

AUTOMATYCZNA REKONSTRUKCJA MODELI 3D MAŁYCH OBIEKTÓW BLISKIEGO ZASIĘGU

3D MODELS AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF SELECTED CLOSE RANGE OBJECTS

Dorota Zawieska

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: SUSAN, automatyczne dopasowanie, RANSAC, rekonstrukcja powierzchni, modelowanie 3D, wizualizacja

STRESZCZENIE: Celem niniejszego artykułu jest prezentacja wyników automatycznego modelowania wybranych obiektów bliskiego zasięgu (głowa manekina, kamień) z wykorzystaniem obrazów cyfrowych z aparatu Hasselblad H4D50. Do obliczeń wykorzystano autorski program, realizujący kolejne etapy tworzenia modelu 3D. Proces modelowania został zaprezentowany jako kompletny proces rozpoczynający się od pozyskania obrazów, który jest ukończony wraz z utworzeniem fotorealistycznego modelu 3D, w tym samym środowisku programowym. Eksperymenty przeprowadzono na wybranych obiektach bliskiego zasięgu, z odpowiednio wykonaną geometrią zdjęć, tworzących pierścieni (okrąg) wokół mierzonego obiektu. Do automatycznego dopasowania punktów, wykrytych algorytmem *SUSAN*, wykorzystano metodę *Area Base Matching (CC/LSM)*, algorytm *RANSAC* wykorzystując rachunek tensorowy. Rekonstrukcja powierzchni generowania modelu jest jednym z bardzo ważnych etapów modelowania 3D. Rekonstrukcja precyzyjnych powierzchni na podstawie nieregularnej chmury punktów uzyskanych z automatycznego opracowania obrazów cyfrowych jest zagadnieniem otwartym. Tworzenie wielokątnych modeli, które mogą sprostać wysokim wymaganiom w zakresie modelowania i wizualizacji, potrzebne jest w wielu aplikacjach. Metoda wielokątów jest zwykle idealną drogą do dokładnego reprezentowania wyników pomiarów, a jednocześnie do uzyskania optymalnego opisu powierzchni. Przetestowano trzy algorytmy: metodę objętościową (*VCG*), metodę *Poissona* i metodę *Ball Pivoting*. Metody te są najczęściej stosowane do modelowania jednorodnej siatki punktów. Wyniki eksperymentów wykazały, że niewłaściwe zastosowanie tych metod powoduje różne artefakty i zniekształcenia powierzchni modelu. Po utworzeniu siatki trójkątów modelowanej powierzchni, wyniki zwizualizowano wykorzystując metodę cieniowania oraz teksturuowanie chmury punktów. Dokładność uzyskanej rekonstrukcji powierzchni modelu uzyskano z poniżej 1 mm.

1. WPROWADZENIE

Rekonstrukcja trójwymiarowych realistycznych modeli obiektów z obrazów cyfrowych jest od wielu lat tematem badań w wielu dziedzinach nauki. Rozwój ten jest stymulowany przez pojawienie się nowych technologii i narzędzi. W ostatnich latach opracowano różne rozwiązania modelowania 3D, w oparciu o wykorzystanie obrazów

cyfrowych. Współczesne systemy pomiarowe bliskiego zasięgu bazują wyłącznie na bezpośrednim sposobie akwizycji obrazów. W celu uzyskania całej powierzchni modelu wymagana jest ciągłość rejestracji kolejnych obrazów wykonanych z odpowiednim pokryciem. Odpowiadające punkty na kolejnych obrazach, określają współrzędne 3D, poprzez odpowiednie przecięcie promieni homologicznych. Dopasowanie obrazów sprawia, że proces staje się bardziej dokładny i szybki. Większość ze stosowanych obecnie wiarygodnych i precyzyjnych rozwiązań opiera się na procedurach półautomatycznych, dlatego wprowadzenie algorytmów automatycznych jest kluczowym celem fotogrametrów i specjalistów zajmujących się widzeniem komputerowym (*Computer Vision - CV*).

Celem niniejszego artykułu jest prezentacja wyników automatycznego modelowania wybranych obiektów bliskiego zasięgu (głowy manekina, kamienia) z wykorzystaniem obrazów cyfrowych z aparatu Hasselblad H4D50 i odpowiednio opracowanej aplikacji.

2. ORIENTACJA I DOPASOWANIE OBRAZÓW

Automatyczne uzyskanie modelu 3D wybranego obiektu z obrazów cyfrowych od wielu lat szeroko omawiana jest w literaturze, (Fitzibbon, Zisserman, 1998; Pollefeys *et al.*, 1999; Nister, 2001; Mayer, 2003) i analizowane są różne rozwiązania. Jedną z nich jest automatyczna rekonstrukcja obiektu 3D na podstawie zorientowanych obrazów, oparta na pewnych cechach obiektu, jak np. pionowość, czy prostopadłość (Werner, Zisserman, 2002), Van den Heuvel, 2003; Wilczkowiak *et al.*, 2003) lub na wykorzystaniu geometrycznych warunków epipolarnych (Gruen *et al.*, 2001). W środowisku fotogrametrycznym, jednym z głównych kryterium generowania modeli 3D jest dokładność. Dlatego też automatyczne dopasowywanie zdjęć i odtwarzanie pełnego, szczegółowego i realistycznego modelu 3D na podstawie obrazów to zadanie wciąż trudne, szczególnie wtedy, gdy wykorzystuje się obrazy nieskalibrowane lub bardzo odległe od siebie (długa baza) (Remondino, Zhang, 2005). Dlatego też rozpatrując problem orientacji i dopasowywania zdjęć w celu budowy modelu 3D należy rozpatrzeć różne cechy operatora detekcji i przypisanej mu techniki dopasowywania punktów jak szybkość działania, jakość dopasowanych punktów i ich lokalizację.

Analizując podstawy teoretyczne modelowania 3D, analizując różne rozwiązania publikowane w literaturze, autorka pracy, przy współpracy z informatykami, opracowała program, w którym weryfikuje proponowane rozwiązania. W wyniku przeprowadzonych wstępnych analiz i eksperymentów zostały zdefiniowane warunki dotyczące geometrii zdjęć, oświetlenia, jakości tekstury obiektu oraz rozdzielczości i formatu obrazu cyfrowego do automatycznego generowania modeli 3D wybranych obiektów. Przetestowano dwie metody dopasowywania zdjęć: pierwsza bazuje na macierzy fundamentalnej i dopasowuje pary zdjęć, druga opiera się na tensorze trójogniskowym i operuje na trzech zdjęciach (Zawieska, 2012). Ostatecznie lepsze wyniki dopasowania zdjęć uzyskano przy wykorzystaniu tensorów.

Program działa wieloetapowo. Do automatycznego dopasowania punktów, wykrytych algorytmem *SUSAN*, wykorzystano metodę *Area Base Matching (CC/LSM)*, algorytm *RANSAC* wykorzystując rachunek tensorowy. Tworzenie modelu składa się z trzech etapów; pozyskanie punktów, dopasowanie ich na kolejnych zdjęciach, wyznaczenie tensora, macierzy projekcji, generowanie chmury punktów 3D (Zawieska, 2012).

3. TESTOWANIE PROGRAMU

W przyjętych założeniach eksperymentu zaplanowano, że wybrane obiekty testowe będą umieszczone na platformie obrotowej. Jako obiekty testowe wybrano: przelamany kamień (ok. 30 cm) długości, dwudziestościan (o boku 15 cm) wykonany z kartonu i sztucznie naniesioną teksturą, wazon ze zróżnicowaną teksturą o gładkich, błyszczących powierzchniach (ok. 40 cm wysokości) oraz manekin ludzki przedstawiający głowę z szyją (ok. 40 cm wysokości), z teksturą typu granit). Podczas kolejnych ekspozycji aparat cyfrowy Hasselblad H4D50 umieszczony na statywie był nieruchomy, a podczas kolejnych ekspozycji obracana była platforma z umieszczonym obiektem. Ponieważ wybranym algorytmem dopasowywania obrazów został tensor, więc należy pamiętać, o odpowiednim pokryciu kolejnych zdjęć. Możemy to uzyskać stosując niewielki kąt obrotu np. 15 stopni. Ma to także tę zaletę że, ułatwia przeprowadzenie procesu dopasowania – zniekształcenia wywołane obrotem są niewielkie, przez co dopasowanie może być przeprowadzone z wyższą dokładnością. Szczególną uwagę należy zwrócić na tło badanego obiektu oraz jego oświetlenie. Tło, jeśli obracamy obiekt a nie aparat, powinno być niezmiennie i jeśli to możliwe jednolite. Pozwala to na łatwiejsze oddzielenie go od badanego obiektu w późniejszych etapach. Oświetlenie dobieramy tak, aby obiekt był dobrze widoczny. Należy zwrócić uwagę, aby nie było żadnych smug ani odbłyśków.

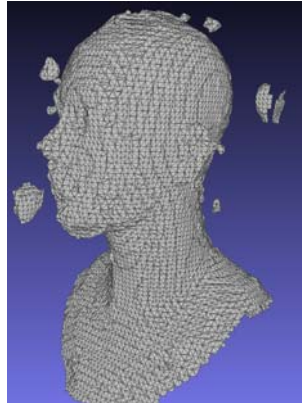
Aby określić poprawność działania zarówno poszczególnych algorytmów oraz opracowanej aplikacji przeprowadzonych zostało szereg testów. Polegały one na wyznaczeniu modelu 3D przy różnych parametrach wejściowych dla poszczególnych algorytmów. Okno opracowanej aplikacji z możliwością ustawiania parametrów wejściowych przedstawiono w artykule (Zawieska, 2012).

3.1. Rekonstrukcja powierzchni modeli

Rekonstrukcja powierzchni generowania modelu jest jednym z bardzo ważnych etapów modelowania 3D. Rekonstrukcja precyzyjnych powierzchni na podstawie niezorganizowanej chmury punktów uzyskanych z automatycznego opracowania obrazów cyfrowych to jest trudne zadanie, nie do końca rozwiązane. Tworzenie wielokątnych modeli, które mogą sprostać wysokim wymaganiom w zakresie modelowania i wizualizacji, potrzebne jest w wielu aplikacjach. Metoda wielokątów jest zwykle idealną drogą do dokładnego reprezentowania wyników pomiarów, a jednocześnie do uzyskania optymalnego opisu powierzchni. Przetestowano trzy algorytmy: metodę objętościową (VCG), metodę *Poissona* i metodę *Ball Pivoting*. Metody te są najczęściej stosowane do modelowania jednorodnej siatki punktów.

Metoda pojemnościowa VCG (Curless, 1997)

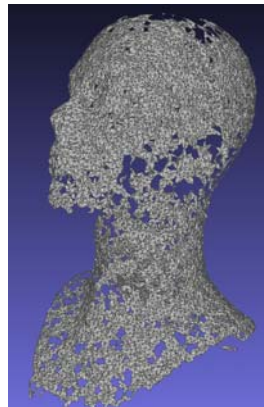
W przypadku modelowanych chmur punktów metoda powoduje powstawanie artefaktów leżących poza obiektem. Tworzą się one wokół pojedynczych punktów zlokalizowanych poza powierzchnią obiektu (rys. 1). Ze względu na brak możliwości usunięcia, w sposób automatyczny wszystkich punktów tego typu, zrezygnowano ze stosowania tej metody.



Rys. 1. Zniekształcenia modelu powstałe przy rekonstrukcji powierzchni metodą VCG

Metoda *Ball Pivoting* (Bernardini, 1999)

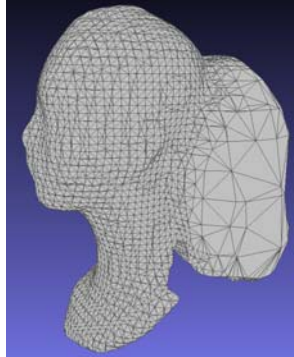
W wypadku dobrania zbyt dużego promienia model zostanie odwzorowany z pominięciem detali. Zastosowanie algorytmu do odtworzenia analizowanych modeli powoduje powstanie wielu dziur, których nie można załatać dedykowanymi do tego algorytmami (rys. 2). Z uwagi na tę cechę algorytmu zrezygnowano z wykorzystania go do rekonstrukcji modelowanych pomierzch obiektów testowych.



Rys. 2. Zniekształcenia modelu powstałe przy rekonstrukcji powierzchni metodą *Ball Pivoting*

Metoda *Poissona* (Kazhdan, 2006)

Algorytm oparty jest na rozwiązaniu równania Poissona. Metoda bardzo wrażliwa na zmiany w wyliczanych wektorach normalnych. Przy złym doborze parametrów generuje narośle na modelu (rys. 3). Jednakże przy właściwym wyznaczeniu wektorów normalnych, metoda daje dobre wyniki i została wybrana jako właściwa do budowy modeli opartych na chmurze punktów w wykonywanych eksperymentach.



Rys. 3. Zniekształcenia modelu powstałe przy rekonstrukcji powierzchni metodą *Poissona*

3.2. Wizualizacja modelu 3D

Po utworzeniu siatki trójkątów modelowanej powierzchni, wyniki zwykle wizualizuje się różnej postaci. Proces wizualizacji może być przeprowadzony na chmurze punktów lub na modelu po wykonanej wcześniej triangulacji.

W tym pierwszym przypadku mamy do wyboru albo wpasowywać fragmenty grafik w chmurę albo nadawać jedynie odpowiednie kolory dla poszczególnych punktów (rys. 4). Drugie rozwiązanie jest prostsze i o wiele szybsze. Ma jednak tę wadę że, pozwala uzyskać jedynie przybliżony obraz obiektu i to w przypadku gdy punktów jest odpowiednio dużo i są gęsto w miarę regularnie rozmieszczone. Jeśli na modelu wykonano triangulację, fragmenty obrazu mogą być wpasowywane w powstałe trójkąty. Pozwala to uzyskać dobrą jakość końcowego produktu (rys. 5).



Rys. 4. Wizualizacja modelu poprzez teksturowanie chmury punktów



Rys. 5. Wizualizacja modelu manekina w postaci siatki trójkątów i metody cieniowej

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Oceny dokładności uzyskanych wyników dokonano pod kątem dokładności geometrycznej modeli, oceny zastosowanych algorytmów oraz poprawności działania programu.

Dokładność wyznaczania tensora opisującego relacje geometryczne pomiędzy trzema zdjęciami zależy od wielu czynników. Wynika to bezpośrednio z technologii jego wyznaczania, która podzielona jest na następujące etapy.

Pierwszy etap to wyznaczanie i dopasowanie punktów charakterystycznych na kolejnych zdjęciach. Do ich pozyskania wykorzystano algorytm *SUSAN*. Ma on możliwość wykrywania punktów z dokładnością podpikselową, jednakże w tym etapie, tak precyzyjne wyznaczanie nie jest wymagane, a jego stosowanie zwiększałoby jedynie czas potrzebny na przeprowadzenie wszystkich obliczeń. Wyznaczono więc te punkty z dokładnością pikselową. Należy jedynie zwrócić uwagę, aby punkty były wyznaczane możliwie na całej powierzchni obiektu i w odpowiedniej liczbie. Parametry wejściowe pozwalają bowiem na taką konfigurację, która zwiększa pewność pozyskania prawidłowego obiektu, ale kosztem ich liczby.

Znacznie większy wpływ na dokładność wyznaczenia tensora ma etap związany z dopasowaniem wzajemnym punktów na kolejnych zdjęciach. Wartości współrzędnych tych punktów wchodzi bezpośrednio do obliczeń. Zatem błędów dopasowania powstałych na tym etapie nie da się już potem usunąć. Na dokładność dopasowania wpływ ma nie tylko dokładność wybranego algorytmu, ale także odpowiednia strategia jego zastosowania. Do wyznaczania samego dopasowania punktów pomiędzy zdjęciami wykorzystana została metoda *ABM/ID (Image Distance)*, (opcjonalnie, w zależności od jakości tekstury) oraz *ABM/CC (Cross Correlation)*, a następnie dla zwiększenia dokładności metoda *ABM/LSM (Least Square Matching)*. Testy przeprowadzone przy wyznaczaniu modeli różnych obiektów jak i wyznaczanych tensorów dla poszczególnych trzech zdjęć, z wykorzystaniem algorytmu *RANSAC*, wykazały, że błąd takiego wyznaczenia określany na podstawie zestawu kontrolnego trzech zdjęć, nie przekracza wielkości jednego piksela. Średnia wartość oscylowała wokół 0.75 piksela. Nie był jednak wyznaczany średni błąd dla wszystkich tensorów obliczanych w ramach wykonanych eksperymentów.

Przeprowadzenie oceny dokładności wygenerowanych modeli 3D, nie jest łatwym zadaniem w przypadku automatycznego modelowania 3D. Chmura punktów wygenerowana jest w przypadkowym układzie współrzędnych, która może być ewentualnie wyskalowana. W celu oceny dokładności jeden z obiektów (przełamany kamień), został opracowany w innym systemie (na stacji fotogrametrycznej *Z/I Imaging firmy Intergraph*). Na podstawie wykonanych przekrojów dokładność odtworzenia powierzchni generowanych modeli opracowaną aplikacją i na stacji fotogrametrycznej nie przekraczała 1mm i wahała się w granicach 0.2 – 0.8mm. Przeprowadzone eksperymenty wykazały poprawność przyjętych założeń: dobra tekstura obiektu, obiekt umieszczony na obrotowej platformie i zdjęcia wykonane „po okręgu”, wykorzystanie algorytmu *SUSAN*, metody *ABM/LSM* z wykorzystaniem rachunku tensorowego i algorytmu *RANSAC* pozwala na automatyczne generowanie modelu 3D wybranych obiektów o dobrej teksturze. Opracowane oprogramowanie ma charakter rozwojowy. Bazując na dotychczasowych doświadczeniach, autorka niniejszego projektu planuje modyfikację algorytmów i rozwój oprogramowania dla generowania modeli 3D, innych obiektów bliskiego zasięgu, o większych rozmiarach i słabszej teksturze.

Przedstawione eksperymenty stanowią fragment badań wykonanych w ramach realizacji grantu habilitacyjnego nt. ”Wielobrazowe dopasowanie zdjęć bliskiego zasięgu dla automatycznej rekonstrukcji fotorealistycznych modeli 3D obiektów.”
N N526 147237

5. LITERATURA

- Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H., Silva, C., Taubin G., 1999. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 5, s. 349-359.
- Curless B., Levoy M., 1996. A volumetric method for building complex models from range images”. *ACM Proc. Of Siggraph*, s. 303-312.
- Fitzgibbon A.W., Zisserman A., 1998. Automatic camera recovery for closed and open image sequences. *Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision, 1*, s. 331-326.
- Gruen A., Zhang L., Visnovcova J., 2001. Automatic reconstruction and visualization of a complex Buddha Tower of Bayon, Angkor, Cambodia. *Proceedings 21 Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*, s. 289-301.
- Kazhdan M., Bolitho M., and Hoppe H., 2006. Poisson Surface Reconstruction *Eurographics Symposium on Geometry Processing*”.
- Mayer H., 2003. Robust orientation, calibration, and disparity estimation of image triples. *25th DAGM Pattern Recognition Symposium (DAGM03), Number 2781, series LNCS, Michaelis/Krell (Eds.)*.
- Nister D., 2001. Automatic dense reconstruction form uncalibrated video sequences. *PHD Thesis, Computational Vision and Active Perception Lab, NADA-KHT*.
- Pollefeys M., Koch R., Van Gool L., 1999. Self-Calibration and Metric Reconstruction in spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters. *IJCV*, Vol.32, No 1, s. 7-25.
- Remondino F., Zhang L., 2005. Surface reconstruction algorithms for detailed close range object modeling. *IASPRS, Vol. 36, Part B5/W17*.
- Van den Heuvel F., 2003. Automation in architectural photogrammetry”. *PhD Thesis, Publication on Geodesy 54*.

Werner T, Ziesserman A., 2002. New technique for automated architectural reconstruction from Photographs. *Proceedings 7th ECCV, Vol.2*, s. 541-555.

Wilczkowiak M., Trombettoni G., Jermann C., Strum P., Boyer F 2003. Scene modeling based on constraint system decomposition techniques. *IEEE Proceedings 9th ICCV*, s. 1004-1010.

Zawieska D., 2012. Automatyczna orientacja obrazów cyfrowych na przykładzie wybranej geometrii sieci zdjęć. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 23*, s. 509-519.

3D MODELS AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF SELECTED CLOSE RANGE OBJECTS

KEY WORDS: automatic matching, 3D modelling, surface reconstruction, model visualization

Summary

Reconstruction of three-dimensional, realistic models of objects from digital images has been the topic of research in many areas of science for many years. This development is stimulated by new technologies and tools, which appeared recently, such as digital photography, laser scanners, increase in the equipment efficiency and Internet. The objective of this paper is to present results of automatic modeling of selected close range objects, with the use of digital photographs acquired by the Hasselblad H4D50 camera. The author's software tool was utilized for calculations; it performs successive stages of the 3D model creation. The modeling process was presented as the complete process which starts from acquisition of images and which is completed by creation of a photorealistic 3D model in the same software environment. Experiments were performed for selected close range objects, with appropriately arranged image geometry, creating a ring around the measured object. The Area Base Matching (CC/LSM) method, the RANSAC algorithm, with the use of tensor calculus, were utilized for automatic matching of points detected with the SUSAN algorithm. Reconstruction of the surface of model generation is one of the important stages of 3D modeling. Reconstruction of precise surfaces, performed on the basis of a non-organized cloud of points, acquired from automatic processing of digital images, is a difficult task, which has not been finally solved. Creation of poly-angular models, which may meet high requirements concerning modeling and visualization is required in many applications. The polynomial method is usually the best way to precise representation of measurement results, and, at the same time, to achieving the optimum description of the surface. Three algorithms were tested: the volumetric method (VCG), the Poisson method and the Ball pivoting method. Those methods are mostly applied to modeling of uniform grids of points. Results of experiments proved that incorrect utilization of these methods results in various artifacts and deformations of models. After generation of a triangular grid of the modeled surface, results were visualized using the shading methods and texturing of the cloud of points. The accuracy of obtained reconstructions of the model surface equaled below 1 mm.

Dane autora:

Dr inż. Dorota Zawieska
e-mail: dorotaz8@wp.pl
telefon: +48 22 234 76 94