

Grzegorz LENDA, Urszula MARMOL

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ GEODEZJI GÓRNICZEJ I INŻYNIERII ŚRODOWISKA
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Dokładność dalmierzy bezzwierciadlanych dla pomiaru obiektów wykonanych z materiałów syntetycznych

Dr inż. Grzegorz LENDA

Od 2005 roku adiunkt w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Specjalista w zakresie geodezji inżynierskiej – przemysłowej z wyszczególnieniem numerycznych analiz kształtu obiektów nieliniowych.



e-mail: grzenda@agh.edu.pl

Dr inż. Urszula MARMOL

Od 2006 roku adiunkt w Katedrze Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska. Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie.



e-mail: entice@agh.edu.pl

Streszczenie

Opracowanie zostało poświęcone badaniu dokładności dalmierzy bezzwierciadlanych związanej z pomiarami od obiektów wykonanych z materiałów syntetycznych. Pojawiające się niejednoznaczności towarzyszące pomiarom tworzywu sztucznych, niejednokrotnie znacznie przewyższają sugerowane przez producentów dokładności dalmierzy bezzwierciadlanych, co skłoniło autorów do wykonania stosownych testów. Materiały syntetyczne z uwagi na właściwą im przepuszczalność światła, zależną dodatkowo od temperatury tworzywa, zmieniają w swojej strukturze przebieg wiązki dalmierzej, co ma bezpośredni związek z osiąganą dokładnością pomiaru. Autorzy wykonali szereg testów uwzględniających rodzaj tworzywa sztucznego, jego temperaturę, mierzoną odległość oraz kąt padania wiązki. Szczegółowe badania przeprowadzono dla wybranego tachimetru bezzwierciadlanego, wykonując dodatkowo testy porównawcze trzech innych tachimetrów. Wyniki badań są aktualne również dla skanerów laserowych, pracujących w oparciu o tą samą metodę działania.

Słowa kluczowe: dalmierz bezzwierciadlany, tachimetr bezzwierciadlany, skaner laserowy, dokładność pomiaru.

Accuracy of reflectorless rangefinders for measurements of objects made of synthetic materials

Abstract

This paper is dedicated to the study of the accuracy of reflectorless rangefinders associated with measurements carried out for targets made of synthetic materials. Ambiguities appearing in the measurement of synthetic materials, sometimes significantly exceeding the precision of the reflectorless rangefinders claimed by their manufacturers, have prompted the authors to perform the relevant tests. Depending on the light permeability of synthetic materials, which is also dependent on their temperature, the direction of the rangefinder beam is altered in the material structure, which has a direct impact on the accuracy of the measurement achieved. The authors have conducted a series of tests taking into account the type of synthetic material, its temperature, the distance measured and the angle of incidence of the beam. Detailed research was conducted for the Leica TCRA 1102+ reflectorless tacheometer (Tab. 2, fig. 3), and additional comparative tests were carried out for three other tacheometers: Leica TCR 407 POWER, Leica TCRP 1201 and Trimble 5503DR (Tab. 3, fig. 4). There were also verified repeatability of the results for each of the materials, carrying out observations in three independent locations of samples (Tab. 4). The results obtained confirm the observation that most synthetic materials, due to their light permeability, alter (increase) the measured length in relation to the actual length. The type of material (related to the density and uniformity of the internal structure) and its thickness have an essential effect on the accuracy of the measurement. Also essential are such factors as the temperature of the material, the angle of incidence of the laser beam and emitted wavelength of the rangefinder. The results of the tests are included in the paper for six synthetic materials of various structures. The results collected also apply to laser scanners that function on the same principles of operation.

Keywords: reflectorless rangefinder, reflectorless tacheometer, laser scanner, measurement accuracy.

1. Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie stanowi rozwinięcie badań [1] prowadzonych przed kilku laty przez jednego z autorów. Testowano wówczas parametry dalmierzy bezzwierciadlanych w zależności od rodzaju celu (koloru, struktury, odbijalności), kąta padania wiązki oraz długości bazy kontrolnej. Przeprowadzone analizy wykazały zbyt optymistyczne podejście producentów do prezentowania danych technicznych, w stosunku do rzeczywistych osiągnięć tych urządzeń. Przedstawiane parametry dotyczą zazwyczaj najlepszych warunków pomiaru, podczas gdy w rzeczywistości mogą być kilku a nawet kilkunastokrotnie gorsze. Użytkownik zmuszony jest zatem samodzielnie zdobywać praktyczne doświadczenie umożliwiające dopasowanie procedury pomiarowej do rodzaju obserwowanego obiektu, celem otrzymania wiarygodnych danych. Badaniu właściwości dalmierzy bezzwierciadlanych i blisko spokrewnionych z nimi skanerów laserowych poświęcono m.in. opracowania [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Kilkuletnia dodatkowa praktyka związana z bezzwierciadlanymi pomiarami różnego typu obiektów, wykazała konieczność rozszerzenia testów na cele wykonane z materiałów syntetycznych. Wykorzystywane są one niejednokrotnie jako zewnętrzne zabezpieczenia przeciwwilgociowe budowli, elementy wykończeniowe, lub też stanowią samodzielne konstrukcje. Podczas pomiarów tego typu obiektów wielokrotnie wykrywano niejednoznaczności w mierzonych odległościach, co było bezpośrednią motywacją do przeprowadzenia stosownych testów.

Wcześniejsze badania przeprowadzono dla tachimetrów Leica TCRA 1102+ oraz Leica TCR 303. Wykazały one, że pod względem dokładnościowym, dalmierze różniące się jedynie mocą emitowanej wiązki promieniowania zachowują się w analogicznie. Aktualnie, testy wykonano dla tachimetru Leica TCRA 1102+. Dodatkowo w uproszczony sposób porównano dokładności tego instrumentu z dalmierzami tachimetrów Leica TCR 407 POWER, Leica TCRP 1201 oraz Trimble 5503DR. Wyniki testów opisują prawidłowości reprezentatywne także dla innych modeli dalmierzy bezzwierciadlanych jak również dla skanerów laserowych, bazujących na analogicznej metodyce pomiaru długości. W zależności od różnic parametrów tych instrumentów (w szczególności długości fali nośnej), dokładności dla różnego typu celów mogą się zmieniać.

Opracowanie zawiera opis metodyki prowadzonych pomiarów, oraz wybrane wyniki testów połączone z oceną dokładności. Zdecydowano się zastosować analogiczną jak uprzednio procedurę testową, wzbogaconą dodatkowo o czynnik zmiany temperatury mierzonej powierzchni.

2. Opis procedury pomiarowej, wyniki testów

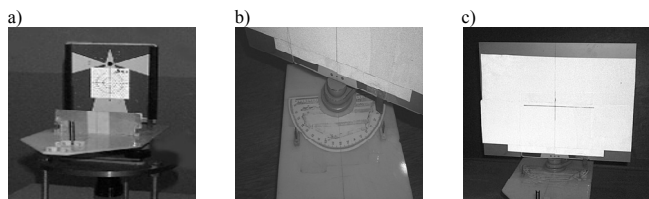
Podstawowym celem badań była ocena dokładności dalmierzy bezzwierciadlanych w zależności od obserwacji prowadzonych od

różnego typu materiałów syntetycznych spotykanych w praktyce pomiarowej. Wstępnie wyselekcjonowano grupę kilkunastu materiałów, dla których autorzy, w oparciu o dotychczasowe doświadczenia praktyczne, spodziewali się otrzymać rozbieżne wyniki. Podstawowe kryteria doboru dotyczyły różnic materiałów w przejmowaniu ciepła o otoczenia oraz stopniu przenikalności optycznej przez wiązkę promieniowania. Dodatkowymi czynnikami była ich konsystencja oraz jednorodność struktury wewnętrznej. Ostatecznie grupę tę zawężono do dziewięciu materiałów, z grupy których do niniejszego opracowania wybrano sześć najbardziej reprezentatywnych:

1. polistyren spieniony (styropian)
2. polipropylen (plastik) o średniej przepuszczalności światła
3. polipropylen (plastik) o słabej przepuszczalności światła
4. polietylen (pianka) o gruboziarnistej strukturze gąbczastej i dobrej przepuszczalności światła
5. kauczuk syntetyczny (guma) o drobnoziarnistej strukturze gąbczastej i średniej przepuszczalności światła
6. kauczuk syntetyczny (guma) o jednolitej strukturze i słabej przepuszczalności światła

Z uwagi na bardzo silną zależność zasięgu dalmierzy bezzwielciadlanych od koloru mierzonego celu, wybrano materiały o jasnych barwach zapewniających dobre odbicie wiązki (biały, żółty, kremowy). Dzięki temu udało się dla każdego materiału przeprowadzić testy we wszystkich kombinacjach ustawień bazy testowej.

Głównym założeniem przy projektowaniu bazy testowej było stworzenie takich warunków pomiarowych, które umożliwiłyby porównanie wszystkich materiałów przy tych samych ustawieniach geometrycznych celów. Konieczne było również zapewnienie możliwości testowania na dowolnych odległościach, przy dowolnym kącie padania wiązki dalmierzej. Do tego celu wykorzystano ruchomą tarczę umożliwiającą montaż na przenośnym statywie (rys. 1). Tarcza, na którą naklejano materiały testowe, pozwalała na obrót wokół osi pionowej o kąt zadany na podziałce gradowej (rys. 1b).



Rys. 1. Platforma testowa: a) orientowanie platformy względem stanowiska pomiarowego, b) ustawianie tarczy pod zadaniem kątem padania wiązki, c) tarcza testowa na którą naklejano badane materiały

Fig. 1. Testing platform: a) platform orientation to measurement station, b) set target plate at a given angle of incidence of the beam, c) the target plate on which testing materials were mounted

Podziałka została naklejona na poziomą podstawkę umieszczoną na spodarce sygnału. Pierwszą istotną czynnością wykonywaną przed przystąpieniem do pomiarów było takie wyjustowanie podstawki, aby tarcza celownicza po ustawieniu jej na zero podziałki gradowej, była ustawiona prostopadłe do osi celowej instrumentu. Umożliwiał to system podobny do zestawu muszka-szczerbinka używanego w broni strzeleckiej. Na podstawce (rys. 1a) mocowano pionową płytkę, ustawioną prostopadłe do osi podłużnej podstawki (którą należało doprowadzić do równoległości z osią wiązki laserowej dalmierza). Na płytce naniesiona była cienka pionowa kreska, ustawiona dokładnie nad osią podłużną platformy. Dodatkowo w pewnej odległości od płytki zamocowana była pionowo przysłona, z wąską szczeliną ustawioną również dokładnie na osi podstawki. Justowanie odbywało się poprzez naprowadzenie celowej instrumentu na pionową kreskę na płytce, a następnie taki obrót podstawki aby kreska ta znalazła się w koincydencji ze szczeliną przysłony. Po ustaleniu położenia systemu pomiarowego demontowano układ płytka-przysłona, mogący zakłócić pomiar odległości. Jako tarczę celowniczą wykorzystano standardową obrotową tarczę geodezyjną do pomiaru kątów,

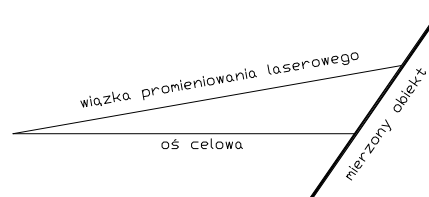
której oś pionowa pokrywa się dokładnie z osią jej obrotu. Oznaczało to, że naklejenie na tarczę jakiegokolwiek materiału testowego o grubości d , powodowało powstanie ekscentru, który po obrocie tarczy celowniczej o określony kąt dodatkowo się powiększał. Znajomość grubości każdego z naklejanych materiałów, oraz kątów przy jakich wykonywano testy, pozwoliły wyliczyć poszczególne wartości ekscentru i odpowiednio zredukować mierzone długości. Wiązka promieniowania laserowego na większych odległościach mogła mieć przekrój poprzeczny większy od wymiarów tarczy celowniczej ustawionej pod ostrym kątem, powodując zaburzenia mierzonej odległości. Aby uniknąć takich niejednoznaczności powiększono standardową tarczę celowniczą do wymiarów widocznych na rys. 1c.

Wszystkie testy prowadzono dla materiałów posiadających temperaturę otoczenia (ok. 15°C) oraz podgrzanych za pomocą termowentylatora. Podgrzewanie symulowało wzrost temperatury celu związany z nasłonecznieniem. Podczas nagrzewania cele osiągały różne temperatury, zależnie od zdolności absorpcji ciepła przez materiał. Ponieważ temperatury po podgrzaniu mierzone na powierzchni materiałów, a uzyskane dokładnie były uzależnione od gradientu temperatury wewnątrz próbek, który dodatkowo podczas ich stygnięcia podlegał zmianom, zrezygnowano z podawania wartości temperatur, jako mało miarodajnych.

Testy dalmierza wykonano na bazach o długościach 25, 50, 75 i 100 metrów. Kąty ustawienia tarczy celowniczej względem wiązki laserowej ustalono na 100, 80, 60 i 40 grad. Pomiar przeprowadzono we wszystkich kombinacjach długości baz, kątów padania wiązki, temperatur i rodzajów materiałów testowych, w trybie pomiarowym standard, zapewniającym uzyskanie najlepszych dokładności. Pomiar na bazach o długościach do 50 metrów odbywały się w zaciemnieniu. Dłuższe bazy testowe wystawione były jednostronnie na światło dzienne, jednak pomiary wykonywano w dni pochmurne, a tarczę obracano w stronę zaciemnioną.

Celem porównania otrzymanych odległości z faktycznymi długościami baz, pomierzono je za pomocą tachimetru TCA 2003 o dokładności 1mm+1ppm (do przyzmatu dalmierczego).

W tachimetrze Leica TCRA 1102+ przed przystąpieniem do testów, należało dokonać justowania wiązki lasera względem osi celowej instrumentu, mającego zapewnić ich pokrycie. Jak ustalono podczas wcześniejszych badań, z uwagi na rozmycie krawędzi płamki lasera nawet na krótkich dystansach, czynności tej nie da się przeprowadzić precyzyjnie. Ostatecznie wiązka lasera będzie zatem przebiegała na lewo lub prawo od punktu celowania. Podczas testów związanych z obrotem tarczy, nastąpi więc skrócenie lub wydłużenie rejestrowanych odległości (rys. 2).



Rys. 2. Zależność rejestrowanej odległości od justowania wiązki lasera dla obiektów ustawionych pod kątem względem osi celowej

Fig. 2. Dependence of the measured distance on the laser beam adjustment for objects angled to the axis of collimation

Zjawisko to wyeliminowano z wykorzystaniem dołączonej do grupy testowanych materiałów folii dalmierzej. Folia cechuje się tym, że obserwowana pod różnymi kątami padania wiązki nie powoduje powstania różnic mierzonej odległości, właściwych części innych materiałów. Przeprowadzone dla niej testy pozwoliły zatem wychwycić zależności pomiędzy kątem ustawienia celu i mierzoną odległością, spowodowane przez błąd justowania dalmierza. Dzięki temu wprowadzono odpowiednie redukcje do wyników uzyskanych dla pozostałych materiałów.

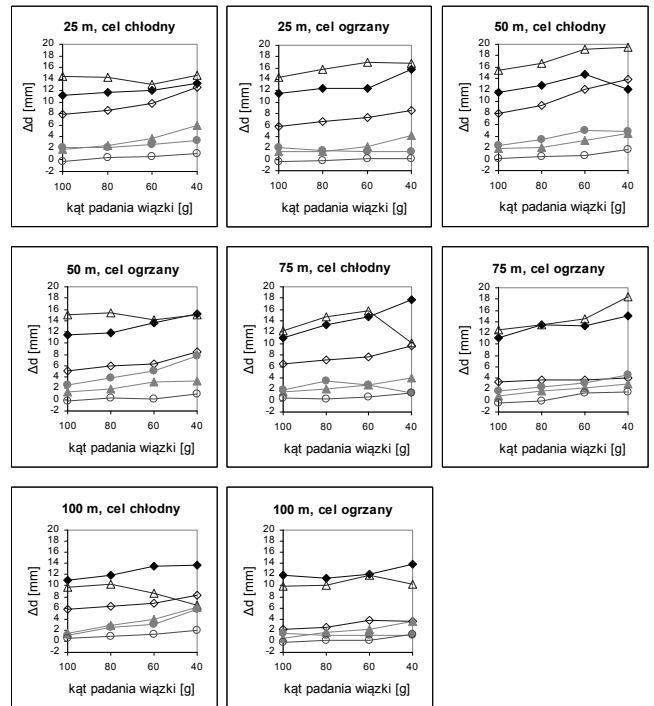
Precyzyjne wyznaczenie redukcji okazało się czynnością wymagającą bardzo dużej staranności i powtarzalności przy zadawaniu odpowiednich kątów padania wiązki. Niektóre testy musiano powtórzyć kilkakrotnie z uwagi na niezadowolające wyniki.

Pomiar każdego materiału, przy każdym z opisanych wyżej ustawień powtarzano 30-krotnie, celem uzyskania serii do wnioskowania statystycznego. Z każdej serii obliczano wartość średnią odległości oraz odchylenie standardowe. Wyniki pomiarów zawarto w tabeli 1. Danym z tabeli odpowiadają wykresy na rys. 3.

Tab. 1. Wyniki testów dalmierza bezzwierciadlanego instrumentu TCRA 1102+, (uwzględniające zależności: rodzaj materiału, długość bazy, kąt padania wiązki, temperatura materiału), zredukowane z tytułu grubości materiałów oraz błędu justowania dalmierza. g - grubość materiału, Δd - różnica między średnią odległością obserwowaną i długością bazy, σ - odchylenie standardowe

Tab. 1. Testing results of reflectorless rangefinder TCRA 1102+ (concerning: type of material, base length, angle of incidence of the beam, material temperature) reduced by material thickness and beam adjustment error. g - material thickness, Δd - difference between mean observation distance and base length, σ - standard deviation

Kąt padania	Styropian (1) g = 29,0 [mm]		Plastik (2) średnia przezroczystość g = 3,3 [mm]		Plastik (3) słaba przezroczystość g = 2,6 [mm]		Pianka (4) mała gęstość, dobra przezroczystość g = 7,5 [mm]		Guma (5) średnia gęstość, średnia przezroczystość g = 2,8 [mm]		Guma (6) duża gęstość, słaba przezroczystość g = 1,2 [mm]	
	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ
[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
baza 25 m długość bazy d=25,4354 cel chłodny												
100	11,2	0,3	7,8	0,2	1,8	0,4	14,5	0,3	2,2	0,2	-0,2	0,2
80	11,7	0,3	8,5	0,4	2,5	0,0	14,3	0,2	2,2	0,3	0,4	0,2
60	12,1	0,4	9,7	0,2	3,8	0,2	13,1	0,7	2,7	0,5	0,6	0,0
40	13,2	0,5	12,5	0,4	5,9	0,4	14,7	0,5	3,3	0,5	1,1	0,4
cel ogrzany												
100	11,5	0,4	5,7	0,4	1,3	0,3	14,3	0,3	2,0	0,4	-0,4	0,5
80	12,5	0,2	6,6	0,4	1,3	0,5	15,7	0,4	1,6	0,3	-0,2	0,4
60	12,4	0,6	7,3	0,5	2,3	0,6	17	0,8	1,3	0,4	0,2	0,5
40	15,7	0,3	8,5	0,3	4,1	0,4	16,9	0,3	1,3	0,5	0,2	0,5
baza 50 m długość bazy d=50,2351 cel chłodny												
100	11,7	0,2	7,9	0,5	1,8	0,2	15,5	0,4	2,4	0,3	0,1	0,3
80	12,8	0,5	9,4	0,3	2,1	0,4	16,7	0,6	3,4	0,4	0,4	0,3
60	14,8	0,5	12,2	0,2	3,3	0,2	19,2	0,6	4,9	0,6	0,7	0,3
40	12,2	0,6	13,9	0,5	4,5	0,5	19,5	0,3	4,8	0,4	1,6	0,5
cel ogrzany												
100	11,5	0,5	5,1	0,7	1,3	0,3	15,0	0,6	2,6	0,5	-0,3	0,6
80	11,8	0,4	5,9	0,4	1,9	0,6	15,3	0,4	3,8	0,5	0,3	0,4
60	13,7	0,7	6,3	0,6	3,2	0,6	14,1	0,9	5,1	0,3	0,1	0,7
40	15,2	0,7	8,5	0,8	3,3	0,4	15,0	0,7	7,7	0,6	1,1	0,6
baza 75 m długość bazy d=75,7345 cel chłodny												
100	11,0	0,6	6,5	0,4	1,6	0,3	12,2	0,8	1,8	0,4	0,4	0,5
80	13,3	0,6	7,1	0,5	2,1	0,3	14,7	0,5	3,5	0,4	0,3	0,3
60	14,7	0,4	7,7	0,5	2,8	0,6	15,8	0,6	2,7	0,6	0,6	0,4
40	17,7	0,7	9,7	0,3	3,9	0,4	10,1	0,9	1,4	0,7	1,3	0,6
cel ogrzany												
100	11,2	0,3	3,3	0,6	0,8	0,5	12,6	0,6	1,8	0,5	-0,4	0,7
80	13,5	0,5	3,7	0,6	1,8	0,7	13,5	0,4	2,4	0,4	-0,1	0,4
60	13,3	0,8	3,7	1,0	2,3	0,4	14,5	0,8	3,1	0,7	1,3	0,6
40	15,1	0,6	4,0	0,4	2,9	0,6	18,4	0,8	4,6	0,6	1,5	0,6
baza 100 m długość bazy d=100,6313 cel chłodny												
100	11,0	0,8	5,7	0,6	1,4	0,4	9,7	1,0	1,0	0,6	0,5	0,3
80	11,8	0,8	6,3	0,4	2,9	0,5	10,3	1,2	2,5	0,8	0,9	0,6
60	13,5	0,9	6,9	0,7	3,9	0,7	8,7	0,7	3,1	0,7	1,2	0,5
40	13,7	1,3	8,2	0,6	6,1	0,7	6,4	0,9	5,8	1,0	1,9	0,7
cel ogrzany												
100	11,9	0,5	2,1	0,9	0,5	0,7	9,9	0,7	1,4	0,9	-0,2	0,6
80	11,3	1,0	2,5	1,3	1,6	0,9	10	0,7	1,1	0,5	0,1	1,0
60	12,0	0,9	3,8	0,7	2,1	1,2	11,9	1,3	1,1	0,7	0,2	0,8
40	13,9	0,8	3,6	1,1	3,5	0,9	10,2	1,1	1,0	1,0	1,3	1,0



Rys. 3. Wyniki testów (tab. 1) dalmierza bezzwierciadlanego instrumentu TCRA 1102+, (uwzględniające zależności: rodzaj materiału, długość bazy, kąt padania wiązki, temperatura materiału) zredukowane z tytułu grubości materiałów oraz błędu justowania dalmierza

Fig. 3. Testing results (Tab. 1) of reflectorless rangefinder TCRA 1102+ (concerning: type of material, base length, angle of incidence of the beam, material temperature) reduced by material thickness and beam adjustment error

Podczas prowadzonych testów zaobserwowano silniejszą niż początkowo przewidywano zależność mierzonych odległości od stopnia przenikalności optycznej większości badanych materiałów. Skłoniło to autorów do dokonania dodatkowych, uproszczonych badań, mających na celu porównanie testowanego dalmierza z kilkoma innymi konstrukcjami. Do testów wybrano następujące instrumenty:

1. Leica TCR 407 Power – dalmierz o tych samych parametrach co TCRA 1102+
2. Leica TCRA 1200 – dalmierz o tej samej długości fali nośnej co TCRA 1102+, ale o większym zasięgu
3. Trimble 5000 – dalmierz o innej długości fali nośnej i krótszym zasięgu niż TCRA 1102+

Parametry wszystkich testowanych dalmierzy zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Porównanie wybranych parametrów testowanych dalmierzy
Tab. 2. Comparison of selected parameters of testing rangefinders

	TCRA 1102+	TCR 407 Power	TCRP 1201	Trimble 5503 DR
Dokładność w trybie standard (odległość do 50m)	3 mm + 2 ppm	3 mm + 2 ppm	3 mm + 2 ppm	3 mm + 2 ppm
Zasięg	~ 170 m	~ 170 m	~ 500 m	~ 70 m
Fala nośna	670 nm	670 nm	670 nm	660 nm
Rozbieżność wiązki	0,15*0,35 mrad	0,15*0,35 mrad	0,15*0,35 mrad	0,4*0,8 mrad

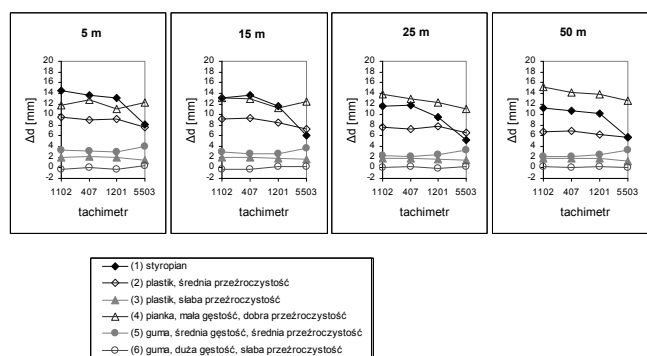
Badania prowadzono w podobny sposób jak dla instrumentu TCRA 1102+, ograniczając je do prostokątnego oświetlenia celów i bez ich podgrzewania. Ponieważ testowane zależności uwidaczniają się silniej na krótkich odległościach, badania przeprowadzono

no dla baz o długościach : 5, 15, 25 i 50 m. Wyniki testów zgro-
madzono w tabeli 3. Danym z tabeli odpowiadają wykresy na rys. 4.

Tab. 3. Wyniki porównania dalmierzy bezzwierciadlanych: TCRA 1102+,
TCR 407, TCRP 1201, 5503DR (uwzględniające zależności: rodzaj
materiału, długość bazy) zredukowane z tytułu grubości materiałów.
Prostopadle usytuowanie wiązki względem celu. Δd - różnica między
średnią odległością obserwowaną i długością bazy, σ - odchylenie
standardowe

Tab. 3. Comparison results of reflectorless rangefinders: TCRA 1102+,
TCR 407, TCRP 1201, 5503DR (concerning: type of materials,
base length) reduced by material thickness. Perpendicular location of
beam to the target, Δd - difference between mean observation
distance and base length, σ - standard deviation

Instrument	Styropian (1) g = 29,0 [mm]		Plastik (2) średnia przezroczystość g = 3,3 [mm]		Plastik (3) słaba przezroczystość g = 2,6 [mm]		Pianka (4) mała gęstość, dobra przezroczystość g = 7,5 [mm]		Guma (5), średnia gęstość, średnia przezroczystość g = 2,8 [mm]		Guma (6), duża gęstość, słaba przezroczystość g = 1,2 [mm]	
	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
baza 5 m, długość bazy d = 5,2712 [m]												
TCRA1102	14,5	0,3	9,5	0,2	2,0	0,0	11,7	0,2	3,4	0,2	-0,3	0,2
TCR 407	13,7	0,0	9,0	0,0	2,2	0,0	12,7	0,3	3,2	0,3	0,1	0,2
TCRP1201	13,2	0,2	9,2	0,0	1,9	0,0	11,0	0,3	2,9	0,3	-0,2	0,0
5503DR	8,1	0,3	7,6	0,2	1,5	0,2	12,2	0,5	4,1	0,2	0,4	0,0
baza 15 m, długość bazy d = 15,8462 [m]												
TCRA1102	13,2	0,2	9,1	0,2	1,9	0,0	13,2	0,4	2,9	0,2	-0,2	0,2
TCR 407	13,6	0,3	9,4	0,0	2,0	0,2	13,0	0,4	2,7	0,2	-0,2	0,0
TCRP1201	11,5	0,2	8,5	0,2	1,7	0,2	11,3	0,3	2,6	0,2	0,2	0,0
5503DR	6,0	0,3	7,3	0,2	1,6	0,2	12,5	0,5	3,7	0,2	0,3	0,2
baza 25 m, długość bazy d = 25,1735 [m]												
TCRA1102	11,5	0,3	7,6	0,2	1,7	0,2	13,8	0,5	2,3	0,2	0,0	0,0
TCR 407	11,8	0,3	7,2	0,3	1,7	0,0	12,9	0,2	2,1	0,2	0,3	0,2
TCRP1201	9,6	0,2	7,8	0,2	1,6	0,3	12,2	0,3	2,5	0,3	-0,1	0,2
5503DR	5,2	0,5	6,6	0,2	1,4	0,2	11,1	0,6	3,3	0,3	0,3	0,3
baza 50 m, długość bazy d = 50,5453 [m]												
TCRA1102	11,2	0,2	6,8	0,3	1,8	0,2	15,2	0,3	2,1	0,5	0,3	0,2
TCR 407	10,7	0,3	7,0	0,2	1,7	0,3	14,2	0,6	2,2	0,2	0,1	0,2
TCRP1201	10,2	0,2	6,3	0,3	1,8	0,2	13,8	0,5	2,4	0,3	0,3	0,3
5503DR	5,8	0,4	5,8	0,3	1,3	0,2	12,6	0,4	3,4	0,3	0,1	0,2



Rys. 4. Wyniki porównania (Tab.3) dalmierzy bezzwierciadlanych : TCRA 1102+,
TCR 407, TCRP 1201, 5503DR (uwzględniające zależności : rodzaj
materiału, długość bazy) zredukowane z tytułu grubości materiałów

Fig. 4. Comparison results (Tab. 3) of reflectorless rangefinders: TCRA 1102+,
TCR 407, TCRP 1201, 5503DR (concerning: type of materials, base
length) reduced by material thickness. Perpendicular location of
the beam to the target

Ostatnią grupą przeprowadzonych badań była ocena powtarzalności wyników dla danego materiału (próbki), prowadzona w trzech miejscach każdej próbki. Z uwagi na niejednorodną strukturę wewnętrzną niektórych materiałów połączoną z zależnością mierzonej odległości od ich przenikalności optycznej oczekiwano rozbieżnych wyników. Testy przeprowadzono dla instrumentu TCRA 1102+, na bazie 25 m, przy prostopadłym oświetleniu celów i bez ich podgrzewania. Wyniki zgrupowano w tabeli 4.

Tab. 4. Porównanie odległości dla trzech niezależnych miejsc (próbek) każdego materiału. Dalmierz bezzwierciadlany instrumentu TCRA 1102+,
prostopadle usytuowanie wiązki względem celu, dane zredukowane
z tytułu grubości materiałów. Δd - różnica między średnią odległością
obserwowaną i długością bazy, σ - odchylenie standardowe

Tab. 4. Comparison of distances for three independent sites (samples) of each
material. Reflectorless rangefinder of TCRA 1102+ tachometer,
perpendicular location of beam to the target, data reduced by material
thickness. Δd - difference between mean observation distance and
base length, σ - standard deviation

Instrument	Styropian (1) g = 29,0 [mm]		Plastik (2) średnia przezroczystość g = 3,3 [mm]		Plastik (3) słaba przezroczystość g = 2,6 [mm]		Pianka (4) mała gęstość, dobra przezroczystość g = 7,5 [mm]		Guma (5), średnia gęstość, średnia przezroczystość g = 2,8 [mm]		Guma (6), duża gęstość, słaba przezroczystość g = 1,2 [mm]	
	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ	Δd	σ
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
baza 25 m, długość bazy d = 25,3743 [m]												
Próbka 1	11,3	0,2	7,5	0,2	1,7	0,2	14,3	0,4	2,0	0,2	-0,2	0,2
Próbka 2	11,8	0,5	7,9	0,2	1,8	0,0	13,3	0,5	2,3	0,2	-0,2	0,2
Próbka 3	10,7	0,3	7,5	0,0	1,7	0,2	12,8	0,3	2,5	0,3	-0,3	0,3

3. Analiza wyników

Wiązka promieniowania laserowego padająca na mierzony cel może ulegać zmianom na skutek szeregu zjawisk właściwych dla określonych substancji (np. absorpcji, rozpraszaniu, pełnemu lub częściowemu odbiciu, załamaniu na granicy ośrodków) opisanych w wielu pozycjach [8, 9, 10, 11, 12].

3.1. Analiza dokładności pomiaru odległości ze względu na rodzaj obserwowanego materiału

Analizę wyników warto rozpocząć od omówienia różnic w rejestrowanych odległościach, związanych z rodzajem obserwowanego materiału. Rozbieżności te wynikają z przepuszczalności optycznej materiału i towarzyszącemu jej rozpraszaniu światła w jego wnętrzu. W zależności od grubości i stopnia przezroczystości materiału, wiązka może częściowo lub też całkowicie przeniknąć substancję, może ulec powtórnemu załamaniu na granicy z kolejnym ośrodkiem, a także odbiciu od kolejnego ośrodka. Współczynnik załamania uzależniony jest między innymi od struktury wewnętrznej materiałów, w przypadku gdy nie jest ona jednorodna, a niejednorodności mają wymiary większe od długości fali, współczynnik może się zmieniać. Współczynnik załamania zależy też od długości fali świetlnej, w związku z tym wiązki pochodzące z instrumentów o różnych długościach fal, będą ulegały odmiennemu załamaniu. Na podstawie szeregu zjawisk występujących w oświetlonych substancjach można ocenić zachowanie poszczególnych badanych materiałów.

Wstępnie przeanalizowano wyniki dla instrumentu TCRA 1102+ na bazie 25 m (tab. 1 dla prostopadłego oświetlenia materiałów). Najbardziej neutralne zachowanie wykazywała guma (6) o bardzo słabej przejrzystości. Wiązka promieniowania praktycznie nie wnikała do struktury substancji, w efekcie mierzone długości nie wykazywały istotnych różnic względem długości bazy. Różnice dochodzące do ok. 2 mm, pojawiły się natomiast dla

plastiku (3) o słabej przezroczystości oraz gumy (5) o drobnoziarnistej strukturze gąbczastej i średniej przepuszczalności światła. Cele były podobnej grubości (2,6 i 2,8 mm) i mimo całkowicie odmiennych struktur wewnętrznej pod względem gęstości i uporządkowania, w podobnym zakresie wpływały na obserwowane długości. Interesujących spostrzeżeń dostarczył plastik (2) o średniej przepuszczalności światła. Grubość materiału wynosiła 3,3 mm, natomiast na długości 25 m, obserwowane różnice względem długości bazy wyniosły ponad 7,5 mm, były więc znacznie większe niż grubość materiału. Wynikać to może z silnego załamania wiązki w strukturze materiału o dużej gęstości. Podobne efekty zaobserwowano dla substancji o odmiennych własnościach czyli pianki (4) o gruboziarnistej strukturze gąbczastej i dobrej przepuszczalności światła. W tym wypadku gęstość materiału była znacznie mniejsza (a więc mniejsze załamanie), jednak wobec jego znacznie większej przepuszczalności światła, a dodatkowo niejednorodnej struktury, fala rozchodziła się chaotycznie w wielu kierunkach wewnątrz substancji. Przy grubości celu ok. 7,5 mm, na odległości 25 m obserwowano zwiększenie długości o ok. 15 mm. Ostatni testowany materiał – styropian (1) o grubości 29 mm, powodował zmiany obserwowanej długości o ponad 11 mm.

Plamka lasera była widoczna w mniejszym lub większym stopniu od tylnej strony każdego (z wyjątkiem gumy (6)) z mierzonych materiałów. Ostateczne odbicie wiązki następowało zatem od różnych miejsc nieprzezroczystej tarczy (uzależnionych od zmian kierunku wiązki po przejściu przez testowane substancje), na którą naklejano cele.

Powyższe obserwacje dotyczyły testów na bazie 25 m. Porównanie wyników dla pozostałych długości baz (tab. 1 dla prostopadłego oświetlenia materiałów, tab. 3 dla tachimetru TCRA 1102+), pokazuje dodatkowe interesujące zależności. Dla wszystkich celów, (z wyjątkiem pianki (4) oraz gumy (6)), zaobserwowano zmniejszanie zmian wraz z rosnącą odległością od instrumentu. Zjawisko to można łączyć z rozproszeniem wiązki promieniowania w środowisku. Na krótkiej odległości, mniej rozpraszona w atmosferze wiązka przenika większe partie mierzonego materiału niż ma to miejsce na dużym dystansie, co skutkowało może zwiększeniem zmian długości. Zjawisko to występowało na największą skalę dla plastiku (2), gdzie na bazie 5m, zmiany długości wynosiły ok. 9,5 mm, a na bazie 100m zmniejszały się do ok. 5,5 mm (4 mm różnicy). Odmiennie wyniki otrzymano dla gumy (6), dla której wraz z rosnącą odległością od instrumentu zmiany długości ulegały zwiększeniu. Ponieważ był to materiał praktycznie nieprzezroczysty, a różnica mierzonych długości, choć zwiększała się systematycznie, była nieznaczna i wyniosła zaledwie 0,8 mm, trudno o właściwą interpretację tego przypadku. Interesujące wyniki otrzymano dla pianki (4), dla której początkowo wraz ze wzrostem odległości (do 50m) obserwowano systematyczny wzrost, a następnie spadek przyrostów długości (baza 5m – 11,7 mm, baza 50m – 15,5 mm, baza 100 m – 9,7 mm). Pianka (4) okazała się materiałem powodującym najbardziej chaotyczne rozproszenie wiązki, co być może zdecydowało o otrzymaniu takich wyników.

Poza wykonanymi testami zaobserwowano dodatkowo, że na bardzo krótkich odległościach (ok. 1 m) niektóre materiały (np. mleczne plexi, o grubości ok. 2,5 mm), mogą powodować zmiany mierzonych długości dochodzące nawet do 30 mm.

Wszystkie opisane powyżej zależności zaobserwowano również dla pozostałych instrumentów (tab. 3, rys. 4). Dalmierze firmy Leica pracujące przy tej samej długości fal (670 nm) uzyskały bardzo zbliżone wyniki. W przypadku instrumentu Trimble 5503DR, pracującego na innej długości fali (660nm), zależności również się potwierdziły, nieco inne natomiast były wielkości obserwowanych różnic względem długości bazy. W przypadku jednych materiałów różnice były większe niż dla dalmierzy Leica, w przypadku innych mniejsze, nie można zatem usystematyzować wyników. Zauważalnie lepsze wyniki (około dwukrotnie dla każdej z testowanych baz) dalmierz Trimble osiągnął dla styropianu (1).

3.2. Analiza dokładności pomiaru długości ze względu na kąt padania wiązki

Kolejne analizy związane były z kątem padania wiązki na cel. Obrazujące je zależności zawarte w tab. 1 najłatwiej przeanalizować na rysunku 3. Wykresy wykazują zależność rejestrowanych długości od kątów padania wiązki, niemniej wpływają one na wyniki przeważnie w mniejszym stopniu niż rodzaj obserwowanego materiału.

Uzyskanie poprawnych wyników, jak wspomniano we wstępie, okazało się trudnym zadaniem z uwagi na konieczność zapewnienia wysokiej powtarzalności wszystkich ustawień testowych, potrzebnych do wprowadzenia odpowiednich redukcji (z uwagi na justowanie wiązki dalmierzej i grubość materiałów). Zadowolające wyniki w niektórych wypadkach osiągnięto dopiero po przeprowadzeniu kilkukrotnych prób. Nieudane próby wykazywały najczęściej gwałtowne (przekraczające 10 mm) wzrosty lub spadki rejestrowanych długości następujące po obrocie tarczy o jeden skok kątowy (20g). Dodatkowo powierzchnia niektórych materiałów (szczególnie styropianu (1) i pianki (4)) nie była całkowicie płaska (nierówności w granicach ok. 0,5 mm), co mogło powodować niedokładne przeliczenie redukcji. Wyniki testów przy zmiennych kątach padania wiązki należy więc traktować z pewną ostrożnością. Testy wykonano dla kątów padania nie mniejszych niż 40g, ponieważ próbne badania przy kącie 20g były obciążone dużymi niepewnościami pomiarowymi.

Wszystkie testowane materiały wykazały zależność mierzonej odległości od kąta padania wiązki. Najmniejsze zmiany (do 2 mm) wystąpiły dla gumy (6), która była materiałem o najmniejszej przepuszczalności światła. Plastik (2) generował maksymalne zmiany do 6 mm, plastik (3), do 4,5 mm. Ogólnie materiały o dużej gęstości i jednorodnej strukturze (plastik (2) i (3), guma (6)), wraz ze zmniejszaniem kąta padania wiązki, powodowały zwiększenie mierzonej długości. Dla materiałów o niejednorodnej strukturze wewnętrznej, generalnie także następował wzrost długości, jednak zdarzały się też sytuacje odwrotne. Wyniki takie można tłumaczyć tym, że na skutek obrotu takich materiałów, oświetlane zostają zmienne elementy ich niejednorodnej struktury, niejednokrotnie rozpraszające wiązkę. Z tego powodu wraz ze zmianą kąta, odległości mogą się zmniejszać lub zwiększać. Maksymalne zaobserwowane zmiany, wyniosły w tym wypadku 5-7 mm w zależności od rodzaju materiału.

3.3. Analiza dokładności pomiaru długości w różnych miejscach każdego z materiałów

Kolejne badania miały na celu sprawdzenie powtarzalności wyników w różnych miejscach każdego z materiałów. Wykonane zostały one w trzech niezależnych jego miejscach (próbkach) (tab. 4). Materiały o jednorodnej lub drobnoziarnistej chaotycznej strukturze, dla żadnej z próbek nie wykazały różnic większych niż 0,5 mm. Materiały niejednorodne o dużym ziarnie tj. styropian (1) oraz pianka (4) wywoływały zmiany odległości w próbkach 2-3 krotnie większe niż pozostałe substancje obserwowane zmiany, wyniosły w tym wypadku 5-7 mm w zależności od rodzaju materiału.

3.4. Analiza dokładności pomiaru długości przy zmianie temperatury

Ostatnią omawianą kategorią testów są wyniki związane z temperaturą mierzonych celów (tab. 1, rys. 3). Podane na ograniczone były jedynie cele, których struktura wewnętrzna nie zawierała pęcherzyków powietrza (plastik (2) i (3), guma (6)). Odległość mierzona do każdego z tych materiałów była po ogrzaniu mniejsza niż dla celu chłodnego. Dodatkowo na bazach o większych długościach zależność ulegała systematycznemu wzrostowi. Zjawisko to można łączyć ze zmniejszaniem się gęstości substancji wraz ze

wzrostem temperatury (rozszerzalność cieplna). Mniejsza gęstość powoduje zmniejszenie współczynnika załamania, a więc i mniejsze różnice mierzonych odległości względem bazy. Na bazie 100 m różnice w mierzonych długościach zmniejszyły się po ogrzaniu o ponad 3 mm dla plastiku (2), a dla pozostałych o ok. 1 mm.

3.5. Ocena odchyłeń standardowych serii pomiarowych

Podsumowując dyskusję wyników, należy poddać ocenie wartości odchyłeń standardowych wyznaczonych dla każdej 30-to obserwacyjnej serii. Wskazują one na dobrą powtarzalność wyników uzyskanych w poszczególnych konfiguracjach pomiarowych.

Ogólnie należy zauważyć, że wyniki potwierdzają łatwy do przewidzenia wzrost odchyłeń połączony ze wzrostem mierzonych odległości, niezależnie od testowanego materiału. Wzrost odchyłeń, choć niezbyt wyraźny, można obserwować również dla większości pomiarów wykonanych przy coraz ostrzejszych kątach padania wiązki lasera.

Materiały przepuszczające światło w połączeniu z ich niejednorodną strukturą wewnętrzną, porprzetykaną komorami powietrza (styropian (1), pianka (4)) powodują wzrost odchyłeń, ponieważ wiązka ulega w ich wnętrzu wielokrotnemu załamaniu.

Należy odnotować wzrost odchyłeń związany ze zmianą temperatury materiału, zaobserwowany dla wszystkich celów o dużej gęstości, łatwo pochłaniających ciepło (plastik (1) i (2), guma jednolita (6)). Wynika on z faktu omówionej zmiany rejestrowanej odległości powiązanej ze zmianą temperatury tego typu materiałów. Z uwagi na fakt że nagrzana uprzednio próbka ulegała w czasie pomiaru stygnięciu, zmieniały się też rejestrowane odległości. Początkowo odchylenia standardowe osiągały większe wartości niż zamieszczone w tabeli 1. Aby ograniczyć to zjawisko, 30-krotne pomiary dla próbek podzielono na serie po 10 obserwacji, po których następowało ponowne ogrzanie materiału, celem podtrzymania jego temperatury.

4. Porównanie tachimetru bezzwierciadlanego z naziemnym skanerem laserowym

Zasada działania tachimetru bezzwierciadlanego jest analogiczna z technologią naziemnego skaningu laserowego [13, 14]. Informacja o przestrzennym położeniu punktu jest określana na podstawie pomierzonej odległości oraz zmiany kątów obrotu. Obydwa systemy wysyłają wiązkę światła laserowego (w zakresie widzialnym lub bliskiej podczerwieni), która po odbiciu od mierzonego obiektu powraca do odbiornika i jest rejestrowana. Na podstawie pomiaru czasu (dalmierz impulsowy) lub różnicy faz (dalmierz fazowy) wyznaczana jest odległość. Odmienna jest natomiast sama procedura wykonania pomiaru. Dla tachimetru wykonanie pomiaru danego punktu jest czynnością jednoznaczną, polegającą na nakierowaniu krzyża w obiektywie lunety instrumentu na cel. Nie jest to możliwe w przypadku skanera który pomiar wykonuje w ustalonym interwale kątowym. Nie ma możliwości pomiaru jednoznacznie określonego punktu, nawet w momencie skanowania z maksymalną rozdzielczością [3]. Z tego powodu, bardziej miarodajne jest wykonanie testów dla tachimetrów bezzwierciadlanych, a ich wyniki zachowują ważność również dla skanerów laserowych. Ogólnie, niniejsze opracowanie wydaje się być bardziej istotne z punktu widzenia dokładności skaningu laserowego niż tachimetrii bezzwierciadlanej. Tachimetry służą bowiem zazwyczaj do pomiaru pojedynczego obiektu budowlanego, który jeśli zawiera elementy syntetyczne, to zwykle są one wykonane z jednakowych materiałów, względne niedokładności mierzonych elementów mają więc ograniczoną skalę. Skanery laserowe mierzą natomiast wszystkie elementy otoczenia, a umiejscowione np. wewnątrz pomieszczenia, w którym może się znajdować wiele typów materiałów syntetycznych, dadzą w wyniku większe błędy względne (jak wykazały badania,

kluczowym czynnikiem wpływającym na dokładność pomiaru jest rodzaj materiału syntetycznego).

Dotychczas niewiele instytucji opublikowało metody i rezultaty testów badających dokładność skanerów laserowych. Wstępne projekty badawcze były prowadzone m.in. przez Instytut Informatyki Przestrzennej i Technologii Pomiarowych z Mainz [15] czy przez Instytut Fotogrametrii i Teledetekcji (IPF) z Karlsruhe [16]. Uzyskane wyniki wymagają jednakże weryfikacji i dalsze bardziej szczegółowe analizy są konieczne.

5. Wnioski

Zebrane podczas testów wnioski zgrupowano w postaci punktowej:

1. Większość materiałów syntetycznych na skutek przepuszczalności światła zmienia (zwiększa) mierzoną długość w stosunku do długości rzeczywistej. Największe zmiany następują dla substancji o dużej gęstości i dobrej przepuszczalności światła. W tych wypadkach zmiany mogą być nawet kilkukrotnie większe niż grubość samego materiału. Należy wziąć pod uwagę, że w czasie badań cele były naklejane na nieprzezroczystą powierzchnię. W praktyce, jeżeli wiązka po przeniknięciu przez materiał o dobrej przepuszczalności światła napotka przeszkodę dopiero na dalszej odległości, zmiany długości mogą być jeszcze większe.
 2. Kolejny ważny wniosek dotyczy wielkości zmian długości powiązanych z mierzoną odległością. Substancje przepuszczające światło, na skutek mniejszej penetracji materiału przez rozproszoną na większej odległości wiązkę, wykazują spadek zmian rejestrowanych długości. Pomiary są zatem tym dokładniejsze im większa mierzona odległość. Stoi to w sprzeczności z postulatem wykonywania pomiarów na niewielkich odległościach, ze względu na spowodowany rozbieżnością wiązki wzrost plamki na większych dystansach. Plamka o dużym przekroju może obejmować elementy znajdujące się w otoczeniu obserwowanego punktu, zaburzając w ten sposób mierzoną odległość. Ostatecznie należy zauważyć, że z powodu obydwu wzajemnie wykluczających się postulatów, trudno oczekiwać wysokiej dokładności pomiaru materiałów syntetycznych łatwo przenikalnych przez światło.
 3. Porównanie dalmierzy wykazało, że zauważalne różnice w mierzonych odległościach (przy zachowaniu pozostałych prawidłowości) występują przede wszystkim dla konstrukcji generujących wiązkę promieniowania o różnych długościach fal.
 4. Pomiary przy zmiennych kątach padania wiązki wpływają na zmiany obserwowanej długości, najczęściej powodując jej zwiększenie. Materiały o niejednorodnej strukturze wewnętrznej, przy zmianie kąta padania mogą wnosić nieprzewidywalne zmiany do mierzonych odległości.
 5. Materiały o niejednorodnej, gruboziarnistej strukturze wewnętrznej przepuszczające światło dają mniej powtarzalne wyniki niż materiały jednolite.
 6. Podczas testów dla substancji jednolitych (o dużej gęstości) zaobserwowano zależność rejestrowanej odległości od temperatury mierzonego celu. W praktyce na skutek dłuższego nasłonecznienia celu, zjawisko może osiągać większe wartości niż obserwowane w czasie badań.
 7. Niewątpliwie zasadnicze znaczenie dla obserwowanych zmian długości ma grubość materiałów syntetycznych. Większa grubość powoduje pojawienie się zmian w większym zakresie. Oczywiście znaczenie mają też inne właściwości substancji i dlatego np. cienkie cele o dużej gęstości dawały czasami porównywalne zmiany jak cele grube o małej gęstości.
- Powyższe spostrzeżenia opisują prawidłowości reprezentatywne także dla innych modeli dalmierzy bezzwierciadlanych, jak również dla skanerów laserowych, które bazują na analogicznej metodzie pomiaru długości.

6. Literatura

- [1] Lenda G.: Badanie zasięgu i dokładności dalmierzy bezzwierciadlanych — Examination of range and accuracy of reflectorless distancers Geodezja : półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie ; ISSN 1234-6608. Kraków 2003 t. 9 z. 1 p. 77–87.
- [2] Berenyi, A., Lovas, T., Barsi A.: (2010). Terrestrial laser scanning – civil engineering applications. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle.
- [3] Hiremagalur J., Yen K., Akin K., Bui T., Lasky T., Ravani B.: 2007. Creating standards and specifications for the use of laser scanning in caltrans projects. California AHMCT Program, University of California at Davis, California Department of Transportation.
- [4] Maciaszek J., Gawalkiewicz R.: Badanie dokładności tachimetrów i skanerów laserowych w warunkach laboratoryjnych i polowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Górnictwo z. 278, 241-258, Gliwice 2007.
- [5] Mazalová J., Valentová K., Vlčková L.: Testing of Accuracy of Reflectorless Distance Measurement of Selected Leica and Topcon Total Stations. Geoscience engineering, Ostrava 2010, Volume LVI, Issue No.1, ISSN 1802-5420.
- [6] Soudarissanane S., van Ree J., Bucksch A., Lindenbergh R.: Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality. Proceedings 3DNordOst 2007, Berlin, Niemcy 2007.
- [7] Soudarissanane S., Lindenbergh R., Gorte B.: Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37, Part B5, Pekin, Chiny 2008.
- [8] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M.: Feynmana wykłady z fizyki. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [9] Szwedowski A.: Materiałoznawstwo optyczne i optoelektroniczne, WNT, Warszawa, 1996.
- [10] Wandachowicz K.: Wyznaczanie rozkładu luminancji we wnętrzach z uwzględnieniem kierunkowo-rozproszonych charakterystyk odbiciowych materiałów, rozprawa doktorska, Poznań 2000.
- [11] Rees W.: Physical principles of remote sensing. Cambridge University Press 1990.
- [12] Szczeniowski Sz.: Optyka. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983.
- [13] Schulz T. i Ingensand H.: 2004a. Terrestrial laser scanning – investigations and applications for high precision scanning. Proceeding of the FIG Working Week-The Olympic Spirit in Surveying, Ateny, Grecja.
- [14] Kašpar M., Pospišil J., Štroner M., Křemen T., Tejkal M.: 2004. Laser scanning in civil engineering and land surveying. Vega s.r.o., Hradce Králové, Czechy
- [15] Boehler W., Borda Vicent M., Marbs A.: 2005. Investigating laser scanner accuracy, scanning.fh-mainz.de/scannertest/results300305.pdf
- [16] Voegtle T., Schwab I., Landes T.: Influence of different materials on the measurements of terrestrial laser scanner. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37, Part B5, Pekin, Chiny 2008.

otrzymano / received: 17.08.2010

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2010

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Energoelektronika

DACPOL

REKLAMA MAPA SERWISU KONTAKT

WORTAL BRANŻOWY

Kompleksowa oferta sprzedaży części i podzespołów

PARTNERZY >>>

FLIR

DACPOL

HELUKABEL

MEDCOM

Strona główna
Rejestracja
Artykuły branżowe
Katalog firm
Oferty B2B
FAQ
Kalendarium
Słownik
Forum

Wyszukaj

1USD 3.163 +0.22% 1EUR 3.8285 +0.3% 1GBP 5.6103 +0.69%

WORTAL BRANŻOWY

+ Nowości, Słownik techniczny

+ Porady specjalistów

+ Przegląd prasy

+ Katalog firm i produktów

+ Opis urządzeń i podzespołów

+ Kalendarium ważnych wydarzeń

ZAPRASZAMY: www.energoelektronika.pl

Ostatnio dodane

Firmy:
Centrum Dystrybucji Norster
więcej >>>

P.W.STOLARZ-LEMPERT sp.j.
więcej >>>

Produkty:

Kompaktowa dmuchawa grzewcza dużej wydajności

CR 030 **więcej >>>**

Promienniki podczerwiieni do maszyn rodmuchowych PET - IRK13213/98F **więcej >>>**

ul. Puławska 34 05-500 Piaseczno k. Warszawy tel. (+48) 22 70 35 290 fax. (+48) 22 70 35 101