

Luigi Barazzetti*, Luigia Binda**
Marco Scaioni***, Paolo Taranto**

Importance of the geometrical survey for structural analyses and design for intervention on c.h. buildings: application to a Mỹ Sơn temple in Vietnam

Znaczenie badań geometrycznych dla analiz konstrukcji i planowania interwencji w budynkach historycznych: zastosowanie w świątyni w Mỹ Sơn w Wietnamie

1. Introduction

The archaeological area of Mỹ Sơn, is situated in the Quảng Nam province (central Vietnam), approximately 30 km South-West from the city of Đà Nẵng and extends over almost 15 ha. The area is located in a small valley surrounded by a semi-circular chain of low mountains, upon which rises mount Hòn Châu. Between the 7th and 12th century, the Cham people, of Hindu religion, built more than seventy brick masonry monumental buildings in this area, thirty of which are still recognizable. The principal temple (*kalan*) was an isolated building only in rare cases, since a religious complex usually consisted of a sanctuary with several annexes. Almost eleven Hindu complexes (usually referred to as “groups”) are still recognizable in the Mỹ Sơn area (fig. 2).

The discovery of the site dates back to 1885 by a squad of French soldiers. In 1901 Henri Parmentier, chief architect of the EFEO (Ecole Française de l' Extreme Orient), classified every group with a letter (from A to N) and every building with a number [1].

During the war against US, in 1969, the buildings which had survived were severely bombed, and many were razed to the ground.

The authors' work was developed in the framework of a preservation project on group G, which involves the Politecnico di Milano, the Institute for Conservation of Monuments of Hanoi and UNESCO.

1. Wstęp

Obszar archeologiczny w Mỹ Sơn, położony jest w prowincji Quảng Nam w środkowym Wietnamie, około 30 km na południowy zachód od miasta Đà Nẵng i rozciąga się na niemal 15 ha. Obszar znajduje się w małej dolinie otoczonej półokrągłym łańcuchem niskich gór, nad którym unosi się góra Hòn Châu. Między VII a XII w. lud Cham, wyznawcy hinduizmu, wybudował tu ponad siedemdziesiąt monumentalnych ceglanych konstrukcji, z których trzydzieści można nadal zidentyfikować. Główna świątynia (*kalan*) rzadko była samodzielnym budynkiem, ponieważ kompleksy religijne składały się zwykle z sanktuarium z kilkoma aneksami. W rejonie Mỹ Sơn nadal rozpoznawalnych jest jedenaście kompleksów hinduistycznych, zwanych zwykle “grupami” (rys. 2).

Miejsce to zostało odkryte w 1885 r. przez oddział francuskich żołnierzy. W 1901 r. Henri Parmentier, główny architekt EFEO (Ecole Française de l' Extreme Orient – Francuska Szkoła Dalekiego Wschodu), sklasyfikował każdą grupę za pomocą liter (od A do N), zaś budynki za pomocą cyfr [1].

Podczas wojny z USA, w 1969 r. ocalałe budynki były bombardowane i wiele z nich zrównano z ziemią.

Praca autorów realizowana była w ramach projektu ochrony grupy G, w którym uczestniczą Politechnika w Mediolanie, Instytut Konserwacji Zabytków w Hanoi i UNESCO. Wybór grupy G był

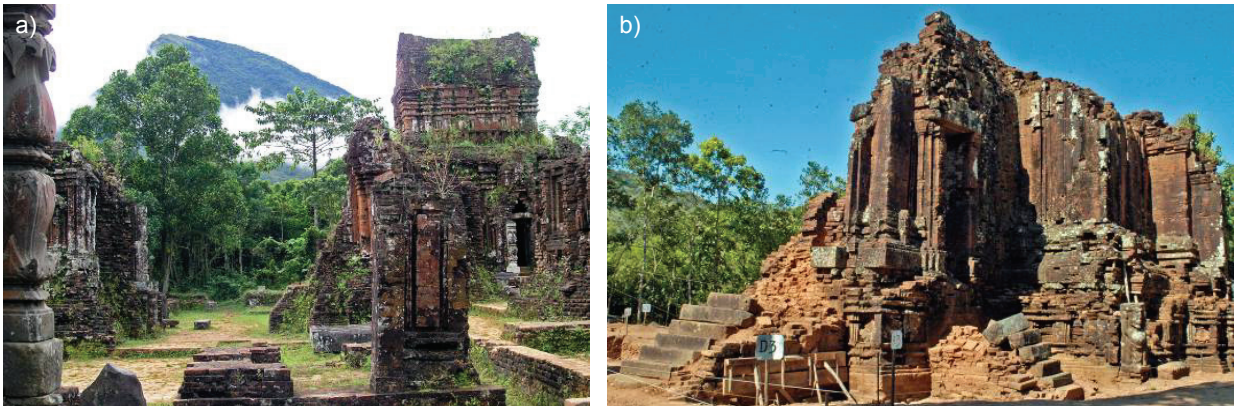


Fig. 1. a) View of groups C and D, Răng Mèo in the background, b) General view of the SW side of G1
 Rys. 1. a) Widok grup C i D, z Răng Mèo w tle, b) Ogólny widok G1 z południowego zachodu

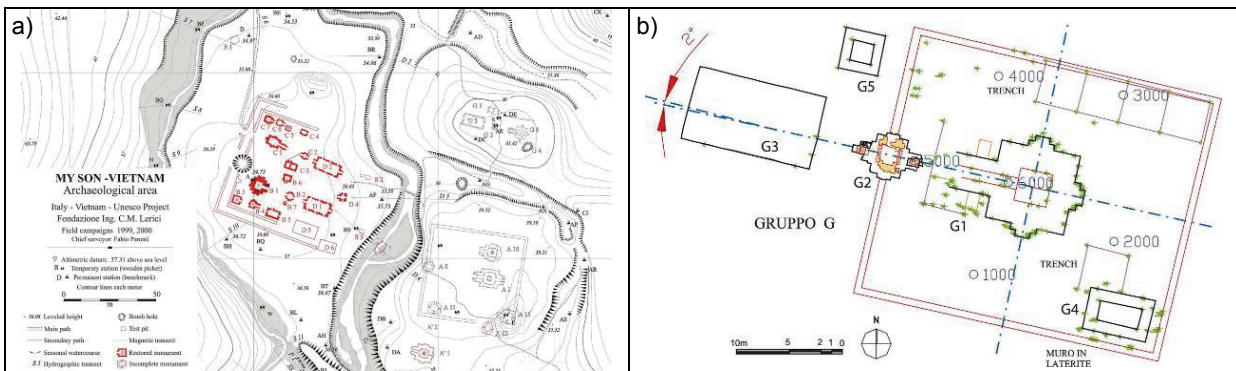


Fig. 2. a) The archaeological area of Mỹ Sơn, b) Orientation of the buildings belonging to Group G
 Rys. 2. a) Obszar archeologiczny w Mỹ Sơn, b) Orientacja budynków należących do grupy G

The choice of group G was determined by important factors for the purpose of archeological research: among the monumental groups of Mỹ Sơn, it shows peculiar and homogeneous characteristics, as for the architecture as well as for the decorations. Moreover, since it was built in the period of decadence of the Cham civilization, it was never restored [2].

A geometrical survey was carried out to allow the exact determination of the position and geometry of the group G buildings, providing both metric and qualitative information. The survey allowed the shape of the hill, as well as the orientation of the buildings to be properly defined: the Group is oriented mainly along the East-West axis, with the entrance at the East side (fig. 2b).

Nowadays the building is in the state of ruin, with a maximum elevation of only 6 m.

In order to prepare a design for the intervention, based on well defined principles of conservation [3], a careful geometrical survey was necessary, taking into account that most of the upper part of the building is constituted by ruins deposited after the failure of the roof. The use of a *terrestrial laser scanner* was a too much costly for the existing budget given by UNESCO, so only a low-cost photogrammetric approach was viable.

Furthermore the detailed survey allows to implement a mathematical model studying the behaviour

podyktowany czynnikami istotnymi dla badań archeologicznych: spośród monumentalnych grup w Mỹ Sơn, ta posiada bardzo specyficzne i jednolite cechy zarówno pod względem architektonicznym, jak i w dziedzinie dekoracji. Poza tym została zbudowana w okresie schyłku cywilizacji Cham i dlatego nie była nigdy odnawiana [2].

Badania geometryczne przeprowadzono, aby umożliwić dokładne ustalenie położenia i geometrii budynków grupy G dzięki informacjom metrycznym i jakościowym. Badanie pozwoliło na sprecyzowanie kształtu wzgórza oraz orientacji budynków: grupa znajdowała się głównie wokół osi wschód-zachód, z wejściem od strony wschodniej (rys. 2b).

Obecnie budynek jest zrujnowany, wznosi się nie wyżej niż na 6 m.

Aby opracować projekt interwencji zgodnie ze starannie określonymi zasadami konserwacji [3], konieczne było dokładne ustalenie poziomów geometrycznych, uwzględniające fakt, że większość górnej części budynku stanowią ruiny powstałe tam po zniszczeniu dachu. Użycie naziemnego skanera laserowego było o wiele za drogie zważywszy na budżet udostępniony przez UNESCO, możliwe więc było jedynie przeprowadzenie znacznie tańszych pomiarów fotogrametrycznych.

Poza tym dokładne badanie pozwala na wprowadzenie modeli matematycznych do analizy pracy

of the building before and after the intervention in order to check its safety level.

2. Group G description and importance of a detailed geometrical survey

Group G consists of five buildings (*kalan*, *maṇḍapa*, *gopura*, *pośa*, *kośagrha*) situated on a low conglomerate hill and built between the 11th and the 12th century (fig. 2). The main temple (*kalan* G1), which contained the divinity, is in the centre of the sacred area; the other buildings are annexes, mainly used to preserve the sacred texts and objects used during the religious rituals, as well as the founding memorial stone, and to gather the pilgrims.

An important characteristic of group G, in common with the other monumental groups of Mý Son, is the peculiar structure of the masonry, with bricks of different shape connected by very thin joints of organic material.

The main temple (14.50 m long and 9.00 m wide) (fig. 2) is characterized by the presence of four fundamental elements: the foundations, the base, the central body and the roof

The most important part of the temple is the cell (*garbhagrha*), where the divinity was guarded. The dimensions of the cell are 3.10×3.20 m; there are small niches, carved in the masonry, where the lamps were placed, since the cell has no windows. The surveys carried out in combination with the excavated foundation pits by the archeologists allowed to detect the foundation depth is limited to a reduced portion of soil, with a thickness close to that of the masonry.

Around 1900, during the research carried out by Parmentier, it was already in bad condition. At that time, almost no remains of the roofs of group G were left, with the exception of a small part in G1. The stability of several parts was endangered: the lintel of the main entrance was already broken, and one of its part had rotated and thus detached from the masonry [2].

The most relevant damage occurred during the Vietnam war. The whole part of the northern entrance and the only remaining connection between the cell and the vestibule collapsed. Moreover, the bombings severely jeopardized the overall stability of the structure.

The state of damage increased over the years because of the lack of regular maintenance, which is the main cause of the vegetation growth: several roots penetrated the masonry, worsening the crack pattern. The overall structural stability is mainly endangered by the lack of the roofs and by several

konstrukcji budynku przed i po interwencji w celu umożliwienia oceny bezpieczeństwa obiektu.

2. Opis grupy G i znaczenie szczegółowego badania geometrii

Grupa G składa się z pięciu budynków (*kalan*, *maṇḍapa*, *gopura*, *pośa*, *kośagrha*) położonych na niskim wzgórzu zlepieniowym i zbudowanych w XI i XII w. (rys. 2). Główna świątynia (*kalan* G1), w której umieszczone było bóstwo, jest w centrum świętego terenu; inne budynki to aneksy, używane głównie do przechowywania świętych tekstów i przedmiotów używanych do rytuałów religijnych i pamiątkowego kamienia węgielnego oraz stanowiące miejsce spotkań pielgrzymów.

Ważną cechą grupy G, podobnie jak innych zabytkowych grup w Mý Son, jest niezwykle sposób murowania: cegły o różnych kształtach połączone są bardzo cienką warstwą spoiwa z materiału organicznego.

Główna świątynia (14,50 m długości i 9,00 m szerokości) (rys. 2) składa się z czterech zasadniczych elementów: fundamentów, pod-stawy, korpusu głównego i dachu.

Najważniejsza część świątyni to komórka (*garbhagrha*), gdzie strzeżono bóstwa. Komórka ma wymiary 3,10×3,20 m; znajdują się tu małe nisze wykute w murze, gdzie stały lampy, ponieważ w komórce nie było okien. Przeprowadzone badania, połączone z odkrywkami fundamentów wykonanymi przez archeologów, pozwoliły na stwierdzenie, że głębokość fundamentu jest ograniczona warstwą gruntu, o miąższości podobnej do grubości murów.

Około 1900 r. podczas badań prowadzonych przez Parmentiera, grupa była już w złym stanie: już wówczas prawie nic nie pozostało z dachów, jedynie niewielki fragment w budynku G1. Stateczność niektórych części była zagrożona, nadproże głównego wejścia było już złamane, a jego część obróciła się, oddzielając się od muru [2].

Najgorsze zniszczenia nastąpiły podczas wojny wietnamskiej. Cała część wejścia północnego oraz jedyne zachowane połączenie między komórką a westybulą zawaliły się. Bombardowania zagraziły także ogólnej stateczności konstrukcji.

Zniszczenia postępowały w miarę upływu lat ze względu na brak stałej konserwacji, co spowodowało rozrost roślinności, korzenie przenikały do murów, pogarszając jeszcze stan zarysowań. Zagrożenie ogólnej stateczności konstrukcji wynika przede wszystkim z braku dachów i z kilku pęknięć przebiegających przez całą grubość ścian. Na górze

cracks, passing through the entire wall thickness. On top of the building and along the sides collapsed and/or unstable parts are present, which can cause along the time partial collapses.

It is worth to mention here the principles for the conservation of Group G adopted by the authors together with the Vietnamese experts and UNESCO and reported in [3]. They can be summarized as follows: (i) to preserve the remaining parts of the damaged G buildings as much as possible by repair and local consolidation, (ii) to reconstruct by sort of anastylosis the sections where stability or durability problems are present leaving intact the present profile of the ruins as much as possible, (iii) to maintain the original masonry adding a new binding only when necessary, (iv) to use new bricks, well distinguished from the old ones only in case of dangerous stability deficiency.

Therefore the project should demand that the collapsed or badly damaged parts should be carefully removed, piece after piece and rebuilt possibly using the recovered original bricks. So it was important to document the position of all these parts and their shape in order to restore them. Furthermore, only by detecting the position of the main cracks it was possible to decide how to carry out the intervention in different steps, in order to avoid further partial or total collapses. Being the shapes highly irregular, it was not possible either to carry out the geometrical survey by usual topographic tools as total stations, nor to adopt a Laser scanner survey; the work was carried out by a low cost photogrammetric approach which will be described in the following sections.

3. The 3-D reconstruction process

The 3-D reconstruction of Mỹ Sơn G1 Temple represents a fundamental task in the restoration design process. Two main techniques can be applied today to this aim, also integrated between them: *digital photogrammetry* and *terrestrial laser scanning* (TLS). A detailed comparison of their capabilities and drawbacks can be found in [4].

In the case discussed here, the selection fell on the so called *soft-copy photogrammetry* [5], which adopts consumer digital cameras and low-cost commercial softwares based on *mono-plotting*¹. This solution is low-cost, considering the whole hardware and software equipment (included PC and screen) can be purchased at less than 5,000 Euros. On the other hand, terrestrial laser scanners and related data processing softwares are much more expensive (at least 15-20 times the cost of photo-

budynku i wzdłuż jego boków leżą części, które odpadły lub straciły stateczność. W przyszłości mogą one powodować częściowe załamania konstrukcji.

Warto tu wspomnieć o zasadach konserwacji grupy G przyjętych przez autorów wspólnie z ekspertami wietnamskimi i UNESCO oraz opisanych w [3]. Można je scharakteryzować w następujący sposób: (i) zachować istniejące części uszkodzonych budynków G na tyle, na ile to możliwe, w oparciu o naprawy i miejscową konsolidację, (ii) zrekonstruować za pomocą anastylozy te sekcje, gdzie występują problemy ze statecznością lub trwałością, w miarę możliwości nie naruszając obecnego profilu ruin, (iii) zachować oryginalną strukturę murowaną, dodając nowe łącza tylko tam, gdzie to konieczne, (iv) używać nowych cegieł, dobrze odróżniających się od starych na wypadek braku stateczności.

Dlatego projekt musiał przewidywać ostrożne usunięcie zawalonych lub mocno uszkodzonych części element po elemencie oraz użycie do odbudowy, w miarę możliwości, odzyskanych oryginalnych cegieł. Ważne było udokumentowanie położenia wszystkich tych części oraz ich kształtu, aby można było je odtworzyć. Poza tym bez wykrycia położenia głównych rys nie byłoby możliwe zdecydowanie, jak przeprowadzić poszczególne kroki interwencji, aby uniknąć dalszych częściowych lub całościowych zawałów. Ponieważ kształty są bardzo nieregularne, nie można było przeprowadzić badań geometrii za pomocą zwykłych narzędzi topograficznych takich jak tachimetry elektroniczne, ani oprzeć się na pomiarach skanerem laserowym. W pracy posłużono się metodami fotogrametrycznymi o niskich kosztach, zgodnie z opisem w dalszej części artykułu.

3. Proces rekonstrukcji trójwymiarowej

Trójwymiarowa rekonstrukcja świątyni G1 w Mỹ Sơn stanowi fundamentalne zadanie w procesie projektowania restauracji. Obecnie w tym celu można zastosować dwie podstawowe techniki lub ich połączenie: *cyfrową fotogrametrię* lub *naziemne skanowanie laserowe* (TLS). Porównanie ich możliwości i wad można znaleźć w [4].

W omawianym przypadku wybrano *cyfrową fotogrametrię* [5], opartą na konsumpcyjnych kamerach cyfrowych i niedrogim oprogramowaniu komercyjnym stosującym *mono-plotting*¹. Rozwiązanie nie jest kosztowne: pełne wyposażenie w sprzęt i oprogramowanie (włącznie z komputerem i monitorem) można kupić za mniej niż 5.000 euro. Z drugiej strony, skanery laserowe i potrzebne do nich oprogramowanie do przetwarzania danych są o wiele droższe (kosztują co najmniej 15-20 razy

grammetry); furthermore, these are still cumbersome, resulting in problems in carrying them on the site of the survey.

But the analysis of the 3-D reconstruction process cannot be limited to instruments for data acquisition only, as often is thought. In fig. 3 the full pipeline of the 3-D reconstruction and modelling processes based on both photogrammetry and TLS is reported. The background colour of each task visually highlights its complexity. In particular, here the pipeline of photogrammetry is discussed and documented by the results obtained from the survey of G1 Temple. More details about the use of photogrammetry in this project are given in [6].

Data acquisition was performed by two Nikon cameras: a D100 (6 Mpx) with a 18 mm lens, and a D80 (10 Mpx) with a 24 mm lens. Calibration was carried out on-site before each data acquisition session by using Photomodeler 6 software (www.photomodeler.com) and the calibration sheet

więcej niż fotogrametria); w dodatku są one niewygodne i trudno jest przewieźć je na miejsce badania.

Ale analiza procesu rekonstrukcji trójwymiarowej nie może ograniczać się do instrumentów zbierania danych, jak często się myśli. Rysunek 3 pokazuje pełen przebieg trójwymiarowej rekonstrukcji i procesów modelowania w oparciu o fotogrametrię i TLS. Kolor tła w każdym zadaniu odzwierciedla poziom jego trudności. Tutaj omawiamy przebieg rekonstrukcji z użyciem fotogrametrii, udokumentowanej wynikami uzyskanymi w badaniu świątyni G1. Więcej danych na temat użycia fotogrametrii w tym projekcie można znaleźć w pracy [6].

Dane zbierano za pomocą dwóch kamer Nikon: D100 (6 Mpx) z soczewką 18 mm oraz D80 (10 Mpx) z soczewką 24 mm. Kalibrację prowadzono na miejscu przed każdą sesją zbierania danych za pomocą oprogramowania Photomodeler 6 (www.photomodeler.com) i karty kalibracji w ze-

	Sensor calibration	Data acquisition	Sensor orientation	3-D point-cloud reconstruction	Extraction of a vector model
Photogrammetry	Always required before a survey. Alternatively: self-calibration during image orientation, if there are enough images and targets	Accurate planning of the survey to control: image scale, block geometry, object coverage.	Automation is still a not consolidated task in commercial SWs, unless targeting is used. Otherwise, it requires manual measurements.	Automation by dense matching, if there is enough texture on the images.	Manually (directly from oriented images).
TLS	TLS to be periodically calibrated in laboratory. Calibration of the integrated camera as in photogrammetry.	TLS has the same requirements than photogrammetry, but less critical to be worked out.	Automatic if the object presents irregular surface. Otherwise, targets must be used.	Automatic (TLS directly acquires point-clouds).	Very involved, unless integrated images are used to texture the point-cloud.

Fig. 3. Pipelines for 3-D reconstruction based on photogrammetry and terrestrial laser scanning; background colours highlight the complexity of each task: easy (green), medium (yellow) difficult (red)

	Kalibracja czujnika	Pozyskiwanie danych	Orientacja czujnika	Rekonstrukcja trójwymiarowej chmury punktów	Generowanie modelu wektorowego
Fotogrametria	Zawsze konieczna przed badaniem. Alternatywa: samokalibracja podczas orientacji obrazów, jeśli jest dość dużo obrazów i celów	Staranne planowanie badania, aby kontrolować: skalę obrazu, geometrię brył, objęcie obiektu	Automatyzacja nadal nie jest zadaniem skonsolidowanym w komercyjnym sprzęcie, chyba że zastosuje się punktowanie. W przeciwnym razie konieczne są ręczne pomiary.	Automatyzacja za pomocą gęstego doboru, jeśli obrazy są o dość dużej teksturze.	Ręcznie (bezpośrednio ze zorientowanych obrazów)
TLS	TLS trzeba kalibrować od czasu do czasu w laboratorium. Kalibracja zintegrowanej kamery jak w przypadku fotogrametrii	TLS ma takie same wymogi jak fotogrametria, ale ich dopracowanie nie jest tak krytycznym zadaniem.	Automatyczna, o ile obiekt ma nieregularną powierzchnię, w przeciwnym razie trzeba zastosować punkty kontrolne	Automatyczna (TLS pobiera bezpośrednio chmurę punktów).	Bardzo pracochłonne, chyba że wygenerowane obrazy zostaną użyte do teksturowania chmury punktów.

Rys. 3. Przebieg rekonstrukcji trójwymiarowej w oparciu o fotogrametrię i naziemne skanowanie laserowe; kolory tła odpowiadają stopniowi trudności każdego zadania: łatwe (zielony), średnie (żółty) trudne (czerwony)

included in the package. The practical survey was accomplished by people not already experienced in such works, and consequently a simple block of images made up of a circular sequence around the building was designed. Furthermore, some coded targets were applied to the external walls to help *image orientation*, while total station measurements of some ground control points were already available. This geometry of the photogrammetric block gave out a good orientation of the images with both manual (by Photomodeler 6) and automatic procedures [7]. On the other hand, many details could not be imaged due to occlusions, or they were captured at a too low scale for reconstructing the fine details as well (e.g. the shape of bricks). Furthermore, *coded targets* were in part not visible in images, preventing the use of the automatic orientation function of Photomodeler 6, which would allow to save time and man work. Indeed, automatic orientation was performed by a proprietary scientific software developed by the SITECH group at Politecnico di Milano, which does not require any targets.

In order to suggest some guidelines to best practises for future applications, we reckon that a simple image block geometry with large overlaps between convergent images is a viable approach to deal with many situations [5, 8]. However, such a block needs to be completed by further images aiming at details and covering occluded areas. Today the most low-cost photogrammetric packages implement procedures for automatic image orientation based on *coded targets*, as mention above. This solution allows also people with a low photogrammetric background to perform this task in short time. Otherwise, the orientation can be carried out manually through the measurement of corresponding natural points on different images. Thus putting coded marks on the object to be surveyed is still strongly suggested, while in a few years marker-less procedures will become more operational at the practitioners' level.

While TLS directly acquires a dense point-cloud describing in a discrete way the surface of an object, photogrammetry requires to extract the 3-D information from the oriented images. This issue deserves to be further discussed here, because when photogrammetry and scanning are applied outside their native communities, it is very often misunderstood. Disregarding the applied tool, a survey might give rise two main 3-D products: *vector models* and/or *point-clouds*. The former describe the fundamental geometry of an object, which is fully exhaustive

stawie. Praktyczne badanie wykonywali ludzie, którzy nie mieli doświadczenia w tej dziedzinie i dlatego powstał prosty ciąg obrazów wykonanych w sekwencji przejścia dookoła budynku. Poza tym zastosowano kilka zakodowanych punktów w ścianach zewnętrznych, aby ułatwić *orientację obrazu*, podczas gdy były już dostępne pomiary niektórych punktów kontrolnych na ziemi, wykonane tachimetrem elektronicznym. Geometria serii fotogrametrycznej dała dobrą orientację obrazów zarówno dzięki procedurom ręcznym (Photomodeler 6), jak i automatycznym [7]. Z drugiej strony wielu danych nie udało się zobrazować, ponieważ były zasłonięte lub uchwycono je w zbyt małej skali, aby zrekonstruować także drobne detale (np. kształt cegieł). W dodatku zakodowane punkty nie były w pełni widoczne na obrazach, co nie pozwoliło na zastosowanie automatycznej funkcji orientacji Photomodeler 6, która umożliwiłaby oszczędność czasu i pracy. W istocie automatyczną orientację przeprowadzono dzięki oprogramowaniu specjalistycznemu stworzonemu przez grupę SITECH z Politechniki w Mediolanie, które nie wymaga żadnych zakodowanych punktów.

Aby przedstawić wytyczne najlepszych praktyk na przyszłość, sugerujemy, że prosta seria obrazów geometrii z dużymi częściami wspólnymi między przylegającymi obrazami to skuteczne podejście w wielu sytuacjach [5, 8]. Jednakże należy ją uzupełnić dalszymi obrazami pokazującymi detalami i zasłonięte obszary. Obecnie najtańsze pakiety fotogrametryczne realizują procedury automatycznej orientacji obrazów w oparciu o zakodowane punkty, jak już wspomniano. To rozwiązanie pozwala także osobom o niewielkiej wiedzy na temat fotogrametrii szybko wykonać to zadanie. W przeciwnym razie orientację można przeprowadzić ręcznie za pomocą pomiarów odpowiednich naturalnych punktów odniesienia na różnych obrazów. Dlatego nadal mocno zaleca się umieszczanie na badanym przedmiocie zakodowanych obrazów, choć za kilka lat dla praktyków lepsze będą rozwiązania oparte na mniejszej liczbie znaczników.

O ile TLS bezpośrednio uzyskuje gęstą chmurę punktów opisującą powierzchnię obiektu, w fotogrametrii informacje o trzech wymiarach należy wydobyc z zorientowanych obrazów. To zagadnienie warto tutaj omówić, ponieważ stosowanie fotogrametrii i skanowania w obcych krajach często prowadzi do nieporozumień. Niezależnie od używanego narzędzia, badanie może przynieść dwa podstawowe trójwymiarowe produkty: *model wektorowy* i/lub *chmurę punktów*. Model wektorów opisuje podstawową geometrię obiektu w sposób wyczerpujący, o ile obiekt ma regularny kształt, czyli da się go

when this has a regular shape, i.e. it can be approximated by known mathematical functions. The latter make use of a dense set of unorganized points (no relationships occur among them) that approximate the surface in a discrete way. While this approach is more suitable than the other one for artefacts presenting irregular shapes (e.g. archaeological ruins, sculptures, bas-reliefs and the like), point-clouds are not adequate for objects showing strong break-lines. Indeed, a point-cloud is made up of points coming from a sampling process that is not targeted to acquire specific points, like e.g. in the vector model construction. Secondly, in many applications for restoration and documentation of Cultural Heritage vector models are required, while point-clouds can be useful for 3-D visualization purposes and in Virtual Reality, to extract cross-sections (even though these require a post processing work [9]) or as intermediate step to other products (e.g. orthoimages). This consideration will be also supported by comments reported in Section 4 on the results obtained at Mý Son Temple.

Now, photogrammetry does not directly give either vector models or point-clouds, but these can be then derived from images. The former by manually measuring points describing a feature in at least two images (if mono-plotting is adopted), or on the stereoscopic model (if stereo-photogrammetry is used). The latter can be performed by using dense matching techniques like those implemented in the “Scanner” module of Photomodeler 6, or another commercial or scientific packages [10]. In fig. 4, a 3-D vector model and a point-cloud of the “G1” Temple are shown. On the other hand, TLS directly acquires a dense point-cloud, from which it is however very involved to extract a vector model. To do this, images are still needed for localization of break-lines, task that is frequently more complex to be performed in a 3-D environment than in im-

wyrazić znanymi wzorami matematycznymi. Chmura punktów operuje gęstym zbiorem niezorganizowanych punktów (między którymi nie występują relacje), które przedstawiają w przybliżeniu powierzchnię. To podejście jest lepsze od poprzedniego przy artefaktach o nieregularnych kształtach (np. ruiny archeologiczne, ruiny, płaskorzeźby i podobne obiekty), chmury punktów nie są odpowiednim narzędziem obrazowania konstrukcji o ostrych liniach przzerwania. W istocie chmura punktów powstaje z punktów z procesu próbkowania, którego celem nie jest uzyskanie konkretnych danych jak w modelu wektorów. Po drugie, w wielu przypadkach do restauracji i dokumentacji dziedzictwa kulturowego wymagane są modele wektorów, natomiast chmury punktów mogą być przydatne do trójwymiarowych wizualizacji i tworzenia rzeczywistości wirtualnej, aby wygenerować przekroje poprzeczne (pomimo iż wymaga to dużo pracy nad obróbką danych [9]) lub jako krok pośredni do innych wyników (np. ortofotomap). Te zastrzeżenia znajdują potwierdzenie w komentarzach zawartych w sekcji 4 i dotyczących wyników uzyskanych w świątyni Mý Son.

Fotogrametria nie tworzy bezpośrednio ani modeli wektorowych ani chmur punktów, ale można je wyprzewodzić z obrazów. Te pierwsze – ręcznie, mierząc punkty, które opisują daną cechę przynajmniej na dwóch obrazach (w przypadku techniki *mono-plotting*), albo na modelu stereo (w przypadku stereofotogrametrii). Chmury obrazów można natomiast wykonać za pomocą technik gęstego doboru, jak te stosowane w module “Skaner” programu Photomodeler 6, lub w innych pakietach komercyjnych lub naukowych [10]. Na rys. 4 pokazano trójwymiarowy model wektorów i chmurę punktów świątyni G1. Z drugiej strony TLS tworzy bezpośrednio gęstą chmurę punktów, z której można jednak wygenerować model wektorów. Potrzebne są do tego nadal obrazy, aby zlokalizować linie przzerwania, które to zadanie jest często o wiele trudniejsze na materiale trójwymiarowym niż

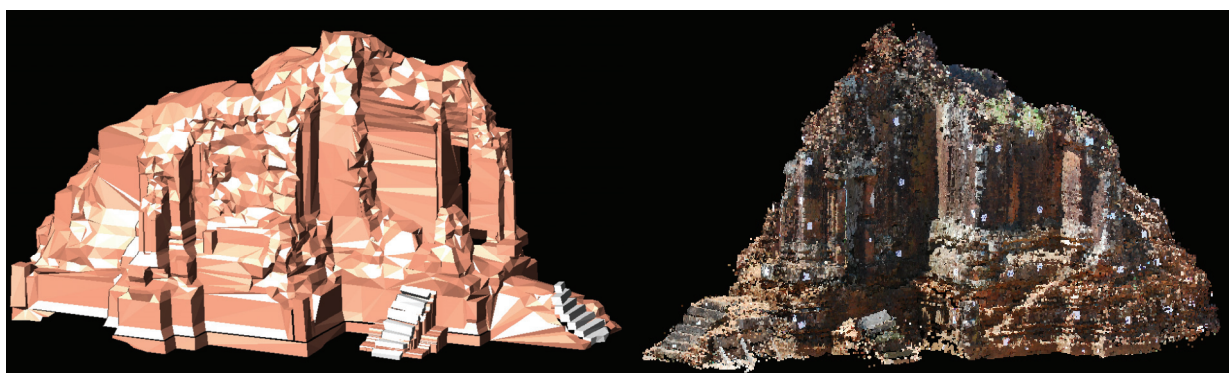


Fig. 4. On the left, a 3-D vector model of the My Son “G1” Temple; on the right a 3-D point-cloud of the same building. Both products were constructed through the photogrammetric process

Rys. 4. Po lewej trójwymiarowy model wektorów świątyni G1 w My Son; po prawej trójwymiarowa chmura punktów tego samego budynku. Oba wyniki wytworzono dzięki fotogrametrii

agery. In many cases, photogrammetry has to be preferred, also motivated by the cheaper cost. On the contrary, when an object features an irregular shape, using TLS is better.

The pipeline described so far might give out other products, in addition to these already discussed: photorealistic 3-D models, orthoimages, anaglyph images for 3-D vision. Traditional horizontal plans, prospects and cross-sections can be derived from vector models and point-clouds, if enough resolution was achieved.

Eventually, the 3-D reconstruction process results in products that are not directly useful for 3-D data management and analysis, because they are based on simple primitives and not on 3-D shapes. This important task can be achieved only after 3-D modelling, i.e. the construction of a solid model where the full object is modelled by 3-D geometric shapes connected among them. The availability of a 3-D model allows to perform 3-D structural analysis [11], to integrate or replace new portions of a building, to analyse deformations and the like. Unfortunately, the 3-D modelling process is still a time-consuming task, to be performed by experts in a graphic environment where the photogrammetric model has to be imported. Practically, an operator has to identify the elementary blocks, to model them with regular shapes, and to apply a proper texture to them.

4. Definition of the subsequent steps of intervention in order to avoid local collapses

In order to avert local collapses which may endanger the overall safety of the structure, a detailed programme of the intervention activities was elaborated.

Due to the necessity of clearly defining not only the content of the single intervention measures but also the details of their operative coordination and temporal succession, a precise planning had to be carried out.

According to the methodology and the general philosophy applied to date, the intervention measures are aimed at the conservation and stabilization of the structure with as few alterations as possible and with the maximum possible preservation of the original morphologic and material features of the artefact.

For the definition of the regions of the structure on which intervention has to be performed, reference was made to the vast evidence of survey activities (3D-model, photographic documentation, past visual inspections, on field reports). Accordingly, graphic documentation, based on plans and three-dimensional

na obrazach. W wielu przypadkach fotogrametria jest preferowana ze względu na niższe koszty. Jednakże w odniesieniu do obiektów o nieregularnych kształtach lepszą metodą jest TLS.

Za pomocą opisanego powyżej procesu można używać także inne produkty, nie tylko te dotąd omówione, ale także: fotorealistyczne modele trójwymiarowe, ortofotomapy, trójwymiarowe anaglify. Tradycyjne plany horyzontalne, perspektywy i przekroje poprzeczne można wyprowadzić z modeli wektorowych i chmur punktów przy odpowiedniej rozdzielczości.

I wreszcie proces rekonstrukcji trójwymiarowej przynosi efekty, które nie są bezpośrednio przydatne w zarządzaniu i analizie danych, ponieważ oparte są na prostych funkcjach pierwotnych, a nie na trójwymiarowych kształtach. To ważne zadanie można osiągnąć tylko w modelowaniu trójwymiarowym, np. stworzenie wiarygodnego modelu, jeśli cały obiekt jest modelowany powiązany z sobą trójwymiarowymi kształtami. Dostępność modelu trójwymiarowego otwiera drogę do trójwymiarowej analizy konstrukcji [11], integracji lub wymiany nowych części budynku, analizy odkształceń itp. Niestety, proces modelowania trójwymiarowego zajmuje wciąż bardzo dużo czasu, musi być prowadzony przez ekspertów w dziedzinie środowiska graficznego, do którego importuje się model. W praktyce operator musi zidentyfikować podstawowe elementy, wymodelować je regularnymi kształtami i zastosować właściwą teksturę.

4. Ustalenie kolejnych kroków interwencji dla uniknięcia lokalnych zawaleń

Aby nie dopuścić do lokalnych zawaleń, które mogłyby zagrozić ogólnemu bezpieczeństwu konstrukcji, opracowano staranny plan interwencji.

Ponieważ konieczne było jasne zdefiniowanie nie tylko treści poszczególnych środków interwencji, ale także szczegółów ich koordynacji i następstwa czasowego. Potrzebne było precyzyjne rozplanowanie, co należy zrobić.

Według dotąd stosowanych metod i filozofii działań, celem środków interwencyjnych jest konserwacja i stabilizacja konstrukcji przy ograniczeniu zmian do minimum oraz zachowaniu pierwotnej morfologii i cech materialnych obiektu na tyle, na ile to możliwe.

Do zdefiniowania tych obszarów konstrukcji, które wymagały interwencji przygotowano materiał referencyjny w formie szerokiej dokumentacji działań badawczych (trójwymiarowy model, dokumentacja fotograficzna, dawne badania wizualne i raporty z badań na miejscu). Opracowano także dokumentację graficzną opartą na planach

views at different scale levels, indicating the points of interventions was produced: every single zone of intervention was identified by a letter.

For better understanding by the working teams, the interventions in each zone were described by templates [12]. On each template, graphic and photographic documentation was provided to identify the point of intervention, and the typology of conservation activity. Two explanatory sections are present: the first one provides details on the current damage and problems of the considered region/part while the second one points out the extent, features and operative details of the single intervention measure to be performed.

i obrazach trójwymiarowych w różnej skali, pokazując punkty interwencji: każdy obszar interwencji zidentyfikowano w najmniejszych szczegółach.

Aby zespoły robocze osiągnęły lepsze zrozumienie, interwencje w każdym obszarze opisano według szablonów [12]. W każdym szablonie zawarto graficzną i fotograficzną dokumentację, aby zidentyfikować punkty interwencji i typologię działań konserwacyjnych. Pokazane były dwa przykładowe przekroje: pierwszy pokazuje dane aktualnych szkód i problemy w omawianych obszarze/elemente, natomiast drugi pokazuje zakres, cechy i szczegóły konkretnego środka interwencyjnego, który należy podjąć.

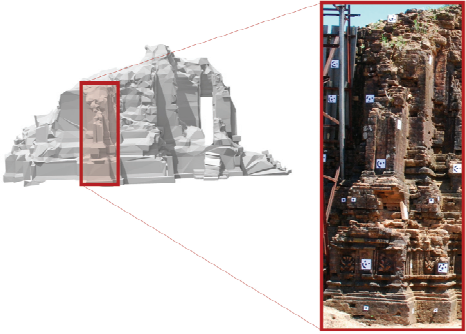


North side Pillar strip – Intervention E <i>Pas północnej strony kolumny – Interwencja E</i>	
	
Intervention / <i>Interwencja</i>	Description / <i>Opis</i>
<p><u>Before</u></p> <p><i>Przed</i></p> 	<p><u>Present condition</u></p> <p><i>Obecny stan</i></p> <p>The north side pillar strip of the main body of the temple exhibits large morphological defects which endanger the local and global stability of the structure. The main problem is connected to the large void and disruption of the wall texture at the base of the element. The upper part of the elements is affected by detachments and diffused damage.</p> <p>On the upper part a vegetal root caused detachment of a brick block.</p> <p><i>Pas północnej strony kolumny głównego korpusu świątyni cechuje się dużymi uszkodzeniami morfologicznymi, które zagrażają miejscowej i całościowej stateczności konstrukcji. Główny problem wiąże się z dużą dziurą i zerwaniem faktury ściany i podstawy elementu. Górna część elementu jest częściowo oberwana i ogólnie zniszczona.</i></p> <p><i>W górnej części korzeń roślinny spowodował oberwanie bloku cegieł.</i></p>
<p><u>After</u></p> <p><i>Po</i></p> 	<p><u>Features of intervention</u></p> <p><i>Cechy interwencji</i></p> <p>The intervention has to be focused on the recovery of the structural function of the element by means of the reconstruction of its base. This operation entails the filling of the displayed lacuna and the consolidation of the surrounding wall area. Removal of the above-mentioned vegetal remains, cleaning and reassembling of the upper part of the element has to be carried out.</p> <p>Intervention has to proceed upward.</p> <p><i>Interwencja musi się koncentrować na odzyskaniu funkcji konstrukcyjnej elementu dzięki rekonstrukcji jego podstawy. Operacja wiąże się z wypełnieniem widocznej dziury i konsolidacją otaczającego obszaru ścian.</i></p> <p><i>Konieczne jest usunięcie wspomnianych resztek roślinnych, oczyszczenie i ponowne połączenie fragmentów w górnej części elementu.</i></p> <p><i>Interwencja musi przebiegać z dołu ku górze.</i></p>

Fig. 5. Example of a template regarding intervention on an external pilaster
 Rys. 5. Przykładowy szablon dotyczący interwencji na zewnętrznym filarze

A schedule of the interventions is forecast with the aim of helping coordination and optimization of the working activity and to avoid interferences and wrong practices which may endanger both the safety of workers and the stability of the monument.

In the following an example of the above mentioned templates is illustrated (fig. 5).

5. Conclusions

The paper describes an application of low-cost photogrammetric techniques for the surveying and 3-D reconstruction of the temple G1 in Mỹ Sơn (Central Vietnam). This experience has represented a pilot case study to be possibly extended as a method for the survey of the other Cham monuments in Mỹ Sơn or in Vietnam. The aim of the project is 3-D reconstruction for documentation and for the design of future conservation works.

Indeed, the geometrical survey carried out on-site allowed to have a 3-D reconstruction of the details of the building with an appropriate resolution. The 3-D model obtained and all the 2-D sections have been used to define the design project for the intervention in all the possible phases, so that all the steps and the details for the restoration could be clearly stated before the real intervention will be started. Furthermore being the knowledge of the geometry and of the crack pattern and damages so deep, it will also be possible to state even after the works have started necessary modifications to the project, due to finding of unexplored parts inside the walls.

In addition, the adopted approach can be considered economically sustainable, operationally viable and not requiring too high expertise in photogrammetry. Exception is represented for the data acquisition design and for setting up projects in commercial softwares, where the contribute of photogrammetrists is relevant. On the other hand, the full reconstruction process might require an intensive man work to be carried out, especially for the orientation of images and for the reconstruction of the 3-D vector model. While the former task is already automatic in scientific softwares (e.g. [7]) and will be so in a few years in commercial packages as well, the latter is expected to be still an interactive process for several forthcoming years. Other products, like point-clouds and orthoimages can be obtained in a more automatic way, if a suitable image resolution and texture were achieved during data acquisition.

Harmonogram interwencji to prognoza, której celem jest ułatwienie koordynacji i optymalizacji robót, aby uniknąć zakłóceń i niewłaściwych praktyk, które mogłyby zagrozić bezpieczeństwu pracowników i stateczności zabytku.

Przedstawiony przykład obrazuje zamieszczony powyżej szablon (rys. 5).

5. Wnioski

Artykuł opisuje zastosowanie niskokosztowych technik fotogrametrycznych do badania i trójwymiarowej rekonstrukcji świątyni G1 w Mỹ Sơn (Środkowy Wietnam). To doświadczenie stanowiło przypadek pilotażowy dla potencjalnego zastosowania tej metody do badania innych zabytków ludu Cham w Mỹ Sơn lub w Wietnamie. Celem projektu jest trójwymiarowa rekonstrukcja do dokumentacji i projektowania przyszłych prac konserwatorskich.

W rzeczywistości badanie geometrii na miejscu pozwala na trójwymiarową rekonstrukcję detali budynku w odpowiedniej rozdzielczości. Uzyskany model trójwymiarowy i wszystkie przekroje dwuwymiarowe są używane do określenia projektu interwencji we wszystkich możliwych fazach, aby wszystkie kroki i szczegóły restauracji były jasno opisane przed rozpoczęciem faktycznej interwencji. Poza tym wiedza o geometrii i obszarze spękań i uszkodzeń pozwoli także po rozpoczęciu prac stwierdzić, jakie zmiany projektu są konieczne dzięki odnalezieniu niezbadanych elementów wewnątrz ścian.

Ponadto zastosowane podejście należy uznać za uzasadnione ekonomicznie, skuteczne w działaniu i niewymagające zbyt dużego doświadczenia w fotogrametrii. Wyjątkiem jest wzorzec pozyskiwania danych i przygotowywanie projektów za pomocą komercyjnego oprogramowania, gdzie istotny jest wkład specjalistów w dziedzinie fotogrametrii. Z drugiej strony pełen proces rekonstrukcji może wymagać ciężkiej pracy, zwłaszcza w kontekście orientacji obrazów i rekonstrukcji trójwymiarowego modelu wektorowego. O ile to pierwsze zadanie jest zautomatyzowane w oprogramowaniu naukowym (np. [7]), a w ciągu paru lat nastąpi także automatyzacja w pakietach komercyjnych, to drugie będzie prawdopodobnie procesem interaktywnym jeszcze przez parę lat. Inne produkty, takie jak chmury punktów i ortofotomapy można uzyskać automatycznie, jeśli na etapie zbierania danych osiągnie się odpowiednią rozdzielczość i teksturę.

References • Literatura

- [1] Parmentier H., *Inventaire descriptif des monuments Ćams de l'Annam*, Vol. 2, E. Leroux, Paris (France) 1909-1918.
- [2] Parmentier H., *L'art architectural hindou dans l'Inde et en Extrême-Orient*, Van Oest les éditions d'art et d'histoire, Paris (France) 1948.
- [3] Binda L., Condoleo P., Cucarzi M., Lê Thành V., Pichard P., Hoàng Đạo K., *Preservation of Temples in Mỹ Sơn (Vietnam)*, Proceedings of Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC), New Delhi (India) 6-8/11/2006, pp. 1479-1486.
- [4] Grussenmeyer P., Landes T., Voegtli T., Ringle K., *Comparison Methods of Terrestrial Laser Scanning, Photogrammetry and Tacheometry Data for Recording of Cultural Heritage Buildings*, Proc. of XXI ISPRS Congress, 3-11 July 2008, Beijing, China, IAPRSSIS Vol. 37(B5), pp. 213-218.
- [5] Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., *Close range Photogrammetry*, Whittles Publishing, Caithness, Scotland (UK) 2006.
- [6] Barazzetti L., Binda L., Cucchi M., Scaioni M., Taranto P., *Photogrammetric Reconstruction of the Mỹ Sơn Temple G1 in Vietnam*, Proc. of 3D-ARCH 2009, 25-28 Feb, Trento, Italy, Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRSSIS) 38(5/W1), 8 pp., on CD-ROM.
- [7] Barazzetti L., Scaioni M., *Automatic orientation of image sequences for 3-D object reconstruction: first results of a method integrating photogrammetric and computer vision algorithms*, Proc. of 3D-ARCH 2009, 25-28 Feb, Trento, Italy, IAPRSSIS 38(5/W1), 8 pp., on CD-ROM.
- [8] Kraus K., *Photogrammetry*, Vol. 2, Dümmler Verlag, Bonn (Germany) 1997.
- [9] Bienert A., *Vectorization, Edge Preserving Smoothing and Dimensioning of Profiles in Laser Scanner Point Clouds*, Proc. of XXI ISPRS Congress, 3-11 July 2008, Beijing, China, IAPRSSIS Vol. 37(B5), pp. 213-218.
- [10] Barazzetti L., Remondino, F., Scaioni M., *Combined use of Photogrammetric and Computer Vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects*, Proc. of Int. Conf. "Videometrics, Range Imaging, and Applications X", 2-3 Aug. 2009, San Diego (CA, USA), SPIE Vol. 7447, pp. 12, on CD-ROM.
- [11] Taliercio A., Binda L., *The Basilica of San Vitale in Ravenna: Investigation on the current structural faults and their mid-term evolution*, Journal of Cultural Heritage, 2007, No. 8, pp. 99-118.
- [12] Binda L., Taranto P., Condoleo P., *Difficulties in the design for conservation of archaeological remains: the G1 temple in Mỹ Sơn*, 11th Int. Conf. on Structural Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, STREMAH 2009, 22-24 July 2009, Tallinn, Estonia, Section 1, pp. 3-14.

* Politecnico di Milano, Dept. DIIAR

** Politecnico di Milano, DIS

*** Politecnico di Milano, Dept. BEST/SITECH

* Politecnico di Milano, Dept. DIIAR

** Politecnico di Milano, DIS

*** Politecnico di Milano, Dept. BEST/SITECH

¹ *Mono-plotting* is opposite to *stereo-plotting*, which requires a device for stereo vision that would increase hardware cost.

¹ *Mono-plotting* stanowi przeciwieństwo *stereo-plotting*, do którego potrzebne jest urządzenie do obrazowania stereo, które zwiększyłoby koszt sprzętu.

Abstract

The geometrical survey of the structure is of great importance in the case of historic buildings, being the base for the interpretation of structural damages, for the structural modelling and for the design of the intervention for preservation of the building.

Streszczenie

Geometryczne badanie konstrukcji jest bardzo ważne w przypadku historycznych budynków, bowiem stanowi podstawę interpretacji uszkodzeń konstrukcyjnych, modelowania strukturalnego i planowania interwencji dla ochrony budynku.

The Mỹ Sơn archaeological site which was declared world patrimony by UNESCO in 1999 comprehends several ancient Hindu temples. The temple G1 addressed in this work represents a pilot case to establish a workflow for both documentation and conservation purposes. Both aims required as primary need the 3-D digital reconstruction of the object. Due to the impossibility of using a terrestrial laser scanning for economic and environmental problems, a low-cost photogrammetric solution was adopted to carry out data acquisition, image orientation and 3-D reconstruction of the temple. After discussing the problems related to the use of low-cost photogrammetry for the creation of 3-D vector models and point-clouds, the paper will also shows how the survey was used to decide the sequence of interventions for the preservation of the temple G1.

Teren badań archeologicznych w Mỹ Sơn, uznany przez UNESCO w 1999 r. za część światowego dziedzictwa, składa się z kilku starożytnych świątyń hinduistycznych. Świątynia G1, o której mówi ten artykuł, to przypadek pilotażowy, który ma ustalić przebieg zarówno dokumentacji, jak i konserwacji. Do obu tych celów potrzebne były przede wszystkim trójwymiarowe cyfrowe rekonstrukcje obiektu. Ponieważ ze względu na problemy ekonomiczne i środowiskowe nie można stosować naziemnych skanerów laserowych, przyjęto niskokosztowe rozwiązanie fotogrametryczne, aby uzyskać dane, zorientować obrazy i przygotować trójwymiarową rekonstrukcję świątyni. Po omówieniu problemów związanych ze stosowaniem niskokosztowej fotogrametrii do tworzenia trójwymiarowych modeli wektorowych i chmur punktów, artykuł przedstawia także, jak użyto badań geometrycznych w procesie decydowania o interwencjach ochronnych w świątyni G1.