

Obrazowanie z przekształceniem odbicia. Charakterystyka i zastosowanie metody

PIOTR WITKOWSKI, PAWEŁ L. POLKOWSKI

On Reflectance Transformation Imaging. Characterisation and application of the method

W niniejszym artykule omawiamy fotograficzną metodę dokumentacji powierzchni zabytków, jaką jest „obrazowanie z przekształceniem odbicia” (RTI). Technika ta wykorzystuje serię fotografii przedmiotu, wykonanych z tego samego miejsca, ale przy kontrolowanej i regularnej zmienności kierunku padania światła. Dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu komputerowemu zdjęcia ta przekształcane zostają w interaktywne zobrazowanie, które możemy wirtualnie oświetlać i analizować. Ponadto, RTI oferuje całą gamę trybów i funkcji, dzięki czemu obserwowana powierzchnia ujawnić może takie elementy, które gołym okiem są albo słabo widoczne, albo wręcz zupełnie niedostrzegalne. Metodę tę testujemy na trzech gładzach ze sztuką naskalną, przechowywanych w Muzeum Archeologicznym w Poznaniu.

Słowa kluczowe: RTI – fotografia – dokumentacja – zobrazowanie – sztuka naskalna – zabytek

In this article we describe a photographic method of recording artefact surface, known as Reflectance Transformation Imaging (RTI). This technique utilises multiple (digital) photographs of an object, all taken from the same position, but with light projected from different directions. These pictures are later processed by specialised software, with an interactive RTI image as a final product, which can then be digitally re-lighted and analysed. Moreover, RTI offers a whole array of modes and functions, which can help in disclosing features of a surface, which are barely visible, or even invisible to the naked eye. We have tested this method on three boulders with rock art images, currently on display at the Poznań Archaeological Museum.

Keywords: RTI – photography – documentation – imaging – rock art – artefact

Wstęp

Fotografia cyfrowa to obecnie najpowszechniejsza metoda dokumentacji zabytków archeologicznych, stosowana zarówno w badaniach terenowych, jak i muzealnictwie. Trudno jest przecenić wysoką (z reguły) jakość dokumentacji fotograficznej w stosunku do krótkiego czasu, jaki potrzebny jest do jej pozyskania i ewentualnego przetworzenia. Warunki, w jakich wykonuje się fotografie, umiejętności fotografującego, a także jakość sprzętu fotograficznego, wpływają jednak na wartość, jaką pozyskane zdjęcia prezentują zwłaszcza w wymiarze analitycznym, np. w badaniach naukowych, czy też działaniach konserwatorskich.

Od początku XXI w. jesteśmy świadkami gwałtownego rozwoju różnych technik (foto)graficznych, dzięki którym dokumentację archeologiczną i konserwatorską cechuje coraz większa dokładność w od-

wzorowywaniu rejestrowanych przedmiotów. Skanery 3D pozwalają na tworzenie trójwymiarowych modeli, choć koszty wykonania tego rodzaju dokumentacji często przekraczają możliwości budżetowe wielu instytucji. Zbliżony potencjał oferuje coraz częściej stosowana metoda fotogrametrii, lecz i w tym wypadku przeszkodą w jej zastosowaniu mogą być koszty – przede wszystkim oprogramowania. Także badania za pomocą spektroskopu stanowią niemałą inwestycję, jeśli konieczny jest zakup sprzętu. Najmniejszy wydatek wiąże się prawdopodobnie z fotografią multispektralną, choć i w tym wypadku łączny koszt kilkunastu filtrów jest niemały.

Można jednak sięgnąć po techniki dokumentacyjne, które nie wymagają wysokich nakładów finansowych, a które jednocześnie oferują uzyskanie dokumentacji o znacznie większym potencjale analitycznym niż standardowa fotografia cyfro-

wa. Jedną z takich metod jest obrazowanie z przekształceniem odbicia (ang. Reflectance Transformation Imaging, dalej: RTI), która pozwala na wygenerowanie modelu 2D+ fotografowanego przedmiotu i jego analizę poprzez kontrolowaną symulację oświetlania jego powierzchni.

Choć RTI posiada znacznie więcej zalet, to już na wstępie podkreślić można dwie zasadnicze: po pierwsze, koszty jej zastosowania są znacznie niższe niż większości innych sposobów modelowania obiektów, a po drugie, zastosowanie metody RTI nie wymaga od użytkownika zaawansowanej wiedzy technologicznej. Redukcja kosztów finansowych wiąże się z możliwością wykorzystywania bezpłatnego oprogramowania, a także z tym, że aparat fotograficzny dobrej jakości jest dziś często standardowym wyposażeniem zarówno ekspedycji archeologicznych, jak i pracowni muzealnych. Nieliczne pozostałe elementy niezbędne do wytworzenia dokumentacji metodą RTI są relatywnie tanie (większym wydatkiem może okazać się jedynie zestaw ręcznej lampy błyskowej ze zdalnym wyzwaczem). Zgromadzenie sprzętu wydaje się więc w zasięgu możliwości finansowych większości instytucji i ekspedycji (szerzej o zestawie do wykonywania RTI zob. poniżej).

Druga ze wspomnianych zalet jest nie mniej istotna. Fakt, że archeolog/muzealnik może sam nadzorować proces pozyskiwania modeli zabytków metodą RTI, bez uciekania się do pomocy specjalistów w zakresie fotografii czy technik komputerowych, powoduje, że implementacja opisywanej metody w środowisku muzealnym/konserwatorskim staje się dużo łatwiejsza. Wystarczy zachować poprawną procedurę pomiarową (sesja fotograficzna), zaś samo modelowanie obiektów jest już kwestią półautomatycznych działań podejmowanych w dedykowanym oprogramowaniu i zaimplementowanych w nim algorytmów¹. Stosunkowa łatwość użytkowania RTI jest zatem jedną z jej kluczowych cech i może mieć zasadnicze znaczenie przy upowszechnianiu tej metody we wszelkich instytucjach zajmujących się dziedzictwem kulturowym.

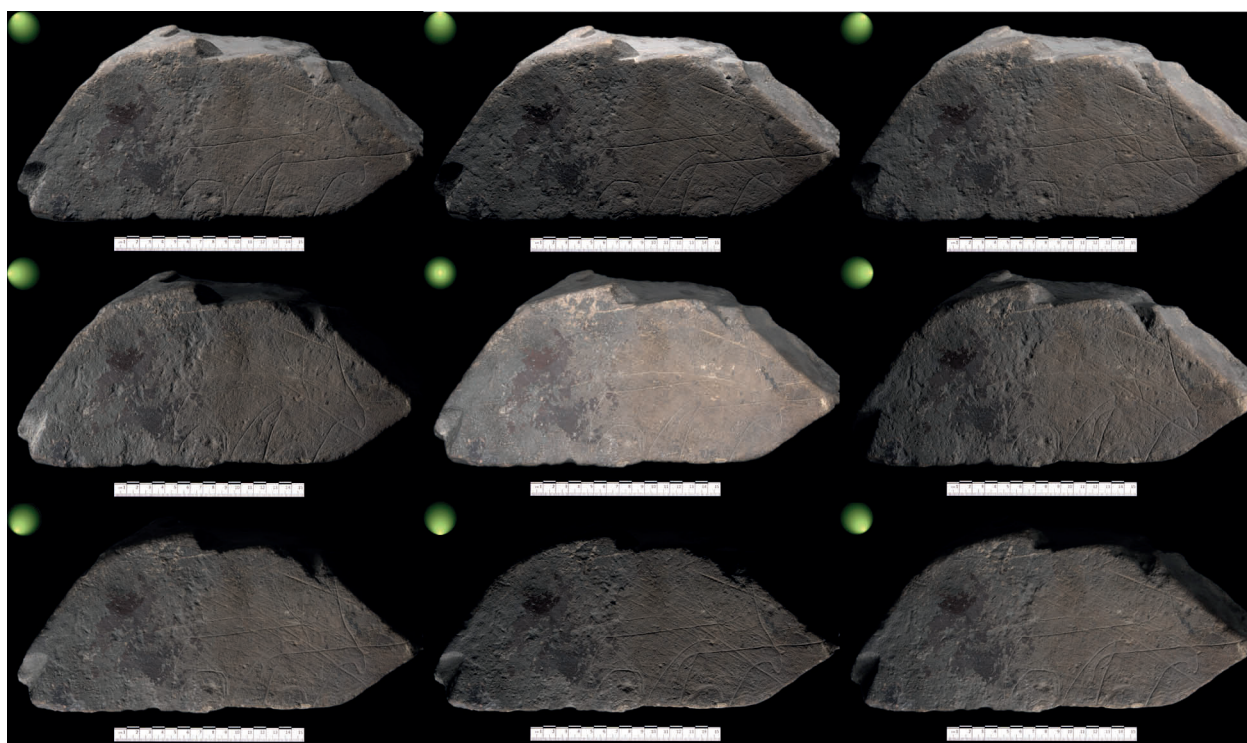
Uniwersalność metody RTI przejawia się również w tym, że znajduje ona zastosowanie zarówno w kontekstach „stacjonarnych”, tj. w pracowniach i magazynach muzealnych (np. Piquette 2011), jak i w archeologicznych badaniach terenowych, i to w tak skrajnych warunkach, jak wschodnia Sahara, np. graffiti świątynne w Sudanie (Kleinitz 2012a) czy sztuka naskalna w Egipcie (Witkowski *et al.* 2016; Hameeuw *et al.* 2016). Poniżej chcielibyśmy rozważyć mocne i słabe strony metody RTI zwłaszcza w kontekście muzealnym. W tym celu przywołujemy m.in. nasze własne prace dokumentacyjne głązów z petroglifami z rejonu IV Katarakty w Sudanie, znajdujące się w Muzeum Archeologicznym w Poznaniu. Zanim jednak scharakteryzujemy praktyczne aspekty procedury dokumentacyjnej, chcielibyśmy omówić podstawowe zasady działania metody RTI, zwracając szczególną uwagę na założenia teoretyczne leżące u jej podstaw.

RTI: charakterystyka metody

Jak już wspomniano, RTI jest metodą obrazowania mającą na celu stworzenie cyfrowego modelu fragmentu rzeczywistego przedmiotu (powierzchni) w formie interaktywnego obrazu zapisanego w pliku. Użytkownik po jego otwarciu w dedykowanej przeglądarce ma możliwość oświetlania obserwowanego modelu pod dowolnym kątem (ryc. 1), w przeciwieństwie do pojedynczej fotografii, na której światła i cienie na powierzchni przedmiotu są „zamrożone” (Duffy *et al.* 2013).

Informacje zapisane w pliku to wartości opisujące kolor każdego piksela (najmniejszego elementu obrazu rastrowego, jakim jest obraz RTI) i współczynniki tak zwanej funkcji rozkładu odbicia światła, opisującej zmienność barwy każdego fragmentu powierzchni (a reprezentowanego na obrazie przez piksel) w zależności od kierunku fal elektromagnetycznych padających na ten fragment. Dane o rozkładzie odbicia, zgromadzone podczas pomiarów, dostarczają informacji o kierunku nachylenia poszczególnych fragmentów powierzchni, dzięki czemu możemy odwzorować kształt przedmiotu. Nachylenie oraz kolorystyka powierzchni są przybliżane z dokładnością, która zależy od tego, jak dużą powierzchnię rzeczywistą reprezentuje każdy piksel obrazu RTI. Ujmując rzecz od strony praktycznej, poprawę dokładności odwzorowania możemy uzyskać poprzez:

¹ Np. wykorzystujące wielomian podczas tworzenia pliku *.ptm, jak w wypadku pierwszej implementacji RTI zwanej wielomianowym mapowaniem tekstury (ang. *Polynomial Texture Mapping*, dalej: PTM). Inny wariant łączy się z zastosowaniem kombinacji liniowej 4, 9 lub 16 funkcji określanych nazwą harmonik półsferycznych podczas generowania pliku *.rti (dalej: HSH); zob. Manfredi *et al.* 2014.



Ryc. 1. Porównanie widoczności poszczególnych cech powierzchni zabytku na obrazie RTI, w trybie wizualizacji *default*, w zależności od kierunku, z jakiego oświetlany jest obiekt. Zielona kula informuje o kierunku iluminacji. Oprac. P. Witkowski

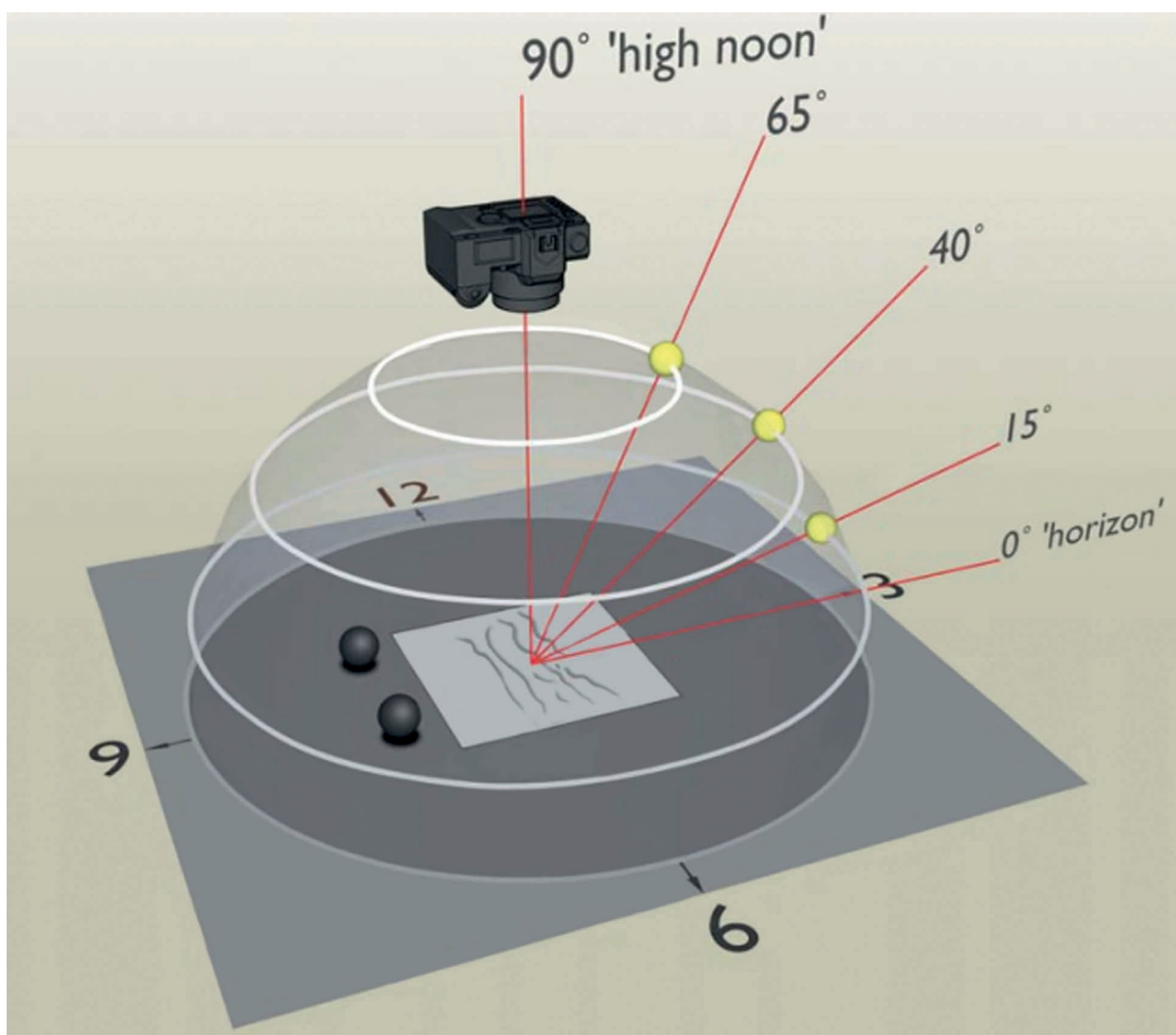
- zmianę odległości między aparatem a przedmiotem (im bliżej zabytku aparat zostanie umieszczony, tym mniejszą powierzchnię rzeczywistości będzie reprezentować piksel),
- zmianę ogniskowej obiektywu (im większa ogniskowa, tym mniejszy wycinek przestrzeni obrazujemy),
- zmianę aparatu na inny charakteryzujący się matrycą o większej rozdzielczości.

Dwa pierwsze rozwiązania mają wspólną cechę: zmiana odległości lub ogniskowej obiektywu powoduje zmianę maksymalnych rozmiarów powierzchni, którą da się udokumentować w ramach jednej sesji. Dodatkowo warto wspomnieć, że zmiana ogniskowej obiektywu wpływa na sposób odwzorowania kształtu przedmiotu, czyli perspektywę. Z założenia powinniśmy dążyć do stworzenia jak najwierniejszego modelu zabytku, a to prowadzi do wniosku, iż preferowane są obiektywy o możliwie najdłuższej ogniskowej.

RTI, jak każda metoda fotograficzna, bazuje na fotografiach. W tym wypadku niezbędny jest zestaw kilkudziesięciu zdjęć zabytku, wykonanych aparatem ustawionym w stałej pozycji. Oś obiektywu wycelowana powinna być prostopadle ku środkowe-

mu punktowi fotografowanej powierzchni (ryc. 2 i 3). Najłatwiej osiągnąć to zamierzenie, montując aparat na statywie przed lub nad przedmiotem, po wcześniejszym umieszczeniu zabytku w odpowiednim położeniu. Jako „obiektyw” należy rozumieć tutaj szeroką grupę obiektywów fotograficznych, mikroskopowych, pierścieni odwrotnego mocowania i konwerterów pozwalających uzyskiwać dowolną skalę obrazowania (Cosentino 2013).

Zgodnie z nazwą metody dokumentujemy odbicia światła od powierzchni przedmiotu. Tym samym musimy postarać się zgromadzić informacje o odbiciach, a nie, na przykład, o wpływie zmian ustawień aparatu na fotografię. Chęć uzyskania prawidłowych pomiarów wymaga, aby ustawienia urządzenia pozostały niezmiennie w trakcie całej sesji fotograficznej, dlatego też po zamocowaniu aparatu na statywie przełączamy go na tryb manualny, określamy parametry ekspozycji (czasu wykonywania zdjęcia, wielkości otworu przesłony i czułości matrycy aparatu) oraz ustawiamy ostrość, a na koniec blokujemy działanie tej funkcji. Ustawienia wewnętrzne lampy (tryb manualny, siła błysku, kąt rozsyłu światła), analogicznie jak ustawienia aparatu, również pozostają stałe przez całą sesję.



Ryc. 2. Syntetyczne przedstawienie sesji fotograficznej, pierwszego etapu metody obrazowania z przekształceniem odbicia.
Źródło ilustracji: Duffy *et al.* 2013: 6, Fig. 11

Jedynymi zmiennymi czynnikami są położenie źródła światła i kierunek iluminacji. Nie są one przypadkowe i następują zgodnie z określonymi regułami. Przed wykonaniem każdego zdjęcia modyfikowane jest położenie lampy. Pozycje, z których oświetlamy przedmiot, powinny znajdować się w możliwie identycznej odległości od jego centrum, a zarazem środkowego punktu kadru. Urządzenie po każdym przemieszczeniu należy obrócić tak, by oświetlało cały przedmiot. Dodatkowo punkty jego położenia powinny być rozmieszczone równomiernie wokół obiektu (zaleca się umieszczanie lampy tak, aby strumień światła oświetlał dokumentowaną powierzchnię pod kątem od 15 do 65 stopni), tworząc wspólnie szkielet wyimaginowanej kopuły, w której centrum znajduje się zabytek. Iden-

tyczna odległość źródła światła od zabytku (w założeniu teoretycznym: taki sam dystans między lampą a każdym fragmentem obrazowanej powierzchni) powoduje, że na zdjęciach zarejestrujemy jedynie informacje o charakterze odbić i zmianie barwy powierzchni, unikając negatywnych i niepożądanych zmian jasności, jakie powodowałyby nieregularna odległość pomiędzy lampą a przedmiotem. Stały dystans najłatwiej jest utrzymać wyznaczając go za pomocą miarki lub sznurka tuż przed wykonaniem każdego zdjęcia. Warto też dodać, iż źródło światła powinno być na tyle mocne (jasne), by zarejestrowane zmiany barwy były spowodowane wykorzystywanym źródłem światła, a nie efektem światła słonecznego czy oświetlenia stałego w pomieszczeniu (Hameeuw *et al.* 2016; Cultural Heritage Ima-

ging 2013a; West Semitic Research Project 2015a; West Semitic Research Project 2015b).

W kadrze, oprócz przedmiotu, powinniśmy umieścić również skalę/miarkę. Ma ona na celu późniejsze szacowanie wielkości poszczególnych elementów powierzchni. Konieczna jest też karta kolorów (by wykonać kalibrację barw zarejestrowanych na zdjęciach) i kule kalibracyjne (niezbędne do określenia położenia źródła światła dla każdej z fotografii (West Semitic Research Project 2015a; West Semitic Research Project 2015b). Dane zobrazowane na tych przedmiotach wykorzystywane są w następnym etapie podczas integracji informacji i generowania pliku RTI. Kule można w prosty sposób wykonać z akrylowych bombek choinkowych, malując je na czarny lub czerwony błyszczący kolor.

W celu usprawnienia całego procesu próbkowania danych warto skorzystać ze zdalnego wyzwalania migawki w aparacie, czy to za pomocą aplikacji zainstalowanej na komputerze lub na urządzeniu mobilnym, czy to poprzez dedykowane urządzenie w formie pilota radiowego. Bezpośrednie naciskanie spustu na obudowie aparatu najprawdopodobniej spowoduje jego poruszenie, a tym samym uzyskany zestaw zdjęć nie będzie nadawał się do dalszego przetwarzania.

Niektóre muzea i uniwersytety posługujące się opisywaną metodą, w celu automatyzacji procesu pozyskiwania fotografii, zbudowały specjalne kopuły lub ramiona, które można określić mianem statywów świetlnych (ryc. 4). Zasadniczym ich elementem są zamocowane źródła światła, najczęściej o stałym i znanym już kierunku emisji fali elektromagnetycznej. Tym samym zbędnym staje się użycie kul kalibracyjnych. Analogicznie jak w przypadku tradycyjnego trójnożnego statywu, również do takiej kopuły lub ramienia doczepiany jest aparat celem ustabilizowania rejestratora (Mudge *et al.* 2006; Kotoula 2013; Piquette 2011; Selmo *et al.* 2017).

Niekiedy w trakcie sesji wykorzystuje się źródła światła o różnych zakresach częstotliwości, na przykład: światło ultrafioletowe, widzialne i podczerwone (Kotoula 2012; Giachetti *et al.* 2017). Umożliwia to stworzenie multispektralnych obrazów RTI, rozszerzając potencjał opisywanej metody o funkcje charakterystyczne dla obrazowania wielospektralnego, takie jak: wstępne rozpoznawanie pigmentów i ich mapowanie, odróżnianie oryginalnych frag-



Ryc. 3. Sesja fotograficzna w Muzeum Archeologicznym w Poznaniu. Fot. Paweł Polkowski

mentów zabytku od powierzchni zmienionych podczas prac naprawczych bądź konserwatorskich, odkrywanie działań związanych z retuszem lub poznanie etapów powstawania zabytku².

Niezależnie jednak od zastosowanej techniki wykonania pomiarów, uzyskujemy zestaw zdjęć obiektu, którego powierzchnia została różnokierunkowo oświetlona. Zarejestrowane zmiany są zawsze efektem odbicia światła od powierzchni i jest to zazwyczaj dominujący czynnik modyfikujący zabarwienie przedmiotu. Nie jedyny jednak. Innymi czynnikami mającymi wpływ na barwę są:

- właściwości powierzchni i struktura przedmiotu (różne powierzchnie, ich mikrostruktura, jak i struktura samego przedmiotu tworzą różnego rodzaju odbicia i załamują, pochłaniają, rozpraszają bądź przepuszczają światło; Falski 2004),
- topografia zabytku (może spowodować przesłonięcie źródła światła i zacięć część zabytku, ale i światło może odbić się od pewnych fragmentów powierzchni, oświetlając w efek-

² <https://chsopensource.org/multispectral-imaging-system/>.



Ryc. 4. Przykład statywu świetlnego (kopuły) wykorzystywanego w celu tworzenia dokumentacji RTI.
Źródło ilustracji: Piquette 2011: 16, Fig. 1

cie inne jej fragmenty lub piksel matrycy aparatu, w którym te fragmenty są rejestrowane; Malzbender *et al.* 2001).

Kiedy już uzyskaliśmy zestaw zdjęć, musimy dokonać ich oceny. Sprawdzamy, czy aparat nie uległ poruszeniu, czy zdjęcia są ostre i prawidłowo naświetlone, a także czy w kadrze znajduje się wyłącznie dokumentowany przedmiot, bez niepożądanych dodatków, np. w postaci nieusuniętej na czas ręki lub miarki.

Kolejny etap do przetwarzania fotografii. W programie graficznym powinniśmy usunąć dystorsje spowodowane przez obiektyw, winietowanie (spadek jasności między centrum kadru a jego brzegiem) i dokonać kalibracji barw. Tak przetworzone zdjęcia w postaci plików JPG otwieramy w programie generującym pliki RTI (RTIBuilder). Praca w nim jest bardzo prosta i sprowadza się do zaznaczenia na zdjęciach obszaru, w którym umieściliśmy kule kalibracyjne. Następnie program jest w stanie samodzielnie określić promień i środek kul,

a także położenie odbić zarejestrowanych na ich powierzchni. Choć proces jest półautomatyczny, to mamy nad jego wynikami całkowitą kontrolę i w razie potrzeby możemy je skorygować. Dzięki określeniu miejsca odbłyśku na powierzchni kuli program wylicza położenie źródła światła w momencie wykonywania każdej fotografii. Są to informacje potrzebne w następnym kroku tego etapu, czyli agregacji danych o rozkładzie odbicia światła. Również ten proces został zautomatyzowany. Od osoby czuwającej nad przebiegiem całego procesu wymagane jest nadanie nazwy tworzonemu plikowi i wykadrowanie (przycięcie) zdjęć do obszaru przez nas pożądanego. Najczęściej z pliku RTI usuwa się część zdjęcia, na której znajdują się kule kalibracyjne.

Powstałe pliki RTI można otworzyć w dedykowanych przeglądarkach (RTIViewer³, Cher-Ob, IS-FStandaloneViewer⁴) na komputerach stacjonar-

³ Cultural Heritage Imaging 2013b.

⁴ http://inscriptifact.com/instructions/Viewer_Instructions.pdf.

nych lub laptopach, jak i zintegrować je ze stroną internetową dzięki dostępnej specjalnej przeglądarce plików RTI, Mirador⁵. Wszystkie one oferują podobne możliwości: kilka trybów interaktywnie i różnorodnie wizualizujących powierzchnię w odpowiedzi na zmianę kierunku oświetlenia dokonywaną przez użytkownika (ryc. 5). Jedyny tryb, w którym brak interaktywności, to tak zwana mapa wektorów normalnych, czyli obraz wizualizujący kształt obiektu, w którym kolor piksela uzależniony jest od kierunku nachylenia płaszczyzny, jaką reprezentuje (dokładniej rzecz ujmując, kolor zależy od kierunku wektora normalnego prostopadłego do danego fragmentu płaszczyzny). Kanał czerwony obrazu przedstawia zmiany kształtu względem osi y od strony lewej do prawej, zaś kanał zielony oznacza zmiany w nachyleniu płaszczyzny reprezentowanej przez piksel względem osi x, od dołu ku górze obrazu. Wartości tych zmian reprezentowane są przez liczby w zakresie od 0 do 255 i definiują zmiany jasności każdego z kanałów, nawet niebieskiego, choć ten zawiera dane nadmiarowe, wynikające z informacji zgromadzonych w kanałach czerwonym i zielonym (MacDonald 2011).

Podsumowując, w wyniku przeprowadzonych pomiarów z użyciem zaledwie kilku prostych i łatwo dostępnych narzędzi (m.in. aparat fotograficzny, statyw i lampa błyskowa), jesteśmy w stanie zgromadzić informacje o barwie, aktualnym kształcie i właściwościach powierzchni dowolnego przedmiotu. Dane te, po przekształceniu do pliku RTI, tworzą interaktywny model powierzchni, który możemy analizować. W następnej kolejności chcielibyśmy się przyjrzeć rodzajom analiz i informacji, jakie możemy uzyskać z obrazu RTI, oraz formom zabytków, które najlepiej nadają się do wizualizacji opisywaną metodą.

RTI w muzealnictwie: zastosowania

Z oczywistych względów nie sposób wymienić wszystkich kategorii obiektów, jakie mogą być udokumentowane metodą RTI. Najczęściej są to: obrazy, płaskorzeźby, monety, pieczęcie i ich odciski, sztuka naskalna, inskrypcje zapisane w kamieniu, drewnie, na papirusie, pergaminie, papierze lub glinie, skamieniałości, jak i drobna plastyka. Cechą

wspólną tych przedmiotów jest ich stosunkowo płaski kształt, choć jak pokazuje praktyka, dokumentować można również przedmioty bardzo przestrzenne, jak rzeźba pełna⁶.

Dlaczego jednak wybierane są z reguły przedmioty o „płaskich” powierzchniach? Im bardziej przestrzenny obiekt, tym większy wpływ na jasność mają czynniki, takie jak samocieniowanie, a nie odbicie. Przeważające oddziaływanie innych czynników na wartość pomiaru jest jednak zjawiskiem niepożądanym, gdyż otrzymujemy wizualizację, która charakteryzuje się np. znacznym zaciemnieniem powierzchni przedmiotu i może utrudniać lub wręcz uniemożliwiać analizę niektórych jego fragmentów. Należy także pamiętać o różnicy w odległościach między poszczególnymi fragmentami powierzchni przedmiotu a źródłem światła. Ten wpływ powinniśmy ograniczać (np. poprzez zwiększenie dystansu między lampą a zabytkiem) szczególnie wówczas, jeśli zależy nam na wizualizacji kształtu oraz definiowaniu i klasyfikacji właściwości powierzchni zabytku. Wniosek jest więc taki, że bardzo urozmaicona topografia przedmiotu, gdzie różnice wysokości jego poszczególnych elementów są duże i mogą powodować zaciemnianie innych, stanowi istotną przeszkodę dla efektywności metody RTI. Dla uzyskania ich modeli lepiej jest raczej skierować się w stronę innych metod obrazowania, zwłaszcza trójwymiarowego. Pewne zróżnicowanie topografii jest jednak konieczne, ponieważ płaska powierzchnia przedmiotu (np. całkowicie wytarta moneta), niezależnie od tego jak różnorodnie oświetlona, nie da podstaw dla stworzenia zadowalającego modelu.

Dokonując iluminacji cyfrowego modelu przedmiotu, i zmieniając kierunek, pod jakim go oświetlamy, mamy możliwość przeprowadzenia analizy jego powierzchni i wykrycia elementów ikonografii. A zatem dzięki kontrolowanej symulacji oświetlenia powierzchni przedmiotu, inaczej mówiąc: dzięki manipulacji światłocieniem, użytkownik otrzymuje świetne narzędzie, pozwalające na dokładniejszą obserwację powierzchni badanej rzeczy. Detale, których nie spo-

⁵ <http://ydc2.yale.edu/news/2014/04/25/mirador-rti-viewer-demonstration>.

⁶ Metoda RTI może być łączona z innymi technikami dokumentacji, dzięki czemu obiekty o skomplikowanej topografii lub o dużych wymiarach można digitalizować używając różnych narzędzi. Doskonałym przykładem jest znajdujący się w British Museum olbrzymi posąg Hakanana'a z Wyspy Wielkanocnej, dla którego wykonano fotograficzny model 3D, zintegrowany później z modelami RTI wybranych fragmentów powierzchni rzeźby (Miles & Pagi 2014; Miles *et al.* 2015).

sób czasami dostrzec „gołym okiem”, ukazują się wyraźniej dzięki wirtualnemu oświetlaniu modelu. Nie dziwi więc, że wśród głównych zastosowań RTI w badaniach archeologicznych i muzealnictwie znajduje się przede wszystkim analiza ikonograficzna. Dotyczy to przeróżnych zabytków, wykonanych z materiałów o niekiedy skrajnie różnej charakterystyce.

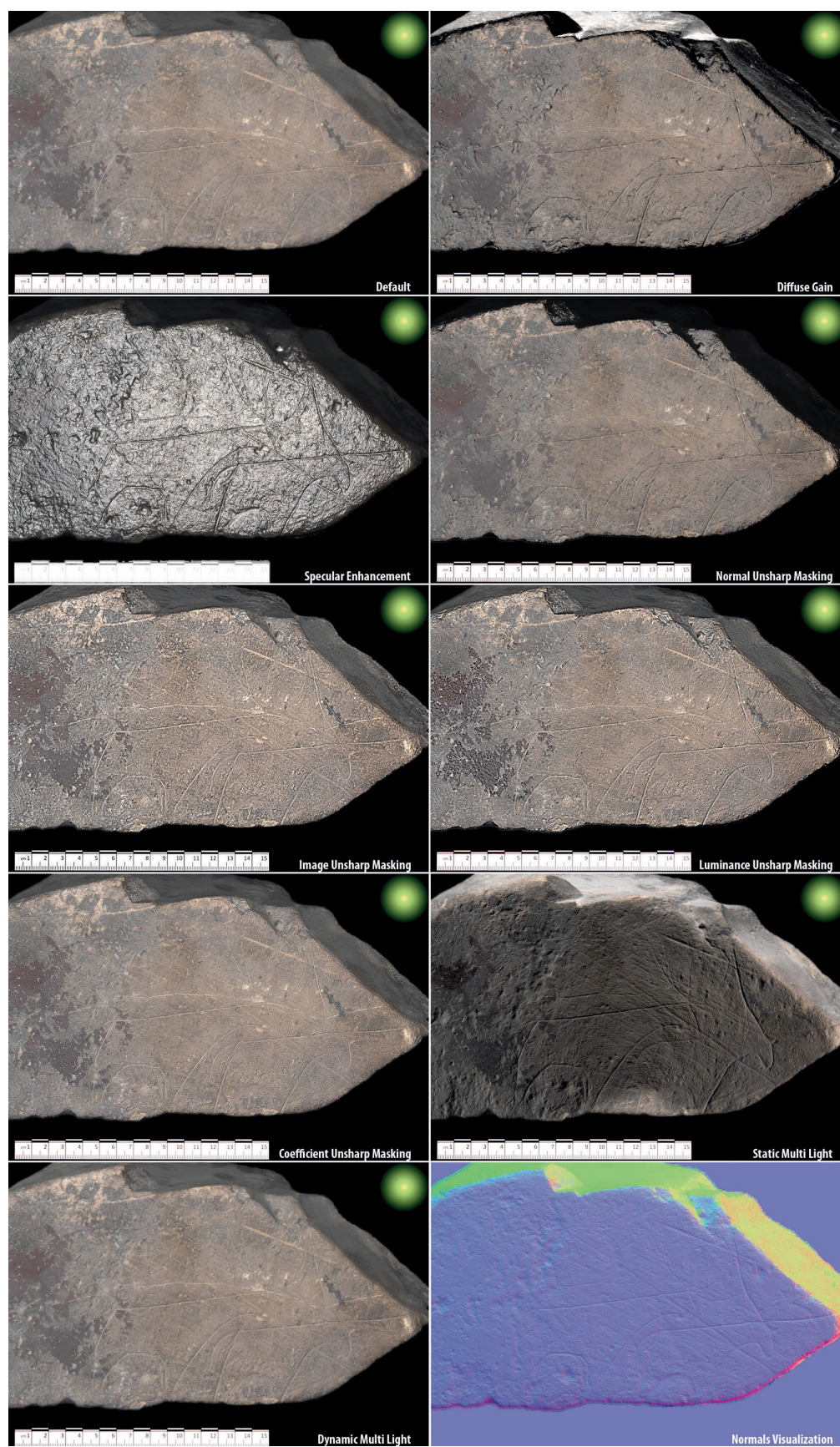
Za przykład posłużyć mogą iberyjskie stele kamiennie, pochodzące z wczesnej epoki żelaza (Díaz-Guardamino & Wheatley 2013; Díaz-Guardamino *et al.* 2015). Choć mają one dość bogatą dokumentację, stworzoną przez różnych badaczy podczas wielu lat, to dopiero po wygenerowaniu modeli RTI można było poprawnie zidentyfikować poszczególne elementy ikonograficznie (niekiedy sprzecznie prezentowane w publikacjach innych autorów), a nawet dostrzec nowe motywy. Przykład ten pokazuje, jak istotne dla procesu dokumentacji są warunki świetlne. Rysunki, wykonane zapewne w różnych okolicznościach, wykazują istotne różnice, podczas gdy RTI pozwala na analizę zabytków niezależną od jednego zestawu czynników zewnętrznych. Świetne rezultaty uzyskano również poprzez analizowanie modeli RTI innych zabytków zawierających reliefowe wyobrażenia, takie jak egipska *Paleta Łowców* (EA20792, British Museum; Piquette 2011), czy jeszcze słynniejsza *Paleta Narmera*⁷, gdzie udało się dostrzec nieznane dotąd detale. Przykłady te jasno pokazują, że digitalizacja otwiera zupełnie nowe ścieżki przed badaczami ikonografii.

Równie dobre rezultaty osiąga się w wypadku odciśków pieczęci mezopotamskich (Willems *et al.* 2005) oraz greckich i rzymskich monet (Kotoula, Kyrano-udi 2013). Te ostatnie, dzięki zastosowaniu RTI, mogą być identyfikowane nawet, gdy ich stan zachowania jest bardzo zły. We wszystkich tych wypadkach najlepsze wyniki daje obserwacja przedmiotów w trybie *specular enhancement*, gdzie powierzchnia staje się połyskliwa, a kolorystyka może być ograniczona do skali szarości. Dzięki temu relief niektórych bardzo skorodowanych rzymskich monet staje się uchwytny, a z nieczytelnego tła potrafią wyłonić się również towarzyszące napisy. Poprawienie czytelności kompozycji figuratywnych i identyfikacja motywów są więc bez wątpienia zadaniami, których realizację RTI potrafi skutecznie umożliwić.

Mówiąc o monetach wspomnieliśmy już o skutecznym odczytywaniu napisów. Zastosowanie RTI w pracy z zabytkami zawierającymi inskrypcje okazuje się bezcennym narzędziem w odczytywaniu słabo zachowanych fragmentów, niekiedy nawet z pozoru niemożliwych do odcyfrowania. Przykładem mogą być gliniane tabliczki z pismem klinowym, które w ostatnich latach w ramach różnych projektów naukowych analizowane były właśnie z wykorzystaniem modelowania RTI (Malzbender *et al.* 2000; Willems *et al.* 2005). Innym przykładem może być analiza modeli RTI drewnianych tabliczek z Vindolandy, a także podobnych pochodzących ze słynnego Herkulanum (Earl *et al.* 2010). Choć zapisane tuszem, a zatem całkowicie płaskie, mogą być mimo wszystko obiektem analizy RTI, ponieważ tusz wpływa na to, jak dystrybuowane jest światło rzucane pod różnym kątem na powierzchnię tabliczek. Okazuje się zatem, że pomimo tego, iż nie mamy tu do czynienia z tekstami wykonanymi w technice rycia, to zastosowanie odpowiednich trybów prezentacji modeli RTI może w zasadniczy sposób wzmocnić czytelność napisów. Dla filologów i epigrafików RTI staje się więc narzędziem bardzo pożądanym.

Analizy dokonywane na podstawie obrazów RTI nie muszą ograniczać się wyłącznie do odkrywania i opisu elementów ikonografii. Analiza topografii poszczególnych fragmentów powierzchni może również doprowadzić do odkrycia śladów po narzędziach, których użyto do wykonania dzieła lub jego przekształcenia, a tym samym zarówno do ich opisu i identyfikacji, jak i określenia technik, jakimi się posłużono w procesie tworzenia zabytku. Daje to nam pojęcie, między innymi, o warsztacie artysty/rzemieślnika oraz umożliwia poznanie historii samego obiektu, nie tylko w kontekście przygotowania powierzchni, sposobu obróbki/aplikacji materiału, ale także dzięki zauważonym zmianom w samej treści dzieła – niezależnie od tego, czy miały one miejsce w trakcie pierwotnego procesu tworzenia, czy też na kolejnym etapie jego funkcjonowania. Na przykład, na wspomnianych stelach iberyjskich zidentyfikowane zostały ślady narzędzi o odmiennych cechach, co sugeruje, że nie istniała żadna skodyfikowana szkoła rzemieślnicza wytwarzania steli, a podejście do tworzenia rytów miało raczej lokalny, idiosynkratyczny charakter (Díaz-Guardamino

⁷ https://www.academia.edu/35160469/New_Insight_into_the_Narmer_Palette_with_Reflectance_Transformation_Imaging.



Ryc. 5. Porównanie trybów wizualizujących obraz RTI dostępnych w programie RTIViewer. Przedmiotem obrazowania jest kamień z petroglifami (nr 1) znaleziony w okolicach IV Katarakty w Sudanie, III-II tys. p.n.e. Oprac. P. Witkowski

et al. 2015). Zwrócono też uwagę na to, że analiza śladów na stelach, również tych wtórnych, wykonanych w późniejszych czasach, pozwala na znacznie bogatszą narrację o „historii życia” przedmiotów i ich społecznym funkcjonowaniu w kolejnych kontekstach kulturowych.

Badanie śladów to take niezwykle ważny wątek w pracach konserwatorskich. Analiza RTI pozwala bowiem na ewaluację stanu zachowania zabytków. Po wykonaniu zdjęć, oceny takiej dokonuje się już bez fizycznego kontaktu z zabytkiem, co pozwala uniknąć zagrożeń wynikających z bezpośredniego obcowania z przedmiotem. Badane mogą być np. ślady korozji przedmiotów metalowych (Earl et al. 2010), wszelkiego rodzaju pęknięcia w kamieniu czy glinie, a także ślady specyficzne dla uszczerbków obrazów malarskich (Manfredi et al. 2013; Manfredi et al. 2014).

W wypadku tych ostatnich metoda RTI może niejednokrotnie z powodzeniem zastąpić takie metody, jak reflektografia IR czy radiografia (Padfield et al. 2005). Można w tym miejscu przytoczyć co najmniej dwa przykłady. Pierwszy z nich to obraz Georges’a Seurata pt. *Sekwana widziana z wyspy Grande Jatte*. Przy bocznym świetle widoczne staje się trójkątne pogrubienie w lewej części obrazu. Jest to żagiel łodzi niewidoczny w ostatecznej wersji dzieła, świadczący o zmianie, jaka dokonała się w zamyśle artysty podczas aktu tworzenia.

Drugi z obrazów, pt. *Madonna i dziecko*, z dokumentował metodą RTI z wykorzystaniem światła podczerwonego Antonino Cosentino. Użycie tego spektrum fali elektromagnetycznej pozwoliło na dostrzeżenie siatki prostokątnej, jak i wcześniejszego szkicu, zakrytych następnie farbą. Co ciekawe, w zależności od kąta oświetlenia uzyskano różny kontrast widoku siatki. Na jasnych obszarach obrazu elementy siatki są widoczne w oświetleniu bocznym, zaś na ciemnych obszarach w oświetleniu górnym. Zdaniem Cosentino, obraz RTI w podczerwieni jest wyraźniejszy niż tradycyjny cyfrowy obraz wykonany w tym spektrum⁸.

Poza badaniem i analizą motywów zdobiących powierzchnię lub odkrywaniem narzędzi i technik, jakimi wykonano zabytek, RTI umożliwia także monitorowanie stanu zachowania obiektu i wykry-

wanie zmian w powierzchni zabytku. Możliwe do odkrycia zmiany to ślady zniszczeń spowodowane upływem czasu i czynnikami środowiskowymi, takimi jak: światło, temperatura, wilgotność, wpływ substancji chemicznych (tlen i zanieczyszczenia w powietrzu), lub organizmów biologicznych (bakterie, grzyby, owady, pleśń; Marengo et al. 2011).

RTI jest zatem metodą, której wykorzystanie nie ogranicza się jedynie do analiz ikonograficznych. Powyższe przykłady wskazują bowiem jasno na to, że stosować ją można w rozmaitych kontekstach, zarówno badawczych, jak i konserwatorskich (a także edukacyjnych i wystawienniczych, zob. poniżej). Jej najpowszechniejsze użycie wiąże się jednak z próbami identyfikacji i rozszyfrowywania ikonografii i tekstów, a jej skuteczność w tym zakresie zdają się potwierdzać coraz to nowe projekty dokumentacyjne na całym świecie. By przetestować tę metodę w praktyce, postanowiliśmy dokonać zbiorów wybranych zabytków przechowywanych w Muzeum Archeologicznym w Poznaniu. Wybraliśmy głązy z petroglifami, które z racji specyfiki powierzchni i wykonanej na nich wgłębnej ikonografii wydają się stanowić doskonały materiał dla tego rodzaju modelowania.

RTI w praktyce: przykład głązów ze sztuką naskalną

Wykonane przez nas modele RTI obrazują trzy zabytki znajdujące się w Muzeum Archeologicznym w Poznaniu (dalej MAP; Polkowski, Witkowski 2017). Są to trzy głązy (ryc. 6-10) niewielkich rozmiarów, zawierające petroglify⁹ odnalezione w rejonie IV Katarakty na Nilu w Sudanie, które stały się częścią kolekcji poznańskiej po zakończeniu archeologicznych badań ratowniczych, współorganizowanych przez MAP (na temat badań zob. Chłodnicki 2007). Kamienie te (nr inw. MAP 2010: 85/1, 2010: 88/1 oraz 2010: 88/2: zob. Chłodnicki et al. 2015: 291-302) pochodzą z rejonu wsi Gama-mija oraz Keheili i są częścią stałej ekspozycji pn. Sztuka naskalna Afryki Północnej, pod opieką kuratorską jednego z autorów¹⁰.

Głązy różnią się między sobą przede wszystkim rodzajem powierzchni, na której wykonano petro-

⁸ <https://chsource.org/2012/12/02/rti-reflectance-transformation-imaging-tips-and-tricks/>.

⁹ Sztuka naskalna należy do obiektów najchętniej dokumentowanych metodą RTI (np. Mudge et al. 2012).

¹⁰ <http://nowa.muzarp.poznan.pl/pl/sztuka-naskalna-afryki-polnocnej>.



Ryc. 6. Kamień nr 1. Obraz RTI w trybie wizualizacji *Image Unsharp Masking*. Oprac. P. Witkowski

glify – od względnie równej w wypadku *kamienia nr 1*, po pofalowaną i chropowatą w kontekście *kamienia nr 2*. Już sam ten fakt predysponował wybrane przez nas głązy do przetestowania na nich metody RTI, która – jak już sygnalizowaliśmy – może dawać rezultaty różnej jakości przy zastosowaniu jej do modelowania powierzchni o odmiennych parametrach. Równie ważne są różnice w technice wykonania poszczególnych petroglifów. O ile w wypadku *kamienia nr 1* mamy do czynienia z prostą i cienką linią rytą, o tyle pozostałe głązy zawierają petroglify wykonane w technice piketażu, czyli poprzez uderzanie twardym narzędziem. Morfologia przedstawień na *kamieniu nr 2 i 3* jest więc zupełnie inna, nie zawsze łatwa do oceny gołym okiem. Nie bez znaczenia jest też stan zachowania petroglifów. Najstarszy z nich, znajdujący się na *kamieniu nr 3* i w zasadzie całkowicie spatynowany, jest mało czytelny i trudny do interpretacji między innymi właśnie ze względu na stan zachowania oraz technikę piketażu. Łatwiej rozpoznawalne są przedstawienia na *kamieniu nr 2*, ale i w tym wypadku, przy słabym źródle światła, nie wszystkie figury są dobrze widoczne. Pod tym względem motyw na *kamieniu nr 1* odcinają się od tła znacznie lepiej i ich identyfikacja, nawet bez żadnych wspomagających technologii, nie nastęrcza trudności. Niemniej, jak poka-

żemy poniżej, RTI pozwoliło nam na zastanowienie się, czy w tle nie znajdują się jeszcze inne ślady, być może nawet niedokończonych(?) petroglifów.

Wykonanie przez nas modeli RTI wybranych głązów wiązało się z realizacją kilku celów, z których najważniejszym było przetestowanie samej metody i sprawdzenie, czy pozwala ona na uzyskanie dokumentacji o lepszej jakości niż ta wykonana wcześniej przy zastosowaniu innych technik. Modele mogły być później porównane z dostępną w MAP dokumentacją terenową (fotografie, rysunki) oraz wykonaną już w Poznaniu dokumentacją fotograficzną. Chcieliśmy także ocenić potencjał modeli RTI w wymiarze wystawienniczo-edukacyjnym. Innymi słowy, wykonanie modeli miało na celu sprawdzenie, czy będą one stanowiły dobre uzupełnienie dla eksponowanych głązów z petroglifami, które ze względu na swoją specyfikę nie zawsze są łatwo czytelne. Niejako dodatkowym celem była ocena przydatności uzyskanych modeli w analizie ikonograficznej rytów skalnych. Choć trudno było się spodziewać odkrycia przedstawień, które byłyby niewidoczne gołym okiem, to jednak nie można było też wykluczyć możliwości dostrzeżenia jakichś elementów dotychczas nieznanymi.

Sesje fotograficzne były przeprowadzone w MAP na wystawie, na której głązy są eksponowane. Ka-

mienie fotografowane były przy użyciu aparatu Canon EOS 750D i obiektywu Canon 60 mm f/2.8 EF-S Macro USM. Z racji ich niedużych rozmiarów można było nad każdym z nich ustawić trójnożny statyw z zamontowanym prostopadle aparatem. Zdjęcia robione były z wykorzystaniem przenośnych lamp błyskowych: Fomei Panther 600 mini i Quadralite Reporter 360, połączonych z aparatem zdalnym wyzwalaczem. Całość sesji prowadzona była z wykorzystaniem oprogramowania EOS Utility. Warto też zaznaczyć, że źródła światła zastanego w pomieszczeniu były stosunkowo słabe. Po uzyskaniu serii zdjęć dla każdego z kamieni, zostały one przetworzone w oprogramowaniu Adobe Photoshop i RTI-Builder.

Kamień nr 1

Petroglify na tym głazie (ryc. 1, 5-7) należą do najbardziej czytelnych w całej kolekcji poznańskiej. Są to przedstawienia bydła długorogiego, wykonane w charakterystycznym stylu, w którym dolne kończyny przedstawione są schematycznie, tworząc wraz z podbrzuszem kształt łuku (Chłodnicki *et al.* 2015: 291, nr 232). Styl ten wiąże się z reguły z okresem kermańskim, a zatem III i II tys. p.n.e. (Kleinitz 2012b). Omawiane petroglify wykonano narzędziem o ostrym końcu, dzięki czemu linia rycia jest bardzo wąska, jednocześnie głęboka i regularna. Pozwala to na łatwe rozpoznanie motywów, nawet w mniej sprzyjających warunkach świetlnych. Cechą charakterystyczną obu zwierząt są długie rozłożyste rogi, choć, jak się wydaje, krowa usytuowana z lewej strony może mieć aż pięć rogów¹¹.

Identyfikacja tych przedstawień nie nastrocza problemów, czego dowodem jest rysunkowa dokumentacja terenowa, która z dużą dokładnością odwzorowuje wyryte wizerunki krów. Dużo bardziej problematyczne są jednak liczne linie o różnej grubości i głębokości, które stanowią tło omawianej kompozycji. Dokumentacja rysunkowa oddaje jedynie częściowo skomplikowaną sieć owych śladów, które dużo lepiej widoczne są dopiero na fotografii zabytku zamieszczonej w katalogu wystawy (Chłodnicki *et al.* 2015: 291, nr 232). Analiza zdjęcia z katalogu pozwala dość łatwo zauważyć, iż prawa strona głazu ma liczne równoległe linie proste. Dopie-

ro jednak modelowanie RTI i późniejsze analizowanie zdjęć przy użyciu wirtualnego źródła światła pozwoliły na jeszcze pełniejsze dostrzeżenie przebiegu owych równoległych linii. Co więcej, RTI pozwala również zweryfikować obserwację o nienaturalnej liczbie rogów jednego ze zwierząt, a także na dostrzeżenie jeszcze jednego zestawu śladów, praktycznie niewidocznego gołym okiem.

Chodzi tutaj o bardzo delikatne linie ryte znajdujące się powyżej oraz częściowo pod lewym petroglifem krowy (ryc. 7). Bardzo skrupulatna analiza, a także wykonanie przez nas dodatkowego modelu obrazującego jedynie część głazu, pozwoliły na wysunięcie hipotezy, iż na głazie wykonane zostało jeszcze jedno przedstawienie bydła, być może niedokończone. Naszym zdaniem model RTI pozwala na dostrzeżenie zwłaszcza linii grzbietowej oraz linii przednich kończyn, które częściowo zachodzą na grzbiet jednej z krów. Kształt ten stylistycznie nawiązuje do pozostałych petroglifów i jest bardzo prawdopodobne, że zanim powstały oba wyraźne przedstawienia bydła, najpierw dokonano pierwszej mniej udanej(?) próby (o płytszej, przez to mniej widocznej linii rycia).

Modele RTI, wykonane dla omawianego kamienia z rytami, okazały się więc bardzo satysfakcjonujące, gdyż znacznie powiększyły dokładność i jakość dokumentacji, jaką dysponujemy. Co więcej, gdy zostaną udostępnione publicznie, dadzą innym badaczom (oraz laikom) możliwość weryfikacji naszej hipotezy. Odkryte przez nas trzecie przedstawienie zoomorficzne może być bowiem wynikiem zjawiska zwanego pareidolią (Bednarik 2016), kiedy to człowiek rozpoznaje zdefiniowany kształt czy wzorec pośród losowo ułożonych, w rzeczywistości nic nie znaczących, elementów. Nie możemy wykluczyć takiej możliwości, ale to właśnie dostępność RTI i możliwość przeprowadzenia ponownej analizy jest jej wielką zaletą.

Kamień nr 2

Drugi głaz (ryc. 8) również zawiera petroglify w stylu kermańskim (Chłodnicki *et al.* 2015: 302, nr 240). Podobnie jak w wypadku kamienia nr 1, mamy do czynienia z przedstawieniami bydła długorogiego. Różnice tkwią jednak w technice wykonania petroglifów oraz w ich kompozycji. Bydło na kamieniu nr 2 jest bowiem ukazane w pozycji an-

¹¹ Jest to zjawisko znane w sudańskiej sztuce naskalnej, por. Kleinitz 2012b: 36, fig. 5.



Ryc. 7. Zbliżenie na niedokończony(?) petroglif krowy(?) na kamieniu nr 1. Obraz RTI w trybie wizualizacji *Diffuse Gain*.
Oprac. P. Witkowski

tytetycznej, a zatem skierowane w przeciwnie strony. Większe ze zwierząt (prawe) zostało nałożone na przedstawienie wykonane wcześniej. Niemniej oba petroglify powstały zapewne w relatywnie krótkim odstępie czasu, o czym może świadczyć jednolita i dość zaawansowana patyna. Ponadto pomiędzy obiema krowami znajduje się jeszcze przedstawienie antropomorficzne – postać ze wzniesionymi i zgiętymi w łokciach rękami. Górna część tej postaci, w tym jej owalna głowa, wydają się mieć nieco jaśniejszy kolor patyny. Wynika to zapewne z kształtu powierzchni kamienia, co wpłynęło na zróżnicowany stopień ekspozycji głazu na różne czynniki środowiskowe (np. wiatr, nasłonecznienie).

Wszystkie petroglify wykonano techniką pikeażu. Kontury przedstawień bydła są wystarczająco głębokie, by odpowiedni kąt padania światła stosunkowo łatwo rysował sylwetki omawianych zoomorfów. Niektóre fragmenty tych petroglifów, a zwłaszcza motywu postaci ludzkiej, są jednak płytsze. Antropomorf posiada bardzo płytki, choć dość szeroki kontur. Przy odpowiednim oświetleniu postać ta

wyłania się ze skalnego tła, ale spośród wszystkich petroglifów na kamieniu jest to element najslabiej widoczny. Należy też zauważyć, że wszystkie przedstawienia, poza pokryciem się warstwą patyny, są już znacznie zwiędzłe – krawędzie konturów są wygładzone, a ślady pikeażu częściowo zatarte. Ponadto chropowata, nieregularna powierzchnia powoduje, że petroglify te stapiają się z tłem jeszcze mocniej. Przed wykonaniem obrazów RTI zastanawialiśmy się zatem, czy metoda okaże się skuteczna w obliczu takiej specyfiki rytów i powierzchni kamienia.

Wygenerowany model spełnił nasze oczekiwania, choć nie w całości. Niezbyt głębokie kontury petroglifów powodują, że cienie są krótkie i nie wszędzie podkreślają kształty rytów. Nie zmienia to jednak faktu, że każdą z figur, w tym postać ludzką, można uczynić stosunkowo czytelną przy odpowiednim nakierowaniu światła. Analiza modelu nie wykazała istnienia innych petroglifów czy intencjonalnych śladów, ale też nie oczekiwaliśmy, aby kamień ten mógł ujawnić jakieś dodatkowe motywy. Nasz nie-

dosyt podyktowany był raczej tym, że „surowy” obraz RTI nie wprowadzał aż tak dużej różnicy w jakości względem statycznej fotografii wykonanej wcześniej (np. Chłodnicki *et al.* 2015: 302, nr 240).

Dlatego też zdecydowaliśmy się na eksperyment i cofnęliśmy się o krok w przeprowadzonej już procedurze. Zestaw zdjęć, na bazie których tworzony był model, został poddany dodatkowej obróbce. Zastosowaliśmy na nich technikę wzmacniania kolorów. W tym celu wykorzystaliśmy dodatek do darmowego programu ImageJ¹² o nazwie DStretch¹³. W ten sposób udało się istotnie wzmocnić kontrast pomiędzy elementami, które w rzeczywistości posiadają odmienne odcienie. Zestaw przetworzonych fotografii posłużył następnie do stworzenia obrazu RTI, dzięki czemu można teraz operować wirtualnym światłem na powierzchni głazu o fałszywej kompozycji barwnej. Petroglify stały się bardzo czytelne, co jest istotne zwłaszcza w przypadku postaci antropomorficznej, która w normalnych warunkach bywa niekiedy niewidoczna.

Przykład ten pokazuje, że istotną zaletą RTI jest jej integralny charakter. Przy ostrożnym połączeniu z innymi technikami fotograficznymi lub metodami przetwarzania zdjęć jej możliwości poszerzają się (Witkowski *et al.* 2016). W tym wypadku zależało nam przede wszystkim na uczynieniu petrogli-fów widocznymi, nawet kosztem utracenia rzeczywistych kolorów. Dla zwiedzających muzeum nie-możliwość rozpoznania tego, co znajduje się na kamieniu, może prowadzić do rozczarowania. Wydaje się, że udostępnienie w takiej sytuacji obrazu RTI może stać się odpowiednim uzupełnieniem ekspozycji i dużym ułatwieniem dla zwiedzających.

Kamień nr 3

Ostatni kamień, który został poddany modelin-gowi różni się nieco od dwóch pierwszych (ryc. 9 i 10). Różnica tkwi w samym petroglifie, znajdującym się na jego powierzchni, który jest kompletnie pokryty patyną i najprawdopodobniej został stworzony w okresie neolitu, jeśli nie wcześniej (Chłodnicki *et al.* 2015: 300-301, nr 239). Ponadto petroglif ten opiera się skutecznie wszelkim próbom identyfikacji i być może należy go zaliczyć do kategorii tak zwanej abstrakcyjnej lub geometrycznej sztuki na-

skalnej. Interpretacji nie ułatwia fakt, że ryt ten jest uszkodzony. Wydaje się bowiem, że głaz ten odłamał się od większej całości wzdłuż obu dłuższych boków, przez co fragmenty petroglifu(-ów) zostały bezpowrotnie utracone, i to zapewne jeszcze w starożytności.

Petroglif wykonano w technice piketażu, i choć jego głębokość jest znaczna, to widać też wyraźne ślady wygładzenia obtłuczonej powierzchni, co jest oczywiście efektem długotrwałego działania wiatru i piasku. Abstrakcyjny charakter ikonografii zabytku nie pozwala nawet stwierdzić z całym przekonaniem, z jakiej strony powinien on być oglądany. Prezentowany przez nas model być może należałoby więc odwrócić.

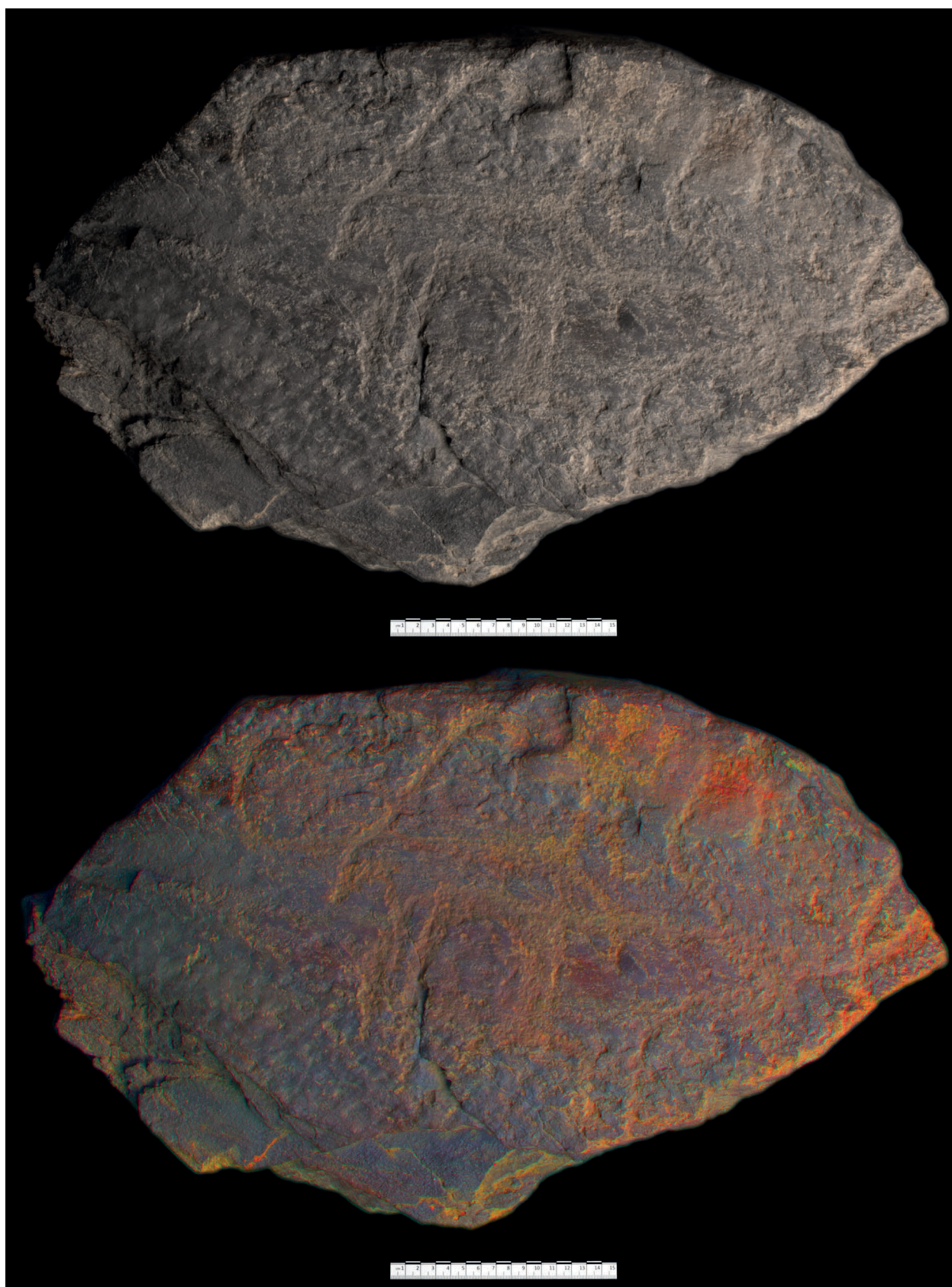
Wykonanie modelu nie przyniosło przełomu w kwestiach interpretacyjnych i choć bezwzględnie daje on dużo większe niż wcześniej możliwości w tym zakresie, to barierą wydaje się tu być po prostu charakter samego petroglifu. Warto jednak wspomnieć, że praca z modelem pozwoliła na wysunięcie sugestii, że być może mamy do czynienia z dwoma etapami tworzenia skomplikowanej figury. Prawa część głazu (ryc. 10) nosi bowiem liczne ślady piketażu o większej średnicy zagłębień. Można to zaobserwować również na wcześniejszych fotografiach, ale obraz RTI pozwala na lepsze ukazanie głębokości tych śladów i ich odmienną specyfikę. Nie można oczywiście wykluczyć, że oba zestawy śladów uderzania należały do tego samego etapu tworzenia petroglifu, a są jedynie świadectwem użycia różnych narzędzi.

Analiza modelu RTI pozwoliła też na lepsze uchwycenie śladów, które nie są pochodzenia antropogenicznego. Mowa tu o licznych bardzo delikatnych i długich rysach zorientowanych wzdłuż kamienia. Rysy te nachodzą na linie petroglifu, są więc późniejsze. Bardzo możliwe, że są one pozostałością po działalności eolicznej i/lub powstały w wyniku tarcia (kamień mógł być przesuwany). Nie są to jednak ślady współczesne.

Wykonane przez nas eksperymentalne modele RTI uznajemy za satysfakcjonujące. Jest to metoda, która pozwala na wytworzenie bardzo precyzyjnej dokumentacji, nadającej się do dalszych studiów znacznie bardziej niż tradycyjny rysunek czy fotografia. Choć walory w postaci przydatności RTI do badań naukowych są dla nas priorytetowe, to chcie-

¹² <https://imagej.net/Welcome>.

¹³ <http://www.dstretch.com/>.



Ryc. 8. Kamień nr 2. Obrazy RTI w wersji normalnej i z zastosowaniem techniki wzmacniania kolorów. Tryb wizualizacji *default*.
Oprac. P. Witkowski



Ryc. 9. Kamień nr 3. Obraz RTI w trybie wizualizacji *Diffuse Gain*, oświetlony z dwóch różnych stron. Oprac. P. Witkowski



Ryc. 10. Zbliżenie na kamień nr 3, ukazujące różne rozmiary śladów piketażu oraz podłużne rysy powstałe już po wykonaniu petroglifu. Obraz RTI w trybie *Image Unsharp Masking*. Oprac. P. Witkowski

libyśmy w tym miejscu podkreślić jednak inną jeszcze zaletę modeli, jaką dostrzegamy po wykonaniu tej dokumentacji: ich edukacyjny wymiar. Wydaje nam się, że zwłaszcza w kontekście takich eksponatów, jak zaprezentowane petroglify, które nie zawsze są czytelne i nastroczają wiele problemów natury percepcyjnej, możliwość prezentacji modeli RTI może ułatwić i wzbogacić doświadczanie takich zabytków. W kolejnej części chcielibyśmy się więc skupić na tym właśnie aspekcie RTI jako wydajnej metody prezentacji eksponatów.

RTI jako multimedialna prezentacja i sposób weryfikacji wyników badań

Obrazy RTI to nie tylko sposób dokumentacji i analizowania zabytków, to także niezwykle interesujący sposób ich prezentacji, szczególnie tam, gdzie brakuje przestrzeni wystawienniczej. Galeria obrazów RTI pozwala odwiedzającym muzea nie tylko na zapoznanie się z większą liczbą dzieł sztuki/zabytków, lecz także na samodzielne ich „odkrywanie”. Interaktywny charakter modeli RTI umożliwia użytkownikom-laikom grę światłem i doświadczanie zabytków/eksponatów w inny sposób niż w przypadku oryginalnych dzieł. Zwiedzający mają sposobność poczynić bardziej szczegółowe obserwacje, o których mogą przeczytać w katalogu wystawy, książce czy opisie towarzyszącym zabytkowi. Doświadczenie danego przedmiotu w formie modelu może być zresztą bardziej dynamiczne, różnorodne i zindywidualizowane niż wówczas, gdy ogląda się oryginał zdeponowany w muzealnej gablocie. Oczywiście nie oznacza to, że modele RTI mają zastąpić bezpośrednie doświadczanie przedmiotów materialnych. Ich rolą byłoby raczej poszerzenie oferty muzealnej o nowe interaktywne narzędzia, które z jednej strony mogą pozwolić na dokonywanie bardziej detalicznych obserwacji, a z drugiej strony, poprzez zintensyfikowane doświadczanie eksponatów w formie modeli RTI, zwiedzający mogą zostać zachęcani do częstszego konfrontowania swych obserwacji z oryginałami na wystawach.

Innym powodem, dla którego RTI może stanowić świetne uzupełnienie wystaw muzealnych, jest fakt, iż niejednokrotnie eksponaty nie są wystarczająco dobrze oświetlone. Z jednej strony wynika to z ograniczonej przestrzeni ekspozycji, co decyduje o rozmieszczeniu obiektów, natomiast z dru-

giej strony wiąże się z niekorzystnym oświetleniem stanowiącym stałą instalację, co może skutkować odbłaskami na powierzchni zabytku. Wpływa to negatywnie na estetykę wystawy oraz odbiór dzieła przez odwiedzającego. Obrazy RTI ze względu na swoją interaktywność nie mają takich ograniczeń i wszędzie tam, gdzie przestrzeń wystawieniowa jest ograniczona, ekran wyświetlający wizualizację RTI może być odpowiednim rozwiązaniem tego typu problemów.

Obrazy RTI mogą ilustrować nie tylko eksponaty muzealne, będące na wyposażeniu jednostki. Pracownicy muzeów niejednokrotnie biorą udział w badaniach archeologicznych i działaniach konserwatorskich podejmowanych w kraju i zagranicą. Ponieważ z reguły nie ma możliwości przywiezienia zabytków z innego kraju, dokumentacja metodą RTI może stanowić dobry sposób na zaprezentowanie ich szerszej publiczności (omówione przez nas kamienie ze sztuką naskalną są w tym kontekście wyjątkowe, gdyż w poznańskiej kolekcji znalazły się one jako wyraz podziękowania władz Sudanu za udział w badaniach ratowniczych). Badane są ponadto zabytki znajdujące się *in situ*, takie jak budowle, rzeźby, czy sztuka naskalna. Dokumentacja RTI jest wówczas jedną z możliwości zaprezentowania w muzeach takich niedostępnych miejsc i zabytków. Na pewno znacznie lepiej oddaje ona ich dynamikę i charakter, niż czyni to tradycyjna fotografia.

Wspomnieliśmy już o możliwości zintegrowania obrazów RTI ze stronami internetowymi. Tym samym galerię obrazów RTI można umieścić nie tylko w tradycyjnej sali wystawowej, lecz także w serwisie internetowym muzeum lub w osobnej galerii internetowej. Poza samym modelem RTI możemy tam również zamieścić informacje dotyczące autora, czasu i miejsca powstania/odkrycia zabytku, jego opis, jak i wszelkie inne adekwatne informacje na jego temat. Obraz RTI nie musi być więc jedynym elementem w galerii internetowej. Taki sposób prezentowania treści już przecież istnieje, gdyż coraz więcej muzeów udostępnia swe zbiory w postaci wirtualnych galerii muzealnych. Tym samym implementacja obrazów RTI nie pociąga za sobą ani wielkich nakładów czasowych ani finansowych.

Opisywana metoda jest również sposobem umożliwiającym wymianę wiedzy i jej weryfikowanie w obrębie grona specjalistów. Pliki RTI posiada-

ją z reguły dużo mniejsze rozmiary¹⁴ niż pliki modeli trójwymiarowych o analogicznej szczegółowości, i mogą być przesyłane za pomocą takich usług, jak Dropbox czy WeTransfer w dowolne miejsce na kuli ziemskiej z dostępem do Internetu. Wymiana wiedzy dotyczy jednak nie tylko specjalistów. Wśród działań podejmowanych przez muzea są również wykłady i lekcje muzealne. Obrazy RTI można wykorzystać zatem w ramach takich prac, sprawiając, że mogą się one stać nie tylko ciekawsze dla odbiorcy, ale angażując go w proces doświadczania modeli spowodują, że zyska on szansę, aby stać się dużo aktywniejszym uczestnikiem zajęć.

Na koniec warto wspomnieć o jeszcze jednej zaletce RTI. Interaktywne obrazy mogą stać się interesującym produktem dla mediów oraz sponsorów placówek. By nieco ułatwić ich integrację ze stronami internetowymi potencjalnych sponsorów, można je udostępnić w formie tradycyjnego pliku wideo, na którym ukażemy grę światła i cieni w różnych trybach wizualizujących zabytek. Taka sekwencja ujęć nie wymaga od odbiorcy aktywności i wyświetla „zaprogramowany” układ kolejnych trybów, pokazując jednocześnie więcej treści niż pojedyncza fotografia. Do pliku wideo można także dołączyć kadry z sesji zdjęciowej czy momenty „odkrywania” zabytków przez osoby odwiedzające muzeum. Sponsor może otrzymać również cyfrową ramkę ze zdjęciami, z których każde następne będzie przedstawiało ten sam zabytek oświetlone z innej strony i pod innym kątem. Również w tym wypadku uzyskamy ruchomy obraz, jak w materiale wideo.

Podsumowanie: ocena metody RTI

Dokonując podsumowania, warto zwrócić uwagę na to, że opisywana metoda, mimo pewnych wad i ograniczeń posiada znacznie więcej zalet. Przede wszystkim pomaga ujawnić informacje, które bywają trudno (lub wcale!) uchwytne podczas empirycznego badania powierzchni przedmiotów. Niemały udział w tym mają specjalne algorytmy wbudowane w dostępne oprogramowanie, pozwalające na różne sposoby wizualizacji danych. Wynikiem dokumentacji jest interaktywnie oświetlany wirtualny model zabytku oraz informacje o kolorze jego po-

wierzchni, jej kształcie, aktualnym stanie i innych właściwościach. Poza analizą treści powierzchni, jaką są elementy kompozycji, mamy możliwość odkrycia informacji o technikach i narzędziach, którymi wykonano bądź zmieniono dekorację, motywy ikonograficzne, napisy, czy malunki. Interpretacje obrazów RTI łatwo mogą zostać zweryfikowane przez innych badaczy i konserwatorów. Kolejną zaletą metody jest jej nieinwazyjność. Nie musimy dotykać bezpośrednio zabytku, naruszając jego powierzchnię, jak ma to miejsce w wypadku dokumentacji rysunkowej. Jest też ona maksymalnie zo-biektywizowana poprzez uniezależnienie się od zastanych warunków świetlnych. Światło słoneczne, padając pod konkretnym kątem, uwypukla jedne cechy powierzchni przedmiotu, ukrywając inne. RTI przewyższa te ograniczenia, co ma również znaczące konsekwencje w archeologicznych badaniach terenowych. Wreszcie, jest to metoda niedroga, ze względu na powszechność sprzętu, jaki się w niej wykorzystuje, oraz darmowe oprogramowanie. Nie wymaga drogich mocnych komputerów w celu przetworzenia danych i jest stosunkowo łatwa do nauczania.

W literaturze dotyczącej RTI, można spotkać się z informacją (Duffy 2013), iż nie powinno się dokumentować obiektów większych niż 2 m z powodu utraty szczegółu (ze względu na zbyt małą liczbę pikseli obrazującą każdą z cech powierzchni). Generalnie jest to prawda, choć – naszym zdaniem – wszystko zależy od wielkości elementów, na których dokumentowaniu i późniejszej analizie nam zależy. Ograniczeniem metody jest również rzadko aktualizowane oprogramowanie, w którym nie zaimplementowano funkcji umożliwiających wykonanie przerysu. Aby osiągnąć ten cel niezbędnym jest zapis aktualnego widoku obrazu RTI w postaci pliku graficznego JPG lub PNG i jego edycja w dowolnym programie graficznym, np.: Corel lub Adobe Photoshop. Znaczącą wadą we współczesnym, uzależnionym od technologii, świecie jest też brak oprogramowania umożliwiającego wyświetlanie obrazów RTI na tabletach i smartfonach. Jedynie posiadacze sprzętu firmy Apple są tu w uprzywilejowanej pozycji¹⁵.

Na koniec warto wspomnieć o oczywistym ograniczeniu metody RTI (jak i każdej innej tech-

¹⁴ Plik RTI wykonany na podstawie obrazów o wielkości 24 megapikseli (6000 x 4000) zajmuje 205MB jako plik *.ptm.

¹⁵ <http://www.rtimobileapp.com/new-page>.

niki fotograficznej wykorzystywanej w dokumentacji), jaką jest zróżnicowana jakość samego obrazu źródłowego (czyli jakość pomiarów). Zdjęcia powinny być wykonane prawidłowo pod względem technicznym i cechować się niskim zaszumieniem, a powierzchnie zabytku należy zobrazować wyraziście. Warto pamiętać także o fenomenie, na którego dokumentacji nam zależy – odbiciach, i konieczności zachowania stałej odległości między źródłem światła a zabytkiem. Trzeba także pamiętać o formacie pliku, w jakim zapisane muszą być fotografie otwierane w oprogramowaniu generującym pliki RTI, czyli JPG, który charakteryzuje się utratą szczegółów przy wielokrotnym zapisie lub zastosowaniu kompresji w celu zmniejszenia rozmiaru pliku. Takie działania mogą zatem wpłynąć niekorzystnie na ostateczną jakość obrazu RTI i należy się ich wystrzegać.

Konkludując, metoda RTI ma duże szanse, by stać się jednym z powszechnie wykorzystywanych narzędzi do digitalizacji zabytków/dzieł sztuki w instytucjach związanych z dziedzictwem kulturowym. W dobie tworzenia elektronicznych baz danych, przenoszenia ekspozycji z wystaw na strony internetowe oraz wszechobecnych analiz komputerowych, RTI oferuje bardzo wiele przy relatywnie niskich nakładach finansowych. Choć pewne ograniczenia metody wciąż pozostają do poprawienia, a niektóre po prostu nie mogą być usunięte, to w chwili obecnej jest ona jednym z najskuteczniejszych narzędzi do wizualizacji zabytków, o olbrzymim potencjale badawczym, konserwatorskim i edukacyjnym.

Bibliografia

- BEDNARIK R.G.
2016 Rock art and pareidolia. *Rock art research* 33: 167-181.
- CHŁODNICKI M.
2007 Archaeological research between Khor Umm Ghizlan and Shemkhiya Region 2003-2005. W: C. Näser, M. Lange (red.), *Proceedings of the Second International Conference on the Archaeology of the Fourth Nile Cataract, Berlin August 4th – 6th, 2005* (= Meroitica 23): 206-212. Wiesbaden.
- CHŁODNICKI M., BAGIŃSKA D., POLKOWSKI P.L.
2015 *Archaeology of the Sudan. Catalogue of the Exhibition in the Poznań Archaeological Museum*. Poznań.
- COSENTINO A.
2013 Macro Photography for Reflectance Transformation Imaging: A Practical Guide to the Highlights Method. *e-conservation Journal* 1: 70-85.
https://www.google.pl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewidgdin5fLWAhWBYVAKHWmBBkgQFghAMAI&url=https%3A%2F%2Fwww.jvrb.org%2Fpast-issues%2F4.2007%2F2120%2F420077.pdf&usg=AOvVaw3vmDINZV-0zsscP_3TSMsD [dostęp: 21.08.2017].
- CULTURAL HERITAGE IMAGING
2013a *Reflectance Transformation Imaging: Guide to Highlight Image Capture. Document version 2.0*. San Francisco.
http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/RTI_Hlt_Capture_Guide_v2_0.pdf [dostęp: 05.05.2016].
- 2013b *Reflectance Transformation Imaging: Guide to RTI Viewer. v1.2*. San Francisco.
http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/rtiviewer/RTIViewer_Guide_v1_1.pdf [dostęp: 05.05.2016].
- DÍAZ-GUARDAMINO M., WHEATLEY D.
2013 Rock art and digital technologies: the application of Reflectance Transformation Imaging (RTI) and 3D laser scanning to the study of Late Bronze Age Iberian stelae. *MENGA. Journal of Andalusian Prehistory* 4: 187-203.
- DÍAZ-GUARDAMINO M., GARCÍA SANJUÁN L., WHEATLEY D., RODRÍGUEZ ZAMORA V.
2015 RTI and the study of engraved rock art: A re-examination of the Iberian south-western stelae of Setefilla and Almadén de la Plata 2 (Seville, Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 2: 41-54.
- DUFFY S. M., BRYAN P., EARL G., BEALE G., PAGI H., KOTOULA E.
2013 *Multi-light Imaging for Heritage Applications*. English Heritage.
https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/multi-light-imaging-heritage-applications/Multi-light_Imaging_FINAL_low-res.pdf [dostęp: 24.06.2014].
- EARL G. P., MARTINEZ K., MALZBENDER T.
2010 Archaeological Applications of Polynomial Texture Mapping: Analysis, Conservation and Representation. *Journal of Archaeological Science* 37: 2040-2050.
- FALSKI M.
2004 *Przegląd modeli oświetlenia w grafice komputerowej*. Nieopublikowana praca magisterska. Uniwersytet Wrocławski. <https://www.ii.uni.wroc.pl/~anl/MGR/falski.pdf> [dostęp: 20.06.2017].
- GIACHETTI A., CIORTAN I. M., DAFFARA C., PINTUS R., GOBBETTI E.
2017 Multispectral RTI Analysis of Heterogeneous Artworks. W: T. Schreck, T. Weyrich, R. Sablatnig, B. Stular (red.), *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*: 19-28. The Eurographics Association.
- HAMEEUW H., DEVILLERS A., CLAES W.
2016 Relighting Egyptian rock art: Rapid, accurate HD imaging of prehistoric petroglyphs. W: *Proceedings "Young Researchers Overseas' Day"* (16.12.2014): 1-11. Brussels.

- https://zenodo.org/record/48060/files/Hameeuw-Devilleers-Claes_Relighting_Egyptian_Rock_Art.pdf [dostęp: 03.06. 2017]
- KLEINITZ C.
- 2012a Reflectance Transformation Imaging (RTI) in der Bestandsdokumentation der Sekundärbilder und Inschriften von Musawwarat es-Sufra in Rahmen des Musawwarat Graffiti Projekt. *Der Antike Sudan. Mitteilungen der Sudanarchäologischen Gesellschaft zu Berlin e.V.* 23: 7-20.
- 2012b Rock art at the Fourth Nile Cataract: An overview. W: Hans-Peter Wotzka (red.), *Proceedings of the Third International Conference on the Archaeology of the Fourth Nile Cataract, University of Cologne, 13-14 July 2006* (= Africa Praehistorica 22): 33-50. Köln.
- KOTOULA E.
- 2012 *Infrared RTI: Experimentation towards the development of multispectral RTI*. <https://generic.wordpress.soton.ac.uk/archaeology/2012/11/11/infrared-rti-experimentation-towards-the-development-of-multispectral-rti/> [dostęp: 10.10.2017].
- 2013 Application of RTI in Museum Conservation. W: G. Earl, T. Sly, A. Chrysanthi, P. Murietta-Flores, C. Papadopoulos, I. Romanowska, D. Wheatley (red.), *Archaeology in the Digital Era, Volume II. e-Papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Southampton, 26-29 March 2012*: 232-240. Amsterdam. <http://dare.uva.nl/cgi/arno/show.cgi?fid=545855> [dostęp: 10.05.2016].
- KOTOULA E., KYRANOUDI M.
- 2013 Study of Ancient Greek and Roman coins using Reflectance Transformation Imaging. *e-conservation magazine* 25: 74-88.
- MALZBENDER T., GELB D., WOLTERS H.
- 2001 Polynomial Texture Maps. W: red. SIGGRAPH '01 *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*: 519-528. New York.
- MALZBENDER T., GELB D., WOLTERS H., ZUCKERMAN B.
- 2000 *Enhancement of Shape Perception by Surface Reflectance Transformation*. Hewlett-Packard Technical Report HPL-2000-38R1. <http://www.hpl.hp.com/techreports/2000/HPL-2000-38R1.pdf> [dostęp: 10.05.2016].
- MANFREDI M., WILLIAMSON G., KRONKRIGHT D., DOEHNE E., JACOBS M., MARENGO E., BEARMAN G.
- 2013 Measuring Changes in Cultural Heritage Objects with Reflectance Transformation Imaging. W: A. C. Addison, G. Guidi, L. de Luca, S. Pescarin (red.), *Proceedings of the Digital Heritage 2013, 28 October - 1 November 2013, Marseille, France, Vol. 1, 2013*: 189-192. Marseille.
- MANFREDI M., BEARMAN G., WILLIAMSON G., KRONKRIGHT D., DOEHNE E., JACOBS M., MARENGO E.
- 2014 A New Quantitative Method for the Non-Invasive Documentation of Morphological Damage in Paintings Using RTI Surface Normals. *Sensors* 14: 12271-12284.
- MARENGO E., MANFREDI M., ZERBINATI O., ROBOTTI E., MAZZUCCO E., GOSETTI F., BEARMAN G., FRANCE F., SHOR P.
- 2011 Development of a technique based on multi-spectral imaging for monitoring the conservation of cultural heritage objects. *Analytica Chimica Acta* 706: 229-237.
- MACDONALD L. W.
- 2011 Visualising an Egyptian Artefact in 3D: Comparing RTI with Laser Scanning. W: S. Dunn, J. P. Bowen & K. C. Ng (red.), *EVA London 2011: Electronic Visualisation & the Arts. Proceedings of a conference held in London 6-8 July*: 155-162. London.
- MILES J., PITTS M., PAGI H., EARL G.
- 2015 Photogrammetry and RTI Survey of Hoa Hakananai'a Easter Island Statue. W: A. Travaglia (red.), *Across Space and Time. Papers from the 41st Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*: 144-155. Perth.
- MUDGE M., MALZBENDER T., SCHROER C., LUM M.
- 2006 New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display. W: D. Arnold F. Niccolucci, M. Ioannides, K. Mania (red.), *VAST 2006: The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Nicosia, Cyprus, 2006. Proceedings*: 195-202.
- MUDGE M., SCHROER C., NOBLE T., MATTHEWS N., RUSINKIEWICZ S., TOLER-FRANKLIN C.
- 2012 Robust and scientifically reliable rock art documentation from digital photographs. W: J. McDonald, P. Veth (red.), *A Companion to Rock Art*: 644-659. Malden & Oxford.
- PADFIELD J., SAUNDERS D., MALZBENDER T.
- 2005 Polynomial Texture Mapping: A new Tool for Examining the Surface of Paintings. W: I. Verger (red.), *The 14th Triennial Meeting, The Hague Preprints. Vol. I. ICOM Committee for Conservation*: 504-510. London.
- PIQUETTE K. E.
- 2011 Reflectance transformation imaging (RTI) and ancient Egyptian material culture. *Damqatum. The CEHAO newsletter* 7: 16-20. <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/ancient-egyptian-material-culture-piquette.pdf> [Dostęp: 01.03.2018].
- PITTS M., MILES J., PAGI H., EARL G.
- 2014 Hoa Hakananai'a: A new study of an Easter Island statue in the British Museum. *The Antiquaries Journal* 94: 291-321.
- POLKOWSKI P. L., WITKOWSKI P.
- 2017 RTI, czyli kilka słów o dokumentacji sztuki naskalnej. *Archeologia Żywa* 4/2017: 74-81.
- SELMO D., STURT F., MILES J., BASFORD P., MALZBENDER T., MARTINEZ K., THOMPSON C., EARL G., BEVANF G.
- 2017 Underwater reflectance transformation imaging: a technology for in situ underwater cultural heritage object-level recording. *Journal of Electronic Imaging* 26: 1-18.
- WEST SEMITIC RESEARCH PROJECT
- 2015a *MANUAL for Reflectance Transformation Imaging (RTI) Photography For Large Objects*. https://www.usc.edu/dept/LAS/wsrp/projects/RTI%20Manual%20LARGE%20OBJECT%205_29_2015.pdf [dostęp: 10.05.2016].
- 2015b *MANUAL for Reflectance Transformation Imaging (RTI) Photography For Small Objects*.

https://www.usc.edu/dept/LAS/wsrp/projects/RTI%20Manual%20SMALL%20OBJECT%205_29_2015.pdf [dostęp: 10.05.2016].

WILLEMS G., VERBIEST F., MOREAU W., HAMEEUW H., VAN LERBERGHE K., VAN GOOL L.

2005 Easy and cost-effective cuneiform digitizing. W: M. Mudge, N. Ryan, R. Scopigno (red.), *Proceedings of 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST 2005)*: 73-80. Aire-la-Ville.

WITKOWSKI P., J. CHYLA M., EJSMOND W.

2016 Combination of RTI and Decorrelation - an Approach to the Examination of Badly Preserved Rock Inscriptions and Rock Art at Gebelein (Egypt). W: S. Campana, R. Scopigno, G. Carpentiero (red.), *Keep The Revolution Going: Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*: 939-944. Oxford.

On Reflectance Transformation Imaging. Characterisation and application of the method

Summary

In the era of the digital revolution, museums have at their disposal an increasing number of tools which enable the recording of all sorts of objects by generating their digital models. Yet, many of such tools are expensive and require either highly specialised equipment, or software, if not both. However, Reflectance Transformation Imaging (RTI) is a recording technique which offers very good results at relatively low costs, and thus may be considered a suitable and helpful tool for any cultural heritage institution.

RTI can be described as a photographic method which serves to capture an object's surface shape and colour, and produce a 2,5D image of it. Such an image may be then re-lighted from any direction by using dedicated software. Moreover, the image may be further enhanced mathematically, allowing the user to observe features otherwise "invisible" to the naked eye. In other words, RTI provides a way to record objects digitally, which can be later scientifically analysed, or displayed for educational purposes.

The method requires several elements to be used. One needs a computer, a digital camera, a tripod (or other stabilizers), a flashgun with a remote trigger, at least two shiny black balls, and a scale. In order to capture photographs of a relatively small object, we need to place a camera on a tripod above it. Then we take a series of pictures, each time illuminating an object from a different direction. Light should be projected from all directions and at different angles, so as to create a virtual hemisphere of light around an object. The photographs must be then processed via specialised software in order to get an RTI image which can be re-lighted interactively, and, subsequently, analysed.

Any objects whose surface is not entirely flat can be imaged with the RTI technique. It is particularly rewarding to image artefacts with diversified surface topography, but at the same time

not visible clearly enough when examined directly. The method is thus often applied in order to investigate the surface of coins, stelae, clay tablets, stone reliefs, or rock art. Even paintings can be imaged and disclose information, for instance, about potential layers of paint. The interactive re-lighting of RTI images becomes a powerful tool in deciphering iconography and inscriptions, as it makes any analyses independent of lighting conditions (such as sunlight or a lamp in the room). Manual illuminating of objects in software makes it possible for the user to observe the object's features under the preferred lighting; by applying different RTI functions and modes the 'visibility' can be enhanced even more.

We selected three boulders with rock art images as a case study. These stones, kept at the Poznań Archaeological Museum (inv. nos. MAP 2010:85/1, 2010:88/1, and 2010:88/2), had been collected in the Sudan, and are currently displayed as part of the Museum's exhibition. All boulders contain images which were produced with a hard tool, although by different techniques. The stones differ from each other also in terms of quality of their respective surface and colour. Varied surface topographies and different morphology of petroglyphs made these objects most appropriate for testing RTI, promising in addition reliable data for the purpose of comparison.

We evaluate our RTI session as successful, as indeed it helped us in observing certain features which were at best anticipated but not clearly visible. For instance, an RTI image of Stone 1 provided evidence for the existence of an additional petroglyph (representing cattle?), barely seen in normal conditions. Analysing the stones helped us to identify and define many intentional and unintentional traces, especially on Stone 3, which must have been subjected to friction long after the petroglyphs had been executed. In all three cases, applying particular modes of display and lighting configuration produced good quality images in which rock art is much better visible than on the "normal" photographs. We also tested the integration of RTI with digital tools such as DStretch, which proved to be a rewarding combination.

Our overall appraisal of the RTI method is very positive. It is a relatively low-cost technique, which does not require IT specialisation, being thus easily applicable at all sorts of cultural heritage institutions. It is not a time-consuming method, although the bigger the object, the more time it will take to perform a photographic session. All software indispensable to create RTI images is obtainable as open access. 2,5D RTI images can be used in research activities, conservation practices, in education, and last but not least as interactive features of exhibitions. They can be also implemented on websites.

The above advantages must, however, be juxtaposed with the flaws of the method. One of them is its low efficiency in the case of recording large objects. Another disadvantage concerns a lack of software updates, and of a proper software version for tablets and smartphones. What is also important to remember, is that the quality of the generated RTI image will always be dependent on the quality of the photographs, from which it is constituted. The latter are in turn reliant on the camera and the skills of a photographer. However, provided that the pictures are taken properly, RTI offers one of the best and most user-friendly methods of recording artefacts, and has a chance to influence the ways in which such objects are analysed and displayed.