

Wykorzystanie technik 3D do wizualizacji żerowisk wybranych gatunków chrząszczy saproksylicznych

The use of 3D techniques for visualizing larval galleries of selected saproxylic beetles

Jakub Wolski¹ , Grzegorz Zawadzki² 

¹Wydział Leśny, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie; ²Katedra Ochrony Lasu, Instytut Nauk Leśnych, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

e-mail: s211272@sggw.edu.pl

Abstract. Advances in digital technologies are increasingly applied in nature education and forest diagnostics. Also, 3D modeling of insect feeding grounds is becoming more and more common in science. This study explores the use of 3D models as a didactic tool in forest entomology, aimed at improving both the learning process and the accurate identification of characteristic features of beetle larval galleries.

Data acquisition involved digital photography of original saproxylic beetle galleries, followed by photogrammetric reconstruction in the Meshroom software. This technique allows for the reconstruction of three-dimensional objects based on a series of two-dimensional images and ensures a high level of detail. The resulting models were refined and textured in the Blender software to create high-resolution visualizations that accurately reflect the structural features of the individual galleries. Eleven saproxylic beetle species were selected to show the diversity of larval galleries of tree-damaging insect species and to present larval galleries in different host tree species. A total of eleven 3D models representing different beetle species and host tree types were developed (Table 1). These interactive models complement traditional teaching resources such as illustrations, photographs, and dry specimens, allowing users to examine the morphology of the galleries from multiple perspectives and at any scale. Image acquisition required 456 photographs in total, and took about 18 hours of shooting. The model processing took 8 hours and resulted in the creation of 1.65 GB compressed files.

The study demonstrates the potential of 3D visualization to enhance modern education and forest diagnostics. The main advantage of using such models and creating virtual guides from them is the possibility of easy storage, multiple playback and accessibility. It represents a step toward the digitization of educational resources and the dissemination of environmental knowledge to a broader audience. Beyond its didactic applications, the approach offers opportunities for digitizing and preserving entomological collections, thereby increasing accessibility while minimizing the need for physical handling of fragile specimens. Moreover, this work shows that the use of such techniques provides a tool supporting the identification of feeding grounds, which may contribute to more effective monitoring and management of forest health.

Słowa kluczowe: Entomologia, fotogrametria, wizualizacja 3D, edukacja, ochrona lasu

Keywords: Entomology, photogrammetry, 3D reconstruction, education, forest protection

1. Wstęp

Zmiany związane z powszechną cyfryzacją spowodowały dynamiczny postęp technologiczny. Metody rekonstrukcji struktury (ang. Structure from Motion) otworzyły nowe perspektywy dla wizualizacji 3D. Modelowanie to jest procesem tworzenia wirtualnych obiektów trójwymiarowych, możliwym np. przy użyciu zdjęć wykonanych zwykłym aparatem fotograficznym. Możliwości zastosowań modeli 3D są liczne: architektura

i urbanistyka (Zawieska i in. 2012), archeologia (Bramorski i in. 2025), kartografia (Kolecka 2012), rozrywka (Niemirka 2013) (panoramy, wirtualne wycieczki, gry komputerowe) czy efekty dla produkcji filmowej (Moulon 2014). Nowe technologie takie jak modele 3D, gogle VR, czy rzeczywistość rozszerzona obecnie wykorzystywane są w różnych dziedzinach nauki, takich jak architektura, inżynieria, biologia czy medycyna (Wenjing i in. 2019) oraz w edukacji (Piotrowska, Cichoń 2015). Na świecie powstają bazy wirtualnych modeli 3D, czego

Wpłynęło: 28.07.2025 r., recenzowano: 25.08.2025 r., zaakceptowano: 15.09.2025 r., opublikowano: 25.09.2025 r.

 BY-NC-ND 4.0 © 2025 J. Wolski, G. Zawadzki

przykładem może być *Skull base*, czyli wirtualna kolekcja 210 czaszek zwierząt dostępna online (Skull Base 2025). Nowe technologie tworzą możliwość rozszerzenia wachlarza narzędzi edukacyjnych oraz pomocy dla profesjonalistów o kolejną pozycję, jaką są modele 3D.

W ostatnich latach rosnąca liczba publikacji naukowych pokazuje, że modelowanie 3D żerowisk owadów jest coraz powszechniej wykorzystywane. W badaniach Li i in. (2022) zastosowano algorytm rekonstrukcji trójwymiarowej do analizy korytarzy drążonych przez owady, a Sioma i in. (2024) wykorzystali obrazowanie 3D do wykrywania śladów żerowania na powierzchni drewna. Z kolei Yang i in. (2022) użyli tomografii komputerowej do szczegółowej wizualizacji i analizy żerowisk chrząszcza *Monochamus alternatus* Hope, 1842. Te prace dowodzą, że wizualizacja 3D stanowi cenne narzędzie badawcze, umożliwiające precyzyjne dokumentowanie i analizę uszkodzeń drewna powodowanych przez szkodniki wtórne, co dotychczas było utrudnione.

Obecny dostęp do programów na licencji Open Source daje możliwość wygenerowania modeli obiektów przestrzennych (biologicznych, takich jak żerowiska czy fragmenty roślin i grzybów, geologicznych lub architektonicznych) dla dowolnej dziedziny nauki. Wirtualne bazy modeli 3D mogą być udostępniane do wglądu dla każdego zainteresowanego, przekazywane między uniwersytetami i placówkami edukacyjnymi poprzez strony WWW, wirtualne biblioteki lub bazy danych. Modele 3D mogą znaleźć zastosowanie podczas kształcenia w zakresie entomologii, gdzie możliwość przybliżenia szczegółów anatomii owadów czy charakterystycznych szczegółów ich żerowisk może podnieść skuteczność nauczania i ułatwić późniejszą identyfikację gatunkową.

W leśnictwie za owady szkodliwe uważa się gatunki powodujące straty gospodarcze (Instrukcja ochrony lasu 2024). Do szkodników wtórnych należą głównie chrząszcze, które zasiedlają osłabione lub uszkodzone drzewa (Dominik, Starzyk 1989). Szkodniki wtórne zazwyczaj żerują pod korą i w drewnie tworząc charakterystyczne żerowiska, unikalne dla każdego gatunku owada. Na podstawie żerowisk często można oznaczyć gatunek, który uszkodził roślinę, bez konieczności zaobserwowania samego sprawcy. Wygląd żerowisk w obrębie danego gatunku ma z reguły podobny schemat i zawiera stałe elementy, jak miejsce złożenia jaj (ma to szczególnie istotne znaczenie w przypadku korników, u których dorosłe chrząszcze tworzą tzw. komory godowe i chodniki macierzyste) oraz miejsce żerowania larw (chodniki larwalne). Wylęgle z jaj larwy żerując drążą chodniki larwalne. U poszczególnych gatunków żerowiska różnią się liczbą chodników larwalnych, rozgałęzieniami, wzajemnym ułożeniem wobec siebie, szerokością, długością oraz kształtem. Niektóre gatunki zakładają w drewnie kolebki poczwarkowe o unikalnym kształcie i rozmiarze, których głównym celem jest ochrona poczwarki, czyli spoczynkowego stadium rozwojowego owada (Szwanwicz 1956). Często poza tymi elementami istotne znaczenie diagnostyczne mają dodatkowe cechy, jak trocinki o specyficznych dla danego gatunku cechach (kolor, grubość, sposób ich ułożenia w żerowisku), czy kształt i rozmiar

otworów wylotowych (Michalski, Mazur 1999). Cechy żerowisk zwykle pozwalają na oznaczenie gatunku przez ekspertów-entomologów. Mniej doświadczone osoby często muszą posilić się poradnikami, przewodnikami i kluczami do oznaczania żerowisk. Opracowania tego typu zawierają liczne ryciny, fotografie oraz opisy żerowisk. Brakuje im jednak możliwości oglądu żerowisk z różnych perspektyw. Cennym uzupełnieniem istniejących już materiałów, ułatwiającym oznaczanie gatunków owadów, mogą być wirtualne przewodniki bazujące na modelach trójwymiarowych.

Celem niniejszej pracy było opracowanie modeli 3D ułatwiających identyfikację żerowisk wybranych gatunków chrząszczy saproksylicznych. W pracy skoncentrowano się na 11 gatunkach chrząszczy, reprezentujących dwie wyższe jednostki systematyczne: podrodzinę korników (*Curculionidae: Scolytinae*) oraz rodzinę kózkowatych (*Cerambycidae*). Większość spośród wybranych gatunków może mieć istotne znaczenie z gospodarczego punktu widzenia. Opracowanie ma na celu dostarczenie narzędzia wspomagającego identyfikację żerowisk, co może przyczynić się do skuteczniejszego monitorowania i zarządzania stanem zdrowotnym lasów. Modele mogą służyć także jako dodatkowe narzędzie dydaktyczne dla studentów kierunków przyrodniczych lub leśnych.

2. Materiały i metodyka

Żerowiska będące pierwowzorami modeli trójwymiarowych zostały pozyskane ze zbiorów Katedry Ochrony Lasu Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Żerowiska znajdowały się w wyciętych wałkach drewna, stanowiących fragmenty pni drzew zasiedlonych przez poszczególne gatunki i zostały oznaczone przez specjalistów z zakresu entomologii. Na potrzeby niniejszych badań wybrano żerowiska posiadające istotne cechy identyfikacyjne, umożliwiające pewne oznaczenie gatunku sprawcy. Wybrano eksponaty z najlepiej widocznymi żerowiskami, by zapewnić możliwie wysoką jakość wizualizacji. Skoncentrowano się na modelowaniu żerowisk znajdujących się na powierzchni drewna i w drewnie (tab. 1.).

W celu stworzenia trójwymiarowych modeli żerowisk wykonano szczegółową dokumentację fotograficzną. Zdjęcia wykonane zostały aparatem fotograficznym Sony Alpha 68 wyposażonym w matrycę APS-C o rozdzielczości 24 megapikseli, oraz obiektywem Minolta AF 50 mm f/1.7. Żerowiska umieszczono w równomiernie oświetlonym miejscu, aby ograniczyć cienie oraz odzwierciedlić kolory obiektu, zapewniając dostęp z każdej strony. Zdjęcia wykonywane były z 4 perspektyw. Pierwsze zdjęcie zrobiono w płaszczyźnie poziomej na wysokości środka żerowiska. W przypadku wyższego żerowiska, nie mieszczącego się w kadrze, etap ten był powtarzany dwa razy: na wysokości $\frac{1}{3}$ i $\frac{2}{3}$ obiektu. W drugim ujęciu fotografie wykonywane były od góry pod kątem 45 stopni, w trzecim ujęciu od dołu pod kątem 45 stopni, a w czwartym od góry. W każdym z ujęć wykonano serię zdjęć przemieszczając aparat dookoła osi fotografowanego obiektu w celu uzyskania 360-stopniowego obrazu. Wszystkie zdjęcia wykonano tak, aby sąsiednie ujęcia częściowo się nakładały, dzięki czemu możliwe

Rycina 1. Rozmieszczenie kamery w przestrzeni (źródło: J. Wolski, program Meshroom)

Figure 1. Camera placement in space (source: J. Wolski, Meshroom software)

Gatunek Species	Wizualizacja żerowiska Visualisation of larval galleries	Liczba zdjęć wykorzystanych do stworzenia modelu Numer of photographs used for model creation
Cetyniec mniejszy (<i>Tomicus minor</i> Hartig, 1834)		45
Cetyniec większy (<i>Tomicus piniperda</i> Linnaeus, 1758)		42
Czterooczek świerkowiec (<i>Polygraphus poligraphus</i> Linnaeus, 1758)		42
Drwalnik paskowany (<i>Trypodendron lineatum</i> Olivier, 1795)		35
Jeśniak czarny (<i>Hylurgops crenatus</i> Duftschmid, 1825)		42

cd. Rycina 1. Rozmieszczenie kamery w przestrzeni (źródło: J. Wolski, program Meshroom)

cont. Figure 1. Camera placement in space (source: J. Wolski, Meshroom software)

Gatunek Species	Wizualizacja żerowiska Visualisation of larval galleries	Liczba zdjęć wykorzystanych do stworzenia modelu Numer of photographs used for model creation
Jodłowiec krzywozębny (<i>Pityokteines curvidens</i> Germar, 1824)		33
Kornik ostrozębny (<i>Ips acuminatus</i> Gyllenhal, 1827)		30
Ogłodek brzoźowiec (<i>Scolytus ratzeburgii</i> Janson, 1856)		47
Rytownik pospolity (<i>Pityogenes chalcographus</i> Linnaeus, 1761)		42
Ściga fioletowa (<i>Callidium violaceum</i> Linnaeus, 1758)		50
Kurtek mniejszy (<i>Molorchus minor</i> Linnaeus, 1758)		48

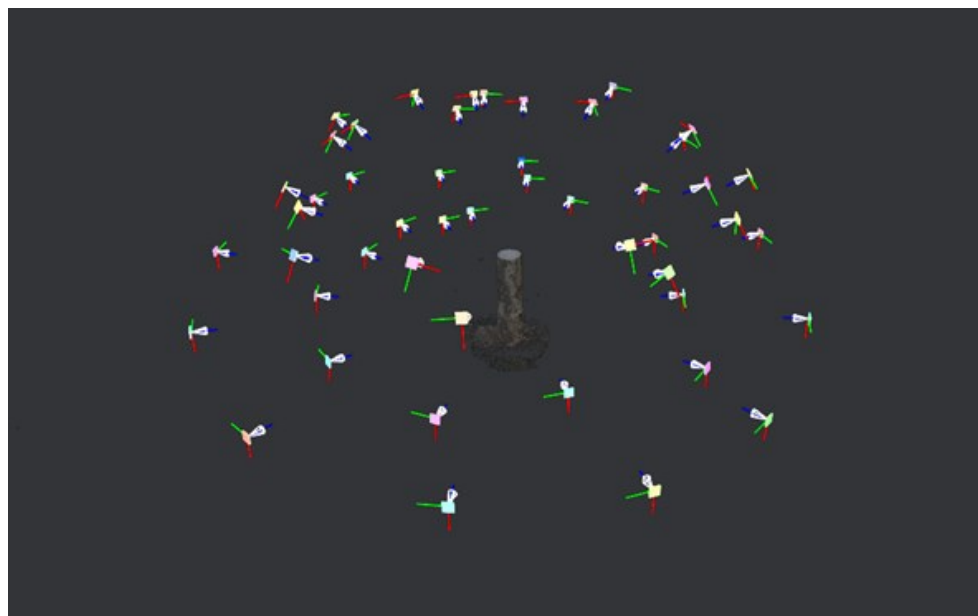
było precyzyjne zidentyfikowanie punktów wspólnych za pomocą programu fotogrametrycznego (Rey-Otero, Delbracio 2014). Dla każdego żerowiska wykonano średnio 41 zdjęć. W przypadku bardziej złożonych lub dużych żerowisk liczba zdjęć była odpowiednio zwiększana. Zdjęcia zapisywano w formacie RAW, czyli w bezstratnym formacie danych, dzięki czemu zapewniona była najwyższa jakość obrazu i szerokie możliwości edycyjne w programach do obróbki grafiki.

Podczas tworzenia modeli wykorzystywano komputer osobisty o następującej specyfikacji: Procesor AMD Ryzen 5 5600G 3.90 GHz, pamięć RAM 32 GB 3600 MHz, procesor graficzny NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti 12 GB GDDR6. Przy takiej specyfikacji komputera tworzenie jednego modelu zajęło średnio 14 minut.

Do tworzenia trójwymiarowych żerowisk wykorzystano oprogramowanie open-source Meshroom (Meshroom 2025) stworzone przez zespół AliceVision (AliceVision 2025). Oprogramowanie to służy do pozyskiwania i analizy danych o wymiarach, kształcie i położeniu obiektów w przestrzeni bazując na fotografiach. Meshroom, wykorzystując technologie Computer Vision i algorytmy komputerowe, pozwala w automatyczny sposób analizować fotografie wykonane z różnych perspektyw. Następnie algorytm wyodrębniając punkty rekonstruuje obiekty lub sceny. Program ten posiada przystępny w obsłudze interfejs graficzny. Zaimplementowane do programu algorytmy można modyfikować w dowolny sposób przy użyciu interfejsu blokowego. Bazuje on na graficznej formie przepływu pracy (ang. workflow) składających się ze zbioru linii i węzłów łączących poszczególne etapy przetworzenia danych. Proces tworzenia modeli składał się z kilku następujących po sobie etapów:

1. **CameraInit** – wstępna konfiguracja tworzenia wizualizacji trójwymiarowych, oparta na fotografiach wprowadzonych do programu i zawartych w nich metadanych,
2. **FeatureExtraction** analiza każdego dodanego obrazu w celu zidentyfikowania punktów charakterystycznych dla danej struktury (Lowe 2004),

3. **ImageMatching**, namierzanie wspólnych, charakterystycznych punktów między parami fotografii i określanie ich wzajemnego położenia,
4. **FeatureMatching** analiza par punktów wygenerowanych w procesie ImageMatching,
5. **StructureFromMotion (SfM)**. inicjacja modelu na podstawie jednej pary zdjęć z wcześniej wyodrębnionych par, tworząc jej strukturę przestrzenną (w postaci punktów) oraz pozycję dwóch kamer, z których fotografie te zostały wykonane. Następnie dane z kolejnych par zdjęć są dodawane do procesu, a ich pozycja jest obliczana z uwzględnieniem znanych punktów charakterystycznych i utworzonych w procesie SfM struktur. Pozycja punktów w przestrzeni jest obliczana za pomocą triangulacji fotogrametrycznej. Triangulacja fotogrametryczna oblicza położenie punktu w przestrzeni, bazując na prostych tworzących trójkąt. Finalnym efektem procesu SfM jest uzyskanie położenia w przestrzeni kamery (współrzędne przestrzenne oraz kąty obrotu), z której wykonano zdjęcie (ryc. 1), a także chmury punktów 3D, która jest szkieletem przyszłego modelu (ryc. 2). Chmura ta przedstawia wszystkie charakterystyczne punkty dla rekonstruowanego obiektu (Dworzak i in. 2015; Nister, Stevenius 2006),
6. **PrepareDenseScene**, przygotowanie danych wyjściowe z procesu SfM do użycia w kolejnych etapach poprzez odfiltrowanie błędnych lub niepotrzebnych punktów z chmury. Następnie, określenie dokładnej głębokości każdego piksela chmury punktów (Hirschmüller 2005),
7. **DepthMapFilter**, łączenie powstałych w poprzednim etapie mapy głębokości oraz wyszukuje i usuwa ewentualne błędy (Hirschmüller 2005),
8. **Meshing** łączenie sąsiadujących ze sobą punktów z gęstej chmury powstałej w procesie DepthMapFilter. Opiera się on na metodzie Triangulated Irregular Network (TIN), czyli triangulacji, polegającej na łączeniu trójkątów w taki sposób, aby żaden z nich nie zawierał w sobie innych



Rycina 1. Rozmieszczenie kamery w przestrzeni (źródło: J. Wolski, program Meshroom)

Figure 1. Camera placement in space (source: J. Wolski, Meshroom software)

punktów. Tak wygenerowana siatka (ryc. 6) jest przygotowana do nałożenia na nią tekstur (Jancosek, Pajdla 2014). Kąty w powstałych trójkątach nie mogą być zbyt ostre ani zbyt rozwarte, ponieważ siatka nie byłaby równomierna, a nałożona na taki trójkąt tekstura mogłaby wyglądać nienaturalnie,

9. **MeshFiltering**, optymalizacja powstałej siatki, usuwająca początkowe artefakty i błędnie utworzone trójkąty (Jancosek, Pajdla 2014),
10. **Texturing**, stworzenie i nałożenie na model tekstur, tworząc mapę ze zdjęć, która jest nakładana na trójwymiarową siatkę (Lévy i in. 2002),
11. Dalsza obróbka graficzna modeli odbywała się w bezpłatnym i otwartym pakiecie 3D Creation Suite „Blender” (Blender 2025). Program ten umożliwił zmniejszenie rozmiaru plików modeli 3D poprzez redukcję liczby wierzchołków i ścian w modelu. Proces ten pozwolił

na znaczące zmniejszenie rozmiaru pliku, z około 1,5 GB do 0,1 GB. Redukcja liczby wierzchołków i ścian za pomocą funkcji Decimate Modifier (Bociek 2014) jest całym kompromisem, który umożliwia efektywniejsze wykorzystanie modelu 3D w różnych zastosowaniach, takich jak wizualizacje do celów dydaktycznych lub udostępnianie go online. Uproszczona geometria modelu, choć nie zachowuje absolutnej szczegółowości oryginału, nadal precyzyjnie odwzorowuje ogólny kształt, strukturę i cechy diagnostyczne żerowiska. Dzięki temu pozostaje w pełni funkcjonalnym narzędziem w kontekście omawianych zastosowań, przy jednoczesnym oszczędzeniu przestrzeni. Wykonanie jednego modelu w programie Meshroom zajęło od 7 do 17 minut, w zależności od szczegółowości modelowanego obiektu. Czas potrzebny na wymodelowanie wszystkich żerowisk to dwie godziny i trzydzieści pięć minut. Należy zaznaczyć, że czas ten może



Rycina 2. Przestrzenna chmura punktów (źródło: J. Wolski, program Meshroom)

Figure 2. 3D point cloud (source: J. Wolski, Meshroom software)



Rycina 3. Powierzchnia modelu stworzona z trójkątów (źródło: J. Wolski, program Meshroom)

Figure 3. Model surface created from triangles (source: J. Wolski, Meshroom software)

się wydłużyć lub skrócić w zależności od konfiguracji komputera, na którym wykonywane są modele. Baza plików, w których skład wchodzi zdjęcia, baza danych oraz surowe modele mają rozmiar 59,7 GB. Natomiast baza gotowych modeli po wykonanym eksporcie do formatu .glb ma rozmiar 1,65 GB.

3. Wyniki

Wynikiem realizacji prezentowanych prac są wizualizacje żerowisk 11 gatunków chrząszczy saproksylicznych. Poniżej przedstawione zostały zrzuty ekranu wybranych modeli z naniesionymi odnośnikami dotyczącymi cech charakterystycznych

danego żerowiska. Modele zapisane są w formacie GLB, który oferuje zapis modelu, tekstur i pozostałych danych w jednym pliku. Aby otworzyć plik, należy użyć programu przeglądarkowego typu „glTF Viewer” (glTF Viewer 2025) lub dedykowanego oprogramowania komputerowego. Wszystkie modele w znajdują się w otwartych repozytoriach (Google¹, Mendeley²).

3.1 Przykłady wizualizacji żerowisk chrząszczy ze wskazaniem cech diagnostycznych

Model żerowiska kurtka mniejszego (ryc. 4, 5): A – Chodniki larwalne kręte, przebiegające głównie poprzecznie względem osi fragmentu drewna, wygrzyzione w drewnie na głębokość 1–2



Rycina 4. Model żerowiska kurtka mniejszego
Figure 4. Model of the feeding ground of the *Molorchus minor*



Rycina 5. Zbliżenie na fragment modelu żerowiska kurtka mniejszego
Figure 5. Close-up of a fragment of the *Molorchus minor* feeding ground model



Rycina 6. Model żerowiska ogłodka brzoźowca
Figure 6. Model of the feeding ground of the *Scolytus ratzeburgii*



Rycina 7. Zbliżenie na fragment modelu żerowiska ogłodka brzoźowca
Figure 7. Close-up of a fragment of the *Scolytus ratzeburgii* feeding ground model

¹ <https://drive.google.com/drive/folders/1MAvkPrEH5-9rcx4VxPur-bvaPZDNPhCT?usp=sharing> (dostęp 1.09.2025)

² <https://data.mendeley.com/preview/j64n64mjks?a=ccc7978e-cabc-443b-8bf9-ff189e3166dd> (dostęp 1.09.2025)

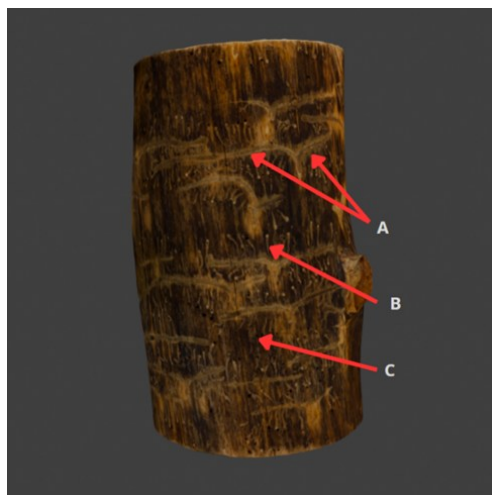
mm. Średnia szerokość chodników to ok. 5 mm (ryc. 4). B – Chodniki larwalne zakończone są 3–4 mm otworem będącym wejściem do kolebki poczwarkowej. C – Na całej długości chodników larwalnych widoczne białawe trocinki z domieszką brunatnych (ryc. 5) (Schnaider 1991).

Model żerowiska ogłodka brzoźowca (ryc. 6, 7): A – Pojedynczy chodnik macierzysty przechodzący wzdłuż włókien, zaznaczony w drewnie. Długość do 10 cm, szerokość 3,5 mm. B – gęsto ułożone chodniki larwalne odchodzące od chodnika macierzystego. Początkowo biegną w poprzek włókien, następnie rozchodząc się ku górze i dołowi. Długość chodników wynosi średnio 20 cm (ryc. 6), C – okrągłe 1 mm otwory wejściowe do kolebek poczwarkowych na końcu chodników larwalnych (ryc. 7) (Szujewski 1995).

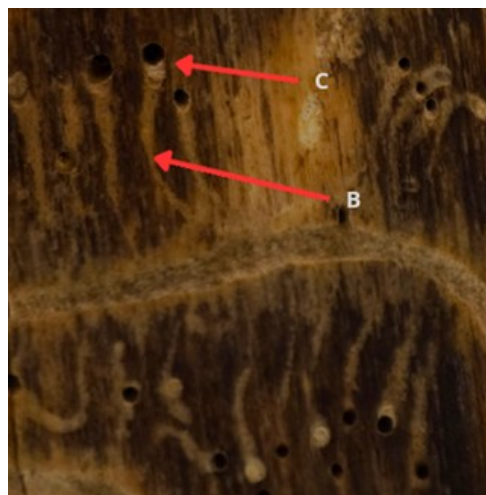
Model żerowiska cetyńca mniejszego (ryc. 8, 9): A – chodnik macierzysty w kształcie dwuramiennej, poprzecznej klamry. Zazwyczaj jedno z ramion jest dłuższe od drugiego. Chod-

nik jest wyryty głęboko w biału. B – chodniki larwalne biegną przeważnie wzdłuż włókien osiągając około 4 cm długości. Żer odbywa się głównie pod korą, przez co w biału znajdują się płytkie ślady. C – Kolebka poczwarkowa okrągłego kształtu znajdująca się na końcach chodników larwalnych jest pionowo zagłębiona w biel. Czasami widoczne są w niej białe trocinki (ryc. 9) (Nunberg 1964).

Model żerowiska cetyńca większego (ryc. 10, 11): A – Pojedynczy chodnik macierzysty przechodzący wzdłuż włókien zaznaczony w drewnie. Długość 8–20 cm, szerokość 3 mm. B – Chodniki larwalne odchodzące od chodnika macierzystego, biegnące nieregularnie, lekko zaznaczone w drewnie (ryc. 10). C – Na obrzeżu chodnika macierzystego występuje zażywiczenie (ryc. 11) (Starzyk i in.).



Rycina 8. Model żerowiska cetyńca mniejszego
Figure 8. Model of the feeding ground of the *Tomicus minor*



Rycina 9. Zbliżenie na fragment model cetyńca mniejszego
Figure 9. Close-up of a fragment of the *Tomicus minor* feeding ground model



Rycina 10. Model żerowiska cetyńca większego
Figure 10. Model of the feeding ground of the *Tomicus piniperda*



Rycina 11. Zbliżenie na fragment modelu żerowiska cetyńca większego
Figure 11. Close-up of a fragment of the *Tomicus piniperda* feeding ground model

4. Podsumowanie

Prezentowana baza modeli przestrzennych żerowisk może być użyteczna w edukacji leśników, przyrodników i miłośników lasu, a także podczas prac z zakresu ochrony lasu. Lasy coraz częściej stają się otwartymi laboratoriami i klasami, w których bezpośredni kontakt z naturą sprzyja głębszemu zrozumieniu procesów ekologicznych (Referowska-Chodak 2013). Modele mogą być przeglądane na komputerach i urządzeniach mobilnych, zarówno w specjalistycznych programach, jak w przeglądarce internetowej. Główną zaletą wykorzystania modeli 3D i stworzenia z nich wirtualnego przewodnika jest możliwość łatwego przechowywania, wielokrotnego odtwarzania oraz dostępność, co czyni je praktycznym narzędziem zarówno w edukacji, jak i w diagnostyce leśnej. W porównaniu do klasycznych drukowanych przewodników przewagą modeli 3D pozostaje dostępność zobrazowania o wysokiej rozdzielczości oraz możliwość szybkiego przeanalizowania szczegółów. Ponadto wzrost zainteresowania rekreacją na terenach leśnych generuje potrzebę łatwo dostępnych źródeł wiedzy o ekosystemach leśnych dla szerokiego grona odbiorców (Chudy 2017).

Obecne pokolenie młodych ludzi chętnie korzysta z technologii cyfrowych, co sprawia, że modele 3D mogą być atrakcyjnym narzędziem dydaktycznym. Umożliwienie interakcji z modelami w wirtualnym środowisku może zwiększyć zainteresowanie tematyką leśnictwa i ochrony przyrody wśród młodzieży. Takie rozwiązanie może również przyciągnąć osoby niezwiązane z leśnictwem, które chciałyby pogłębić swoją wiedzę o środowisku naturalnym (Radiant 2020). Mimo dużego potencjału wirtualne modele nie zastąpią tradycyjnych metod edukacji, ale mogą być wartościowym uzupełnieniem obecnie funkcjonujących metod dydaktycznych, szczególnie w sytuacjach, gdy dostęp do eksponatów jest ograniczony. Zaletą modeli 3D jest stosunkowo niski koszt ich wykonania, a wadą dość czasochłonny proces ich tworzenia, obejmujący pozyskanie modeli do odwzorowania, ich fotografowanie, komputerowe modelowanie, oraz obróbki w programach graficznych. Bazy modeli powinny być przechowywane w magazynie danych online, co ułatwia ich udostępnianie lub wymianę materiału między placówkami edukacyjnymi i naukowymi.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowanie anonimowym recenzentom i Redaktorowi działowemu za włożony wysiłek i cenne uwagi do wcześniejszych wersji pracy.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Źródła finansowania badań

Badania sfinansowano ze środków własnych autorów.

Wkład autorów

J.W. – koncepcja, metodyka, pozyskanie danych, obróbka danych, przygotowanie treści manuskryptu, G.Z. – współudział w opracowaniu koncepcji, konsultacje merytoryczne, udział w zbieraniu i selekcji danych, redakcja i korekta treści manuskryptu.

Literatura

- AliceVision 2025. <https://github.com/alicevision/AliceVision> (dostęp 10.12.2024)
- Blender 2025. <https://www.blender.org> (dostęp 24.01.2025)
- Bociek B. 2014. Blender. Podstawy modelowania. Helion, Gliwice. ISBN: 978-83-283-0590-3.
- Bramorski J., Niedostatkiewicz M., Banaś A. 2025 Zastosowanie fotogrametrii do tworzenia replik w obiektach zabytkowych, *Inżynieria i budownictwo* 1. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.8820>.
- Chudy K. 2017. Zagospodarowanie w lasach miejskich alternatywą dla rozwoju bazy turystyki lokalnej w kontekście oczekiwań społecznych, *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej* 19 (51): 172–182.
- Dominik J., Starzyk M. 1989. Owady niszczące drewno. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa. ISBN 83-09-00638-1.
- Dworzak M., Biessikirski A., Pyra J., Sołtys A., Winzer J. 2015. Wstępna analiza możliwości zastosowania cyfrowej niemetrycznej fotogrametrii naziemnej z wykorzystaniem metody SfM (Structure-from-Motion) w robotach strzałowych, *Przegląd Górniczy* 9: 61–68.
- glTF Viewer 2025. <https://gltf-viewer.donmccurdy.com> (dostęp 03.02.2025)
- Hirschmüller H. 2005. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05). DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.56>.
- Jancosek M., Pajdla T. 2014. Exploiting Visibility Information in Surface Reconstruction to Preserve Weakly Supported Surfaces. CTUP.
- Kolecka N. 2012. Numeryczne modelowanie kształtu stromych i urwistych stoków na podstawie danych ze skaningu laserowego i danych fotogrametrycznych (Rozprawa doktorska). Repozytorium Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Lévy B., Petitjean S., Ray N., Maillot J. 2002. Least Squares Conformal Maps for Automatic Texture Atlas Generation, *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 21 (3): 362–371. DOI: <https://doi.org/10.1145/566654.566590>.
- Li X., Yang M., Li W. 2022. Three-Dimensional Reconstruction and Predictive Simulation Algorithm of Forest and Fruit Wood Borer Galleries Based on Two-Dimensional Images and Different Influencing Factors, *Agronomy* 12 (5): 1087.
- Lowe D.G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision* 60: 91–110. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:IJCV.0000029664.99615.94>.
- Meshroom 2025. <https://alicevision.org> (dostęp 10.12.2024)
- Michalski J., Mazur A. 1999. Korniki. Praktyczny przewodnik dla leśników. Wydawnictwo Świat, Warszawa. ISBN 83-85597-83-2.
- Moulon P. 2014. Positionnement robuste et précis de réseaux d'images. Université Paris-Est, Paris.
- Niemirka B. 2013. Zastosowanie grafiki wektorowej w projektowaniu, (w:) M. Chrzęściak (red.) Produkcja przekazów multimedialnych. Wyższa Szkoła Promocji, Warszawa.
- Nister D., Stewenius H. 2006. Scalable Recognition with a Vocabulary Tree. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2: 2161–2168. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.26>
- Nunberg M. 1964. Uszkodzenia drzew i krzewów leśnych wywołane przez owady. PWN, Warszawa.
- Piotrowska I., Cichoń M. 2015. Multimedia i E-Podręczniki w kształceniu młodzieży pokolenia cyfrowego, *Prace Komisji Edukacji* 4: 67–85. DOI: <https://doi.org/10.24917/pke.4.67>.
- Radiant J., Wilsenach A. 2020. Exploring the Potential of Virtual Reality for Learning and Teaching in Primary and Secondary Education: A Systematic Review, *Computers & Education* 153: 103893.
- Referowska-Chodak E. 2013. Znaczenie edukacji leśnej w plenerze, *Studia i Materiały CEPL w Rogowie* 15 (34): 11–21.

- Rey-Otero I., Delbracio M. 2014. Anatomy of the SIFT Method. *Image Processing On Line*, 4: 370–396. DOI: <https://doi.org/10.5201/ipol.2014.82>.
- Schnaider Z. 1991. Atlas uszkodzeń drzew i krzewów powodowanych przez owady i roztocze. PWN, Warszawa. ISBN 978-83-01-10515-3.
- Sioma A., Nagashima K., Lenty B., Hebda A., Nakata Y., Harada K. 2024. Detection of pest feeding traces on industrial wood surfaces with 3D imaging, *Applied Sciences* 14 (23): 10775.
- Skull Base 2025. <https://skullbase.info/index.php> (dostęp 13.11.2024)
- Starzyk J.R., Skrzypczyńska M. Rossa R., Michalcewicz J. 2007. Klucze do oznaczania owadów leśnych. PWRiL, Warszawa. ISBN 978-83-09-01053-5.
- Szujecki A. 1995. Entomologia leśna. Tom II. Wydawnictwo SGGW, Warszawa. ISBN 978-83-00-03290-7.
- Szwanwicz B. 1956. Entomologia ogólna. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Wenjing Y., Liang W., Li-Ang Z., Xin L., Bo W., Huazhe Y. 2019. The applications of virtual reality technology in medical education: a review and mini research, *Journal of Physics: Conference Series* 1176 (2): DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/2/022055>.
- Yang H., Gao S., Wang J., Li W., Hou Q., Qiu J. 2022. Three-dimensional reconstruction of *Monochamus alternatus* galleries using CT scans, *Insects* 13 (8): 692.
- Zawieska D., Bakula K., Podlasiak P. 2012. Analiza deformacji powierzchni elementów budowlanych na podstawie zdjęć cyfrowych, *Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji* 23: 521–529. ISSN 2083-2214/ISBN 978-83-61576-19-8.