

**ANALIZA DOKŁADNOŚCI KSZTAŁTU MODELU ELEMENTU
PRZEMYSŁOWEGO POZYSKANEGO ZE ZDJĘĆ CYFROWYCH
I SKANINGU NAZIEMNEGO**

**ANALYSIS OF ACCURACY OF SHAPE OF INDUSTRIAL ELEMENT MODEL
OBTAINED FROM DIGITAL IMAGES AND TERRESTRIAL LASER SCANNING**

Dorota Zawieska¹, Anna Klimkowska²

¹ Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i SIP, Wydział Geodezji i Kartografii, PW

² Wydział Geodezji i Kartografii PW, studentka studiów magisterskich specjalności FiT

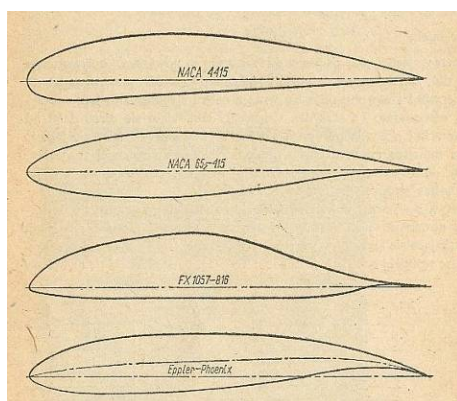
SŁOWA KLUCZOWE: model przestrzenny 3D, automatyczne dopasowanie obrazów, precyzyjny skaner przemysłowy, model projektowy

STRESZCZENIE: Celem niniejszego referatu jest porównanie dokładności odtworzenia kształtu elementu łopaty wirnika nośnego śmigłowca pozyskanego ze zdjęć cyfrowych i skaningu naziemnego. Zdjęcia wykonano aparatem cyfrowym CANON EOS20D. Automatyczne dopasowanie zdjęć (*matching*), wykonano przy wykorzystaniu programu PhotoModeler Scanner. Do pomiaru badanej powierzchni metodą skaningu naziemnego, wykorzystano precyzyjny skaner optyczny ATOS II firmy GOM, który jest stosowany w pomiarach przemysłowych. Porównanie wygenerowanych modeli 3D, z modelem projektowym obiektu, wykonano w programie NX Siemens, będącym zaawansowanym programem typu CAD/CAM/CAE. Dopasowanie modeli wykonano na całym obiekcie, na wybranych profilach badanej łopaty wirnika. Ocenę dokładności otrzymano na podstawie pomiaru odchyłek na 148 punktach, dla których policzona została wartość średnia. Wymagana dokładność, określona przez specjalistów, odtworzenia kształtu tego rodzaju elementu konstrukcyjnego śmigłowca wynosi 0.1 mm. W prezentowanym eksperymencie otrzymano dla modelu fotogrametrycznego 0.42 mm, dla modelu ze skaningu laserowego 0.22 mm.

1. WPROWADZENIE

Fotogrametryczne metody pomiaru są nowoczesnym, bezkontaktowym narzędziem pomiaru, kontroli i monitoringu o bardzo szerokim spektrum zastosowań. Obecnie dostępne fotogrametryczne systemy pomiarowe bliskiego zasięgu opierają się na technice cyfrowej i służą do rekonstrukcji powierzchni obiektu lub opracowań punktowych. Charakterystycznymi cechami tych systemów są uniwersalność zastosowań, wysoka dokładność i wiarygodność opracowania oraz zaawansowany stopień automatyzacji pomiarów. Głównym celem pomiarów inżynierskich jest badanie stanu obiektu, stanowiące podstawę diagnozy technicznej, określającej dopuszczalność do eksploatacji lub warunki jej przedłużenia. Przemysł lotniczy jest dziedziną, gdzie fotogrametria bliskiego zasięgu znalazła szerokie zastosowanie. Wiele fabryk wykorzystuje fotogrametryczne systemy pomiarowe w produkcji i kontroli jakości elementów lotniczych. (Amini, 2008).

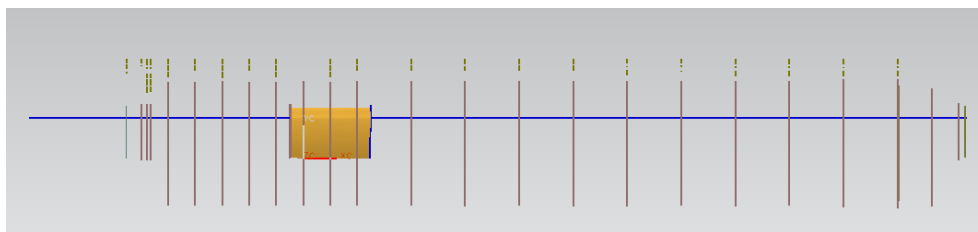
Element przemysłowy wykorzystany w przeprowadzonych badaniach jest to fragmentem wirnika nośnego śmigłowca. O właściwościach aerodynamicznych skrzydła w przeważającym stopniu decyduje kształt profilu (Rys. 1). Do zadań konstruktora należy dobór najodpowiedniejszego profilu skrzydła do projektowanego płatowca (Witkowski, 1986).



Rys. 1. Przykłady profili skrzydła

Doskonałość skrzydła jest wielkością stałą, zależną od: kształtu profilu skrzydła, obrysu skrzydła, ustawienia profilu skrzydła względem kierunku lotu.

Model projektowy skrzydła wykonany został w programie NX firmy SIEMENS (SIEMENS, 2010). Z rysunków technicznych przeniesiono do programu odpowiednie parametry (Pacana, 2005). Dzięki temu powstały przekroje, profile lotnicze na których została rozpięta powierzchnia (Rys. 2). Kolejnym krokiem było wycięcie fragmentu obiektu odpowiadającego przedmiotowi opracowania.

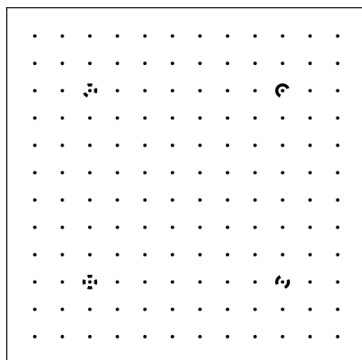


Rys. 2. Szkielet całej łopaty z pozostawionym opracowywanym fragmentem

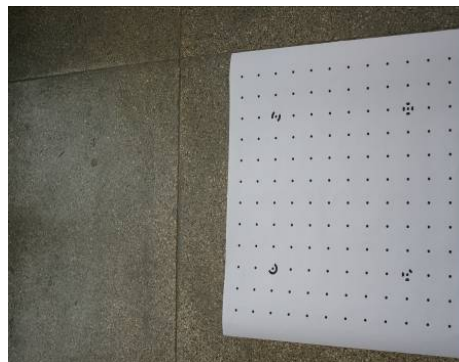
2. REJESTRACJA I OPRACOWANIE DANYCH Z OBRAZÓW CYFROWYCH

Do uzyskania danych cyfrowych wykorzystano aparat CANON EOS20D z obiektywem 28 mm, o rozdzielczości matrycy 3456×2304 i 0.0064 mm wielkości piksela, natomiast oprogramowanie, w którym wykonano model 3D jest programem kanadyjskiej firmy EOS – PhotoModeler (PhotoModeler, 2010). Przed wykonaniem zdjęć wykonano kalibrację aparatu. W tym celu skorzystano z pola testowego proponowanego przez oprogramowanie (Rys. 3). Zdjęcia zbieżne pola testowego wykonano z odległości około 1 m, w trzech położeniach

i czterech kierunkach. Pierwsza pozycja aparatu to pozycja horyzontalna, w drugim położeniu aparat obrócony został w prawo o 90° i kolejno w lewo, o 90° w stosunku do pozycji wyjściowej. Przykład obrazu do kalibracji aparatu przedstawia rysunek 4.



Rys. 3. Pole testowe



Rys. 4. Przykład zdjęcia pola testowego

Ostatecznie, wykonano 12 zdjęć, które wprowadzono do programu, w celu wykonania automatycznego pomiaru pola testowego i kalibracji aparatu. Wyniki przedstawiono tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki kalibracji aparatu Canon EOS 20D z obiektywem 28 mm

Liczba zdjęć	m_o [mm]	x_o [mm]	y_o [mm]	C_k [mm]	Seria zdjęć
12	0.003	11.240556	7.686655	28.715912	1

W następnym etapie stworzono punkty, dzięki którym był możliwy automatyczny pomiar obiektu. W tym celu wygenerowano dwa rodzaje punktów: punkty kodowe RAD i nie-kodowe punkty RAD (Rys. 5).



Rys. 5. Kodowe (z lewej) i nie-kodowe (z prawej) punkty RAD

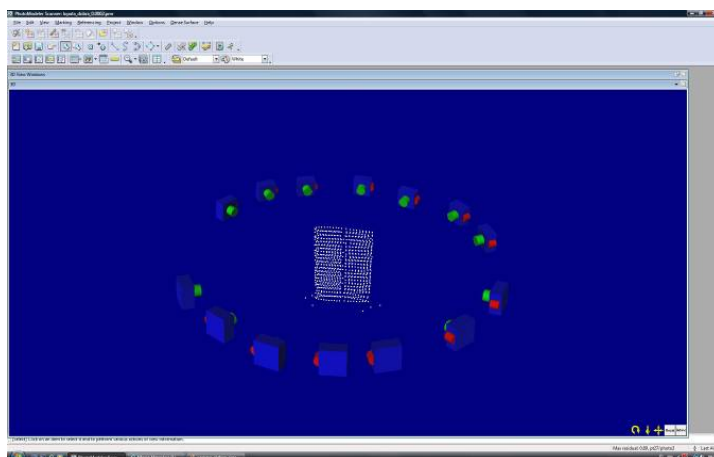
Następnie naklejono punkty na całym obiekcie tak, aby po ich pomiarze utworzyły się profile lotnicze. Punkty kodowe zostały umieszczone również na stoliku, na którym stał obiekt. Celem tego było zwiększenie liczby punktów rozpoznawanych przez program podczas wykonywania automatycznego pomiaru (Rys. 6). Po naniesieniu punktów na przedmiot przystąpiono do wykonania zdjęć. Wykonywano je z odległości około 1 m. Warunkiem prawidłowego działania programu jest dopasowanie parametrów sieci zdjęć do wymagań numerycznych oprogramowania. Program PhotoModeler Scanner podaje wskazówki, których niespełnienie spowoduje brak automatycznego pomiaru. Ważne jest, aby każdy punkt, który ma być pomierzony znajdował się na przynajmniej trzech zdjęciach. Zwiększa to dokładność pomiaru. Istotne jest również, aby zdjęcia wykonane były pod różnym kątem z różnych pozycji. Wykorzystany w eksperymencie obiekt nie jest bryłą

o zbliżonych powierzchniach każdej ze ścian. Powodowało to problemy z odpowiednim zaprojektowaniem zdjęć, tak aby węższa ściana została dobrze pomierzona.

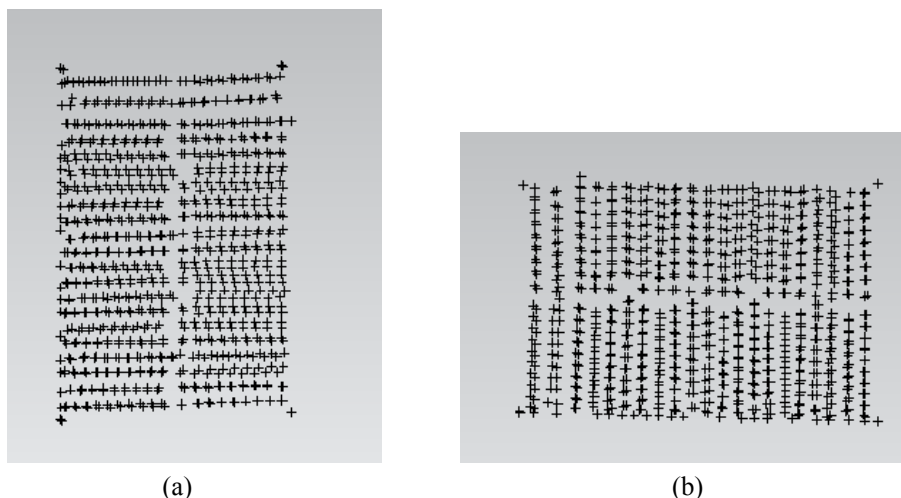


Rys. 6. Naniesione na obiekt punkty do pomiaru

Aby program zadziałał poprawnie muszą być spełnione odpowiednie warunki odnoszące się do pokrycia zdjęć i rozmieszczenia punktów pomiarowych. Na każdym z uzyskanych obrazów niemal cała powierzchnia modelu skrzydła musiała zostać pokryta znaczkami pomiarowymi. Po uwzględnieniu wszystkich zasad dotyczących projektowania sieci zdjęć wykonano rejestrację i pomiar zdjęć. Pozyskano 14 obrazów cyfrowych, które wprowadzono do programu Photomodeler (Rys. 7). Po wczytaniu zdjęć, należało ustalić parametry dzięki którym program automatycznie wyznaczy współrzędne punktów. W wyniku dopasowania zdjęć (ang. *matching*) wyznaczone zostało 1549 punktów, dla opracowywanych powierzchni skrzydła (Rys. 8a, 8b).



Rys. 7. Położenia aparatu podczas rejestracji zdjęć



Rys. 8. Graficzna prezentacja wyniku dopasowania zdjęć dla opracowywanych powierzchni łopaty wirnika

Głównym parametrem określającym jakość geometryczną modelu, w programie PhotoModeler jest parametr *Tightness*. Określa on wewnętrzną spójność pomiarów na zdjęciach. Wartość jest wyznaczana w procentach. Jeśli wartość parametru jest mniejsza, tym lepiej wykonany jest pomiar. Dla stworzonego modelu średnia wartość tego parametru wyniosła 0.00008%.

3. SKANING LASEROWY I OPRACOWANIE DANYCH

Skaning laserowy wykonano skanerem optycznym ATOS II firmy GOM (GOM, 2010) (Rys. 9), który charakteryzują następujące podstawowe parametry: wybór padł na ten skaner ze względu na jego parametry skanowanie: liczba punktów pomiarowych 1 400 000, czas skanu – 1 s, pole pomiarowe od 175×140 mm do 2000×1600 mm, fizyczna odległość punktów: od 0.12 do 1.4 mm.



Rys. 9. Skaner ATOS II

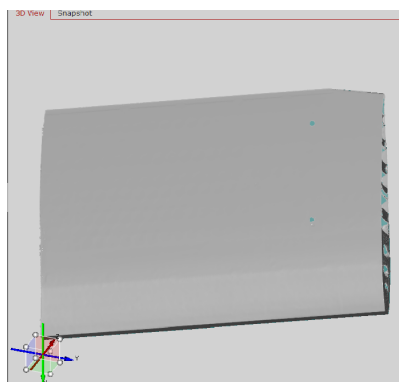


Rys. 10. Krzyż do kalibracji

Przed procesem skanowania wykonano kalibrację skanera, gdzie wykorzystano krzyż do kalibracji ATOS II (Rys. 10). Przed wykonaniem skanowania, obiekt pokryty został cienką warstwą sproszkowanej kredy. Czynność ta została wykonana po to, aby powierzchnia przedmiotu była jasna i nie-odbłaskowa. Na powierzchni fragmentu łopaty naklejone zostały znaczki, takie jak niekodowane znaczki RAD (Rys. 6), aby podczas skanowania w sposób automatyczny połączyć skany. Działanie skanera opiera się na zasadzie triangulacji, w której dwie kamery obserwują przebieg promieni na mierzonym detalu i dla każdego piksela kamery z dużą precyzją obliczane są współrzędne punktów (Rys. 11).



Rys. 11. Zdjęcie pracy skanera

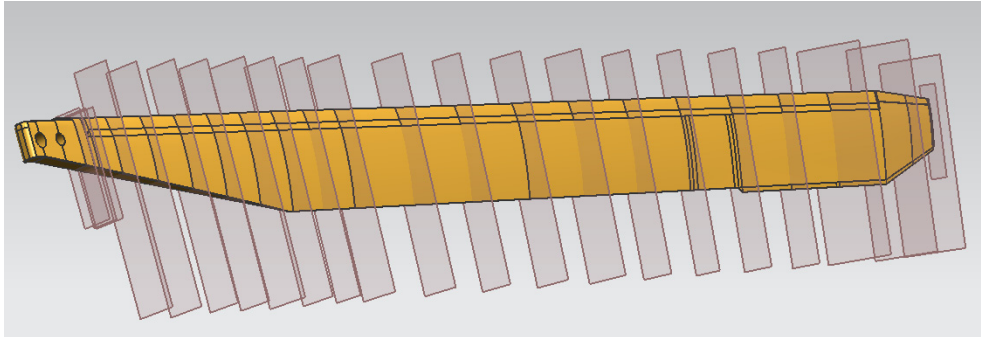


Rys.12. Wynik pracy skanera

W wyniku skanowania uzyskano ok. 450 000 punktów. Wizualizację fragmentu uzy-skanej powierzchni 3D przedstawia rysunek 12.

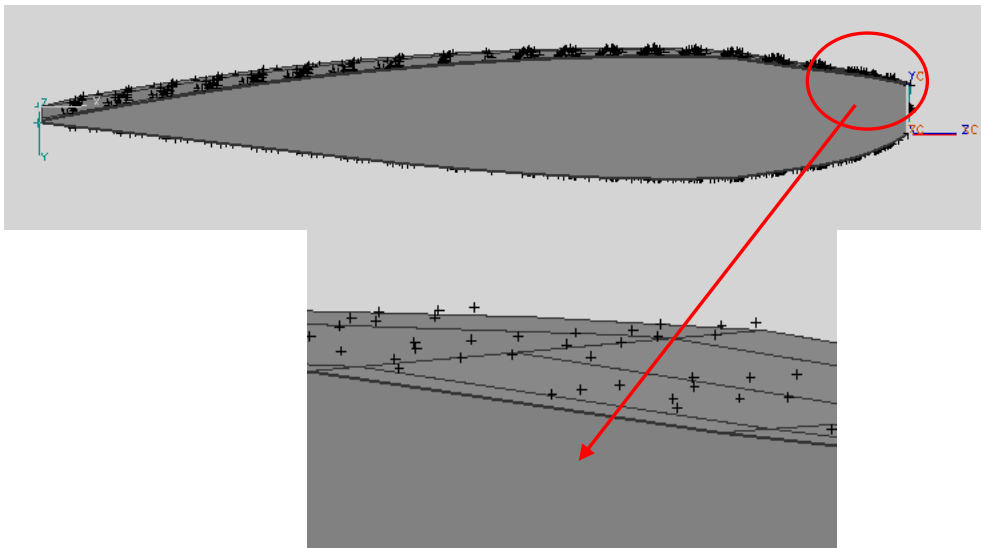
4. PORÓWNANIE JAKOŚCI GEOMETRYCZNEJ MODELI 3D

Porównanie modeli pozyskanych z pomiaru fotogrametrycznego i ze skaningu laserowego z danymi projektowymi wykonane zostało w programie NX firmy SIEMENS. Program ten znajduje zastosowanie w projektowaniu 3D modeli w takich dziedzinach przemysłu, jak np. lotniczy (Rys.13), czy motoryzacyjny (Leu *et al.*, 2008). Wybór padł na to oprogramowanie ze względu na szeroki wachlarz możliwości jakie oferuje. Pozwala on na przemieszczenie obiektów o małe wartości zarówno kątowe jak i liniowe, co było nieocenione przy wykonywanym projekcie. W celu uzyskania jak najlepszego dopasowania modeli należało je przemieszczać względem różnych osi o dziesiąte części milimetra, albo stopni. Program posiada funkcje, które okazują się bardzo przydatne przy pracy z plikami o dużej zawartości punktów. Jest to możliwość ukrywania niepotrzebnych w danym momencie danych. Powoduje to, że praca nie jest spowalniana przez bardzo dużą liczbę danych. Jego zaletą jest łatwość operowania w środowisku 3D. Należy zauważyć, że modelowane zostały nie pojedyncze powierzchnie obiektu, a cała bryła. Stąd wymagania odnośnie programu były wysokie. Każdy z modeli otrzymany został w różnych układach współrzędnych, a więc bardzo ważna była funkcja w programie pozwalająca na ustalanie układu współrzędnych względem wybranych płaszczyzn.

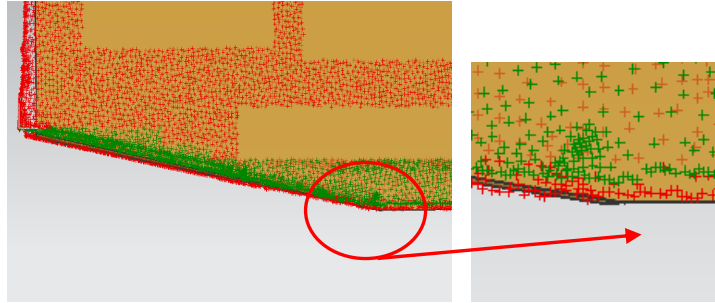


Rys. 13. Przykład projektowania w programie NX

Po dopasowaniu ze sobą par modeli: modelu cyfrowego z nominalnym (Rys. 14) i modelu ze skaningu cyfrowego z nominalnym (Rys. 15), zostały wybrane punkty wyznaczające profile lotnicze. Model nominalny został utworzony z danych projektowych łopaty wirnika i był modelem referencyjnym. Wygodną funkcją oprogramowania jest możliwość zmieniania widoczności obiektu. Dzięki zróżnicowanym poziomom transparentności można znacznie łatwiej kontrolować wykonywane pomiary i wybór punktów przeznaczonych do ostatecznych obliczeń. Ponieważ trudno było znaleźć punkty z modelu fotogrametrycznego i ze skaningu wybierane były punkty znajdujące się najbliżej siebie. W celu łatwiejszego rozróżnienia punktów nadano im różne kolory, w zależności od tego z którego są modelu i po której stronie się znajdują. Punkty w kolorach żółtym i Magenta, należą do modelu fotogrametrycznego, kolory niebieski i zielony – model ze skaningu laserowego (Rys. 16).



Rys. 14. Graficzna prezentacja wyniku nałożenia modelu nominalnego z fotogrametrycznym

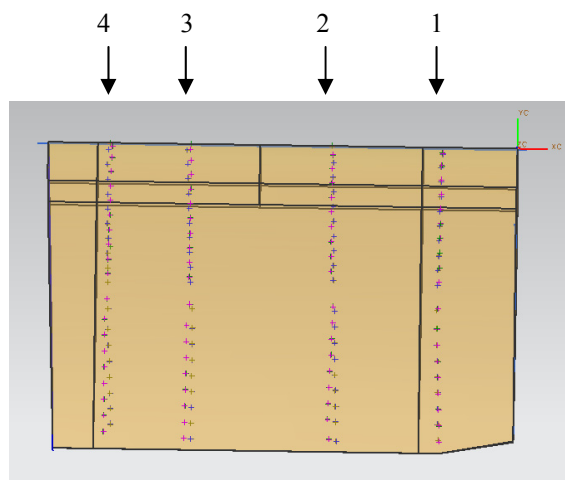


Rys. 15. Graficzna prezentacja wyniku nałożenia modelu nominalnego z modelem ze skaningu laserowego

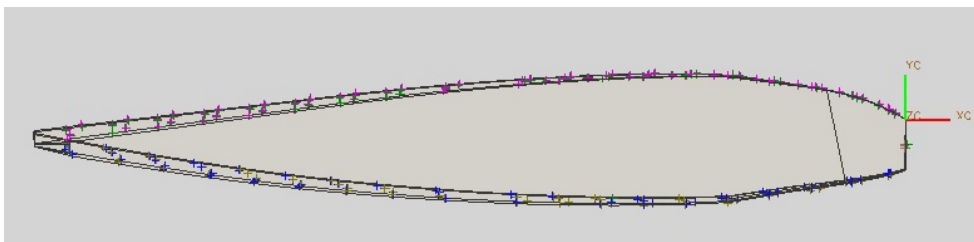


Rys. 16. Wspólne punkty odniesienia dla modeli 3D

Na całym obiekcie wyznaczone zostały cztery profile, na których przeanalizowano uzyskane wyniki pomiarowe (Rys. 17). Graficzną prezentację złożenia wszystkich profili przedstawia rysunek 18.



Rys. 17. Graficzna prezentacja złożonych profili do analizy kształtu 3D modelu



Rys. 18. Graficzna prezentacja złożenia profili dla modelu nominalnego, fotogrametrycznego i uzyskanego ze skaningu laserowego

Ostateczną ocenę dokładności otrzymano na podstawie pomiaru odchyłek na 148 punktach profili, dla których policzona została średnia odchyłka. Wymagana dokładność jaka jest dopuszczalna dla odtworzenia kształtu tego rodzaju elementu wynosi 0.1 mm. W przypadku tego zadania otrzymano dla modelu fotogrametrycznego 0.42 mm, dla modelu ze skaningu laserowego 0.22 mm.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone eksperymenty wykazały jaką dokładność można uzyskać przy pomiarze tak precyzyjnej powierzchni, jakim była powierzchnia skrzydła. Wymagana dokładność wyznaczenia tego typu powierzchni, określona przez konstruktorów, wynosi 0.1 mm. Analizując uzyskane wyniki, gdzie dla modelu fotogrametrycznego uzyskano średnią odchyłkę 0.42 mm a dla modelu ze skaningu laserowego 0.22 mm, można by stwierdzić, że obie metody nie spełniły oczekiwań. Na taki wynik wpłynęło jednak wiele czynników, które mogły mieć wpływ na uzyskanie takich dokładności. Po pierwsze, pozyskane dane były w różnych warunkach, bez wspólnego układu odniesienia. Podczas realizacji dopasowywania poszczególnych modeli z modelem referencyjnym, największą trudność stanowiło ustalenie wspólnych punktów odniesienia dla otrzymanych profili, w następstwie otrzymanych modeli 3D. Gdyby cały eksperyment przeprowadzono w jednakowych warunkach rejestracji, z określoną wspólną bazą referencyjną, to otrzymano by wyższą precyzję pomiaru od osiągniętych wyników. Nie bez znaczenia jest fakt, że przy wykorzystaniu metody fotogrametrycznej, na powierzchni skrzydła wirnika były naklejane punkty kodowane i niekodowane, które pomimo tego, że były z papieru, ale miały określoną „grubość”. Ta sama uwaga dotyczy pomiaru ze skaningu laserowego, sproszkowana kreda rozprowadzona po powierzchni skrzydła, też wprowadzała pewne „zaburzenia” tej powierzchni.

Przedstawione eksperymenty wykazały jednak, w jakim stopniu skuteczne są obie metody oraz jak dokładne wyniki można uzyskać. Uzyskane doświadczenia mogą być na tyle cenne, że mogą być wykorzystane przy następnych tego typu badaniach w pomiarach przemysłowych.

6. LITERATURA

AMINI A., VARSHOSAZ M., SAADATSERESHT M., (2008). „*Deformation determination of aircraft parts by photogrammetry*” – XXI ISPRS Congress, Pekin. Vol. XXXVII, part B5, s. 135–138.

Witkowski R., 1986. „Budowa i pilotaż śmigłowców”, WKŁ Warszawa, s. 172.

Pacana J., 2005. „Parametryczne projektowanie CAD z wykorzystaniem systemu Unigraphics NX”, Rzeszów.

Leu M., Joshi A., 2008. „NX5 for engineering design”, Missouri.

SIEMENS, 2010: http://www.plm.automation.siemens.com/pl_pl

PhotoModeler, 2010: <http://www.photomodeler.com>

GOM, 2010: <http://www.gom.com>

ITA-Polska, 2010: <http://www.ita-polska.com.pl>

ANALYSIS OF ACCURACY OF SHAPE OF INDUSTRIAL ELEMENT MODEL OBTAINED FROM DIGITAL IMAGES AND TERRESTRIAL LASER SCANNING

KEY WORDS: spatial model, automatic image matching, precise industrial scanner, project model

SUMMARY: The purpose of this paper is to compare the accuracy of shape of an element of the main rotor of a helicopter reconstructed from digital photographs and terrestrial scanner. The purpose of the main rotor is to generate the thrust necessary for the flight (forward, backward, sideward), as well as the moments for stability and control. The construction of such types of objects requires very high precision, since the admissible error of the reproduced part amounts to 0.1 mm. To carry out an analysis of the accuracy, 3D models obtained from different data were generated. A first reference model was created from the design data.. Design data allow to draw profiles of the main rotor and then describe its surface, and it is possible to measure coordinates of any point of the object. A second model was obtained from digital images taken by the Canon EOS 20D camera and with use of two types of coded and uncoded reference points placed on the object. Automatic image matching was executed in the PhotoModeler Scanner software. The third model was reconstructed on the basis of data from terrestrial laser scanning, where the industrial precise ATOS II scanner from the GOM company was used. In addition, special target points for automatic scan matching on this object were located. A comparison of these two generated 3D models with the reference model was carried out in the NX program, which is an advanced CAD/CAM/CAE software. Based on the analysis, both evaluation of the accuracy of the generated models and the time consumption and economic aspects were compared.

dr inż. Dorota Zawieska
e-mail: d.zawieska@gik.pw.edu.pl
telefon: 222347694

Anna Klimkowska
e-mail: anna.maria.klimkowska@gmail.com
telefon: 602822345