

## NOWE METODY SKANOWANIA 3D NA POTRZEBY INWENTARYZACJI GEOMETRYCZNEJ POJAZDÓW

### Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania techniki inżynierii odwrotnej w procesie konstrukcji i badania pojazdów. Opisano tok postępowania umożliwiający geometryczne odwzorowanie geometrii obiektu z procesu digitalizacji skanerem typu Mantis Vision, jako przykład przedstawiono fragment pojazdu. Wykonano również analizę dokładnościową w sali testowej WAT dla MV F5 , MV F5SR oraz skanera laserowego Trimble TX5.

### WSTĘP

W ostatnich kilkunastu latach pojawiło się zapotrzebowanie na rynku na indywidualizację oferty, szczególnie pod względem wytwarzania towarów o unikatowych właściwościach materiałowych, mechanicznych czy geometrycznych. Produkowane są nowe, innowacyjne towary dostosowywane od pierwszej fazy wytwarzania do życzeń wysublimowanych potrzeb użytkownika końcowego. [1] W technice proces ten nazywa się inżynierią odwrotną.

Obecne możliwości wykorzystania bezdotykowych metod trójwymiarowej inwentaryzacji geometrycznej umożliwiają realizację procesów modelowania 3D z wysoką precyzją i efektywnością. Perspektywy zastosowań szybkiego modelowania 3d są nieograniczone. Technologia ta jest niezwykle przydatna podczas aktualizacji i uzupełniania dokumentacji technicznej obejmującej wymiarowanie obiektu na potrzeby modernizacji lub produkcji [3]. Szczególnie wartościowe z punktu widzenia projektowania jest możliwość prowadzenia symulacji numerycznych zjawisk fizycznych zachodzących w obrębie konstrukcji pojazdów. Istnieje możliwość porównania złożonej geometrii z projektem lub dokumentacją CAD w celu weryfikacji tolerancji odchyleń czy sprawdzania cech geometrycznych [4].

Obecnie na rynku komercyjnym dostępne są różnego typu rozwiązania w większości oparte o technologię skanowania laserowego. Od 2012 roku komercyjnie dostępne jest również nowe narzędzie wywodzące się bezpośrednio z projektu realizowanego na potrzeby armii izraelskiej w latach 2008-2012. Ręczne, w pełni mobilne skanery MVP pracujące w oparciu o technologię światła strukturalnego stanowią poważną alternatywę dla wykorzystywanych obecnie narzędzi trójwymiarowej inwentaryzacji obiektów. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki testów weryfikujących jakość i efektywność tego typu skanerów, przeprowadzonych w Wojskowej Akademii Technicznej w 2014 roku.

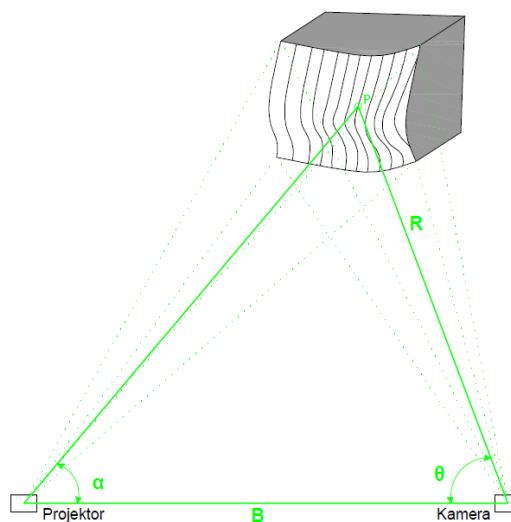
### 1. CHARAKTERYSTYKA RĘCZNYCH SKANERÓW MVP

Ręczne skanery Mantis Vision to linia lekkich i prostych w obsłudze skanerów 3D przeznaczona do wykonywania szybkich pomiarów obiektów trójwymiarowych o złożonej geometrii, głównie do celów inżynierii odwrotnej, np. badanie i konstrukcja pojazdów. W skład przenośnego zestawu wchodzi również współpracujący z nim kontroler wykorzystywany do sterowania procesem rejestracji danych pomiarowych

#### Mapowanie techniką światła strukturalnego

Wykorzystując dane wejściowe (struktura światła, obraz zarejestrowany przez kamerę, jej parametry kalibracyjne, kąt pomiędzy

kierunkiem projekcji, a kierunkiem odczytu) oraz równania matematyczne obliczane są współrzędne dla każdego piksela kamery (Rys. 1). Wynikiem pojedynczego pomiaru jest chmura punktów, których liczba jest uzależniona od rozdzielczości kamery.



Rys. 1 Metoda wyznaczenia współrzędnych w technice światła strukturalnego

Przedstawione zależności można opisać następująco:

$$\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{B}{\sin \varphi}$$

$$R = B \frac{\sin \theta}{\sin(\alpha + \theta)}$$

gdzie:

$\alpha$  - kąt pomiędzy wiązką światła emitowaną przez projektor a odcinkiem łączącym projektor z kamerą

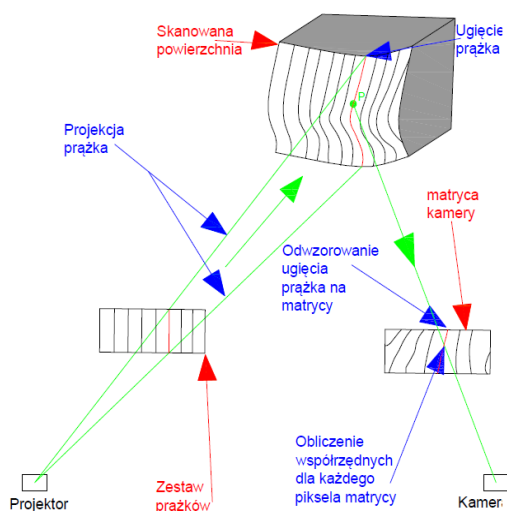
$\theta$  - kąt pomiędzy wiązką światła docierającą do kamery a odcinkiem łączącym projektor z kamerą.

$B$  - odległość pomiędzy kamerą a projektorem

$R$  - Odległość pomiędzy kamerą a powierzchnią przedmiotu mierzonego

Skanery wykorzystujące światło strukturalne powstały z inicjatywy zastąpienia jednego z aparatów w skanerze stereoskopowym przez aktywny element, jakim jest projektor lub laser (Rysunek 2).

Zastosowanie tego rozwiązania ułatwia wyszukiwanie odpowiadających sobie punktów obrazu, które dla pasywnych systemów stanowi poważny problem.



Rys. 2. Schemat działania skanera MVP

Skanery MVP realizują pomiar w oparciu o technologię światła strukturalnego oraz skanera laserowego. Działają na zasadzie tzw. epipolar coding - skaner rzutuje w zakresie widmowym bliskiej podczerwieni (808 nm) opatentowany wzór który, ulega on deformacji w zależności od krzywizny mierzonej powierzchni. Jednocześnie obiektyw kamery o znanych parametrach kalibracji wewnętrznej względem geometrycznego środka rzutnika, rejestruje obiekt wraz z rzutowanym na niego geometrycznym wzorem z prędkością 10 klatek na sekundę.

Skanery umożliwiają pomiar bez wcześniejszego przygotowania sceny, tzn. w odróżnieniu od obecnych na rynku rozwiązań nie ma konieczności stosowania fotopunktów w celu rejestracji modelu 3d. Pozwala to na zwiększenie efektywności pomiaru poprzez wyeliminowanie prac związanych z przygotowaniem obiektu do pomiaru.

Wynikiem pomiaru pojedynczej ramki (1/10 sekundy) jest chmura punktów o wielkości do 50 tys. punktów i rozdzielczości przestrzennej zależnej od odległości skanowania. Zasięg skanowania to 0,3 – 4,5 m.

Dodatkową możliwością urządzenia jest połączenie dwóch skanerów w system, który po wcześniejszym zsynchronizowaniu umożliwi pozyskiwanie danych na temat różnego rodzaju obiektów w postaci danych 4D, czyli uwzględnienie położenia punktów w czasie. Pozwala to na tworzenie filmów 3d.

### Przetwarzanie danych z pomiaru skanerem MVP

Po zakończeniu procesu skanowania (trwającego od kilku do kilkunastu minut), dane w formacie surowym należało zaimportować do oprogramowania dedykowanego skanerom MVP. Kolejną czynnością polegała na zamianie informacji o geometrii obiektu z postaci filmu 2D do postaci 3D, czyli chmury. Proces ten wykonywany jest automatycznie. W celu skrócenia czasu jego realizacji użytkownik może wybrać klatki, które zostaną pominięte w procesie przetwarzania, w celu skrócenia czasu realizacji procesu i odciążenia mocy obliczeniowej stacji roboczej.

Kolejny etap to łączenie pojedynczych chmur punktów z poszczególnych klatek w grupy. Istnieje możliwość wykonania tego procesu automatycznie bądź manualnie, poprzez ustalenie zakresu klatek przeznaczonych do łączenia. Następnym krokiem jest łączenie poszczególnych grup chmur punktów w jeden obiekt. Wykonuje

się poprzez manualne dopasowanie tych samych elementów z dwóch grup, drugim sposobem jest dopasowanie chmury punktów na trzy tzw. wspólne punkty, tj. poprzez wybór trzech par odpowiadających sobie punktów na każdym segmencie. Po wykonaniu tej czynności powstaje chmura punktów, z której można usunąć zbędne punkty w tym punkty odstające, będące szumem pomiarowym. Istnieją dwie możliwości ich eliminacji, poprzez określenie wartości błędu dokładności, bądź podanie wartości odległości względem początku układu współrzędnych.

Przedstawiona procedura rejestracji danych dotyczy jednego pliku wideo. W celu łączenia danych pochodzących z nagrań wykonanych niezależnie z różnych kierunków należy skorzystać z opcji. Nagrania z obszarami o wspólnym pokryciu wykorzystywane będą do orientacji poszczególnych skanów.

Rysunek 3 przedstawia fragment zeskanowanego pojazdu wojskowego. Celem realizacji pomiaru była potrzeba dostarczenia części zapasowych, wytworzonych na podstawie pomiaru obiektu (Rys. 4).



Rys. 3. Wynik skanowania fragmentu pojazdu wojskowego w postaci wysokorozdzielczej chmury punktów.



Rys. 4. Schemat działania skanera MVP

## 2. BADANIE DOKŁADNOŚCI

Na potrzeby badań przeprowadzono ocenę dokładności pozyskanych danych przy pomocy opracowanego testu przestrzennego. Elementy testu wykonane zostały z materiałów o różnych właściwościach refleksyjnych oraz kształtach (Rys. 5)

Ocena dokładnościowa polegała na porównaniu wartości odległości pomiędzy punktami charakterystycznymi testu. Elementy tablicy to zbiór próbek metalowych i drewnianych o znanych wymiarach, pomalowanych farbą matową oraz z połyskiem. Wykorzystano skrajne barwy (biel i czerń) ze względu na charakterystykę spektralną matrycy CCD badanego skanera pracująca w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR).



**Rys. 5** Jeden z elementów testu przestrzennego wykorzystywanego podczas pomiarów testowych.

W pierwszej kolejności dokonano pomiarów elementów tablic z wykorzystaniem suwmiarki. Następnie jako wartości referencyjne przyjęto obserwacje wyznaczone tachymetrycznie (z wykorzystaniem metod geodezyjnych i tachimetru precyzyjnego Leica TM30) pozwalające na realizację osnowy pomiarowej. Użyte metody i instrumentarium (pomiar odległości z dokładnością 0,6 mm + 1 ppm, kąta - 3'') pozwoliły na realizację osnowy referencyjnej z błędem średnim położenia punktu po wyrównaniu poniżej 0,003 m.

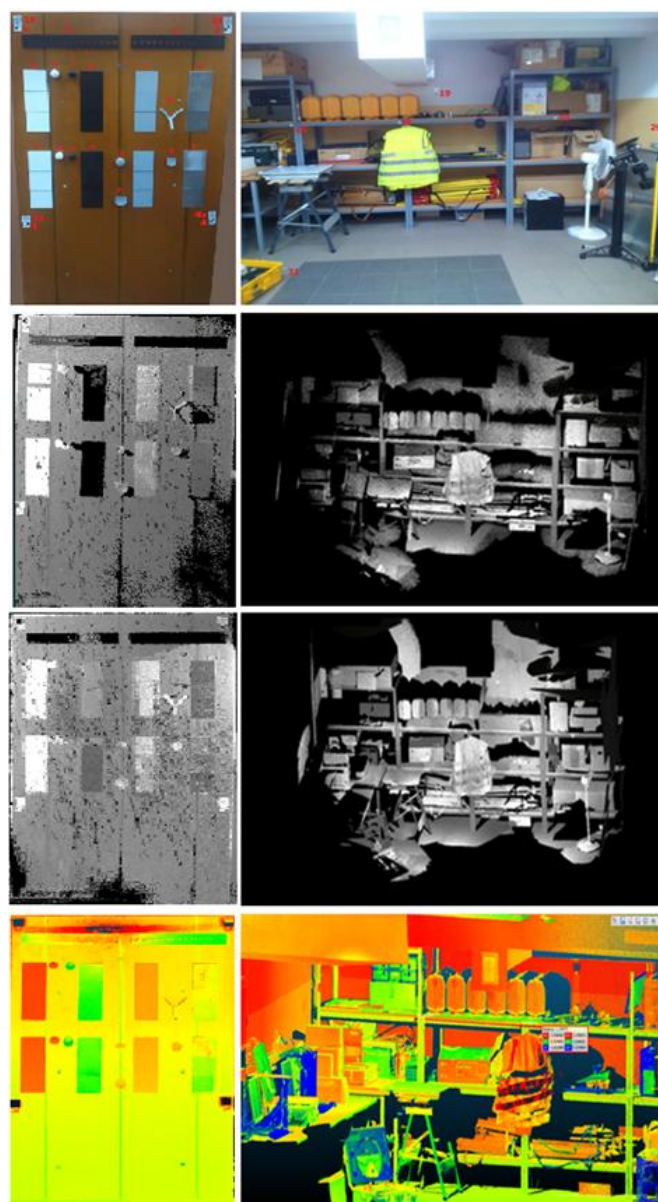
Kolejnym krokiem badania dokładności było przeprowadzenie skanowania laserowego z wykorzystaniem skanera laserowego Trimble TX5. Pomiar każdego elementu liniowego na skanie wykonano dziesięciokrotnie, średnią wartość przyjęto do dalszych wyliczeń. Wynik skanowania elementów dla oceny dokładności przedstawia rysunek 6.

### Analiza dokładnościowa wyników pomiarów

Dokładność chmur punktów pozyskanych w z wykorzystaniem różnych technik pomiarowych określono jako wartość różnicy pomiędzy wartością referencyjną (wyznaczoną tachymetrycznie) a otrzymaną w wyniku skanowania laserowego. Dokładności chmury punktów uzyskane ze skanerów bazujących na technice światła strukturalnego są porównywalne, nie przekraczają 4,2 mm. Dla skanera stacjonarnego wartość ta nie przekracza 5,9 mm. Analizę dokładności z określonymi wartościami różnic odległości dla poszczególnych skanerów przedstawia tabela 1.

**Tab. 1** Zestawienie wyników analizy dokładności testowanych narzędzie pomiarowych.

ANALIZA											
Przedział odległości - tablica [m]:						Przedział odległości - fotopunkty [m]:					
min		max				min		max			
0,0030		0,4140				0,8578		3,6687			
Skaner długiego zasięgu		Skaner krótkiego zasięgu		Skaner stacjonarny		Skaner długiego zasięgu		Skaner krótkiego zasięgu		Skaner stacjonarny	
min [m]	max [m]	min [m]	max [m]	min [m]	max [m]	min [m]	max [m]	min [m]	max [m]	min [m]	max [m]
0,0000	0,0034	0,0000	0,0032	0,0001	0,0044	0,0013	0,0042	0,0010	0,0033	0,0018	0,0059



**Rys. 6** Od góry: fotografia pola testowego; wynik skanowania skanerem światła strukturalnego MVP i MVP-SR; wynik skanowania skanerem laserowym Trimble TX5.

### PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań, można wnioskować, iż skanery typu Mantis Vision są dobrym rozwiązaniem do wykorzystania w procesie inżynierii odwrotnej. Umożliwiają przeprowadzenie szczegółowej digitalizacji obiektu, bez pozostawiania tzw. martwych pól. Co więcej zakres pracy ustalany jest przez użytkownika. Skaner stacjonarny umożliwia pomiar z jednolitą gęstością chmury punktów, w skanerach typu Mantis Vision, czynnik ten uzależniony jest od czasu naświetlania danego elementu. Im dłużej trwał pomiar obiektu tym otrzymana chmura miała więcej danych. Na dokładność pomiarów wykonywanych skanerem, oprócz klasy instrumentu i panujących warunków atmosferycznych, ma wpływ również rodzaj skanowanej powierzchni. Powierzchnie silnie odbijające (np. szkło) lub pochłaniające promieniowanie świetlne mogą utrudniać, lub nawet uniemożliwić wykonanie pomiarów skanerem, albo powodować powstawanie znacznych niedokładności. Użycie światła strukturalnego z zakresu podczerwieni w skanerach typu Mantis Vision pozwala zrekonstruować nawet bardzo słabo oświetlone sceny, natomiast czarne czy odbijające, gładkie powierzchnie mogą nie

zostać odtworzone ze względu na pochłanianie i rozpraszanie fali emitowanych przez promiennik. Skanery laserowe również działają w całkowitych ciemnościach, z powodzeniem mogą być stosowane w nieoświetlonych halach bądź górnictwie. Najnowsze naziemne skanery laserowe zbierają dodatkowo informację o kolorze punktu za pomocą zintegrowanej kamery. Znajduje to zastosowanie przy skomplikowanych inwentaryzacjach obiektów przemysłowych, architektonicznych. Taka własność pozostawia daleko w tyle inne, klasyczne urządzenia wykorzystywane w inżynierii odwrotnej. Urządzenia wykorzystujące światło strukturalne wypełniają lukę pomiędzy tanimi komercyjnymi skanerami o niewystarczającej precyzji, a tymi z wysokiej półki, których bardzo wysoka cena hamuje ich zastosowanie. Inżynieria odwrotna wymaga nie tylko wysokiej precyzji, ale również dokładnego geometrycznie odwzorowania kształtu. Systemy optyczne z uwagi na coraz niższe ceny elementów optoelektronicznych tj. kamery CCD oraz cyfrowego projektora stanowią konkurencję dla powszechnych technik skanowania laserowego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Abraham M., Three dimensional camera and projector for same. United States Patent Applications Publication no.US 2013/0250066 A1.
2. Małachowski Paweł, Płatek Paweł, Sybilski Kamil, Odwzorowanie geometrii obiekt wnętrza pojazdu z wykorzystaniem techniki inżynierii odwrotnej.
3. Mantis Vision Ltd. F5 3D Imaging System User Manual.
4. Praca magisterska, Piotrowska Wioletta, Wykorzystanie techniki światła strukturalnego w trójwymiarowej inwentaryzacji miejsca zbrodni, WAT, Warszawa, czerwiec 2015.
5. Strojny Piotr. Inżynieria Odwrotna w kontroli dokładności geometrycznej ramy bolidu klasy Formuła Standard.
6. Szal Mateusz, Herma Sławomir, Metodyka projektowania cyfrowych modeli produktów z wykorzystaniem wybranych technik inżynierii odwrotnej

## NEW METHODS FOR 3D SCANNING OF VEHICLES

### *Abstract*

*Summary: Paper presents the general concept of automation of the 3D scanning process based on structured light projection and laser scanning. The input data is a cloud of points representing the test object acquired through measurements. The work contains results of measurements of part room using MV F5. Presents options for using of reverse engineering in the design and testing of vehicles. The work contains results of measurements of automobile using MV F5. Described problems encountered during the process of digitizing data.*

Autorzy:

dr inż. **Maciej Wrona** – Wojskowa Akademia Techniczna; 01-319 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2; mwrone@wat.edu.pl

mgr inż. **Wioletta Piotrowska** – Wojskowa Akademia Techniczna; 01-319 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2; mwrone@wat.edu.pl