

Joanna GANCARCZYK, Tomasz GANCARCZYK
 AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA W BIELSKU-BIAŁEJ

Nieinwazyjne badania obiektów zabytkowych z wykorzystaniem fotografii w świetle widzialnym, fluorescencji UV i reflektografii IR

Mgr Joanna GANCARCZYK

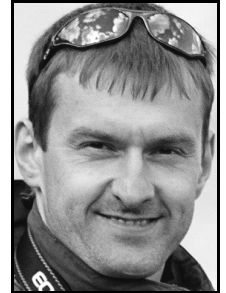
Jest asystentem w Zakładzie Mechaniki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Naukowo zajmuje się przetwarzaniem i analizą obrazu cyfrowego, w szczególności z zastosowaniem do nieinwazyjnego badania dzieł sztuki.



e-mail: jgan@ath.bielsko.pl

Dr inż. Tomasz GANCARCZYK

Stopień doktora uzyskał w 2008 w specjalności modelowanie komputerowe, na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. W swoich naukowych zainteresowaniach skupia się na modelowaniu komputerowym układów dynamicznych i zarządzaniem serwerowymi systemami operacyjnymi.



e-mail: tgan@ath.bielsko.pl

Streszczenie

Nieinwazyjne badania obiektów zabytkowych oparte na komputerowym przetwarzaniu i analizie obrazu zajmują coraz bardziej znaczącą pozycję wśród znanych do tej pory podobnych badań w innych dziedzinach, jak medycyna, analiza zdjęć satelitarnych, wojskowość czy kontrola jakości w przemyśle. Niniejsza praca przedstawia przegląd literatury dotyczącej poruszanego tematu a także opis badań własnych przeprowadzonych na udostępnionym obiekcie muzealnym. Przedstawione zostało stanowisko do wykonania zdjęcia w świetle widzialnym, zasady poprawnego oświetlenia obiektu oraz przykład zastosowania makrofotografii. Dodatkowo zaprezentowano otrzymane wyniki analizy z wykorzystaniem fluorescencji UV (ultrafiolet) i reflektografii IR (podczerwień) oraz ich interpretację.

Słowa kluczowe: badania nieinwazyjne, komputerowa analiza obrazu, fluorescencja UV, reflektografia IR, fotografia obiektów muzealnych.

Non-invasive museum object inspection by VIS photography, UV fluorescence and IR reflectography

Abstract

Non-invasive inspection of museum objects based on computer image processing and analysis has recently gained a signifying position among other similar methods known so far in medicine, satellite image analysis, military or quality control in the industry. Investigation outside the visible light spectrum is a basic tool to reveal underdrawings as well as to recognize retouching and former restoration marks in the painting. Computer vision will not replace traditional art historical methods of connoisseurship but enhance and extend them. They can rely on visual features that are hard to determine by eye, for instance subtle relationships among the structure of a brushstroke at different scales or colours. This paper provides an overview of the literature and a case study concerning the analysis performed on a given museum object (Fig. 2, with courtesy of the Museum of Bielsko-Biała). The workplace for VIS photography is shown, as well as the schema of proper illumination of a painting (Fig. 3) and an example of use of macrophotography (Fig. 5, craquelure analysis). Additionally, there are presented the results of inspection with use of UV fluorescence (Fig. 7) and IR reflectography (Fig. 8) together with their interpretation.

Keywords: non-invasive inspection, computer image analysis, UV fluorescence, IR reflectography, museum object photography.

1. Wstęp

Techniki przeprowadzania ekspertyzy naukowej dotyczącej obiektów malarstwa przebiegają z reguły wielokierunkowo. Z jednej strony jest to badanie kontekstu historycznego dzieła w powiązaniu z epoką i biografią artysty, poparte analizą symboliki i relacjami słownymi. Z drugiej dochodzi do tego analiza estetyczna pod kątem kompozycji, zastosowanych środków stylistycznych i wykorzystanej palety barw. Kolejnym, trzecim kierunkiem są badania ściśle fizyczne dotyczące struktury wewnętrznej obrazu tj.: analiza spektrometryczna, analiza stanu zachowania,

analiza warstw [21]. Celem niniejszej pracy jest zwrócenie uwagi na ostatni z wymienionych kierunków, w szczególności na badania nieinwazyjne oparte na analizie obrazu cyfrowego powstałego w wyniku fotografowania obiektu w świetle widzialnym, w promieniach UV i IR.

2. Przegląd zastosowań

Rozwój komputerowej analizy obrazu w dziedzinie analizy malarstwa jest kwestią ostatnich kilku lat [20], aczkolwiek o badaniach nieinwazyjnych można mówić już od momentu wykorzystania promieni rentgenowskich do prześwietlania obrazów w celu wykrycia ukrytych warstw malarskich (koniec XIX wieku). Traktując techniki komputerowe jako uzupełnienie dotychczasowej pracy konserwatorów i historyków sztuki można przypisać im szczególną wartość ze względu na:

- możliwość wykrycia i analizy niezauważalnych dla oka szczegółów (subtelne przejścia tonalne);
- możliwość dokonania automatycznej ekstrakcji zadanych cech i ich podsumowania (sąsiedztwo barw, analiza kształtu);
- obiektywność i powtarzalność otrzymywanych wyników.

Poniżej przedstawiono syntetyczny przegląd wybranych możliwości zastosowania komputerowego przetwarzania obrazu do analizy dzieł sztuki, który wykonano na podstawie aktualnych doniesień literaturowych.

2.1. Badanie stanu zachowania

Kluczową kwestią związaną z przechowywaniem i ekspozycją dzieł sztuki jest możliwość systematycznej kontroli stanu ich zachowania w celu wyeliminowania szkodliwych czynników, które mogą mieć wpływ na przebieg procesów degradacyjnych. Analiza obrazu cyfrowego obiektu umożliwia zarówno dokładne wyznaczenie wielkości powierzchni ubytku warstwy malarskiej, jak i ocenę mikropęknięć, w szczególności długość i kierunek ich rozchodzenia się [1, 19]. Prace [16, 19] opisują ponadto możliwości, jakie daje analiza w świetle UV i właściwe dla werniksu zjawisko fluorescencji w wykrywaniu przemalowań i retuszy oraz dokonanych uzupełnień warstwy malarskiej.

2.2. Analiza autorstwa, datowanie

Badania widniejących na obrazie odręcznych symboli, takich jak sygnatura autora, litery w dacie, podpisie czy dedykacji, znane dotąd z innych niż historia sztuki dziedzin (np. kryminalistyka), pozwalają wykluczyć lub z dużym prawdopodobieństwem potwierdzić zakładane autorstwo i datę powstania dzieła. Dodatkowo badania pod kątem autorstwa prowadzone są na podstawie analizy faktury obrazu przy pomocy opisu orientacji, kształtu i rozmieszczenia pociągnięć pędzlem [3]. Autorzy pracy [4] wprowadzają

pojęcie kolorów uzupełniających w kontekście analizy barwnej, pozwalającej na umieszczenie dzieła w jednym z wyodrębnionych okresów twórczości danego autora. Prace [10, 11] podają przykład wykorzystania analizy falkowej do klasyfikacji dzieł malarskich pod względem autorstwa. Analiza falkowa w połączeniu z zastosowaniem systemów uczących się wykorzystana została w artykule [9] w celu analizy stylistycznej obrazu.

2.3. Badania poza spektrum światła widzialnego

Oprócz wymienianej powyżej analizy w świetle UV istnieją liczne opracowania przedstawiające wyniki badań wykonywanych w bliskiej podczerwieni oraz za pomocą promieni rentgenowskich. Podstawy teoretyczne oraz wyniki badań w świetle wykraczającym poza spektrum widzialne prowadzonych metodami tradycyjnymi przedstawiono w [21]. Natomiast w pracy [5] przedstawiono wyniki badań prowadzących do odczytania obrazu znajdującego się pod nowszą warstwą malarską za pomocą analizy w promieniach rentgenowskich. Sposób wykonania cyfrowego zdjęcia obrazu w podczerwieni omówiony jest szerzej w [6] (przykład alternatywnego stanowiska badawczego w stosunku do specjalistycznego sprzętu laboratoryjnego) oraz w [15] i [17], dla przypadku rejestracji dużych powierzchni (malowidła naścienne). Przedmiotem rozważań przedstawionych w publikacjach [13] i [14] jest analiza manuskryptów poprzedzona opisem metody rejestracji obrazu i serią operacji zwiększających ich czytelność. Autorzy artykułu [12] proponują metodę automatycznego rozpoznawania narzędzia wykorzystanego do wykonania szkicu pod warstwą malarską na podstawie analizy tekstury i krawędzi odseparowanych śladów.

2.4. Rekonstrukcja obrazu

W pracy [7] wymieniono metody umożliwiające wirtualną rekonstrukcję fresku zniszczonego podczas działań wojennych. Jako podstawę do przeprowadzenia rekonstrukcji autorzy przyjęli odzyskane fragmenty dzieła oraz jego zdjęcie z czasów sprzed dewastacji, które wykonano w skali szarości. Badania zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu algorytmów opartych na metodach interpolacji z zastosowaniem analizy harmonicznej i równań różniczkowych. Metody rekonstrukcji oparte na równaniach różniczkowych wyższego rzędu przytoczone są również w pracy [2]. Wykorzystanie metod rekonstrukcji obrazu w celu odtworzenia kolejnych, nakładających się na siebie warstw malarskich obrazu można znaleźć w artykule [18].

3. Fotografia w świetle widzialnym

W dalszej części przedstawiono kolejne etapy badań, jakie przeprowadzono na obrazie udostępnionym przez Muzeum w Bielsku-Białej (rys. 1).



Rys. 1. Przygotowanie stanowiska fotograficznego
Fig. 1. Preparing the workplace

3.1. Obiekt badań

Do badań wykorzystano obraz „Chrystus przed Piłatem” namalowany w XVI lub na początku XVII wieku na terenie Włoch

przez anonimowego artystę (rys. 2). Obraz wykonany został na desce w technice olejnej o żywej kolorystyce, ma gładką powierzchnię wykończoną werniksem. Na badanym obrazie nie było widocznych wyraźnych spękań, ubytków czy podmalowań.



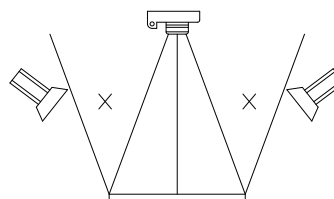
Rys. 2. Obraz poddany analizie
Fig. 2. The investigated painting

3.2. Stanowisko fotograficzne

Do wykonania zdjęć obiektu wykorzystano aparat typu DSLR Canon EOS 50D z obiektywem firmy Tamron AF SP 17-50 f/2.8 XR Di-II Asp. Aparat ten posiada matrycę CMOS typu APS-C, 15.1 Mp. Pracą aparatu sterowano za pomocą komputera przenośnego oraz za pomocą wyzwalacza radiowego. Dla światła widzialnego, wykonano dwie serie zdjęć: w oświetleniu naturalnym oraz z wykorzystaniem błyskowych lamp studyjnych firmy Elfo. W obu przypadkach balans bieli ustawiano za pomocą wzornika, tzw. "białej karty". Dodatkowo, dla zdjęć w świetle naturalnym, pomiaru ekspozycji dokonywano z wykorzystaniem tzw. "szarej karty". W celu wyeliminowania drgań aparatu skorzystano ze stabilnego statywu oraz dokonywano rejestracji obrazu po uprzednim podniesieniu lustra aparatu. Lampy oświetlające wyzwalane były poprzez sterownik aparatu (pierwsza lampa) oraz komórkę światłoczułą (druga lampa). Trzecia seria zdjęć wykonana została z użyciem oświetlenia promieniami UV oraz IR. Rejestrowano zdjęcia z czułością 100 ISO, przesłoną równą f/12 i ogniskową F=31 (odpowiednik F=50 dla pełnowymiarowej matrycy). Wszystkie zdjęcia zapisane zostały w bezstratnym formacie RAW.

3.3. Kąty odbicia światła

Głównym problemem, pojawiającym się podczas wykonywania zdjęć obiektu o silnie odbijającej promienie światła powierzchni, (taką jest powierzchnia obrazu olejnego), są licznie występujące odbicia bezpośrednie. Powstają one w sytuacji, gdy promienie światła oświetlającego fotografowany obiekt trafiają po odbiciu od jego powierzchni wprost do obiektywu aparatu. Zbiór wszystkich punktów, w których zlokalizowane źródła światła tworzą rejestrowane przez aparat fotograficzny odbicia bezpośrednie nazywa się rodziną kątów tworzących tego typu odbicia (na rys. 3 zaznaczono krzyżykami) [8].



Rys. 3. Schemat poprawnego oświetlenia – źródła światła rozmieszczone są poza rodziną kątów tworzących odbicia (pola oznaczone krzyżykami)
Fig. 3. The proper illumination schema – light sources are placed outside the fields marked with a cross

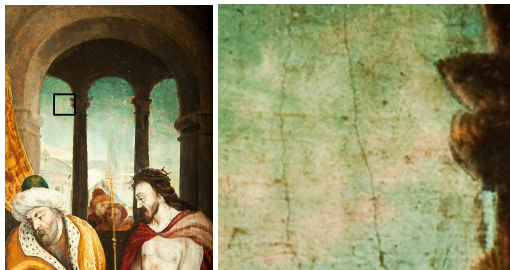
Lokalizacja źródła światła wewnątrz tak zdefiniowanej rodziny kątów powoduje niepożądany efekt w postaci tworzącego się na powierzchni fotografowanego obiektu odbicia (rys. 4).



Rys. 4. Przykład odbicia bezpośredniego
Fig. 4. Example of a direct light reflection

3.4. Makrofotografia

W celu przeprowadzenia dalszej szczegółowej analizy poszczególnych detali, wykonano fotografię zbliżeniową wybranych fragmentów obrazu. Rys. 5 przedstawia fragment wraz ze zbliżeniem wybranego obszaru. Widoczne są wyraźne mikropęknięcia o charakterystycznym dla malarstwa na desce równoległym ułożeniu.



Rys. 5. Charakterystyczne mikropęknięcia widoczne na makrofotografii
Fig. 5. Typical craquelures visible in the macrophotography

Analiza mikropęknięć stanowi jeden z ważniejszych sposobów kontroli stanu zachowania obiektu. Przy zapewnieniu powtarzalności warunków wykonania fotografii możliwe jest systematyczne dokonywanie pomiarów z uwzględnieniem długości oraz kierunków rozchodzenia się pęknięć, a co za tym idzie, identyfikacja i wyeliminowanie ewentualnej przyczyny występowania uszkodzenia.

4. Metodologia badań

Badania nieinwazyjne oparte na komputerowej analizie obrazu bazują na kilku podstawowych krokach, które schematycznie przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Metodologia badań
Fig. 6. Research methodology

Pierwszym etapem badań było wykonanie w sposób prawidłowy fotografii obiektu (z zachowaniem jego geometrii, kolorystyki, powtarzalności ujęcia oraz wyeliminowaniem niepożądanych odbić światła). Wstępna analiza na tym etapie polega przede wszystkim na interpretacji i wyrównaniu histogramu oraz operacjach bezkontekstowych, takich jak: przekształcenia geometryczne, liniowe czy binaryzacja. W niektórych przypadkach przydatne jest rozbięcie obrazu na poszczególne kanały barwne. W dalszej kolejności stosuje się operacje morfologiczne (otwarcie, domknię-

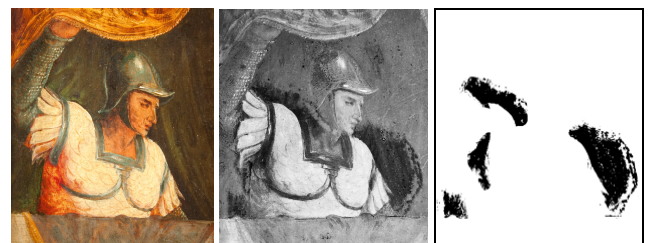
cie, szkieletyzacja, gradient) oraz filtry (np. odszumiające, wykrywające krawędzie). Ekstrakcja cech badanego obiektu jest zazwyczaj etapem pośrednim przed ostatecznym wnioskowaniem. Jak opisano w rozdziale 2, na podstawie cech geometrycznych, barwnych czy ilościowych można w szczególności potwierdzić autorstwo dzieła lub dokonać jego wirtualnej rekonstrukcji.

Poziom zaawansowania używanych algorytmów wzrasta wraz z przejściem do kolejnego etapu analizy, w końcowej fazie stosuje się takie narzędzia jak: metody klasteryzacji danych, analizę falkową, równania różniczkowe, czy metody automatycznego uczenia się. Pewnym ograniczeniem może okazać się zarówno duża złożoność obliczeniowa, jak i wielkość wymaganej pamięci dla stosowanych algorytmów, jednak nie mają one w przypadku obiektów zabytkowych, aż takiego znaczenia, jak w innych dziedzinach – np. w wojskowości, gdzie wymagana jest wręcz odpowiedź w czasie rzeczywistym.

5. Fluorescencja UV

Promieniowanie ultrafioletowe jest promieniowaniem elektromagnetycznym o zakresie fal o długości krótszej niż światło widzialne i dłuższej niż promieniowanie rentgenowskie. Do celów spektroskopii stosuje się podział na ultrafiolet bliski ($0,4 < \lambda < 0,32 \mu\text{m}$), daleki ($0,32 < \lambda < 0,1 \mu\text{m}$) i głęboki ($\lambda < 0,1 \mu\text{m}$) [17]. W analizie dzieł sztuki bliski ultrafiolet stosowany jest do identyfikacji rodzaju użytego werniksu oraz podmalowań i retuszy powstałych w późniejszym okresie niż sam obraz. Rezultatem oświetlenia obiektu światłem ultrafioletowym jest emisja fotonów z jego powierzchni w widzialnym zakresie fal. Zjawisko to, zwane fluorescencją UV, powstaje w wyniku absorpcji fotonów (promieniowania UV) o wysokiej energii i reemisji fotonów przez obiekt już w spektrum widzialnym. Warstwą absorbującą w przypadku analizy malarstwa jest warstwa werniksu, nadająca efekt wykończenia i zabezpieczenia właściwej warstwy malarskiej przed szkodliwym działaniem środowiska. Starsze warstwy werniksu mają inną właściwość fluorescencji niż nowsze. Ponadto niektóre współczesne pigmenty reagują na to zjawisko w inny sposób niż stosowane tradycyjnie (pomimo, iż są nierozróżnialne w świetle widzialnym). Dlatego też analiza w świetle UV umożliwia identyfikację pigmentów, wykrycie wtórnych przemalowań i poprawek, a także analizę stanu zachowania oryginalnej warstwy, poprzez identyfikację istniejących uzupełnień ubytków. Analiza UV stosowana jest również do badań ceramiki, porcelany i papieru.

Na podstawie analizy zdjęć wykonanych w świetle UV odkryto niewidoczne w świetle widzialnym ciemniejsze fragmenty w niektórych partiach obrazu. Zgodnie z rozważaniami przeprowadzonymi powyżej wyniki te mogą wskazywać na istniejące w tych miejscach późniejsze przemalowania. Weryfikację tej hipotezy należałoby przeprowadzić za pomocą dokładniejszych badań spektroskopowych. Na rys. 7 przedstawiono kolejno fragment obrazu w świetle widzialnym, ultrafioletowym i maske w miejscu prawdopodobnych przemalowań.



Rys. 7. Fluorescencja UV – widoczne fragmenty przemalowań
Fig. 7. UV fluorescence – retouching visible in some parts of the painting

6. Reflektografia IR

Promieniowanie podczerwone obejmuje zakres fal elektromagnetycznych o długości większej niż promieniowanie widzialne

($\lambda > 0,75 \mu\text{m}$). Reflektografia IR, jako technika badania dzieł sztuki została wprowadzona przez A. de Boera w 1960 r. Wykorzystuje ona fakt, że promieniowanie podczerwone, w przeciwieństwie do światła widzialnego ($0,4 < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$), posiada zdolność przenikania przez niektóre stosowane w malarstwie pigmenty. W związku z tym za pomocą zdjęcia wykonanego w podczerwieni istnieje możliwość detekcji szkiców wykonanych innym niż sam obraz materiałem (węgiel, rysik ołowiany), które zostały ukryte pod właściwą warstwą malarską [6]. Badania pod tym kątem dają szerokie możliwości analizy dzieła sztuki w kontekście historycznym (pierwotny zamysł autora mógł ulec zmianie ze względu na wymagania odbiorcy) lub poznania warsztatu twórczego artysty (kolejne szkice prowadzące do ustalenia ostatecznej kompozycji i wyrazu dzieła).

Zdjęcie analizowanego obrazu w podczerwieni umożliwiło zlokalizowanie fragmentów szkiców w okolicy płaszcza oraz na twarzach postaci stojących w oknie w tle kompozycji (rys. 8).



Rys. 8. Analiza w podczerwieni – widoczne szkice w niektórych partiach obrazu (dolna ilustracja)

Fig. 8. IR reflectography – sketches visible in some parts of the painting (bottom)

7. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań na udostępnionym przez muzeum obrazie z wykorzystaniem fotografii w świetle widzialnym, fluorescencji UV i reflektografii IR. Uzyskano wyniki potwierdzające skuteczność stosowanych metod, które umożliwiły zlokalizowanie zarówno miejsc prawdopodobnych przemalowań obrazu, jak i fragmenty ukrytych pod warstwą malarską szkiców. Zebrany materiał może stanowić podstawę do dalszej pracy, jaką mogłoby być opracowanie serii algorytmów poprawiającą czytelność pewnych cech szczególnych obrazów, w szczególności umożliwiających lepsze odseparowanie mikro-pięknicy, szkiców i obszarów przemalowań.

Autorzy pragną podziękować Dyrekcji i Pracownikom Muzeum w Bielsku-Białej za udostępnienie obrazu do badań i konsultację oraz studentom, pani Justynie Zarnie oraz panu Mateuszowi Gródkowi za pomoc w wykonaniu zdjęć.

8. Literatura

- [1] Abas F.S., Martinez K.: Craquelure Analysis for Content-Based Retrieval. 14th International Conference on Digital Signal Processing, Santorini, Greece, 2002 pp. 111-114.
- [2] Baatz W., Fornasier M., Markowich P., Schönlieb C.B.: Inpainting of ancient austrian frescoes, Conference Proceedings of Bridges 2008, Leeuwarden, 2008, pp. 150-156.
- [3] Berezhnoy I., Postma E., Van Den Herik J.: Computer analysis of Van Gogh's complementary colours. Pattern Recognition Letters, 28, 2007, pp.703-709.
- [4] Berezhnoy I., Postma E.O., Van Den Herik H.J.: Automatic extraction of brushstroke orientation from paintings. Machine Vision and Applications, 20, 2009, pp. 1-9.
- [5] Dik J., Janssens K., Van Der Snickt G., Van Der Loeff L., Rickers K., Cotte M.: Visualization of a Lost Painting by Vincent van Gogh Using Synchrotron Radiation Based X-ray Fluorescence Elemental Mapping. Analytical Chemistry, 80, 16, 2008, pp. 6436-6442.
- [6] Falco Ch.M.: Invited article: High resolution digital camera for infrared reflectography. Review of scientific instruments, 80, 7, 2009, pp. 071301-071301-9.
- [7] Fornasier M.: Nonlinear projection recovery in digital inpainting for color image restoration. J. Math. Imaging Vis. 24, 3, 2006, pp. 359-373.
- [8] Hunter F., Biver S., Fuqua P.: Światło w fotografii. Magia i nauka. Galaktyka, Łódź, 2009.
- [9] Jafarpour S., Polatkan G., Brevdo E., Hughes S., Brasoveanu A., Daubechies I.: Stylistic analysis of paintings using wavelets and machine learning. European Signal Processing Conference (EUSIPCO) 2009.
- [10] Johnson C.R., Jr., Hendriks E., Berezhnoy I., Brevdo E., Hughes S., Daubechies I., Li J., Postma E., Wang J.Z.: Image Processing for Artist Identification: Brushwork in the Paintings of Vincent Van Gogh, IEEE Signal Processing Magazine Special Issue on Visual Cultural Heritage, 25, 4, 2008, pp.37-48.
- [11] Johnson C.R., Jr., Ed., Proc. 1st Int. Workshop Image Processing for Artist Identification. Amsterdam, The Netherlands, 2007.
- [12] Kramerer P., Lettner M., Zolda E., Sablatnig R.: Identification of drawing tools by classification of textural and boundary features of strokes. Pattern Recognition Letters, 28, 2007, pp. 710-718.
- [13] Lettner M., Diem M., Sablatnig R., Miklas H.: Registration and enhancing of multispectral manuscript images. 16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2008), Lausanne, Switzerland, 2008.
- [14] Lettner M., Diem M., Sablatnig R., Kramerer P., Miklas H.: Registration of multi-spectral manuscript images as prerequisite for computer aided script description. 12th Computer Vision Winter Workshop, St.Lambrecht, Austria, 2007.
- [15] Paviotti A., Ratti F., Poletto L., Cortelazzo G.M.: Multispectral acquisition of large-sized pictorial surfaces. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2009, doi:10.1155/2009/793756.
- [16] Pelagotti A., Pezzati L., Piva A., Del Mastio A.: Multispectral UV Fluorescence Analysis of Painted Surfaces. 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006), Florence, Italy, 2006.
- [17] Rizzi A., Voltolini F., Girardi S., Gonzo L., Remondino F.: Digital preservation, documentation and analysis of paintings, monuments and large cultural heritage with infrared technology, digital camera and range sensors. Proceedings of the XXI CIPA International Symposium, Athens, Greece, 2007.
- [18] Shahram M., Stork D.G., Donoho D.: Recovering layers of brush strokes through statistical analysis of color and shape: An application to van Gogh's Self portrait with grey felt hat. Computer image analysis in the study of art, D.G. Stork, J. Coddington (eds.), SPIE 2008.
- [19] Sobczyk J., Obara B., Frączek P., Sobczyk J.: Zastosowania analizy obrazu w nieniszczących badaniach obiektów zabytkowych. Wybrane przykłady. Ochrona zabytków, 2, 2006, pp. 69-78.
- [20] Stork D.G.: Computer image analysis of paintings and drawings: An introduction to the literature. Proceedings of the Image processing for artist identification workshop, van Gogh Museum, Amsterdam, The Netherlands, 2008.
- [21] Taft W.S., Mayer J.W.: The science of paintings. Springer-Verlag New York, Inc., 2000.

otrzymano / received: 21.12.2009

przyjęto do druku / accepted: 03.02.2010

artykuł recenzowany