

**WARSZAWSKA
WYŻSZA SZKOŁA INFORMATYKI**

**PRACA DYPLOMOWA
WYŻSZE STUDIA ZAWODOWE**

Łukasz ANDRZEJOWSKI

Numer albumu 2923

**Rekonstrukcja zabytków archeologicznych z wykorzystaniem
grafiki komputerowej w środowisku 3D**

Promotor:

mgr inż. Daniel JAROSZEWSKI

.....
**PRACA SPEŁNIA WYMAGANIA
STAWIANE PRACOM INŻYNIERSKIM NA
STUDIACH INŻYNIERSKICH**

Spis treści

1. Wstęp.....	4
2. Wprowadzenie teoretyczne.....	5
2.1. Grafika rastrowa	5
2.1.1. Kompresja bezstratna	5
2.1.2. Kompresja stratna	5
2.2. Modele przestrzeni barw w grafice rastrowej.....	6
2.2.1. Model RGB	6
2.2.2. Model CMY/CMYK	7
2.2.2. Model HSV.....	9
2.3. Grafika wektorowa	10
2.4. Przekształcenia 2D	11
2.4.1. Przesunięcie	11
2.4.2. Skalowanie	12
2.4.3. Obracanie.....	13
2.5. Metody wizualizacji	14
2.5.1. Metoda rzutowania promieni.....	15
2.5.2. Metoda śledzenia promieni.....	15
2.5.2. Metoda energetyczna.....	16
2.6. Tekstury	18
2.6.1. Mapowanie	18
2.6.2. Bump mapping i displacement mapping	19
2.6.3. Tekstury parametryczne	20
3. Przygotowania do realizacji	22
3.1. Wybór przedmiotów do rekonstrukcji.....	22
3.2. Zbieranie materiałów referencyjnych.....	24
4. Modelowanie	26
4.1. Narzędzia	27
4.1.1. Krzesiwo.....	27
4.1.2. Osełka	28
4.1.3. Krzesak	28
4.2. Włócznia i oszczep	29
4.3. Miecz	31
4.4. Tarcza	33
4.4.1. Główki nitów	33
4.4.2. Umbo	33
4.4.3. Okucia brzegów tarczy	34
4.4.4. Tarcza	35
4.4.5. Okucie imacza i okucia na powierzchni tarczy	35
5. Teksturowanie	37
5.1. Narzędzia.....	37
5.1.1. Krzesiwo.....	38
5.2. Włócznia i oszczep	39
5.3. Miecz	41
5.4. Tarcza	43
6. Przygotowanie do animacji i animacja.....	45
6.1. Oświetlenie	45
6.2. Ustawianie sceny	46

6.3. Animacja.....	47
7. Renderowanie, montaż nieliniowy i udźwiękowienie.....	49
7.1. Renderowanie	49
7.2. Udźwiękowienie	50
7.3. Montaż nieliniowy.....	51
8. Wnioski.....	52

1. WSTĘP

Rekonstrukcja zniszczonych, pochodzących sprzed wielu stuleci przedmiotów jest bardzo ciekawym zagadnieniem. Możliwość odtworzenia ich wyglądu, na podstawie zachowanych do dziś fragmentów, pozwala nie tylko poznać lepiej ich budowę i funkcję, ale także dowiedzieć się czegoś o ludziach, którzy je stworzyli, w pewnym sensie dotknąć historii. Wykorzystanie nowoczesnej technologii do stworzenia trójwymiarowej wizualizacji rekonstrukcji zabytków jest niezwykle ciekawym przedsięwzięciem. Połączenie wiedzy archeologów z możliwościami drzejącymi we komputerowym oprogramowaniu graficznym ma szczególny urok, wyrażony przez kontrast wielu wieków historii ze współczesną wiedzą i osiągnięciami informatyki. Formuła filmu przypominającego produkcje popularnonaukowe narzuciła się niejako sama, bowiem jest to wyśmienity sposób na dokładne pokazanie efektów rekonstrukcji, a jednocześnie zainteresowanie widza, który nie orientuje się w tematyce archeologicznej.

Celem tej pracy jest przedstawienie procesu rekonstrukcji i wizualizacji zniszczonych zabytków archeologicznych. Obejmuje on zebranie i analizę materiałów referencyjnych, modelowanie przedmiotów w środowisku 3D, tworzenie w środowisku 2D materiałów pokrywających modele i wreszcie przygotowanie animacji, prezentującej efekt rekonstrukcji.

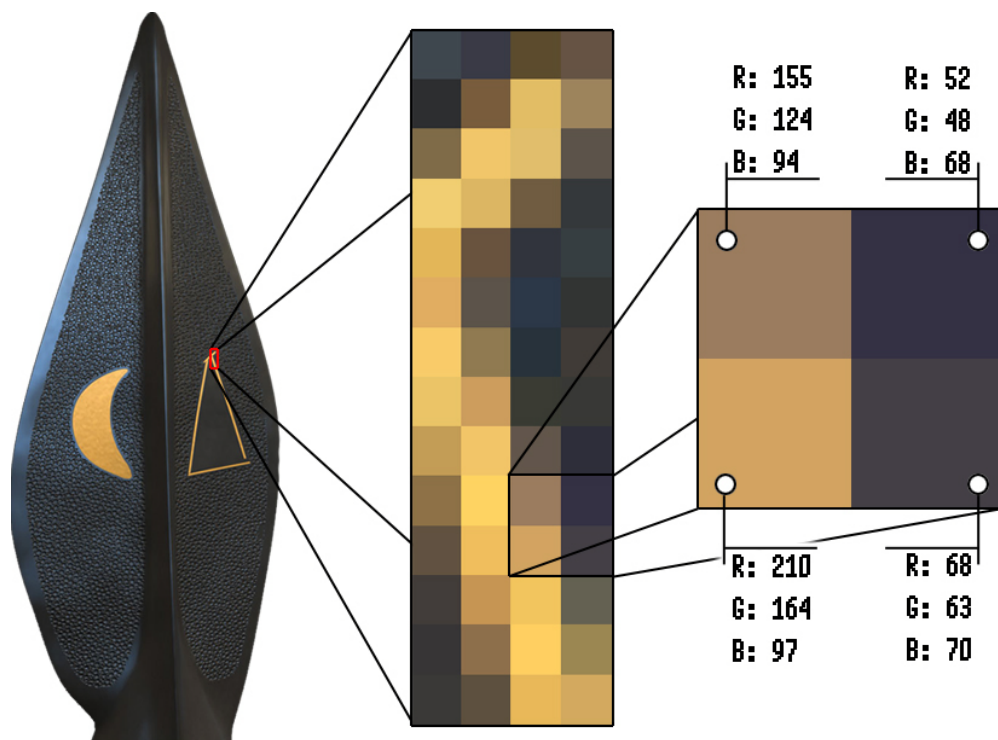
Materiał podzielony został zgodnie z kolejnymi etapami działań. Wprowadzenie teoretyczne obejmuje wybrane zagadnienia, związane z realizacją tej pracy. Następnie omówiony jest proces kompletowania materiałów referencyjnych i ich analiza pod kątem przydatności do wykorzystania w dalszej części pracy. W rozdziale poświęconym modelowaniu, opisany został sposób budowy kolejnych modeli i wykorzystane przy tym narzędzia. Część dotycząca teksturowania omawia przebieg produkcji tekstur i napotkane przy teksturowaniu tym problemy. W dwóch kolejnych rozdziałach przedstawione zostały prace wykończeniowe i przebieg montażu ostatecznej wersji animacji.

2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

2.1. Grafika rastrowa

Obraz w grafice rastrowej, nazywanej też bitmapową, tworzony jest przez ułożone na regularnej siatce punkty, odpowiadające pikselom na urządzeniach wyjściowych, na przykład monitorze lub drukarce. Do opisu piksela może zostać użyte od jednego bitu (w obrazach dwubarwnych) do kilku bajtów.

Do przechowywania obrazów rastrowych wykorzystywane są trzy rodzaje formatów: bez kompresji, z kompresją bezstratną i z kompresją stratną. Przykładem formatu, w którym nie stosuje się kompresji danych jest BMP, gdzie pełnym zestawem wartości opisany jest każdy punkt składający się na obraz.



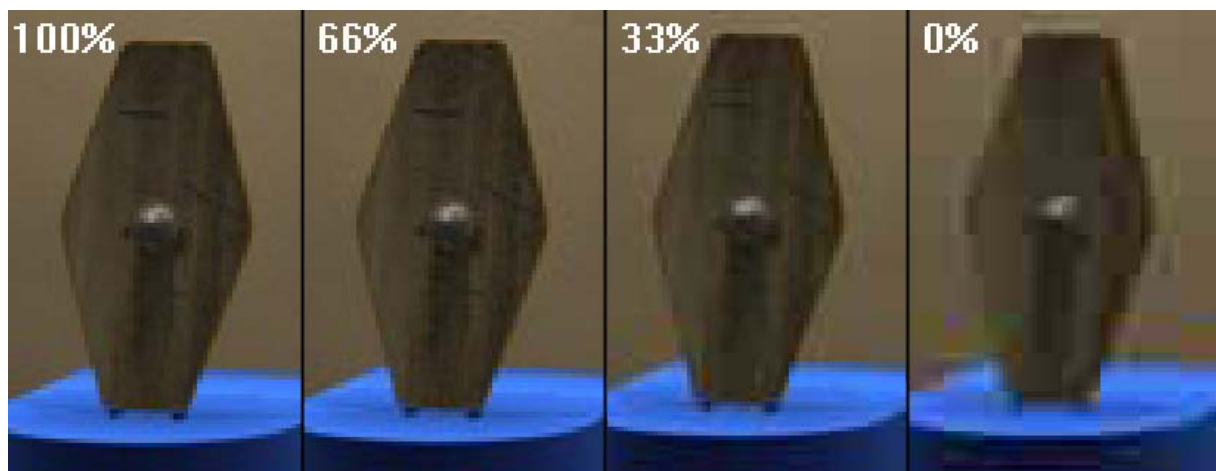
Rys. 2.1. Grafika rastrowa

2.1.1. Kompresja bezstratna

Kompresji bezstratnej używa się, gdy konieczne jest idealne odtworzenie pierwotnego obrazu. Jednym z najpopularniejszych formatów wykorzystujących kompresję bezstratną jest PNG, gdzie zastosowano algorytm deflate oparty o algorytm LZ77 i kodowanie Huffmana.

2.1.2. Kompresja stratna

Wszędzie tam, gdzie niewielki rozmiar pliku graficznego jest istotniejszy niż jakość obrazu, stosowane są algorytmy kompresji stratnej. Pozwalają one na znaczne zredukowanie wielkości pliku bez wyraźnego dla ludzkiego oka pogorszenia wyglądu obrazu. Wraz z rozwojem Internetu bardzo dużą popularność zyskał standard JPEG, pozwalający na kompresję rzędu 20:1, przy praktycznie niedostrzegalnej utracie detali. Algorytm JPEG składa się z wielu kroków, ale największa strata informacji następuje podczas kwantyzacji danych przekształconych dyskretną transformatą kosinusową, kiedy wartości zmiennoprzecinkowe zastępowane są liczbami całkowitymi.



Rys. 2.2. Kompresja stratna algorytmu JPEG

2.2. Modele przestrzeni barw w grafice rastrowej

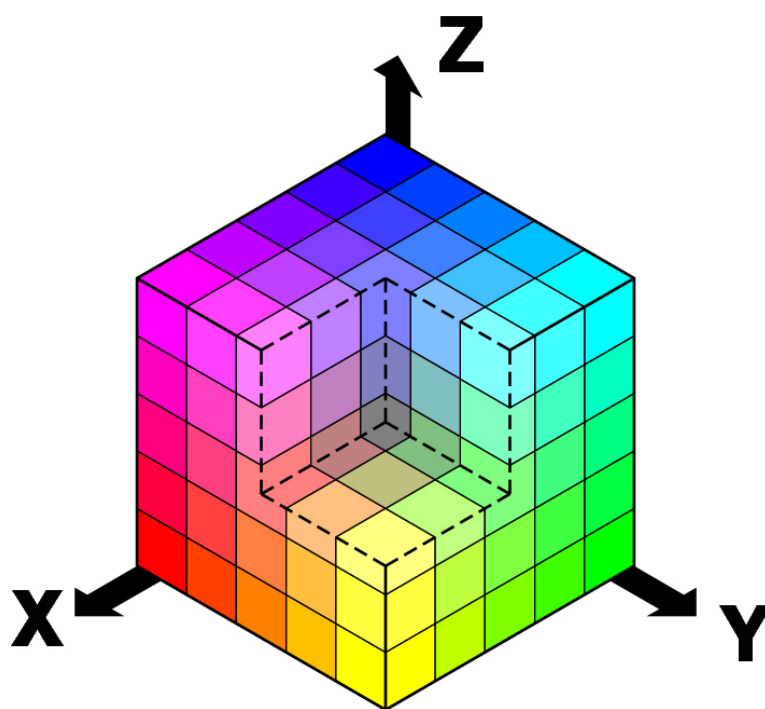
Modele przestrzeni barw są matematyczną reprezentacją barw z określonej gamy, opisanych trójwymiarowym systemem współrzędnych. Stworzone zostały by umożliwić opis barwy w sposób możliwie zbliżony do postrzegania barw przez człowieka. Różne modele przestrzeni barw zostały określone międzynarodowymi normami.

2.2.1. Model RGB

Model przestrzeni barw RGB jest modelem wykorzystującym syntezę addytywną, barwy powstają w wyniku łączenia czerwonego, zielonego i niebieskiego światła, na przykład

emitowanego przez urządzenia wyjściowe, takie jak kineskopy czy wyświetlacze ciekłokrystaliczne. Jest to model teoretyczny i jego odwzorowanie jest uzależnione od charakterystyki widma emitowanego przez urządzenia wyjściowe.

W modelu przestrzeni barw RGB, wykorzystywanym w technice analogowej i cyfrowej, punkt definiowany jest wartością każdego z trzech kolorów składowych. Popularnie stosowana jest 24-bitowa paleta, która do opisanie koloru piksela wykorzystuje trzy bajty, co daje 256 poziomów intensywności (od 0 – czarny, do 255 – pełna intensywność) dla każdej składowej i ponad 16 milionów możliwych do uzyskania kolorów.



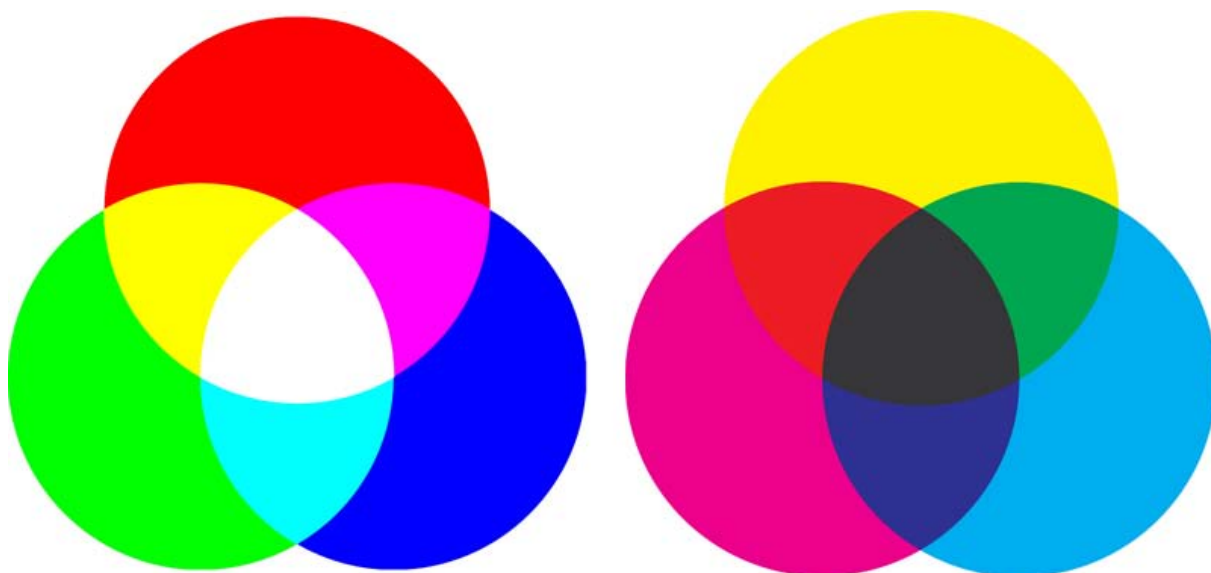
Rys. 2.3. Model przestrzeni barw RGB przedstawiony na sześciacie jednostkowym (z wyciętym fragmentem, prezentującym wnętrze sześcianu) [6]

Model ten można przedstawić za pomocą sześcianu jednostkowego (rys. 2.3), w którym trzy przeciwległe wierzchołki reprezentują trzy barwy podstawowe, a przekątna z równymi wartościami każdej z tych barw, reprezentuje poziomy szarości od czarnego do białego.

2.2.2. Model CMY/CMYK

Model przestrzeni barw CMY jest modelem wykorzystującym syntezę subtraktywną, barwy powstają przez mieszanie barw dopełniających: cyjan jest barwą dopełniającą dla czerwonego, magenta dla zielonego, a żółty dla niebieskiego. Kolory podstawowe w modelu

CMY absorbują część widma światła odbitego, odwrotnie niż w modelu RGB, gdzie kolory podstawowe są emisją określonego widma, dlatego barwy wynikowe modelu CMY są efektem odejmowania przez poszczególne barwy podstawowe różnych długości promieniowań światła widzialnego.



Rys. 2.4. Porównanie syntezy addytywnej modelu przestrzeni barw RGB (z lewej) i syntezy substraktywnej modelu przestrzeni barw CMY (z prawej)

Model CMY wykorzystywany jest przede wszystkim w druku i dlatego stworzono uzupełniający go model CMYK z czwartym, czarnym kolorem uzupełniającym. Było to konieczne bowiem niemożliwe jest uzyskanie idealnej czystości barwników podstawowych, a tylko w takim wypadku da się uzyskać kolor czarny, powstający przez nałożenie wszystkich barw podstawowych w pełnej intensywności. W praktyce uzyskać można najwyżej ciemny szaro-brązowy odcień, nie tylko niewystarczająco bliski czarnego, ale też wymagający zużycia trzykrotnie większej ilości farby niż w przypadku druku jednym, czarnym barwnikiem. Zastosowanie dodatkowego koloru ułatwia też druk precyzyjny, na przykład typografii – gdyby stosować mieszanie trzech barwników, trzeba by idealnie dopasować każdą warstwę druku, co w praktyce jest bardzo trudne do osiągnięcia.

Konwersji między tymi dwoma modelami można dokonać za pomocą następujących równań:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

gdzie:

C – wartość intensywności barwy cyjan w modelu CMY

M – wartość intensywności barwy magenta w modelu CMY

Y – wartość intensywności barwy żółtej w modelu CMY

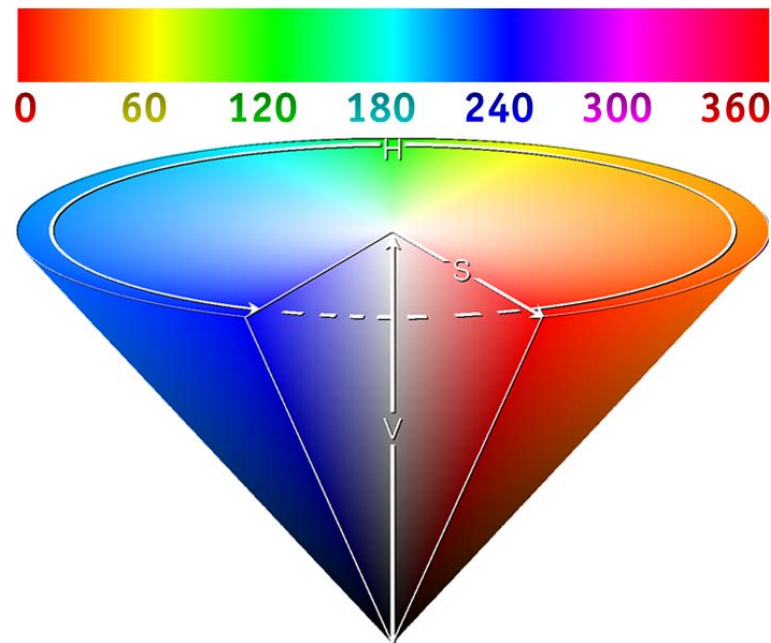
R – wartość intensywności barwy czerwonej w modelu RGB

G – wartość intensywności barwy zielonej w modelu RGB

B – wartość intensywności barwy niebieskiej w modelu RGB

Macierz jednostkowa we wzorach (2.1) reprezentuje kolor czarny dla modelu CMY i kolor biały dla modelu RGB.

2.2.2. Model HSV



Rys. 2.5. Stożek reprezentujący model przestrzeni barw HSV wraz z przykładowymi wartościami odcieni kolorów [6]

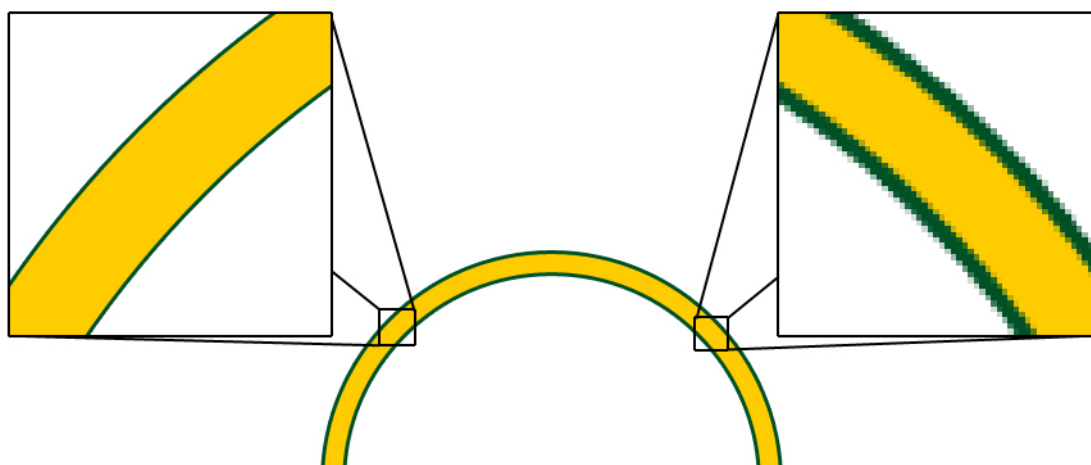
W odróżnieniu od modeli przestrzeni barw RGB i CMYK, które uwarunkowane są technicznymi rozwiązaniami stosowanymi w urządzeniach wyjściowych takich jak wyświetlacze i drukarki, model HSV jest odpowiedzią na potrzeby użytkownika. Operuje on bardziej naturalnymi wartościami odcienia, nasycenia i jasności barwy. Przedstawiany jest w postaci stożka o podstawie z koła barw (Rys. 2.5.), na którym odcień przedstawiony jest kątem o war-

tości od 0° do 360° (0° lub 360° dla czystego koloru czerwonego, 120° dla zielonego i 240° dla niebieskiego), nasycenie stanowi promień podstawy, a wysokość stożka opisuje jasność.

2.3. Grafika wektorowa

Obrazy w grafice wektorowej tworzone są za pomocą opisanych matematycznie obiektów takich jak punkty, proste, krzywe czy wielokąty. Pozwala to na dowolne skalowanie i przekształcanie obrazu bez straty jakości, obecnej przy takich działaniach na obrazach rastrowych. Grafika wektorowa wykorzystywana jest tam gdzie niezbędna jest skalowalność obrazu, przede wszystkim w druku, ale także do tworzenia fontów, które muszą być czytelnie niezależnie od rozmiaru.

Przed wysłaniem grafiki obiektowej do urządzenia wyjściowego, na przykład monitora, dokonywana jest rasteryzacja obrazu, czyli zamiana obiektów wektorowych na piksele.



Rys. 2.6. Efekty skalowania w grafice wektorowej (z lewej) i rastrowej (z prawej)

Grafika wektorowa ma także powszechne zastosowanie w tworzeniu obrazów w środowisku 3D. Istnieje co prawda odpowiednik grafiki rastrowej w środowisku trójwymiarowym – obrazy tworzone z wokseli, czyli pikseli wolumetrycznych, punktów rozmieszczanych na przestrzennej siatce na podobnej zasadzie jak piksele w grafice rastrowej, ale metoda ta jest zbyt obciążająca sprzętowo, by znaleźć szerokie zastosowanie. Używana jest głównie w wizualizacjach medycznych, gdzie obrazy przestrzenne generowane są na podstawie łączonych ze sobą płaskich skanów.

2.4. Przekształcenia 2D

Podstawowymi transformacjami obrazów wektorowych są przekształcenia obiektów wykonywane na płaszczyźnie. Obiekt zdefiniowany za pomocą punktów można przesuwać, skalować i obracać, dokonujących wybranych operacji na każdym z tych punktów.

2.4.1. Przesunięcie

Obiekt można przesunąć na płaszczyźnie dodając do współrzędnych definiujących go punktów współrzędne wektora przesunięcia. Przesunięcie punktu $P(x,y)$ do nowego położenia $P'(x',y')$ o wektor (d_x, d_y) można zapisać następująco:

$$\begin{aligned}x' &= x + d_x \\ y' &= y + d_y\end{aligned}\tag{2.2}$$

gdzie:

x, y – współrzędne początkowego położenia punktu

x', y' – współrzędne docelowego położenia punktu

d_x – wartość przesunięcia wzdłuż osi x układu współrzędnych

d_y – wartość przesunięcia wzdłuż osi y układu współrzędnych

Jeśli współrzędne punktów i wektora przesunięcia zapisać w postaci macierzy:

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix}\tag{2.3}$$

gdzie:

P – pierwotne położenie punktu

P' – docelowe położenie punktu

T – wektor przesunięcia

x, y – współrzędne początkowego położenia punktu

x', y' – współrzędne docelowego położenia punktu

d_x – wartość przesunięcia wzdłuż osi x układu współrzędnych

d_y – wartość przesunięcia wzdłuż osi y układu współrzędnych

to równanie (1.1) da się przedstawić w skróconej postaci:

$$P' = P + T \quad (2.4)$$

gdzie:

P – pierwotne położenie punktu

P' – docelowe położenie punktu

T – wektor przesunięcia

2.4.2. Skalowanie

Zmiana skali obiektu odbywa się na analogicznej zasadzie co przesunięcie. Każdy punkt skaluje się mnożąc jego współrzędne przez współczynnik skalowania wzdłuż obu osi układu współrzędnych, co można zapisać następująco:

$$\begin{aligned} x' &= s_x \cdot x \\ y' &= s_y \cdot y \end{aligned} \quad (2.5)$$

gdzie:

x, y – współrzędne początkowego położenia punktu

x', y' – współrzędne docelowego położenia punktu

s_x – współczynnik skalowania względem osi x układu współrzędnych

s_y – współczynnik skalowania względem osi y układu współrzędnych

Żeby dokonać zapisu tego działania w postaci macierzowej, trzeba uzupełnić macierz skalowania tak, by można było wykonać operację mnożenia. Otrzymane równanie będzie miało następującą postać:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

gdzie:

x, y – współrzędne początkowego położenia punktu

x', y' – współrzędne docelowego położenia punktu

s_x – współczynnik skalowania względem osi x układu współrzędnych

s_y – współczynnik skalowania względem osi y układu współrzędnych

co w skróconym zapisie można przedstawić jako:

$$P' = S \cdot P \quad (2.7)$$

gdzie:

P – pierwotne położenie punktu

P' – docelowe położenie punktu

S – współczynnik skalowania

2.4.3. Obracanie

Podobnie wykonywana jest operacja obracania obiektu. W najprostszym przypadku, kiedy obrót wykonywany jest wokół początku układu współrzędnych, matematyczne przedstawienie ma następujący zapis:

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot \cos \theta - y \cdot \sin \theta \\ y' &= x \cdot \sin \theta + y \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (2.8)$$

gdzie:

x, y – współrzędne początkowego położenia punktu

x', y' – współrzędne docelowego położenia punktu

θ – kąt obrotu wokół początku układu współrzędnych

co w postaci macierzowej da się zapisać jako:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

gdzie:

x, y – współrzędne początkowego położenia punktu

x', y' – współrzędne docelowego położenia punktu

θ – kąt obrotu wokół początku układu współrzędnych

co z kolei przedstawić można w uproszczonym zapisie następująco:

$$P' = R \cdot P \quad (2.10)$$

gdzie:

P – pierwotne położenie punktu

P' – docelowe położenie punktu

R – macierz obrotu

2.5. Metody wizualizacji

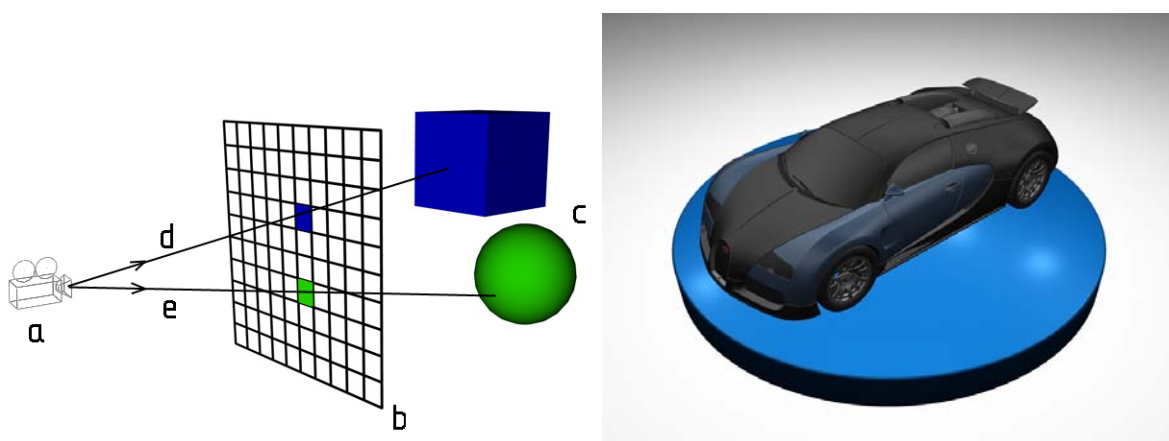
Osiągnięcie fotorealistycznych efektów w generowanych komputerowo obrazach jest obok komputerowo wspieranego projektowania jednym z wiodących kierunków rozwoju oprogramowania graficznego. Pierwsze algorytmy prowadzące do tego celu naśladowały różne zjawiska optyczne, ale wraz ze wzrostem możliwości obliczeniowych współczesnych komputerów, zostały zastąpione rozwiązaniami opartymi na matematycznym opisie tych zjawisk. Teoretycznie najprostszym wyjściem jest symulacja wszystkich zjawisk dla każdego źródła światła, emitującego umowne promienie, i każdego obiektu, obecnych w scenie trójwymiarowej. W praktyce takie podejście wymaga olbrzymiej mocy obliczeniowej, która w dodatku w znacznej mierze zostaje marnowana, bowiem wirtualny obserwator obejmuje tylko fragment całej sceny. Z tego powodu opracowana została metoda analizy jedynie dla tych fragmentów, które są widoczne dla obserwatora.



Rys. 2.7. Grafika komputerowa rysunkowa i fotorealistyczna

2.5.1. Metoda rzutowania promieni

Metoda rzutowania promieni polega na wyprowadzaniu promieni, po jednym na piksel, od obserwatora w kierunku płaszczyzny rzutowania i znalezieniu dla każdego promienia miejsca pierwszego przecięcia z obiektem na scenie (Rys. 2.8.). Na tej podstawie określany jest kolor piksela, natomiast jego jasność zależy od kąta pomiędzy wektorem normalnej płaszczyzny, na której znajduje się obrazowany punkt, a odcinkiem tworzonym między obserwatorem i obserwowanym punktem. W metodzie tej przyjęto uproszczone założenie, że światło nie jest blokowane i zawsze dotrze do obiektu, dlatego nie pozwala ona na generowanie cieni rzucanych przez obiekty. Ponadto z powodu, że promienie analizowane są tylko do pierwszego przecięcia z obiektem na scenie, niemożliwe jest uzyskanie efektów optycznych, takich jak odbicia, refrakcje i cienie.

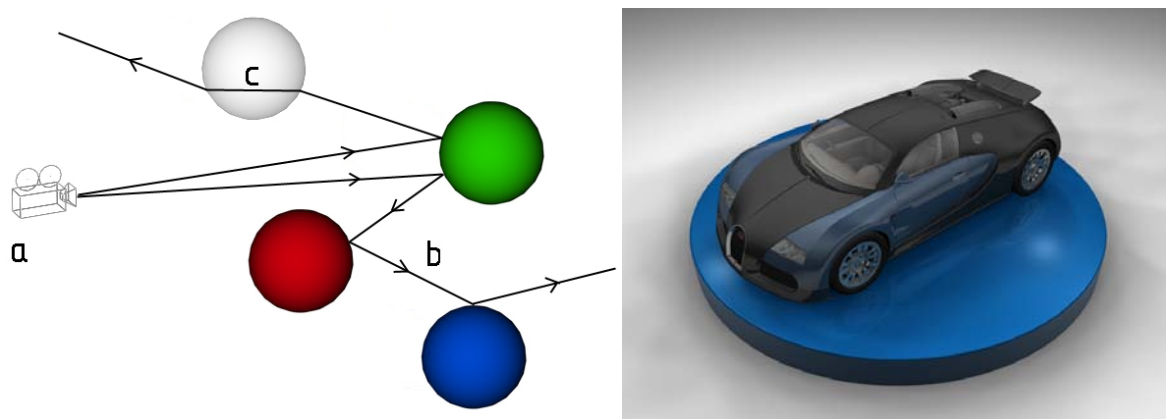


Rys. 2.8. Metoda rzutowania promieni: a) kamera, b) płaszczyzna rzutowania, c) obiekty na scenie d), e) rzutowane promienie. Z prawej strony efekt wizualizacji tą metodą

2.5.2. Metoda śledzenia promieni

Metoda śledzenia promieni jest rozwinięciem metody rzutowania promieni. Tak samo promienie wyprowadzane są od obserwatora w kierunku płaszczyzny rzutowania, jednak analiza każdego z promieni nie kończy się w momencie pierwszego przecięcia z obiektem na scenie (Rys. 2.9.). Promień analizowany jest dalej, z uwzględnieniem właściwości powierzchni, w które trafia i może dodatkowo utworzyć trzy kolejne typy promieni: odbicia, refrakcji i cienia. Promień odbity od lustrzanej powierzchni śledzony jest do momentu trafienia w kolejną przeszkodę – kolor piksela, przez który przechodzi promień przed odbiciem,

odzwierciedla kolor obiektu, w który trafił promień po odbiciu. Dla obiektów przezroczystych, załamujących promienie, wykonywane są analogiczne działania. Cienie natomiast wyznaczane są przez wysyłanie promieni od źródeł światła, do pierwszego przecięcia z obiektem na scenie. Następnie promień taki jest przedłużany za miejsce przecięcia i sprawdzane jest, czy na jego drodze znajdują się inne obiekty. Jeśli tak, oznacza to że pierwszy obiekt zasłonił źródło światła dla kolejnego i rzuca cień.



Rys. 2.9. Metoda śledzeniapromieni: a) kamera, b) promień odbite, c) promień załamany przez obiekt. Z prawej strony efekt wizualizacji tą metodą

2.5.2. Metoda energetyczna

Zupełnie innym podejściem charakteryzuje się metoda energetyczna. Oparta jest o symulację zjawisk fizycznych związanych z promieniowaniem cieplnym, z czego wynikają dwie zasady: zachowania energii na powierzchni obiektu i zachowania energii w scenie. Pierwsza z nich mówi o tym, że całe światło, które dociera do powierzchni obiektu jest przez nią odbijane, załamywane lub pochłaniane, natomiast druga zasada mówi, że energia świetlna może dotrzeć do każdego obiektu na scenie. W metodzie energetycznej każdy obiekt znajdujący się na scenie może emitować światło, dlatego wszystkie źródła światła traktowane są jak obiekty o niezerowej powierzchni.

Przygotowanie sceny do obliczeń polega na podzieleniu powierzchni wszystkich obiektów na skończonej wielkości tak zwane płyty, emitujące i odbijające światło jednakowo całą swoją powierzchnią. Dla każdego płyta wyznaczany jest współczynnik pochłaniania światła – jeśli jest dodatni to część energii świetlnej docierającej do płyty jest przez niego absorbowana, a pozostała część odbijana, natomiast jeśli jest ujemny to światło jest przez płyt emitowane. Następnie dla każdej pary płyt dokonuje się obliczeń sprawdzających ile ener-

gii świetlnej przekazywanej jest pomiędzy tymi płatami. Kolejnym etapem jest iteracyjne obliczanie jasności każdego z płatów, zgodnie z następującą zależnością:

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j F_{j-i} \frac{A_j}{A_i} \quad (2.11)$$

gdzie:

B_i, B_j – natężenie oświetlenia płatów i oraz j

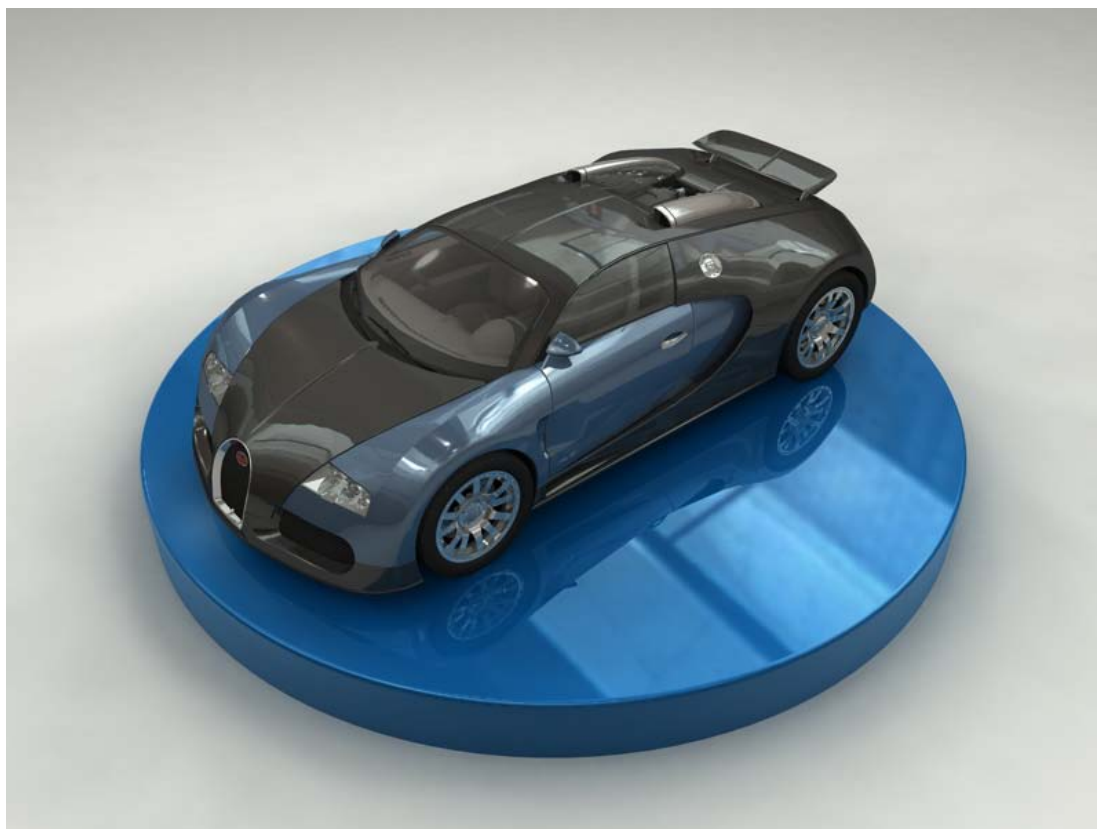
E_i – natężenie energii świetlnej emitowanej przez płat i

ρ_i – współczynnik odbicia płata i

F_{j-i} – współczynnik sprzężenia optycznego pary płatów

A_i, A_j – powierzchnie płatów i oraz j

Dla uzyskania najlepszego efektu wizualnego, przy jednoczesnym możliwie największym uproszczeniu obliczeń, łączy się metody śledzenia promieni i energetyczne, wykorzystując zalety obu metod i uzupełniając ich wzajemne braki. Metoda energetyczna służy do realistycznego globalnego oświetlenia sceny z uwzględnieniem pochłaniania i odbijania światła przez wszystkie powierzchnie, natomiast metodą śledzenia promieni obrazuje się odbicia, załamania i ostre cienie.



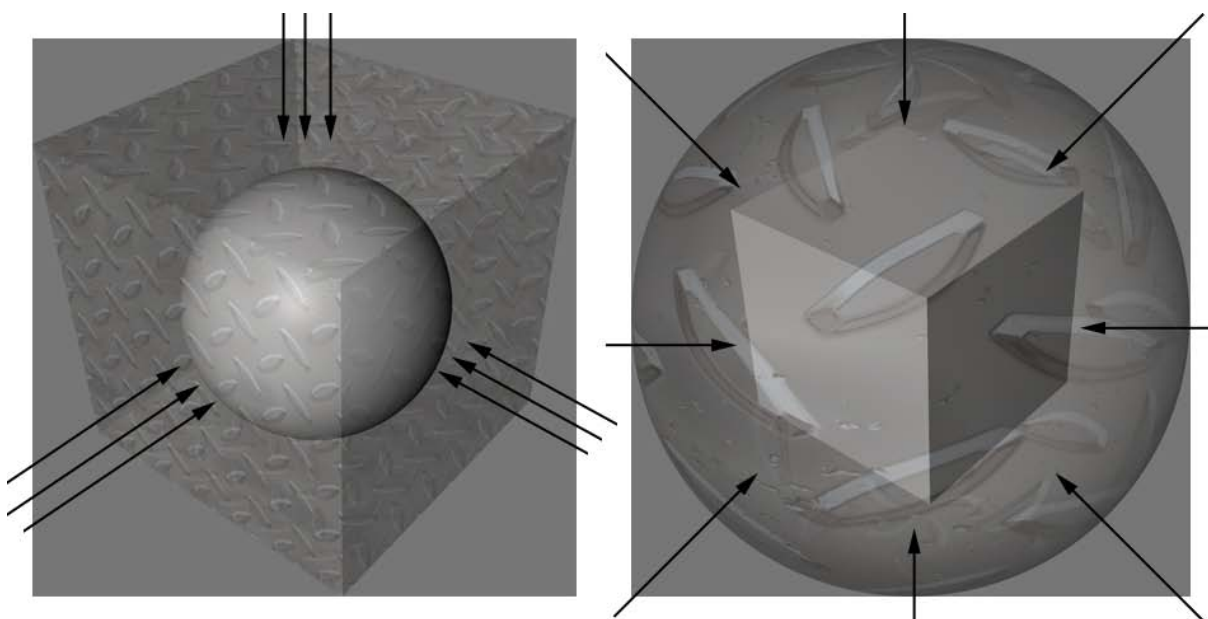
Rys. 2.8. Obraz uzyskany połączeniem metody energetycznej z metodą śledzenia promieni

2.6. Tekstury

Tekstury nazwać można funkcją modyfikującą właściwości powierzchni obiektów znajdujących się na scenie. Mówiąc bardziej obrazowo, tekstura odpowiadać może za kolor, fakturę, refleksyjność, chropowatość, a nawet deformacje powierzchni obiektu, do którego zostanie przypisana.

2.6.1. Mapowanie

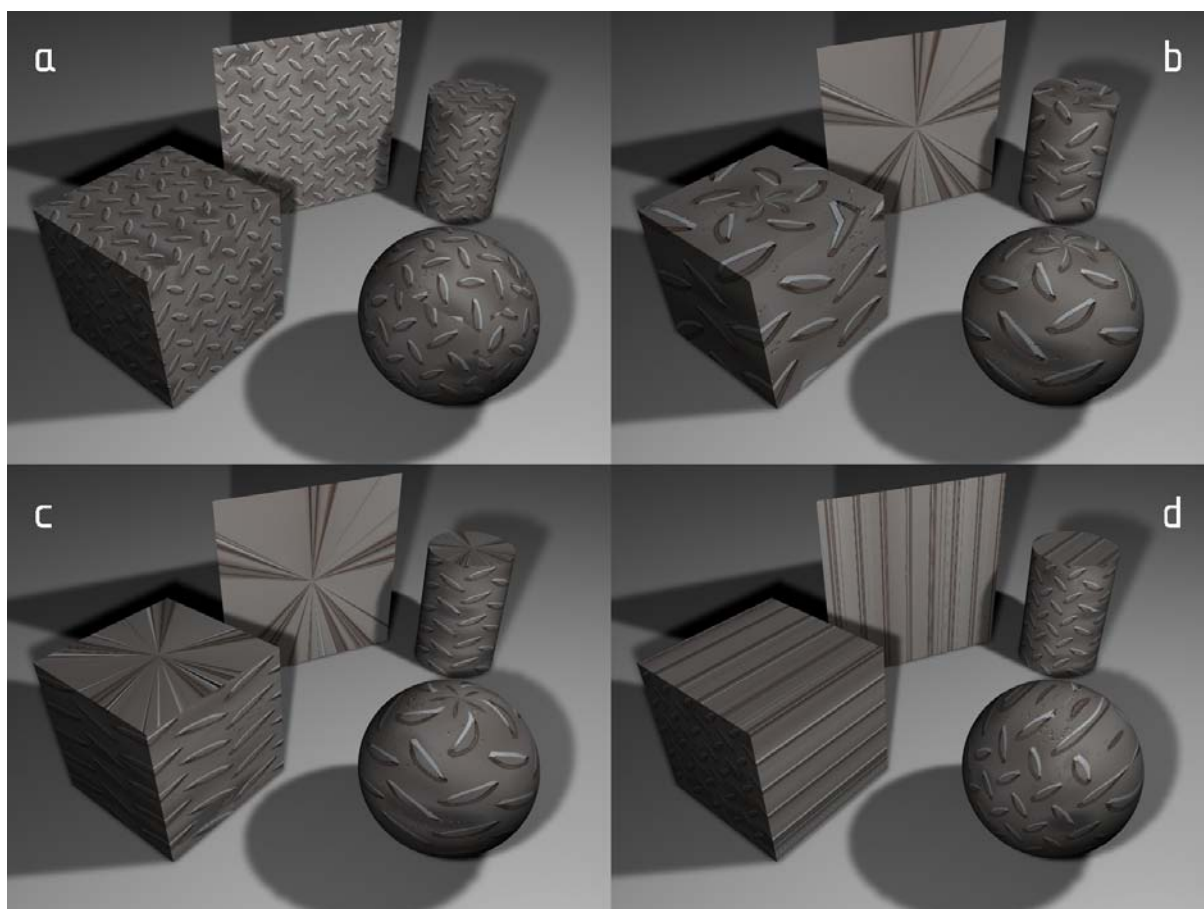
Mapowanie tekstur to operacja polegająca na przyporządkowaniu współrzędnych siatki tworzącej obiekt 3D współrzędnym dwuwymiarowej tekstury. Podstawowe metody mapowania to rzutowanie tekstur – „wyświetlanie” ich na obiektach z pomocą „projektorów” o różnych kształtach (Rys. 2.9.).



Rys. 2.9. Rzutowanie tekstury na obiekt: z lewej rzutowanie sześciennie na kulę, z prawej rzutowanie sferyczne na sześcian. Strzałki wskazują kierunki, z których tekstura rzutowana jest na obiekt

Taka metoda sprawdza się w przypadku prostych geometrycznie obiektów, o kształtach zbliżonych do kształtu rzutowania, ale nie daje zadowalających efektów przy bardziej

złożonych formach. Dlatego stworzone zostało mapowanie UV, które pozwala odwzorować trójwymiarową siatkę na płaskiej powierzchni, umożliwiając tym samym precyzyjne dopasowanie każdego punktu siatki do nakładanej na nią tekstury.

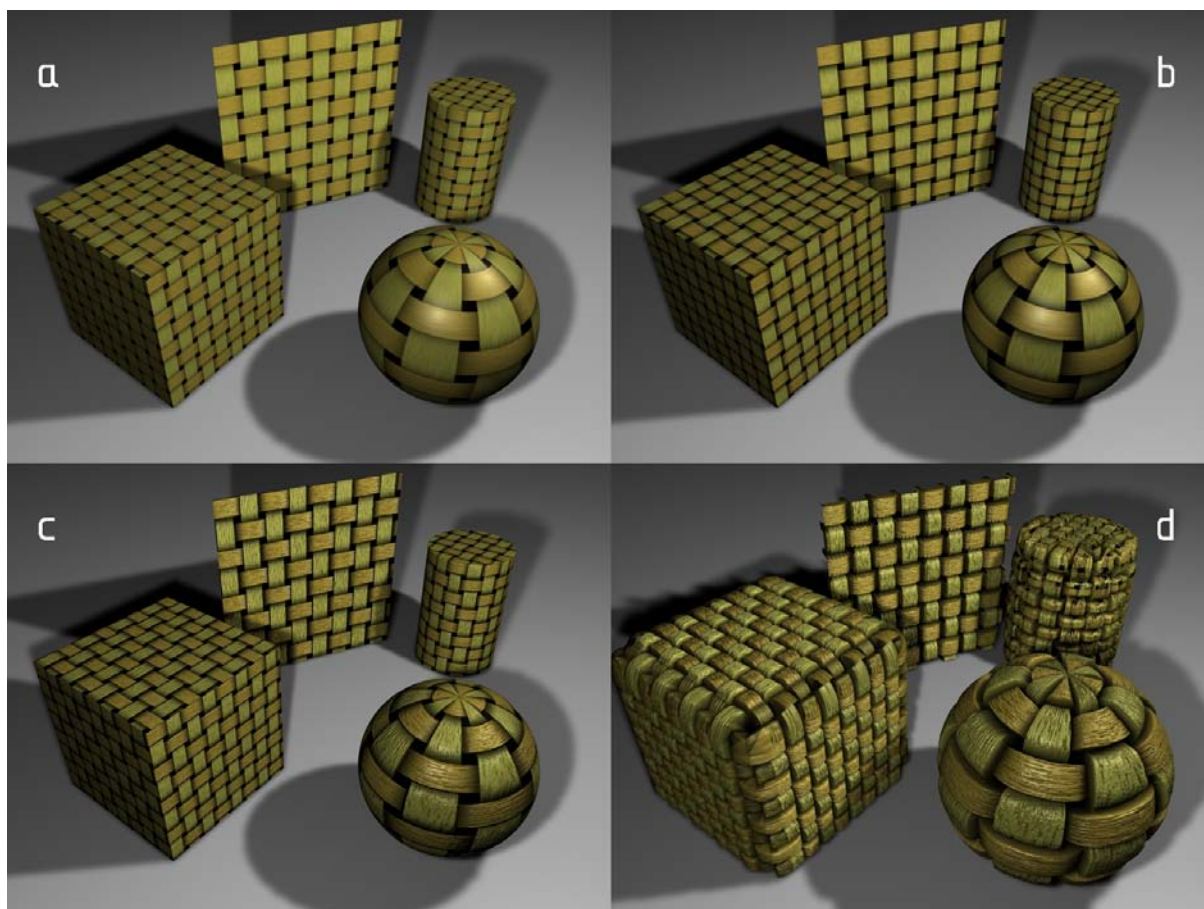


Rys. 2.10. Porównanie efektów mapowania: a) sześciennego, b) sferycznego, c) cylindrycznego, d) płaszczyznowego

2.6.2. Bump mapping i displacement mapping

Tekstury, poza zmianą koloru obiektu, mogą też służyć do symulowania nierówności i faktycznego odkształcania siatki obiektu. Pierwsza z metod polega na obracaniu wektora normalnego powierzchni, dzięki czemu zmienia się kąt padania światła na tę powierzchnię, wyliczany podczas modelowania cieniowania obiektu. Jest to sposób stosunkowo szybki i w większości wypadków dający zadowalające rezultaty, choć można łatwo zauważyć, że mimo złudzenia nierówności powierzchni, obrys obiektu pozostaje prosty. Druga metoda dokonuje rzeczywistego odkształcania siatki obiektu – w czasie renderowania punkty siatki

przesuwane są wzdłuż wektora normalnego, tym samym zmieniana jest geometria obiektu. Efekt ten jest znacznie bardziej realistyczny, choć wymaga też dużo większej ilości obliczeń.



Rys. 2.11. Porównanie efektów mapowania nierówności: a) tekstura bez mapowania nierówności, b) tekstura przygotowana tak, by naśladować efekt mapowania nierówności, c) tekstura z zastosowanym bump mapping, d) tekstura z zastosowanym displacement mapping

2.6.3. Tekstury parametryczne

Tekstury mogą być przygotowanymi wcześniej bitmapami – rysunkami, zdjęciami itp., ale mogą być także generowane na podstawie wzorów matematycznych. Są to tekstury parametryczne i, jak wskazuje nazwa, ich wygląd może być modyfikowany z pomocą opisujących je parametrów. Przykładami takich obrazów są m.in. fraktale, szumy, kształty geometryczne czy obrazy naśladujące słoje drewna lub marmur. Teksturę marmuru opisać można stosunkowo prostym wzorem [9]:

$$Marble = \sin(f \cdot (x + A \cdot Turb(x, y, z))) \quad (2.12)$$

gdzie:

Marble – funkcja generująca obraz imitujący marmur

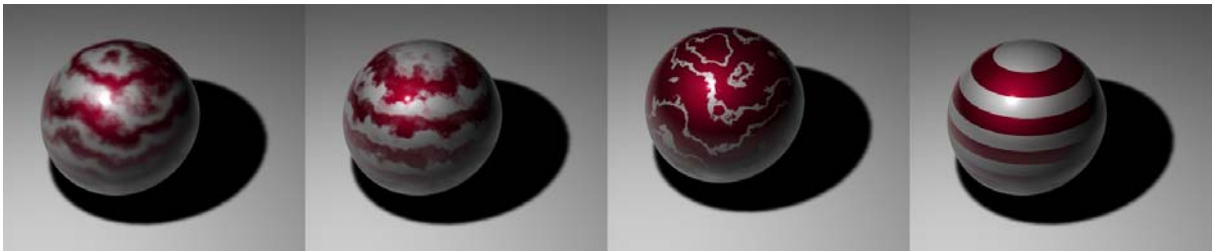
Turb – funkcja turbulencji

f – częstotliwość funkcji sinusa

A – amplituda funkcji turbulencji

x,y,z – współrzędne przestrzeni tekstury

Przebieg powstawania tekstury marmuru z użyciem powyższego wzoru wygląda następująco: trójwymiarowa przestrzeń tekstury wypełniana jest za pomocą funkcji sinusa dwukolorowymi pasami, następnie pasy te są odkształcane przez funkcję turbulencji. Częstotliwość funkcji sinusa wpływa na rozmiar pasów – otrzymać można niewiele szerokich pasów lub wiele wąskich, natomiast amplituda funkcji turbulencji wpływa na siłę odkształcenia pasów. W skrajnych przypadkach otrzymać można równe, proste pasy lub jednolitą barwę, będącą efektem całkowitego rozmycia pasów.



Rys. 2.12. Różne efekty uzyskane przy użyciu funkcji Marble

3. PRZYGOTOWANIA DO REALIZACJI

Pomysły na realizację animacji od samego początku koncentrowały się wokół rekonstrukcji zabytków archeologicznych. Idea wykorzystania nowoczesnej technologii do wizualizacji pierwotnego wyglądu zniszczonych, pochodzących sprzed wielu wieków przedmiotów była bardzo atrakcyjna. Na początku konieczne było rozwiązanie dwóch kwestii: skompletowanie zestawu przedmiotów do odtworzenia i opracowanie sposobu ich prezentacji – od tego zależała znaczna część przyszłych działań.



Rys. 3.1. Replika miecza ze zbiorów PMA (na górze) i testowy render komputerowej rekonstrukcji (na dole)

Rekonstrukcja pierwotnego wyglądu przedmiotów narzucała precyzyjne wykonanie ich komputerowych modeli, więc oczywistym było, że konieczne będzie pokazanie wszystkich detali. Rozważane było stworzenie animacji przypominających hasła encyklopedii multimedialnej, ostatecznie obraz przyjął formę zbliżoną do filmu popularnonaukowego – z jednej strony pozwoliło to na precyzyjną prezentację wykonanych modeli, a z drugiej, dzięki dołączonemu komentarzowi, film może pełnić funkcję edukacyjną, w przystępny sposób opisując budowę i funkcję poszczególnych przedmiotów.

3.1. Wybór przedmiotów do rekonstrukcji

Kolejnym problemem na etapie przygotowań było wybranie zestawu zabytków do odtworzenia. Musiały to być rzeczy na tyle zniszczone, żeby miało sens ich rekonstruowanie, ale też na tyle dobrze zachowane, by można było dokonać rekonstrukcji. Istotnym czynnikiem

była też wizualna atrakcyjność przedmiotów dla odbiorcy, dlatego odrzucone zostały zabytki interesujące z punktu widzenia archeologicznego, ale nieciekawe dla laika. Kolejnym kryterium była różnorodność kształtów i materiałów, tak by możliwe było zastosowanie rozmaitych technik graficznych.

Ostatecznie wybrany został zestaw przedmiotów pochodzących z cmentarzyska z I-II w. naszej ery, odkrytego w 1982 roku we wsi Nadkole u ujścia Liwca do Bugu. Cmentarzysko zostało całkowicie zbadane wykopaliskowo przez archeologów z Państwowego Muzeum Archeologicznego w Warszawie [2], gdzie przechowywane są wszystkie zabytki. Dobór przedmiotów koncentrował się wokół wyposażenia, którym mógł dysponować ówczesny wojownik, jednak nie wszystkie trafiły do końcowej animacji, głównie z powodu ograniczeń czasowych. Zgodne było to z poczynionym wcześniej założeniem, by w skomponowanym zestawie można było w razie potrzeby zrezygnować z niektórych elementów.



Rys. 3.2. Zestaw zdjęć referencyjnych umba tarczy

3.2. Zbieranie materiałów referencyjnych

Za zgodą dyrektora Państwowego Muzeum Archeologicznego, pana Wojciecha Brzezińskiego, na potrzeby niniejszej pracy dyplomowej udostępnione zostały wybrane zabytki ze zbiorów muzeum. Dzięki temu możliwe było stworzenie szczegółowej dokumentacji fotograficznej, wykonanej z uwzględnieniem potrzeb przyszłych prac (Rys. 3.2.) i stanowiącej trzon materiałów referencyjnych. Znaczącą pomocą okazało się także udostępnienie replik broni, dzięki którym udało się zebrać dużo informacji o materiałach, z których wykonywano te przedmioty. Wiele elementów drewnianych i delikatniejszych metalowych nie zachowało się wcale, lub w bardzo złym stanie, dlatego w celu ustalenia ich wyglądu konieczne okazało się sięgnięcie do dalszych źródeł. Wykorzystana została między innymi dokumentacja rysunkowa z opracowania naukowego stanowiska archeologicznego, z którego pochodzą wybrane przedmioty [2] jak i opracowań innych stanowisk z tamtego okresu. Wyjątkowo przydatne były opracowania materiałów z tak zwanych depozytów bagiennych z terenów Jutlandii i wysp duńskich [3]. Szczególne warunki panujące w bagnach sprawiły, że do dziś doskonale zachowały się zarówno elementy organiczne, takie jak drzewca włóczni i deski tarcz, jak i metal, z którego wykonano znalezione przedmioty.

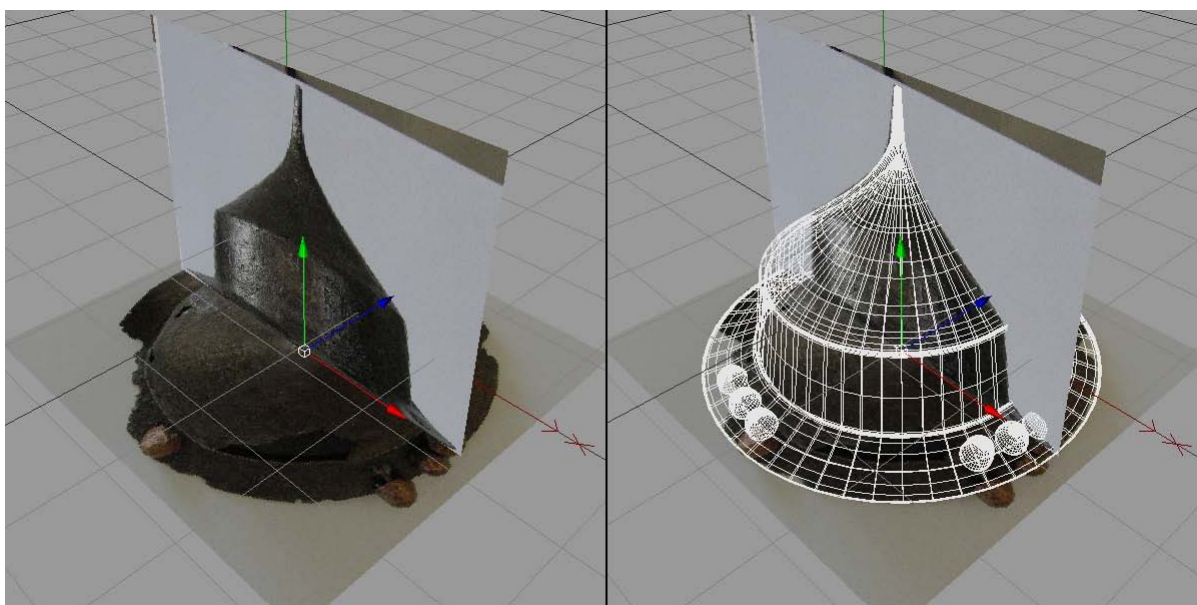


Rys. 3.2. Szkic płaskorzeźby z tzw. pomnika Julijskiego [5] Szarym kolorem wyróżniono wojownika trzymającego sześciokątną tarczę

Najwięcej problemów sprawiła tarcza – zachowały się z niej tylko metalowe elementy, w dodatku niewystarczające do odtworzenia jej kształtu i wymiarów. W tym wypadku pomocne okazały się miniaturka tarczy, znaleziona na tym samym cmentarzysku co tarcza, oraz materiały z innych terenów Europy, ze zbliżonego okresu. Jednym z nich jest tzw. pomnik Julijski – rzymski nagrobek z Nadrenii z I w., obrazujący schemat bitwy pomiędzy legionową konnicą rzymską, a konnymi wojownikami germańskimi [5]. Jeden z barbarzyńskich wojowników ma sześciokątną tarczę (Rys. 3.2.), na której proporcjach można było oprzeć proporcje rekonstrukcji. Drugim źródłem było znalezisko z południowej Norwegii - grób szkieletowy z przełomu I i II w. naszej ery [4]. Pochowany w nim wojownik został przykryty tarczą, której okucia zachowały się na całym obwodzie i leżały w pierwotnym układzie, odwzorując kształt tarczy. Z pomocą tych wszystkich materiałów możliwe było wierne zrekonstruowanie kształtu i rozmiarów tarczy.

4. MODELOWANIE

Wszystkie prace związane z modelowaniem prowadzone były przy użyciu programu Cinema4D. Pierwszym etapem w przypadku większości obiektów było odpowiednie przygotowanie materiałów referencyjnych. Spośród zdjęć przedmiotów należało wybrać odpowiednie ujęcia, pomocne przy podglądzie w rzutach ortogonalnych i ujednolicić ich skalę. Zdjęcia robione były „z ręki”, więc względny rozmiar przedmiotu różnił się na kolejnych ujęciach i trzeba było te różnice zniwelować. Następnie przygotowane w ten sposób zdjęcia nakładane były jako tekstury na obiekty *plane*, które w edytorze dopasowywane były tak, by odpowiednie krawędzie przedmiotów znalazły się w jednej linii w sąsiednich rzutach (Rys. 4.1.).



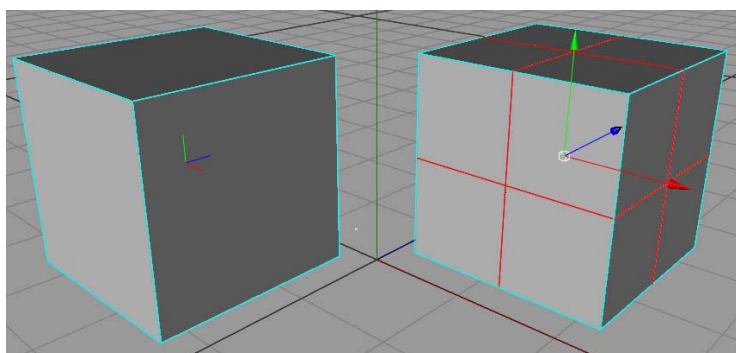
Rys. 4.1. Przygotowanie materiałów referencyjnych do pomocy przy modelowaniu (z lewej) oraz siatka obiektu wykonanego na ich podstawie (z prawej)

Część mniejszych elementów, takich jak nity, modelowana była bez pomocy tak przygotowanych materiałów. Wystarczyła znajomość ich wymiarów, bowiem regularny kształt nie był trudny do odtworzenia i nie było konieczne wspieranie się zdjęciami do celów innych, niż porównawcze. Natomiast całe otoczenie, tworzące środowisko animacji, modelowane było „z głowy”, bez pomocy jakichkolwiek materiałów referencyjnych, inspirowane jedynie zdjęciami podobnych pomieszczeń, znalezionymi w Internecie.

4.1. Narzędzia

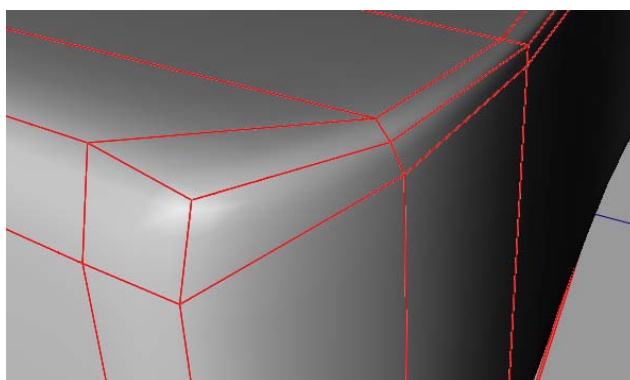
4.1.1. Krzesiwo

Najłatwiejsze do wymodelowania były narzędzia: krzesiwo, oselka oraz krzesak. Modelowanie krzesiwa sprowadziło się do trzech kroków. Pierwszym było dodanie krawędzi na osiach symetrii równoległych do osi układu współrzędnych sceny do podstawowego obiektu prymitywnego – sześcianu (Rys. 4.2.).



Rys. 4.2. Podział sześcianu z użyciem funkcji *Knife*. Na czerwono zaznaczono linie podziału

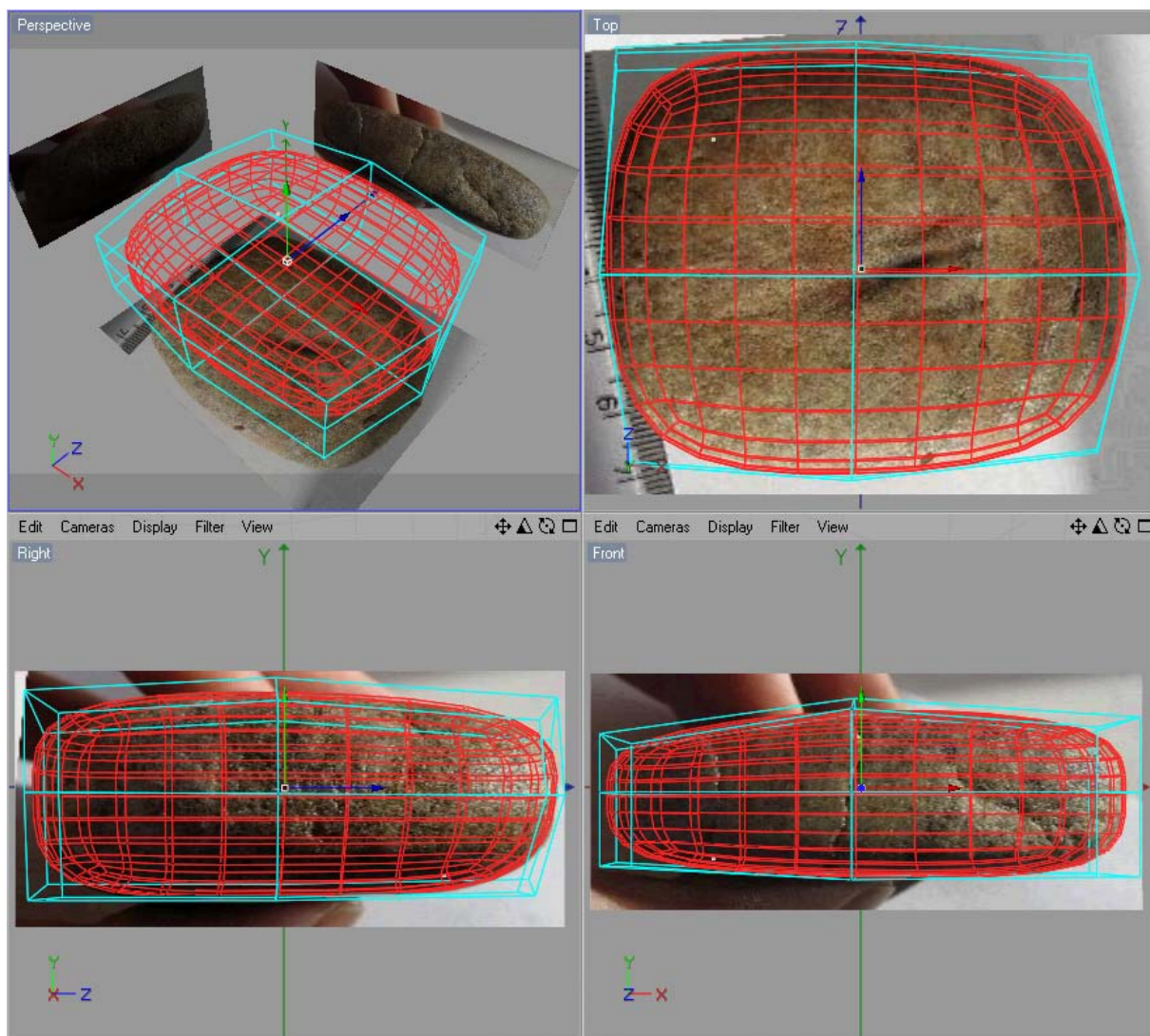
Kolejnym krokiem było wstępne dopasowanie wierzchołków bryły do obrysu przedmiotu ze zdjęć referencyjnych umieszczonych jako tekstury na obiektach *plane*. Następnie w drzewku obiektów w edytorze nałożony został tag HyperNURBS, który modyfikuje siatkę obiektu, zaokrąglając ją i wygładzając. Na zakończenie pozostało już tylko dokonać drobnych korekt, dopasowujących zaokrąglony kształt do zdjęć referencyjnych (Rys. 4.4.).



Rys. 4.3. Liczba i zagęszczenie krawędzi pozwala regulować siłę zaokrąglenia HyperNURBS

4.1.2. Osełka

Analogicznie wykonany został model osełki, z tą różnicą, że większa była liczba wykonanych podziałów. Wynikało to z dwóch przyczyn: nieco bardziej skomplikowanego kształtu i regulowania siły zaokrąglenia HyperNURBS przy pomocy dodatkowych krawędzi w podstawowej siatce obiektu (Rys. 4.3.).

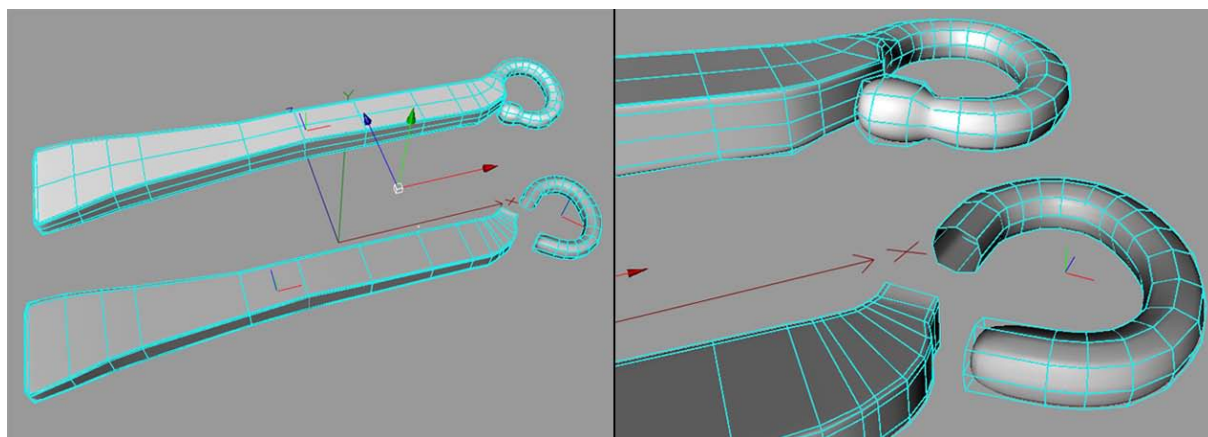


Rys. 4.4. Dopasowanie obiektu do zdjęć referencyjnych krzesiwa. Błękitna siatka prezentuje model podstawowy, siatka czerwona prezentuje model po nałożeniu tagu HyperNURBS

4.1.3. Krzesak

Nieco więcej pracy wymagał model krzesaka. Główna, prosta część wykonana została na tej samej zasadzie co krzesiwo i osełka, po dokonaniu podziału sześcianu na mniejsze

segmenty i nałożeniu tagu HyperNURBS, wierzchołki modelu zostały dopasowane do obrysu przedmiotu ze zdjęć referencyjnych, a obiekt uzupełniany był w miarę potrzeby dodatkowymi krawędziami. Osobno musiał być wykonany haczyk, bowiem jego okrągły kształt i ośmiokątny przekrój wymagały zastosowania innej techniki modelowania. Modelem wyjściowym ponownie stał się sześcian, który został uzupełniony o krawędzie umożliwiające nadanie mu ośmiokątnego przekroju. Następnie jedna ze ścian powstałej bryły została wyciągnięta narzędziem *Extrude*, które w czasie operacji przedłużania tworzy nowe wierzchołki i krawędzie na końcu przedłużenia. Otrzymana w ten sposób ściana, wieńcząca dwusegmentową rurkę o ośmiokątnym przekroju, została następnie obrócona o kilka stopni w poziomie i ponownie przedłużona. Operacja ta powtarzana była do osiągnięcia wymaganej długości niepełnego okręgu, następnie wierzchołki otrzymanej bryły dopasowane zostały do obrysu haczyka krzesaka. Na koniec połączone zostały oba elementy modelu (Rys. 4.5.).

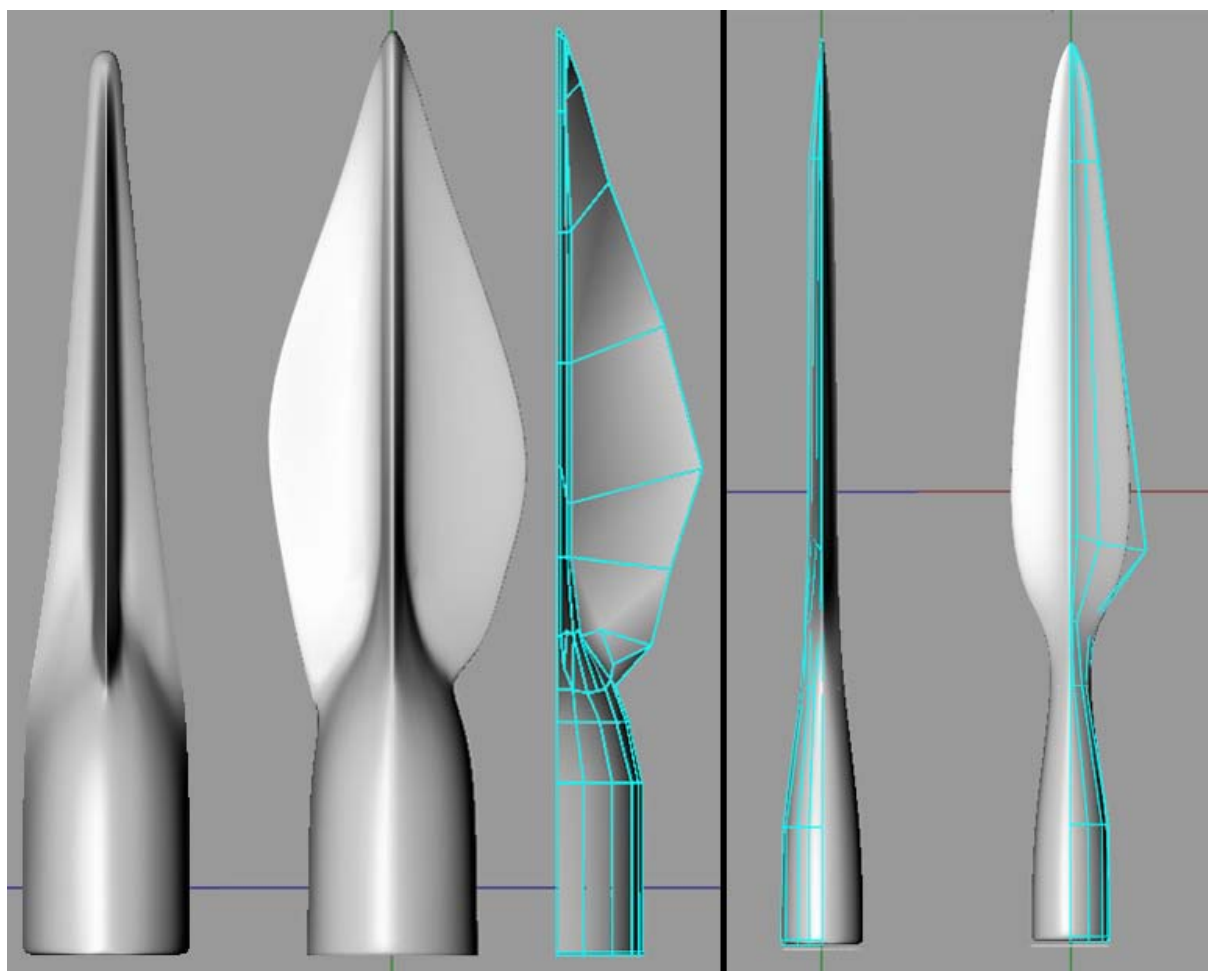


Rys. 4.5. Krzesak złożony został z dwóch elementów. Z lewej strony na górze widać gotowy model, na dole elementy modelu sprzed połączenia. Z prawej strony zbliżenie na haczyk sprzed i po połączeniu.

4.2. Włócznia i oszczep

Modelowanie grotów włóczni i oszczepu miało podobny przebieg. Pierwszym krokiem było podzielenie sześcianu na mniejsze segmenty i dopasowywanie bryły do obrysu ze zdjęcia referencyjnego, przy jednoczesnym dodawaniu krawędzi tam, gdzie było to konieczne. Modelowanie odbywało się z od razu nałożonym na obiekt tagiem HyperNURBS, tak by możliwe było obserwowanie jak zmiana geometrii podstawowej siatki wpływa na zmianę wyglądu obiektu po wygładzeniu i zaokrągleniu.

Ponieważ oba groty są przedmiotami symetrycznymi, zastosowana została funkcja symetrii, tworząca lustrzane odbicie wybranego obiektu, względem jednej z osi układu współrzędnych. W przypadku grotu oszczepu faktycznie modelowana była tylko prawa połowa, ale z powodu, że liście tego grotu nie są w pełni symetryczne, po połączeniu obu połówek – modelowanej i odbitej symetria – konieczne było ręczne poprawienie kształtu lewego liścia grotu. Przy grocie włóczni wykorzystano podwójną symetrię, tak że faktycznie modelowana była tylko ćwiartka obiektu, odbita później względem obu osi symetrii. Podczas modelowania tulejki grotu u jej podstawy i szczytu umieszczone zostały do pomocy dwa okręgi, wyznaczające jej promień w tych miejscach.



Rys. 4.6. Modele grotów przygotowane z wykorzystaniem symetrii, niebieska siatka pokazuje siatkę modelu poddaną symetrycznym odbiciom. Z lewej strony model grotu oszczepu, z pojedynczą symetrią, z prawej model grotu włóczni z podwójną symetrią

Nity i drzewca wymodelowane zostały z walca. Drzewca rozciągnięte zostały do właściwych rozmiarów, w odpowiednich miejscach dodane zostały krawędzie, które posłużyły do

nadania drzewcom odpowiedniej grubości. Główki nitów zostały dodatkowo ręcznie zdeformowane, by naśladować odkształcenia powstające przy wykuwaniu prawdziwego przedmiotu.

4.3. Miecz

Pierwszym problemem przy modelowaniu miecza było dostosowanie materiałów referencyjnych, ponieważ jest on mocno zniszczony i zniekształcony, w dodatku składa się z kilku elementów, z których jeden – drewniana okładzina rękojeści – nie zachował się wcale.



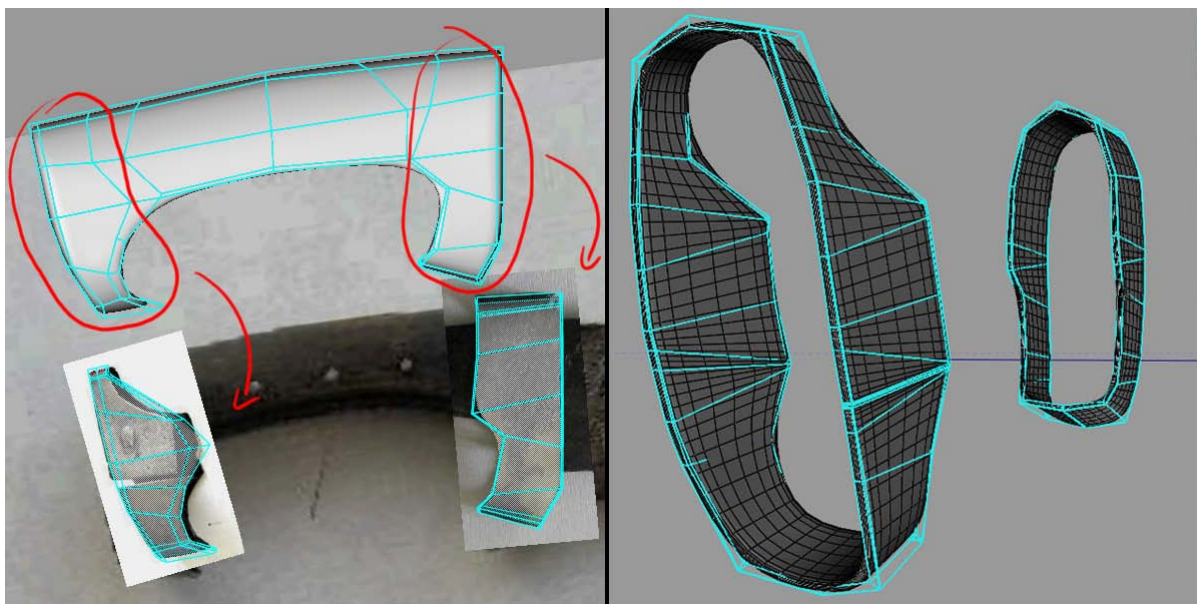
Rys. 4.7. Materiały referencyjne wykorzystane przy modelowaniu miecza: a) zdjęcie repliki miecza ze zbiorów PMA, b) obraz złożony ze trzech zdjęć zniszczonego miecza, d) zbliżenia na okucia rękojeści, c) zdjęcie pokazujące miecz, ze wszystkimi zachowanymi elementami

Po przygotowaniu materiałów można było przystąpić do modelowania. Główny element, głownia przechodząca w rdzeń rękojeści, wymodelowana została w sposób analogiczny do narzędzi i grotów. Począwszy od sześcianu, na drodze kolejnych podziałów i przesuwania

nowych krawędzi, odtworzony został kształt obrysu. Z powodu zastosowania wygładzania HyperNURBS, aby uzyskać wąskie ostrze należało w tej części modelu bardzo zagęścić krawędzie, co miało później dość nieprzyjemne konsekwencje podczas teksturowania.

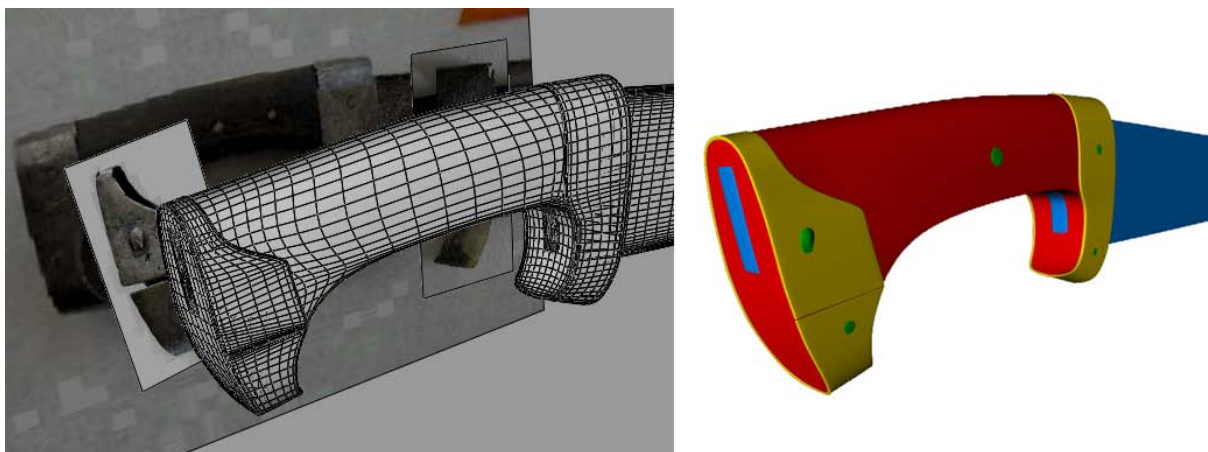
Kolejnym elementem do wykonania była okładzina rękojeści. Do odtworzenia jej ogólnego kształtu wykorzystane zostało zdjęcie repliki miecza. Końce rękojeści wyznaczały zachowane do dziś okucia, możliwe więc było wierne zrekonstruowanie kształtu całej rękojeści.

Gotowy model okładziny rękojeści można było wykorzystać do stworzenia modeli okuć, ponieważ okucia, nakładając się na okładzinę, „kopiowały” jej kształt. Dzięki temu wstępny etap modelowania okuć można było pominąć – po prostu wykonana została kopia modelu okładziny i usunięto z niej zbędne elementy geometrii (Rys. 4.8.). Dużo pracy wymagało przygotowanie do zaokrąglenia przy użyciu HyperNURBS siatki modeli okuć. Ponieważ są to elementy bardzo wąskie trzeba było dopasować liczbę i położenie krawędzi tak, by odtwarzając kształt przedmiotów nie doprowadzić do deformacji brzegów modelu.



Rys. 4.8. Modele okuć okładziny rękojeści miecza. Z lewej strony, na czerwono zaznaczone fragmenty modelu okładziny, wykorzystane do stworzenia modeli okuć. Z prawej gotowe modele okuć

Główki nitów, mocujących okładzinę rękojeści do metalowego rdzenia i okucia do okładziny, wykonane zostały ze spłaszczonych kul, które uformowano w oparciu o rozmiary i kształt zachowanych nitów.



Rys. 4.9. Z lewej strony model miecza na tle materiałów referencyjnych, z prawej gotowy model miecza z wyróżnionymi kolorami elementami, z których składa się model

4.4. Tarcza

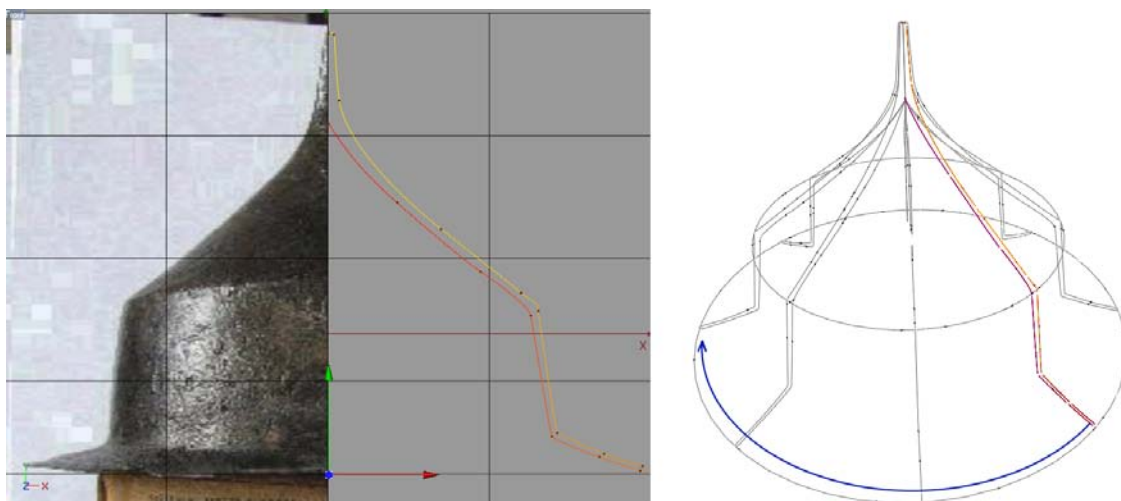
Najbardziej złożonym, choć nie najbardziej skomplikowanym do wykonania modelem, był model tarczy. Najtrudniejszym etapem przy jej tworzeniu było zebranie i opracowanie materiałów referencyjnych. Dobrze zachowały się tylko fragmenty okuć, nity i umbo, całą resztę należało zrekonstruować, posilując się materiałami innymi, niż wykonana wcześniej dokumentacja fotograficzna. Cała tarcza składa się z wielu elementów, z których każdy trzeba było osobno wymodelować.

4.4.1. Główki nitów

Najłatwiejsze do wykonania były główki nitów. Wymodelowane zostały z obiektu *Oil tank* – walca z półokrągłymi podstawami. Z jednej strony tego obiektu podstawa została nieco wyciągnięta i zaokrąglona, druga podstawa została spłaszczona. Powstały obiekt wystarczyło tylko skopiować wymaganą ilość razy i przeskalować dopasowując do wymiarów pozostałych elementów.

4.4.2. Umbo

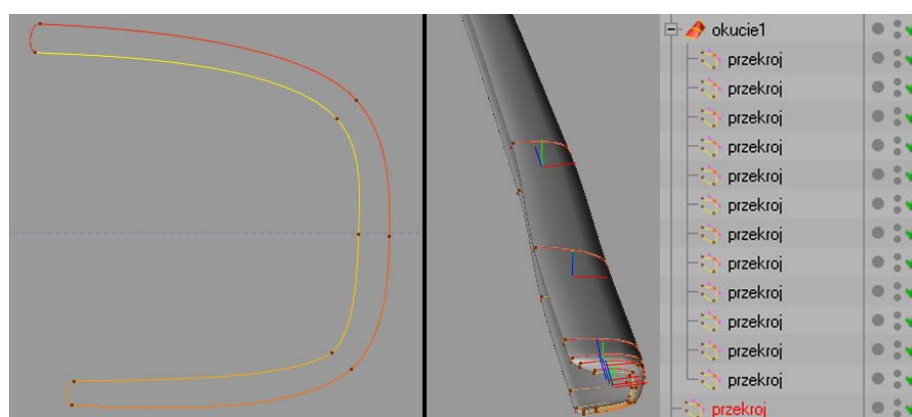
Umbo ma regularny, okrągły kształt, dlatego do jego stworzenia wykorzystane zostało narzędzie *Lathe NURBS*, dzięki któremu można „owinać” przygotowaną wcześniej krzywą wokół osi. W tym wypadku krzywa odtwarzała przekrój umba (Rys. 4.10.).



Rys. 4.10. Z lewej strony krzywa odtwarzająca przekrój umbra (kolorowa linia), z prawej schemat pokazujący działanie funkcji Lathe NURBS:

4.4.3. Okucia brzegów tarczy

Do wykonania okuć brzegów tarczy wykorzystano funkcję *Loft NURBS*, która łączy rozmieszczone na scenie krzywe, tworząc pomiędzy nimi nowe segmenty bryły. Dzięki temu modele wszystkich okuć powstały na bazie jednego przekroju, co zaoszczędziło dużo czasu i pracy. Po wykonaniu modeli o odpowiednich długościach i kształtach należało jeszcze zaokrąglić ich końce. W tym celu na każdym końcu dodano kilka coraz mniejszych przekrojów, dzięki czemu uzyskany został zaokrąglony kształt. Na koniec trzeba było jeszcze dopasować położenie każdego modelu okucia do położenia pozostałych modeli i kształtu samej tarczy.



Rys. 4.11. Konstrukcja modelu okucia brzegu tarczy, od lewej: przekrój stworzony krzywą, fragment modelu, widok na drzewko obiektów tworzących model Lathe NURBS okucia

4.4.4. Tarcza

Główna część tarczy zbudowana jest z desek, drewnianych elementów, które nie zachowały się do dzisiejszych czasów, w związku z tym najpierw trzeba było ustalić kształt przedmiotu (Rys. 4.12.). Początkowo rozważane było modelowanie każdej deski z osobna, ale pomysł ten został szybko zarzucony na rzecz odpowiedniego (naśladującego konstrukcję z desek) teksturowania obiektu w późniejszym etapie. W rezultacie model był bardzo prosty do wykonania i nie było potrzeby stosowania skomplikowanych technik modelowania. Otwór w którym umieszczony jest imacz wycięty został przez usunięcie odpowiednich poligonów modelu.

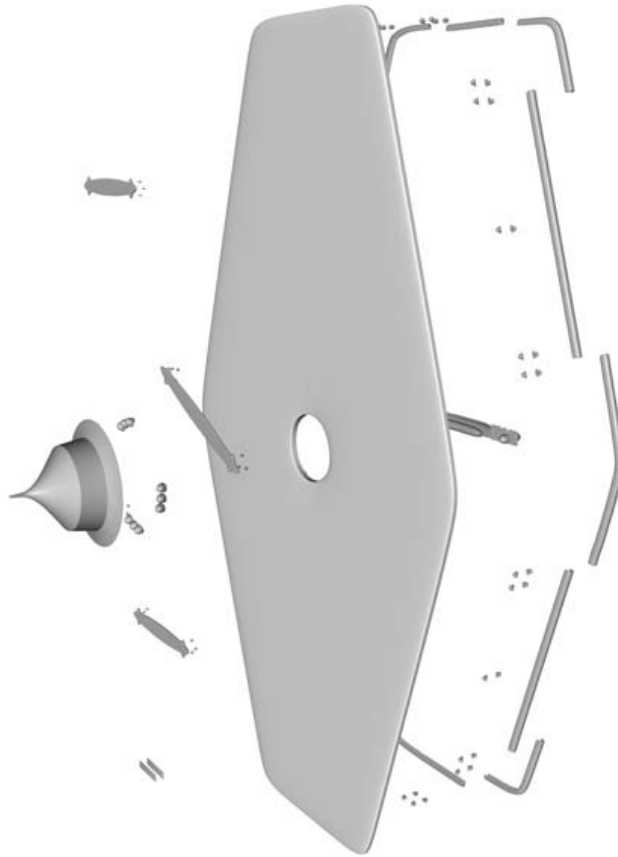


Rys. 4.12. Kształt tarczy, od lewej: miniaturka tarczy, fragment płaskorzeźby z nagrobka, model tarczy wykonany na podstawie materiałów referencyjnych

4.4.5. Okucie imacza i okucia na powierzchni tarczy

Pozostałe okucia nie sprawiały już problemów przy modelowaniu. Okucia na powierzchni tarczy są płaskie, dlatego ich modelowanie przebiegło analogicznie do sposobu modelowania narzędzi. Okucie imacza podzielone zostało na trzy części – płaskie końcówki, półkolisty „grzebień” łączący końcówki ze środkową częścią i sama część środkowa, wygięta w łuk. Każda z części modelowana była osobno, a po połączeniu w całość zostały odbite za pomocą symetrii, tak że faktycznie wymodelowana została tylko połowa obiektu.

Po wymodelowaniu wszystkich elementów składających się na tarczę, trzeba już było tylko dopasować ich położenie na głównym elemencie i można było przejść do dalszego etapu prac. Cały model tarczy składa się ze 175 elementów.



Rys. 4.13. Elementy modelu tarczy

5. TEKSTUROWANIE



Rys. 5.1. Pokryte teksturami modele, od lewej: krzesiwo; osełka

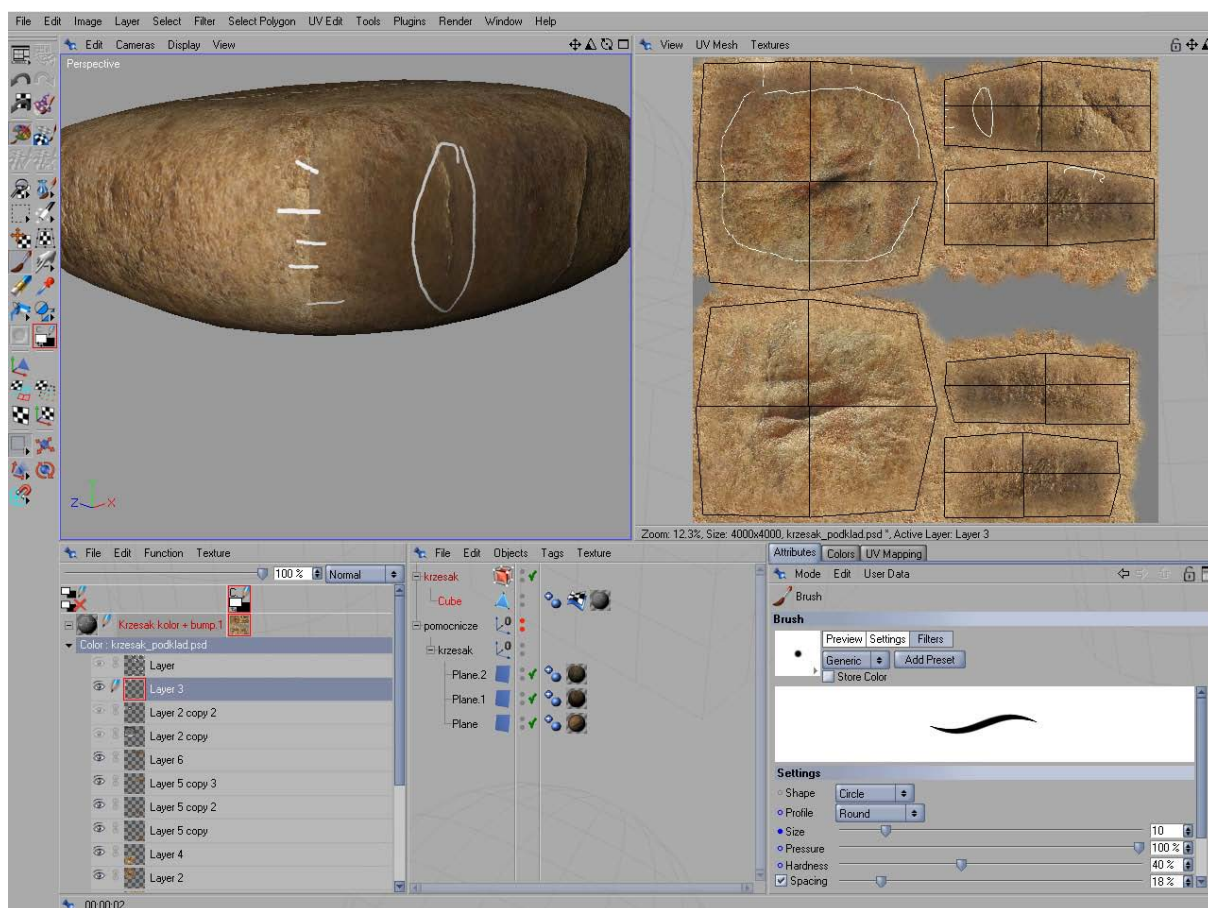
Po zakończeniu modelowania wszystkich przedmiotów, pokazywanych w animacji, przyszedł czas na ich teksturowanie, co okazało się procesem znacznie bardziej wymagającym i czasochłonnym, niż to się początkowo wydawało. Wyszły na jaw niedoskonałości obsługi materiałów przez program Cinema4D, który bardzo słabo radzi sobie z tworzeniem i renderowaniem materiałów organicznych, takich jak drewno i nisko przetworzonych surowców, takich jak ręcznie obrabiane żelazo. Okazało się także, że niemożliwe jest nakładanie na siebie szaderów, przez co nie mogły zostać wykorzystane przy teksturowaniu. Dużą pomocą przy tworzeniu tekstur okazał się tablet graficzny, dzięki któremu możliwe było ręczne rysowanie wielu elementów tekstur, od razu w postaci cyfrowej. Używanie tabletu przyspieszyło także wiele prac, które wykonywane wyłącznie myszką trwałyby znacznie dłużej i wymagały zastosowania bardziej złożonych narzędzi do obróbki grafiki.

5.1. Narzędzia

Podobnie jak w przypadku modelowania, stosunkowo najłatwiejsze do pokrycia teksturami były narzędzia. Kolor i fakturę piaskowcowej oselki udało się uzyskać dzięki zastosowaniu dwukolorowego szumu w kanałach koloru i bump tekstury. Na materiał stanowiący podstawę tekstury oselki nałożony jeszcze został materiał zwiększający różnorodność szumu w kanale bump i jeszcze jeden materiał, tworzący wgłębienia. Na tej samej zasadzie powstał materiał pokrywający krzesak, inny był oczywiście nadany kolor oraz skala szumu i siła mapowania nierówności.

5.1.1. Krzesiwo

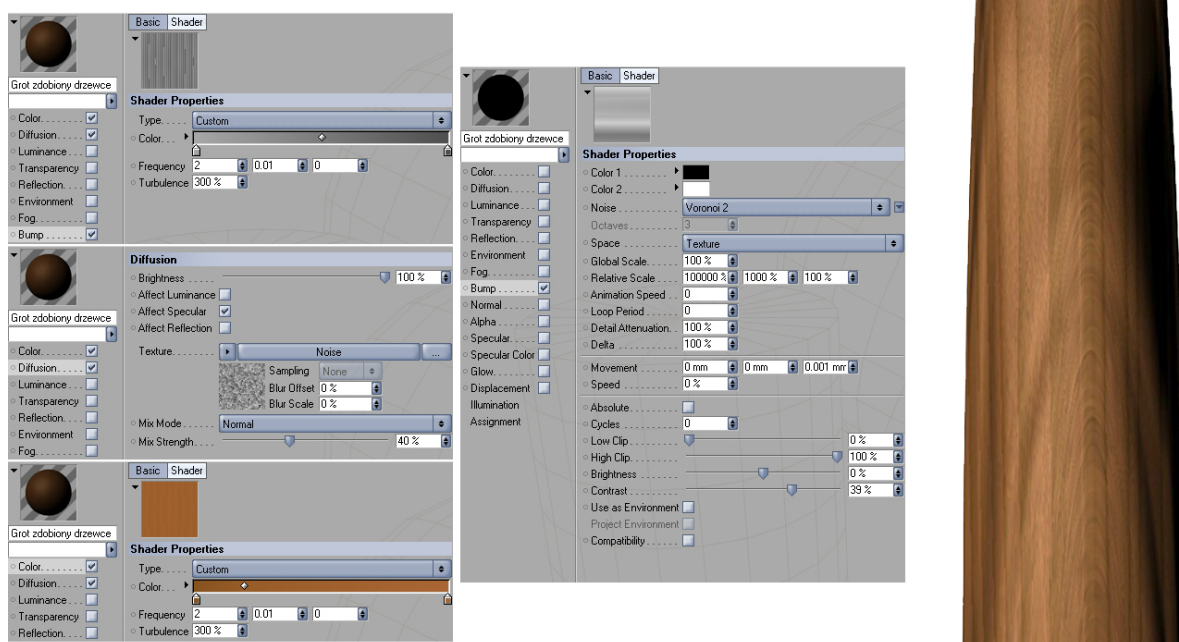
Więcej pracy wymagało przygotowanie tekstury krzesiwa. Próby uzyskania wyglądu i faktury granitu przy użyciu narzędzi dostępnych w Cinema4D nie dawały zadowalających rezultatów, ponadto dużo problemów sprawiały wgłębienia powstałe w wyniku zużycia krzesiwa. Modelowanie ich miało się z celem, a ręczne rysowanie bumpmapy nie sprawdziło się, dlatego zdecydowano się na wykonanie tekstury wykorzystując zdjęcia referencyjne. Przedmiot nie został sfotografowany ze wszystkich stron, ale brakujące fragmenty można było uzupełnić wykorzystując istniejące zdjęcia. Przed ostatecznym dopasowaniem tekstury przygotowano mapowanie UV modelu, żeby widać było, w których miejscach pliku graficznego stanowiącego teksturę, ułożą się krawędzie obiektu. Po nałożeniu tekstury należało jeszcze dokonać poprawek w miejscach łączenia poszczególnych ścian obiektu (Rys. 5.2.).



Rys. 5.2. Krzesiwo podczas teksturowania w module BodyPaint. Na białe obrysowane fragmenty tekstury do poprawienia, czarna siatka w prawym oknie pokazuje mapowanie UV

5.2. Włócznia i oszczep

Drzewca włóczni i oszczepu pokryte zostały tym samym materiałem. Ponieważ nie są dobrze widoczne w animacji, można było zaakceptować średniej jakości efekt, uzyskany przy użyciu wbudowanych w Cinema4D narzędzi do tworzenia materiału drewna. W kanale koloru tekstury zastosowano te same ustawienia parametrów tekstury drewna, co w kanale bump, uzyskując w ten sposób wystarczającej jakości wzór i fakturę słoików. Nałożony na to materiał z szumem z algorytmu Voronoi 2 w bardzo dużej skali, zastosowanym w kanale bump, dodał do faktury podstawowego materiału deformacje imitujące ślady pozostawione na drewnie w wyniku strugania.



Rys. 5.3. Ustawienia materiałów nałożonych na drzewce (z lewej) i fragment pokrytego teksturą modelu (z prawej)

Dużym problemem okazało się stworzenie materiałów grotów. Oksydowanie żelaza sprawia, że materiał ten nabiera charakterystycznego niebieskiego połysku, odbijając równocześnie światło w kolorze jego źródła. Niestety Cinema4D nie pozwala na stworzenie materiału, który mógłby imitować refleksy w dwóch kolorach – można by uzyskać ten efekt przy użyciu shaderów, ale tych z kolei nie da się na siebie nałożyć, co było niezbędne do stworzenia zdobień grotu oszczepu. Po wielu próbach udało się obejść ten problem, nieco oszukując. Bazą kanału koloru materiału stał się obraz generowany z algorytmu Fresnela – opisowo rzecz ujmując, pokrywa on materiał kolorem, zależnym od kąta między wektorem normalnym

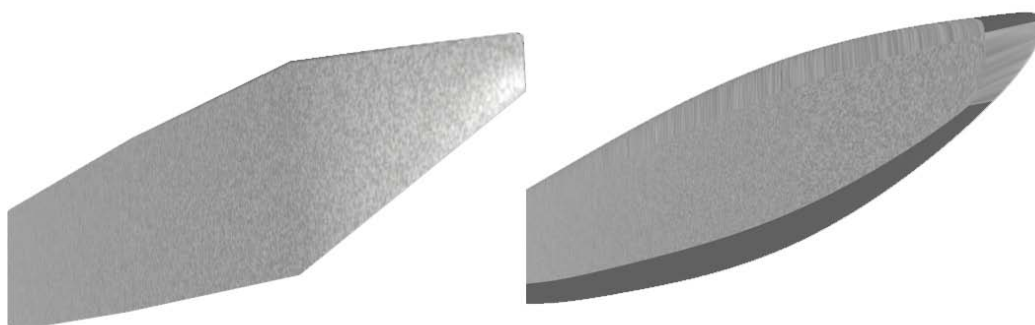
powierzchni, a prostą wzdłuż której rzutowania dokonuje kamera. W ten sposób imitowany jest niebieski odbłask, tak jakby źródło światła było w tym miejscu co kamera, a równocześnie widoczne są odbłaski innych kolorów, zależne od prawdziwych źródeł światła. Rezultat nie jest idealny, ale wystarczająco przekonujący. Materiał ten został wykorzystany jako baza dla obu grotów.



Rys. 5.4. Od lewej: siatka modelu z naniesionymi zgodnie z mapowaniem UV teksturami zdobień, model po nałożeniu wszystkich tekstur, zbliżenia na zdobienia (u góry) i na dwukolorowy odbłask (na dole)

Na grocie oszczepu trzeba było jeszcze umieścić zdobienia – wybijane puncą dziurki i inkrustowane metalem innego koloru półksiężycy i trójkąty. Wykorzystanie zdjęć referencyjnych nie wchodziło w rachubę, więc wszystkie zdobienia trzeba było narysować ręcznie. Mimo wielu prób nie udawało się uzyskać takiego wzoru i faktury, jakie powstają podczas wybijania otworków w metalu, dlatego zdecydowano się na wypełnienie przestrzeni zdobienia okrągłymi kropkami różnej wielkości. Znowu nie było to rozwiązanie idealne, ale dawało wystarczająco zbliżony do rzeczywistości rezultat. Wzory półksiężyców i trójkątów odryso-

wane zostały ze zdjęć referencyjnych i trafiły do kanału alpha kolejnego materiału. Użycie kanału alpha pozwoliło na umieszczenie wzorów tak, że tylko one były widoczne, a reszta materiału pozostawała przezroczysta i nie wpływała na wygląd materiału bazowego. Oba materiały zawierające zdobienia dopasowane zostały do modelu mapowaniem UV.



Rys. 5.5. Deformacja tekstury na wygładzonym obiekcie: z lewej obiekt sprzed wygładzania, z prawej po wygładzeniu

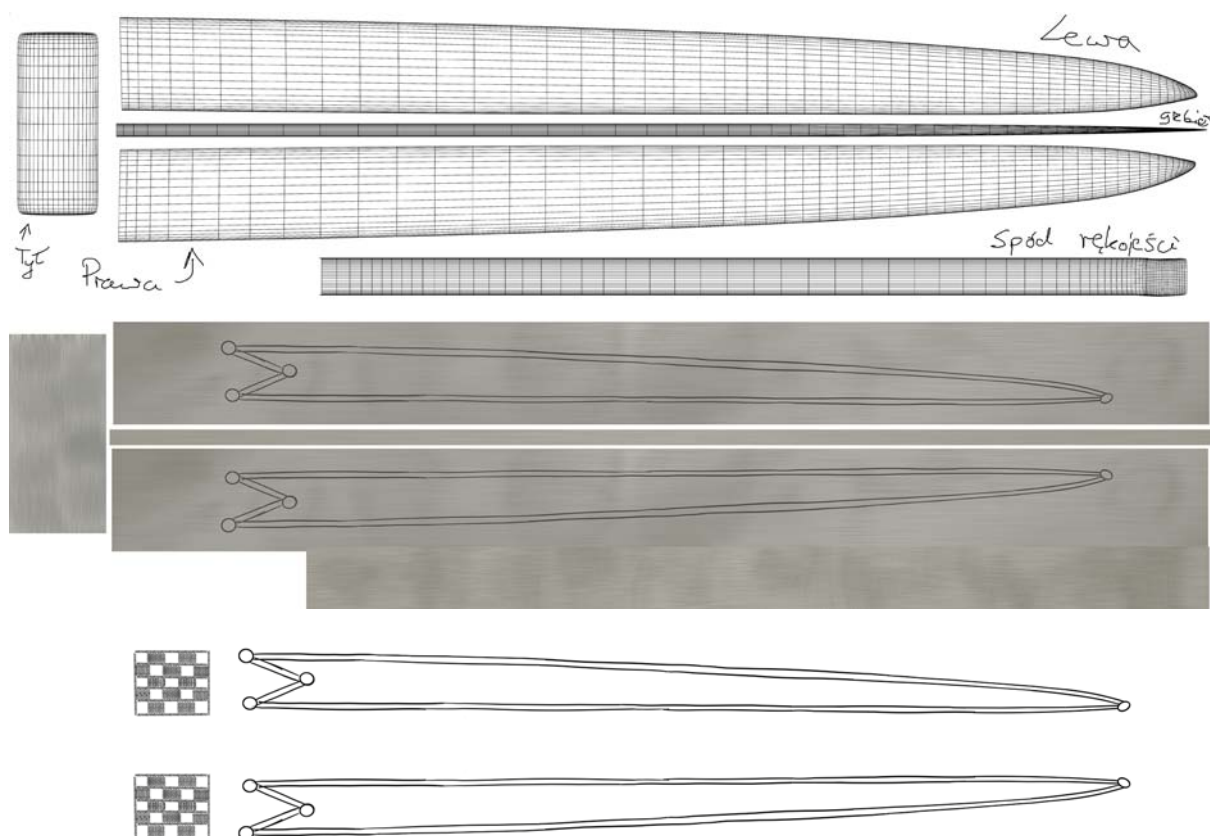
5.3. Miecz

Teksturowanie miecza dostarczyło kolejnej porcji problemów. Po pierwsze ponownie trzeba było zmierzyć się z materiałem tworzącym drewno. Na szczęście udało się uzyskać zadowalający efekt metodami zbliżonymi do zastosowanych przy teksturowaniu drzewców włóczni i oszczepu.



Rys. 5.6. Zbliżenia na różne fragmenty modelu miecza po teksturowaniu

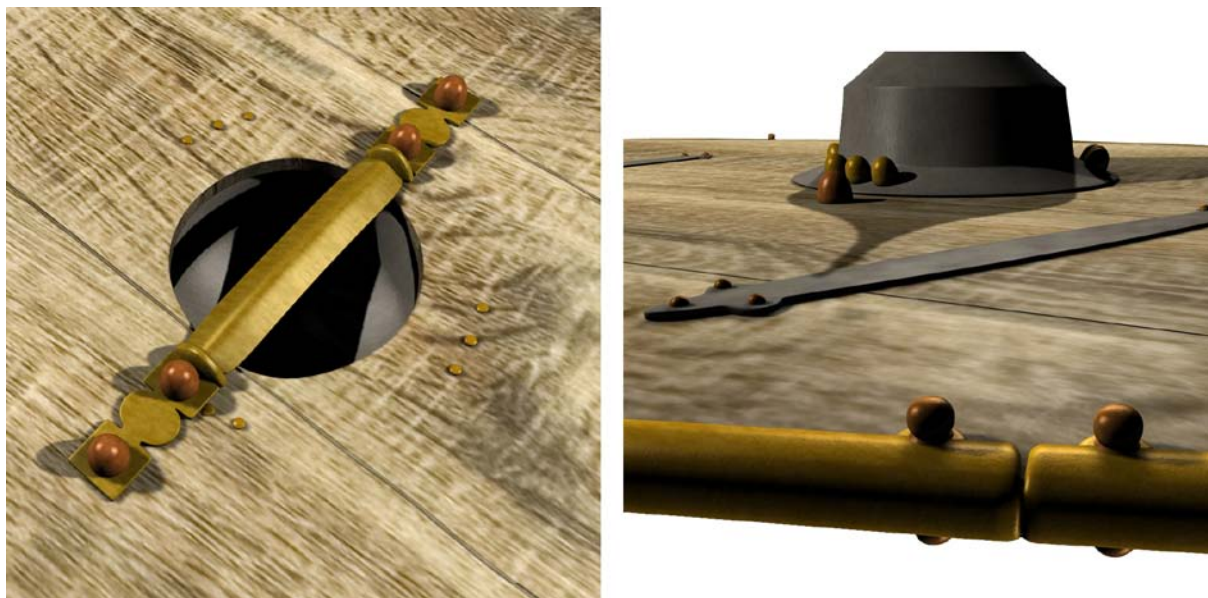
Kolejnym problemem było uzyskanie materiału naśladującego ręcznie kute i wygładzone żelazo – narzędzia dostępne w Cinema4D nie pozwalały osiągnąć pożądanego rezultatu, a podobnie jak przy grotach, nie można było wykorzystać szadera. Teksturę żelaza trzeba było wykonać ręcznie i nanieść na model mapowaniem UV. Tu pojawiła się kolejna przeszkoda – pierwotnie mapowanie UV wykonane było na modelu bazowym, niezmodyfikowanym tagiem HyperNURBS. Po nałożeniu tekstury na obiekt wyszło jednak na jaw, że wraz z wygładzaniem siatki bazowej obiektu, deformowane jest również oparte na niej mapowanie UV, a co za tym idzie deformacji ulega tekstura przypisana do tego mapowania (Rys. 5.5.). W rezultacie mapowanie UV trzeba było przeprowadzić na siatce obiektu po wygładzeniu i liczba poligonów do zaznaczenia i mapowania wzrosła z kilkudziesięciu do kilku tysięcy. Model głowni miecza przed wygładzeniem składał się ze 197 poligonów, po wygładzeniu ich liczba wzrosła do ponad 12,500. Ostatecznie tekstura miecza została złożona z czterech warstw: koloru, bumpmapy dla całej powierzchni tekstury i dwóch bumpmap, osobnych dla obu wzorów zdobienia.



Rys. 5.7. Od góry: siatka modelu głowni miecza odpowiadająca mapowaniu UV, tekstura koloru głowni zgodna z mapowaniem UV, połączone bumpmapy zdobień głowni miecza zgodne z mapowaniem UV

5.4. Tarcza

Pierwszym wyzwaniem przy teksturowaniu tarczy było znalezienie odpowiedniego materiału do odtworzenia wyglądu desek. W materiałach referencyjnych brakowało odpowiedniego zdjęcia, a narzędzia dostępne w Cinema4D nie nadawały się do tego celu. W końcu udało się znaleźć odpowiednie zdjęcie w serwisie cgtextures.com, choć wymagało ono jeszcze pewnych zabiegów. Wykorzystane zdjęcie miało oryginalnie rozmiary 2356 na 1912 pikseli – było o wiele za małe, podczas zbliżeń na obiekt tekstura mocno się rozmywała. Zdjęcie zostało dwukrotnie powiększone i wyostrzone by zniwelować rozmycie powstałe po operacji skalowania, następnie na jego podstawie stworzona została bumpmapa. Po kolejnych testach okazało się, że cienie powstające po zastosowaniu bumpmapy mają bardzo niską rozdzielczość wynikającą z niskiej rozdzielczości grafiki rastrowej użytej do mapowania nierówności. Rozwiązaniem okazało się przeskalowanie obrazka bumpmapy, ostatecznie uzyskał on rozmiar 9424 na 7648 pikseli – przy natywnej rozdzielczości typowego monitora LCD, wynoszącej 1280 na 1024 piksele, do wyświetlenia całej tekstury w skali 1:1 trzeba by połączyć ze sobą 64 monitory.



Rys. 5.8. Zbliżenia na różne fragmenty modelu tarczy po teksturowaniu

Początkowo wydawało się, że sporo trudności sprawi przygotowanie tekstury umbra, jednak po próbnym nałożeniu pierwszego materiału efekt był prawie idealny, wystarczyło tylko skorygować kolorystykę. Problemów nie sprawiło także teksturowanie nitów i okuć,

wygląd metalu uzyskany został przy pomocy zdjęć miedzi i mosiądzu, odpowiednio przerobionych na potrzeby tekstury.



Rys. 5.9. Model tarczy po nałożeniu tekstur

6. PRZYGOTOWANIE DO ANIMACJI I ANIMACJA

6.1. Oświetlenie

Przed przystąpieniem do animacji należało jeszcze oświetlić scenę, stanowiącą środowisko i tło filmu oraz poszczególne przedmioty. Do oświetlenia „sali wystawowej” użytych zostało 36 okrągłych, punktowych świateł kierunkowych, oświetlających korytarz wejściowy, ściany i kopułę. Są głównym źródłem światła i cieni, umieszczone zostały tak, aby przy ich pomocy nie tylko oświetlić scenę, ale także wydobyć nieco detali tekstur otoczenia i urozmaicić jego kolorystykę.



Rys. 6.1. Porównanie różnych rodzajów cieni, od lewej od góry: światło nie daje cienia; miękki cień małej rozdzielczości z dużym promieniem próbkowania; miękki cień w dwukrotnie większej rozdzielczości; miękki cień w czterokrotnie większej rozdzielczości; miękki cień w ośmiokrotnie większej rozdzielczości i z małym promieniem próbkowania; twardy cień; cień obszarowy niskiej jakości; cień obszarowy wysokiej jakości

Same światła kierunkowe nie mogły jednak zapewnić wystarczającej ilości światła – przy ich optymalnej mocy, kiedy ich bezpośrednie otoczenie nie było oświetlone zbyt mocno, niedoświetlone pozostawały fragmenty sceny, których nie obejmował snop światła punktowego. Do wydobywania z cienia tych miejsc wykorzystane zostały światła typu *Omni* ułożone na planie okręgu mniej więcej w połowie wysokości kopuły i dwa prostokątne światła obszarowe, doświetlające sufit korytarza – żadne ze świateł doświetlających nie powoduje rzucania

cienia przez obiekty znajdujące się na scenie. Żeby uzyskać naturalnie wyglądające, miękkie cienie, mapy cieni przypisanych do świateł punktowych mają niewielką rozdzielczość, 500 na 500 punktów, i stosunkowo duży promień próbkowania. Z tego powodu przedmioty umieszczone na gablotach nie rzucają widocznego cienia – są zbyt małe. Żeby temu zaradzić, nad każdą gablotą umieszczone zostało okrągłe światło obszarowe, którego jedynym zadaniem jest rzucanie ostrego cienia przedmiotów.

Przedmioty w scenach pokazów są oświetlone całkiem niezależnie od otoczenia. Światła oświetlające scenę ignorują przedmioty z pokazów, a światła oświetlające przedmioty nie wpływają na oświetlenie otoczenia. Nie tylko przyspieszyło to późniejsze renderowanie, ale pozwoliło też na wydobywanie detali pokazywanych przedmiotów mocnym, punktowym światłem, które nie było rozpraszane przez oświetlenie otoczenia. Wszystkie przedmioty oświetlone zostały zestawami czterech okrągłych, punktowych świateł kierunkowych umieszczonych po dwa z przodu i z tyłu przedmiotu. Potem każdy przedmiot był indywidualnie doświetlany słabszymi światłami z przodu i mocnymi, wydobywającymi krawędzie, świecącymi z tyłu. Tarcza dodatkowo oświetlona została dwoma zestawami składającymi się z trzech ruchomych punktowych świateł kierunkowych, włączanych do dokładnego oświetlenia umbra i imacza, w odpowiednich momentach animacji.

Siła, pozycja, kierunek i rodzaj cienia przypisanego do źródła światła – wszystkie te ustawienia uzyskiwane były metodą prób i błędów, co zajmowało bardzo dużo czasu, bowiem rendery testowe musiały być wykonywane z docelową jakością, by można było upewnić się, że wszystko wygląda tak jak powinno.

6.2. Ustawianie sceny

 Miecz pokaz.c4d	12 226 KB	Plik C4D	 otoczenie v5 - pokaz tarcza.c4d	50 348 KB	Plik C4D
 Narzedzia pokaz.c4d	3 452 KB	Plik C4D	 otoczenie v5 - pokaz wlocznie.c4d	49 623 KB	Plik C4D
 otoczenie v5 - intro animacja.c4d	40 963 KB	Plik C4D	 otoczenie v5 - pokazy.c4d	40 952 KB	Plik C4D
 otoczenie v5 - ludzik obchod.c4d	41 003 KB	Plik C4D	 Tarcza pokaz.c4d	9 444 KB	Plik C4D
 otoczenie v5 - pokaz miecz.c4d	53 279 KB	Plik C4D	 Wlocznie pokaz.c4d	8 487 KB	Plik C4D
 otoczenie v5 - pokaz narzedzia.c4d	44 704 KB	Plik C4D			

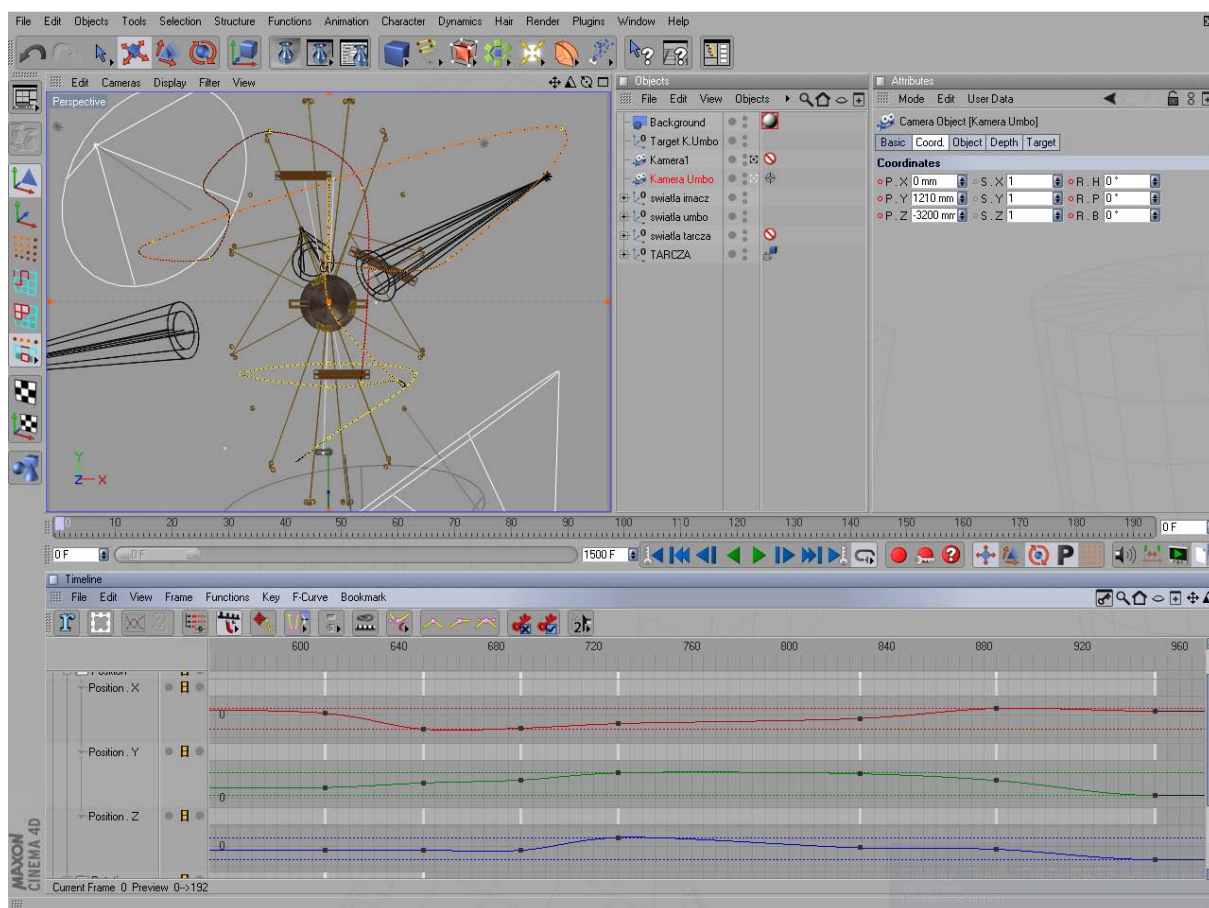
Rys. 6.2. Zestaw plików Cinema4D ze scenami składającymi się na końcowy render

Główna scena, po której porusza się „gość” zwiedzający wystawę stworzona została niezależnie od scen pokazów przedmiotów. Ułatwiło to operowanie na obiektach i przygotowanie samych animacji, bowiem mniej było równocześnie znajdujących się na scenie ruchomych elementów. Sceny pokazów przedmiotów łączone były z główną sceną dopiero przed

końcowym renderem. Taki podział umożliwił też łatwe przygotowywanie testowych renderów i nanoszenie na ich podstawie poprawek przed renderem w najwyższej jakości.

6.3. Animacja

Poza kilkoma wyjątkami, jedynymi ruchomymi elementami na poszczególnych scenach, są kamera i cel, na który jest nakierowana. W scenie pokazu narzędzi, poruszone są dodatkowo krzesak i krzesiwo, żeby zilustrować komentarz dotyczący krzesania ognia, a także obracana jest ośłka, tak by kamera ze zbliżenia na nią mogła płynnie przejść do ujęcia zawierającego krzesak i krzesiwo. W scenie pokazu tarczy, poruszana jest tarcza i zestawy świateł oświetlających umbo i imacz – miało to na celu wydobyć detali tekstur i kształtów modeli.



Rys. 6.3. Widok na edytor animacji. W oknie podglądu kolorowa linia pokazuje ścieżkę, którą podąża podczas animacji kamera. Na dole w oknie linii czasowej kolorowe linie pokazują zmiany położenia celu kamery w czasie

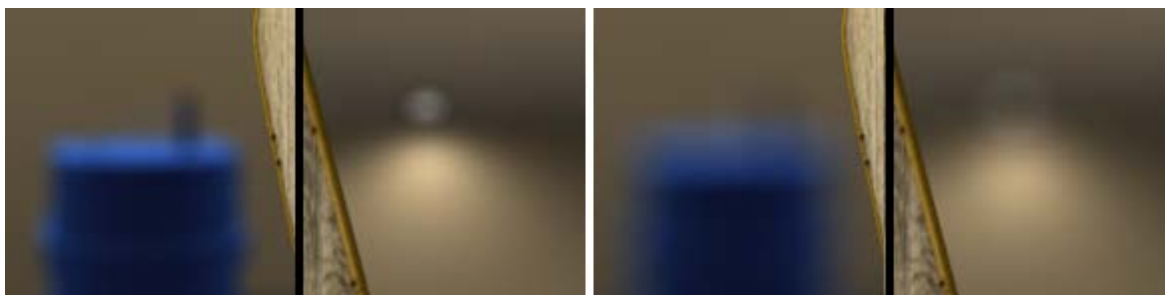
Zdecydowano się na użycie kamery śledzącej cel – pusty obiekt zawierający tylko globalne współrzędne układu współrzędnych sceny, ponieważ umożliwiło to łatwe i niezależne kontrolowanie położenia kamery i kierunku, w którym kamera „patrzy”. Dzięki temu nie było problemu z utrzymaniem w kadrze konkretnych fragmentów sceny, nawet jeśli kamera poruszała się w poprzek linii „wzroku”.

Praktycznie wszystkie sekwencje animacji ułożone zostały poprzez rejestrowanie zmian parametrów i położenia obiektów „na żywo”. Edytor nagrywał każdą zmianę w wybranej wcześniej klatce, automatycznie tworząc klatki kluczowe. Klatki kluczowe tworzone były ręcznie tylko tam, gdzie wymagały tego korekty położenia obiektów lub szybkości zmiany parametrów.

7. RENDEROWANIE, MONTAŻ NIELINIOWY I UDŹWIEKOWIENIE

7.1. Renderowanie

Każda scena animacji renderowana była osobno, część z nich podzielona także została do na mniejsze części. Niestety część gotowych animacji uległa uszkodzeniu i trzeba było ponownie renderować te fragmenty. Wszystkie rendery wykonane zostały w rozdzielczości PAL D1 (720 na 576 pikseli) w technice śledzenia promieni, ograniczenia sprzętowe i czasowe nie pozwoliły wykorzystać dającej lepsze efekty metody energetycznej. Początkowym założeniem było, że każda klatka animacji powinna się liczyć nie dłużej niż 30 sekund, co dawało około 13 minut obliczeń dla sekundy animacji i około 12 godzin obliczeń dla minuty animacji. W trakcie pracy okazało się, że czas renderowania pojedynczej klatki bliższy jest jednej minucie, a w wielu przypadkach nawet mocno przekraczał tę wartość, w rezultacie przeciętny czas potrzebny na wyrenderowanie jednej sekundy animacji sięgał około pół godziny, a minuta animacji tworzona było około 20 godzin. Wiele scen było znacznie bardziej wymagających, najdłuższy render, obejmujący niecałą minutę animacji, trwał ponad 60 godzin, a łączny czas renderowania wszystkich scen, łącznie z renderami testowymi i poprawkami, grubo przekroczył 200 godzin – gdyby render przeprowadzany był w typowych godzinach pracy, trwałby ponad 5 tygodni.



Rys. 7.1. Rendery porównujące efekty zastosowania większej i mniejszej głębi ostrości

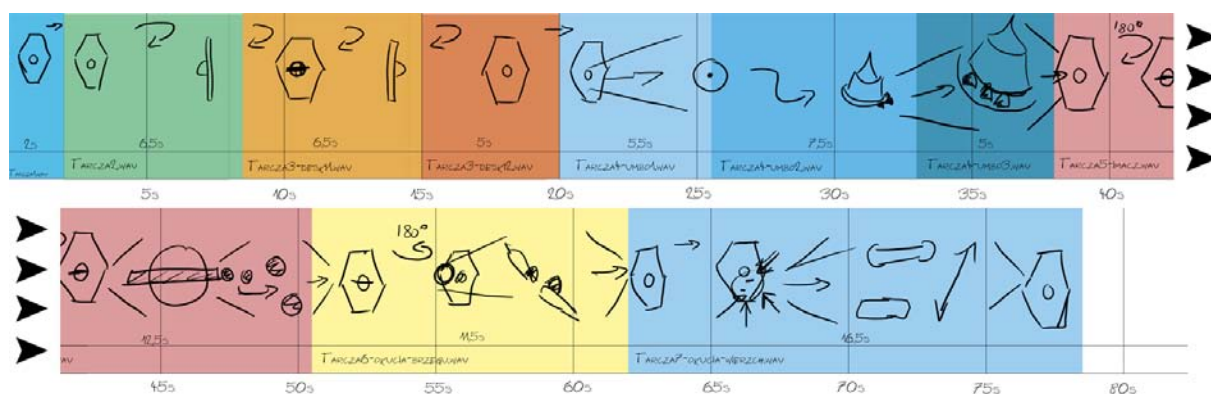
Animacja tworzona była na domowym komputerze z dwurdzeniowym procesorem Athlon64 taktowanym procesorem 2.0GHz i 2GB pamięci RAM. Biorąc pod uwagę realne czasy przeliczania renderów, trzeba było ograniczyć wiele efektów, między innymi dla tego nie wykorzystano metody energetycznej – przy użyciu metody raytracingu klatka przeliczana była około minuty, przy zastosowaniu metody energetycznej czas ten wydłużyć się mógł na-

wet dwudziestokrotnie, co było nie do zaakceptowania. W scenach prezentacji wykorzystany został efekt głębi ostrości – przedmioty na pierwszym planie pozostają ostre, podczas gdy położone dalej otoczenie stało się rozmyte. Nie tylko poprawia to efekt wizualny, pozwalając widzowi skupić się na pokazywanych przedmiotach, ale pozwoliło też na redukcję detali w tle, między innymi wyłączenie cieni, co bardzo przyspieszyło proces renderowania tych scen.

7.2. Udźwiękowanie

Komentarze do animacji nagrywane były przy pomocy darmowego programu Gold-Wave, który posłużył także do redukcji szumów, wynikających z użycia kiepskiej klasy mikrofonu. Ponieważ komentarz opisuje konkretne elementy przedmiotów, konieczne było zsynchronizowanie go w czasie z animacją. Łatwiej też było dopasować przebieg animacji do treści istniejącego już komentarza i w takiej właśnie kolejności prowadzone były prace – najpierw nagrywany był komentarz, a później tworzona była dopasowana do niego animacja.

Żeby ułatwić przygotowanie animacji i jej synchronizację z komentarzem, nagrania zostały oznaczone zgodnie z długością ich trwania i na tej podstawie tworzone były ilustracje pomocnicze (Rys. 7.2.), pozwalające na ustalenie ile czasu powinien trwać każdy fragment animacji. Na początku komentarz nagrywany był osobno dla każdej sceny, jednak na koniec nagrano całość komentarza ponownie, w czasie jednej sesji, by ujednolicić jego brzmienie.

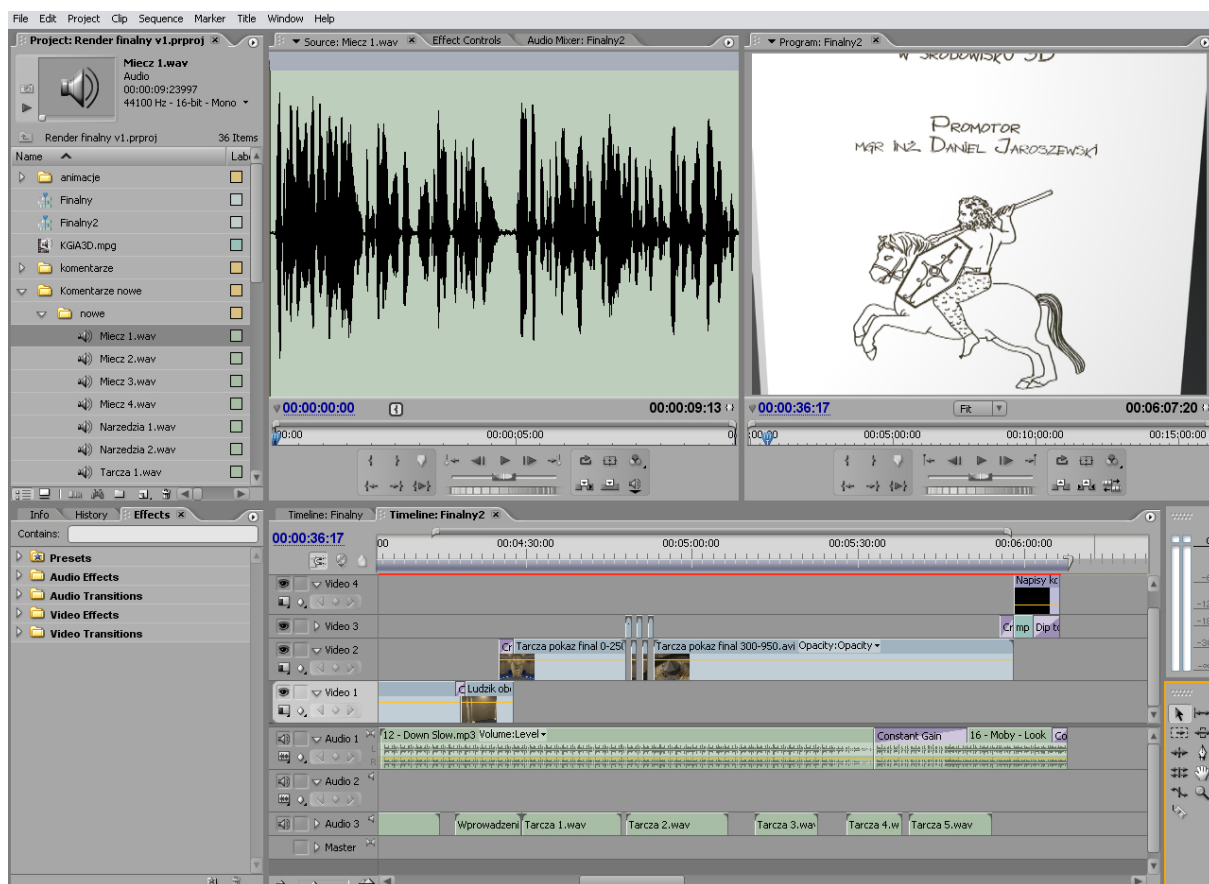


Rys. 7.2. Obrazek pomocniczy ilustrujący etapy animacji zsynchronizowane z komentarzem.

Kolorami wyróżniono poszczególne fragmenty komentarza

7.3. Montaż nieliniowy

Montaż animacji złożonej z poszczególnych scen przeprowadzony został w całości w programie Adobe Premiere. Rendery scen w postaci nieskompresowanych plików AVI trafiały po zaimportowaniu do programu na wirtualny stół montażowy, gdzie można je było dowolnie ciąć i układać, łącząc film w całość z pojedynczych „klocków” różnej długości. W ten sam sposób zmontowana została ścieżka dźwiękowa filmu – pliki dźwiękowe w formatach wav i mp3 zostały zaimportowane do programu, a potem ułożone na linii czasowej w odpowiednich miejscach. Podkład muzyczny został nieco przyciszony, tak by nie zagłuszać komentarza, a jedynie stanowić dla niego tło dźwiękowe. Montaż nieliniowy pozwolił na łatwe dopasowanie wszystkich fragmentów i bardzo prostą wymianę uszkodzonych fragmentów renderów na nowe, naprawione. Napisy końcowe również umieszczone zostały w filmie przy użyciu narzędzi dostępnych w oprogramowaniu do montażu. Także w tym programie, przy użyciu narzędzi do eksportu, przygotowana została wersja DVD Video animacji.



Rys. 7.3. Program do montażu nieliniowego

8. WNIOSKI

Zawsze interesowałem się grafiką komputerową, więc realizacja pracy dyplomowej wymagającej stworzenia animacji 3D była dla mnie oczywistym wyborem. Kiedy przystępowałem do pracy miałem już dość dużą praktykę z grafiką rastrową, jednak moje kontakty z grafiką 3D ograniczały się do wcześniejszych zajęć na uczelni i czysto hobbystycznych „zabaw” z różnymi programami. Wykonanie animacji do pracy dyplomowej kosztowało mnie wiele czasu i wysiłku, tak na prawdę wszystkiego uczyłem się od nowa, dodatkowo ograniczała mnie też tematyka pracy. Konieczność wiernego odtworzenia i przekonującego przedstawienia rzeczywistych przedmiotów wymusiła na mnie zgłębienie technik pozwalających na osiągnięcie jak najbardziej realistycznych efektów. Nie mogłem puścić wodzy fantazji i tworzyć „z głowy”, nie mogłem nic zmyślać – z jednej strony było to przekleństwo, bowiem mścił się na mnie każdy błąd psujący realistyczny rezultat, a z drugiej strony była to świetna nauka metod realizacji takiego projektu.

Prace od początku planowałem tak, żeby móc zrezygnować z różnych elementów animacji. Przedmioty do rekonstrukcji wybrałem tak, bym na wczesnym etapie prac mógł stwierdzić, które z nich zdążę odtworzyć, a z których będę musiał zrezygnować. Pomysł prezentacji przedmiotów od początku zakładał, że będą pokazywane osobno, bardzo późno wykrystalizowała się tylko koncepcja tła dla tych prezentacji i ogólnie „środowiska” animacji.

Na każdym etapie pracy czegoś się uczyłem – zwykle na własnych błędach, więc w zasadzie wszystko zajęło więcej czasu niż planowałem. Musiałem nauczyć się efektywnego modelowania obiektów 3D, które musiały być wierne rzeczywistości, ale też skonstruowane tak, by łatwa była ich dalsza obróbka i renderowanie. Nauczyłem się jak optymalizować siatkę modelu i jak wykorzystywać rozmaite techniki polimodelingu do osiągnięcia pożądaných rezultatów. Wiele czasu zajęło mi przy tym naprawianie popełnionych błędów, często sprowadzające się do rozpoczynania pracy całkiem od nowa.

Bardzo dużo nauczyłem się o teksturowaniu modeli 3D. Praktycznie wszystkie tekstury musiałem wykonać ręcznie, bowiem ograniczenia programu Cinema4D nie pozwalały na osiągnięcie właściwych rezultatów przy użyciu dostępnych w nim narzędzi. Bardzo pomogło mi nabyte wcześniej doświadczenie w pracy z grafiką 2D, a także fakt, że przy produkcji tekstur mogłem posłużyć się tabletem graficznym. To jednak przyspieszyło tylko samą obróbkę plików graficznych, o mapowaniu UV, nakładaniu tekstur na obiekty 3D, wykorzystywaniu bumpmappingu i wielu innych technikach, nauczyłem się dopiero w trakcie pracy z projektem.

Pełnienie licznych błędów, wynikających z niewiedzy lub nieuwagi, mściło się szczególnie podczas renderowania. Ponieważ czasy renderów sięgały kilkudziesięciu godzin, mordęgą było wprowadzenie każdej kolejnej poprawki, kiedy trzeba było czekać nawet kilka godzin na wygenerowanie kilku sekund „łatki”. Pod koniec pracy udawało mi się już unikać większości takich wpadek, ale nie dało się unikać problemów nie do przewidzenia. Dwudziestogodzinny render został uszkodzony w wyniku błędu programowego, który powstał w czasie renderowania jednej ze scen. Efekt był taki, że cały render trzeba było wykonać od nowa, a w dodatku musiałem odkryć przyczynę powstawania błędu. Okazało się, że przedobrzyłem z ustawieniami i mój komputer zwyczajnie nie dawał rady pomieścić całej sceny w pamięci. Zdarzyło się też tak, że trwający 60 godzin render był nie tylko częściowo uszkodzony, ale też nie dawał się zaimportować do programu do montażu i znów wszystko trzeba było powtarzać. W efekcie tych doświadczeń nauczyłem się przygotowywać sceny animacji do renderowania tak, by z jednej strony zminimalizować ryzyko i straty powstałe w wyniku ewentualnego uszkodzenia pliki, a z drugiej zoptymalizować sceny by liczyły się możliwie szybko, przy jak najmniejszej utracie jakości.

Praca przy animacji 3D wymagała także dobrego poznania wielu programów. Przede wszystkim musiałem dogłębnie poznać możliwości i ograniczenia programu Cinema4D, na którym wykonana została animacja. Znałem już dobrze oprogramowanie do grafiki rastrowej, służące mi przy tym projekcie nie tylko do tworzenia tekstur, ale także obróbki materiałów referencyjnych. Wykorzystać też musiałem oprogramowanie do rejestracji i obróbki dźwięku, ponadto opanować musiałem program do montażu nieliniowego. Praca na wielu plikach i programach jednocześnie wymagała dużego skupienia i organizacji, choć nie zawsze udawało się unikać pomyłek.

Z obecnym doświadczeniem z pewnością byłbym w stanie zrealizować ten projekt lepiej i szybciej, dołączając do niego elementy, z których musiałem zrezygnować z braku czasu i możliwości technicznych, pewne rzeczy chciałbym też poprawić i zmienić. Po tak długim okresie, który spędziłem przy produkcji animacji, trudno mi podejść do efektów mojej pracy z dystansem. Choć wiem, że usterki i niedociągnięcia, z których ja doskonale zdaję sobie sprawę, pozostaną niezauważone, to nie jestem w stu procentach zadowolony z tego co udało mi się osiągnąć. Po prostu wiem, że teraz zrobiłbym wszystko lepiej, stosując nieco inne rozwiązania i lepiej organizując sobie pracę. Kolejne moje projekty z pewnością będą doskonalsze, dzięki doświadczeniom zdobytym przy realizowaniu tej pracy dyplomowej.

WYKAZ LITERATURY

1. J.D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, J.F. Hughes, R. L. Phillips, *Wprowadzenie do grafiki komputerowej*, Warszawa 1995, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
2. J. Andrzejowski, *Nadkole 2, A Cemetery of the Przeworsk Culture in Eastern Poland*, Kraków 1998, Wydawnictwo i Drukarnia "Secesja"
3. J. Ilkjær, Illerup Ådal. *Die Schilde, Vol. 9: Textband, Vol. 10: Katalog, Tafeln und Fundlisten*, *Jysk Arkæologisk Selskab XXV:9–10*, Aarhus 2001, Aarhus University Press
4. Resi H. Gjøstein, Gravplassen Hunn i østfold, *Norske Oldfunn XII*, Oslo 1986, Universitetets Oldskamling
5. H. Gabelmann, Römische Grabmonumente mit Reiterkampfszenen im Rheingebiet, „Bonner Jahrbücher“ 173, 1973, s. 132–200.
6. <http://www.wikipedia.org>
7. <http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/toc.htm>
8. <http://www.dimENSION3.spine.pl/index.php>
9. <http://groups.csail.mit.edu/graphics/classes/6.837/F01/notes.html>