

Przemysław NOWAK
Politechnika Wroclawska
Wydział Architektury
przemek.nowak781@gmail.com

Bogusław SZLACHETKO
Politechnika Wroclawska
Wydział Elektroniki
boguslaw.szlachetko@pwr.edu.pl

AUTONOMICZNA INWENTARYZACJA SKOMPLIKOWANEGO OBIEKTU ARCHITEKTONICZNEGO PRZY UŻYCIU UAV I ANALIZA KOMPLETNOŚCI ZEBRANEGO MATERIAŁU 3D

Streszczenie. Artykuł łączy zagadnienia z dziedziny informatyki, architektury i robotyki. Połączenie i udoskonalenie istniejących już algorytmów poskutkowało opracowaniem zupełnie nowej metody pozwalającej na zminimalizowanie czasu i kosztów potrzebnych do wykonania inwentaryzacji struktury architektonicznej. Metoda opracowana w czasie przeprowadzonych badań nadała niespotykaną dotychczas autonomię jednostce UAV (ang. Unmanned Aerial Vehicle) wykonującej prace inwentaryzacyjne. Pozwala na to między innymi nowy algorytm szacowania kubatury opracowany na podstawie analizy przebytej trasy. Użyta została m.in. technika SLAM (ang. Simultaneous Localization And Mapping). Całość procesu inwentaryzacyjnego oparto na technice fotogrametrii. Dodatkowo w pracy pokazano, że zebrano dokładniejsze wejściowe dane fotograficzne w całkowicie zautomatyzowany sposób.

Słowa kluczowe: dokumentacja fotograficzna, fotogrametria, automatyczne modelowanie 3D, zbieranie danych, zastosowanie UAV

3D DATA COLLECTION BY THE USE OF UAV AND ANALYSIS OF 3D MODEL COMPLETENESS FOR COMPLICATED ARCHITECTURAL OBJECTS

Abstract. This paper combines issues in the fields of Computer Science, Architecture and Robotics. Alignment and refinement of already existing algorithms has resulted in the creation of a completely new method allowing to minimize the cost and time needed to collect knowledge about 2D and 3D structure of architectural objects. The method created during our study gives the

unprecedented autonomy of a UAV (Unmanned Aerial Vehicle) unit performing documentary work. Autonomy of the vehicle was achieved by the volume analysis of walls, which allows to better plan of the UAV indoor travel. SLAM (simultaneous location and mapping) was used for this part of work. The whole of the acquisition process was based on photogrammetry. The purpose of our activities is to bring the most comprehensive collection of photographic input data into a fully automated way. Collecting complete photographic documentation allows to create a 3D representation of an architectural object and creating its documentation, saving multiple working days of many people.

Keywords: photographics documentation, close range photogrammetry, automated 3D modelling, knowledge collection, UAV application

1. Wprowadzenie

Zagadnienie inwentaryzacji 3D różnych obiektów architektonicznych jest ważnym aspektem związanym z budowaniem wiedzy o wybranym obiekcie. Wprawdzie współczesne budynki, czy obiekty inżynieryjne posiadają dokumentację projektową, jednak istnieje ogromna ilość obiektów, które takiej dokumentacji nie posiadają. Dotyczy to zwłaszcza obiektów historycznych o dużych walorach architektonicznych. W takim przypadku konieczne jest wykonanie pomiarów na potrzeby różnych prac związanych z renowacją i utrzymaniem obiektu.

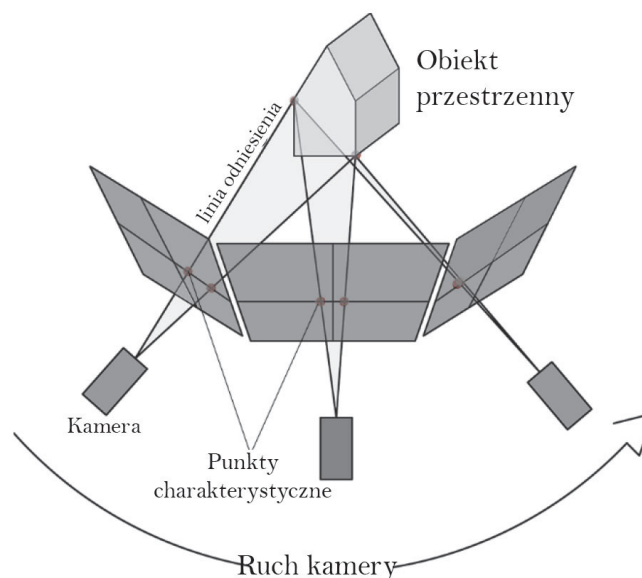
Rozwój komputerowych technik fotogrametrycznych w ostatnim czasie przyczynił się do dużego wzrostu zainteresowania tym zagadnieniem, gdyż upraszcza on i skraca czas wykonania pomiarów. Pierwsze zastosowanie fotogrametrii analogowej można datować na rok 1858. [10] Wykonane z balonu fotografie Paryża pozwoliły zobaczyć, że zdjęcia budynków i ulic wykonane z różnych miejsc mogą posłużyć do tworzenia planów miasta. W roku 1915 skonstruowano pierwszy autograf analogowy - narzędzie geodezyjne umożliwiającym odczytanie danych przestrzennych z materiału fotograficznego.

Celem zastosowania fotogrametrii jest zapis fragmentu przestrzeni poprzez utworzenie trójwymiarowego (3D) modelu, bądź jego dwuwymiarowej (2D) reprezentacji. Danymi wejściowymi procesu jest materiał fotograficzny. Do stworzenia reprezentacji przestrzennej wymagane są przynajmniej dwa ujęcia z różnych położzeń posiadające widoczne punkty wspólne. Model tworzony jest poprzez odnalezienie zależności perspektywicznych pomiędzy punktami wspólnymi fotografii. Przebieg tego procesu przedstawiony został na rysunku 1.

Obecnie istniejące metody są wciąż udoskonalane o nowe algorytmy pozwalające tworzyć modele z większą precyzją i oszczędnością mocy obliczeniowej.

Zagadnienie inwentaryzacji czasem zwane digitalizacją przestrzeni jest ważne również w robotyce. W tym przypadku robot stara się pozyskać informację o otaczającej go przestrzeni i wykorzystuje w tym celu sensory własne - np. kamery, ultradźwiękowe lub laserowe mierniki

odległości, sensory inercyjne itp. [2, 9] W celu wyznaczenie modelu 3D przestrzeni wokół robota konieczna jest znajomość położenia jednostki i jej sensorów. Ponieważ pozycjonowanie robota nie jest łatwe, szczególnie wewnątrz pomieszczeń (ang. indoor), stąd opracowano grupę algorytmów symultanicznej lokalizacji i mapowania [(ang. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)]. Warto zauważyć, że w sensie obliczeniowym zagadnienie SLAM jest niemal identyczne z zagadnieniem fotogrametrii.



Rys. 1. Uproszczony schemat ukazujący zasadę działania fotogrametrii

Źródło: Opracowanie własne.

Pierwszą grupę algorytmów SLAM stanowią algorytmy oparte o laserowy pomiar odległości. [7, 13] Robot za pomocą dalmierzy laserowych wykonuje skan otoczenia i wyznacza model obserwowanej przestrzeni. Następnie lokalizuje sam siebie w tej przestrzeni i przemieszcza się w inne zaplanowane miejsce. Po osiągnięciu nowej pozycji wykonuje się kolejny skan. Kolejne pozycje robota wybierane są tak aby skanowana przestrzeń miała wiele punktów wspólnych ze znaną już z poprzednich skanów przestrzenią, dzięki czemu można stworzyć pełną mapę pomieszczenia, gdyż skan laserowy wykonany z jednej pozycji nie umożliwi odwzorowania wszystkich szczegółów.

Kolejną grupę algorytmów rozwiązujących problem SLAM stanowią algorytmy wykorzystujące obraz z ruchomej kamery [4, 6], przy czym należy rozróżnić dwa przypadki - mono i stereo-wizji. W przypadku stereowizji możliwe jest wyznaczenie mapy głębi widocznej na zdjęciach przestrzeni, a w konsekwencji możliwe jest stosunkowo proste lokalizowanie się w niej. Oczywiście problemem jest precyzja tej lokalizacji, która silnie zależy od odległości i ogniskowej zastosowanych kamer [5]. W przypadku monowizji nie jest możliwe wykonanie mapy głębi bezpośrednio z pojedynczego zdjęcia, jednak kolejne ujęcia wykonane z innych pozycji pozwalają na traktowanie ich jak w przypadku stereowizji tyle, że koniecznym staje się wstępne wyznaczenie pozycji względnej kamery dla obu zdjęć [4, 12].

W pracy [7] opisano bardzo ciekawe zagadnienie tworzenia modelu 3D przez połączenie fotografii wykonanych z powietrza, oraz dalmierzy laserowych zainstalowanych na ziemi. Jednak nawet w przypadku zastosowania konfiguracji monowizji algorytm SLAM pozwalają na stworzenie rzadkiej chmury punktów, którą następnie można użyć do tworzenia modelu 3D przestrzeni otaczającej UAV. Przykład takiego podejścia prezentuje algorytm octomap [6, 11] zaimplementowany w robotycznym systemie operacyjnym (ang. Robotic Operating System) (ROS). Jest to hierarchiczny model przestrzeni o niskiej precyzji. Mimo tego, jest on w zupełności wystarczający do podjęcia decyzji, czy wykonane zdjęcia pozwolą na wyznaczenie precyzyjnego modelu 3D wykorzystującego metody fotogrametrii. analiza trajektorii lotu UAV powiązana z zapamiętanymi punktami wykonania zdjęć pozwala wyznaczyć dodatkowe punkty charakterystyczne, w których należy wykonać zdjęcia, aby fotogrametryczny model 3D był kompletny. Jest to innowacyjne podejście do zagadnienia inwentaryzacji 3D dużych obiektów architektonicznych.

2. Cel pracy i metodyka

Nadrzędnym celem pracy jest zminimalizowanie czasu i środków potrzebnych do stworzenia trójwymiarowej reprezentacji obiektu architektonicznego.

Inspekcja zewnętrzna obiektu to podstawa jakiegokolwiek pracy inwentaryzacyjnej. Najczęściej stosowaną techniką jest ręczne odwzorowanie obiektu na podstawie pomiarów wykonanych tradycyjnymi sposobami. Metoda ta stosowana jest od najdawniejszych czasów, często z użyciem technik niezmiennych od lat. Tradycyjne przyrządy miernicze wspierane bywają nowoczesnymi dalmierzami lub poziomiami laserowymi.

Sposób ten przysparza wielu problemów. Punkty odniesienia są często trudno dostępne, a obiekty nie zawsze posiadają regularne kształty. Szczególnym przypadkiem jest dokumentowanie obiektów, które uległy częściowemu zniszczeniu [1,3]. Nagminne są błędy pomiarowe powodujące komplikacje w kolejnych etapach projektu. Zdarzają się przypadki, w których niewłaściwe ustalenie odniesień niweczy całą wykonaną pracę. Jest to problem dotyczący w szczególności podmiotów niedysponujących specjalistycznym sprzętem geodezyjnym i mierniczym. Wykonanie dokumentacji dla średnich rozmiarów obiektu wymaga często wielodniowej pracy kilkunastoosobowego zespołu.



Rys. 2. Ruiny obiektu architektonicznego o nieregularnym kształcie
Źródło: Wikimedia Commons.

Stosowanie metody tradycyjnej wynika zazwyczaj z nieznamomości nowoczesnych technik. Istnieją techniki znacznie przyspieszające inwentaryzację obiektu architektonicznego. Powszechnie stosowane są skanery laserowe 3d. Pozwalają one uzyskać trójwymiarowy obraz formy przestrzennej w formie chmury punktów o zaskakująco wysokich rozdzielczościach. Wysoka jakość tych urządzeń pozwala zminimalizować przekłamanie powstające w innych metodach. Wadami tego rozwiązania są bardzo wysokie ceny urządzeń i skomplikowana obsługa wymagająca często zaangażowania wykwalifikowanych pracowników posiadających dobrą znajomość specjalistycznego oprogramowania. Obraz uzyskany na podstawie skanowania laserowego jest niezwykle dokładny. W większości przypadków taki poziom precyzji jest zbędny. Margines błędu przyjmowany przy dokumentowaniu obiektów architektonicznych waha się najczęściej w przedziale od 0,5 do 1,5 centymetra w zależności od przeznaczenia dokumentacji (rys. 2).

Rozwiązaniem od niedawna szerzej stosowanym w architekturze jest cyfrowy skan fotogrametryczny. Algorytmy obliczające znane są już od dawna, jednak dopiero rozwój technologii cyfrowej z ostatnich lat pozwolił na osiągnięcie mocy obliczeniowej pozwalającej korzystać z tej technologii szerszemu gronu użytkowników. Nadal jednak technika ta jest mało popularna w stosunku do tradycyjnej inwentaryzacji czy skanu laserowego. Jej wadą jest mniejsza dokładność i tendencja do przekłamań powstałej reprezentacji w stosunku do skanu laserowego. Zazwyczaj jednak taki poziom precyzji wystarcza do stworzenia dokumentacji projektowej.

Niepodważalną zaletą tego rozwiązania są wymagania sprzętowe. Do wykonania skanu fotogrametrycznego wystarczy najprostszy aparat cyfrowy, chociażby wbudowany w smartfon. Przykład tak prostego podejścia pokazany został na rysunku 3.



Rys. 3. Trójwymiarowy model ludzkiej głowy wykonany przez autora przed (z lewej) i po nałożeniu tekstur (z prawej)

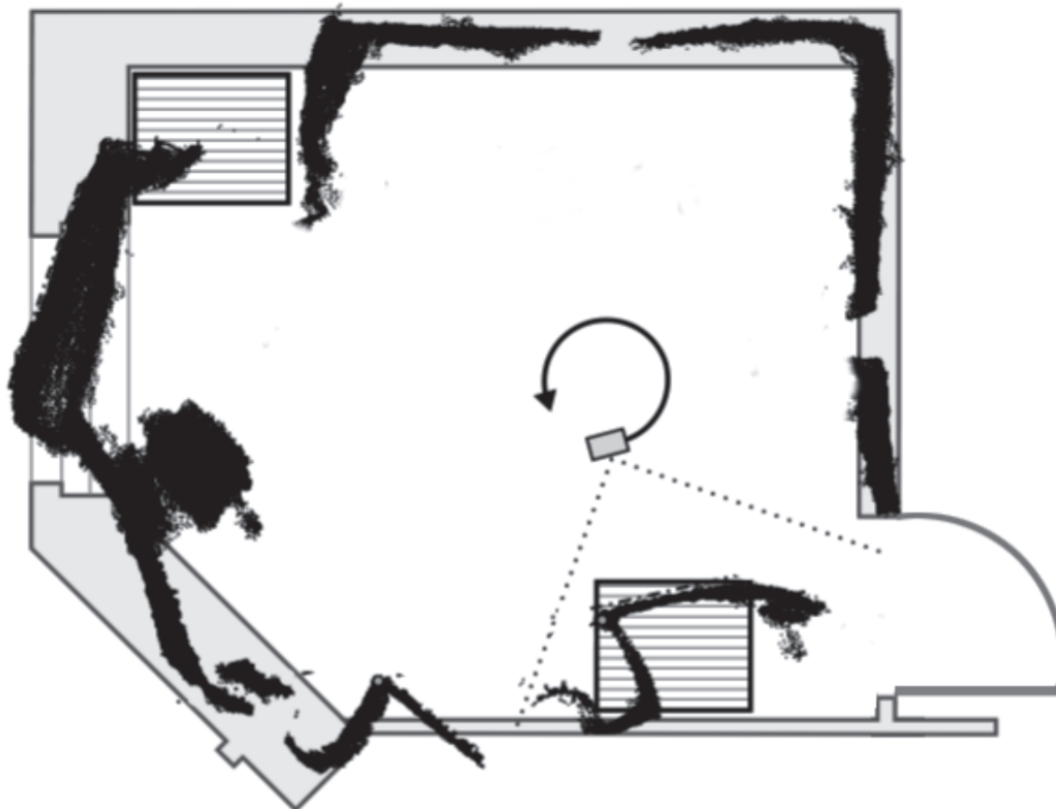
Źródło: Opracowanie własne.

Wielu producentów oprogramowania umożliwiającego obsługę algorytmów fotogrametrycznych zadbało o przyjazny dla użytkownika interfejs przeprowadzający użytkownika przez cały proces tworzenia modelu. Stworzenie reprezentacji nie wymaga więc specjalistycznej wiedzy z zakresu informatyki. Oprogramowanie generuje obraz w formacie zgodnym z większością środowisk 3D. Programy powszechnie używane przez architektów posiadają funkcje ułatwiające tworzenie dokumentacji z danych pozyskanych na podstawie skanów.

W przypadku badań zespołu algorytmy SLAM wykorzystywane są przez jednostkę UAV przemieszczającą się w nieznanym otoczeniu używającą tylko jednej, statycznej kamery. Głębina przestrzeni i odległość od obiektów otaczających obliczane są na podstawie następujących po sobie klatek.

Do reprezentacji przestrzeni 3D używamy modułu Octomap, który jest dostępny w ROS. Reprezentacja ta jest niezwykle efektywna w zakresie określania zajętości przestrzeni 3D w sposób hierarchiczny za pomocą drzewa ósemkowego [8]. Na każdym poziomie szczegółowości przestrzeń całkowicie pusta jest pamiętana jako pojedynczy węzeł bez dodatkowych zagłębień, przestrzeń częściowo wypełniona jest dzielona na osiem jednakowych węzłów o dwukrotnie mniejszym rozmiarze. W efekcie duże puste przestrzenie są reprezentowane przez pojedyncze liście na wysokich poziomach drzewa, a przestrzeń w pobliżu ścian lub innych przeszkód może być uszczegółowiona przez podział i zejście na niższe poziomy drzewa. Procedura kończy się na arbitralnie wybranym poziomie, który jednoznacznie określa precyzję uzyskanego modelu 3D.

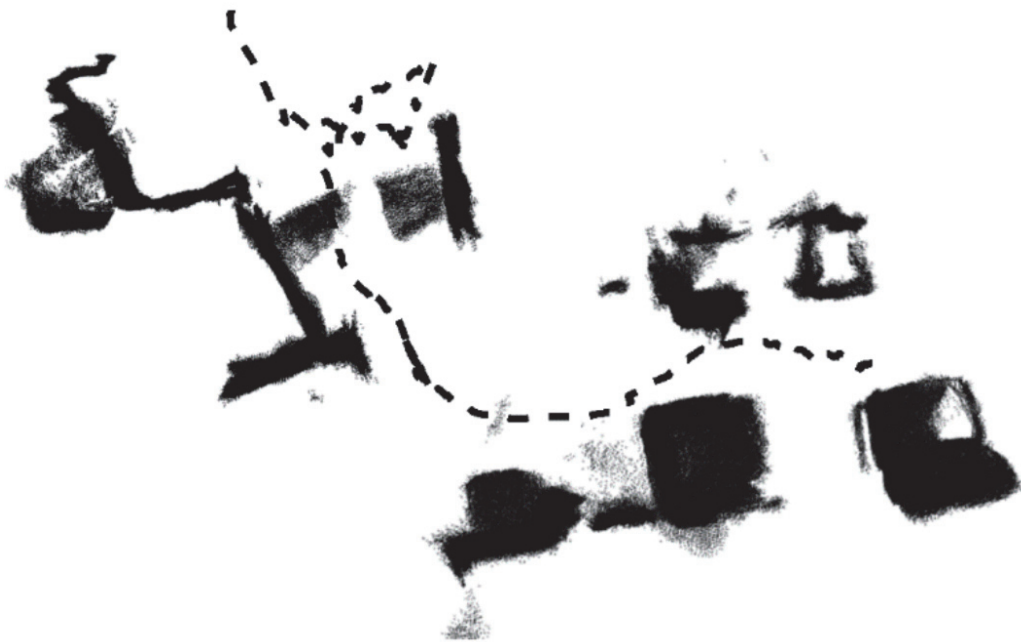
Reprezentacja octomap jest jednocześnie używana do planowania ścieżki przelotu tak aby omijać wykryte przeszkody - w drzewie ósemkowym są to węzły oznaczone jako całkowicie lub częściowo zajęte. Co więcej, octomap umożliwia odnalezienie otworów przez które można podjąć dalszą eksplorację w kolejnych przestrzeniach.



Rys. 4. Reprezentacja chmury punktów uzyskanej na podstawie pojedynczego obrotu UAV z zainstalowaną kamerą. Punkty nałożone zostały na schemat ścian i wyposażenia analizowanego pomieszczenia.

Źródło: Opracowanie własne.

Źródłem danych dla Octomapy jest chmura punktów wyliczona przez algorytm SLAM. Wyznaczanie chmury punktów odbywa się w czasie rzeczywistym na UAV. Tak więc, periodycznie dostarczana jest nowa chmura punktów, która po przeliczeniu uzupełnia reprezentację Octomap. Przykład wyznaczania chmury punktów przez algorytm SLAM pokazano na rysunku 4. Czarne kropki reprezentują wyznaczoną chmurę punktów przy czym wybrane zostały punkty dla przekroju na wysokości około 1 m. Chmura punktów została nałożona na schemat pomieszczenia na którym zaznaczono ściany, okno oraz dwie szafy. Na schemacie pomieszczenia nie zostało oznaczone biurko z komputerem, które znajdowało się pod oknem. Algorytm SLAM natomiast wykrył tę przeszkodę i zobrazował ją jako plamę punktów pod oknem.



Rys. 5. Trasa przelotu UAV wyznaczona na podstawie mapowania 3d. Czarne kropki odwzorowują meble i ściany, przerywaną kreską oznaczona została trasa przelotu
Źródło: Opracowanie własne.

Na rysunku 5 zaprezentowano wynik działania algorytmu SLAM uzyskany podczas autonomicznego przelotu UAV przez korytarz zastawiony regałami różnej wysokości. W tym przypadku można zauważyć, że algorytm SLAM niedokładnie wykrył kąty proste między ścianami. Efekt ten jest niwelowany w czasie analizy zajętości przestrzeni 3D liczonej na potrzeby uaktualnienia Octomapy.

Metody zbierania materiału fotograficznego wnętrza są bardzo podobne do inwentaryzacji zewnętrznej. Napotykanne są jednak problemy rzadziej występujące na zewnątrz. Podstawowym problemem jest skomplikowanie bryły - przegrody budowlane. Jakość wykonanej dokumentacji weryfikuje się ostatecznie dopiero podczas tworzenia modelu. Stopień skomplikowania obliczeń fotogrametrycznych sprawia, że wykonywanie ostatecznego modelu na bieżąco jest niemożliwe do wykonania z użyciem sprzętu dostępnego dla zwykłego użytkownika. Tworząc dokumentację należy więc dbać o dokładne pokrycie wszystkich powierzchni. Widać tu znaczącą przewagę omawianego rozwiązania, gdyż stopień pokrycia bryły materiałem fotograficznym jest trudny do zweryfikowania podczas wykonywania fotografii ręcznie.

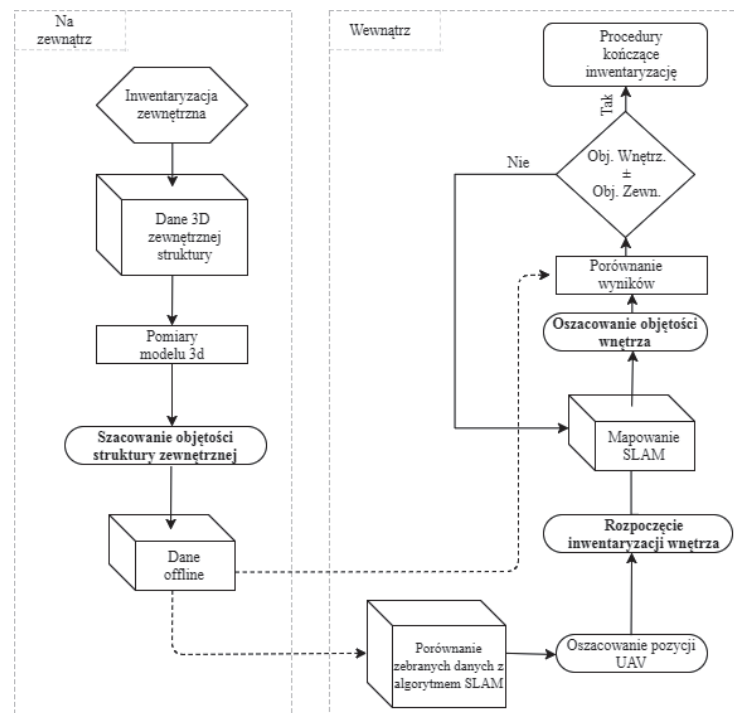
3. Autonomizacja inwentaryzacji

Pierwszym krokiem proponowanego algorytmu jest stworzenie zewnętrznego modelu 3D z zastosowaniem fotogrametrii. Uzyskana w ten sposób chmura punktów jest następnie przeliczana na reprezentację octomap [14]. Uzyskane w ten sposób drzewo ósemkowe (OT) reprezentujące badany obiekt zawiera informację hierarchiczną o zajętości przestrzeni 3D, przy czym korzeń drzewa jest opisany jako częściowo wypełniony. Inaczej mówiąc w korzeń drzewa wpisana jest cała bryła badanego obiektu. Kolejny poziom w zależności od kształtu bryły może zawierać puste sześciany. Pozostałe częściowo zajęte sześciany opisane są na następnych poziomach zagłębienia drzewa. Korzystając z własności drzew opracowano algorytm przeglądu zupełnego drzewa w celu oszacowania kubatury całkowitej bryły obiektu (OV). Szacowanie jest tym dokładniejsze im więcej poziomów zagłębienia zostanie wzięte pod uwagę. Rozmiar sześcianów w drzewie maleje w postępie potęgowym 2^n , gdzie n oznacza poziom zagłębienia drzewa. Przykładowo, jeżeli korzeń drzewa reprezentuje sześcian o boku 100m to na dziesiątym poziomie drzewa długość boku sześcianu wynosi: $ov=100*2^{-10}=0,097$. Zatem drzewo o dziesięciu poziomach zagłębienia pozwala reprezentować przestrzeń 3D z precyzją około 10cm. Kolejne trzy poziomy zwiększają precyzję do około 1cm. Jest ona wystarczająca do wstępnego ustalenia kubatury całkowitej obiektu. Algorytm szacowania OV polega na przeglądaniu octomapy za pomocą operatora iteracji liści. Przyniesiony poniżej fragment kodu ukazuje proces wykrywania zajętych przestrzeni poprzez wykonywanie iteracji drzewa ósemkowego:

```
ov = 0
for l in octree.iterate()
    if not l.hasLeafs()
        if l.isOccupied()
            ov = ov + l.getVolume()
        end
    end
end
if l.getLevel() == maxDepth
    if l.isOccupied()
        ov = ov + l.getVolume()
    end
end
end
```

Następny krok algorytmu inwentaryzacji polega na wykorzystaniu mapy 3D budowanej ad-hoc w czasie lotu UAV przez kolejne pomieszczenia. W oparciu o algorytm SLAM powstaje chmura punktów, która następnie jest analizowana i używana do uaktualnienia octomapy. Tak

tworzone jest drzewo reprezentacji wnętrza. W tym przypadku jest to osobne drzewo budowane dla reprezentacji przestrzeni wewnętrznej. Analogicznie do drzewa OT możliwa jest analiza zajętości przez iterację po liściach drzewa, jednak tym razem szacowana jest objętość przestrzeni pustej, która jest oznaczona jako "iv". Różnica między objętością zewnętrzną a objętością wewnętrzną powinna być zbliżona do objętości wszystkich przegród badanego obiektu. Diagram przedstawiony na rysunku 6 ukazuje zasadę działania opracowanego algorytmu. Jest on podzielony na dwa etapy pracy - na zewnątrz oraz wewnątrz. Traktowane są one jako dwa niezależne procesy. Ich wspólną częścią są dane pozyskane podczas fotogrametrycznego skanu zewnątrz. Są one przydatne zarówno przy procedurach porównawczych jak i w momencie lokalizacji UAV na początku inwentaryzacji wnętrza. Procesy bezpośrednio poprzedzające rozpoczęcie inwentaryzacji wnętrza są przeprowadzane wewnątrz jednostki UAV. Cały proces dąży do procedur kończących, które zależne są od programu sterującego jednostką.



Rys. 6. Schemat działania opracowanego algorytmu przedstawiony w formie diagramu
Źródło: Opracowanie własne.

Należy zaznaczyć, że objętość wszystkich przegród jest szacowana na podstawie precyzyjnego modelu 3D uzyskanego w pierwszym kroku inspekcji. Przy czym zakładamy, że istnieją tylko przegrody poziome i pionowe oraz, że grubości przegród danej klasy są w przybliżeniu jednakowe. Założenia te pozwoliły opracować algorytm, który samodzielnie podejmuje decyzję o zakończeniu eksploracji wnętrza obiektu na skutek uzyskania kompletności inspekcji. Zakończenie misji polega na autonomicznym powrocie do operatora. Misja kończy się również w przypadku wyczerpania baterii lub, gdy UAV nie znajdzie

możliwości przekroczenia przegrody pomimo tego iż estymacji różnicy objętości wskazuje na istnienie niezbadanych przestrzeni.

4. Wnioski

Połączenie fotogrametrii z techniką SLAM umożliwiło opracowanie procedury inspekcji 3D skomplikowanych obiektów architektonicznych. Procedura jest niemal w pełni automatyczna dzięki opracowaniu algorytmu sprawdzania kompletności materiału zdjęciowego, tworzono podczas przelotu i wykonywania zdjęć w czasie rzeczywistym. Opracowana procedura skraca czas wykonania inwentaryzacji, a dodatkowo skutecznie ogranicza błędy ludzkie, co skutkuje poprawą jakości zebranych danych.

Zaproponowana procedura wymaga prowadzenia dalszych prac badawczych, gdyż nie udało się jeszcze rozwiązać problemu zaliczania mebli i innego dużego wyposażenia wewnątrz do przestrzeni zajętej przez przegrody. Dalsze prace będą prowadzone w kierunku automatycznej segmentacji semantycznej sceny z wykorzystaniem głębokiego uczenia maszynowego (ang. deep learning). Liczymy, że rozpoznanie i prawidłowa klasyfikacja wykrytych obiektów wyeliminuje podstawowe źródło błędów w szacowaniu przestrzeni wolnej w pomieszczeniach.

Bibliografia

1. Achille, C., Adami, A., Chiarini, S., Cremonesi, S., Fassi, F., Fregonese, L., Taffurelli, L.: UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications— Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy). “Sensors”, 2015, No. 15, p. 15520–15539.
2. Bachrach, A., He, R., Roy, N.: Autonomous Flight in Unknown Indoor Environments. “International Journal of Micro Air Vehicles” 2009, No. 1, p. 217–228.
3. Chiabrando, F., Marenchino, D., Nex, F., Piatti, D., Rinaudo, F.: UAV systems for photogrammetric recording in archaeological areas: problems, suggestions, and products. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IX. 2009.
4. Davison, A.J., Reid, I.D., Molton, N.D., Stasse, O.: MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. “IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence”, 2007, No. 29, p. 1052–1067.
5. Eisenbeiss, H., Sauerbier, M.: Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. “The Photogrammetric Record”, 2011, No. 26, p. 400–421.

6. Fairfield N., Kantor G., Wettergreen D.: Real-Time SLAM with Octree Evidence Grids for Exploration in Underwater Tunnels."Journal of Field Robotics", 2007, No. 24.1- 2, p. 3-21.
7. Fruh, C., Zakhor, A.: 3D model generation for cities using aerial photographs and ground level laser scans. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001.
8. Hornung, A., Wurm, K.M., Bennewitz, M., Stachniss, C., Burgard, W.: OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. "Autonomous Robots", 2013, No. 34, p. 189–206.
9. Hähnel, D., Burgard, W., Thrun, S.: Learning compact 3D models of indoor and outdoor environments with a mobile robot. "Robotics and Autonomous Systems", 2003, No. 44, 15–27.
10. Kreuztal, A. G.: The Origin of the Term Photogrammetry. Photogrammetry Week'07, Wichmann Verlag, Heidelberg 2007.
11. Meagher D.: Geometric Modeling Using Octree Encoding. Computer Graphics and Image Processing, 1982, No. 19.1.
12. Quan, L., Lan, Z.: Linear N-point camera pose determination. "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence", 1999, No. 21, p. 774–780.
13. Surmann, H., Nüchter, A., Hertzberg, J.: An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments. "Robotics and Autonomous Systems", 2003, No. 45, p. 181–198.
14. Hornung A.: ROS wiki, <http://wiki.ros.org/octomap>, [ostatni dostęp 21.05.2017].