

Rafał Gawalkiewicz\*

## OKREŚLENIE CHARAKTERYSTYK DOKŁADNOŚCIOWYCH WYBRANYCH INSTRUMENTÓW LASEROWYCH\*\*

---

### 1. Wstęp

Od momentu skonstruowania w latach 60. XX w. [6] pierwszych urządzeń laserowych do dziś udokumentowano szereg praktycznych zastosowań tego wynalazku w wielu dziedzinach życia, w tym również geodezji. Gwałtowny rozwój geodezyjnych technik pomiarowych, jaki odnotowano w latach 90. ubiegłego stulecia, był wynikiem wdrażania coraz nowszych rozwiązań wskaźników, pionów i dalmierzy laserowych, które obecnie zdominowały rynek sprzętu geodezyjnego.

Począwszy od skonstruowania prostych dalmierzy laserowych pracujących zarówno w zakresie światła widzialnego (plamki), jak i w podczerwieni, działających początkowo jako całkowicie odrębne urządzenia służące do pomiaru odległości, czołowi producenci szybko wprowadzili na światowe rynki instrumenty zintegrowane, łączące w sobie funkcje przyrządów kątomierzowych i dalmierzowych (laserowych), czego przykładem są tachimetry elektroniczne klasy total station. Ostatnia dekada XX wieku stanowi potwierdzenie rozwoju technik pomiarowych w kierunku maksymalnego wykorzystania urządzeń laserowych w precyzyjnych pracach geodezyjnych. Konstruktorzy skupili swą uwagę na stworzeniu instrumentów w pełni zautomatyzowanych, w których wpływ czynnika ludzkiego na uzyskiwane wyniki pomiarów byłby ograniczony do minimum lub wyeliminowany całkowicie poprzez zastosowanie specjalnych napędów, tzw. serwowatorów. Już dziś elementy te stanowią „serca” wielu modeli zmotoryzowanych stacji roboczych czy też panoramicznych skanerów laserowych. Tak narodziła się idea skanowania laserowego, która wykorzystując technologię pomiarów klasycznych – metodę biegunową, pozwala w krótkim czasie pozyskiwać wielomilionowe dane w formie „chmury punktów”, z których każdy posiada określone współrzędne przestrzenne  $X$ ,  $Y$ ,  $H$ . Dostępne na rynku specjalistyczne oprogramowanie dystrybuowane przez producentów tego właśnie sprzętu laserowego, a także ogólnie dostępne programy środowiska CAD-owskiego umożliwiają łatwą obróbkę danych (np. transformację, filtrację), ich przetwarzanie oraz wizualizację końcowych efektów. W praktyce droga od

---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

\*\* Pracę wykonano w ramach projektu nr 5 T 12E 031 24

momentu wdrożenia produktu do poznania instrumentu poprzez określenie pełnej charakterystyki dokładnościowej jest długa i wymaga przeprowadzenia szeregu badań zmierzających do ustalenia rzeczywistych dokładności przyrządu oraz możliwości jego wykorzystania do konkretnych prac pomiarowych. W chwili obecnej pęd człowieka do pozyskiwania istotnych danych o środowisku (wykorzystywanych przez specjalistów wielu branż) sprawia, że kompleksowe pomiary geodezyjne zyskały na znaczeniu, zaś samej geodezji stawia się nowe cele. Z tego też powodu producenci sprzętu geodezyjnego wprowadzają instrumenty wysokiej jakości, funkcjonalne, pracujące w różnych warunkach środowiska, o wysokiej wydajności pracy, a przy tym niedrogie. O ile zachowanie warunku wysokiej jakości realizacji prac (dużej dokładności pomiaru) oraz możliwości pozyskiwania ogromnej ilości danych w krótkim interwale czasowym jest zagwarantowane już dziś przez wielu producentów, o tyle koszty zakupu tej specjalistycznej aparatury pomiarowej (zaliczanej do tej z „najwyższych półek cenowych”) są często bardzo wysokie. Tak jest w przypadku zmotoryzowanych stacji roboczych (klasy *total station*) czy też skanerów laserowych, które coraz częściej wykorzystuje się w bardzo złożonych pracach realizacyjnych nowoczesnych i skomplikowanych budowli, ale także przy inwentaryzacji obiektów o charakterze zabytkowym w procesie ich rewitalizacji (także górniczych).

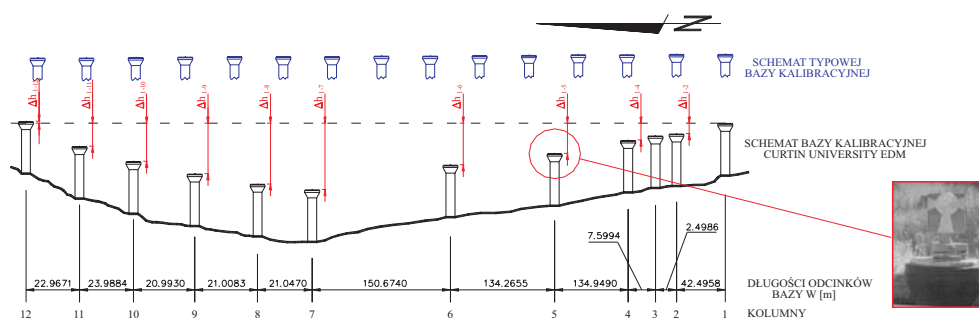
Z powodu obawy przed konkurencją sprzedawane instrumenty pozbawione są szczegółowych dokumentacji technicznych. Tak jest i w przypadku skanera laserowego Callidus firmy Callidus Precision Systems GmbH (CPS) w Halle z Niemiec. Parametry dokładnościowe skanera dotyczą tylko odchylenia standardowego pomiaru odległości dalmierzem wbudowanym w głowicę pomiarową. Zastosowanie dalmierza pracującego w paśmie światła podczerwonego (906 nm) gwarantuje pełne bezpieczeństwo dla użytkowników skanera oraz osób przebywających w zasięgu jego pracy. W praktyce ma to znaczenie zwłaszcza w górnictwie, gdyż wyłączenie z ruchu inwentaryzowanych wyrobisk podziemnych jest często niemożliwe z uwagi na specyfikę kopalni.

Niniejsze opracowanie ma na celu przybliżenie czytelnikowi charakterystyki testowanych instrumentów laserowych, tj. panoramicznego skanera laserowego Callidus (firmy Callidus Precision Systems GmbH z Halle – Niemcy) oraz instrumentu uzupełniającego prace badawcze – bezzwierciadlanego tachimetru laserowego TCR 303 (firmy Leica Geosystems – Szwajcaria). Badania przeprowadzono w komparatorium wydziałowym AGH, zaś ich głównym celem było wyznaczenie dokładności pomiaru długości do ruchomej tarczy-bazy oraz sprawdzenie dokładności orientacji sytuacyjno – wysokościowej skanera do wybranych pryzmatów referencyjnych.

## **2. Przygotowanie pola testowego dla określenia charakterystyk dokładnościowych dalmierzy laserowych wbudowanych w tachimetr elektroniczny TCR 303 Leica oraz w skaner laserowy Callidus**

W światowej literaturze technicznej dotyczącej testowania dalmierzy możemy spotkać się z wieloma konstrukcjami baz testowych. Większość tradycyjnych linii badawczych składa się z szeregu słupków pomiarowych (rozieszczonych wzdłuż odcinka prostoliniowego),

wieńczonych metalowymi głowicami. Wyposażenie głowic w czopy (śruby), umożliwiające wymuszone centrowanie instrumentu nad punktem, zwiększa dokładność pomiarów liniowych (eliminacja błędu centrowania). Zazwyczaj klasyczne bazy testowe zbudowane są tak, aby głowice punktów badawczych leżały w jednej płaszczyźnie poziomej, choć w praktyce nie jest to regułą. Jednym z wyjątków innego rozwiązania bazy kalibracyjnej jest model linii badawczej w Curtin University of Technology w Perth (Australia) (rys. 1), która od kilku lat służy do określania dokładności pomiaru odległości skanerami laserowymi (zwłaszcza o dużym zasięgu), m.in. systemu laserowego MAPTEK I-SiTE [2].

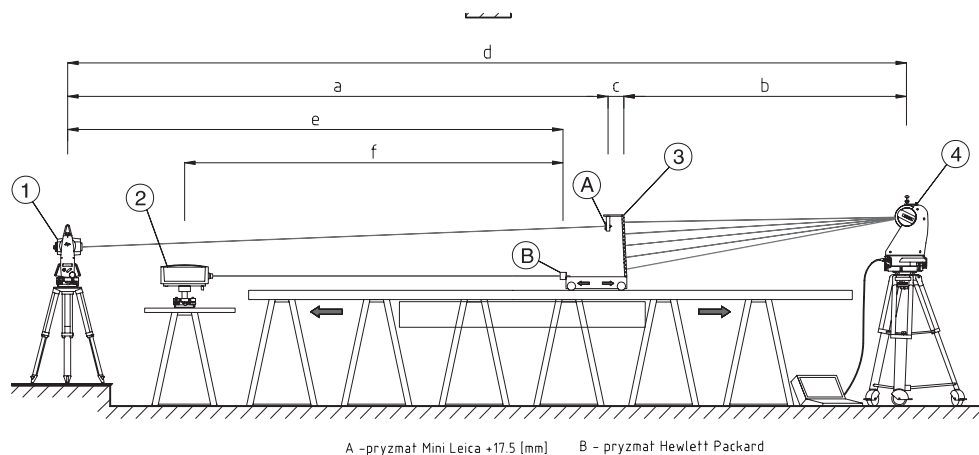


Rys. 1. Schemat linii kalibracyjnej w Curtin University EDM w Perth - Australia

W przypadku przedstawionej na rysunku 1 linii odległości wzorcowe poszczególnych odcinków bazy mierzone są precyzyjnymi tachimetrami elektronicznymi lub techniką GPS z wykorzystaniem wymuszonego centrowania instrumentu i sygnału (wybrane kolumny). Określenie dokładności dowolnego dalmierza polega na bezpośrednim porównaniu jego wskazań z odległościami bazowymi. Mankamentem tej konstrukcji jest brak możliwości płynnej regulacji długości wzorcowych, tak jak to ma miejsce w przypadku bazy komparacyjnej zainstalowanej w wydziałowym komparatorium AGH (pawilon C-4) w zakresie pomiaru 0÷30 m i wyposażonej w precyzyjny instrument pomiaru długości - interferometr laserowy Hewlett Packard o dokładności 0,02 mm.

Konstrukcja interferometru ((2) - rys. 2) i brak znaczka centrującego na jego korpusie nie pozwala na realizację zadań testowych z wykorzystaniem stanowisk z centrowaniem wymuszonym, a w konsekwencji na bezpośrednie porównanie wielkości pomierzonej z wartością wzorcową.

Do określenia dokładności testowanych dalmierzy laserowych wbudowanych w tachimetr TCR 303 firmy Leica (1) oraz skaner Callidus (4), autor wykorzystał proste zależności matematyczne wynikające z rysunku 2 oraz wskazania odległości wzorcowych (interferometru) do przemieszczającego się wzdłuż toru komparatora - pryzmatu HP (zamocowanego na przesuwym wózku (3)). Dodatkowo wózek zaopatrzone w tarczę celowniczą o wymiarach 260×390 mm oraz kontrolny pryzmat Mini GMP 111 Leica (rys. 2). Układ ten w rezultacie przypomina klasyczną bazę kontrolną wykorzystywaną w polowych liniach testowych dalmierzy elektrooptycznych. W analizie autor zastosował pary różnic wskazań odległości interferometru i tachimetru TCR 303, co w konsekwencji pozwoliło uzyskać wielkości teoretyczne odległości skanera Callidus od tarczy celowniczej.



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia testowanych instrumentów laserowych: tachimetru TCR 303 Leica i skanera panoramicznego Callidus względem toru komparatora (AGH Kraków)

### 2.1. Testowanie dalmierza tachimetru laserowego TCR 303 Leica w zakresie światła podczerwonego do pryzmatów: HP i Mini Leica

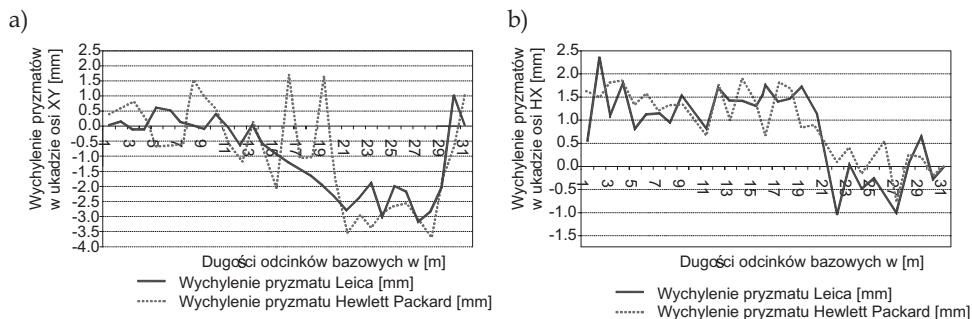
Klasyczne instrumenty geodezyjne, posiadające pionny optyczny lub laserowy wbudowany w spodarkę lub korpus alidady, umożliwiają w rezultacie precyzyjne centrowanie danego przyrządu nad określonym (zastabilizowanym) punktem. Ma to ogromne znaczenie w przypadku dokonywania porównań wielkości mierzonych ze wzorcem (w warunkach braku centrowania wymuszonego).

Nie wszystkie instrumenty wyposażone są w pionny optyczny lub laserowy, jak np. Callidus. Dotychczas producenci skanera z Halle nie zastosowali żadnych spodarek zaopatrzonych w pion umożliwiający ustawienie jego osi obrotu nad wybranym punktem. Uzasadnienie braku tego elementu w podstawowym wyposażeniu przyrządu wiąże się ze znacznym ciężarem instrumentu (13,5 kg); jego zainstalowanie wymagałoby zmiany konstrukcji śrub ustawczych montowanych w klasycznych spodarkach.

Przedstawiony na rysunku 2 schemat przeprowadzonego eksperymentu badawczego pozwolił w praktyce uniknąć zniekształceń długości wynikających z błędów centrowania testowanych instrumentów laserowych. Wtyczenie przyrządów w oś bazy komparatora, wyznaczonego przez środek pryzmatu HP na obu końcach toru w zakresie długości  $0 \pm 32$  m, pozwoliło na określenie krzywizny drogi (tachimetrycznie, poprzez pomiar kątów poziomych, zenitalnych i długości) przemieszczającego się wózka (rys. 3) oraz wprowadzenie poprawek do długości wynikających z:

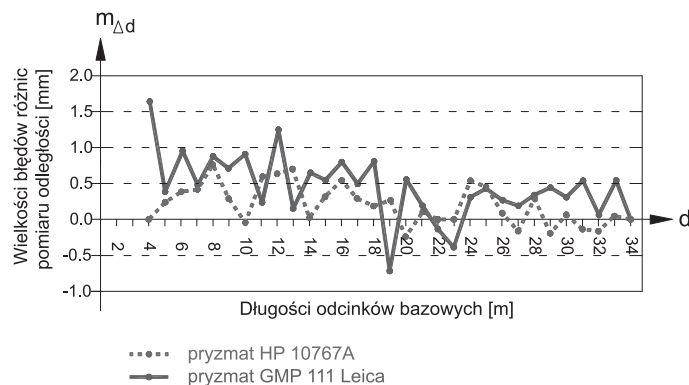
- nieprostoliniowości jego osi (osi toru),
- luzów pomiędzy szyną komparatora a rolkami wózka,

wpływających na przestrzenne położenie (skręcenie) tarczy celowniczej zamocowanej na ruchomym wózku (rys. 3).



**Rys. 3.** Graficzna ilustracja wartości liniowych odchyłek położenia środków przyrządów: HP i Mini Leica względem prostoliniowej osi toru komparatora: a) wykresy wychylenia środków przyrządów względem osi głównej bazy komparacyjnej w układzie osi XY; b) wykresy wychylenia środków przyrządów względem punktu początkowego w układzie osi XH

Ponadto przyrządy HP i Mini Leica oraz tarcza celownicza zamocowane na wózku tworząc układ sztywny, pozwoliły na ustalenie pomiarowych długości bazowych w zakresie 0÷34 m. Na podstawie pomiaru polegającego na porównaniu różnic długości (określonych na podstawie kolejnych położenia wózka) wskazań wzorca – interferometru laserowego Hewlett Packard 5529A oraz testowanego tachimetru laserowego TCR 303 Leica – określono błędy pomiaru wyznaczanych różnic przedstawionych graficznie na rysunku 4.



**Rys. 4.** Graficzna ilustracja błędów różnic przyrostów długości określonych przez interferometr laserowy HP i tachimetr elektroniczny TCR 303 Leica dla przyrządów: HP i Mini Leica (+17,5 mm)

Dzięki pomiarowi odległości do dwóch różnych przyrządów (HP i Mini Leica) otrzymano charakterystykę dokładnościową (dwukrotnie niezależnie), co umożliwiło kontrolę badań. Wyniki różnic pomiaru odległości przedstawiono w formie tabelarycznej (tab. 1). Na podstawie 31 wskazań różnic dla każdego z przyrządów wyznaczono: średni błąd pojedynczej różnicy, średni błąd pojedynczego pomiaru odległości oraz średni błąd średniej arytmetycznej.

**Tabela 1.** Zestawienie wartości błędów pomiaru odległości do pryzmatów Mini GMP 111 Leica i Hewlett Packard

Błędy	Mini Leica	Hewlett Packard
Średni błąd pojedynczej różnicy $m_d$	$\pm 0,63$ mm	$\pm 0,34$ mm
Średni błąd pojedynczego pomiaru odległości $m_o$	$\pm 0,44$ mm	$\pm 0,24$ mm
Średni błąd średniej arytmetycznej dla 30 różnic odległości $m_x$	$\pm 0,31$ mm	$\pm 0,17$ mm

Podana charakterystyka stanowi uzupełnienie badań prowadzonych przez G. Lendę [4] w zakresie światła widzialnego, zmierzających do wyznaczenia dokładności pomiaru odległości do wybranych rodzajów materiałów reprezentujących najczęściej spotykane powierzchnie.

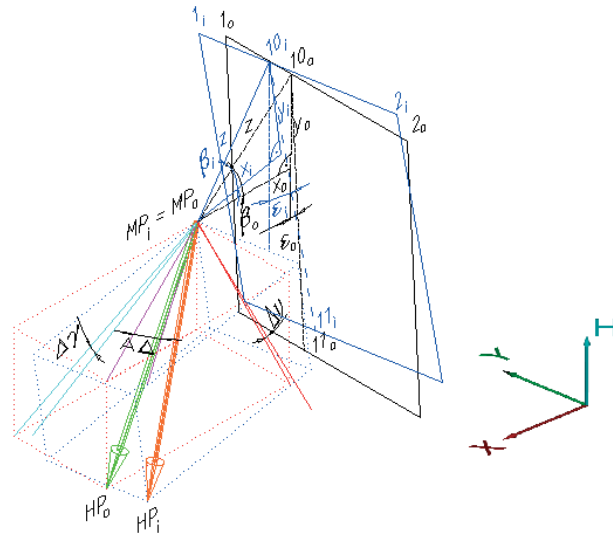
## 2.2. Testowanie dalmierza skanera laserowego Callidus

Dla wyznaczenia charakterystyki dokładnościowej pomiaru długości dalmierza wbudowanego w panoramiczny skaner laserowy Callidus wykorzystano opisany w rozdziale 2 model badawczy. Dzięki wykorzystaniu wielkości:

- $a$  – odległość tachimetr TCR 303 (pryzmat Mini Leica);
- $c$  – stała (odległość pryzmatu Mini GMP 111 Leica od górnej krawędzi tarczy w rzucie na płaszczyznę poziomą);
- $d$  – odległość tachimetr TCR 303 (skaner Callidus);
- $e$  – odległość tachimetr TCR 303 (pryzmat Hewlett Packard);

możliwe było wyznaczenie pośredniej wielkości  $b$  (odległość pomiędzy skanerem Callidus a górną krawędzią tarczy). Znajomość współrzędnych przestrzennych obu sygnałów zwrotnych w przyjętym układzie współrzędnych oraz odległości pryzmatu Mini GMP 111 Leica od górnej krawędzi tarczy w rzutach w płaszczyźnie  $X-H$ , a także kątów skręcenia układu wózka  $\Delta A$ ,  $\Delta \gamma$ ,  $\Delta v$  w trzech płaszczyznach:  $X-Y$ ,  $X-H$ ,  $Y-H$  względem pierwszego położenia (bazowego) wózka (rys. 5), pozwoliła wyznaczyć równania płaszczyzny tarczy celowniczej w każdym jej położeniu.

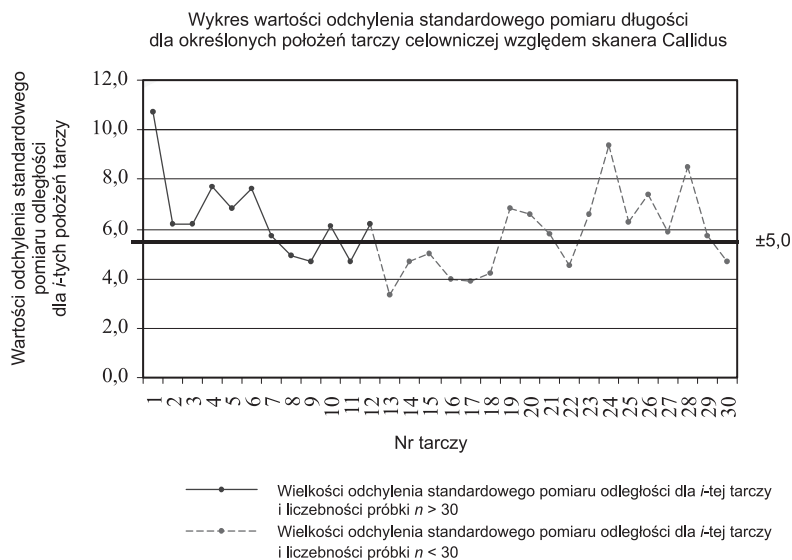
Na podstawie równań możliwe było wyznaczenie błędów pomiaru długości skanerem Callidus do tarczy. Ograniczenia czasowe wymusiły przyjęcie rozdzielczości skanowania płaszczyzny celu na poziomie  $0,25 \times 0,25^\circ$  w nawiązaniu do jednego pryzmatu referencyjnego firmy Nadowski, ustawionego w odległości około 15 m od skanera. Do przeprowadzenia doświadczenia wykorzystano program Callidus w wersji 1.3 ograniczający odległość sygnału od skanera do połowy przyjętego zakresu pomiarowego, tj. do 32 m. Testom poddano tarczę wykonaną z blachy aluminiowej, a zatem materiału reprezentującego powierzchnie metaliczne – silnie refleksyjne (odbijające). Błędy pomiaru odległości wyznaczono, wykorzystując znajomość współrzędnych punktów przebicia tarczy pękiem prostych łączących środek dalmierza skanera i punkty pomierzone – odwzorowane w obrębie płaszczyzny celu. Odwzorowanie wielu punktów na tarczy pozwoliło na określenie rozkładu błędów i ich wielkości. Posłużono się wartościami odchylenia standardowego pomiaru odległości (do kolejnych położań płaszczyzn celu).



**Rys. 5.** Graficzna interpretacja zachowania układu w kolejnych położeniach wózka ( $i$ -tych) względem położenia początkowego (0) wraz z wielkościami analizowanymi wpływającymi na zachowanie (położenie) tarczy celowniczej.  $x_0, y_0, z_0$  – wielkości pomierzone bezpośrednio w zerowym położeniu tarczy (początkowym);  $1_0, 2_0, 10_0, 11_0$  – punkty charakterystyczne tarczy w położeniu początkowym;  $MP_0$  – położenie przyzmatu Mini GMP 111 Leica (położenie początkowe);  $HP_0$  – położenie przyzmatu HP (położenie początkowe);  $\epsilon_0$  – kąt wychylenia płaszczyzny tarczy od pionu (położenie początkowe)

Przyjęcie stałej rozdzielczości skanowania dla całego zakresu badawczego spowodowało zmiany liczebności poszczególnych próbek. I tak np. dla odległości około 1 m wyselekcjonowano 2941 punktów, zaś dla 33 m tylko 2. Chcąc uniknąć zniekształceń wyników, do analizy zakwalifikowano tylko te punkty, co do których była pewność, że energia sygnału powrotnego (do skanera) pochodziła w całości od aluminiowej tarczy celowniczej. Przeprowadzona analiza pozyskanych danych pozwoliła określić wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych odległości bazowych, które zestawiono graficznie na rysunku 6. Wprowadzając wagi  $p_i$  będące odwrotnością liczebności danej próbki (punktów odwzorowanych na poszczególnych tarczach), określono wypadkową wartość odchylenia standardowego  $\sigma_d$  pomiaru długości przy wykorzystaniu testowanego skanera laserowego. Wielkość ta wynosi  $\sigma_d = \pm 6,5$  mm i przekracza wartość dokładności określonej przez producenta na poziomie  $\pm 5$  mm [1]. Z uwagi na reprezentatywność próbki tylko pierwsze 12 metrów badawczych daje pełny obraz rzeczywistej dokładności dalmierza. Liczba punktów pomiarowych w pełni odwzorowanych na płaszczyźnie tarcz w zakresie pomiaru  $1 \div 13$  m przekracza 30, a zatem stanowi próbkę doskonale nadającą się do wnioskowania statystycznego.

W dostępnych materiałach i dokumentacji technicznej skanera Callidus nie umieszczono żadnych informacji dotyczących dokładności rozpoznawania przez instrument przyzmatów referencyjnych, służących do orientacji sytuacyjnej skanów względem punktów osnowy geodezyjnej. Zaletą skanera jest wykonywanie panoramicznych – „punktowych” – zdjęć szczegółów (punkty pomiarowe o współrzędnych  $XYH$ ), co w przypadku dostępnych, prostych geometrycznie obiektów nie wymaga praktycznie uzupełniania braków (tzw. „martwych pól”) z innych jego stanowisk.



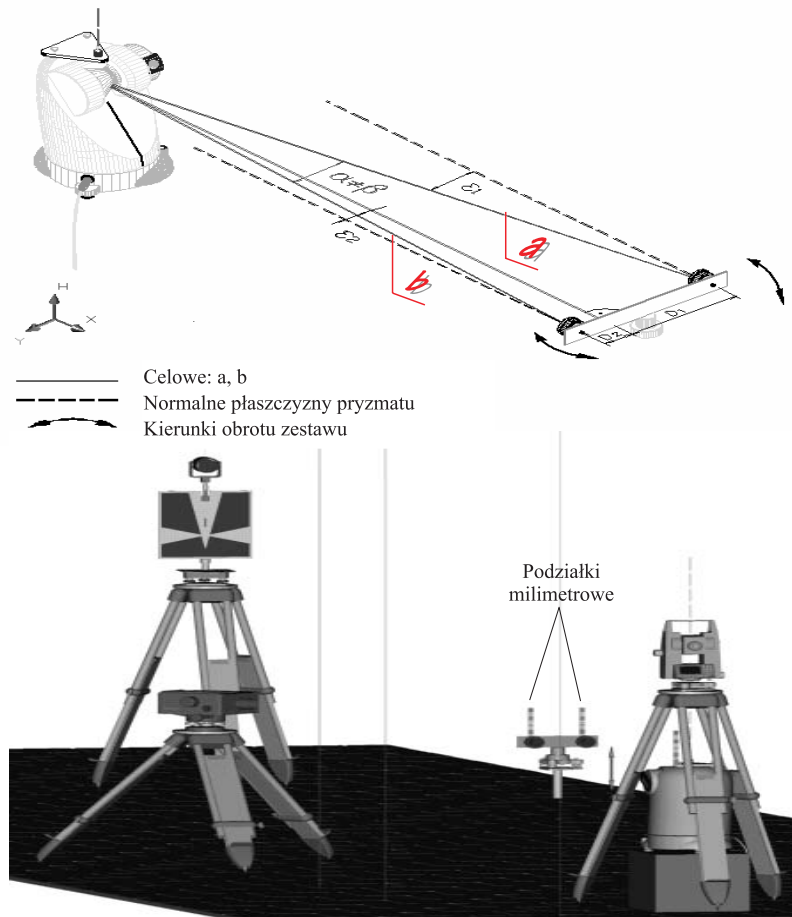
Rys. 6. Graficzna ilustracja rozkładu błędów pomiaru odległości dla poszczególnych położen tarczy celowniczej dana odchyleniem standardowym

Każde łączenie pomiarów wykonywanych z różnych punktów osnowy lub stanowisk swobodnych (również w przypadku tachimetrycznego wcięcia przestrzennego) wiąże się z koniecznością zwiększenia precyzji nawiązania danych biegunowych w oparciu o kierunki nawiązania. Wszelkie błędy orientacji pomiarów, tachimetrycznych i skanerowych, uwidaczniają się w przypadku „sklejania” danych pozyskanych z różnych stanowisk instrumentu, a dotyczących tych samych inwentaryzowanych elementów. W przypadku łączenia skanów efektem błędnego nawiązania jest „rozmycie” obrazu złożonego z milionów punktów. Ma to istotne znaczenie w sytuacji, kiedy z uwagi na charakter obiektu (złożony kształt) długość boku nawiązania (skaner – pryzmat referencyjny) jest znacznie mniejsza niż długość biegunowa (do punktu P szczegółu).

Ograniczenia wersji 1.3 oprogramowania skanera pozwalały na umiejscawianie pryzmatu w odległości nie większej niż połowa zakresu pomiaru odległości, co oznaczało, że dla zakresu pomiarowego (np. do 32 m) pryzmat nawiązawczy nie mógł znajdować się w odległości większej niż 16 m. W roku 2003 firma CPS wprowadziła na rynek nowe oprogramowanie sterujące pracą skanera – wersję Callidus 1.5, które umożliwia ustawienie pryzmatu na dowolną odległość w przyjętym przez użytkownika zakresie pomiarowym instrumentu.

Autor opracował projekt badań zmierzających do stwierdzenia rzeczywistej dokładności orientacji skanera danej średnim błędem pomiaru kierunku  $m_{k(skan)}$  w kilku wybranych zakresach odległości do pary jednakowych pryzmatów GMP 111. Eliminację wpływu błędu poziomowania skanera na ostateczną wartość mierzonego kąta uzyskano w wyniku wtyczenia osi pryzmatów GMP 111 w płaszczyznę poziomą przebiegającą przez środek dalmierza laserowego Callidusa. Efekt ten uzyskano w wyniku zastosowania niwelacji geometrycznej, wykorzystując niwelator Na 3003 firmy Leica oraz podziałki milimetrowe przytwierdzone do obu sygnałów i adaptera skanera (rys. 7).





Rys. 7. Schemat modelu badawczego zmierzającego do wyznaczenia błędów pomiaru kierunku  $m_{k(skan)}$  do pryzmatów Mini Leica dla wybranych długości bazowych oraz rozdzielczości

Regulację wysokości pryzmatów osadzonych na sztywnym ramieniu gwarantował statyw posiadający możliwość płynnej zmiany wysokości osi obu sygnałów zwrotnych. Ustawienie centryczne tachimetru TCR 303 i skanera Callidus (wtyczonego) nad punktem wierzchołkowym mierzonego kąta (punkt P8) pozwoliło na porównanie wielkości kątowych pomierzonych dwoma instrumentami do pary sygnałów GMP 111. Aby zmniejszyć składową błąd pomiaru kąta wzorcowego (określonego tachimetrycznie) wynikającą z liniowego błędu centrowania tachimetru (z wbudowanym pionem laserowym o dokładności  $\pm 0,8$  mm/1,5 m [3]), zamieniono oryginalną spodarkę instrumentu na jej odpowiednik z pionem optycznym o błędzie liniowym centrowania nie przekraczającym 0,5 mm.

Przeprowadzone doświadczenia miały określić średnie błędy kątów pomierzonych skanerem  $m_{\beta(skan)}$  oraz wyznaczyć zmiany tych wartości wraz ze wzrostem odległości skanera do sygnałów referencyjnych oraz zmianą rozdzielczości skanowania sygnałów.

Prace badawcze przeprowadzono w komparatorium wydziałowym, a zatem w pomieszczeniu o stałych warunkach atmosferycznych. Temperatura w czasie pracy skanera wynosiła  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$  (typowa temperatura komparacji przymiarów wstęgowych).

### 3. Wyznaczenie średnich błędów pomiaru kierunku $m_{k(\text{skan})}$ (orientacji) do pryzmatów Mini GMP 111 Leica

Pierwotnie skaner przeznaczony był do inwentaryzacji obiektów architektury powierzchniowej. Wbudowany wewnątrz serwowator miał umożliwić zautomatyzowanie procesu pozyskiwania danych w formie „panoramycznych chmur punktów”. Zdjęcie szczegółów w otoczeniu przyrządu nie nastęczało kłopotów. Sytuacja komplikowała się z chwilą inwentaryzacji obiektów złożonych, skomplikowanych, które wymuszały zmianę położenia instrumentu i wymagały powiązania skanów jednostkowych w jedną „chmurę” danych. Potrzeba powiązania skanów pozyskiwanych z różnych stanowisk wymusiła na CPS GmbH osadzenie w korpusie specjalnych gniazd służących do zamocowania adaptera pod typowe pryzmaty: Geodimeter, Spectra itp., które pozwoliły nawiązać sytuacyjnie i wysokościowo pozycję instrumentu w przestrzeni względem osnowy pomiarowej. Środek łącznika pryzmatu z adapterem (w formie sworznia z gwintem) wyznacza punkt leżący w osi głównej obrotu instrumentu. Punkt ten autor wykorzystał do centrowania spoziomowanego skanera przy wykorzystaniu pionu optycznego tachimetru laserowego (ustawionego nad skanerem) nad punktem wierzchołkowym mierzonego kąta. Porównanie kątów poziomych pomiędzy parą pryzmatów GMP 111 a stanowiskiem instrumentów, tj. tachimetru – wzorca (kąt  $\beta$ ) i skanera (kąt  $\alpha$ ), pozwoliło na określenie średniego błędu pomiaru kąta  $m_\beta$ .

Wykorzystując zależność [2]

$$m_{k(\text{skan})} = \frac{m_\alpha}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

wyznaczono średnie błędy pomiaru kierunku (orientacji)  $m_{k(\text{skan})}$  do pryzmatów dla dwóch rozdzielczości skanowania sygnałów, tj.  $0.01^\circ \times 0.25^\circ$  i precyzyjnej  $0.0018^\circ \times 0.25^\circ$ .

Opierając się na analizie błędu średniego pomiaru kąta  $m_\beta$ , a ściślej na metodzie błędów elementarnych, w której  $m_\beta$  jest ich funkcją [7], a zatem

$$m_\alpha = f(m_{et}, m_{es}, m_{poz}, m_c, m_o),$$

gdzie:

- $m_{et}$  – średni błąd pomiaru kąta wywołany centrowaniem instrumentu,
- $m_{es}$  – średni błąd pomiaru kąta wywołany centrowaniem sygnałów,
- $m_{poz}$  – średni błąd pomiaru kąta wywołany ustawieniem osi głównej w pionie (poziomowaniem),
- $m_c$  – średni błąd pomiaru kąta wywołany celowaniem,
- $m_o$  – średni błąd pomiaru kąta wywołany odczytywaniem,

autor zadbał o stworzenie takich warunków, aby zminimalizować wpływ tych błędów na wartość ostateczną wielkości  $m_\alpha$  lub całkowicie ten wpływ wyeliminować.

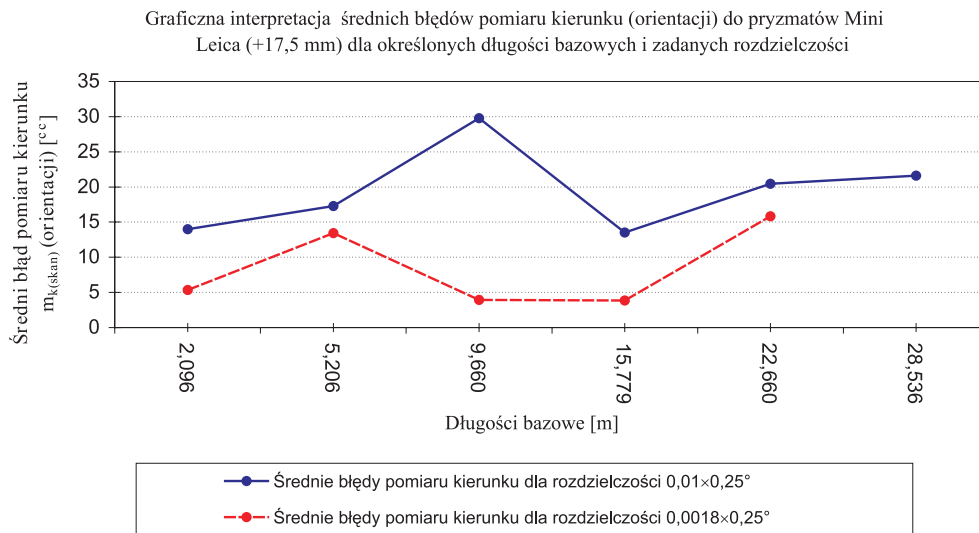
Pełna forma tych zależności dotyczy klasycznych instrumentów kątomierzczych, tj. teodolitów i tachimetrów, zaś ostateczną wielkość błędu  $m_\alpha$  kształtuje pośrednio także obserwator ( $m_c, m_o$ ). Oba te błędy w przypadku skanera powinny być zastąpione błędem adekwatnym do charakteru pracy skanera  $m_{o(skan)}$  z uwagi na automatykę celowania i przyjętą rozdzielczość skanowania sygnałów referencyjnych.

Dla ograniczenia wpływu błędów elementarnych model badawczy przygotowano tak, aby wyeliminować część z nich. Sprzężenie dwóch pryzmatów GMP 111 osadzonych na statywie (ze zmienną, płynną regulacją wysokości – rys. 7) oraz wykorzystanie niwelatora Na 3003 Leica pozwoliło ustawić środki obu sygnałów w płaszczyźnie poziomej przechodzącej przez środek dalmierza, wówczas  $m_{poz} = 0,0^{cc}$ . Podziałki milimetrowe zamocowane do obu pryzmatów i adaptera skanera umożliwiły przeprowadzenie tej czynności z uwzględnieniem stałej wysokościowej skanera, tj. odległości górnej krawędzi płytki adaptera do środka wbudowanego dalmierza wynoszącej  $i = 108$  mm (dane dystrybutora – firmy Trimble). Pomiar kąta poziomego  $\alpha$  i odległości poziomych  $a$  i  $b$  do sygnałów za pomocą tachimetru elektronicznego („współosiowego” ze skanerem) pozwolił na eliminację także błędu  $m_{es} = 0,0^{cc}$  (rys. 7). Zatem można przyjąć, że na wartość określonego skanerem błędu pomiaru kąta mają wpływ tylko:  $m_{et}$  (o wartości zbliżonej do met tachimetru) i  $m_o$  ściśle związany z przyjętą rozdzielczością pokrycia pryzmatu przez wiązkę laserową oraz dokładnością rozpoznania krawędzi pryzmatu w oparciu o moc sygnału powrotnego (pochodzącego tylko częściowo z reflektora). Ponadto określono wielkości kątów skręcenia pryzmatów względem celowej skanera  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ , które w otrzymanym zakresie wartości nie wpływają na wartość średnich błędów pomiaru kąta, co potwierdziły dodatkowo przeprowadzone testy (tab. 2).

**Tabela 2.** Zestawienie długości bazowych  $a$  i  $b$  oraz kątów skręcenia pryzmatów względem celowych skanera

Lp.	Długość pozioma $a$ [mm]	Długość pozioma $b$ [mm]	Kąt poziomy $\alpha$ [g]	$D$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_2$ [mm]	Kąty skręcenia	
							$\varepsilon_1$ [g]	$\varepsilon_2$ [g]
1	2096,6	2096,0	6,6812	219,9	115,7	104,2	3,5141	3,1671
2	5197,9	5196,5	2,6937	219,9	143,0	76,9	1,7521	0,9416
3	9640,1	9641,0	1,4513	219,8	70,4	149,4	0,4649	0,9863
4	15779,0	15778,8	0,8872	219,9	124,3	95,6	0,5015	0,3857
5	22661,0	22660,0	0,6185	220,1	213,0	7,1	0,5984	0,0201
6	28536,0	28535,0	0,4910	220,1	239,7	19,6	0,5348	0,0437

Posługując się wartościami prawdziwymi błędów  $\varepsilon$ , określono charakterystykę dokładnościową błędu orientacji  $m_{k(skan)}$  dla kilku wybranych długości bazowych, co graficznie przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Graficzna interpretacja średnich błędów pomiaru kierunku  $m_{k(sk)}$  do pryzmatów Mini Leica dla wybranych długości bazowych oraz rozdzielczości

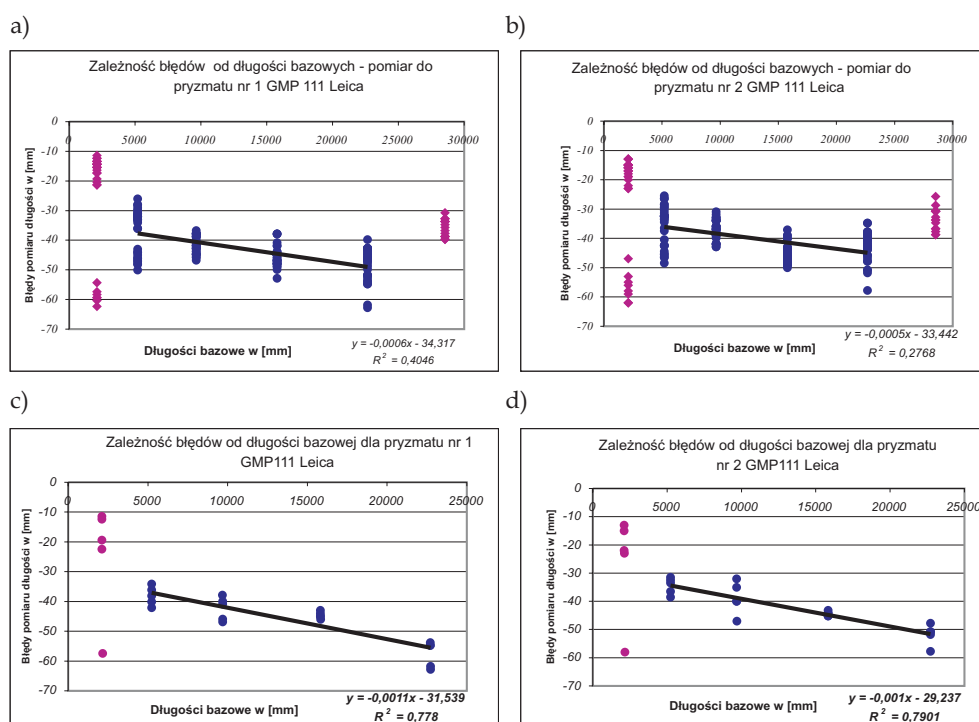
W przypadku najlepszej rozdzielczości oferowanej przez oprogramowanie sterujące Callidus w wersji 1.5 brak wartości błędu  $m_{k(sk)}$  dla odległości 28,536 m spowodowany jest brakiem określenia wartości obu kierunków poziomych Hz do dwóch sygnałów (przez skaner). Przy założonej rozdzielczości 0,0018×0,25° skaner wnioskował o istnieniu tylko jednego pryzmatu, zaś kierunek Hz, który został zarchiwizowany w pliku (o rozszerzeniu .prp), dotyczył średniej wartości obu kierunków, co świadczyć może o pewnych błędach samego oprogramowania analizującego sygnały powrotne do instrumentu. Świadczy o tym fakt, iż przy rozdzielczości mniejszej, tj. 0,01×0,25° (o większej plamce lasera) możliwe było określenie kierunków wypadkowych do obu reflektorów przy stałej odległości pomiędzy środkami pryzmatów wynoszącej 220 mm.

#### 4. Wyznaczenie średnich błędów pomiaru długości $m_d(sk)$ do pryzmatów GMP 111

Opisana metoda badań pozwoliła na określenie dokładności pomiaru odległości do pryzmatów GMP 111. Na podstawie automatycznie pomierzonych wartości odległości do pryzmatów zapisywanych do pliku danych \*.prp wyznaczono wielkości poprawek do długości. Uwzględnienie poprawki do odległości pozwala na adaptację tych wielkości do nawiązania sytuacyjnego skanera tylko do dwóch pryzmatów referencyjnych przy wykorzystaniu wycięcia liniowego. Po niewielkich przekształceniach możliwe jest przejście na wcięcie kątowno-liniowe (kombinowane) z obliczeniem kątów wierzchołkowych utworzonego trójkąta. Wykorzystując pomierzone długości oraz kąt poziomy wyznaczone w procesie skanowania sygnałów w oparciu o twierdzenie Carnota, można określić w przestrzeni położenie skanera

względem osnowy pomiarowej. Takie dane pozwalają na eliminację dodatkowego tachimetru w procesie nawiązania instrumentu skanującego względem punktów osnowy, co wiąże się pośrednio również ze skróceniem czasu prac pomiarowych, ale przede wszystkim eliminuje dodatkowe urządzenia w procesie realizacji zadania pomiarowego. Stabilizacja dodatkowych punktów ociosowych w wyrobiskach podziemnych umożliwia łatwe nawiązywanie kątowno-liniowe do punktów o znanych współrzędnych  $X, Y, H$ .

Wyznaczenie równań poprawek dla dwóch przyjętych rozdzielczości, tj.  $0,01^\circ \times 0,25^\circ$  (typowej) i  $0,0018^\circ \times 0,25^\circ$  (precyzyjnej) pozwala na eliminację błędów instrumentalnych, spowodowanych błędną interpretacją środków reflektorów (rys. 9). Dla bardzo krótkich celowych rozrzut wartości próbek o liczebności  $n = 31$  (typowa rozdzielczość) i  $n = 5$  (precyzyjna rozdzielczość) przekraczała 50 mm, dlatego do wyznaczenia poprawek dla obu rozdzielczości wyniki tych pomiarów pominięto. Z uwagi na znaczne rozbieżności wyników dla długości bazowej 28,54 m i przy kątowym interwale pokrycia pryzmatów, tj.  $0,01^\circ \times 0,25^\circ$ , jak również zmniejszenie liczebności uzyskanej próbki ( $n = 15$ ) spowodowanej prawdopodobnymi błędami programu zarządzającego skanowaniem, w przeprowadzonej analizie odrzucono te wartości. Fakt zniekształcenia wyników dla odległości powyżej 28 m wymagałby przeprowadzenia dodatkowych prac zmierzających do wyjaśnienia przyczyn tych błędów i charakterystyki dokładnościowej dla większych zakresów pomiarowych.



Rys. 9. Graficzna interpretacja błędów pomiaru długości do pryzmatów GMP 111 dla dwóch wybranych rozdzielczości skanowania sygnałów:  $0,01^\circ \times 0,25^\circ$  (a, b) oraz  $0,0018^\circ \times 0,25^\circ$  (c, d)

## 5. Wnioski

1. Zastosowanie instrumentów laserowych w górnictwie wymaga przeprowadzenia szeregu testów zmierzających do określenia stopnia przydatności przyrządów do prowadzenia określonych prac dołowych oraz warunków pozwalających uzyskać zadowalające rezultaty. Zaprezentowane w artykule rezultaty przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych testów (komparatorium wydziałowym) pozwalają wnioskować o najkorzystniejszych warunkach pracy. Dostarczają praktycznych wskazówek dla doboru modelu nawiązania prac pomiarowych.
2. W zależności od realizowanego zagadnienia pomiarowego, a przede wszystkim od warunków panujących w inwentaryzowanych obiektach i wokół nich, istotną kwestią jest właściwy dobór rozdzielczości skanowania pryzmatów. W sytuacjach, w których długości celowych do szczegółów sytuacyjnych przekraczają znacznie długości boków nawiązania, należy zwiększać rozdzielczość skanowania pryzmatów. W praktyce wiąże się to także ze znacznym wydłużeniem czasu pracy. Najlepsze rezultaty nawiązania kątowno-liniowego do reflektorów uzyskano dla odległości z przedziału 10÷20 m.
3. W przypadku wykorzystania do określenia położenia skanera względem sygnałów – odległości do pryzmatów – należy unikać bardzo krótkich celowych. Przeprowadzone prace testowe wykazały znaczny rozrzut tych wartości w próbcie (o liczebności  $n = 31$ ) dla odległości około 2 m. Ponadto zmiana rozdzielczości skanowania reflektorów pomiędzy testowanymi zakresami:  $0,01^\circ \times 0,25^\circ$  i  $0,0018^\circ \times 0,25^\circ$  tylko w niewielkim stopniu poprawia wyniki orientacji odległościowej.
4. Wyniki pomiaru odległości uzyskane na bazie komparacyjnej do tarczy aluminiowej dają pewien pogląd na dokładność pomiaru odległości, ale wnioskowanie o rzeczywistej dokładności wymagałoby przeprowadzenia testów dla innych bardziej typowych materiałów występujących w przyrodzie.
5. Uzyskane wyniki testowe świadczą, iż zastosowanie tylko dwóch pryzmatów referencyjnych może pozwolić na precyzyjne określenie pozycji instrumentu w przestrzeni – samodzielnie, bez konieczności użycia przyrządów pomocniczych (tachimetrów), pełniących rolę nawiązawcze (skanera względem punktów osnowy). Ma to przede wszystkim znaczenie ekonomiczne, ale także ergonomiczne, gdyż ogranicza ilość potrzebnego sprzętu i liczebność zespołu pomiarowego potrzebnego do realizacji prowadzonych czynności pomiarowych wokół lub wewnątrz cyklicznie inwentaryzowanych obiektów.

## Literatura

- [1] *Callidus Precision Systems GmbH*. Operating Instructions, wersja 1.1. Halle, Niemcy, 2001
- [2] Jagielski A.: *Geodezja II*. Kraków, Wydawnictwo Stabill 2003
- [3] Leica Geosystems. *Instrukcja użytkownika instrumentu TCR 303, wersja 2.1*. Heerbrugg, Szwajcaria, 1999

- 
- [4] Lenda G.: *Badanie zasięgu i dokładności dalmierzy bezzwierciadlanych*. Kraków, Pótrocznik AGH Geodezja, t. 9, nr 1, 2003
  - [5] Lichti D., Steward M., Tsakiri M., Snow A.: *Benchmark Tests on a Three-dimensional Laser Scanning System*. Perth - West Australia, School of Spatial Sciences Curtin University of Technology 2001
  - [6] Kazimierzuk Z.: *Zaczął się od lasera*. Warszawa, Instytut Wydawniczy „Nasza Księgarnia” - Biblioteka Młodego Technika 1985
  - [7] Milewski M.: *Geodezja górnicza. Część I*. Skrypty Uczelniane nr 1105, Kraków, Wydawnictwa AGH 1988