

— Obrazowanie hiperspektralne w analizie dokumentów i konserwacji sztuki

Damian K. Chlebda, Tomasz Łojewski

notes 18_2016
konserwatorski

Summary: Damian K. Chlebda, Tomasz Łojewski, *Hyperspectral Imaging in the Analysis of Documents and in Art Conservation*

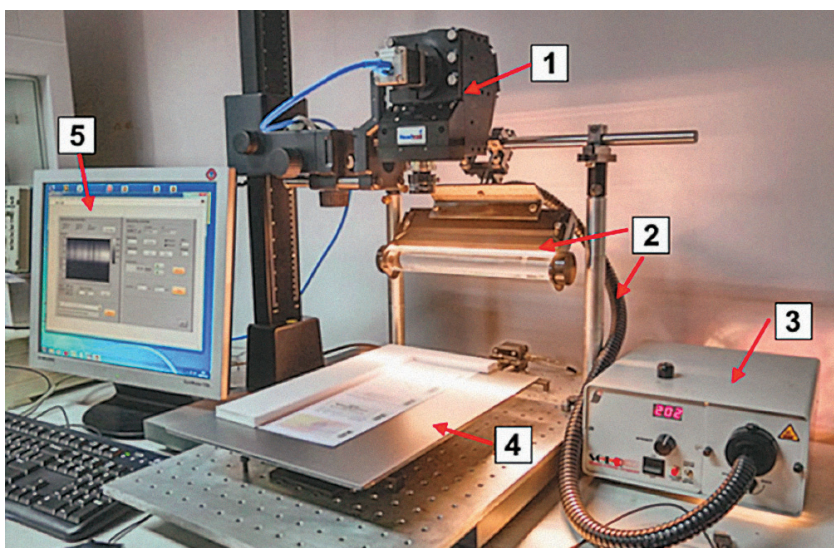
Non-invasive methods, especially spectroscopy, are increasingly used for analysing materials in art and heritage conservation. Hyperspectral imaging (HSI) is a novel non-contact technique that yields analytical data for the entire object scanned. The article presents the physicochemical foundations of hyperspectral imaging and its main applications in cultural heritage research. Herein HSI has been successfully used for analysing documents and paintings. This technique may be a valuable tool for the assessment and optimisation of conservation procedures as well as for monitoring the influence of storage and exposition conditions on the object. The hyperspectral image of the object (in the form of a datacube) can be analysed both qualitatively and quantitatively that – depending on the object of study, results in i.a. the differentiation and identification of colorants, increasing the legibility of the document, detection of hidden elements.

— Przystępując do badań obiektów zabytkowych i dzieł sztuki, sięga się przede wszystkim po metody fizykochemiczne pozwalające na ich nieinwazyjną i nieniszczącą analizę. To ograniczenie istotnie utrudnia zdobycie pełnych

informacji o budowie technologicznej dzieła czy przebiegających procesach jego degradacji. Dynamiczny rozwój metod analitycznych przynosi wciąż rozwiązania, których adaptacja w obszarze badań materialnego dziedzictwa kultury pozwala uzyskać nowe informacje o obiekcie w sposób dla niego bezpieczny. Przykładami z ostatnich lat mogą być techniki optycznej tomografii koherencyjnej (OCT) oraz konfokalnej spektrometrii fluorescencji rentgenowskiej (3D-XRF), które umożliwiają analizę warstwowej struktury obiektów bez konieczności wykonywania przekrojów próbek. Dziedzina, która przeżywa ostatnio szczególnie rozkwit, jest widzenie maszynowe (*machine vision*) – grupa metod rejestracji i analizy obrazu, która pozwala przekroczyć ograniczenia ludzkiego wzroku i dostarcza nowych jakościowo i ilościowo danych na temat obrazowanego obiektu lub sceny.

Widzenie maszynowe opiera się na nieinwazyjnej rejestracji światła odbitego od obiektu, różne techniki należące do tej kategorii metod znalazły zatem szybko zastosowanie w badaniach zabytków i dzieł sztuki. Przykładem może być obrazowanie trójwymiarowe, wielomianowe mapy tekstury czy obrazowanie hiperspektralne, któremu poświęcony jest ten artykuł.

Obrazowanie hiperspektralne jest techniką pochodną w stosunku do standardowej fotografii cyfrowej, w której obraz rejestrowany jest w trzech zakresach długości fali, odpowiadających kanałom: niebieskiemu, zielonemu i czerwonemu. Obraz hiperspektralny składać się może z setek pojedynczych obrazów rejestrowanych przy ściśle określonych długościach fali, przez co dostarcza znacznie więcej informacji o obiektach od tradycyjnej fotografii cyfrowej. Możliwa do uzyskania duża rozdzielczość spektralna tej techniki (2 nm i lepiej) pozwala przedstawiać rejestrowane dane jako dwuwymiarową mapę widm refleksyjnych, co otwiera drogę do nowego rodzaju interpretacji ilościowej (np. pomiar barwy) i jakościowej (np. identyfikacja związków chemicznych) obrazów. W zależności od cech konstrukcyjnych kamery hiperspektralnej rejestrowane mogą być dane obejmujące szeroki zakres promieniowania elektromagnetycznego – od ultrafioletu, przez zakres widzialny, do podczerwieni. Przykładową konfigurację sprzętową do obrazowania hiperspektralnego przedstawiono na fot. 1.

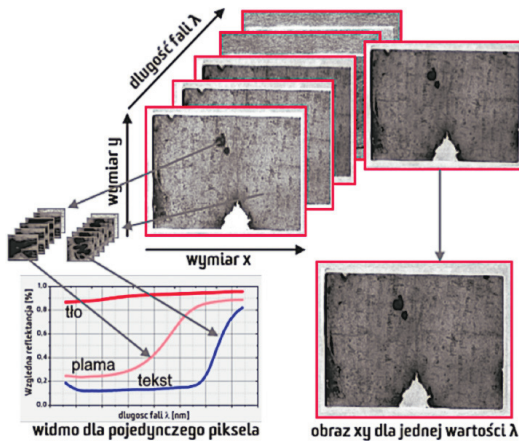


Fot. 1.

Przykładowa konfiguracja sprzętu do obrazowania hiperspektralnego: 1 – kamera hiperspektralna pracująca w zakresie od ultrafioletu do bliskiej podczerwieni (w zależności od parametrów technicznych) wraz z obiektywem; 2 – światłowodowe wyprowadzenie wiązki zakończone obiektywem cylindrycznym formującym światło w linię świetlną; 3 – lampa halogenowa; 4 – zmotoryzowany precyzyjny stolik umożliwiający ruch próbki w osi y; 5 – komputer z oprogramowaniem do rejestracji danych

Początki techniki obrazowania hiperspektralnego (*Hyperspectral Imaging*, HSI) to lata 70. XX wieku i zastosowania militarne, w których wykorzystywano zainstalowane na satelitach i samolotach kamery umożliwiające rejestrację kilku kanałów spektralnych (4–10). Obecnie dostępne są urządzenia pozwalające na rejestrację ponad 200 kanałów spektralnych przy jednoczesnym zachowaniu ciągłości pomiędzy nimi¹. Istotnym obszarem wykorzystywania HSI jest wciąż wojskowość i bezpieczeństwo. Technika ta znajduje także szerokie zastosowa-

1 J. Qin et al., *Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality*, „Journal of Food Engineering” 2013, vol. 118, no. 2, s. 157–171, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877413001659 [dostęp: 19.11.2014].



Fot. 2.

Przykładowa zawartość kostki danych spektralnych otrzymywana podczas rejestracji obrazowaniem hiperspektralnym. Zbiór danych posiada trzy wymiary: dwa geometryczne i jeden wymiar spektralny. Pozwala to przeglądać obraz obiektu w dowolnej zarejestrowanej długości fali, a dla wybranego piksela bądź obszaru pozwala uzyskać pełną informację spektralną, służącą później m.in. do identyfikacji materiału barwnego

nie w przemyśle, w kontroli jakości produkcji, w ochronie środowiska, w poszukiwaniu minerałów, w kryminalistyce oraz w badaniu dziedzictwa kultury.

HSI jest szczególnie cenne w dwóch ostatnich z wymienionych obszarów ze względu na nieinwazyjność pomiaru oraz fakt, że nie jest to technika punktowa, jak wiele innych technik analitycznych, lecz umożliwia rejestrację danych dla całego obiektu bez względu na jego rozmiar². Pojedyncza rejestracja danych jest stosunkowo szybka i badany obiekt jest wystawiany na działanie promieniowania przez krótki, liczony w sekundach czas. Uzyskany cyfrowy obraz, zwany kostką danych (ang. *Datacube*; pokazany schematycznie na fot. 2), jest nie tylko podstawą do dalszych analiz służących na przykład znalezieniu w nim różniących się spektralnie elementów, ale również stanowi cyfrową kopię o wierności odwzorowania cech powierzchni daleko przekraczającej tradycyjne techniki reprodukcji cyfrowej. Obrazowaniu HSI można poddać każdy obiekt, bez względu na jego stan zachowania i rozmiar – rejestracje HSI można prowadzić za pośrednictwem satelity, teleskopu czy mikroskopu. Aparatura służąca do

² H. Liang, *Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation*, „Applied Physics A” 2011, vol. 106, no. 2, s. 309–323, <http://link.springer.com/10.1007/s00339-011-6689-1> [dostęp: 27.03.2014].

rejestracji obrazów HSI poddaje się miniaturyzacji – w 2015 roku pojawiły się pierwsze kamery zaprojektowane do montażu na dronach. W obecnym stanie rozwoju tej techniki rejestracje HSI można przeprowadzić praktycznie w dowolnym miejscu³.

Podstawą analizy danych spektralnych są metody chemometryczne, które można stosować w celu identyfikacji, mapowania stężeń czy monitorowania procesów (np. starzenia dokumentów pod wpływem różnych czynników). W przypadku analizy dokumentów HSI, oprócz wykonania operacji typowych dla fotografii i wymienionych wcześniej zastosowań, umożliwia zwiększenie kontrastu i wydobywanie ukrytych informacji (znaków wodnych, wyblakłych fragmentów) czy śladów celowych zabiegów na dokumentach, wykorzystując powiązanie danych spektralnych i danych obrazowych⁴. Dzięki obrazowaniu hiperspektralnemu można uzyskać informacje w skali subpikselowej, a przez to wykonać bardzo szczegółową analizę obiektu i dokonać rozpoznania bardzo podobnych próbek. Opisanie wcześniej cechy HSI pozwoliły zastosować ją w dziedzinach konserwacji sztuki, historii sztuki i archeologii. Poniżej zaprezentowane zostaną główne zastosowania dla obrazowania hiperspektralnego podjęte w obecnie prowadzonych badaniach związanych z ochroną dziedzictwa kulturowego.

Analiza dokumentów

Pigmenty, atramenty, znaki wodne, jak również plamy pojawiające się często w historycznych dokumentach są badane i opisywane z użyciem metod chemometrycznych. Dzięki nim można odczytać trudno dostępny tekst, wykryć

3 F. G. France, *Advanced Spectral Imaging for Noninvasive Microanalysis of Cultural Heritage Materials: Review of Application to Documents in the U.S. Library of Congress*, „Applied Spectroscopy” 2011, vol. 65, no. 6, s. 565–574, www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=as-65-6-565 [dostęp: 9.05.2015]; H. Liang, op. cit.

4 S. J. Kim et al., *Interactive visualization of hyperspectral images of historical documents*, „IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics” 2010, vol. 16, no. 6, s. 1441–1448, www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20975185 [dostęp: 25.09.2016].

zniszczenia i dokonać ich klasyfikacji, a także ujawnić innego typu operacje wykonywane na dokumencie. Do badań tego rodzaju zwykle wykorzystywane są konwencjonalne metody spektroskopii refleksyjnej, obejmujące użycie spektrometrów UV-Vis-NIR lub spektroskopii w świetle widzialnym (FORS, ang. *Fiber Optics Reflectance Spectroscopy*)⁵. Metody te są niedestrukcyjne, lecz nie dają od razu informacji o całym obiekcie i ograniczają się zwykle do pojedynczych punktów pomiarowych. Wykorzystanie HSI rozszerza możliwości aplikacji metody spektroskopii refleksyjnej do identyfikacji pigmentów, monitorowania zmiany koloru (przez wyznaczenie wskaźników barwy na podstawie danych spektralnych, np. w przestrzeni CIEL*a*b*), określania zgodności kolorów oraz samej dokumentacji i archiwizacji danych⁶. Archiwizacja danych w obecnych czasach łączy się z procesem cyfryzacji obiektów, czyli procesem konwersji i przeniesienia informacji o obiektach świata rzeczywistego na informacje w formie cyfrowej⁷. Ponieważ HSI jest również metodą fotografii, badany obiekt posiada po rejestracji swoją wersję cyfrową. W ostatnich latach w literaturze można znaleźć wiele zastosowań analizy dokumentów wspomaganą metodą HSI. Badanie żółknięcia papieru, starzenia się atramentów, uszkodzenia biologiczne i chemiczne obiektów, rozróżnianie stosowanych atramentów, wyodrębnianie wybranych elementów czy zwiększanie czytelności zniszczonych części i całych dokumentów to najczęstsze tematy i wyzwania dla obrazowania spektralnego⁸.

⁵ M. Bacci et al., *Fiber Optics Reflectance Spectroscopy in the Entire VIS-IR Range: a Powerful Tool for the Non-invasive Characterization of Paintings*, „MRS Proceedings” 2011, vol. 852, s. OO2.4.1–OO2.4.6, http://journals.cambridge.org/abstract_S194642740008074X [dostęp: 9.05.2015].

⁶ M. Kubik, *Hyperspectral Imaging: A New Technique for the Non-Invasive Study of Artworks*, w: *Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage*, t. 2, red. D. Creagan, D. Bradley, Amsterdam 2007, s. 199–259.

⁷ P. Shiel, *Hyperspectral Image Analysis for Questioned Historical Documents*, praca magisterska, National University of Ireland Maynooth 2010, <http://eprints.maynoothuniversity.ie/2659/> [dostęp: 25.09.2016].

⁸ S. J. Kim, F. Deng, M. S. Brown, *Visual enhancement of old documents with hyperspectral imaging*, „Pattern Recognition” 2011, vol. 44, no. 7, s. 1461–1469, www.sciencedirect.com/

Żółknięcie i starzenie dokumentów i obrazów

Barwa jest bardzo ważnym elementem rysunków, jest też elementem najbardziej czułym na degradację. Procesy żółknięcia, ciemnienia czy blaknięcia powodują, że dany obiekt ulega starzeniu, zmieniając swoje właściwości. Ma to istotny wpływ na zmianę sposobu odbioru wizualnego dzieła⁹. Żółknięcie często postrzegane jest jako jedna z wczesnych oznak starzenia i pogorszenia jakości papieru. W zależności od natury papieru oraz warunków przechowywania żółty kolor, pojawiający się po pewnym czasie, może zmienić się w brązowy, a papier stać się łamliwy i kruchy¹⁰. Proces żółknięcia powoduje absorpcja promieniowania w niebieskiej części widma światła widzialnego¹¹. Wizualnie zażółcenia związane są z degradacją obiektu przez światło, czynniki chemiczne lub poprzez warunki przechowywania. Proces żółknięcia papieru przyspieszany jest przez tworzenie się nowych grup funkcyjnych zachowujących się jak akceptory. Powstają one w reakcjach utleniania¹² i procesie absorpcji światła¹³ przez chromofory związków

science/article/pii/S0031320311000045 [dostęp: 21.03.2014]; B. J. Aalderink et. al., *Quantitative Hyperspectral Imaging Technique for Condition Assessment and Monitoring of Historical Documents*, „The Book and Paper Group Annual” 2010, vol. 29, s. 121-126, www.cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v29/bp29-20.pdf [dostęp: 25.04.2014].

- 9 M. Kubik, *Preserving the Painted Image: The Art and Science of Conservation*, „JAIC – Journal of the International Colour Association” 2010, vol. 5, s. 1-8, <http://jaic.jsitservices.co.uk/index.php/JAIC/article/view/12> [dostęp: 26.04.2014].
- 10 H. A. Carter, *The Chemistry of Paper Preservation: Part 2. The Yellowing of Paper and Conservation Bleaching*, „Journal of Chemical Education” 1996, vol. 73, no. 11, s. 1068, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed073p1068> [dostęp: 25.09.2016].
- 11 *Ageing and stabilisation of paper*, red. M. Strlič, J. Kolar, Ljubljana 2005.
- 12 A. Mosca Conte et al., *Role of Cellulose Oxidation in the Yellowing of Ancient Paper*, „Physical Review Letters” 2012, vol. 108, no. 15, s. 158301.1-158301-5, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.108.158301> [dostęp: 25.04.2014].
- 13 C. Heitner, *Light-induced yellowing of wood-containing papers. An evolution of the mechanism*, „Photochemistry of Lignocellulosic Materials” 1993, vol. 531, s. 2-25.

wchodzących w skład papieru, do których należą: celuloza, hemiceluloza, lignina, zanieczyszczenia drewna, barwniki, środki klejące oraz inne dodatki¹⁴. Reakcje te skutkują powstaniem produktów degradacji papieru zawierających grupy karbonylowe (C=O) oraz wiązania podwójne pomiędzy węglami (C=C), przy niekontrolowanych warunkach, takich jak podwyższona temperatura i wilgotność oraz obecność zanieczyszczeń (jak np. SO₂ i NO₂)¹⁵. Proces starzenia się papieru zależy od warunków jego przechowywania. W warunkach uznawanych za odpowiednie do przechowywania materiałów papierowych (2–18 °C; 30–40% rh)¹⁶ proces starzenia jest bardzo powolny, jednak i tak nieuchronnie prowadzi do znanych efektów starzenia, np. opisanego żółknięcia.

Efekty starzenia mogą być łatwo rozpoznawalne gołym okiem, jednak wykorzystanie do tego celu obrazowania hiperspektralnego pozwala uzyskać informacje ilościowe w sposób dokładny¹⁷. Konwencjonalne metody używane w kolorymetrii, jak spektrofotometria, można zastąpić bardziej efektywnym obrazowaniem hiperspektralnym. Działanie metod konwencjonalnych limitowane jest przez stosowane spektrofotometry, które pozwalają na pomiar jednego punktu w danym czasie. Stwarza to istotne trudności przy powtarzaniu pomiarów, natomiast uzyskane dane mogą nie być reprezentatywne dla analizowanego obiektu. Obrazowanie hiperspektralne ograniczyło te bariery, pozwalając na zwiększenie efektywności analizy poprzez umożliwienie wykonania jednoczesnego pomiaru całego obiektu złożonego z milionów

¹⁴ H. A. Carter, op. cit.

¹⁵ *Ageing and stabilisation of paper*, op. cit.; H. A. Carter, op. cit.; G. W. Lundeen, *Preservation of paper based materials: Present and future research and developments in the paper industry*, w: *Conserving and preserving library materials*, red. K. L. Henderson, W. T. Henderson, Urbana-Champaign 1983, s. 73–88, <http://hdl.handle.net/2142/459> [dostęp: 26.04.2014].

¹⁶ ISO 11799:2003 *Information and documentation. Document storage requirements for archive and library materials*, 2003, s. 14.

¹⁷ M. Kubik, *Preserving the Painted Image...*, op. cit.

pikseli¹⁸. Dane spektralne uzyskiwane są w formie trójwymiarowej reprezentacji – kostki informacji spektralnych, a ich analiza pozwala na wyodrębnienie użytecznej informacji zawierającej całe widmo refleksyjne dla każdego punktu obiektu. Zbierając widma odbiciowe, można monitorować żółknięcie lakierów i farb na obrazach w konkretnym położeniu na analizowanym dziele. Przez porównanie widm czystej powierzchni obrazu i żółkniętej można stwierdzić, jak ten proces wpływa na właściwości spektralne oraz ocenić stopień zaistniałej zmiany. Lokalizacja zmiany na obiekcie pozwala podjąć kroki konserwatorskie w konkretnym miejscu, nie narażając reszty powierzchni obiektu na dodatkowy kontakt z odczynnikami chemicznymi.

Obrazowanie hiperspektralne wykorzystywane jest w badaniach procesu zmiany barwy czy badań nad efektami czyszczenia obiektu¹⁹. Wyniki pomiarów stopnia żółknięcia przedstawia się również przy pomocy wskaźnika żółknięcia, który jest wielkością obliczaną na podstawie danych spektralnych i opisuje zmianę barwy próbki od białej (czystej) do żółtej. Test ten jest powszechnie stosowany do oceny zmiany barwy w materiale spowodowanej rzeczywistą lub symulowaną ekspozycją na powietrze. Odporność na światło zwykle zmniejsza się wraz ze wzrostem wilgotności powietrza, zależy również od stopnia wniknięcia barwnika w strukturę podłoża²⁰. Opisane efekty mają swoje odzwierciedlenie w zamianie charakterystyki spektralnej danych składników, a ta charakterystyka może być przetransformowana matematycznie do odpowiedniej skali, dlatego zmiany te mogą być analizowane przez obrazowanie hiperspektralne, dając w szybki i wygodny sposób informacje jakościowe.

¹⁸ Ibidem.

¹⁹ Ibidem.

²⁰ M. Karlovits, D. Gregor-Svetec, *Durability of Cellulose and Synthetic Papers Exposed to Various Methods of Accelerated Ageing*, „Acta Polytechnica Hungarica” 2012, vol. 9, no. 6, s. 81–100, www.uni-obuda.hu/journal/Karlovits_Gregor-Svetec_38.pdf [dostęp: 26.04.2014].

Starzenie atramentów

Istotną rolę w procesie degradacji dokumentów historycznych odgrywa skład chemiczny papieru, jak również sam atrament i proces jego korozji²¹. Właściwości poszczególnych atramentów (światłotrwałość, odporność alkaliczna, odporność na rozpuszczalniki) są obecnie regulowane normami krajowymi i międzynarodowymi. Stosowane farby drukarskie stanowią złożoną mieszaninę różnych składników, które zostały zaklasyfikowane do grup na podstawie funkcji, jaką pełnią w matrycy atramentu, a sama kompozycja atramentu zależy znacząco od technologii druku. Dane barwy atramentów są wynikiem połączenia barwników i pigmentów. Ostatnie badania przeprowadzane pod kątem analizy stabilności dla czarnych i kolorowych farb do druku offsetowego w procesach przyspieszonego starzenia wykazują, że różne barwy cechują się inną stabilnością. Na przykład czarny tusz do druku utrzymuje chemiczne i wizualne właściwości lepiej niż badane w tych samych warunkach przyspieszonego starzenia kolorowe tusze offsetowe (magenta i żółty)²².

Barwniki stosowane na dokumentach historycznych obejmują ogromną grupę różnych substancji, z których każda ma specyficzne właściwości chemiczne i fizyczne oraz inny sposób reagowania z podłożem (np. papierem) i warunkami środowiskowymi. Barwniki te badane były zwykle konwencjonalnymi metodami, głównie przez pomiary spektroskopii w podczerwieni (FTIR, ang. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) i spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej (XRD, ang. *X-ray Diffraction*). HSI może stanowić ważne narzędzie do określania dystrybucji substancji wykorzystywanych do pisania. Zastosowanie to wynika głównie z samej idei metody – badania całego obiektu i uzyskiwania bardzo szczegółowych danych już podczas pojedynczego pomiaru. Ważną cechą tej techniki przy analizie atramentów jest

21 *Hyperspectral Data Exploitation: Theory and Applications*, red. Ch-I. Chang, Hoboken 2007.

22 M. Maraval, F. Flieder, *The Stability of Printing Inks*, „Restaurator” 1993, vol. 14, no. 3, s. 141–171.

to, że nie wymaga dokładnego określenia obszaru, który nas interesuje (tzw. ROI – *Region of Interest*), a sam ROI może być wielokrotnie zmieniany, nie wydłużając przy tym czasu pomiaru. Ryzyko braku interesujących i wartościowych informacji ze względu na niewłaściwy wybór ROI jest minimalizowane. Kolejną cechą HSI jest możliwość zastosowania do analizy otrzymanych wyników spektralnych metod chemometrycznych – algorytmów matematycznych stosowanych w celu uzyskania map rozmieszczenia przestrzennego, np. obszarów pogorszenia jakości tuszu czy śledzenia procesu starzenia w czasie²³.

Powszechnie używane w teledetekcji metody klasyfikacji mają swoje zastosowanie również przy analizie składników i rozmieszczenia śladów pisma. Dane można użyć do wizualizacji niejednorodności tuszów i okolic podłoża dotkniętych degradacją chemiczną, jak np. zmiany właściwości papieru wywołane przez migrację jonów żelaza(II) – składnika atramentu żelazowo-galusowego, znanego od starożytności²⁴. Obrazowanie hiperspektralne bądź multispektralne może służyć dokumentacji procesu starzenia²⁵, dzięki czemu można śledzić zmianę właściwości atramentów, nawet jeśli nie są widoczne dla ludzkiego oka. Dodatkowo HSI daje możliwość ucytelnienia tekstu po procesie starzenia.

Uszkodzenia fizyczne i biologiczne obiektów

Analiza spektralna może zostać wykorzystana do badania cech obiektów (dokumentów, malunków itd.) wystawionych na ekspozycję czynników biologicznych,

23 S. J. Kim et al., op. cit.

24 S. Tse et al., *Effect of Aqueous Treatments on Nineteenth-Century Iron-Gall-Ink Documents: Assessment Using Hyperspectral Imaging*, „The Book and Paper Group Annual” 2009, vol. 28, s. 75–82; M. Kubik, *Hyperspectral Imaging...*, op. cit.; *Ageing and stabilisation of paper*, op. cit.

25 A. Giacometti et al., *Cultural Heritage Destruction: Documenting Parchment Degradation via Multispectral Imaging*, „Electronic Visualisation and the Arts” 2012, s. 301–308, http://ewic.bcs.org/upload/pdf/ewic_ev12_s17paper2.pdf [dostęp: 11.01.2015].

ze względu na powiązanie zmian wizualnych tych dokumentów w zależności od gatunku i stanu rozwoju mikroorganizmów. Zdecydowanie najważniejsze są tutaj bakterie i grzyby, gdyż stanowią poważne zagrożenie dla każdego materiału historycznego, z uwagi na ich bardzo szybki i trwały sposób atakowania podłoża, często z katastrofalnymi skutkami. Dodatkowo, dokładne określenie uszkodzeń podłoża jest trudne do wykrycia, np. z powodu możliwej korozji atramentu w przypadku historycznych obiektów²⁶. Obrazowanie hiperspektralne może posłużyć tutaj do monitorowania wpływu działania mikroorganizmów na sam papier, jak i na stan atramentu oraz innych substancji nanoszonych na powierzchnię. Technika ta może również zapewnić ocenę jakościową i ilościową wpływu stosowanych czynników mających usunąć mikroorganizmy na stan papieru bądź innego podłoża.

Rozróżnianie atramentów

Aby umożliwić identyfikację różnych materiałów konieczny jest rozwój baz widm referencyjnych. Zastosowanie ich umożliwia nieinwazyjne rozróżnianie podobnych wizualnie organicznych i nieorganicznych barwników i pigmentów. Stosowane materiały referencyjne powinny obejmować próbki naturalne i modelowe poddane przyspieszonemu starzeniu pod wpływem czynników środowiskowych, ponieważ może to wywołać odmienną odpowiedź uzyskiwaną podczas rejestracji widma różnych materiałów. Badania porównawcze mogą być prowadzone z wykorzystaniem obrazowania hiperspektralnego²⁷. Dodatkowo, w celu wizualizacji danych możliwe jest zastosowanie specjalnych algorytmów i metod chemometrycznych, które w efektywny sposób pozwalają odróżnić na przykład oryginalne pismo od poprawek naniesionych w późniejszym okresie (np. metody bazujące na pomiarze kąta spektralnego czy odległości spektralnej).

²⁶ M. E. Klein et al., *Quantitative Hyperspectral Reflectance Imaging*, „Sensors” 2008, vol. 8, no. 9, s. 5576–5618, www.mdpi.com/1424-8220/8/9/5576/htm [dostęp: 11.01.2015].

²⁷ Ibidem.

Ostatnio w literaturze można znaleźć informacje na temat hiperspektralnej segmentacji²⁸. Metoda ta opiera się na rozdzieleniu i segmentacji różnych atramentów na podstawie pomiaru i analizy ich właściwości odczytanych z widma odbiciowego. Jest ona szczególnie przydatna do rozróżniania tekstu, który był tworzony przez różnych autorów w długim okresie czasu. Dodatkowo, oprócz analizy widmowej, możliwe jest przedstawienie wyników w formie graficznej, pozwalającej łatwo wskazać elementy zmienione podczas późniejszej edycji dokumentu.

*Wykrywanie niewidocznych elementów
i zwiększenie czytelności*

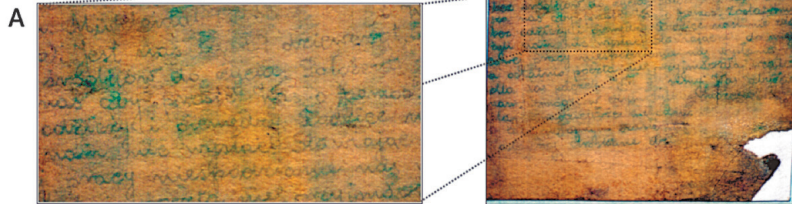
Odtworzenie całej zawartości dokumentów historycznych jest szczególnie ważne dla osób zainteresowanych ich datowaniem, ustalaniem pochodzenia czy odnajdywaniem nieznanymi informacjami (fot. 3 przedstawia przykład dokumentu historycznego, którego treść odzyskano przy pomocy HSI i metod chemometrycznych). Jednak ze względu na zwykle postępującą degradację tych dokumentów, poszukiwane cechy są ukryte lub słabo wykrywalne za pomocą konwencjonalnych metod analitycznych: metody wzrokowej lub standardowych technik obrazowania²⁹. W niektórych przypadkach pogorszenie stanu dokumentów historycznych jest spowodowane procesami, takimi jak blaknięcie w czasie czy pojawienie się przebarwień. W innym przypadku tekst może być zmieniany w sposób intencjonalny przez późniejszych edytorów.

Stosując szeroki zakres promieniowania, od promieniowania z zakresu UV do bliskiej podczerwieni, metoda HSI pozwala na analizę historycznych dokumentów w poszukiwaniu ukrytych treści. Takie wykorzystanie promieniowania poza zakresem widzialnym stosowane jest od lat w badaniach obiektów zabytkowych. Tą drogą można wykryć na przykład drugie warstwy w obrazach

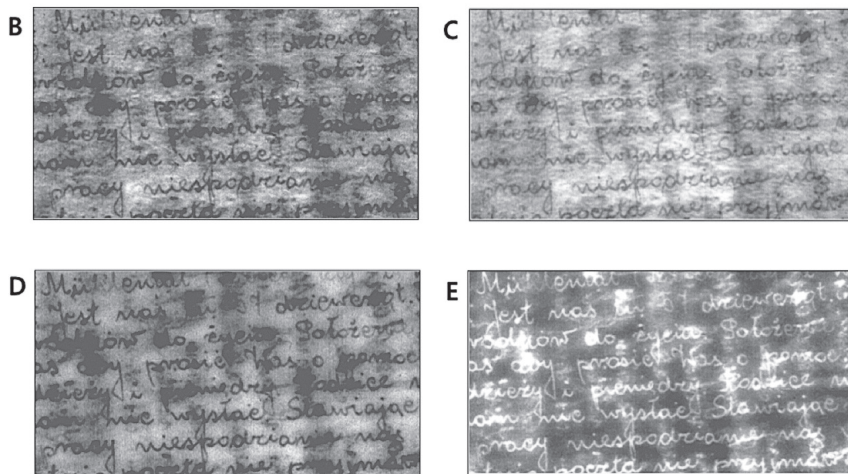
²⁸ *Kodikologie und Paläographie im digitalen Zeitalter*, red. M. Rehbein, P. Sahle, T. Schaßan, Norderstedt 2009, <http://kups.ub.uni-koeln.de/2939/> [dostęp: 11.01.2015].

²⁹ P. Shiel, op. cit.

Obraz RGB dokumentu przed
analizą hiperspektralną:



Obraz po analizie hiperspektralnej:



Fot. 3.

Przykład dokumentu poddanego analizie hiperspektralnej, mającej na celu ucztylnienie tekstu z wykorzystaniem metod chemometrycznych: A) wycinek dokumentu przed analizą; B) wynik analizy z wykorzystaniem metody PCA (ang. *Principal Component Analysis*, bazującej na macierzy korelacji), wyraźne odtworzenie wymytego tekstu; C) wynik analizy metodą PCA (macierz kowariancji); D) wynik analizy metodą ICA (ang. *Independent Component Analysis*); również dobra separacja linii atramentowych; E) obraz po analizie metodą MNF (ang. *Minimum Noise Factor*). Podziękowania za udostępnienie dokumentu do analizy dla Pani Wioletty Bachur z Muzeum Żydowskiego Instytutu Historycznego im. Emanuela Ringelbluma w Warszawie

oraz dokonać analizy tekstu dokumentu pisanego atramentem niewidocznym gołym okiem.

Generalnie istnieją dwie metody wykorzystania promieniowania z zakresu UV – rejestracja promieniowania odbitego od powierzchni obiektu i rejestracja widzialnej fluorescencji. Obie metody można łatwo zastosować, używając ogólnie dostępnego sprzętu fotograficznego i specjalnych filtrów promieniowania³⁰. Wiele substancji, zarówno organicznych, jak i nieorganicznych, wykazuje charakterystyczną emisję fluorescencji UV, ukazując cechy obiektów niewidoczne w świetle widzialnym. Z drugiej strony, niektóre farby i pigmenty wizualnie identyczne są często różne w bliskiej podczerwieni (780–2500 nm)³¹, ponieważ odbijają lub pochłaniają w tym obszarze zupełnie inaczej niż w zakresie widzialnym. Zastosowanie promieniowania z zakresu IR pozwala uzyskać informacje na temat warstw ukrytych pod rysunkami czy pismem. Przy większej długości fali (mniejszej energii) przenikanie promieniowania następuje w większym stopniu, aż do odsłonięcia warstwy podłoża w bliskiej podczerwieni. Inne zachowanie się barwników w tym świetle pozwala na ich łatwe zróżnicowanie. Fotografia w podczerwieni znajduje zastosowanie również w analizie innych materiałów. Zakres ten jest pomocny przy odsłanianiu znaków z pokrytych patyną lub inną warstwą ceramik czy szkła³².

W czasach historycznych w celu poprawienia czytelności zniszczonych części dokumentów lub odtworzenia ukrytych informacji stosowano specjalne roztwory chemiczne. Długofalowe efekty działania tych czynników nie były przedmiotem głębszych rozważań. Znane z historii przykłady zdobywania informacji tą drogą obejmują różne pergaminy pochodzące z palimpsestów,

30 K. Janssens, *X-ray based methods of analysis*, „Comprehensive Analytical Chemistry” 2004, vol. 42, s. 129–226, [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-526X\(04\)80008-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-526X(04)80008-4) [dostęp: 25.09.2016].

31 M. Kubik, *Hyperspectral Imaging...*, op. cit.

32 K. Janssens, op. cit.

jak i odczynniki wykorzystywane do karbonizowania papirusu w celu zwiększenia kontrastu między podłożem a farbą³³.

Wiele dawnych tekstów uległo również zniszczeniu w wyniku pożarów czy złych warunków przechowywania. Doskonałym przykładem mogą być tutaj stosunkowo niedawno odkryte tzw. Zwoje z Petra (ang. *The Scrolls of Petra*), które około roku 600 zostały zniszczone w pożarze kościoła. Obecnie są to jedyne dokumenty opisujące VI-wieczne miasto Petra, które uległo zniszczeniu w 551 roku w wyniku trzęsienia ziemi. Unikalne wykorzystanie technologii cyfrowych może posłużyć do wyodrębnienia ze zdegradowanych dokumentów, czy tych, z których usunięto poprzedni tekst, informacji niewidocznych dla oka³⁴. Przykład ten pozwala stwierdzić, że obrazowanie hiperspektralne jest cenną alternatywą dla uzyskiwania większej czytelności tekstów, jak i innych elementów, bez destrukcyjnego i inwazyjnego, bezpośredniego działania na dany obiekt³⁵. Innym słynnym przykładem sukcesu w uczytelnianiu zakrytego tekstu są wyniki badań nad amerykańską *Deklaracją Niepodległości*. Wykazano, że Thomas Jefferson, gdy używany przez niego atrament był jeszcze mokry, wykreślił i usunął słowo „poddani” i zastąpił słowem „obywatele”, a naukowcy wytłumaczyli to odkrycie przepisywaniem przez Jeffersona pierwszej strony *First Draft of the Virginia Constitution*³⁶. Jak wspomniano, analiza z wykorzystaniem obrazowania hiperspektralnego daje możliwość odtworzenia znaków wodnych, jak również elementów niebędących częścią jawną obrazu. Przykładem tutaj mogą być różne odciski, np. odbite wzory ram czy mikrouszkodzenia powierzchni. Zastosowanie HSI umożliwia nadanie ostrości dokumentowi i wizualizację wybranego

33 M. E. Klein et al., op. cit.

34 D. M. Chabries, S. W. Booras, G. H. Bearman, *Imaging the past: recent applications of multispectral imaging technology to deciphering manuscripts*, „Antiquity” 2003, vol. 77, no. 296, s. 359–372.

35 F. G. France, op. cit.; M. Attas et al., *Near-infrared spectroscopic imaging in art conservation: Investigation of drawing constituents*, „Journal of Cultural Heritage” 2003, vol. 4, no. 2, s. 127–136.

36 F. G. France, op. cit.

obszaru. Opcja ta jest szczególnie przydatna dla konserwatorów sztuki, którzy łatwo mogą wskazać obszary wymagające naprawy, często bardzo trudne do zlokalizowania metodami konwencjonalnymi. Poprzez pokazanie uszkodzonego miejsca w kontekście całego dokumentu, konserwator może dokonać fizycznej naprawy w odpowiednim obszarze dokumentu, ograniczając działanie odczynników chemicznych bądź procesów fizycznych na cenny historycznie obiekt³⁷.

Analiza obrazów

Jednym z przykładów zastosowania obrazowania hiperspektralnego w analizie obrazów były pomiary wykonane ostatnio na obrazie Leonarda da Vinci *Mona Lisa*³⁸. Dzięki nim można było odtworzyć oryginalną paletę barw dzieła, a także ujawnić wcześniej stworzone szkice przez malarza. Dodatkowo pomiary doprowadziły do odkrycia szczegółów powstawania i zmian koncepcji podczas malowania.

Interesujące jest również zastosowanie analizy bazującej na wykorzystaniu źródeł światła pokrywających regiony UV i podczerwieni przy rejestracji powierzchni obrazów. Jak wspomniano wcześniej, tą drogą – przez wykorzystanie faktu różnej penetracji warstw malarskich przez światło o różnej energii – można zróżnicować stosowane przy tworzeniu dzieła materiały. Dane literaturowe przywołują, jako użyteczny, zakres widmowy w przypadku analizy obrazów zwykle wynoszący 400–1000 nm z powodu interferencji pochodzących od lakierów poniżej 400 nm³⁹.

HSI wykorzystywane jest do wykrywania fałszerstwa obiektów, ponieważ poza typową oceną wizualną dostarcza informacji na temat charakterystyki

³⁷ S. J. Kim et al., op. cit.

³⁸ M. Elias, P. Cotte, *Multispectral camera and radiative transfer equation used to depict Leonardo's sfumato in Mona Lisa*, „Applied Optics” 2008, vol. 47, no. 12, s. 2146–2154, <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-47-12-2146> [dostęp: 1.02.2015].

³⁹ M. Kubik, *Hyperspectral Imaging...*, op. cit.

użytych farb czy podłoża. Należy zauważyć, że materiały malarskie stosowane obecnie zwykle znacznie różnią się składem chemicznym od tych używanych w dawnych czasach. Informacje o składzie pigmentów i barwników użyteczne są również podczas retuszu obiektów. Poprawianie uszkodzonych obrazów, polegające na uzupełnieniu ubytku farby odpowiednim pigmentem, wymaga szczególnej uwagi. Różne pigmenty/barwniki wyglądające pod jednym światłem tak samo, pod innym wyglądają inaczej. Zjawisko to nazywa się metamerizmem. Identyfikacja stosowanego pigmentu spełnia ważną rolę i należy dążyć do sytuacji, gdy w przyjętych standardowych warunkach oświetleniowych uzyskane barwy miałyby identyczne właściwości odbijania światła. Kompletnie dopasowanie spektralne uzyskiwane jest, gdy użyty zostanie taki sam pigment lub stworzony z tego samego wzorca⁴⁰. Obrazowanie hiperspektralne w łatwy sposób pozwala dokonać klasyfikacji stosowanych pigmentów, bazując na ich widmie refleksyjnym.

40 Ibidem.

Bibliografia

- Aalderink Bernard J. et al., *Quantitative Hyperspectral Imaging Technique for Condition Assessment and Monitoring of Historical Documents*, „The Book and Paper Group Annual” 2010, vol. 29, s. 121–126, www.cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v29/bp29-20.pdf.
- Ageing and stabilisation of paper*, red. Matija Strlič, Jana Kolar, Ljubljana 2005.
- Attas Michael et al., *Near-infrared spectroscopic imaging in art conservation: Investigation of drawing constituents*, „Journal of Cultural Heritage” 2003, vol. 4, no. 2, s. 127–136.
- Bacci Mauro et al., *Fiber Optics Reflectance Spectroscopy in the Entire VIS-IR Range: a Powerful Tool for the Non-invasive Characterization of Paintings*, „MRS Proceedings” 2011, vol. 852, s. OO2.4.1–OO2.4.6, http://journals.cambridge.org/abstract_S194642740008074X.
- Carter Henry A., *The Chemistry of Paper Preservation: Part 2. The Yellowing of Paper and Conservation Bleaching*, „Journal of Chemical Education” 1996, vol. 73, no. 11, s. 1068, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed073p1068>.
- Chabries Douglas M., Booras Steven W., Bearman Gregory H., *Imaging the past: recent applications of multispectral imaging technology to deciphering manuscripts*, „Antiquity” 2003, vol. 77, no. 296, s. 359–372.
- Elias Mady, Cotte Pascal, *Multispectral camera and radiative transfer equation used to depict Leonardo's sfumato in Mona Lisa*, „Applied Optics” 2008, vol. 47, no. 12, s. 2146–2154, <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-47-12-2146>.
- France Fenella G., *Advanced Spectral Imaging for Noninvasive Microanalysis of Cultural Heritage Materials: Review of Application to Documents in the U.S. Library of Congress*, „Applied Spectroscopy” 2011, vol. 65, no. 6, s. 565–574, www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=as-65-6-565.
- Giacometti Alejandro et al., *Cultural Heritage Destruction: Documenting Parchment Degradation via Multispectral Imaging*, „Electronic Visualisation and the Arts” 2012, s. 301–308, http://ewic.bcs.org/upload/pdf/ewic_ev12_s17paper2.pdf.
- Heitner Cyril, *Light-induced yellowing of wood-containing papers. An evolution of the mechanism*, „Photochemistry of Lignocellulosic Materials” 1993, vol. 531, s. 2–25.

- Hyperspectral Data Exploitation: Theory and Applications*, red. Chein-I Chang, Hoboken 2007.
- Janssens Koen, *X-ray based methods of analysis*, „Comprehensive Analytical Chemistry” 2004, vol. 42, s. 129–226, [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-526X\(04\)80008-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-526X(04)80008-4).
- Karlovits Mirica, Gregor-Svetec Diana, *Durability of Cellulose and Synthetic Papers Exposed to Various Methods of Accelerated Ageing*, „Acta Polytechnica Hungarica” 2012, vol. 9, no. 6, s. 81–100, www.uni-obuda.hu/journal/Karlovits_Gregor-Svetec_38.pdf.
- Kim Seon J. et al., *Interactive visualization of hyperspectral images of historical documents*, „IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics” 2010, vol. 16, no. 6, s. 1441–1448, www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20975185.
- Kim Seon J., Deng Fanbo, Brown Michael S., *Visual enhancement of old documents with hyperspectral imaging*, „Pattern Recognition” 2011, vol. 44, no. 7, s. 1461–1469, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320311000045.
- Klein Marvin E. et al., *Quantitative Hyperspectral Reflectance Imaging*, „Sensors” 2008, vol. 8, no. 9, s. 5576–5618, www.mdpi.com/1424-8220/8/9/5576/htm.
- Kodikologie und Paläographie im digitalen Zeitalter*, red. Malte Rehbein, Patrick Sahle, Torsten Schaßan, Norderstedt 2009, <http://kups.ub.uni-koeln.de/2939>.
- Kubik Maria, *Hyperspectral Imaging: A New Technique for the Non-Invasive Study of Artworks*, w: *Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage*, t. 2, red. Dudley Creagh, David Bradley, Amsterdam 2007.
- Kubik Maria, *Preserving the Painted Image: The Art and Science of Conservation*, „JAIC – Journal of the International Colour Association” 2010, vol. 5, s. 1–8, <http://jaic.jsitserver.co.uk/index.php/JAIC/article/view/12>.
- Liang Haida, *Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation*, „Applied Physics A” 2011, vol. 106, no. 2, s. 309–323, <http://link.springer.com/10.1007/s00339-011-6689-1>.
- Lundeen Gerald W., *Preservation of paper based materials: Present and future research and developments in the paper industry*, w: *Conserving and preserving library materials*, red. Kathryn Luther Henderson, William T. Henderson, Urbana-Champaign 1983, s. 73–88, <http://hdl.handle.net/2142/459>.

Maraval Martine, Flieder Françoise, *The Stability of Printing Inks*, „Restaurator” 1993, vol. 14, no. 3, s. 141–171.

Mosca Conte Adriano et al., *Role of Cellulose Oxidation in the Yellowing of Ancient Paper*, „Physical Review Letters” 2012, vol. 108, no. 15, s. 158301, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.108.158301>.

Qin Jianwei et al., *Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality*, „Journal of Food Engineering” 2013, vol. 118, no. 2, s. 157–171, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877413001659.

Shiel Patrick, *Hyperspectral Image Analysis for Questioned Historical Documents*, praca magisterska, National University of Ireland Maynooth 2010, <http://eprints.maynoothuniversity.ie/2659/>.

Tse Season et al., *Effect of Aqueous Treatments on Nineteenth-Century Iron-Gall-Ink Documents: Assessment Using Hyperspectral Imaging*, „The Book and Paper Group Annual” 2009, vol. 28, s. 75–82, <http://cool.conservation-us.org/coolaic/sg/bpg/annual/v28/bp28-16.pdf>.