

**IRENEUSZ WYCZAŁEK*, ARTUR PlichTA,
MICHAŁ WYCZAŁEK**

**BADANIA MOŻLIWOŚCI TECHNICZNYCH POMIARU
PŁASKOŚCI POWIERZCHNI KINEMATYCZNĄ METODĄ
TRYGNOMETRYCZNĄ**

Streszczenie

Nowe podejście do pomiaru płaskości posadzek lub innych powierzchni poziomych bazuje na użyciu sensorów montowanych na pojeździe przemieszczającym się po tych powierzchniach w mniej lub bardziej zautomatyzowany sposób. Staje się ono konkurencyjne w stosunku do metod klasycznych wykorzystujących tałę i klin lub pochyłomierze przykładane w miejscu pomiaru, a także do stosowanych zamiennie metod geodezyjnych. Pomiar z użyciem pojazdów wymaga z jednej strony przemieszczania sensorów wzdłuż zadanych linii, z drugiej - odpowiedniej częstości i precyzji odczytów. Prowadzone są prace badawczo-wdrożeniowe nad wykonywaniem kinematycznych pomiarów tachimetrycznych do pryzmatu przemieszczanego na posadzce. Prace te obejmują dwa aspekty: zdolność pomiarową instrumentów oraz precyzję oceny płaskości w funkcji przemieszczania pryzmatu w określonych kierunkach na badanej powierzchni. Tematy te stanowią przedmiot prac naukowo-badawczych i są okresowo publikowane.

W ramach niniejszej pracy wykonano próby kinematycznego pomiaru zmotoryzowanym tachimetrem (RTS) Leica TCRP 1201+ do pryzmatu przemieszczanego na zdalnie sterowanym pojeździe stosowanym w modelarstwie i robotyce. Opracowano modele pomiaru (różne warianty skanowania), poddano analizie wiarygodność reprezentacji osi pomiarowej przez uśrednianie między dwoma kołami pojazdu oraz wykonano testy mające na celu stwierdzenie poprawności pomiaru wykorzystanym typem tachimetru do poruszającego się celu. Testowano oba warianty skanowania: (i) wzdłuż zadanych linii oraz (ii) wzdłuż dowolnie dobranych linii, uzyskując zbliżone wyniki (nieprzekraczające 10%). W efekcie przeprowadzonych badań uznano, że przyjęte tezy znajdują potwierdzenie a tym samym stwierdzono,

* Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

że zastosowane podejście może być stosowane do pomiarów płaskości posadzek.

Słowa kluczowe: płaskość, tachimetr zmotoryzowany, pomiar kinematyczny

WPROWADZENIE

Posadzki w obiektach wielkopowierzchniowych, magazynach wysokiego składowania, a także w wielu innych obiektach budowlanych muszą między innymi spełniać coraz bardziej wymagające kryteria płaskości. Podobnie rzecz się ma z nawierzchniami dróg, placów i innych obiektów inżynierskich. Wszystkie one są poddawane kontrolom mającym na celu sprawdzenie zgodności ich wykonania z wymaganiami projektowymi lub normami. Kontrolom tym służą uregulowania normatywne, które definiują kryteria poszczególnych klas nawierzchni i określają zasady oceny zgodności z tymi kryteriami [1, 5, 6, 16]. Sposoby kontroli i rozwiązania technologiczne z tym związane są przedmiotem licznych prac naukowych [2, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 13, 17, 18, 19, 20].

Klasycznym sposobem oceny płaskości powierzchni jest tak zwana *metoda łąty i klina*, która umożliwia pomiar wyskalowanym klinem zagłębień powierzchni pod położoną na niej łątą o określonej długości (tj. 2, 3 lub 4 m). Łata przykładana jest wzdłuż zadanych linii o ukształtowaniu zależnym od (istniejącej lub przyszłej) zabudowy posadzki, docelowych tras ruchu pojazdów, lub w siatce o regularnych odstępach. W ciągu tych linii nawierzchnia nie powinna mieć zagłębień większych niż określone w normach albo dokumentacji projektowej oraz przyjętych kryteriów statystycznych. Niektóre normy (brytyjskie) określają te krytyczne wielkości dwustopniowo - dla 90% i 100% mierzonych miejsc [16]. Metodę tę powszechnie przyjęto jako referencyjną względem innych metod pomiaru.

Z uwagi na swoje ograniczenia i trudność realizacji metoda łąty i klina poddawana jest różnym modyfikacjom, głównie wynikającym z postępu technologicznego i powszechnego dążenia do zwiększenia efektywności. Powstające nowe metody są w pewnym stopniu uzależnione od cech wspomnianego wyżej, referencyjnego sposobu pomiarów, zatem ich rozwój musi zachodzić w określonej relacji względem niego. Rozwiązania proponowane przez geodetów zmierzają do zastąpienia pomiarów klinem luk pod łątą przez niwelację lub inne metody pomiarów geodezyjnych. Obecnie rozwijane są one w kierunku zastosowania skaningu laserowego lub fotogrametrii [2, 3, 4, 13], albo kinematycznego pomiaru tachimetrycznego [9, 15, 19, 20], albo też tachimetrii wraz z GNSS [10, 14]. Mimo zgodności geometrycznej, metody te różnią się między sobą sposobem doboru i określenia położenia mierzonych punktów. Podczas gdy metody foto-

grametryczna i laserowa obejmują zasięgiem rejestracji całą mierzoną powierzchnię, niwelacja geometryczna lub tachimetria wymagają sekwencyjnego przemieszczania łąty lub pryzmatu wzdłuż zadanej trasy. W tym zakresie są one zbieżne z metodą referencyjną, a jednocześnie mogą bardzo skrócić czas pomiaru płaskości. We wnioskach z wcześniejszych prac wskazaliśmy na znaczny potencjał ciągłego (kinematycznego) pomiaru tachimetrycznego do pryzmatu przemieszczanego przy użyciu jakiegoś pojazdu. W tym celu wykonaliśmy i przetestowaliśmy dwie prototypowe platformy mobilne [19, 20] uzyskując zadowalające wyniki i formułując szereg praktycznych wniosków.

W niniejszej pracy została ponownie podjęta - w oparciu o wcześniejsze doświadczenia - analiza techniki referencyjnej od strony jej niezawodności oraz z punktu widzenia jej aspektów praktycznych. Efektem tej analizy jest określenie szczegółowych kryteriów pomiaru kinematycznego i obliczeń płaskości w oparciu o uzyskane wyniki. Przedstawia się też prototyp platformy samobieżnej, która miałaby być prowadzona po zadanej trasie i śledzona za pomocą tachimetru w celu cyklicznego, prawie ciągłego, pomiaru wysokości. Podaje się w końcu praktyczne rozwiązania obliczeniowe i schemat metody oceny płaskości powierzchni. Proponowana metoda jest na tyle uniwersalna, że można ją stosować zarówno do podszadek obiektów budowlanych jak i do nawierzchni drogowych.

KINEMATYCZNE ROZWIĄZANIE GEODEZYJNE

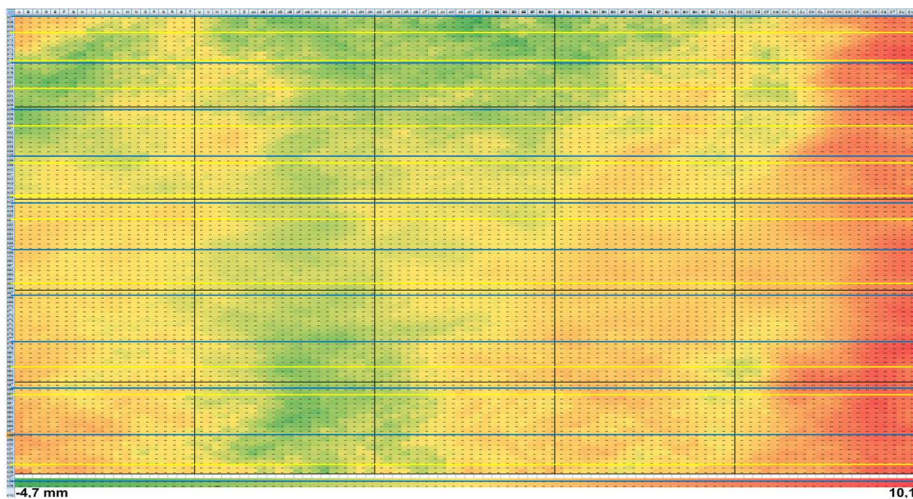
Ocena metody łąty i klina oraz metod pochodnych

Podstawą pomiarów płaskości jest założenie, że określony obiekt lub jego część powinny mieć powierzchnię zgodną z jakimś przyjętym kształtem, którym w praktyce jest płaszczyzna lub inna powierzchnia definiowalna matematycznie. W takim kontekście pomiary płaskości wpisują się w całokształt dziedziny pomiarowej jaką jest metrologia lub diagnostyka geometryczna budowli, stanowią zatem jedno z typowych zadań geodezji inżynierskiej.

Wynikiem omawianego zabiegu metrologicznego jest określenie stopnia zgodności przedmiotu oceny z określonym kształtem odniesienia (tutaj: płaszczyzną), która może przyjąć postać:

- wskaźnika liczbowego opisującego płaskość za pomocą jakiejś miary statystycznej,
- wskaźnika liczbowego odnoszącego się do wydzielonego fragmentu lub określonej procentowo części badanego obiektu (bez wskazania konkretnego miejsca),
- wskaźnika określającego wartości ekstremalne, w tym przypadku największe różnice wysokości,
- wykresu niezgodności (niepłaskości),
- wskazania lokalnych niezgodności na mapie obiektu.

Dla uproszczenia, odstępstwa te są badane w określonych miejscach lub wzdłuż określonych linii, tam, gdzie mają największe oddziaływanie na użytkownika obiektu lub stosowane przez niego urządzenia. Metoda łąty i klina, a także metody profilometryczne, przyjmują domyślnie założenie, że do oceny obiektu wystarczy jego reprezentacja liniowa. Odnoszą się więc do pewnego modelu badanego obiektu. Odniesienie to jest tak mocne, że konkurencyjne metody (np. skaning laserowy [3, 4, 11, 22]) do niego się dostosowują. Drugim założeniem metody łąty i klina jest to, że na określonym odcinku występuje tylko jedno miejsce ilustrujące stopień niepłaskości. Autorzy metody DIPSTIK ([21]) w pierwszym podejściu przyjęli jeszcze większe uproszczenie - że te niezgodności można mierzyć przy stałym interwale pomiarowym (30 cm w przypadku urządzenia D-meter [21]), podobnie zresztą jak to ma miejsce w odniesieniu do pomiaru niwelacyjnego. Z czasem okazało się, że założenie to nie spełnia oczekiwań i rozpoczęto wdrażanie rozwiązań quasi-ciągłych (F-meter [21], profilografy), które w obecnych zastosowaniach przeważają.



Rys. 1. Siatka testowa o niepłaskiej, pofalowanej powierzchni (w granicach 15 mm)

Fig. 1. Test Grid with non-flat, undulated surface (within 15 mm)

Standardowo linie pomiaru płaskości są tycone równoległe do ścian lub osi konstrukcyjnych danej budowli i przecinają się pod kątem prostym. Tak więc w praktyce ocena globalna liczona jest w oparciu o nieliczną reprezentację pomiarową. Przyjmując bowiem pomiary co 10 cm wzdłuż linii oddalonych co 3 m, na placu o powierzchni 1 ha (praktycznie 99×99 m w siatce co 3 m, bez 0,5-metrowych marginesów) daje to 2x34 linie po 990 punktów, czyli 67320 punktów, podczas, gdy cała powierzchnia (pełna siatka 10×10 cm) to 980100 punktów. Zatem do oceny przyjmuje się 7-procentową reprezentację powierzchni.

Taka reprezentacja jest przyjmowana powszechnie w sposób domyślny przez regulacje o charakterze normatywno-prawnym. Jednocześnie oczekuje się, aby trasa „skanowania” wzdłuż linii pomiarowych była wyznaczona z dużą dokładnością. Oznacza to, że całkowicie pomija się nierówności nawierzchni poza liniami skanowania.

Nawet w pomiarach w oparciu o skaning laserowy 3D uzyskaną chmurę punktów interpoluje się i wtórnie generuje się przekroje wzdłuż tych zadanych osi [4]. Rodzi się zatem pytanie na ile w ocenie płaskości należy być wiernym zasadzie pomiaru wzdłuż zadanych osi. W tym celu wykonano eksperyment numeryczny, polegający na wygenerowaniu modelu posadzki o wymiarach 15×15 m (Rys. 1) i ocenie jej jakości w oparciu o trzy sposoby podziału na przekroje: (a) klasycznie w siatce 3×3 m, (b) wzdłuż linii poziomych oddalonych wzajemnie o około 1,5 m, (c) w siatce linii poziomych o losowo wybranych odstępach, lecz z zachowaniem tej samej liczby 22 przekrojów. Warianty te pokazano kolejno na rysunku, zaś wyniki statystyczne - w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki oceny płaskości obliczone dla odcinków 3-metrowych z 15-centymetrowym krokiem, według wariantów pokazanych na rysunku 1 (a - linie czarne, b - niebieskie, c - żółte)

Procent	Wariant a	Wariant b	Wariant c
0 - 3 mm	83,3%	85,5%	78,2%
3 - 4 mm	3,3%	5,5%	9,1%
4 - 5 mm	6,7%	5,5%	7,3%
ponad 5 mm	6,7%	3,6%	5,5%

Precyzja obliczeń $\pm 2\%$ odpowiada zmianie dla 1 punktu.

Ocena płaskości zilustrowana w tabeli 1 bazuje na liczności punktów w kilku grupach odstępstw (co 1 mm) od płaskości. Jak wykazano, różnice procentowego udziału nierówności powierzchni (do 3mm, 3-4mm, 4-5mm i ponad 5 mm) nie przekraczają 5%, zaś ocena obliczona w według normy brytyjskiej (90% i 100% punktów poniżej 5 mm) daje we wszystkich przypadkach wynik niemal identyczny. Wynika stąd wniosek, że układ testowych linii w formie regularnej siatki 3×3 m (lub 2×2) nie jest konieczny i może być zastąpiony zagęszczonymi (dwukrotnie) liniami o tej samej orientacji, i do tego - niekoniecznie w równych odstępach.

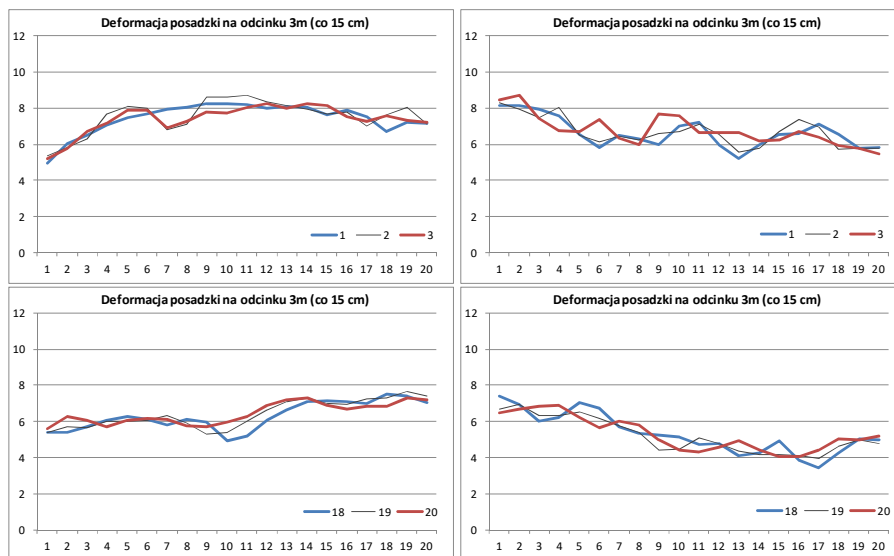
Drugi test wykonano na tym samym modelu posadzki i w tym samym rozmieszczeniu przekrojów, jednak interpolując je pomiędzy dwiema liniami oddalonymi od siebie o 0,3 m (co drugi rząd na modelu z rys. 1). Takie podejście odpowiada pomiarowi, w którym element mierzony znajduje się pomiędzy dwoma śladami kół równoległymi do wytyczonej osi. Jest to sposób planowany dla proponowanej tu geodezyjnej metody kinematycznej z pomiarem do pryzmatu przemieszczanego na samobieźnym wózku. Uzyskane wyniki takiego po-

dejęcia zestawiono w tabeli 2. Pierwszy wiersz zawiera rozbieżności między wartościami odstępstw od płaskości dla środkowego rzędu punktów we wszystkich analizowanych trójkach rzędów - zarówno poziomych (górne wartości), jak i pionowych (wartości dolne) - w wierszu drugim porównano skrajne wartości niepłaskości obliczone dla rzędów odpowiadających trasie kół wózka. W kolejnych kolumnach podano kolejno: wartości minimalne (dla 99 "mierzonych" rzędów), maksymalne i przeciętne, a następnie - skrajne i przeciętne wartości błędów prawdziwych (odchyleń standardowych od wartości prawdziwej).

Tab. 2. Wyniki oceny płaskości obliczone na podstawie interpolowanych wysokości z sąsiednich linii poziomych lub pionowych wokół osi pokazanych na rysunku 1

Wartości [mm]	Różnice między rzędami: - przekroje poziome - przekroje pionowe			Odchylenia standardowe: - przekroje poziome - przekroje pionowe		
	min	max	przec	min	max	min
Rozbieżności między 1 i 3 rzędem	-2,7 -3,3	2,8 -3,4	1,1 1,3	0,19 0,43	1,30 1,84	0,65 0,81
Rozbieżności między rzędem 2 a średnią z 1 i 3	-1,2 -1,9	1,2 1,3	0,5 0,7	0,10 0,24	0,57 0,60	0,26 0,37

Na rysunku 2 pokazano cztery wykresy przekrojów (3-metrowych odcinków) ze śladami kół wózka (linia niebieska i czerwona) oraz środkowego wiersza (czarny) odpowiadającego osi wózka.



Rys. 2. Wykresy utworzone z modelu posadzki (rys. 1) dla czterech losowo wybranych 3-metrowych przekrojów: ślad koła lewego (niebieski), prawego (czerwony) i osi wózka (czarny)

Fig. 2. Diagrams created from the floor model (Figure 1) for four randomly selected 3-meter sections: left wheel (blue), right (red) and trolley axis (black)

Powyższa analiza wykazała, że dla gładkiej, choć niepłaskiej (w granicach 15 mm), powierzchni różnice między wyznaczonymi odstępstwami od płaskości dla rzędu zlokalizowanego w osi między kołami wózka a wartościami interpolowanymi dla śladów dwóch kół są dwukrotnie mniejsze niż różnice między kołami, zaś błędy prawdziwe (względnych wartości znanych) nawet do 3 razy mniejsze. Można zatem uznać za uzasadnione stwierdzenie, że dla statystycznej oceny płaskości można wykonywać pomiary do celu przemieszczanego na dwóch kołach i ocenie poddawać wartości interpolowane. Wniosek ten wykorzystano w omawianym dalej rozwiązaniu.

Idea geodezyjnego pomiaru płaskości nawierzchni

Podejście quasi-ciągłe pomiaru przyjęto w omawianej tu kinematycznej metodzie tachimetrycznej, szczególnie zaś w jej wersji zakładającej pomiar do przyzmatu przemieszczanego na pojeździe kołowym. Polega ono na możliwie częstym pomiarze kątów i odległości do przyzmatu przemieszczanego na mobilnej platformie wzdłuż zadanej trajektorii. Wykazano przydatność precyzyjnych tachimetrów zrobotyzowanych (np. Leica TCRP 1201+) do tego typu pomiarów [9, 14, 15]. Instrumenty te mogą pracować z dużą dokładnością w zasięgu do 100 m, a przy mniej restrykcyjnych wymaganiach dokładnościowych - nawet znacznie dalej [20]. Niezbędne jest jedynie zapewnienie widoczności przyzmatu, a także dostosowanie prędkości wózka do szybkości pracy tachimetru.

Jednym z aspektów metody jest przetworzenie wyników pomiaru do postaci stanowiącej spełnienie kryterium oceny płaskości powierzchni. Założono, że opracowywana metoda pozwoli na uzyskanie różnych, wymienionych wcześniej miar dokładnościowych - zarówno statystycznych jak i deterministycznych.

Warunki pomiaru i obliczeń

W celu kompleksowego opracowania metody sformułowano następujące warunki, jakie powinien spełniać pomiar, a także następujący po nim proces obliczeniowy. Do tych warunków odniesiono wymagania dla pomiaru kinematycznego:

- a) *pomiar jest wykonywany wzdłuż zadanych linii* - w metodzie łaty i klina niezbędne jest ich zaznaczenie na posadzce (nawierzchni drogowej), podobnie się dzieje w punktowych metodach geodezyjnych; w metodzie kinematycznej należy zapewnić odpowiedni sposób przemieszczania przyzmatu i ewentualną jego korektę;
- b) *miarowi poddaje się czystą powierzchnię* - w ujęciu klasycznym powierzchnię trzeba oczyścić na całej długości łaty, metody geodezyjne wymagają opar-

- cia łąty lub drążka na stopce o określonym wymiarze; w rozwiązaniu kinematycznym poprawność pomiaru zależy od przeszkód leżących na trasie kół pojazdu przenoszącego pryzmat;
- c) *pomiar luk odnoszony jest do dwóch najwyższych punktów na przekroju* (na których kładziona jest łąta) - nie mogą one leżeć zbyt blisko siebie [5], nie mogą to być też nieregularne elementy powierzchni (krawędzie, wystające elementy konstrukcji, progi itp.), niezbędne jest odsunięcie osi mierzonych przekrojów od ścian, dylatacji i linii technologicznych [5, 16], a ponadto też baczne przyglądanie się położeniu łąty; elementem kontroli pomiaru kinematycznego musi być selekcja i eliminacja jednostkowych odstępstw od płynności reprezentacji punktowej (skokowych różnic w pomiarze kolejnych punktów);
 - d) *zagłębienia mierzy się do punktów położonych w najniższym punkcie* - należy kontrolować, czy nie jest to uskok, przerwa lub inna nieciągłość, problemem jest też definicja kierunku pomiaru luki (w pionie, prostopadle do łąty czy do powierzchni); odpowiednikiem tego rozwiązania technicznego jest przyjęta metoda obliczeń pomiaru geodezyjnego;
 - e) *metoda łąty i klina odnosi pomiar do jej poszczególnych przyłożeń* - pomiary geodezyjne, w tym pomiary kinematyczne, obejmują szeregi punktów leżących wzdłuż zadanych osi, muszą zatem zostać podzielone na części, w granicach w których dokonywana jest ocena.

ROZWIĄZANIA TECHNICZNE METODY KINEMATYCZNEJ

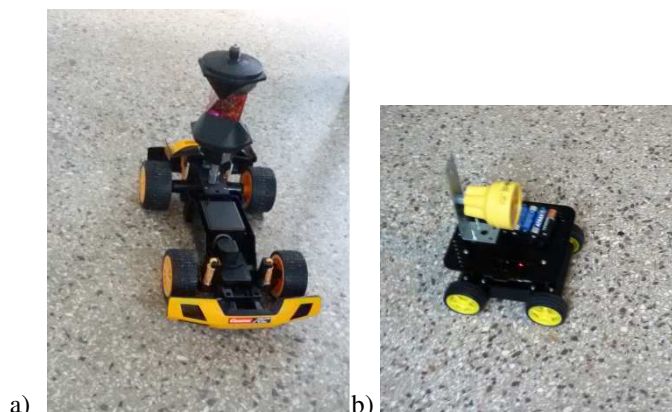
Trasa wózka

Klasyczne pomiary wykonywane są wzdłuż linii oznaczonych uprzednio na nawierzchni, albo są na te linie przeliczane. W przypadku wózka przenoszącego pryzmat jest możliwe prowadzenie go wzdłuż tych linii, o ile nie ma innych warunków technicznych (wózek ma określoną szerokość i wysokość, ma też określone możliwości manewrowania). Planowany przez nas pojazd samobieżny można przemieszczać wzdłuż zadanych linii, jednak sytuacja terenowa, a także jakość systemów kontroli i sterowania mogą doprowadzić do pewnych odstępstw od zadanej trasy.

Zatem trasa ta musi być programowalna, ale też musi być zapewniona możliwość jej kontroli i korekcji. W tym celu zaplanowano następujące działania:

- 1) napęd wózka niezależnie na dwa koła, sterowany z komputera pokładowego;
- 2) oprogramowanie komputera takie, aby było możliwe zadanie trasy - rozpatruje się dwie możliwości: albo w oparciu o zdefiniowane punkty (i kąty) załamania, albo przez zadanie współrzędnych dwóch przeciwległych narożników badanego obiektu i wymiaru oczka siatki;

- 3) kontrola pomiarów tachimetrycznych przez komputer nadzorujący instrument i - w oparciu o obliczone współrzędne kolejnych położeń - wysyłanie poleceń do komputera pokładowego w celu korekty toru przejazdu.



Rys. 3. Mobilne platformy testowane na obiekcie PP: a) z pryzmatem GRZ122, b) z pryzmatem GPR112

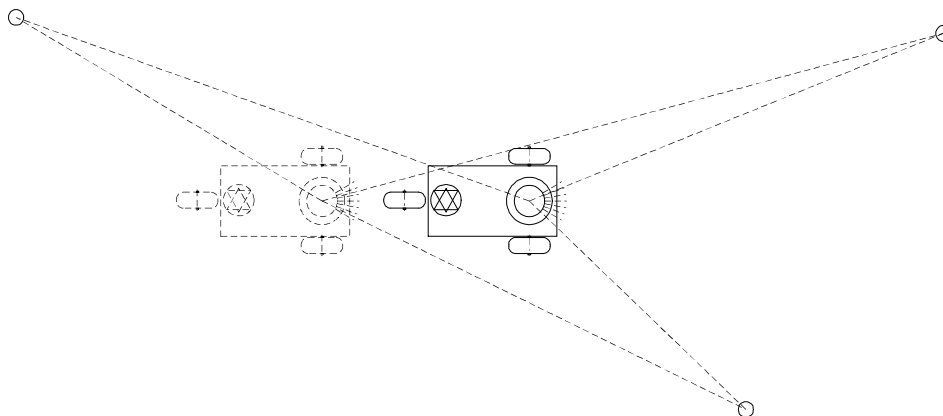
Fig. 3. Mobile platforms tested on a PP object: a) with prism GRZ122, b) with prism GPR112

Punkt pierwszy jest zapewniony w przypadku wózków dedykowanych jako podstawa samobieżnych robotów. Mają one zwykle 2 lub 4 koła napędzane niezależnie i odpowiednią elektronikę sterującą. Do testów wybrano dwa modele tego typu pojazdów - pierwszy z napędem na dwa koła (rys. 3a), drugi z czterema silnikami (rys. 3b). Silniki charakteryzują się dużym momentem obrotowym i są niezależnie sterowane. Pojazdy mają koła o średnicy odpowiednio 64 i 40 mm z oponami przystosowanymi do poruszania się w różnych warunkach terenowych. Pierwszy z modeli ma resorowane koła, zatem w ramach adaptacji usztywniono zawieszenie tylnej osi, nad którą zainstalowano pryzmat 360° .

Pojazd z rysunku 3b może być sterowany z zewnątrz - za pomocą pilota - zatem, aby prowadzić go po zadanej trasie, potrzebne jest zaangażowanie osoby za to odpowiadającej. Rolę pilota może pełnić odpowiednio uzbrojony komputer sterujący, który w oparciu o pozyskane z tachimetru dane obserwacyjne będzie zdolny do wysyłania poleceń wózkowi. Opcjonalnie wyznaczanie trajektorii ruchu lub położenia robota planuje się określać za pomocą skanera laserowego UTM-30 LX/LN oraz odpowiednio rozmieszczonych punktów orientacyjnych (rys. 4). W takim rozwiązaniu położenie wózka oblicza się metodą liniowego wcięcia wstecz. Ten etap prac wymaga wykonania odpowiednich prac elektro-nicznych i jego realizacja planowana jest w przyszłości.

Położenie wózka może być kontrolowane w oparciu o wyniki kolejnych pomiarów tachimetrycznych, obejmujących tradycyjnie pomiar odległości i dwóch kątów - poziomego i pionowego. Na podstawie pomierzonych odległości i kątów

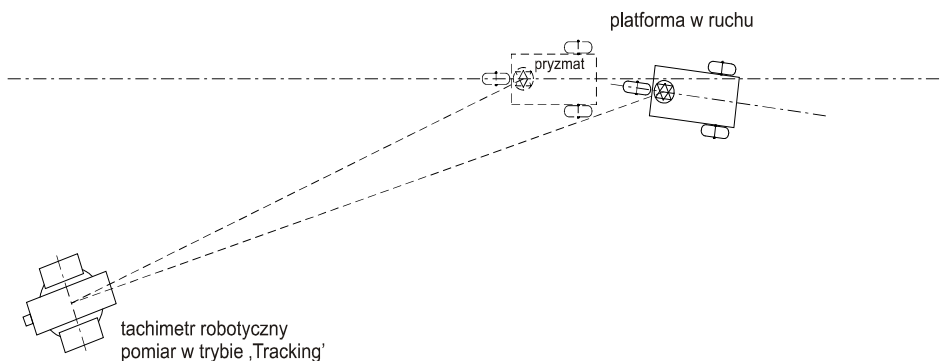
pionowych wyznacza się rzędne służące do opisu ukształtowania powierzchni, po której pryzmat jest przemieszczany, natomiast jego kolejne położenia (współrzędne) oblicza się na podstawie odległości i kąta poziomego. Obliczone współrzędne mogą posłużyć do określenia odległości wózka od zadanej osi, co w porównaniu z wynikami obliczeń wcześniejszych położen umożliwi określenie trendu trasy. To zaś jest podstawą do obliczenia kąta skręcenia wózka w celu płynnego powrotu na zadaną trasę. Omawianą sytuację ilustruje rysunek 5.



Rys. 4. Lokalizacja wózka według punktów orientacyjnych - w oparciu o pomiar odległości dalmierzem obrotowym (na rysunku pośrodku między kołami) i zasadę wcięcia liniowego

Fig 4. Location of the wheelchair according to the orientation points - based on the distance measurement with the rotary distance gauge (on the drawing in the middle of the wheels) and the rule of the linear intersection

Zanim wózek powróci na zadaną trasę jest ponownie mierzony, dzięki czemu można doprecyzować parametry korekty ruchu.



Rys. 5. Śledzenie trasy wózka pomiarowego za pomocą tachimetru używanego do pomiaru wysokościowego nawierzchni

Fig. 5. Tracking the trolley tour with the tachymeter used to measure the road surface

Pomiar

Istotą pomiaru kinematycznego jest cyklicznie powtarzany odczyt kątów i odległości w trybie „*Tracking*”, którego czas trwania deklarowany jest dla instrumentów Leica na 0,15s. Sprawne wykonanie pomiaru wymaga użycia odpowiedniego pryzmatu - raczej okrągłego GPR, np. GPR 131, niż GRZ zaliczonego do kategorii 360°, lepiej widocznego ale mniej dokładnego. Doświadczenia praktyczne wykazały jednak, że nawet w przypadku celowania na pryzmat 360° (tj. GRZ) wysokości można mierzyć z dokładnością powyżej $\pm 0,5$ mm. Pryzmat śledzony jest przy włączonej opcji „*Lock*”, która na bieżąco skierowuje lunetę w jego stronę. Pomiar quasi-ciągły można wykonywać z zadaną częstotliwością, począwszy od 10 pomiarów na sekundę (10Hz), ale dotychczasowe doświadczenia wskazują, że lepiej jest zaprogramować ją na 5Hz lub mniej.

Pomiar z częstotliwością 2Hz oznacza, że aby mierzyć punkty w odstępach 0,05 m wózek musi się poruszać z prędkością 0,1 m/s. Nie jest to zbyt szybki ruch, choć możliwy do uzyskania przez prezentowane wyżej wózki. Niemniej, taka prędkość pozwoli na pomiar 360 m trasy w ciągu godziny, co może to się okazać zbyt wolne. Problem ten będzie przedmiotem dalszych badań.

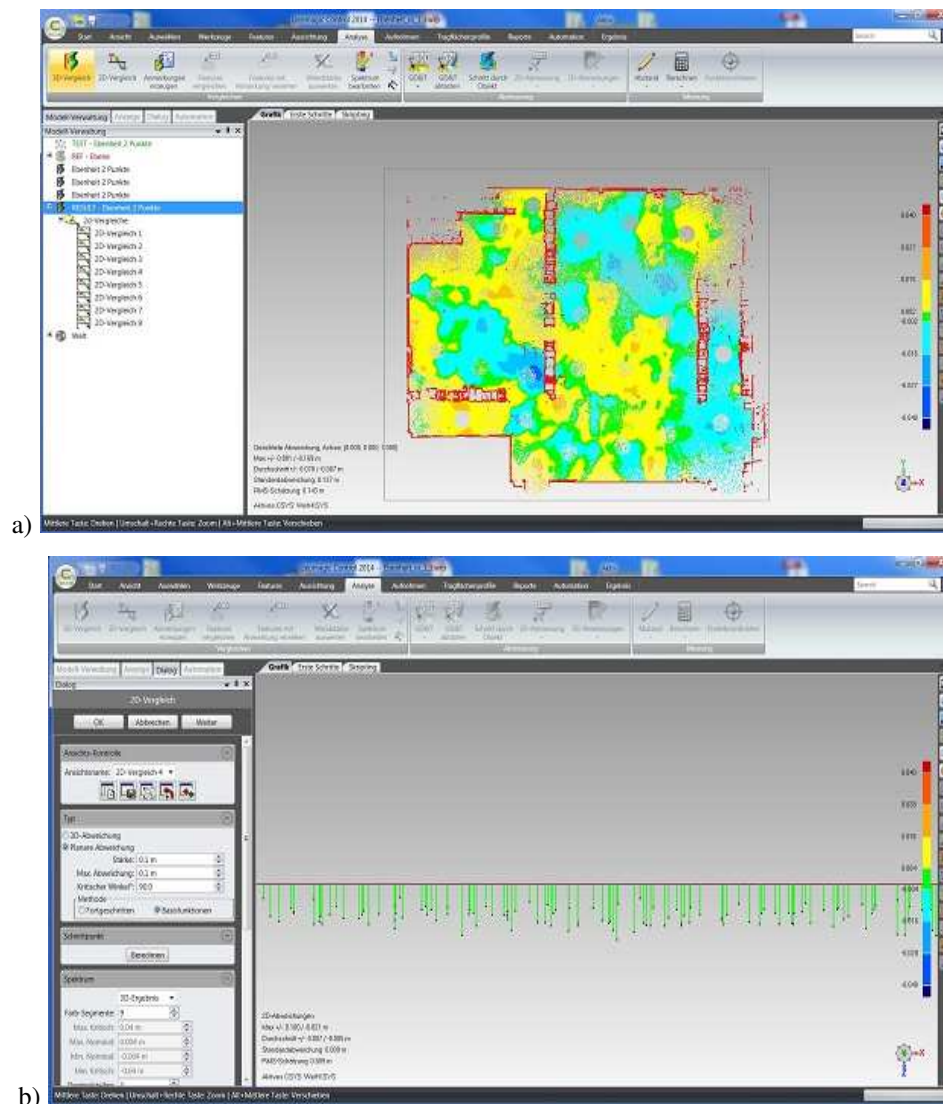
Obliczenia składowej wysokościowej pryzmatu

Pomiar z jednego stanowiska nie wymaga dodatkowych czynności pomiarowych, jednak w przypadku konieczności obserwacji pryzmatu z różnych stanowisk, niezbędne jest określenie położenia oraz orientacji stanowiska. W takiej sytuacji najlepsze wydaje się stosowanie metody „*Free Station*” w nawiązaniu do co najmniej 3 punktów odniesienia. W zupełności wystarczające jest użycie do tego zadania tarcz na folii odblaskowej odpowiednio rozmieszczonych w mierzonej przestrzeni lub jej otoczeniu. Takie podejście daje też możliwość powtarzania pomiarów w kolejnych dniach, zachowując ten sam układ odniesienia sytuacyjnego i wysokościowego.

Obliczenia niepłaskości

Odstępstwa danej powierzchni od płaskości można przedstawić w różny sposób, autorzy strony internetowej [22] zaproponowali dwie formy graficzne przedstawione na rysunku 6a i b.

W poprzednio prezentowanych pracach [19, 20] przedstawialiśmy metodę graficzną pomiaru luk pod łąką. Polega ona na wygenerowaniu - w programie graficznym - wykresu (profilu) i przykładaniu do jego fragmentów (graficznego) modelu łąki. Odległość do najniższego punktu pod łąką odpowiada wielkości mierzonej luki.



Rys. 6. Prezentacja wyników pomiaru płaskości posadzki metodą skaningu laserowego 3D: a) rysunek typu GRID, b) punkty wzdłuż określonego przekroju (źródło: [22], dost. 1.12.2015)

Fig. 6. Presentation of the results of floor flatness measurement using 3D laser scanning: a) GRID type drawing, b) points along a given section (source: [22], 1.12.2015)

W ramach niniejszego opracowania metodę tę rozpisano algorytmicznie, zgodnie z rysunkiem 6, według następującego schematu:

- i. zdefiniuj długość odcinka porównawczego „ d ” (modelu łąty) oraz jego końcowych części „ pd ” „ kd ” służących do obliczenia średniego spadku profilu modelu badanej nawierzchni;
- ii. oblicz spadek w oparciu o rzędne profilu na krańcach odcinka porównawczego:

$$i_{pk} = \frac{H_{kd} - H_{pd}}{(kd - pd)} \text{ oraz rzędną na początku odcinka } H_0;$$

- iii. poszukaj dwóch punktów (A i B) najbardziej oddalonych w górę od odcinka porównawczego pochylonego o wartość „ i_{pk} ”;
 - iv. oblicz spadek między nimi (i_{AB}) oraz nową wysokość H_0 ;
 - v. poszukaj najbardziej w dół oddalonego punktu (D) od osi AB .
- Odległość punktu D od linii AB jest równa wielkości luki pod łątą.

Powyższe rozwiązanie, podobnie jak praktyczne aspekty pomiarów luk pod fizyczną łątą za pomocą wyskalowanego klina, ma pewne mankamenty, budzi też szereg wątpliwości. Sprawy te zidentyfikowano i rozwiązano w sposób opisany poniżej:

- 1) Podstawowym problemem w ułożeniu łąty (fizycznej) na badanej powierzchni jest odległość między najwyższymi punktami - jeśli jest ona zbyt mała, to łąta traci stabilność (pochyla się), jeśli dochodzi do skraju łąty, to może doprowadzić do jej osunięcia. Norma DIN [6] nie dopuszcza do wykonywania pomiaru w takich okolicznościach. W proponowanym tutaj rozwiązaniu przyjęto dodatkowy warunek, aby drugi z najwyższych punktów nie leżał bliżej pierwszego niż w określonej (przyjętej jako parametr) odległości, standardowo 0,5 m. Zatem drugiego punktu poszukuje się na odcinku łąty poza zakresem tego dopuszczalnego odcinka. Natomiast nie rozpatruje się kryterium końców odcinka, bo ono w podejściu analitycznym nie występuje.
- 2) Może się zdarzyć, że skrajnymi punktami na danym odcinku badanego profilu są punkty błędnie pomierzone - albo z powodu skokowej zmiany wysokości wózka (np. nieciągłość na jego drodze), albo grubego błędu pomiaru (np. przeszkoda na drodze wiązki dalmierczej). Takie punkty powinny zostać usunięte ze zbioru obserwacyjnego, albo skorygowane. W omawianym tu rozwiązaniu przyjęto, że dane pomiarowe zostaną poddane ocenie płynności polegającej na zachowaniu pewnego kryterium maksymalnego odstępstwa. W praktyce zaproponowano następujący filtr uśredniający dla i -tego punktu:

$$h_{sr} = \frac{h_{i-2} + 2 \cdot h_{i-1} + 2 \cdot h_{i+1} + h_{i+2}}{6}.$$
- 3) Jeśli różnica między pomierzoną rzędną a wartością średnią obliczoną dla jej najbliższych sąsiadów przekracza określoną wartość dopuszczalną Δh_{dop} to:

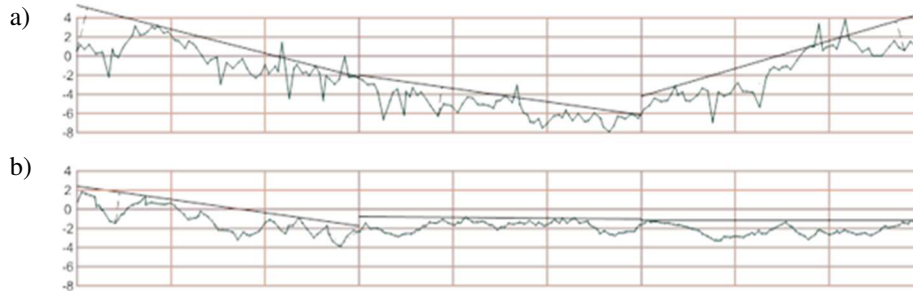
wersja a: usuń tę obserwację, gdy odległość do najbliższych sąsiadów jest wystarczająco mała,

wersja b: zamień tę wartość na obliczoną wartość średnią h_{sr} .

Dopiero taki przekrój poddawany jest ocenie wielkości zagłębień.

- 4) Ostatni problem dotyczy kierunku pomiaru luki. W klasycznym pomiarze klin leży płasko na mierzonej powierzchni - oznacza to, że luka mierzona jest w kierunku prostopadłym do tej powierzchni. Można przyjąć z dużym przybliżeniem, że jest on również prostopadły do łąty, a sama luka ma tę samą wielkość. W pewnym uproszczeniu można też założyć, że pomiar luki wykonywany jest wzdłuż linii pionowej. W naszym rozwiązaniu wielkość zagłębienia liczona jest w kierunku prostopadłym do modelu łąty.

Rysunek 7 ilustruje rozwiązania opisane powyżej. Dopuszcza się pewną modyfikację metody polegającą na przeliczeniu (interpolacji) wysokości pomierzonych punktów na stałe odstępach na profilu, na przykład co 0,1 m. Wersja ta jest również pokazana na wspomnianym wyżej rysunku (część dolna).



Rys. 7. Wykresy sześciu odcinków prezentujący dwie dopuszczalne wersje pomiaru: a) z uskokiemi, które wymagają korekty, b) ze znacznym zróżnicowaniem odstępów między pomierzonymi punktami, wymagającym zagęszczenia reprezentacji powierzchni drogą interpolacji

Fig. 7. Graphs of six sections presenting two acceptable versions of the measurement: a) with faults that require correction; b) with considerable variation of the space between the measured points, which requires densification of the surface representation by interpolation

Podsumowanie

Pomiar płaskości posadzek lub nawierzchni kinematyczną metodą geodezyjną zaproponowaną w niniejszej pracy obejmuje następujące składniki:

- 1) samobieżny pojazd poruszający się po mierzonej powierzchni wzdłuż zadanej trasy i przenoszący pryzmat obserwowany przez tachimetr wyposażony w funkcje śledzenia celu i automatycznie powtarzany pomiar kątów i odległości;

- 2) trasa wózka może być korygowana w oparciu o pomiary jego położenia w kolejnych blokach odczytów;
- 3) w oparciu o pomierzone wysokości (i lokalizacje) kolejnych położzeń pryzmatu na wózku generowany jest profil terenu, a następnie wykonywane są obliczenia odpowiadające tradycyjnemu pomiarowi metodą łąty i klina;
- 4) w przypadku stwierdzonych obserwacji odstających, a także nierównych odstępstw między kolejnymi punktami, stosowane są algorytmy aproksymujące.

Na obecnym etapie prac przyjęte zasady teoretyczne zostały zaimplementowane i poddane badaniom praktycznym. Nie rozwiązano jednak do końca automatyki pojazdu, zatem ostateczna ocena metody będzie możliwa po doprowadzeniu tego etapu badań do końca, co planuje się zrealizować w następnym etapie prac.

LITERATURA

1. ASTM E1155M-01, 2001, *Standard Test Method For Determining FF Floor Flatness and FL Floor Levelness Numbers [Metric]*; American National Standards, Washington, USA.
2. ATASOY G., TANG P. & AKINCI B.: 2009, *A comparative study on the use of laser scanners for construction quality control and progress monitoring purposes*, (<http://itc.scix.net/data/works/att/w78-2009-1-59.pdf>).
3. BOSCHE F., GUENET E.: 2014, *Controlling Slab Flatness Automatically using Laser Scanning and BIM*, The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014), (http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2014_submission_15.pdf).
4. BOSCHÉ F., GUENET E.: 2014, *Automating surface flatness control using terrestrial laser scanning i building information models*. *Automation in Construction* 44, 212-226.
5. DIN 15185, 2005, *Flurförderzeuge - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Einsatz in Schmalgängen*.
6. DIN 18202, 2005, *Toleranzen im Hochbau - Bauwerke* (http://www.kmb2.de/wp-content/uploads/2012/12/DIN-18202_10_2005-Toleranzen-im-Hochbau.pdf).
7. HENRY R. S., INGHAM J.: 2010, *Field measurements of concrete floor surface regularity*. Conference Proceedings of The New Zealand Concrete Industry Conference, Wellington, New Zealand.
8. JAMROŻY P.: 2014, *Analiza dokładnościowa różnych metod pomiaru płaskości nawierzchni przemysłowych*. Praca magisterska, Wydział Budownictwa i Inżynierii ŚRODOWISKA, POLITECHNIKA POZNAŃSKA, POZNAŃ.
9. KIRSCHNER H., STEMPFHUBER W.: 2008, *The kinematic potential of modern tracking total stations - a state of the art report on the Leica TPS1200+*. 1st International Conference on Machine Control & Guidance. (http://www.mcg.ethz.ch/papers/Kirschner_Stempfhuber_05.pdf).

10. MARENDIĆ A., PAAR R., DUVNJAK I., BUTERIN A.: 2002, *Determination of Dynamic Displacements of the Roof of Sports Hall Arena Zagreb* (http://www.svf.stuba.sk/docs/web_katedry/gde/ingeo/TS1-02_Marendic.pdf).
11. NUIKKA M., RÖNNHOLM P., KAARTINEN H., KUKKO A., SUOMINEN A., SALO P., PÖNTINEN P., HYYPPÄ H., HYYPPÄ J., HAGGRÉN H., ABSETZ I., PUTTONEN J., HIRSI H.: *Comparison of three accurate 3D measurement methods for evaluating as-built floor flatness*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing i Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, 129-134, 2008.
12. PAAKKARI JUSSI: 1998, *On-line flatness measurement of large steel plates using moiré topography*. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1998/P350.pdf>.
13. PINGBO TANG, BURCU AKINCI, DANIEL HUBER: 2008, *Characterization of Three Algorithms for Detecting Surface Flatness Defects from Dense Point Clouds*, [https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/1/paper_10_27_2008_IST_SPIE_conference%20\(final\).pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/1/paper_10_27_2008_IST_SPIE_conference%20(final).pdf).
14. STEMPFHUBER W., WUNDERLICH T.: 2004, *Auf dem Weg zur Sensorsynchronisation von GPS und TPS für kinematische Messaufgaben*. Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 05/2004 (http://www.leica-geosystems.de/downloads123/de/general/system1200/case_studies/AVN_0504_Sonderdruck_Leica_2206.pdf).
15. STIROS S. C., PSIMOULIS P. A.: 2013, *Measuring deflections of a short-span railway bridge using a Robotic Total Station*. Journal of Bridge Engineering, 18(2), 182-185 (http://www.researchgate.net/publication/273750555_Measuring_Deflections_of_a_Short-pan_Railway_Bridge_Using_a_Robotic_Total_Station).
16. TECHNICAL REPORT NO. 34, 2003, *Concrete industrial ground floors. A guide to design i construction*. The Concrete Society, United Kingdom.
17. WALSH K. D., MIGUEL G. P.: 2003, *Method for Forensic Analysis of Residential Floor-Elevation Data*, Journal of Performance of Constructed Facilities, 17, 110-117
18. WALSH K. D.: 2007, *Performance of Methods for Analysis of Relative Floor Elevation Measurements in Residential Structures*" Journal of Performance of Constructed Facilities, 21, 329-336.
19. WYCZAŁEK I., JAMROŻY P., WYCZAŁEK M.: 2015, *Pomiary płaskości i spadków nawierzchni metodami geodezyjnymi*, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 20/2015, 77-92.
20. WYCZAŁEK I., TSANTOPOULOS E., WYCZAŁEK M.: 2015, *Dynamiczny pomiar płaskości nawierzchni metodą trygonometryczną*. W M. Kwaśniak (Red.), Techniki inwentaryzacji i monitoringu obiektów inżynierskich (ss. 19-31). Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej. ISBN 978-83-61576-31-0.
21. <http://www.allenface.com/>.
22. <http://www.laserscanning-europe.com/en/news/analysis-flatness-deviations-with-laser-scanners>.

RESEARCHES ON TECHNICAL POSSIBILITIES OF FLATNESS EXAMINATION USING KINEMATIC TRIGONOMETRIC METHOD

Abstract

The new approach for measuring the flatness of floors or other horizontal surfaces is based on the use of vehicle-mounted sensors that moves through these surfaces in a more or less automated way. It becomes competitive in relation to the classical methods using the straightedge and the wedge or tilts or geodetic methods used interchangeably. The measurement with vehicles requires, on the one hand, the movement of the sensors along the set lines, and on the other - the appropriate frequency and precision of the readings. Research and implementation works on the implementation of kinematic tacheometric measurements to the prism moved on the floor are still underway. These works cover two aspects: the measurement capability of the instruments and the precision of evaluation of flatness as a function of prism movement in certain directions on the tested area. These topics are the subject of scientific research and are periodically published.

As the part of this work, kinematic measurements of the Leica TCRP 1201+ motorized tacheometer (RTS) have been performed to the prism mounted on a remote-controlled vehicle used in modeling and robotics. Measurement models (different scan variants) were developed, the reliability of the measurement axes' position by averaging between two wheels of the vehicle was analyzed, and tests that enabled determination of the accuracy of the totalizer-type measurement for the moving target were performed. Both scan variants were tested: (i) along fixed lines and (ii) along individually defined lines, obtaining comparable results (not exceeding 10%). As a result of the research, it was concluded that the adopted theses were confirmed and thus the applied approach could be used for measuring flatness of the floor.

Key words: flatness, motorized tachimetr, kinematic measurement