

# SATELITARNE WYZNACZANIE WSPÓLRZĘDNYCH PUNKTÓW NIEDOSTĘPNYCH<sup>1</sup>

---

**Andrzej Uznański**

dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, e-mail: auznan@agh.edu.pl

---

***Streszczenie.** Satelitarne pomiary kinematyczne w czasie rzeczywistym RTK i RTN są aktualnie powszechnie stosowaną techniką pomiarową przez wykonawców robót geodezyjnych. Jest to technika najefektywniejsza. Jednym z mankamentów pomiarów satelitarnych jest wymóg ustawienia anteny satelitarnej nad punktem mierzonym. Wiele szczegółów sytuacyjnych nie można pomierzyć ten sposób (budynki stacyjne, wiaty, słupy trakcyjne, drzewa, itp). Punktami niedostępnymi dla pomiarów satelitarnych mogą być również punkty z bardzo przesłoniętym horyzontem (szpalery wysokich drzew wzdłuż linii kolejowych). W pracy przedstawiono metody praktycznego wyznaczania pozycji punktów formalnie niedostępnych do pomiaru technikami satelitarnymi RTK/RTN, wykorzystujące funkcje COGO, dalmierz laserowy oraz inklinometr w odbiorniku satelitarnym.*

***Słowa kluczowe:** RTK, RTN, COGO, punkty niedostępne (Hidden Point), dalmierz laserowy, inklinometr*

## 1. Wprowadzenie

Podstawowym kryterium doboru techniki pomiarowej do realizacji zadania powinno być spełnienie żądanych wymagań, co do dokładności. W praktyce częściej najważniejsza dla wykonawcy robót geodezyjnych jest strona ekonomiczna pomiarów. Z tego powodu może się zdarzać, że narzędzia pomiarowe są wykorzystywane w sposób nieodpowiedni, skutkujący obniżeniem jakości wyników. Tak zdarza się w przypadku pomiarów punktów niedostępnych dla pomiarów satelitarnych, np. tyczka z anteną i odbiornikiem satelitarnym jest dostawiana do narożnika obiektu. Zazwyczaj współrzędne zostaną wyznaczone, ale ich dokładność może istotnie odbiegać od rzeczywistego położenia szczegółu sytuacyjnego. Na terenach kolejowych może mieć to znaczenie szczególne ze względu na występowanie pojęcia skrajni.

W każdym pomiarze satelitarnym wyznaczane są położenia centrów fazowych anteny sygnałów satelitarnych, które producenci starają się zlokalizować konstrukcyjnie w osi geometrycznej anteny GNSS. Z tego powodu prawidłowe ustawienie anteny satelitarnej polega na jej scentrowaniu nad mierzonym punktem. Aktualnie anteny satelitarne są montowane przez producentów w jednej obudowie z odbiornikiem satelitarnym, więc w praktyce nad punktem ustawia się taki zestaw pomiarowy.

---

<sup>1</sup> Praca wykonana w ramach badań statutowych, umowa nr 11.11.150.005

Z punktu widzenia pomiarów satelitarnych są dwa rodzaje punktów niedostępnych do pomiaru tą techniką pomiarową:

- punkty, nad którymi nie można scentrować anteny sygnałów satelitarnych,
- punkty o zbyt dużych przesłonięciach horyzontu, blokujących lub zakłócających skutecznie sygnały satelitarne.

Można wyróżnić także przypadek, w którym punkt jest tylko czasowo niedostępny do pomiarów satelitarnych, a jego pomiar satelitarny wymaga starannego zaplanowania momentu z korzystną konstelacją satelitów nad miejscem pomiaru. W praktyce rzadko się zdarza sytuacja, w której wykonawca dobiera moment pomiaru do uwarunkowań lokalnych i konstelacji satelitów. Takie punkty są mierzone z wykorzystaniem 3 metod dostępnych w odbiornikach satelitarnych.

Pierwsze komercyjne odbiorniki satelitarne z funkcją pomiarów w czasie rzeczywistym RTK z połowy lat dziewięćdziesiątych były wyposażane w tzw. funkcje COGO (Coordinate Geometry), które można było wykorzystać także do wyznaczenia pozycji punktów niedostępnych. Kolejnym krokiem była sprzętowa i programowa możliwość podłączenia do odbiornika dalmierza laserowego lub tylko wprowadzenia wyniku pomiaru odległości z takiego urządzenia. Aktualnie producenci geodezyjnego sprzętu do pomiarów satelitarnych wyposażają swoje odbiorniki w funkcje kompensacji wychylenia tyczki, które umożliwiają poprawne wyznaczenie pozycji niektórych rodzajów punktów niedostępnych.

Niedostępność punktów dla pomiarów satelitarnych może skutkować wymogiem pochylenia tyczki przy braku możliwości scentrowania anteny nad punktem, np. narożniki budynków itp. obiekty). Wówczas pochylomierz będzie rozwiązaniem możliwym do praktycznego i prawidłowego zastosowania. W przypadku pomiaru obiektów takich jak drzewa, konieczne będzie zastosowanie którejś z pozostałych dwóch metod.

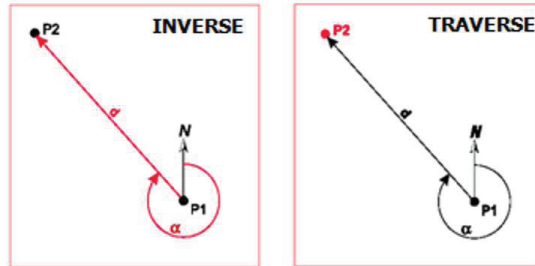
W pracy przedstawiono charakterystykę wymienionych rozwiązań, zwracając uwagę na ich zalety i mankamenty.

## 2. Funkcje COGO

Funkcje COGO (Coordinate Geometry) to rozwiązanie programowe dostępne już w pierwszych komercyjnych odbiornikach satelitarnych dedykowanych pomiarom RTK. Funkcje te umożliwiały odbiornikowi satelitarnemu obliczenie pozycji punktu, którego lokalizację można było opisać prostymi związkami geometrycznymi z punktami, które pomierzono odbiornikiem satelitarnym lub których współrzędne wprowadzono do pamięci odbiornika, a same punkty można było zidentyfikować w terenie i ustalić relacje geometryczne z pozycją punktu, którego współrzędne odbiornik satelitarny obliczał w terenie. To rozwiązanie można było zaadoptować do wyznaczenia punktów niedostępnych.

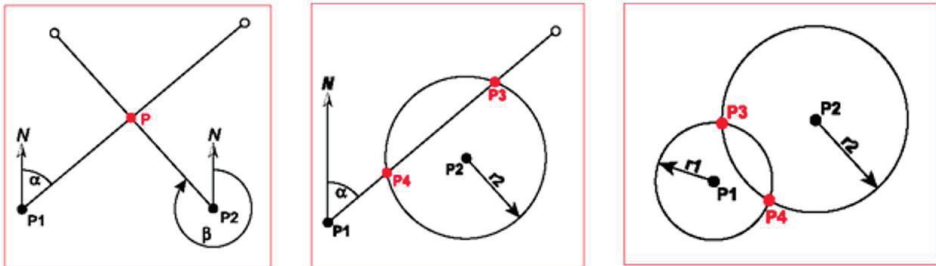
Podstawowe funkcje COGO umożliwiają wyznaczenie azymutu i długości linii na podstawie współrzędnych dwóch punktów lub też współrzędnych jednego

z punktów przy znanych pozostałych wielkościach, jak w metodzie biegunowej pomiarów tachymetrycznych (rys. 1).



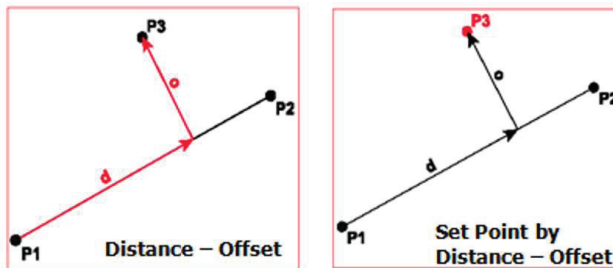
Rys. 1. Funkcje COGO: Inverse i Traverse

Kolejną grupą funkcji są przecięcia: dwóch prostych, prostej i okręgu oraz dwóch okręgów (rys. 2).



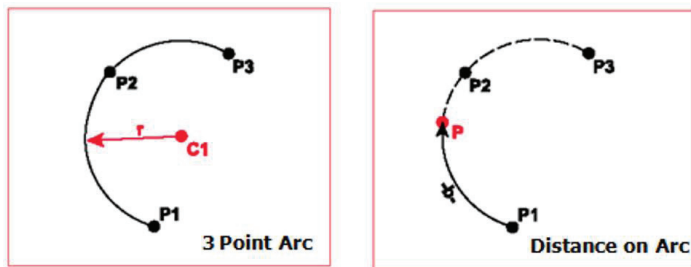
Rys. 2. Funkcje COGO – przecięcia

W funkcjach COGO dostępne są też rozwiązania znane z podstaw pomiarów geodezyjnych, związanych z pomiarem szczegółów sytuacyjnych w odniesieniu do linii pomiarowej, a dotyczących domiarów prostokątnych (rys. 3).



Rys. 3. Funkcje COGO - domiary prostokątne

Podstawowe funkcje COGO dopełniają zadania związane z okręgiem, wyznaczające jego środek i promień oraz lokalizujące punkt na okręgu w zadanie odległości po łuku od jego początku.



Rys. 4. Funkcje COGO - okrąg

Są dostępne również funkcje umożliwiające podział linii na zadane odcinki, tyczenie regularnych siatek punktów. Z czasem pojawiły się także funkcje związane z obliczeniami powierzchni, obwodu i podziału działek.

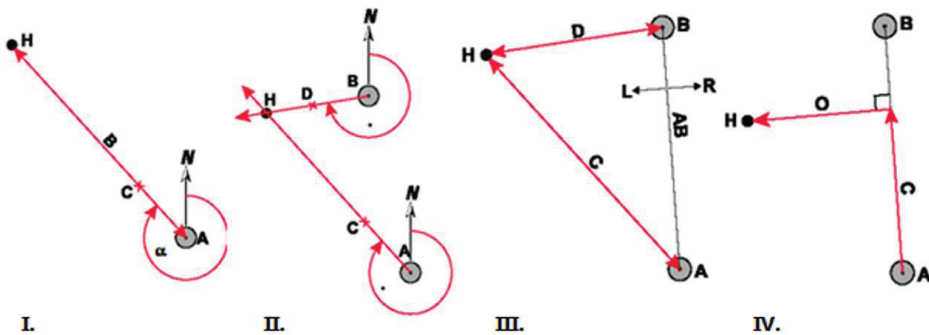
Z punktu widzenia tematyki pracy, w praktyce wykorzystywana jest funkcja przecięcia prostych (rys. 2). Korzystając z niej starano się zdefiniować tak dwie proste, aby ich przecięcie wypadło w narożniku obiektu lub w środku drzewa. W przypadku niekorzystnych warunków topograficznych (braku miejsca i wizur, przesłonięć horyzontu) wykorzystywano także funkcję analogiczną do tachymetrycznych pomiarów biegunowych z rys. 1. Wówczas wyznaczano prostą za pośrednictwem pomiaru punktu pomocniczego, który umożliwiał zdefiniowanie linii w odbiorniku satelitarnym.

Podstawowym czynnikiem wpływającym na dokładność realizacji zadania w takich przypadkach jest umiejętność wtyczania się w linię. Atutem wyznaczania współrzędnych punktów niedostępnych za pomocą funkcji COGO jest brak kosztów. Odbiorniki satelitarne są w standardzie wyposażane w zestaw takich funkcji.

### 3. Dalmierz laserowy

Jedna z wiodących firm na rynku sprzętu geodezyjnego zaproponowała połączenie swoich dwóch produktów w celu efektywnego i prawidłowego wyznaczenia współrzędnych punktów niedostępnych w pomiarach satelitarnych. Takim rozwiązaniem było podłączenie do odbiornika satelitarnego przez port szeregowy RS232 dalmierza laserowego, potocznie dziś nazywanego disto, co było nazwą handlową takiego urządzenia tejże firmy. W praktyce fizyczne podłączenie dalmierza nie było konieczne, a wystarczającym było wpisanie w aplikację kontrolera odbiornika satelitarnego odległości pomierzonej dalmierzem laserowym. Innowacją tej metody było wykorzystanie pomiaru odległości, który był znacznie dokładniejszy od optycznego wtyczania się w linię. Dokładność pomiaru odległości dalmierzy wahała się od ok. 5 mm do aktualnie 1 mm. Same funkcje oprogramowania różniły się nieznacznie od opisanych funkcji COGO. Najpowszechniej implementowane w oprogramowaniu kontrolerów sposoby przedstawia rys. 5. W przypadku pierwszego sposobu wymagane było wyznaczenie punktu pomocniczego C, który umożliwiał obliczenie azymutu linii, koniecznego do biegunowego wyznaczenia

współrzędnych punktu niedostępnego. W tym przypadku można było to zrealizować dokładniej niż w funkcjach COGO, celując na punkt dalmierzem, a następnie identyfikując przebieg promienia lasera w odległości C od stanowiska instrumentu, które oznaczono na rysunku przez A. Dwa kolejne sposoby realizują de facto liniowe wcięcie w przód. Sposób drugi umożliwia kontrole dokładności wyznaczonej pozycji punktu niedostępnego, gdyż jest zdublowaniem sposobu pierwszego z rys. 5. Sposób III. opiera się na klasycznym wcięciu liniowym. Sposób IV stosuje domiary prostokątne. Jego mankamentem jest konieczność realizacji kąta prostego. Na dokładność wyznaczenia pozycji punktu niedostępnego z wykorzystaniem dalmierza laserowego podstawowe znaczenie ma celowanie na ten sam punkt obiektu.



Rys. 5. Funkcje wyznaczające punkty niedostępne z pomocą dalmierza laserowego

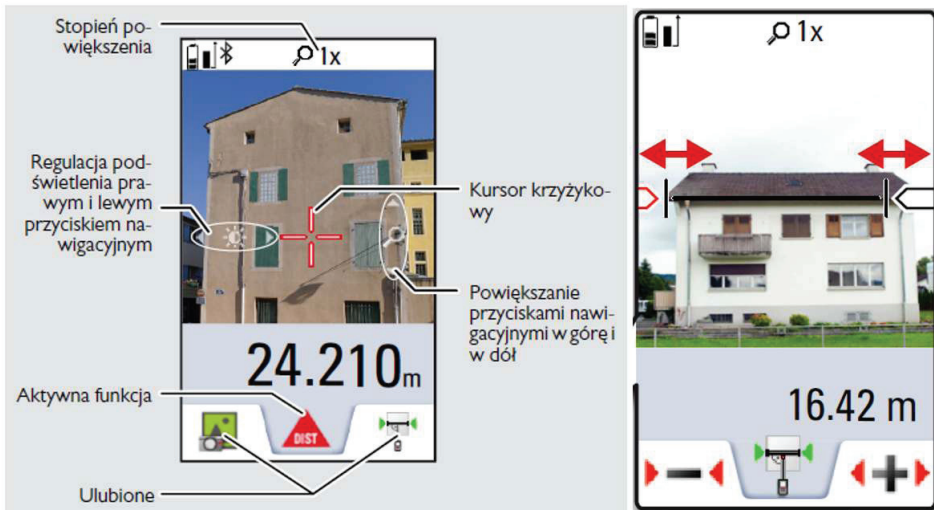
W realizacji pomiarów istotne znaczenie miało spoziomowanie dalmierza laserowego do pomiaru odległości. W późniejszym okresie pojawiły się droższe wersje dalmierzy wyposażonych w inklinometr.

W praktyce terenowej zawsze występował problem identyfikacji punktu pomiaru wiązką laserową w dni słoneczne, gdyż plamka lasera była słabo widoczna. Relatywnie niedawno pojawiły się specjalne okulary wzmacniające widoczność plamki lasera. Nie mniej jedynym prawdziwie skutecznym rozwiązaniem tego problemu jest wyposażenie dalmierza laserowego w kamerę z powiększeniem optycznym (dostępne na rynku dalmierze mają powiększenie czterokrotne). Umożliwiają też wykonanie zdjęcia dokumentującego pomiar i sam punkt pomiaru (rys. 6), a także obliczenie szerokości, średnicy, powierzchni na podstawie wykonanego zdjęcia.

Dopiero dysponowanie przez dalmierz laserowy z kamerą dało sens rozważaniom o zasięgu dalmierza, jako istotnym parametrze. Standardowo zasięg dalmierza laserowego sięgał początkowo poniżej 50 m, kolejne modele potrafiły zmierzyć odległości do 100. Rozwój sprzętu przyniósł na rynek instrumenty potrafiące zmierzyć odległość do 200 m, a lider nawet 250 m (z dokładnością 1 mm). Dalmierz bez kamery traci jednak swą funkcjonalność ze względu na problemy z identyfikacją położenia plamki lasera już przy odległości kilku -kilkunastu metrów, mimo że formalnie zasięg ma większy.

Aktualnie można wyróżnić dalmierze laserowe budowlane, mierzące odległości i wykonujące najprostsze obliczenia, generalnie dedykowane pomiarom wewnątrz budynków oraz geodezyjne, które mają bardzo bogate oprogramowanie i akcesoria (statyw z leniwkami, okulary do lepszej obserwacji plamki lasera), umożliwiające realizację bardzo zróżnicowanych zadań. Droższe modele są też wyposażone w dodatkowe możliwości sprzętowe, jak np. kamera. W praktyce jest jeden lider na tym rynku, o czym świadczy fakt, że w sklepie firmowym największego konkurenta w branży sprzętu geodezyjnego jest cała półka produktów rynkowego rywala.

Istotnym jest pamiętać o wykonaniu w terenie przed pomiarami kalibracji dalmierza wyposażonego w inklinometr elektroniczny.



Rys. 6. Pomiar dalmierzem laserowym z kamerą i wyznaczenie jego wymiarów (szerokości) [1]

#### 4. Kompensacja wychylenia

Pomiar odbiornikiem satelitarnym bez kompensacji wychylenia tyczki polega na pionowym odrzutowaniu wyznaczonego położenia centrów fazowych anteny satelitarnej na poziom obniżony o wprowadzoną do odbiornika długość tyczki. Wszelkie odchylenia od pionu spowodowane błędami osobowymi operatora (niestabilne trzymanie tyczki) wpływają na obniżenie dokładności wyników pomiaru. Odbiornik z czujnikiem pochyleń eliminuje tę niedogodność. Wystarczy umieścić grot tyczki w mierzonym punkcie. Odbiornik mierzy wartość wychylenia tyczki i jego kierunek. Pozycja centrów fazowych anteny satelitarnej jest rzutowana na grot tyczki, a nie wzdłuż linii pionu, odwzorowując zawsze rzeczywiście pomierzony punkt. Konieczne jest jedynie poprawne zorientowanie odbiornika względem kontrolera, zgodnie z zaleceniami producenta.

Pierwsze rozwiązanie wykorzystujące kompensację wychylenia odbiornika satelitarnego zostało wprowadzone na rynek w 2015 roku przez firmę, będącą jedną z wiodących w branży. W odbiorniku satelitarnym zastosowano magnetometr umożliwiający wyznaczania kierunku wychylenia, czyli urządzenie podobne do tych stosowanych w smartfonach, które wykorzystywane jest w nich do określania kierunku w kompasie telefonu. Magnetometr wymaga niestety częstej kalibracji i nie jest odporny na zakłócenia magnetyczne generowane przez źródła pól elektromagnetycznych, jak i ferromagnetyki, np. beton zbrojony. Zakłócenia magnetyczne mogą powodować finalnie błąd pozycji wyznaczonej przez odbiornik satelitarny, korzystający z takiego sposobu kompensacji wychylenia rzędu nawet kilkudziesięciu centymetrów. Sama procedura kalibracji wymaga znalezienia miejsca z dala od zakłóceń magnetycznych i wykonania 3 kroków kalibracji. W pierwszym - kalibrującym czujnik pochyleń odbiornika należy utrzymać nieruchomo odbiornik w pozycji poziomej korzystając z libelli sferycznej. W drugim kroku procedury kalibracyjnej należy skalibrować magnetometr. Czynność jest bardziej uciążliwa niż w smartfonach. Wymagany jest obrót odbiornika o  $360^{\circ}$  wokół osi poziomej, dla co najmniej 12 różnych kierunków w płaszczyźnie poziomej. Ostatni krok procedury wymaga obracania spoziomowanego odbiornika wokół jego osi pionowej. W każdym kroku kalibracji odbiornika satelitarnego na ekranie kontrolera wyświetlany jest bieżący postęp aż do sygnalizacji zakończenia danego kroku procedury.

Kalibracja rekomendowana jest w każdym przypadku, gdy zostanie wymieniona bateria zasilająca odbiornik satelitarny, nastąpił silny wstrząs (upadek odbiornika), aktualna temperatura wewnątrz odbiornika różni się o więcej niż  $30^{\circ}$  w stosunku do temperatury, w której wykonano kalibrację.

Można nadmienić, że wyposażenie odbiornika satelitarnego w kompensację pochyleń umożliwia także korzystanie z libelli elektronicznej, w miejsce sferycznej mocowanej na tyczce.

Rozwiązania opartego na magnetometrze nie można zastosować na terenach kolejowych ze względu na infrastrukturę powodującą zakłócenia pola magnetycznego. Brak znajomości zasad działania instrumentu może skutkować błędami o dużych wartościach.

W 2017 roku na targach InterGeo w Berlinie miała miejsce premiera najnowszego rozwiązania technicznego w zakresie kompensacji wychylenia odbiornika satelitarnego. Inna z wiodących na rynku firm przedstawiła rozwiązanie oparte na bezwładności, wykorzystujące moduł IMU (Inertial Measurement Unit) opracowany specjalnie do celów geodezyjnych. Dzięki takiemu rozwiązaniu odbiornik satelitarny nie wymaga kalibracji i jest odporny na zakłócenia magnetyczne. Jakość rozwiązania problemu docenili nawet prekursorzy rozwiązania z kompensacją wychylenia, będąc de facto konkurencją na rynku. Moduł IMU wymaga inicjalizacji, która jest wykonywana automatycznie w ruchu. Konieczne jest tylko wspomniane powyżej odpowiednie zorientowanie odbiornika satelitarnego względem kontrolera. Producent podaje, że odbiornik nie ma ograniczeń, co do zakresu wychylenia. Niemniej należy pamiętać o konieczności zapewnienia odbioru sygnału przez mi-



nimum 4 satelity w trakcie pomiarów zinicjalizowanym odbiornikiem satelitar-nym, a każdy z nich jest wyposażony w wewnętrzny groundplane, służący elimi-nacji sygnałów odbitych. Oznacza to, że odbiornik może odbierać tylko sygnały docierające do niego ze źródeł powyżej horyzontu anteny, który przy przechyle może istotnie ograniczyć dostęp sygnałów z satelitów. Można też zwrócić uwagę, że w specyfikacji technicznej odbiornika [2] zapisano, iż dodatkowa niepewność położenia poziomego grotu tyczki wynosi zazwyczaj poniżej  $8 \text{ mm} + 0.4 \text{ mm}/^\circ$  wychylenia do  $30^\circ$  wychylenia, co może jednak wskazywać ograniczenie. Wartość wychylenia tyczki od pionu do  $30^\circ$  można przyjąć za standardową wartość tego parametru. Często podawana w specyfikacjach technicznych jest także wartości  $15^\circ$ , a są przypadki występowania obydwu tych wartości dla różnych procedur pomiarowych danym odbiornikiem [3].

Oszacowano, że poprawa wydajności pomiarów wykorzystujących kompensację wychylenia może sięgnąć o ok. 20% czasu z tytułu braku konieczności usta-wiania i utrzymywania tyczki w pionie, centrycznie nad punktem przy każdym pomiarze przez wyeliminowanie czasu potrzebnego na doprowadzenie tyczki do pionu i ewentualne opanowanie jej wychyleń z tytułu mniej stabilnego utrzymy-wania w pionie, czasem utrudnionego przez warunki atmosferyczne (wiatr).

Wyposażenie odbiornika w pochylomierz, choć jest rozwiązaniem najnowszym, to jednak nie uniwersalnym. W ten sposób nie można pomierzyć obiektów takich, jak np. drzewa, których współrzędne środka pnia są nanoszone na mapę. W tym przypadku najkorzystniejsze może się okazać wykorzystanie przecięć linii z funkcji COGO. Ewentualnie możliwe jest też wykorzystanie dalmierza laserowego z funk-cją wyznaczenia średnicy na podstawie zdjęcia. Po jej wyznaczeniu można wpro-wadzić korektę do pomierzonych odległości, aby oprogramowanie wyznaczyło po-prawne współrzędne.

## 5. Podsumowanie

Rozwój technik pomiarów geodezyjnych wprowadza dostępność nowych funk-cji dzięki wyposażaniu instrumentów w dodatkowe podzespoły i wspomagające urządzenia elektroniczne oraz dedykowane im oprogramowanie, umożliwiające wykorzystanie potencjału nowych rozwiązań. W opracowaniu przedstawiono sposoby poprawnego wyznaczania współrzędnych punktów niedostępnych dla pomiarów satelitarnych. Scharakteryzowano istotę ich wykorzystania w realizacji tytułowego zadania oraz wskazano na ograniczenia, a nawet istotne mankamenty z punktu widzenia obszaru zastosowań, czyli bardzo specyficznych terenów kole-jowych. Brak znajomości zasad działania nowoczesnych rozwiązań może skutko-wać poważnymi błędami w wykonawstwie robót geodezyjnych, które przełożą się wprost na błędy w realizacji technicznej obiektów infrastruktury kolejowej.

Opracowanie ma aktualnie charakter opisowy. Przedstawienie uniwersalnych i ogólnie ważnych analiz dokładności wyników uzyskiwanych przedstawionymi



metodami jest trudne, gdyż zależy w zbyt dużej mierze od umiejętności i doświadczenia osób prowadzących pomiary, rodzaju obiektu, geometrii zadania, producenta sprzętu, a nawet i warunków atmosferycznych realizacji pomiarów. W wymienionych aspektach istotną rolę odgrywa wtyczanie się w linię w przypadku funkcji COGO, jednoznaczność celowania dalmierzem oraz redukcja odległości do poziomu w kolejnej metodzie. W zasadzie tylko metodę wykorzystującą kompensację wychylenia można poddać obiektywnym testom, które dałyby wynik reprezentatywny, ale z kolei ograniczony do danego instrumentu.

Tematyka wydaje się istotna. Wykonawca często dąży do maksymalizacji zysku. Kluczowym czynnikiem jest czas. Rozwiązania umożliwiające szybsze wykonanie zadania są więc chętnie wykorzystywane w realizacji robót. Ostatnią nowinką w branży satelitarnej sprzętu geodezyjnego jest możliwość wykonywania pomiarów wychyloną od pionu tyczką z odbiornikiem. Odbiorniki wyposażone w magnetometrię nie powinny być stosowane na obszarach kolejowych ze względu na duże natężenie zakłócających ich pracę elementów infrastruktury kolejowej.

## Bibliografia

- [1] Leica Geosystems AG: Leica DISTO D810 touch. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Szwajcaria 2014.
- [2] Leica Geosystems AG: Leica GS18 T Dane techniczne. Leica Geosystems sp. z o.o., Warszawa 2017.
- [3] <https://geoline.pl/produkty/zenith35-pro/>
- [4] <https://help.trimblegeospatial.com/TrimbleAccess/2018.00/en/>
- [5] <https://www.topconpositioning.com/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-hr>

