

Michał Turek*

Optimalizacja skanowanych rotacyjnie siatek 3D prowadzona na potrzeby szybkiego renderowania w czasie rzeczywistym

1. Wprowadzenie

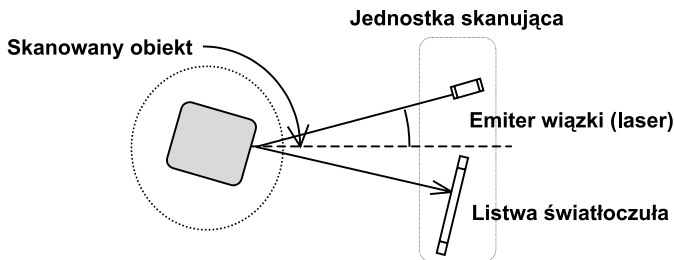
Wirtualne sceny 3D tworzone dziś masowo na potrzeby gier czy prezentacji multimedialnych angażują ogromne ilości graficznych kształtów trójwymiarowych – wyświetlanych później w symulowanej przestrzeni 3D jako postrzegane przez obserwatora kształty [3]. Aby ich obróbka przy wyświetlaniu była odpowiednio wydajna, a efekt wizualny satysfakcjonujący, struktura modelu 3D przedstawiającego dany kształt jest obciążona ograniczeniami. Ograniczenia powodują konieczność definiowania materiałów 3D zgodnie z zasadami, określonymi przez twórców algorytmów wyświetlających te obiekty, a funkcjonujących w silnikach 3D. Dotyczą one głównie sposobu definiowania siatek wielokątów w modelach trójwymiarowych, ich stopnia skomplikowania oraz wielu przypadków szczególnych geometrycznego ułożenia komponentów kształtu 3D. Zadanie odpowiedniego przygotowania modeli 3D spoczywa na projektantach i grafikach, którzy wykorzystując edytory 3D, dokonują ręcznie żmudnych czynności adaptujących. Najwięcej trudności przysparza obróbka materiału będącego dosłowną kopią obiektów trójwymiarowych ze świata rzeczywistego, a pozyskanego w drodze ich skanowania. Tu prace adaptacyjne są szczególnie kłopotliwe. Istnieją możliwości przyspieszenia tych prac – głównie poprzez wprowadzenie rozwiązań automatycznie optymalizujących siatki wielokątów w modelach 3D. Takie możliwości rozważy niniejsze opracowanie, proponując gotową procedurę finalnie adaptującą skanowane siatki 3D do wymagań stawianych przez obecnie stosowane renderujące silniki 3D.

2. Technologia skanowania rotacyjnego

Istnieje kilka mniej lub bardziej dopracowanych metod pozyskiwania kształtów 3D ze świata rzeczywistego. Wśród nich szczególne znaczenie ma metoda skanowania rotacyjnego-

* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

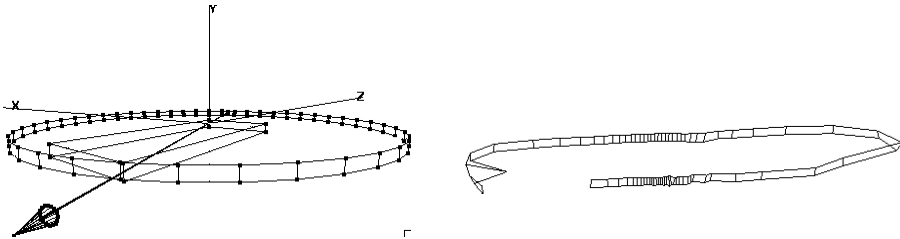
go. Przez producentów skanerów 3D jest obecnie najczęściej stosowana, gdyż umożliwia pobieranie kształtów z obiektów wypukłych, a takie najczęściej umieszczane są w wirtualnych scenach 3D (kamera przemieszcza się pomiędzy obiektami, eksponując w kadrze ich zewnętrzne powierzchnie) [8]. Metoda skanowania rotacyjnego umożliwia dość precyzyjny odczyt pozycji punktów zlokalizowanych na powierzchni skanowanej bryły, lecz jednak przy niewielkiej liczbie tych punktów w danym regionie bryły (odwrotnie, niż w przypadku zastosowania kamer i użycia metod fotometrycznych [10] lub stereoskopii [4]). Ponadto użycie tej metody wymaga skonstruowania stosunkowo prostego urządzenia, przy możliwości adaptacji modułów już istniejących na rynku i wykorzystywanych w innych urządzeniach. Podstawowym założeniem procesu skanowania rotacyjnego jest obrót obiektu skanowanego wokół własnej osi podczas procedury skanowania oraz zsynchronizowany z obrotem odczyt informacji o powierzchni obiektu. W wariancie urządzenia przeznaczonego do skanowania obiektów znacznej wielkości możliwa jest naturalnie rotacja jednostki oświetlająco-skanującej wokół umieszczonego statycznie obiektu skanowanego. Tak czy inaczej podczas skanowania obiekt jest oświetlany sukcesywnie dookoła wiązką laserową. Wiązka odbija się od powierzchni obiektu i po odbiciu pada na listwę światłoczułą (podobną do montowanych w skanerach 2D). Odczyt z listwy umożliwia wykrycie dokładnego miejsca padania odbitej wiązki. Ponieważ zarówno laser oświetlający, jak i listwa w urządzeniu skanującym ustawione są pod ustalonym kątem (rys. 1), miejsce padania wiązki na listwę światłoczułą uzależnione jest od drogi przebytej przez wiązkę. Z prostego obliczenia można zatem ustalić odległość punktu oświetlanego na skanowanym obiekcie od jednostki skanującej.



Rys. 1. Skanowanie rotacyjne – wyrzutnia i detektor

Gdy obiekt skanowany jest obracany, odczyty z listwy dokonywane są co ściśle określona wartość kątową. Pozwala to na uzyskanie kompletu odczytów odległości powierzchni obiektu skanowanego od jego osi obrotu (znając odległość środka od urządzenia skanującego oraz wartość odczytu z listwy). Każda z wartości odczytanej odległości jest sprzężona w wartością kątową, ale której została pobrana. Pozostaje zatem dokonanie konwersji tych par na współrzędne w przestrzeni euklidesowej 2D (dwuwymiarowej). Liczba takich odczytów w ramach pełnego obrotu obiektu (360) może być naturalnie różna, formułując parametr skanowania zwany potocznie rozdzielczością kątową skanowania. Gdy po wykonaniu

pełnego obrotu dokonamy przesunięcia jednostki skanującej wzdłuż osi pionowej i powtórzmy pełny obrót skanowania – uzyskamy podstawy do utworzenia siatki trójwymiarowej (rys. 2). Wielokrotne powtarzanie tej czynności spowoduje powstanie obrazu 3D całej skanowanej bryły. Przesunięć jednostki skanującej wzdłuż osi pionowej dokonuje się co stałą jednostką odległości, ustalając odgórnie i określaną mianem rozdzielczości pionowej skanowania.



Rys. 2. Konwersja odczytów rotacyjnych do przestrzeni euklidesowej oraz wyniki po wykonaniu dwóch pełnych odczytów rotacyjnych

Materiał powstały ze skanowania jest siatką czworokątów otwartą w części górnej i dolnej (te powierzchnie skanowanej bryły znajdują się poza zasięgiem wiązki). Procedura generowania siatki, jak i technologia samego skanowania nie są doskonałe. Wady skanowania (związane głównie z błędami odczytu wiązki laserowej) powodują powstawanie licznych niedoskonałości siatki, które należy eliminować dalszymi przekształceniami. Propozycje takich przekształceń są jednym z przedmiotów rozważań w niniejszym artykule. Proponowane w artykule algorytmy utworzono, opierając się na specyfice charakteryzującej rzeczywiste materiały 3D (siatki) generowane w procesie skanowania rotacyjnego. Typowy ich kształt, najczęstsze wady czy przypadki niewystępujące zostały określone w konsekwencji analizy dziesiątek siatek 3D faktycznie skanowanych obiektów trójwymiarowych o najróżniejszych kształtach i charakterystykach powierzchni. Do badań wykorzystywano głównie profesjonalny rotacyjny skaner 3D firmy Roland. Skaner ten generuje szumy typowe dla takich urządzeń, operuje monochromatycznym emiterym i detektorem światła. Materiał z takiego urządzenia najlepiej nadaje się do prowadzenia doświadczeń i testowania algorytmów optymalizujących. Celem jest optymalne przystosowanie tego materiału do potrzeb renderowania w czasie rzeczywistym. Wiąże się to przede wszystkim z koniecznością usunięcia wad niedoskonałości siatek 3D skutkujących ich późniejszymi wadami wizualnymi. W drugiej kolejności – z uzyskaniem dużej precyzji prezentacji wizualnej siatki 3D jako odpowiednika skanowanego wcześniej obiektu.

3. Transformacje siatek skanowanych rotacyjnie

W konsekwencji operacji skanowania otrzymujemy zbiory zawieszonych w przestrzeni 3D punktów (definiujących przyszłą siatkę i model 3D) o stałej rozdzielczości kątowej

i pionowej. Siatki 3D wytwarzane z użyciem opisanej metody charakteryzują się dużymi odległościami pomiędzy wierzchołkami, co eliminuje także problem redukcji redundantnej informacji. Krawędzie wielokątów przyszłej siatki tworzone są domyślnie poprzez zdefiniowanie adiacencji punktów-sąsiadów, niezależnie od wartości odczytów odległości od środka obrotu skanowanej bryły 3D. Jedynym wyjątkiem jest tutaj odczyt „zerowy”, który mógł powstać w wyniku błędu skanowania (gdym na przykład niewłaściwa powierzchnia obiektu rozproszyła lub pochłonięła wiązkę), albo wyjścia poza zakres wysokości obiektu (obiekt był niższy niż wysokość skanowania). Generowane są zatem krawędzie, które łączą każdy punkt 3D z jego sąsiadem po stronie prawej, po lewej, na górze oraz na dole. Wyjątkiem są sytuacje brzegowe (dolna lub górna krawędź bryły skanowanej). Z braku kolejnej warstwy wierzchołków te krawędzie nie są współdzielone przez wielokąty.

3.1. Usuwanie szumów skanowania

Wielokrotne testy skanowania różnorodnych powierzchni wykazały (tab. 1), iż około 97% błędów skanowania skutkujących szumem to błędne odczyty jednopunktowe. Pojedynczy wierzchołek siatki powstały w konsekwencji szumów urządzenia łatwo sklasyfikować – posługując się choćby danymi o pozycji jego bezpośrednich sąsiadów w linii oraz w liniach poprzedzającej i następującej.

Tabela 1

Średnie zliczeń szumów dla przypadków szumu pojedynczego (jeden wierzchołek błędny) lub złożonego (2–4 sąsiadujące wierzchołki błędne). Wartość danego pola w tabeli to średnia arytmetyczna trzech identycznych skanowań. Skanowano ze zmiennymi rozdzielczościami pionowymi i kątowymi

Rozdzielczość kąta-wa/pionowa	Obiekt zbliżony kształtem do walca		Obiekt zbliżony kształtem do kuli		Obiekt nieregularny wypukły		Obiekt nieregularny wklęsły	
	pojedynczy	złożony	pojedynczy	złożony	pojedynczy	złożony	pojedynczy	złożony
1° / 1 mm	18	3	15	3	31	2	43	4
1° / 3 mm	9	1	16	2	12	2	39	3
3° / 1 mm	7	2	9	1	4	0	36	4
3° / 3 mm	3	1	7	0	8	1	16	3
5° / 3 mm	2	0	4	0	4	0	16	3
3° / 5 mm	0	0	2	0	2	0	9	2
5° / 5 mm	0	0	3	0	0	0	1	0

Natychmiastowa eliminacja wierzchołków błędnych okazała się niekorzystnym rozwiązaniem. Burzy ona układ siatki mający jeszcze na tym etapie monogeniczną strukturę prostokątów. To znacznie utrudniłoby dalsze transformacje. W miejsce eliminacji lepiej do-

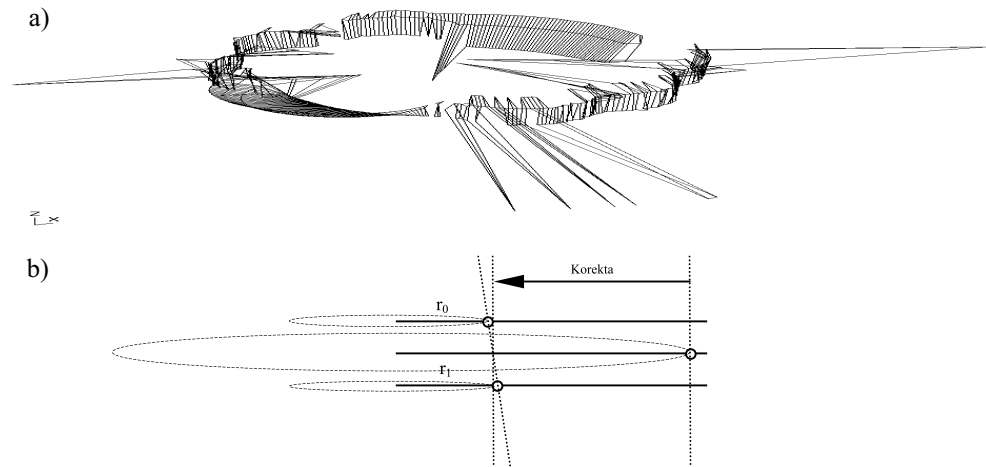
konać korekt współrzędnych wierzchołka. Do klasyfikacji wierzchołków jako szum najprościej zdefiniować metrykę określającą tolerancję na szum i bazującą na średniej arytmetycznej odległości wierzchołków – sąsiadów od środka obrotu skanowanej bryły. Metryka porówna różnicę średniej dla sąsiadów ($r_{\text{średnia}}$) i odległości rozważanego punktu (r_{test}) z wartością tolerancji T . W przypadku wykrycia szumu – przesunie wierzchołek:

$$r_{\text{średnia}} = (r_1 + r_2) / 2$$

jeżeli

$$\text{abs}(r_{\text{test}} - r_{\text{średnia}}) > T, \text{ wtedy } r_{\text{test}} = r_{\text{średnia}}$$

Ta podstawowa procedura odszumiania dała bardzo przyzwoite efekty i w zupełności wystarczyła w przypadku większości powierzchni skanowanych (rys. 3).



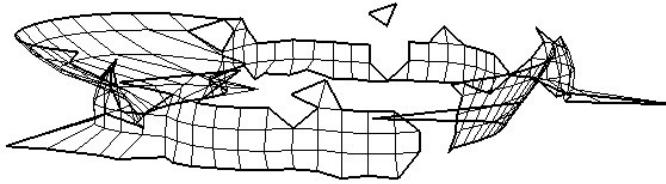
Rys. 3. Przykłady szumów skanowania (a) i korekta pozycji wierzchołków (b) przy skanowaniu rotacyjnym

3.2. Usuwanie oderwanych wielokątów

Podstawowym założeniem skanowania rotacyjnego jest to, iż w jego wyniku powstaje jedna siatka wielokątów. Wielokąty współdzielą swoje krawędzie (sąsiedztwo). Wśród wad siatki mogą występować wielokąty nie posiadające kompletu sąsiadów. Istnienie wielokąta nie posiadającego jakichkolwiek sąsiadów definiuje nową siatkę – (złożoną z jednego wielokąta), co jest niedozwolone. W kolejnym kroku procedury odszumiania musimy zatem wyeliminować z obrabianego materiału wszystkie takie wielokąty (rys. 4).

Wielokrotnie prowadzone skanowania testowe wykazały, że jeśli w materiale w ogóle występowały oderwane wielokąty, to zawsze występowały pojedynczo. Tym samym rozwiązanie określające procedurę ich eliminowania nie będzie skomplikowane. W zupełności

wystarczy przeglądnąć wszystkie wielokątów i dla każdego z nich wykazanie istnienia krawędzi wspólnej w innym wierzchołkami. Gdy żadna z krawędzi nie jest współdzielona – wielokąt jest oderwany.



Rys. 4. Szumy skanowanie – oderwane wielokąty

3.3. Zamykanie siatki 3D

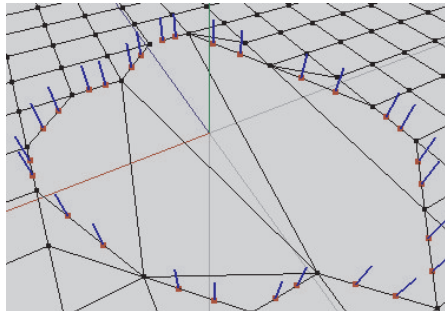
Zamykanie siatki 3D można zdefiniować jako jej przekształcenie do postaci reprezentującej graficznie bryłę 3D posiadającą tzw. kubaturę (*cubic measure*). Innymi słowy, zamknięta siatka 3D musi być tak zdefiniowana, aby swoim kształtem umożliwiała ekspozycję tylko jednej (tzw. zewnętrznej) strony każdego z należących do niej wielokątów [9]. Celem konwersji zamykającej siatki (będącej produktem skanowania rotacyjnego) jest zatem eliminacja wszelkich ubytków w siatce. Ubytki te objawiają się głównie występowaniem wielokątów nie posiadających kompletu swoich sąsiadów. Po zakończeniu procesu zamykania każda krawędź siatki powinna być współdzielona przez dokładnie dwa wielokąty. Wówczas efekt graficzny procesu zamykania siatki 3D będzie skutkował właśnie wytworzeniem wrażenia kubatury prezentowanej bryły – poprzez uniemożliwienie ekspozycji „wewnętrznej” strony siatki 3D ją reprezentującej.

W przypadku materiałów pochodzących ze skanowania rotacyjnego nie będziemy mieli do czynienia z redundancją wierzchołków, pojawiającą się np. w konsekwencji łączenia siatek czy użycia innych technik skanowania 3D. Nie ma zatem sensu przeprowadzania procedury redukcji wierzchołków (wykrywania i eliminacji serii wierzchołków o zbliżonych pozycjach zastępując je tylko jednym).

Wykrycie krawędzi otworów skanowanej bryły w przypadku jej dolnej i górnej powierzchni nie przysparza problemów. Po usunięciu odczytów stanowiących szum mamy do czynienia z linią łamaną zamkniętą, znajdującą się na pozycji 0 (licząc ją na skali wysokości skanowania). Dodatkowo zakładając, iż podstawą skanowanego obiektu jest płaszczyzna, wystarczy pokryć tą płaszczyznę siatką wielokątów, aby uzyskać pożądany efekt. Pokrycie takie w najprostszym przypadku będzie polegało na prowadzeniu nowych krawędzi pomiędzy kolejnymi wierzchołkami łamanej, tworząc z nich wierzchołki trójkątów (skądinąd trójkąt jest najbardziej pożądanym w siatkach 3D wielokątem, co uzasadnione zostanie w następnych podrozdziałach). Okazuje się, że kolejność prowadzenia linii może tu być istotna. Przykładem transformacji skutkującej późniejszymi wadami bryły 3D było rozpoczęcie i kontynuowanie zamykania danego otworu bryły zawsze od tego samego wierz-

chołka, należącego do łamanej. Na rozważanej płaszczyźnie tworzą się wówczas tzw. wachlarze trójkątów, których istnienie wprowadza bardzo jaskrawe refleksy świetlne podczas renderowania (rys. 5) w silniku 3D (efekt uboczny stosowania techniki cieniowania wierzchołków przy renderowaniu bryły). Innym wadliwym rozwiązaniem jest generowanie krawędzi w takiej kolejności, iż w nowopowstałym wielokącie pojawia się parzysta liczba wierzchołków, należących uprzednio do wejściowej krzywej łamanej. W konsekwencji tego zjawiska konieczne jest końcowe łączenie krawędziami dwóch sąsiednich wierzchołki krzywej ów łamanej, co zdefiniuje trójkąt ekstremalnie mały i wpływający negatywnie na późniejszy efekt wizualny projekcji tworzonej bryły.

Testy pokazały, iż najlepszą metodą jest wybór kilku maksymalnie odległych punktów łamanej i prowadzenie stamtąd nowych krawędzi w kierunku kolejnych (już np. losowo) wybranych punktów (z uszanowaniem wyżej opisanej reguły „nieparzystości”). Nieregularność tak powstałej siatki wyeliminuje niepożądane efekty wizualne (rys. 5).



Rys. 5. Etap pierwszy zamykania „otworu siatki”: kwalifikowanie krawędzi do krzywej łamanej zamkniętej i wstępne generowanie dodatkowych krawędzi łączących wierzchołki łamanej (przypadek uproszczony)

W przypadku istnienia braków poza płaszczyznami dolną i górną ich wykrycie wymaga już dokładnej analizy poszczególnych wielokątów siatki. Koncepcja algorytmu wykrywającego będzie oparta na poszukiwaniu takich krawędzi siatki (par wierzchołków), które nie są współdzielone przez dokładnie dwa wielokąty. To założenie nie pokrywa naturalnie wszystkich możliwości wystąpienia wad w siatce 3D (przykładowo istnienie dwóch identycznych wielokątów).

W poszukiwanym rozwiązaniu brane są jednak pod uwagę tylko siatki powstałe w wyniku skanowania rotacyjnego, a w tym konkretnym przypadku autor nie stwierdził występowania innego rodzaju wad (po zanalizowaniu około 200 skanowanych siatek). Gdy wykryje się wadę siatki, możliwe jest uruchomienie faktycznego algorytmu określającego zakres korekty. Będąc jednym z przedmiotów niniejszego opracowania, określa on, w jaki sposób ustalić serię wierzchołków siatki 3D (definiujących jednocześnie krzywą łamaną), które będą łączone dodatkowymi krawędziami w celu usunięcia wady siatki.

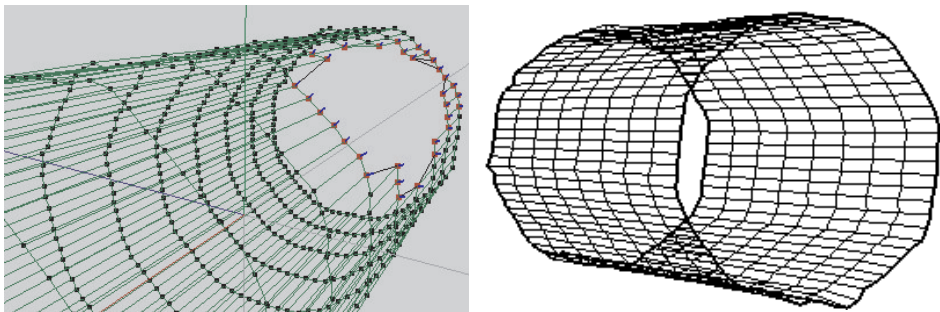
Propozycja algorytmu będzie następująca:

1. Stworzyć listę wszystkich krawędzi, posiadających wady (metodę określono wcześniej).
2. Wprowadzić parametr *Distance* (o wartości liniowej) determinujący minimalne sąsiedztwo między krawędziami wadliwymi (czyli wpływają na określenie zagęszczenia wad na danym fragmencie siatki tworzącego podstawę do zdefiniowania krzywej zamkniętej i ich eliminacji) (rys. 6).
3. Od wybranej losowo wadliwej krawędzi rozpocząć poszukiwanie najbliższego wadliwego sąsiada, do którego liczba przejść przez inne wierzchołki jest mniejsza niż *Distance*. Do poszukiwania zastosować algorytm OSPF (siatka jest jednocześnie grafem zadanym listami krawędzi i wierzchołków) i wówczas:
 - 3.1. Gdy za pierwszym razem nie znaleziono – losować następny.
 - 3.2. Gdy znaleziono – szukać kolejnego, poczynając od uprzednio znalezionej.
 - 3.3. Gdy za kolejnym razem nie znaleziono – wziąć kolejny dalszy wierzchołek. Gdy nie ma już dalszych znalezionych – przejść do 4.

Do poszukiwań użyty zostanie „podwójnie zagnieżdżony” algorytm rekursywny OSPF ze stałą metryką odległości między wierzchołkami:

4. Wszystkie kolejno znalezione wierzchołki wraz ze ścieżkami do nich prowadzącymi odnotować w liście.
5. Wyszukać (OSPF) najkrótszą drogę pomiędzy pierwszym i ostatnim wierzchołkiem listy. Dodać drogę na koniec listy zamykając tym samym krzywą łamaną definiowaną tą listą wierzchołków.

Po wykonaniu kroków 1–5 lista zawiera wierzchołki stanowiące krzywą łamaną określającą granice otworu bryły do zamknięcia (rys. 6).



Rys. 6. Zamykanie siatki 3D do bryły

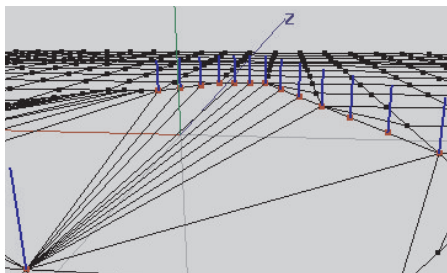
Powyższy algorytm został zaimplementowany i przetestowany na siatkach skanowanych o najróżniejszych kształtach. Testy algorytmu i zaimplementowanej z jego użyciem procedury odbyły się na próbie 80 przypadków siatek 3D (reprezentujących różne kształty).

Detekcja przebiegła poprawnie dla 77 z nich. Pozostałe 3 cechowały się jednak tak wysokim poziomem zaszumienia, iż ich reprezentacja graficzna nawet nie była postrzegana jako trójwymiarowy kształt. Tym samym i tak stosowanie zarówno algorytmu, jak i całej opisywanej metody byłoby wobec nich bezcelowe. Przy tak dużej próbce i wysokim odsetku poprawnie przetworzonych obiektów można wysunąć tezę o przydatności algorytmu w pracach związanych z optymalizacją siatek 3D. Obecna implementacja jest zakodowana w C++ i operuje na plikach w formacie .3ds (siatki wielokątów). Tester wizualizujący został stworzony nad OpenGL/GLUT.

Następnym krokiem będzie wypełnienie ustalonej już krzywej łamanej dodatkowym fragmentem siatki, którego brakuje.

3.4. Zamykanie siatki 3D z emulacją wypukłości

Rozwiązanie takie może zostać zastosowane w celu zatarcia „śladów” pozostawionych przez procedurę zamykania bryły. Lwia część skanowanych kształtów (szczególnie dla technologii skanowania rotacyjnego) to kształty wypukłe. Powody takiej właśnie sytuacji zostały przedstawione wcześniej. Zamknięcie bryły poprzez wygenerowanie wielokąta uzupełniającego siatkę zaburzy naturalną wypukłość bryły (rys. 7). Poprawne rozwiązanie (dające w konsekwencji przyzwoity wizualnie efekt) wymaga zastosowania większej liczby wielokątów i bardziej złożonej procedury ich generowania. Generowanie większej liczby wielokątów w zamykanej przestrzeni może być wykonane z pomocą jednej z ogólnie znanych technik (można użyć przykładowo techniki Kobbelta [6], Loopa [7], czy Doo-Sabina [2]). Gotowe rozwiązania w tym zakresie już istnieją i nie ma sensu ich dalej rozważać. Gdy powierzchnia bryły w miejscu prowadzenia korekty jest wypukła lecz zbliżona do płaszczyzny najlepsze wyniki prezentowała metoda Kobbelta (algorytm testowo zaimplementowany wprowadzał do siatki $n^2/3$ dodatkowych wierzchołków, gdzie n to liczba wierzchołków na krzywej łamanej definiującej otwór w siatce do zamknięcia). W przypadku powierzchni mocno wypukłych – najlepiej sprawdził się wariant metody Doo-Sabina (przy tej samej liczbie dodanych wierzchołków).

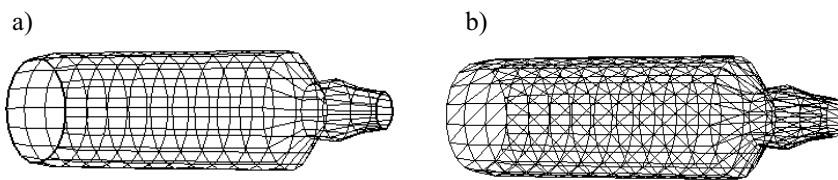


Rys. 7. Selekcja wierzchołków definiujących krzywą łamaną wokół otworu siatki do zamknięcia

3.5. Triangularyzacja siatki 3D

Jak wspomniano, skanowana rotacyjnie siatka 3D powstaje w wyniku łączenia sąsiednich wierzchołków materiału skanowanego (górny, dolny, prawy i lewy). Powstaje materiał, będący serią czworokątów, posiadających wspólne krawędzie (rys. 8a). Końcową transformacją dokonywaną podczas obróbki 3D powinna być triangularyzacja. Termin ten można tu zdefiniować jako przekształcenie siatek modelu 3D do postaci zawierających wyłącznie trójkąty [5]. Redukcja dowolnych wielokątów siatki do trójkątów umożliwia znaczne uproszczenie późniejszych procedur renderujących taką siatkę. Proces triangularyzacji często jest wręcz wymagany, gdyż niektóre silniki renderujące są w stanie operować wyłącznie na siatkach definiowanych przy użyciu trójkątów. Trójkąty w siatkach 3D są także wskazane ze względów wydajnościowych. Definicje procedur teksturujących obiekty (tekstutowanie przyrostowe) czy rozmywające obiekty (cieniowanie gradientem na podstawie wartości wektorów normalnych) są implementowane właśnie dla trójkątów [1].

Na pierwszy rzut oka proces triangularyzacji jest banalny i nie wart nawet omówienia. Jest oczywiste, iż każdy wielokąt można poprzecinać dodatkowymi krawędziami łączącymi jego wierzchołki i tym samym przebudować go do zbioru trójkątów (rys. 8b). Taka operacja znacznie jednak zwiększa liczbę wielokątów koniecznych do późniejszej obróbki. Celowe więc będzie opracowanie takiej procedury triangularyzacji, które nie powodując powstawania wad modelu, utrzyma liczbę wielokątów (docelowo: trójkątów) na stałym poziomie, lub wręcz ją zmniejszy. W ramach badań do niniejszego opracowania zaimplementowano wiele różnorodnych procedur tak udoskonalonej triangularyzacji. Powstałe na ich bazie algorytmy są zbyt skomplikowane, aby można było je opisać na łamach tej publikacji. Generalnie polegają na wykrywaniu w produkcie wstępnej triangularyzacji par trójkątów przylegających (mających wspólną krawędź) i scalaniu ich w nowy wielokąt. Równocześnie realizowana jest korekta pozycji jednego ze wspólnych wierzchołków scalonych trójkątów – tak aby nowy wielokąt znów był trójkątem. Pary trójkątów muszą naturalnie spełniać szereg kryteriów gwarantujących, iż scalanie nie pogorszy efektu wizualnego uzyskiwanego z prezentacji wynikowej siatki jako obiektu 3D.

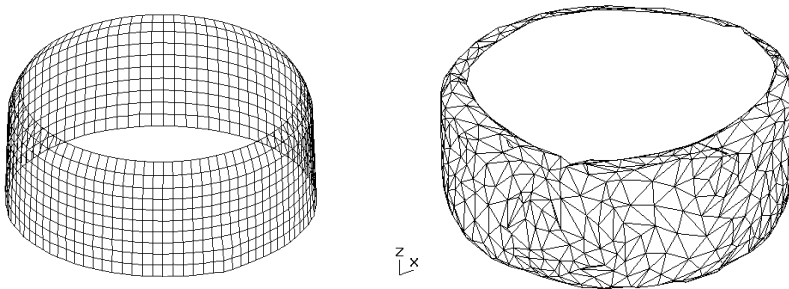


Rys. 8. Triangularyzacja siatki 3D – przykład: a) siatka przed triangularyzacją; b) wynik działania procedury triangularyzacji

3.6. Losowe deformowanie bryły w procesie triangularyzacji siatki 3D

Potrzeba wprowadzania deformacji wynika bezpośrednio ze specyfiki procedur renderujących, jakimi posługują się silniki 3D. Bryła renderowana w akceleratorze 3D jako

komponent sceny 3D, powinna jak najwierniej odzwierciedlać symbolizowany nią obiekt. Nieznaczne nieregularności siatki 3D potrafią (można by powiedzieć – paradoksalnie) ukryć niedoskonałości algorytmów renderujących, związane najczęściej z nieprecyzyjnym obliczaniem refleksów świetlnych. Nieregularności deformują punktowo takie refleksy [9], a niedoskonałości obliczeń (w tym np. efekt Moire, błędy, zatarcie perspektywy przy mocno oświetlonych lub zbyt dużych obiektach) nie będą postrzegane przez człowieka. Najprostszym przykładem procedury deformującej jest zaburzenie pozycji wszystkich wierzchołków siatki o niewielką wartość liczbową (zarówno współrzędnej X , Y , jak i Z) generowaną losowo. Na rysunku 9 przedstawiono efekt działania procedury deformującej.



Rys. 9. Triangulizacja ze zniekształcaniem (tu zniekształcenie zbyt intensywne, lecz przedstawione tak celowo dla zobrazowania efektu końcowego)

Co oczywiste – taką transformacją najlepiej jest zakończyć procedurę optymalizacji siatki. Zastosowanie jej w fazie wcześniejszej zniszczyłoby informację o siatce 3D, konieczną do użycia innych opisanych tu metod.

4. Podsumowanie rozwiązania – adaptacja skanowanych siatek 3D dla potrzeb silników 3D

Podjęte w artykule rozważania wykazały, iż procedura eliminacji wad modelu 3D mających znaczenie przy jego renderowaniu w silnikach 3D będzie złożona i wieloetapowa. Możliwe jest jednak jej sformułowanie, a wyniki jej stosowania powinny dać zadowalający efekt.

Ważne jest wzięcie pod uwagę konkretnych technologii renderowania, jakie wykorzystują silniki 3D. Wymaga to przeprowadzania dziesiątek testów i empirycznej oceny wyników dostępnych wyłącznie w postaci efektu wizualnego.

Celowe wydaje się zdefiniowanie następującej kolejności postępowania przy prowadzeniu wspomnianego procesu adaptacji:

1. Odszumianie.
2. Eliminacja kształtów niepowiązanych z bryłą (pojedyncze wielokąty).

3. Zamykanie bryły 3D i emulacja wypukłości dla zamykanej bryły wybraną metodą.
4. Triangularyzacja zamkniętej siatki 3D.
5. Redukcja (scalanie) trójkątów po triangularyzacji.
6. Deformowanie losowe.

Stosując powyższą procedurę oraz opisane algorytmy, autor poddał obróbce siatki 3D powstałe w konsekwencji skanowania kilkudziesięciu różnorodnych brył trójwymiarowych – przeprowadzając je do postaci zoptymalizowanego modelu 3D. Wyniki wizualne były satysfakcjonujące. W przypadku tego konkretnego problemu wydaje się, iż tylko taka ocena końcowego rozwiązania może miarodajnie wpłynąć na uzasadnienie zasadności jego stosowania w praktyce.

Literatura

- [1] Botsch M., Steinberg S., *Openmesh – a generic and efficient polygon mesh data structure*. OpenSG Symposium, 2002.
- [2] Doo D., Sabin M., *Analysis of the Behaviour of Recursive Division Surfaces Near Extraordinary Points*. Computer Aided Design, vol. 10, 1978, 356–360.
- [3] Foley D.A. van Dam., *Wprowadzenie do Grafiki Komputerowej*. WNT, 1995.
- [4] Julesz B., *Binocular depth perception of computer-generated images*. The Bell System Technical Journal, 39(5), 1125–1163.
- [5] Kettner L., *Using generic programming for designing a data structure for polyhedral surfaces*. 14 Annual ACM Symposium. On Computational Geometry, 1998 (wykorzystano tezy ogólne).
- [6] Kobbelt L., *Interpolatory Subdivision on Open Quadrilatera, Nets With Arbitrary Topology*. Proceedings of Eurographics 96, 1996, 409–420.
- [7] Loop C., *Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles*. Department of Mathematics, 1987 (Master's thesis, University of Utah).
- [8] Mayer R., *Invention and Innovation From Canada's National Research Council, Scientific Canadian*. Raincoast Books, Vancouver, 1999.
- [9] Tobler R., Maierhofer S., *A Mesh Data Structure for Rendering and Subdivision*. Short Communications proceedings. WSCG'2006, January 30-February 3, 2006.
- [10] Woodham R.J., *Photometric method for determining surface orientation from multiple images*. Optical Engineering, vol. 19, No. 1, 1980, 139–144.