

Marlena Ziajka

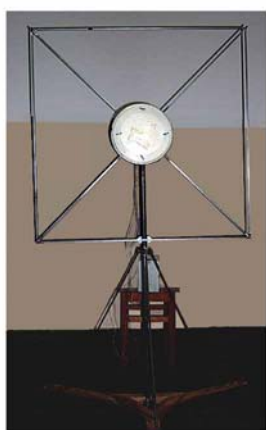
NOWE MOŻLIWOŚCI POMIARÓW OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH

Wspólną cechą opisanych poniżej metod jest pomiar konturów w płaszczyźnie poprzecznej: wyrobiska górniczego, tunelu, szybu, torowiska, budowli, czy urządzenia. Chcemy przybliżyć inżynierom budownictwa nowe metody pomiarowe, bowiem dynamiczny rozwój fotogrametrycznych metod pomiarowych zasługuje na uwagę i szersze wykorzystywanie – również w budownictwie.

1. Pomiary podziemnych przekroi metodą płaszczyzny światła

Warunki wykonywania pomiarów przekroi wyrobisk podziemnych określają przepisy górnicze i budowlane. Celem pomiarów jest dokumentowanie kształtu i wymiarów, pozwalające określić odchyłki projektowe przekrojów drążonego wyrobiska. Od tradycyjnej formy planu kreskowego, bardziej racjonalne może być utworzenie numerycznego modelu wyrobiska, poprzez przetworzenie wszystkich profili (wykonanych wzdłuż jego osi) do jednego układu współrzędnych. Z kolei dane takie można wykorzystać do wykreślenia mapy sytuacyjnej, określania odchyłek projektowych, obliczenia objętości wyrobiska, a w nawet śledzenia odkształceń [Szpetkowski, 1998].

Fotogrametryczne pomiary przekrojów wyrobisk podziemnych, można wykonywać w oparciu o zasadę fotogrametrii jednoobrazowej, przy wykorzystaniu urządzenia rzucającego na ocios „płaszczyznę światła” (*Rys.1.*). Silny snop światła rzuca lampa błyskowa, lub silna

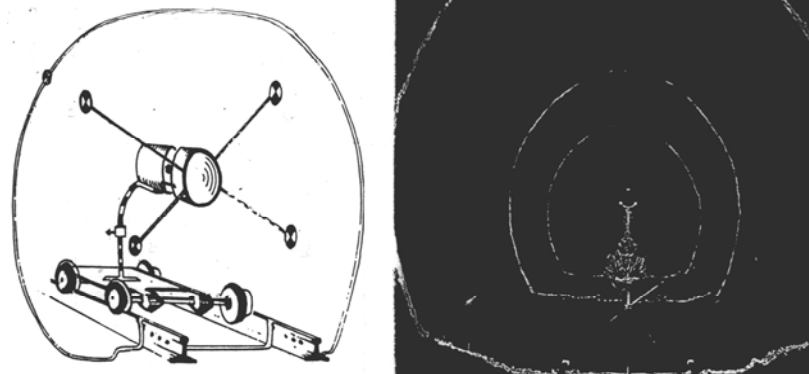


żarówka zamknięta w puszcze ze szczeliną, której płaszczyzna jest – w zależności od rodzaju wyrobiska – pozioma lub pionowa. Do tej płaszczyzny powinna być równoległa – zgodnie z zasadą fotogrametrii jednoobrazowej – płaszczyzna ramki tłowej kamery. Jeżeli taką nie jest, powinna być do tej postaci przetworzona rzutowo. Może to być osiągnięte na drodze fotomechanicznej – o takim rozwiązaniu jest mowa w podrozdziale 1.1., albo cyfrowo – jak to opisano w podrozdziale 1.3.

Rys.1. Urządzenie rzucające na ocios „płaszczyznę światła” opracowane w Zakładzie Fotogrametrii AGH (projekt: J. Bernasik, wykonanie: Z. Starek): w okrągłej puszcze umieszczona jest silna żarówka, której światło przez szczelinę jest widoczne jako przekrój pionowy na ociosie wyrobiska. Cztery sygnaliki stanowią podstawę rzutowego przetworzenia sfotografowanego obrazu.

1.1. Sposób analogowy.

Przetworzenie zarejestrowanego fotograficznie świetlnego zarysu przekroju wyrobiska (*Rys.2.*) może być wykonane w przetworniku fotomechanicznym (rozbudowany powiększalnik). Doprowadzony do określonej skali rysunek przekroju wyrobiska może zostać skopiowany na papierze fotograficznym, ale częściej bywał po prostu zrysowywany (w ciemni), aby móc porównać kształt i wymiary rzeczywiste z projektowymi. Takie postępowanie stosowano w przeszłości [Gutu, Tolea, 1988].

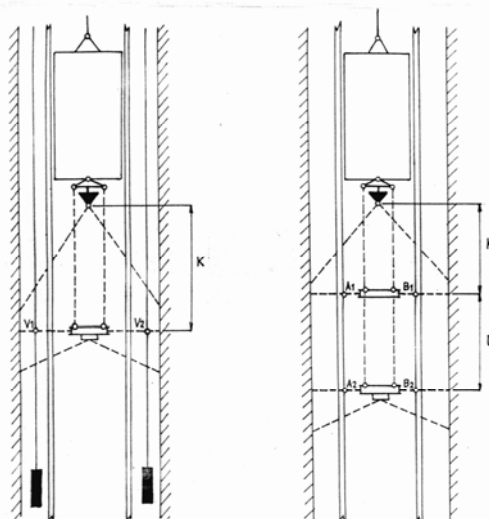


Rys.2. Rejestracja pionowego przekroju podziemnego korytarza metodą płaszczyzny światła; widoczne 4 sygnały stanowią podstawę rzutowego przekształcenia obrazu. [wg E. Gutu, A. Tolea]

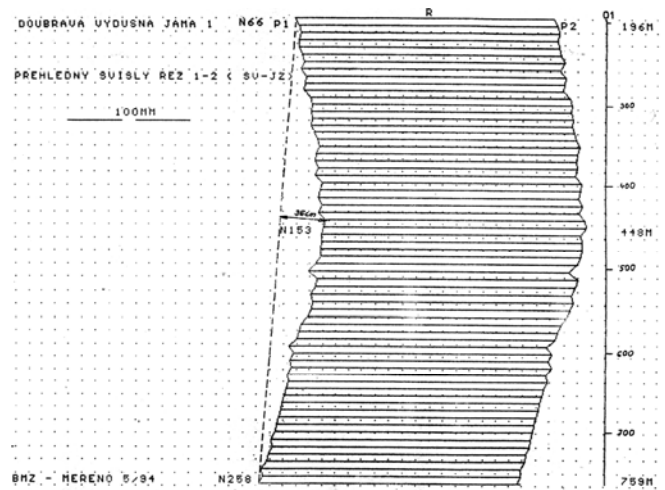
Średnie błędy wyznaczenia tą metodą odcinków na przekroju o rozmiarach 3m x 4m, ze zdjęć w skali 1:100, przy opracowaniu graficznych wykonanym w skali 1: 25, mieściły się w granicach +/- 20mm,

1.2. Sposób analityczny.

W czeskich kopalniach stosowany jest z powodzeniem sposób „płaszczyzny światła” ale sfotografowany przekrój jest precyzyjnie mierzony (do 0,001mm) zaś analityczna obróbka wyników została zautomatyzowana [Gavlovsky, 1999]. Do fotografowania stosuje się adaptowaną kamerę lotniczą, rejestrując na zdjęciach nie tylko przekrój poziomy ociosu, ale także widoczne na zdjęciach prowadniki szybowe; druty zawieszonych pionów stanowią układ odniesienia (Rys.3.). Precyzyjny pomiar fotogramów jest wykonywany na monokomparatorze Ascorecord, zaś obliczenia szukanych odchyłek od położenia normatywnego (kołowość przekroju, pionowość rury szybowej i poprawne ustawienie prowadników klatki szybowej) i pozwala opracować graficznie (Rys.4.) specjalny program.



Rys.3. Rejestracja przekroju rury szybowej metodą płaszczyzny światła; widoczne są prowadniki klatki szybowej, pionowe druty i ocios, oraz podwieszona kamera; na rysunku lewym oświetlany jest tylko jeden przekrój a na prawym – dwa równocześnie. [wg E. Gutu, A. Tolea]



Rys.4. Graficzne opracowanie wyników pomiaru rury szybowej - odchylenia pionowe. [wg E. Gutu, A. Tolea]

1.3. Cyfrowa metoda rejestracji i przetworzenia zarejestrowanego obrazu przekroju.

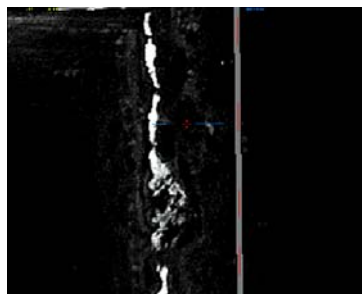
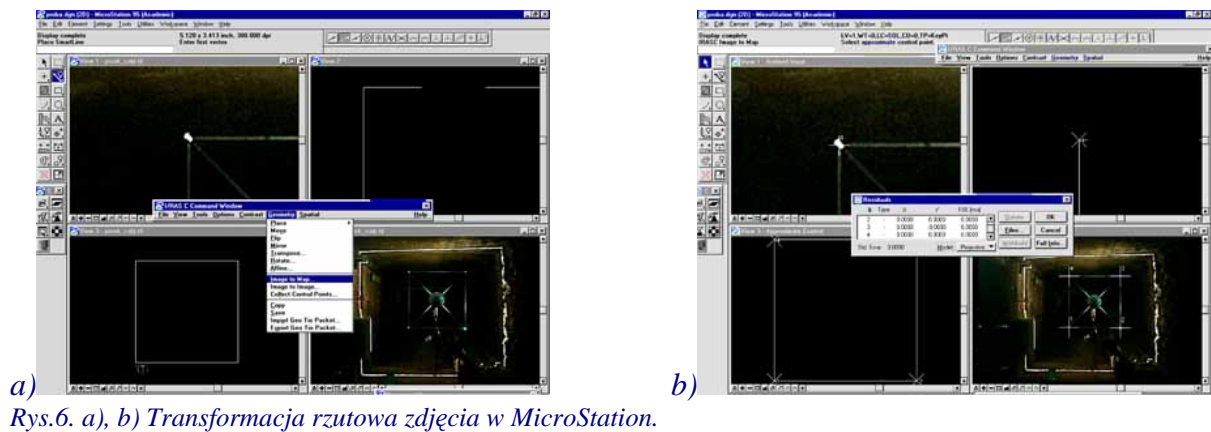
Opisana idea rejestracji i przetwarzania obrazów przekroi podziemnego wyrobiska (przy wykorzystaniu „płaszczyzny światła”) stwarza nową jakość przy zastosowaniu fotogrametrii cyfrowej. Powyżej opisane metody pomiaru przekrojów podziemnych dawały zadawalające wyniki, jednak wiązały się z długotrwałymi pracami kameralnymi. Celem udoskonalenia pomiarów, analogową kamerę metryczną, zastąpiliśmy kamerą cyfrową. Rejestrację taką kamerą można wykonać w pełni automatycznie, lub wprowadzić własne parametry fotografowania. Ze względu na specyficzne warunki – zdjęcie wykonuje się w ciemności a jedynym źródłem światła jest żarówka, zamknięta w metalowej puszcze ze szczeliną, rzucająca smugę światła na chodnik kopalni – wskazane jest określenie kilkusekundowego czasu naświetlania.

Próby pomiarowe przeprowadzono w kopalni doświadczalnej AGH w Krakowie. Urządzenie, które rzuca na ocios płaszczyznę światła przedstawiono na *Rys. 1*. Widoczna na zdjęciu ramka ma znane długości ramion, a tym samym określone współrzędne czterech wierzchołków w przyjętym układzie odniesienia. Zamontowana przy stojaku libelka umożliwia ustawienie urządzenia w pionie. Zdjęcia zarejestrowano przy użyciu kamery cyfrowej KODAK DC260. Światłoczuła matryca CCD gwarantuje maksymalną rozdzielczość rzędu 1536 x 1024 pikseli. Zastosowany obiektyw daje możliwość zmiany ogniskowej (w zakresie 38mm – 115mm). Aparat rejestruje zdjęcia w formacie *JPEG*.

Urządzenie oraz kamerę ustawiono na osi chodnika. Zdjęcie wykonane zostało bez znajomości elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej. Tak wykonany obraz (*Rys.5a.*) nie spełniał warunków geometrycznych fotogrametrii jednoobrazowej, więc należało go przetworzyć rzutowo, w oparciu o znane współrzędne naroży ramki, wyraźnie odfotografowane na zdjęciu. Do tego celu wykorzystaliśmy program MicroStation, a dokładnie jego nakładkę – *IrasC* (funkcja *Image to Map*) (*Rys.6.*).



Na tak przygotowanym zdjęciu (*Rys.5b.*) można było wykonać pomiary przekroju poprzecznego chodnika; pomierzaliśmy zdjęcie na autografie cyfrowym VSD, co pozwoliło na uzyskanie współrzędnych mierzonych punktów bezpośrednio w przyjętym układzie odniesienia. Innym rozwiązaniem jest (jeszcze w MicroStation) wektoryzacja profilu. Wyniki mogą być prezentowane w postaci współrzędnych określonych punktów, bądź też wartości odchylek od przekroju teoretycznego w mierzonych punktach (*Rys.7.*). Możliwy jest również bezpośredni wydruk w dowolnej skali z MicroStation, odfotografowanego rzeczywistego przekroju wraz z nałożonym jego teoretycznym kształtem, jak przykładowo pokazano na *Rys.8.*



Rys.7. Przykład pomiaru odchyłki przy wykorzystaniu VSD (linia czerwona – przekrój teoretyczny, linia niebieska – różnica między przekrojem teoretycznych a pomierzonym)



Rys.8. Na mierzonym zdjęciu czerwoną linią oznaczono teoretyczny przekrój chodnika.

Idea pomiaru przekroji podziemnych przy zastosowaniu „płaszczyzny światła” da się w przyszłości efektywnie (i efektywnie) rozwinąć przy zastosowaniu fotogrametrii cyfrowej. Rejestracja cyfrową kamerą współpracującą on-line z odpowiednio oprogramowanym notebookiem (MicroStation, VSD) umożliwi określanie odchyłek projektowych – pomiędzy projektową skrajnią – wizualizowaną jako „warstwa tematyczna” VSD a obrazem wydrążonego przekroju tunelu (czy wyrobiska). Dalszym rozwinięciem tej koncepcji może być rejestracja kamerą video – z jadącego „pociągu”: w trakcie ciągłej rejestracji przekroji wyrobiska cyfrową kamerą video, system śledzący będzie informować o miejscach występowania i rozmiarach odchyłek projektowych, zaś siedzący przy laptopie operator będzie informować o tym budowniczych.

2. Zastosowanie skanera laserowego

Rozwój techniki w ostatnich latach znajduje swoje odzwierciedlenie również w tworzeniu instrumentów pomiarowych, dających coraz wyższe dokładności. Fotogrametria cyfrowa, jak wykazaliśmy wcześniej, zdaje się być bardzo dogodnym rozwiązaniem dla wykonania pomiarów przekrojów podziemnych. Warto też wspomnieć o bardzo popularnych ostatnio skanerach laserowych – instrumentach, o których wiele się mówi ze względu na wszechstronność zastosowania, wysoką dokładność (i niestety równie wysoką cenę). Zanim zaprezentujemy możliwości zastosowania skanerów laserowych, przedstawimy ogólną zasadę ich działania. Skanery laserowe (Rys.9.) służą do bardzo szybkiego, zdalnego pozyskiwania danych przestrzennych. Pracują, wykorzystując laser impulsowy zintegrowany z kamerą cyfrową i komputerem. Obecnie dają one dokładne wyniki przy odległościach od obiektu w zakresie 0.5m - 100m. [www.cyra.com]



Rys. 9. Najnowszy skaner laserowy firmy Leica - Cyrex 2500.[www.leica.com]

Jeżeli chodzi o czas trwania pomiaru, zależy on od wielkości obiektu oraz wymaganej dokładności (szczegółowości) pomiaru. Skanery dają możliwość pomiaru około 1000 punktów na sekundę, są więc niezwykle szybkim narzędziem do pozyskiwania danych. Nie mają specjalnych wymagań, co do warunków oświetleniowych ani pogodowych, więc

pomiary mogą być wykonywane zarówno w dzień, jak i w nocy. Dokładność pomiarów podaje *Tab.1*.

Wyniki pomiarów dostarczane są w postaci gęstej „chmury punktów” obiektu o dokładnie znanych współrzędnych. Dane pomiarowe mogą być dowolnie modelowane i przetwarzane, w zależności od potrzeb i wymagań, przy użyciu oprogramowania dostępnego wraz ze skanerem. Możliwy jest też eksport do formatu *DXF*, celem dalszej ich obróbki, w zależności od założeń wykonywanego projektu.

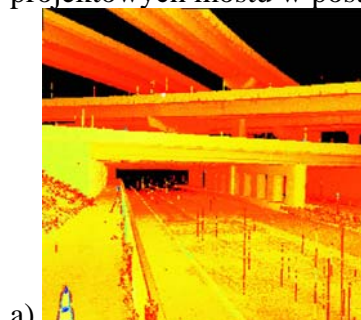
Efektom finalnym może być gładki, barwny model 3D mierzonego obiektu lub dowolny jego rzut 2D.

PARAMETRY SKANERA CYRAX 2500	
Dokładność pomiaru odległości	+/- 6 mm
Dokładność pomiaru kątów	+/- 12''
Szybkość skanowania:	1000 punktów / sekundę
Zasięg	> 200 m
Pole widzenia (H, V)	40 °
Średnica plamki lasera	6 mm

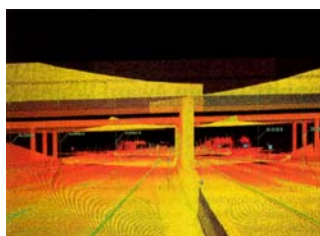
Tab.1. Charakterystyka techniczna jednego ze skanerów laserowych, podana przez producenta.[www.cyra.com]

Żeby omówić o możliwości wykorzystania skanerów do pomiarów przekrojów inżynierskich, należy najpierw zdać sobie sprawę jakie są możliwości ich wykorzystania do różnego typu pomiarów oraz jaka jest postać danych pomiarowych i możliwości ich opracowania. Spośród szerokiej gamy zastosowań skanera laserowego wymienimy kilka przykładów wykorzystania go w budownictwie oraz geodezji inżynierskiej [www.cyra.com]:

- **Pomiary inwentaryzacyjne mostów.** Wspomnieć tutaj należy o zaletach fotogrametrycznych wyznaczania odkształceń konstrukcji: możliwość pozyskania informacji w tym samym momencie na zdjęciu, różnicowy sposób pomiaru zdjęć wykonanych w pewnych odstępach czasu, szybki i prosty sposób wyznaczanie odchyłek konstrukcyjnych mostu. Wszystkie te zalety ma również metoda skaningu laserowego. Dodatkowym atutem jest możliwość szybkiego pozyskania informacji o geometrii skanowanego obiektu i utworzenie rysunków projektowych mostu w postaci cyfrowej – *Rys.10*.



a)

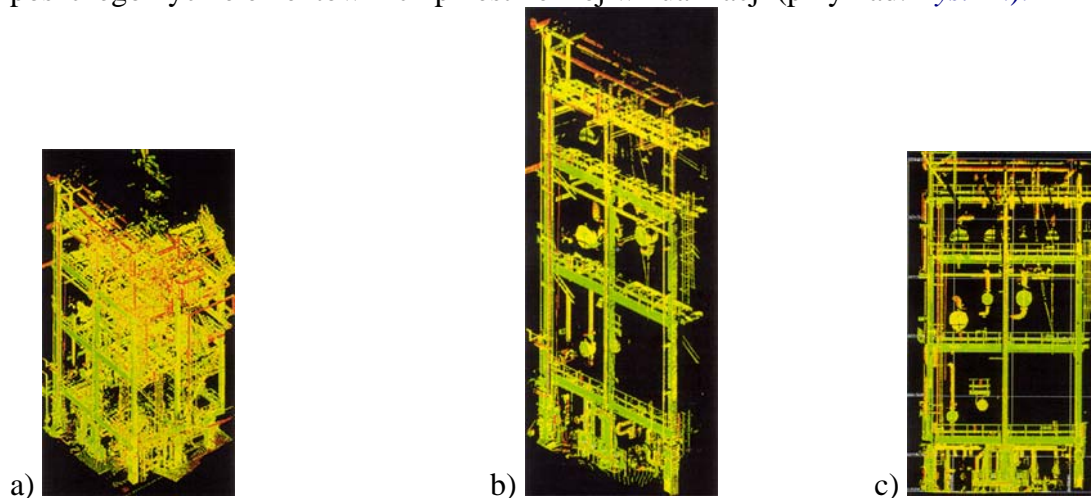


b)

Rys.10. a), b) - Przykłady danych pomiarowych uzyskanych ze skanera laserowego, dla pomiarów inwentaryzacyjnych mostu na jednej z autostrad w Nebrasce. Zbiór punktów wygląda jak zdjęcie obiektu, a dodatkowo jest to zbiór dający informacje przestrzenne dla każdego punktu.[www.cyra.com]

- **Tworzenie modeli 3D obiektów o skomplikowanej konstrukcji.** Dane, pozyskane jako „chmury punktów”, konwertowane są w obiekty geometryczne, a w efekcie w konkretne elementy konstrukcyjne. Tak wykonany, końcowy model konstrukcji obiektu daje dokładne

informacje o jego geometrii przestrzennej oraz możliwość szybkiego pomiaru poszczególnych elementów i ich przestrzennej wizualizacji (przykład: *Rys.11.*).



Rys.11. Przykład wyników pomiarów jednostki produkcyjnej fabryki: a) widok 3D; b) widok przekroju jednostki; c) rzut 2D posiadający skalę, z układem współrzędnych płaskich i wysokościowych. [www.cyra.com]

- **Pomiary rurociągów.** Pomiar skanerem wzdłuż rurociągu dostarczy zbiory danych do wygenerowania dokładnej, kartometrycznej jego struktury. Dane 3D otrzymane bezpośrednio ze skanera posłużą do utworzenia dokumentacji obiektu i dadzą możliwość wizualizacji wybranego fragmentu przestrzennie bądź też w rzucie 2D.

- **Pomiary pod projekty poszerzenia lub modernizacji dróg.** W przypadku modernizacji dróg aktualnie użytkowanych, tradycyjne metody pomiarowe wymuszają wstrzymanie ruchu samochodowego na czas trwania prac. Wykorzystanie skanera laserowego nie powoduje takiej konieczności.

- **Obliczanie objętości obiektów.** Zastosowanie skaningu laserowego do tego typu zastosowań daje bardzo zagęszczoną siatkę punktów, w porównaniu z tradycyjnymi metodami pomiarowymi, co znacznie podnosi dokładność dalszych analiz. Ogromnym atutem jest możliwość automatycznego opracowania wyników pomiarów jeszcze na stanowisku pomiarowym, co daje natychmiast wartości objętości nasypów ziemi czy brył skalnych, pozwalając na bieżąco nadzorować i korygować prace budowlane.

- **Tworzenie wysokościowego modelu terenu.** Można sobie wyobrazić, jak bardzo zastosowanie metody skaningu laserowego obniży nakład czasu i pracy, a jednocześnie podniesie dokładność wykonywanych pomiarów. W przypadku, gdy mierzony obszar jest trudnodostępny (teren skalisty) lub dostęp jest wręcz niemożliwy (teren bagnisty), zastosowanie skanera laserowego zdaje się być doskonałym rozwiązaniem

Można pokusić się o stwierdzenie, że zastosowanie laserów w budownictwie i geodezji otwiera nowe możliwości wykonywania pomiarów terenowych. Podstawową zaletą metody skanowania laserowego jest pomiar całej powierzchni obiektu z bardzo wysoką rozdzielczością. Dane pozyskiwane są w czasie rzeczywistym, umożliwiając uzyskanie współrzędnych przestrzennych dowolnego punktu, oraz modelowanie i odtwarzanie obiektów 3D. Bezpośredni wynik pomiaru obiektu dostarcza tak dokładnych i szczegółowych informacji na temat jego konstrukcji, jak zdjęcie, z tą różnicą, że dodatkowo daje obraz trójwymiarowy. Dane pomiarowe stanowią cenny materiał do przeprowadzania licznych analiz: porównanie z modelem teoretycznym, wymiarowanie, dowolne przekroje, rzuty itp. Instrumenty te mają wszechstronne zastosowania; od wymienionych w niniejszym artykule, przez szeroko rozumianą obsługę budowli, po medycynę, archeologię, architekturę i sztuczne widzenie.

Analizując ogólny zarys sposobu pomiaru przekroji podziemnych i mając na myśli nowoczesne instrumenty pomiarowe, można się zastanowić nad wykorzystaniem ich do podobnych zastosowań (np. tyczenie tuneli drogowych, kolejowych, kopalnianych, szybów, itp.), gdzie niezbędne jest wyznaczenie przekroji poprzecznych. Wykorzystanie pomiarów laserowych, bezzwierciadlanych umożliwiłoby wyznaczenie dokładnego przekroju, bez ograniczania liczby mierzonych punktów.

Sam pomiar wykonywany jest bardzo szybko, a wyniki są dostępne niemal natychmiast na stanowisku pomiarowym. Nie ma tutaj problemu oświetlenia mierzonych elementów, gdyż pomiar skanerem laserowym nie jest uzależniony od oświetlenia. Instrument pomiarowy może zostać umieszczony na dachu pojazdu, a pomiar wykonywany ze stanowisk odległych od siebie o określoną długość, dając wyniki w czasie rzeczywistym. Może to być wygodne przy pracach związanych z budową tuneli, gdyż pozwoli na bieżąco korygować miejsca odstępstw od przekroju projektowego.

Przy odpowiednim rozmieszczeniu stanowisk pomiarowych możliwe będzie również utworzenie przestrzennego modelu tunelu czy wyrobiska. A to z kolei pozwoli na stworzenie map 3D.

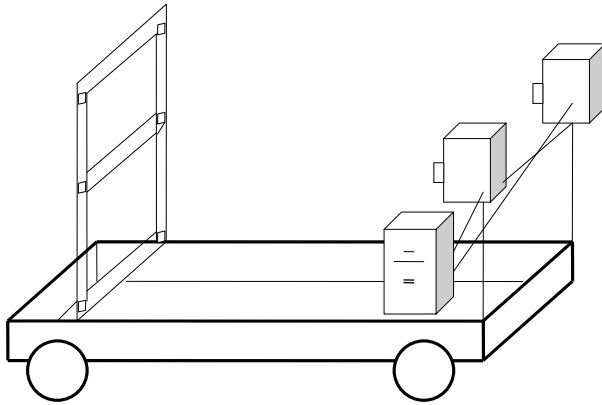
Opisany sposób pomiarów zdaje się być bardzo dobrym rozwiązaniem. Jedyne problemy stanowią ich dokładności. Należałoby więc na wstępie przeprowadzić testy dokładnościowe instrumentu, żeby stwierdzić czy uzyskane wyniki są zadowalające.

3. Pomiary skrajni kolejowej metodą fotogrametrii cyfrowej¹

Opisywany system fotogrametryczny jest składnikiem systemu pomiarowego, który ma służyć do kontrolowania skrajni kolejowej, czyli minimalnej, bezpiecznej odległości obiektów od toru kolejowego. Skrajnię kolejową stanowi okalająca tor odpowiednia linia łamana, usytuowana prostopadle do osi toru. W trakcie pomiaru określa się przestrzenne współrzędne punktów znajdujących się zbyt blisko toru kolejowego.

Pomiar jest oparty o wykorzystanie dwóch kamer cyfrowych zainstalowanych na specjalnej platformie (rys. 12). Zdjęcia (lekko zbieżne) są wykonywane synchronicznie, a zarejestrowane obrazy są przetwarzane komputerowo. „Współrzędne ekranowe” pomierzonych punktów są przetwarzane i wykorzystywane do fotogrametrycznego wcięcia w przód.

¹ Tekst oparto o opracowanie: R. Tokarczyk, S. Mikrut, M. Huppert: Fotogrametryczny cyfrowy system bliskiego zasięgu dla pomiaru skrajni kolejowej. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. Vol. 10. Kraków 2000



Rys. 12. Schemat systemu pomiarowego skrajni kolejowej: 2 kamery cyfrowe, komputer i rama z zaznaczonymi punktami dostosowania.

Opracowanie obrazów cyfrowych obejmuje:

- wczytanie zdjęć – są one wyświetlane na połówkach ekranu monitora komputerowego
- pomiar punktów za pomocą myszki komputerowej,
- orientację wzajemną i absolutną zdjęć,
- wyświetlenie obrysu skrajni, pozwalające określić, czy analizowany obiekt znajduje się zbyt blisko toru.

Pracę rozpoczyna wczytanie pary zdjęć. Wizualizowane są one na połówkach ekranu komputerowego a do pomiaru wykorzystywana jest mysz komputerowa. Po wskazaniu na stereogramie punktu, co do którego istnieje obawa o niedopuszczalną bliskość toru, wyświetlany jest zarys skrajni pozwalający na odpowiednią kwalifikację punktu.

Przeprowadzone pomiary na polu testowym wskazują na możliwość osiągnięcia dokładności na poziomie 1 mm; wymagana dokładność określenia punktów skrajni (1 cm) jest zatem zapewniona.

Metoda szybkiego (w czasie „prawie rzeczywistym”) wymiarowania przekroji obiektów znalazła zastosowanie przy ocenie gabarytów pojazdów przewidzianych do załadunku na platformy kolejowe.

Bibliografia

- [1] Gavlovsky E.: *Single – image photogrammetric method of vertical working – present situation and future options*. Zeszyty Naukowe Polit. Śląskiej, s. Górnictwo. Z. 239, Gliwice 1999
- [2] Gutu E., Tolea A.: *Photogrammetric Monitoring of the Structural Elements of the Deformation at the Railway Tunnels Using the Interactive Processing Systems”* *Photogrammetric monitoring of the structural elements of the deformation at the railway tunnels using the interactive processing systems*. International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing. Kyoto 1988
- [3] Szpetkowski S.: *Pomiary deformacji na terenach górniczych*. Wydawnictwo SŁĄSK. Katowice 1998.
- [4] – Internet – www.cyra.com.
- [5] – Internet – www.leica.com.
- [6] – Norma budowlana PN-G-06002 „*Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe*” 1997.

[7] – Ziajka M. „*Nowe możliwości szybkich pomiarów obiektów inżynierskich*” Magazyn Geodeta (w druku).