

MICHAŁ BRACH, KAMIL BIELAK, STANISŁAW DROZDOWSKI

Dokładność pomiaru wybranymi dalmierzami laserowymi w środowisku leśnym*

Measurements accuracy of selected laser rangefinders in the forest environment

ABSTRACT

Brach M., Bielak K., Drozdowski S. 2013. Dokładność pomiaru wybranymi dalmierzami laserowymi w środowisku leśnym. Sylwan 157 (9): 671-677.

Paper presents results of measurement accuracy evaluation of two laser rangefinders (TruPulse and ForestPro integrated with MapStar compass) mounted on monopod and tripod under the forest conditions. The precise data on spatial coordinates of 34 trees in the Rogów Arboretum and 8 points from the geodetic control network in the Głuchów Forest were used. The results show that the measurement sets equipped with ForestPro and MapStar were more accurate than TruPulse ones. However, no significant influence of applied stands on the measurement accuracy was observed.

KEY WORDS

forest geodesy, forest inventory, laser rangefinder, silvicultural planning

ADDRESSES

Michał Brach ⁽¹⁾ – e-mail: Michal.Brach@wl.sggw.pl

Kamil Bielak ⁽²⁾ – e-mail: kamil_bielak@sggw.pl

Stanisław Drozdowski ⁽²⁾ – e-mail: stanislaw_drozdowski@sggw.pl

⁽¹⁾ Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa; SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

⁽²⁾ Katedra Hodowli Lasu; SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

Wstęp

Rozwój leśnictwa ekosystemowego od końca lat 80. ubiegłego wieku spowodował wzrost znaczenia ekologicznej funkcji lasów, a przez to i potrzebę kształtowania drzewostanów zróżnicowanych strukturalnie [Puettmann i in. 2009]. W praktyce leśnej przejawia się to coraz częstszym stosowaniem rębni złożonych, które przyczyniają się do powstawania drzewostanów wielogatunkowych, wielopiętrowych i różnowiekowych [Bernadzki, Brzeziecki 1999; Schütz 2002]. Duża swoboda prowadzenia cięć odnowieniowych w rębniach złożonych wymaga większych umiejętności techniczno-organizacyjnych ze strony administracji leśnej [Twaróg 1990; Bernadzki 2000; Puchalski 2000] oraz przyczynia się do sięgania po nowoczesne instrumenty pomiarowe. Do takich urządzeń należą dalmierze laserowe, które w przeciwieństwie do odbiorników nawigacyjnych są niezależne od zanikającego w warunkach leśnych sygnału satelitarnego [Brach 2012]. Dzięki temu można je wykorzystywać do wyznaczania w terenie kolejnych etapów realizacji rębni oraz inwentaryzacji istniejących płatów odnowień i roślin chronionych. Urządzenia te mogą znaleźć również zastosowanie w wielkoobszarowej inwentaryzacji stanu lasu na stałych powierzchniach kołowych.

* Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach grantów NN309 114137 i NN309 006439.

Istotnym elementem związanym ze stosowaniem dalmierzy laserowych w środowisku leśnym jest konieczność posiadania wiedzy na temat dokładności pomiarów oraz przyczyn powstawania błędów. Celem niniejszej pracy było porównanie dokładności pomiarów położenia drzew i ciągów busolowych w warunkach drzewostanowych wybranymi dalmierzami laserowymi oraz określenie ich przydatności do stosowania w praktyce leśnej.

Materiały i metody

Badania przeprowadzono w oparciu o osnowy geodezyjne zlokalizowane na terenie Leśnego Zakładu Doświadczalnego SGGW w Rogowie. Do pomiarów położenia pojedynczych drzew wykorzystano powierzchnię doświadczalną żywotnika olbrzymiego (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) na terenie Arboretum w Rogowie (ryc. 1). Obiekt wybrano ze względu na bardzo dobrą widoczność ułatwiającą jednoznaczne wskazanie celu pomiarowego pod okapem drzewostanu, ponieważ nie występowały w nim dolne warstwy. W badaniach wykorzystano 34 drzewa (osie celowe od 8 do 57 m) o położeniu wyznaczonym metodami geodezyjnymi. Wartość błędu średniego (MP) wyznaczania współrzędnych tachimetrem elektronicznym dla środka pomierzonych żywotników wynosiła $\pm 0,04$ m [Brach 2009]. Do analizy dokładności pomiaru ciągu busolowego w warunkach leśnych wybrano osnowę geodezyjną zlokalizowaną na terenie Leśnictwa Głuchów (ryc. 2). Zróżnicowane długości celowych (od 210 do 499 m), zmienne wartości azymutów boków osnowy (wszystkie główne kierunki stron świata) oraz różnorodne drzewostany stworzyły dobre warunki do przeprowadzenia niniejszych badań. Wykorzystano 8 boków istniejącej osnowy geodezyjnej o łącznej długości 2568 metrów. Były one zlokalizowane wzdłuż linii oddziałowych przebiegających przez środek kompleksu leśnego. Współrzędne punktów odniesienia wyznaczono metodami geodezyjnymi (PUWG 2000) ze średnim błędem wyznaczania punktu wynoszącym 0,06 m [Brach 2012].

Śród szerokiej gamy dostępnych na rynku dalmierzy laserowych wytypowano TruPulse 360 z wbudowanym kompasem elektronicznym oraz dalmierz laserowy ForestPro współpracujący z zewnętrznym elektronicznym kompasem MapStar (ryc. 3, tab. 1). Testowane dalmierze cechowały się możliwością współpracy z przyrządem oraz pozwalały na pomiar odległości i azymutu w tym samym czasie. Trudne warunki leśne wymagają stosowania przyrządów w celu zapewnienia prawidłowego pomiaru odległości. W badaniach przetestowano 4 zestawy pomiarowe:

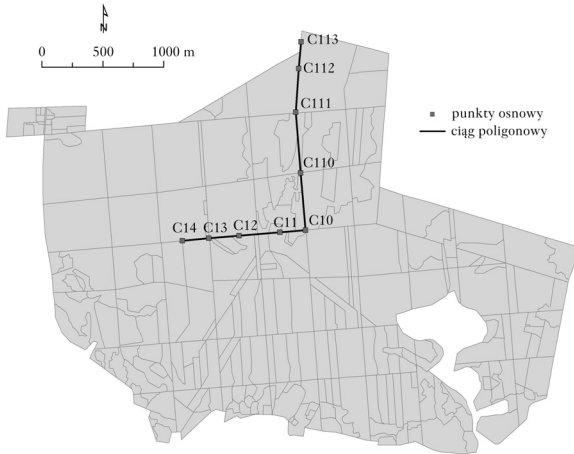
- 1) ForestPro i MapStar montowane na trójnogu (FP-T),
- 2) ForestPro i MapStar montowane na monopodzie (FP-M),
- 3) TruPulse montowany na trójnogu (TP-T),
- 4) TruPulse montowany na monopodzie (TP-M).



Ryc. 1.

Widok powierzchni żywotnika olbrzymiego w Arboretum w Rogowie ze stanowiska pomiarowego (fot. M. Brach)

Side view from the measurement point of Western redcedar plot in the Rogów Arboretum



Ryc. 2.

Szkic osnowy geodezyjnej wykorzystanej w badaniach na terenie Leśnictwa Głuchów

Geodetic control network location in the Głuchów Forest



Ryc. 3.

Dalmierz laserowy TruPulse 360 (z lewej) oraz ForestPro zintegrowany z kompasem MapStar (z prawej)

TruPulse laser rangefinder (left) and ForestPro integrated with MapStar compass (right)

Tabela 1.

Charakterystyki dalmierzy laserowych wykorzystanych w badaniach
Characteristics of analysed laser rangefinders

Dalmierz	Waga [g]	Wymiary [cm]	Temperatura pracy [°C]	Dokładność [cm] i [°]	Zasięg [m]	Cena netto [zł]
ForestPro (FP)	1000	15,2x6,4x12,7	-30 do +60	odległość +/- 3	do 575	8000
z kompasem MapStar	570	31x5x2,5	-30 do +50	azymut +/- 0,3		3700
TruPulse 360 (TP) z wbudowanym kompasem	220	12x5x9	-20 do +60	odległość +/- 30 azymut +/- 1,0	do 2000	7000

Wszystkie pomiary rejestrowane były automatycznie na komputerach terenowych z użyciem oprogramowania Field-Map (www.fieldmap.cz).

Pomierzone odległości i azymuty posłużyły do obliczenia współrzędnych drzew. Błędy średnie wyznaczania współrzędnych X i Y (odpowiednio M_x i M_y) na podstawie n pomiarów obliczono według wzorów:

$$M_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_{xi}^2}{n}} \quad \text{oraz} \quad M_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_{yi}^2}{n}} \quad [1] \text{ i } [2]$$

Wartości d_x oraz d_y obliczono, stosując następujące wzory:

$$d_x = X_{DALMIERZ} - X_{GEO} \quad \text{oraz} \quad d_y = Y_{DALMIERZ} - Y_{GEO} \quad [3] \text{ i } [4]$$

gdzie:

$X, Y_{DALMIERZ}$ – współrzędne wyznaczone wybranym dalmierzem laserowym,
 X, Y_{GEO} – współrzędne referencyjne z pomiarów geodezyjnych.

Błąd określania pozycji (M_p) będący wypadkową błędów M_x oraz M_y obliczono wzorem:

$$M_p = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad [5]$$

Błędy wyznaczania azymutu (A) oraz odległości (D) obliczono na podstawie pomiarów wykonanych na osnowie geodezyjnej w Leśnictwie Głuchów. Błąd pomiaru azymutu (M_A) obliczono według wzoru:

$$M_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (A_{DALMIERZ_i} - A_{GEO_i} - Bias_A)^2}{m-1}} \quad [6]$$

gdzie:

$Bias_A$ – błąd systematyczny pomiaru azymutu,
 m – całkowita liczba pomiarów wykonana danym zestawem pomiarowym na wszystkich bokach osnowy.

Ponieważ długość boków osnowy określono, stosując dokładny pomiar geodezyjny, wzór na błąd pomiaru odległości (M_D) dla poszczególnych dalmierzy przyjął formę:

$$M_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (D_{DALMIERZ_i} - D_{GEO_i} - Bias_D)^2}{m}} \quad [7]$$

gdzie:

$Bias_D$ – błąd systematyczny pomiaru odległości.

Uzyskane wartości błędów wykorzystano do przeprowadzenia oceny dokładności pomiarowej każdego z urządzeń dla stosowanej dość powszechnie metody biegunowej i konstrukcji ciągu wiszącego. Pierwszą składową błędu w takim przypadku jest błąd średni podłużny (m_l) zależny od liczby stanowisk w ciągu (k):

$$m_l = M_D \cdot \sqrt{k} \quad [8]$$

Wiąże on błąd pomiaru długości (M_D) z liczbą stanowisk (k), która w środowisku leśnym jest zmienna, głównie ze względu na trudne warunki wyznaczania osi celowych. Drugą składową jest błąd średni poprzeczny (m_p) uwzględniający długość odcinka pomiarowego (D), błąd wyznaczania azymutu (M_A) i liczbę stanowisk w ciągu (k) [Łukasiewicz 1973]:

$$m_p = \frac{DM_A}{\zeta} \cdot \sqrt{k} \quad [9]$$

gdzie:

$\zeta \approx 57,2958^\circ$ – współczynnik wyrażający wartość kąta w stopniach równy jednemu radianowi [Kamela, Lipiński 1975].

Tym samym błąd całkowity wyznaczania położenia punktu w wiszącym ciągu busolowym (m_c) wynosić będzie:

$$m_c = \sqrt{m_l^2 + m_p^2} \quad [10]$$

W analizach dokładności wyznaczania położenia drzew za jednostkę statystyczną przyjęto pojedynczy wektor przesunięcia, czyli odległość między położeniem środka drzewa pomierzonego tachimetrem elektronicznym i środka drzewa pomierzonego badanym zestawem. W przypadku pomiarów ciągu geodezyjnego za jednostkę statystyczną przyjęto wielkość pojedynczego błędu azymutu i odległości pomniejszoną o błąd systematyczny. Z powodu istotnych odstępstw rozkładów analizowanych spostrzeżeń od rozkładu normalnego, do porównania zestawów pomiarowych wykorzystano nieparametryczny odpowiednik jednoczynnikowej analizy wariancji dla pomiarów powtarzalnych, czyli test Friedmana ($\alpha=0,05$). W celu wyznaczenia grup jednorodnych użyto testu znaków ($\alpha=0,05$). Testowano hipotezy o wpływie zastosowanych zestawów pomiarowych na dokładność pomiaru położenia drzew oraz na dokładność pomiaru azymutów i odległości w ciągu geodezyjnym. Wyniki opracowano, wykorzystując oprogramowanie Statistica 9.0 (StatSoft Inc.).

Wyniki

Porównując odległości między położeniami środków drzew pomierzonych tachimetrem i środkami drzew pomierzonych badanym zestawem, uzyskano istotne statystycznie różnice w dokładnościach pomiarowych ($\chi^2=69,43$; $P<0,001$). Zestawy wykorzystujące dalmierz TruPulse różniły się istotnie od zestawów z ForestPro i MapStar (tab. 2). Porównując wielkości błędów pomiaru azymutu, także uzyskano istotne różnice w dokładności poszczególnych zestawów pomiarowych ($\chi^2=258,62$; $P<0,001$). Zestawy wykorzystujące TruPulse różniły się istotnie od zestawów z ForestPro i MapStar (tab. 2). Również w przypadku wielkości błędów pomiaru odległości uzyskano istotne różnice w dokładności poszczególnych zestawów pomiarowych ($\chi^2=78,54$; $P<0,001$).

Przy założeniu pomiaru ciągu busolowego opartego na 6 stanowiskach odległych od siebie o 100 metrów stwierdzono, że wartości błędów stopniowo rosną w zależności od zastosowanego modelu dalmierza i metody pomiaru (ryc. 4). Tym samym dla długości 600 metrów ciągu wiszącego, złożonego z sześciu stanowisk i łatwiejszej w realizacji metodzie pomiaru z użyciem monopodu, błąd wyznaczania punktu będzie wynosił 1,50 m dla dalmierza ForestPro i 4,45 m dla dalmierza TruPulse.

Dyskusja

Przeprowadzone badania wykazały zadowalającą dokładność dalmierzy laserowych do wyznaczania położenia drzew. Pomimo gorszych rezultatów w przypadku zestawów wykorzystujących dalmierz TruPulse, można stwierdzić, że wszystkie cztery przetestowane zestawy pomiarowe są przydatne do wyznaczania pozycji drzew na powierzchniach kołowych. Związane jest to głównie z tym, że błąd określania azymutu rzędu $\pm 1^\circ$ w przypadku TruPulse przy krótkich osiach

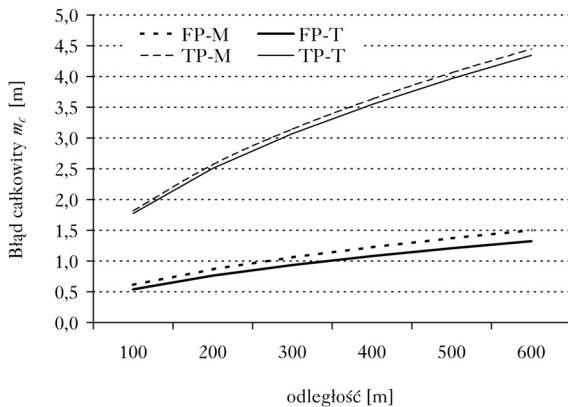
Tabela 2.

Średnie wartości błędów wyznaczania współrzędnych $X (M_x)$ i $Y (M_y)$, położenia drzew (M_p), pomiaru azymutu (M_A) oraz długości boków (M_D) dla analizowanych zestawów pomiarowych

Mean errors of X and Y coordinates (M_x and M_y , respectively) and trees position (M_p) determination as well as azimuth (M_A) and distance (M_D) surveys for analysed measurements sets

Dalmierz	M_x [m]	M_y [m]	M_p [m]	M_A [°]	M_D [m]
FP-T	0,19	0,11	0,22a	0,31a	0,07a
FP-M	0,14	0,16	0,22a	0,35a	0,08a
TP-T	0,68	0,36	0,77b	1,01b	0,15b
TP-M	0,68	0,36	0,77b	1,04b	0,18c

te same litery oznaczają grupy homogeniczne;
the same letters indicate homogenous groups



Ryc. 4.

Błędy wyznaczania położenia punktów ciągu busolowego w zależności od długości ciągu

Points location errors of compass traverse depending on its total length

celowych (np. do 12,62 m w przypadku 5-arowych powierzchni kołowych) nie odgrywa aż tak istotnej roli. Dokładność ta jest w pełni wystarczająca do identyfikacji drzew w kolejnych inwentaryzacjach, co ma szczególnie duże znaczenie w przypadku stałych powierzchni. Warto jednak pamiętać, aby środek powierzchni był wyznaczony możliwie najdokładniej przy zastosowaniu dalmierza ForestPro lub też kombinowanych metod pomiarowych [Brach 2009].

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zastąpienie tańszego monopodu stabilnym i wygodnym w obsłudze, ale nieco droższym trójnogiem, nie wpływa istotnie na zwiększenie dokładności wykonywanych pomiarów.

Uzyskane wyniki wartości błędów pomiaru azymutu oraz długości w przypadku przetestowanych dalmierzy laserowych nie odbiegają od parametrów dokładnościowych podanych przez producenta (www.lasertech.com). W przypadku dalmierza TruPulse osiągnięto nawet większą dokładność pomiaru odległości, co potwierdzają również badania Farve [2010]. Testowane metody pomiarowe są dobrym uzupełnieniem dla odbiorników GPS. Odbiornik Trimble ProXH, po zastosowaniu korekcji różnicowej, wyznacza współrzędne z dokładnością poniżej 1,5 m [Brach 2012], co jest porównywalne z dalmierzem TruPulse. W praktyce jednak korekcja różnicowa jest stosowana rzadko, co oznacza pogorszenie dokładności pomiarów. Optymalnym rozwiązaniem w leśnych pracach pomiarowych jest rozpoczynanie ciągów busolowych dalmierzami laserowymi od punktów wyznaczonych w terenie otwartym (np. na dużych gniazdach) za pomocą odbiorników nawigacyjnych bądź od innych punktów (np. istniejące osnowy) o prawidłowo wyznaczonych współrzędnych, które można wykorzystać do wyrównania ciągu. Nie zmienia to faktu, że konstrukcje ciągów busolowych nie powinny być dłuższe niż wielkość oddziały leśnego.

Wnioski

- ✦ Pomiar położenia drzew oraz ciągów busolowych wykonywane dalmierzem laserowym ForestPro (zintegrowany z elektronicznym kompasem MapStar) były dokładniejsze od pomiarów wykonanych dalmierzem TruPulse. Średnie błędy wyznaczania położenia drzewa, odległości oraz azymutu były większe w przypadku TruPulse o odpowiednio: 0,55 m, 0,7° i 0,10 m.
- ✦ Niezależnie od zastosowanego rodzaju statywu (trójnóg, monopod), błędy pomiarowe nie różniły się istotnie dla tych samych urządzeń pomiarowych.
- ✦ Droższy dalmierz ForestPro zalecany jest do prac pomiarowych, w których wymagana jest większa dokładność, np. wyznaczanie położenia stałych powierzchni inwentaryzacyjnych, natomiast mniej dokładny i tańszy TruPulse do wyznaczania położenia drzew na powierzchniach kołowych.

Literatura

- Bernadzi E. 2000. Cięcia odnowieniowe. PWRiL, Warszawa.
- Bernadzi E., Brzeziecki B. 1999. Wpływ metod odnowienia na różnorodność biologiczną lasów zagospodarowanych w Polsce. W: Rykowski K., Matuszewski G., Lenart E. [red.]. Ocena wpływu praktyki leśnej na różnorodność biologiczną w lasach w Europie Środkowej. Studium w zakresie polskiej Ustawy o lasach i innych przepisów prawnych. Instytut Badawczy Leśnictwa, Warszawa.
- Brach M. 2009. Pomiar położenia środka drzewa z wykorzystaniem tachimetru elektronicznego. Sylwan 153 (4): 231-239.
- Brach M. 2012. Analiza dokładności wyznaczania współrzędnych wybranymi odbiornikami GNSS w środowisku leśnym. Sylwan 156 (1): 47-56.
- Farve R. 2010. Evaluation of Laser Rangefinders. San Dimas, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology and Development Center.
- Kamela Cz., Lipiński M. 1975. Geodezja. Tom I. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa.
- Łukasiewicz E. 1973. Poligonizacja. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych. Warszawa. 55-56.
- Puchalski T. 2000. Rębnie w gospodarstwie leśnym. PWRiL, Warszawa.
- Puettmann K. J., Coates K. D., Messier C. 2009. A Critique of Silviculture: Managing for Complexity. Island Press Washington-Covelo-London.
- Schütz J.-Ph. 2002. Silvicultural tools to develop irregular and diverse forest structures. Forestry 75 (4): 329-337.
- Twaróg J. 1990. Rębnie w górach. PWRiL, Warszawa.

SUMMARY

Measurements accuracy of selected laser rangefinders in the forest environment

The change in the public attitude toward forests since the 1980s has caused a rise in importance and role of complex silvicultural systems. On the one hand, stands managed by these systems are characterized by a diverse stand structure that is well accepted by public. On the other hand, elasticity of working combined with a long regeneration period demands proper measurement devices, like laser rangefinders, that facilitate data collection for silvicultural planning. Therefore, the main objective of this study was an evaluation of measurement accuracy for selected laser rangefinders (TruPulse and ForestPro integrated with MapStar compass) mounted on monopod and tripod under the forest conditions. To this end, two sources of precise geodetic data: spatial coordinates of 34 trees in the Rogów Arboretum (fig. 1) and 8 points belonged to geodetic control network in the Głuchów Forest (fig. 2), were used. In the first case the mean errors of tree position and X , Y coordinates determination were calculated, while in the second one the mean errors of azimuth and distance survey were computed (tab. 2). The result obtained point out that sets equipped with ForestPro and Mapstar are more accurate than TruPulse ones, however, in this study, no significant influence of applied stands on the measurement accuracy was observed. Thus, the first rangefinder should be used to more precise measurements (marking out the borders of new regeneration feelings or distribution of central points of permanent sample plots), while TruPulse can be applied to forest inventory on circular sample plots, as the error of azimuth determination in this case does not play a significant role. Thanks to built-in the option 'foliage filter', the examined laser rangefinders provide reliable field measurements under the conditions of dense understory. Therefore, the use of them is recommended for forest digital maps updating.