowy modelu 3D podzielić można na dwie główne części: rekonstrukcję geometrii i teksturowanie. Rekonstrukcja geometrii 3D przeprowadzana została w programie Cyclone 7.1. Jej celem była aproksymacja trójwymiarowej chmury punktów za pomocą płaszczyzn. Praca rozpoczyna się od wskazania kilku punktów leżących na tym samym płaskim elemencie, np. ścianie budowli. W wyniku działania algorytmu rosnących płaszczyzn [Jarząbek, Borkowski 2010, Vosselman, Mass 2010] zbiór danych zostaje rozszerzony o wszystkie punkty przedstawiające wybraną powierzchnię. Następnie w zbiór ten wpasowywana jest płaszczyzna najdokładniej przedstawiająca powierzchnię pokrytą punktami. Opisany proces reprezentacji grup

Ryc. 6. Model wektorowy po nałożeniu tekstur

Fig. 6. 3D vector model with texture



punktów za pomocą płaszczyzn powtarzany jest kolejno dla wszystkich elementów obiektu. Pozwala to na wymodelowanie jego krawędzi, będących wynikiem przecięcia sąsiadujących płaszczyzn, a następnie na odpowiednie docięcie bądź rozciągnięcie tych płaszczyzn. Ostatnim etapem rekonstrukcji geometrii jest kontrola topologii. Ponieważ punkt w przestrzeni trójwymiarowej jest jednoznacznie wyznaczony w wyniku przecięcia trzech płaszczyzn, wierzchołki, w których spotyka się większa ich liczba, mają kilka wariantów lokalizacji. Najczęstszym sposobem korekty topologii jest przyjęcie położenia punktu wyznaczonego przez trzy największe płaszczyzny i przesunięcie pozostałych tak, aby przecinały się w tym samym punkcie. Po zakończeniu rekonstrukcji obiektu model należy uzupełnić informacją o geometrii jego przyziemia. Szczególnie istotne znaczenie

ma to w przypadku modelowania z wykorzystaniem danych lotniczego skaningu laserowego, kiedy nie dysponujemy danymi dotyczącymi fasad skanowanych obiektów. W tym celu możemy posłużyć się dodatkowym źródłem danych, jakim jest NMT. Przecięcie zbudowanego obiektu z NMT pozwala na obliczenie przyziemia obiektu, tym samym kończąc etap budowy modelu wektorowego (ryc. 5).

W drugiej części modelowania na opracowany model nakładane są tekstury. Do tego zadania wykorzystywane są zdjęcia wykonane aparatem cyfrowym. Ze względu na specyfikę obiektów jakimi są forty dostęp do fotografowanych elementów jest często bardzo utrudniony. Z tego powodu fotografie wykonane są pod dużym kątem w stosunku do obiektu, a nierzadko spore fragmenty obiektu przesłonięte są przez roślinność. Aby wyeliminować ten defekt, opracowa-

point. After constructing the site, the created model should be enhanced with information on the baseline geometry. This is especially important when modeling with airborne laser scanning data, which has no data on the facades of scanned structures. For this reason, an additional source of data is used, the DTM (Digital Terrain Model). The intersection of the constructed site and the DTM allows for the calculation of the baseline, which is the final phase of constructing the vector model (Fig. 5).

The second stage of building the models is to overlay texture from digital photographs. Photographing fortress sites is often very difficult because of the inaccessibility of some elements. For this reason, images are taken at a large angle relative to the site, and it is not unusual for large areas of the site to be covered over by vegetation. To eliminate this defect an application was developed that changes the projected photos so that the overlaid texture most closely resembles an orthogonal projection. Moreover, after indicating the common points on the model and the photo, the program makes it possible to exactly match the modelled texture to the shape of the initially modelled plane. The algorithms that were developed make a large contribution to automating the texturing process. Depending on the desired needs of the modeling product, the adjusted texture can be edited at the final stage to remove unwanted objects, such as branches obstructing a building

facade. The final model after overlaying textures and setting the baseline with DTM is shown in Figure 6. The model in this form is presented on the geo-portal "Opole in the Internet".

Characteristics, accuracy and the level of detail in modeling the fort

The concept of 3D modeling presented in this work was previously applied to the process of modeling buildings. Although the results obtained are satisfactory, emphasis should be placed on some differences in the characteristics of these two types of modeling targets.

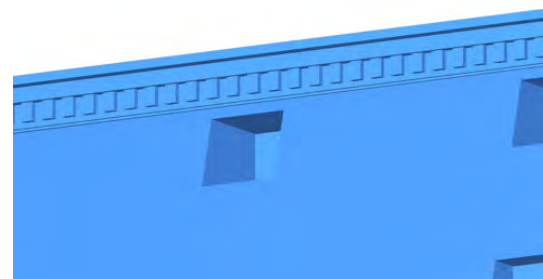
It is especially important that the majority of elements in the modeling process of fortresses are earthen structures that often have a very irregular shape. This can create a certain degree of ambiguity in the results and a need to extrapolate/generalize when making an approximation of the terrain with the aid of the intersecting planes. Another difference is related to the assignment of texture to the model. It is not always possible to use realistic digital images. There are difficulties involved, if there are problems with walled sections of a fortress, if the digital images obtained of earthen structures cover a large area that is visible only from an aerial view, or if the trees stand or vegetation covers over parts of the fort. These problems

do not affect the stone parts of a fortress, when it is possible to achieve a high degree of accuracy and detail in the modeling. This is illustrated in Figure 7, which shows a section of wall with casemates.

A question arises as to what degree of detail there should be in modeling this type of site. On one hand, this depends on the needs and expectations of the user, on the other hand there are absolutely no standards presently in use. The CityGML LoD level of detail was applied for the modeling of buildings (Tab. 1).

These standards could be applied to the modeling of military sites like defensive forts.

The metric accuracy of the generated 3D model in terms of the external coordinate system (georeferencing) can only be determined by direct surveying with geodesic methods. Such measurements were validated for other sites. In the work of [Borkowski, Józków 2012] an assessment was made of the accuracy of a model of the Silesian Duke's Castle in Brzeg. The evaluation was based on a comparison of the position of site points calculated with the



Ryc. 7. Fragment ściany modelu wektorowego Fortu Prusy

Fig. 7. Part of a wall of the vector model of the Prussian Fort (own elaboration)

no autorską aplikację pozwalającą na transformację rzutową zdjęcia, by nałożona tekstura jak najbardziej przypominała rzut ortogonalny. Ponadto, po wskazaniu punktów wspólnych na modelu oraz na zdjęciu, program umożliwia dokładne dopasowanie opracowywanej tekstury do kształtu wymodelowanych wcześniej płaszczyzn. Opracowane algorytmy przyczyniły się do znacznej automatyzacji procesu tekstuowania. W zależności od potrzeby przekształcone tekstury zostają na końcu poddane edycji w celu usunięcia niepożądanych obiektów, np. gałęzi przesłaniających fasadę. Ostateczny model po nałożeniu tekstur i posadowieniu na NMT przedstawiono na rycinie 6. W tej postaci model ten jest prezentowany na stronie geoportalu „Opolskie w Internecie”

Specyfika, dokładność i szczegółowość modelowania fortów

Wykorzystany w niniejszej pracy i przedstawiony w poprzednim rozdziale schemat budowy modelu 3D fortu został zaczerpnięty z procesu modelowania budynków. Pomimo tego, że sposób ten pozwala na osiągnięcie dobrych rezultatów, należy zwrócić uwagę na pewne różnice wynikające z charakterystyki tych dwóch typów obiektów.

Szczególnie istotny jest tutaj fakt, iż podczas rekonstrukcji fortu

w znacznej części modelowane są budowle ziemne, które w aktualnym stanie mają niejednokrotnie bardzo nieregularną strukturę. Powoduje to pewną niejednoznaczność i konieczność generalizacji podczas aproksymacji terenu za pomocą złożenia płaszczyzn. Drugą różnicą jest opracowanie tekstur. Nie zawsze możliwe jest wykonanie i nałożenie realistycznych zdjęć cyfrowych. O ile na ogół nie ma z tym problemu w części murowanej fortów, o tyle uzyskanie zdjęć cyfrowych budowli ziemnych obejmujących duże powierzchnie, widoczne jedynie „z lotu ptaka” oraz przedstawiające korony drzew i krzewów zarastających fort, jest trudne.

Wspomniane problemy nie dotyczą części murowanej fortów. Można tutaj osiągnąć wysoką dokładność i szczegółowość modelowania. Fakt ten ilustruje rycina 7, przedstawiająca fragment ściany kazamatów.

Powstaje jednak pytanie, jaka powinna być szczegółowość modelowania tego typu obiektów. Z jednej strony jest to uwarunkowane potrzebami i oczekiwaniami odbiorcy, z drugiej strony brak jest jakichkolwiek standardów w tym zakresie. W przypadku modelowania budynków przyjęło się stosować standardy CityGML LoD (*level of Detail*) (tab. 1).

Wydaje się, że standardy te można przenieść na modelowanie obiektów militarnych typu forty obronne.

Dokładność metryczną zbudowanego modelu 3D względem

zewnętrznego układu współrzędnych (georeferencja) można określić tylko na podstawie bezpośrednich pomiarów terenowych metodami geodezyjnymi. Tego typu pomiary autorzy wykonali w innych obiektach. W pracy [Borkowski, Jóźków 2012] wykonano ocenę dokładności dla modelu Zamku Książąt Śląskich w Brzegu. Polegała ona na porównaniu położenia punktów modelu z położeniem pomierzonym metodami geodezyjnymi. W wyniku tego stwierdzono, że średnia odległość przestrzenna pomiędzy modelem a rzeczywistym położeniem budynku kształtuje się na poziomie 14 cm. Ponieważ do modelowania Fortu Prusy zastosowano tę samą metodologię oraz takie same metody pozyskiwania danych, należy się spodziewać podobnej dokładności. Wydaje się, że taka dokładność jest wystarczająca dla możliwych zastosowań tego typu modeli w architekturze krajobrazu i pracach związanych z zagospodarowaniem przestrzeni.

Podsumowanie

Modelowanie 3D budynków jest obecnie aktualnym problemem badawczym i aplikacyjnym. W tym zakresie osiągnięte zostały znaczny postęp oraz wysoki poziom automatyzacji. Literatura przedmiotu jest również szeroka. Problem modelowania obiektów militarnych typu forty obronne jest jednak niemal nieobecny w literaturze.

Tabela 1. Standardy modelowania CityGML (opracowanie własne)

Table 1. CityGML modeling standards (own elaboration)

LoD	Kształt dachów Roof shape	Generalizacja Generalization [m]	Dokładność Accuracy [m]	Inne cechy Other features	Przykład Example
0	Brak budynków No 3D buildings	Najwyższa The highest	Niższa niż LoD1 Lower than LoD1	NMT z ortofotomapą DEM with orthophotomap	
1	Płaskie Flat	6x6x3	5/5	Widok blokowy Simple blocks	
2	Uproszczony Simplified	4x4x2	2/2	Brak szczegółów No detail	
3	Rzeczywisty Realistic	2x2x1	0.5/0.5	Rzeczywisty wygląd budynków Realistic appearance of buildings	
4	Rzeczywisty Realistic	Najniższa The lowest	0.2/0.2	Modelowane wnętrze Interior model	

W niniejszej pracy przedstawiono metodologię budowy modelu 3D na podstawie danych ALS i TLS w odniesieniu do Fortu Prusy w Nysie. Metodologia ta jest adaptacją podejścia stosowanego podczas modelowania 3D budynków. Również standardy CityGML mogą być, zdaniem autorów, przeniesione na modelowanie obiektów militarnych typu forty.

Zarówno technologia skaningu laserowego, jak i modelowanie 3D mają duży potencjał aplikacyjny w architekturze krajobrazu i modelowaniu przestrzeni, zwłaszcza w odniesieniu do fortyfikacji obronnych. Możliwości penetracyjne skaningu laserowego w odniesieniu do roślinności dają przewagę tej technologii w stosunku do innych metod. Ponadto, wykorzystując proste operacje na chmurze punktów, można łatwo zasymulować i zobrazować przekształcenia krajobrazu, np. usuwając punkty będące odbiciami od drzew, symuluje się efekt wycięcia drzew czy lasu.

Modele 3D, oprócz zastosowań związanych z kształtowaniem i zagospodarowaniem krajobrazu, stanowią wiarygodną georeferencję dla innych badań, związanych z fortyfikacjami, nie pomijając prac konserwatorskich samych fortów. Na podstawie realistycznych modeli 3D możliwa jest ocena zarówno jakościowa, jak i ilościowa reprezentowanych obiektów. Zaprezentowana technologia i metodologia wychodzą naprzeciw pojawiającym się coraz częściej

opiniom o wysokiej przydatności geometrii 3D w pracach związanych z planowaniem zagospodarowania przestrzeni.

Należy dodać, że kontynuowane są prace zarówno związane z automatyzacją procesu modelowania, jak i dalszym uszczegółowieniem modelu 3D o obiekty roślinne [Tymków, Borkowski 2010], tak aby był on jak najbardziej realistyczny.

Ryciny opracowali autorzy.

**Andrzej Borkowski,
Małgorzata Jarząbek-Rychard,
Przemysław Tymków, Grzegorz Józków**

Institut Geodezji i Geoinformatyki
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Literatura – Literature

1. Borkowski A., Józków G., 2012a. Accuracy Assessment of Building Models Created from Laser Scanning Data. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B3 No., Melbourne, Australia, 253–258.
2. Borkowski A., Józków G., 2012b. Ocena dokładności modelu 3D zbudowanego na podstawie danych skaningu laserowego na przykładzie Zamku Piastów Śląskich w Brzegu. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 23, Wrocław, 37–47.
3. Jarząbek-Rychard M., 2012. Automatyczna budowa wektorowych modeli 3D budynków na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 24, Warszawa, 99–109.

4. Jarząbek-Rychard M., Borkowski A., 2010. Porównanie Algorytmów RANSAC oraz rosnących płaszczyzn w procesie segmentacji danych skaningu laserowego. Archiwum Kartografii, Fotogrametrii i Teledetekcji, Vol. 21, 119–130.

5. Sheppard S.R.J., 2004. Laser-scanning for landscape planning: implications for policy and practice from end-user's perspective. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI – 8/W2, 237–246.

6. Tymków P., Borkowski A., 2010. Rekonstrukcja geometrii 3D krzewu na podstawie naziemnego skaningu laserowego. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 21, 405–414.

7. Vosselman G., Maas H-G., 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing, Dunbeath.

Podziękowanie

W niniejszej pracy wykorzystano, za zgodą Urzędu Marszałkowskiego w Opolu, dane lotniczego skaningu laserowego pozyskane w projekcie „Opolskie w Internecie – system informacji przestrzennej i portal informacyjno-promocyjny województwa opolskiego”. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Funduszu Rozwoju Regionalnego oraz środków budżetu województwa opolskiego w ramach działania 2.2 Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2007–2013.

model and the site points measured in the field. This research confirmed that the average spatial distance between the model and the actual position of the building was 14 cm. Since the Prussian Fort was modeled with the same methodology and on the same method of obtaining data, it is expected to achieve a comparable degree of accuracy. This level of accuracy would seem to be sufficient for possible applications of this type of modeling in landscape architecture and urban planning.

Conclusion

The 3D modeling of buildings is currently a very popular topic in research and application. In recent years tremendous progress has been made and a high level of automation has been achieved. There is also a wide range of literature on the subject. However, the problem of modeling military sites like fortresses has been absent thus far in the literature.

This paper presents the methodology of constructing a 3D model based on ALS and TLS data using the example of the Prussian Fortress in Nysa. This methodology is an adaptation of the approach to the 3D modeling of buildings. CityGML standards should also be applied to fortress modeling.

Both laser scanning technology and 3D modeling have great application potential in landscape architecture and spatial modeling, especially

in the case of fortresses. The ability of laser scanning to penetrate vegetation gives this method an advantage over other methods. By performing simple operations on a point cloud, changes to a landscape can easily be simulated and visualized. For example, by removing points that are reflections from trees, it is possible to simulate the effect of cutting down trees or forested areas.

In addition to applications related to landscape formation and management, 3D models can provide a solid foundation for other research on fortifications, including conservation works. With realistic 3D models it is possible to make both a qualitative and quantitative evaluation of a chosen site. The technology and methodology presented here gives support to the increasingly widely held opinion that 3D geometry in work related to spatial planning is highly useful.

Finally, it should be mentioned that continued work is needed on both the automation of the modeling process and enhancement of the model with sites of vegetation [Tymków, Borkowski 2010], so that the final results can be as realistic as possible.

**Andrzej Borkowski,
Małgorzata Jarząbek-Rychard,
Przemysław Tymków, Grzegorz Józków**

Institute of Geodesy and Geoinformatics
Wrocław University of Environmental and Life
Sciences

Acknowledgement

In this work airborne laser scanning data was used, with the approval of the Marshal's Office in Opole, from the project "Opole in the Internet – a spatial information system and information portal of the Opole province". The project was co-financed by the European Union Regional Development Fund and the Opole voivodeship budget funds under Measure 2.2 of the Regional Operational Programme 2007–2013 Opole.