

TECHNIKI FOTOGRAMETRYCZNE STOSOWANE W MODELOWANIU 3D MIAST

KAROL ROTCHIMMEL, MARIUSZ KACPRZAK

Centrum Technologii Kosmicznych, Zakład Teledetekcji, Instytut Lotnictwa, Al. Krakowska 110/114,
02-256 Warszawa, karol.rotchimmel@ilot.edu.pl, mariusz.kacprzak@ilot.edu.pl

Streszczenie

Głównym celem artykułu jest ukazanie możliwości generowania teksturowanych modeli brył budynków z wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych, na obszarze o gęstej zabudowie. Wykorzystanie tego rodzaju danych źródłowych narzuca zastosowanie określonego procesu technologicznego. Przedstawione zostaną sposoby pozyskiwania kolejnych produktów pośrednich tj.: surowej chmury punktów, NMT, przestrzennych wektorowych modeli budynków, true ortofotomapy i realistycznych tekstur ścian bocznych. Przedstawiony zostanie również sposób ich końcowej integracji przy użyciu oprogramowania typu GIS. Następnie zaproponowana zostanie analiza dokładnościowa, która pozwoli na określenie standardów, które spełnia utworzony 3D model miasta.

Słowa kluczowe: modelowanie 3D, true ortofotomapa, korelacja obrazów, aerotriangulacja.

WPROWADZENIE

Postęp technologiczny, a także ogromny rozwój przestrzeni informatycznej jakiego jesteśmy świadkami odgrywa istotną rolę w gromadzeniu i przekazywaniu informacji przestrzennej. Obecnie niemal każda aglomeracja na świecie posiada lub dąży do stworzenia 3D modelu miasta. Tradycyjna dwuwymiarowa mapa stała się produktem nieatrakcyjnym, w sposób niewystarczający obrazującym otaczającą nas przestrzeń geograficzną. Trójwymiarowe modele miast swoją popularność zawdzięczają nie tylko efektownemu sposobowi prezentacji, ale również mnogości zastosowań, takim jak: sporządzanie projektów studiów uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego, planowanie oraz projektowanie nowych inwestycji, symulacja wystąpienia klęsk żywiołowych, opracowanie map akustycznych, tworzenie serwisów lokalizacyjnych oraz nawigacji samochodowej i jeszcze wiele innych.

Dane źródłowe

W zależności od celu w jakim sporządzany jest 3D model miasta możemy określić wymagany stopień szczegółowości opracowania, a co za tym idzie rodzaj danych i oprogramowania, które zostanie wykorzystane do stworzenia modelu przestrzennego.

Zgodnie z [1] jako źródła danych do stworzenia modelu 3D posłużyć mogą:

- dane wektorowe i opisowe z ewidencji budynków,
- stereo-pary zdjęć satelitarnych (dokładność 1-2 metrów),
- stereo-pary zdjęć lotniczych (dokładność do 0.2 metra),
- dane z lotniczego skaningu laserowego (dokładność do 0.2 metra),
- technologia naziemna (naziemny skaning laserowy, zdjęcia naziemne)
- zdjęcia ukośne

TWORZENIE 3D MODELI MIAST

W niniejszym artykule przedstawiono zakres technik fotogrametrycznych wykorzystywanych w modelowaniu 3D miast z wykorzystaniem źródłowych danych w postaci zdjęć lotniczych. Przebieg procesu tworzenia modeli 3D jest ściśle związany z rodzajem danych źródłowych, w przypadku zdjęć lotniczych pierwszym etapem opracowania jest zaprojektowanie nalotu fotogrametrycznego.

Głównym czynnikiem determinującym parametry nalotu fotogrametrycznego jest terenowy wymiar piksela: GSD (*Ground Sampling Distance*). Jest on bezpośrednio związany ze skalą zdjęcia, wpływa więc w sposób bezpośredni na projektowaną wysokość lotu, na jego podstawie obliczany jest terenowy zasięg zdjęcia. Im mniejszy rozmiar piksela, tym więcej szczegółów zostanie odfotografowanych na zdjęciu. Obecnie przy wykorzystaniu nowoczesnych kamer cyfrowych pozyskiwane są zobrazowania o wymiarze piksela (GSD) rzędu kilku centymetrów z wysokości około jednego kilometra. W planie lotu należy uwzględnić takie parametry jak pokrycie podłużne i poprzeczne, które w znacznej mierze zależą od charakteru terenu [2]. Dla nalotu projektowanego nad terenem miejskim z wysoką zabudową należy odpowiednio zwiększyć pokrycie, co spowoduje że ten sam obszar terenu zostanie odfotografowany na większej liczbie zdjęć. Dzięki temu zminimalizowana zostanie możliwość wystąpienia powierzchni niewidocznych – przysłoniętych przez wysoką zabudowę. Przy projektowaniu nalotu fotogrametrycznego określone są dodatkowo takie parametry jak liczba zdjęć w poszczególnych szeregach, liczba szeregów, całkowita liczba zdjęć, itd. Ostatnią czynnością na tym etapie zadania jest zaprojektowanie polowej osnowy fotogrametrycznej, która umożliwi pozyskanie elementów orientacji zewnętrznej zdjęć w trakcie procesu aerotriangulacji. Projekt polowej osnowy fotogrametrycznej (układ i liczba punktów) jest ściśle zależny od użytego systemu pozyskiwania współrzędnych w locie.

Aerotriangulacja ma za zadanie połączenie dużej liczby zdjęć w jednolitą sieć geometryczną, wyrażoną zwykle w zewnętrznym przestrzennym układzie geodezyjnym. Funkcjonujące na rynku oprogramowanie fotogrametryczne umożliwia przeprowadzenie aerotriangulacji cyfrowej wykorzystującej głównie metodę niezależnych wiązek. Proces ten przebiega w sposób półautomatyczny lub automatyczny. W pierwszym z nich operator interaktywnie wybiera jeden punkt wiążący w pasie pokrycia podłużnego lub poprzecznego zdjęć lotniczych. Punkt ten transferowany jest metodą korelacji obrazów do wszystkich zdjęć, na których występuje. W drugiej metodzie cały proces wyboru, transferowania i pomiaru punktów wiążących odbywa się automatycznie. Algorytmy odpowiadające za wyrównanie obserwacji uwzględniają takie parametry jak krzywizna ziemi czy refrakcja atmosferyczna. Umożliwiają również modelowanie błędów systematycznych

(*shift, drift*). W celu oceny poprawności i weryfikacji jakości procesu aerotriangulacji należy zaprojektować i pomierzyć w terenie punkty kontrolne. Aktualnie mimo znacznego rozwoju systemów do precyzyjnego wyznaczenia położenia kamery w przestrzeni (integracja GPS/INS) pomiar nie jest jeszcze w pełni ekwiwalentny dla aerotriangulacji (osiągane dokładności kątowe są około dwukrotnie niższe). Może on jednak stanowić jej realne wzmocnienie, szczególnie dla bloków o słabszej konstrukcji, takich jak bloki pasmowe. GPS/INS znacznie ułatwia tworzenie projektów pomiarowych aerotriangulacji, gdyż daje bardzo dobre przybliżenie orientacji dla pomiaru punktów wiążących [3].

Połączone w jednolitą sieć geometryczną zdjęcia lotnicze stanowią punkt wyjściowy do tworzenia 3D modeli miast o zadanym stopniu szczegółowości. Metodyka budowy 3D modelu miasta z uwzględnieniem możliwości dostępnego na rynku oprogramowania komercyjnego obejmuje:

Proces budowy modelu przestrzennego zakłada:

- wygenerowanie chmury punktów uzyskanej w procesie korelacji obrazów (*image matching*)
- proces klasyfikacji otrzymanej chmury punktów (automatyczny) wraz z budową NMT, oraz wytworzenie wektorowego modelu 3D budynków w sposób manualny lub półautomatyczny
- tekstuowanie modelu – do tego celu wykorzystać można wygenerowane w sposób automatyczny *True Ortho* nałożone na dachy budynków, oraz dodatkowo zdjęcia pozyskane z wykorzystaniem technik naziemnych do tekstuowania ścian bocznych

Wygenerowanie chmury punktów odbywa się poprzez identyfikację i pomiar punktów homologicznych na dwóch lub więcej obrazach. W przypadku fotogrametrii cyfrowej, problem *matchingu* sprowadza się głównie do dwóch zadań: automatycznego poszukiwania punktów identycznych na dwóch zdjęciach lub automatycznego poszukiwania wzorca na plikach rastrowych. Istnieją trzy metody korelacji obrazów (możliwe jest ich połączenie w celu poprawy osiągniętych rezultatów) [4]:

Area Based Matching opiera się na analizie obszaru grupy pikseli (porównanie ich skali szarości). W przypadku obrazu kolorowego można wykorzystać jeden z kanałów do korelacji. W metodzie tej porównuje się małe fragmenty obrazów zwanych z ang. *image patches*, a następnie mierzy się ich podobieństwa na podstawie korelacji lub znanych metod najmniejszych kwadratów (ang. *least squares matching* oznaczany często LSM).

Feature Based Matching jest używany przeważnie w grafice komputerowej. Krawędzie lub inne obiekty wydobywane z obrazów oryginalnych są porównywane z odpowiednimi, homologicznymi obiektami na pozostałych obrazach. Podobieństwo liczone jest najczęściej jako funkcja kosztów.

Symbolic Matching to metoda porównująca opisy symboliczne używając również funkcji kosztów. Opisy symboliczne mogą odnosić się do skali szarości lub występujących na obrazie obiektów. Mogą być zaimplementowane do systemu jako grafy, drzewa, sieci semantyczne. W porównaniu do poprzednich metod *symbolic matching* nie bazuje na podobieństwie geometrycznym. Zamiast podobieństwa kształtu lub położenia, porównuje własności topologiczne obiektów.

Dodatkowo w celu zwiększenia efektywności poszukiwania odpowiednika na obrazie stosuje się metody ograniczające zakres obszaru poszukiwań:

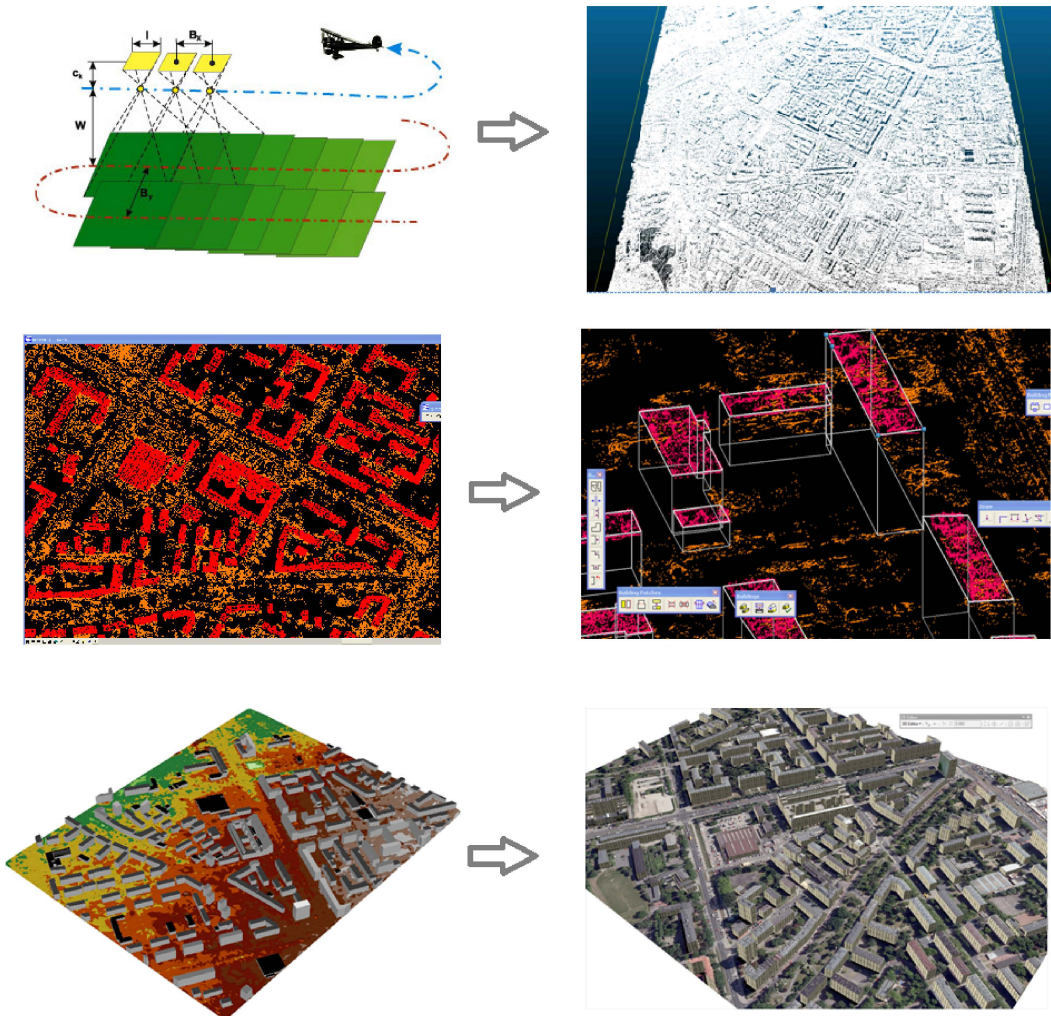
- Wykorzystanie obrazów (linii) epipolarnych
- Wykorzystanie położenia linii pionowych (lub poziomych w przypadku fotogrametrii naziemnej)
- Podejście hierarchiczne (piramida obrazów)

Utworzona nieregularna chmura punktów posiada szereg punktów błędnie skorelowanych (błąd współrzędnej wysokościowej) jest to wynikiem istniejących na zdjęciu szumów, oraz zawodności algorytmów dopasowujących punkty homologiczne (na krawędzi dachów, na koronach drzew). Konieczne jest przeprowadzenie filtracji i klasyfikacji. Tak przetworzona chmura punktów może zostać wykorzystana do budowy NMT i ekstrakcji wektorów reprezentujących krawędzi dachów. Na rynku dostępnych jest wiele programów dedykowanych do pracy z regularną chmurą punktów pozyskaną z lotniczego skaningu laserowego (ALS), niestety ich działanie w zastosowaniu do nieregularnej chmury punktów jest mocno ograniczone. Większość dostępnych algorytmów przeprowadza segmentację, której efektem jest wyodrębnienie fragmentów o tym samym znaczeniu semantycznym – wykorzystywane do tego celu jest kryterium jednorodności położenia, krzywizna oraz/lub kierunek wektora normalnego. Fakt ten sprawia, że w przypadku zastosowania do nieregularnej chmury punktów, algorytm może znaleźć „fałszywe” płaszczyzny, które nie znajdują pokrycia w rzeczywistości [5]. Obecnie nie istnieje żaden niezawodny w pełni automatyczny program pozwalający na klasyfikację i ekstrakcję obiektów „wystających” ponad powierzchnie. Przeprowadzenie wektoryzacji zabudowy miejskiej wciąż wiąże się ze żmudną i czasochłonną manualną pracą edycyjną operatora.

Wyselekcjonowane punkty terenowe zostają zamienione z wykorzystaniem algorytmu interpolującego na regularną lub nieregularną siatkę. Dzięki temu zabiegowi możliwa jest ortorektyfikacja zdjęć, które po przeprowadzeniu procesu mozaikowania utworzą ortofotomapę. W celu utworzenia trueortofotomapy, która jest rzutem ortogonalnym wszystkich obiektów zarejestrowanych na zdjęciu (posiadającym geometrię rzutu środkowego), zarówno powierzchni topograficznej terenu, jak i obiektów „wystających” ponad tę powierzchnię (w praktyce zwykle zawęża się kategorie obiektów ortorektyfikowanych do budynków i mostów) konieczne jest dysponowanie nie tylko numerycznym modelem terenu (NMT), ale również przestrzennymi modelami brył budynków (NMPT).

Uzyskana true ortofotomapa może służyć do automatycznego pokrycia realistycznymi teksturami NMT i zamodelowanych dachów budynków. Kompleksowy 3D model miasta powinien posiadać dodatkowo oteksturowane ściany boczne. Tekstura nałożona na wirtualny model obiektu spełnia nie tylko rolę informacyjną, pozwalając na wyróżnienie i identyfikację poszczególnych obiektów ale również powinna dla modeli metrycznych zapewnić odpowiednią dokładność odtworzenia przestrzeni. W tym celu należy skorzystać ze specjalnie przygotowanych danych źródłowych. Głównie są to zdjęcia naziemne wykonane średniej klasy niemetrycznymi aparatami cyfrowymi, na których odfotografowana została elewacja budynków. Zdjęcia pozyskane w ten sposób są obarczone różnego rodzaju błędami: zniekształcenia układu optycznego (dystorsja beczkowa i dystorsja poduszkowa),

niekorzystna perspektywa, w której oddana jest zabudowa oraz występowanie przeszkód na linii kamera – obiekt. Należy więc zdjęcia odpowiednio przygotować zanim zostaną użyte w procesie teksturowania. Wymienione błędy można z powodzeniem usunąć przy zastosowaniu dostępnego oprogramowania (nawet z licencją typu *freeware*) np. aplikacje z zaimplementowanym algorytmem realizującym rzut ortogonalny oraz funkcjonalnością, która umożliwi korekcję niekorzystnej perspektywy. Sam proces teksturowania może się odbywać w sposób automatyczny, półautomatyczny lub manualny. W celu otekstutowania modelu w sposób automatyczny muszą być wyznaczone elementy orientacji poszczególnych zdjęć w układzie współrzędnych punktów utworzonego modelu. Tekstutowanie automatyczne polega na rzutowaniu obrazu na obiekt z wykorzystaniem równania kolinearności. W celu uzyskania najlepszej dokładności geometrycznej teksturowania, wykorzystuje się najczęściej matematyczne modele kamery obliczone w procesie ścisłego wyrównania sieci zdjęć [6].



Rys. 1. Cykl tworzenia 3D modeli miast ze zdjęć lotniczych i naziemnych [źródło własne].

Integracja utworzonych warstw: NMT, modeli szkieletowych i *True Ortho* może być z powodzeniem przeprowadzona przy wykorzystaniu oprogramowania typu GIS. Umożliwia ono jednoczesną wizualizację wielu typów danych pochodzących z różnych źródeł. Możliwa jest ich superimpozycja, wybór kolejności i sposobu wyświetlania oraz ustawienie stopnia przezroczystości. Zaletą tego oprogramowania poza znacznymi możliwościami w zakresie wizualizacji i manipulacji widokami jest opcja prowadzenia analiz przestrzennych pod kątem ich rozmieszczenia, relacji i tendencji czyli wielu aspektów, których nie można odczytać wprost. Przy wykorzystaniu dostępnych narzędzi, można budować modele, skrypty i kompletne procesy pracy, które pomagają: lepiej odpowiadać na pytania dotyczące geoprzestrzeni, prognozować, zarządzać zasobami i podejmować decyzję.

Ponadto w oprogramowaniu SIP/GIS możliwe jest wczytanie serwisów WMS (standard publikacji danych przestrzennych w Internecie), które mogą być wykorzystane do kontroli geometrycznej zbudowanego modelu. Analizy dokładnościowej można dokonać poprzez porównanie geometrii utworzonych modeli z wczytaną referencyjną warstwą WMS. Użytkownicy korzystający z serwisów WMS mogą pobierać udostępniane dane i wyświetlać je na tle własnych zasobów. Z serwisu WMS korzysta się właściwie tak jak z warstwy informacyjnej, należy jednak pamiętać, że dane z tej warstwy nie są przechowywane na własnym komputerze lecz są one gromadzone na serwerze WMS. Na uzyskane wyniki analizy dokładności stworzonego modelu przestrzennego wpływa w znacznej mierze standard danych referencyjnych (jakość danych udostępnionych na wybranym serwerze WMS).

PODSUMOWANIE

Wizualizacje miast obejmujące trzy wymiary to pojęcie wciąż bardzo młode, zdążyło już jednak wejść do świadomości użytkowników: nawigacji samochodowych, nowoczesnych urządzeń mobilnych czy po prostu osób korzystających na co dzień z zasobów Internetu. Na jakość informacji przestrzennej zawartej w trójwymiarowym modelu terenu zurbanizowanego wpływa zarówno dokładność geometryczna jak i graficzny sposób prezentacji. Im dokładniejsze dane tym atrakcyjniejszy produkt. Modele trójwymiarowe przedstawiające poszczególne budynki są coraz bardziej realistyczne. W sposób szczegółowy przedstawiają konstrukcje dachów i wygląd elewacji, wykorzystując do tego celu zdjęcia lotnicze i naziemne. Aby uzyskać produkt spełniający poziom szczegółowości standardu CityGML na poziomie LoD 2 lub LoD 3 – w pełni oteksturuowane modele ze zgeneralizowanymi detalami, odpowiednio: poniżej 4 i 2 [m] oraz dokładnością przestrzenną $XY \leq 2$, $H \leq 1$ [m] dla LoD 2 i $XYH \leq 0,5$ [m] dla LoD 3, należy wykorzystać dane źródłowe w postaci zdjęć lotniczych lub chmur punktów z lotniczego skaningu laserowego. Schemat tworzenia 3D modeli miast wykorzystujący skaningu laserowy jest w dużej mierze zbliżony z przedstawionym w powyższym artykule schematem wykorzystującym zdjęcia lotnicze. Chmura punktów LIDARu posiada wyższą dokładność przestrzenną i jest łatwiejsza w „obróbce” (automatyczne algorytmy przetwarzania dają lepsze wyniki), dlatego też coraz częściej stosuje się integrację danych z obu systemów.

Proces tworzenia 3D modeli miast został już w znacznym stopniu zautomatyzowany, najtrudniejszym etapem jest ekstrakcja wektorowych modeli budynków i to właśnie w tej materii

należy poczynić największe postępy. Możliwe jest już orientowanie zdjęć w czasie rzeczywistym (lub w czasie bliskim rzeczywistemu) z dokładnością około dwukrotnie mniejszą niż w procesie aerotriangulacji. Prowadzone są próby pozyskiwania wysokorozdzielczych tekstur ze zdjęć ukośnych oraz systemów MMS (Mobile Mapping System). Możliwa jest instalacja kamer cyfrowych i lekkich skanerów laserowych na platformach bezzałogowych (UAV). Wykorzystanie zdalnie sterowanych statków powietrznych w przeciwieństwie do tradycyjnych kampanii fotolotniczych umożliwia szybkie i stosunkowo tanie pozyskanie wysokorozdzielczych zdjęć o dowolnej orientacji dla stosunkowo niewielkich obszarów. Najprawdopodobniej już w niedalekiej przyszłości modele miast 3D staną się standardem prezentowania informacji przestrzennej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Różycki S., 2007, „Trójwymiarowe modele miast – tworzenie i zastosowania”, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17b.
- [2] Czapski, P i inni, 2014, „Budowa i zastosowanie platformy wielosensorowej w badaniu wybranych parametrów środowiska”, *Prace Instytutu Lotnictwa*, 234, pp. 126-142.
- [3] <http://www.igik.edu.pl/pl/badanie-warunkow-stosowania-pomiaru-katow-orientacji-w-aerotriangulacji>
- [4] Bernasik J. i Mikrut S., 2007, „Fotogrametria inżynierska”, *Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Kraków*, s. 38-46.
- [5] Poręba M. i Goulette E., 2012, „Automatyczna detekcja płaszczyzn w chmurze punktów w oparciu o algorytm RANSAC i elementy teorii grafów”, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24, s. 301-310.
- [6] Tokarczyk R., Kohut P., Mikrut S. i Kolecki J., 2012, „Przegląd metod teksturowania modeli 3D obiektów uzyskanych na drodze laserowego skanowania naziemnego i technik fotogrametrycznych”, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24, s. 367 – 381.

PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES USED IN 3D CITY MODELING

Abstract

The main purpose of this article is to show a possibility to generate textured building models from high resolution aerial images in densely built-up areas. The use of this type of data source suggests/implies/imposes the use of a particular process. The following paper describes how to acquire further intermediates, i.e. : the raw point cloud, DSM, DTM, space models of buildings, True Ortho photos and photo-textures. Next, a possible way of their final integration by using GIS software was presented and how an implementation of a precision analysis which allows the user to specify standards that meet the created 3D city model can be made.

Keywords: 3D city model, True Ortho, matching, aerotriangulation.