

STABILIZACJA SYSTEMU POMIAROWEGO DLA WIATRAKOWCA W ASPEKTCIE JAKOŚCI DANYCH LIDAR

STABILIZATION OF THE PHOTOGRAMMETRIC SYSTEM FOR A GYROCOPTER IN TERMS OF THE LIDAR DATA QUALITY

Jakub Kolecki, Marcin Prochaska, Paweł Piątek, Jerzy Baranowski,
Zdzisław Kurczyński

ADRAM sp. z o. o.

SŁOWA KLUCZOWE: stabilizacja, wiatrakowiec, lotniczy skaning laserowy, gęstość skanowania, planowanie nalotu, jakość danych

STRESZCZENIE: Definicja parametrów jakościowych chmury punktów pozyskanej metodą lotniczego skanowania laserowego stanowi element niemal każdego zamówienia wiążącego się z wykonaniem lotów pomiarowych. Jakość danych LiDAR nie może być utożsamiana wyłącznie z ich dokładnością, ale jest pojęciem znacznie szerszym, obejmującym inne parametry chmury punktów pozyskanej w wyniku lotu pomiarowego. Przykładowo wymagania dotyczące parametrów takich jak pokrycie oraz gęstość określone są w polskich regulacja prawnych. Na wyżej przywołane parametry danych LiDAR mogą wpływać w pewnym stopniu czynniki związane z samym lotem, takie jak niestabilność prędkości czy linowe lub wysokościowe odstępstwa od planowanej linii lotu. Najbardziej istotnym czynnikiem wydają się być jednak wychylenia oraz drgania platformy pomiarowej. Pozyskiwanie danych LiDAR bez systemu stabilizacji oraz wibroizolacji może utrudniać zachowanie wymaganych parametrów jakościowych. W trakcie prac prowadzonych w ramach projektu, którego efektem było zbudowanie prototypu ultralekkiej stabilizowanej platformy pomiarowej dla wiatrakowca, dokonano szeregu analiz związanych z doбором odpowiedniego systemu stabilizacji rozpatrując trzy składowe wychyleń: *roll*, *pitch*, *yaw*. W tym celu stworzone zostały narzędzia informatyczne służące badaniu wpływu wychyleń na jakość danych LiDAR przy założeniu określonych parametrów linii nalotowych oraz ustawień pracy skanera.

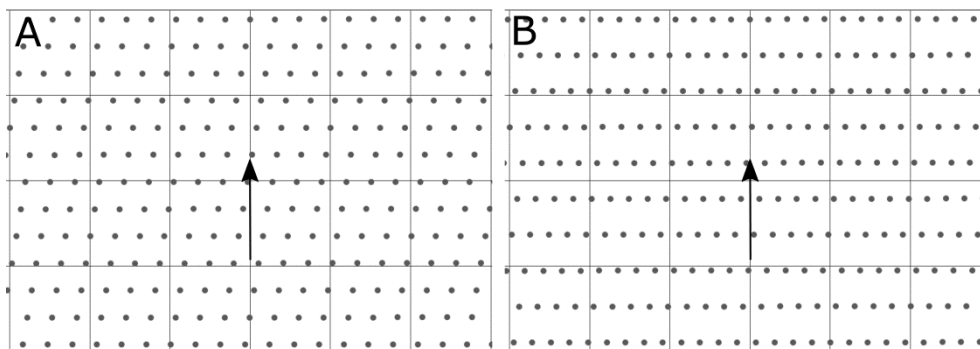
1. WPROWADZENIE

1.1. Jakość danych LiDAR w aspekcie polskich regulacji prawnych

Określenie parametrów technicznych jakie powinny być spełnione przez dane LiDAR jest niezbędne z punktu widzenia dostarczenia produktu o wymaganej jakości. Niektóre parametry danych LiDAR definiowane są w Rozporządzeniu Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji, z dnia 3 XI 2011, w sprawie baz danych dotyczących zobrażeń lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu

(MSWiA, 2011). Rozporządzenie mówi o gęstości punktów laserowych, a także o pokryciu poprzecznym pomiędzy szeregami. Gęstość w myśl Rozporządzenia powinna wynosić minimum 2 pkt/m² lub minimum 8 pkt/m², odpowiednio dla terenów niezurbanizowanych i zurbanizowanych. Otrzymanie wymaganej gęstości chmury punktów jest istotne np. z punktu widzenia generowania NMT (Raber et al., 2007). Wymagane pokrycie poprzeczne powinno być nie mniejsze niż 20% szerokości szeregu i większe niż 100 metrów. Zleceniodawcy mogą także definiować wymogi dotyczące innych parametrów. Przykładem może być równomierność gęstości określona w specyfikacji istotnych warunków zamówienia dla projektu ISOK (Kurczyński, Bakula, 2013). Równomierność gęstości definiowana jest jako iloraz odległości sąsiednich punktów w linii skanowania i wzajemnej odległości linii skanowania. Zgodnie ze specyfikacją wartość ta powinna mieścić się w przedziale $2/3 \div 3/2$.

Rysunek 1 przedstawia dwie chmury punktów o tej samej gęstości, lecz odmiennej strukturze punktów. W przypadku projektu ISOK chmura A spełniałaby kryterium równomiernej gęstości, natomiast chmura B zostałaby odrzucona.



Rys. 1. Symulacja położenia punktów pozyskanych za pomocą skanera z rotującym lustrem przy doborze różnych ustawień prędkości obrotu lustra i zachowaniu niezmienniej częstotliwości emisji impulsu.

Strzałką umieszczoną w osi szeregu oznaczono kierunek lotu. Siatka: 1×1 m.

1.2. Czynniki kształtujące jakość danych LiDAR

Na parametry jakościowe związane z geometrią chmury punktów wpływ mają liczne czynniki. Pierwszym z nich jest baza sprzętowa, w tym rodzaj skanera laserowego. Przykładowo skaner z obracającym się lustrem pozwala na zachowanie korzystniejszej równomierności gęstości niż skaner z lustrem oscylującym, w szczególności na obrzeżach szeregów. Kolejnym czynnikiem jest rodzaj wykorzystywanego statku powietrznego a co za tym idzie możliwa do uzyskania stabilność parametrów lotu. Mowa tu o utrzymaniu stabilnej, zaplanowanej prędkości lotu, utrzymaniu założonej wysokości, unikaniu linowych zejść z planowanej linii naltowej czy też wreszcie unikaniu wychyleń kątowych.

Nie bez znaczenia dla jakości danych jest sam projekt lotu pomiarowego, który zawsze poza narzucanymi wymaganiami i ograniczeniami musi uwzględniać uwarunkowania ekonomiczne. Przykładowo lecąc wyżej wykonawca jest w stanie

pozyskać dane realizując mniejszą liczbę szeregów skracając tym samym całkowity czas lotu i dystans przebyty przez statek powietrzny, zmniejszając koszty realizacji zamówienia. Jednakże wraz ze wzrostem wysokości lotu występujące wychylenia kątowe platformy będą w większym stopniu wpływały np. na lokalne zmiany gęstości chmury punktów a dodatkowo dokładność pomiaru ulegnie pogorszeniu. Kluczową rolę dla zachowania wymaganej jakości danych LiDAR ma bez wątpienia kompensacja wychyleń kątowych, które nieuchronnie występują podczas każdego lotu pomiarowego. Realizowana jest ona za pomocą różnego rodzaju systemów stabilizujących, np. rozwiązań typu *gimbal*.

1.3. Wpływ wychyleń platformy pomiarowej na dane LiDAR w kontekście lotu wiatrakowcem

Niestabilizowane wychylenia platformy pomiarowej w sposób negatywny rzutują na jakość danych LiDAR. Wiatrakowiec, podobnie jak każdy inny statek powietrzny doznaje wychyleń w każdej z trzech składowych: *roll* (ϕ), *pitch* (θ), *yaw* (ψ). Niska masa wiatrakowca a także realizacja napędu oparta o zjawisko autorotacji sprawiają, że specyfika wychyleń kątowych wiatrakowca będzie inna niż helikoptera czy też samolotu. Należy się spodziewać, że wychylenia wiatrakowca mogą być większe niż wychylenia cięższych statków powietrznych. Wychylenie w każdej z trzech składowych będzie w inny sposób przekładało się na zmiany pokrycia, gęstość i jej równomierności. Inny skutek będą miały stałe, dłużej utrzymujące się wychylenia a inne zmiany wychylenia czyli poszczególne składowe prędkości kątowychobrotu ($d\phi$, $d\theta$, $d\psi$). Teoretycznie można spodziewać się, że wpływ na gęstość i jej równomierność będą miały wychylenia w tych składowych, które skorelowane są ze zmianą położenia mierzonego punktu w kierunku równoległym do linii nalotowej. Spodziewany wpływ wychyleń na parametry danych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wpływ wychyleń na jakość danych LiDAR.

● – wpływ bardzo nieznaczny, ●● – wpływ istotny, ●●● – wpływ bardzo istotny.

parametr	ϕ	θ	ψ	$d\phi$	$d\theta$	$d\psi$
pokrycie	●●●	○○●	○○●	○○○	○○○	○○○
gęstość	○○○	○○●	○○●	○○●	●●●	●●●
równomierność gęstości	○○○	○○●	○○●	○○●	●●●	●●●

2. KONCEPCJA BADANIA POSZCZEGÓLNYCH WARIANTÓW STABILIZACJI

2.1. Warianty stabilizacji platformy pomiarowej

Zgodnie z tabelą 1 stabilizacja poszczególnych składowych wychyleń w różny sposób wpłynie na poprawę jakości danych LiDAR. Koszty a także gabaryty i masabudowanej platformy rosną wraz z uwzględnianiem możliwości stabilizacji wychyleń w konkretnych kierunkach (*roll*, *pitch*, *yaw*), wzrostem zakresu kompensowanych wychyleń, dokładnością mechanizmu stabilizującego i szybkością jego reakcji na wychylenia. Rozpatrując kierunki

poszczególne osie wychyleń postanowiono rozważyć warianty stabilizacji przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Rozpatrywane warianty stabilizacji.
 ● – składowa stabilizowana, ○ – składowa niestabilizowana

wariant	<i>roll</i>	<i>pitch</i>	<i>yaw</i>
1	●	○	○
2	○	●	○
3	●	●	○
4	●	○	●
5	○	●	●
6	●	●	●

2.2. Symulacja pracy skanera z rotującym lustrem

Rozpatrywanie poszczególnych wariantów stabilizacji nie może odbywać się bez odniesienia do typu wykorzystywanego systemu skanującego. Budowany prototyp lekkiej platformy dla wiatrakowca wyposażony został w skaner Riegl VQ-580. Jest to skaner wyposażony w mechanizm obracającego się lustra (Vosselman, Mass, 2010) o trójkątnym przekroju. Lustro odbija wiązki lasera wysyłane ze zdefiniowaną przez użytkownika częstotliwością przez układ emitujący. Ponieważ w wyniku obrotu ścianka lustra pochyla się, zmianie ulega kąt, pod którym pada na nią promień. Skutkuje to stopniową zmianą kierunku, pod którym wiązka lasera opuszcza skaner.

Prędkość obrotu lustra jest parametrem modyfikowalnym i jest określana poprzez częstotliwość skanowania (liczbę linii skanowania na sekundę). Dostosowywana jest ona do prędkości i wysokości lotu oraz do wybranej częstotliwości emisji impulsu tak by zapewnić określoną strukturę (wzór) punktów na powierzchni terenu (rys. 1). Skaner Riegl VQ-580 umożliwia ustawienie następujących parametrów skanowania:

- częstotliwość emisji impulsu (ang. *PRR – PulseRepetitionRate*) (wybór spośród wartości: 50, 100, 150, 200, 300, 380 KHz),
- częstotliwość skanowania (ang. *SR – ScanningRate*) (wybór z zakresu 10 ÷ 150 ln/s),
- pole widzenia (wybór z zakresu 0 ÷ 60°).

Podczas lotu rejestrowane są dane trajektorii, które dostarczają informacji o położeniu i orientacji kątowej układu skanera laserowego w funkcji czasu. Korzystając z danych trajektorii a także znając wymienione wcześniej parametry pracy skanera (częstotliwość emisji impulsu, częstotliwość skanowania oraz pole widzenia) można obliczyć kierunek każdego z emitowanych promieni:

$$r = R_{\psi}R_{\theta}R_{\phi}R_{\alpha}v \quad (1)$$

gdzie: R_{ψ} , R_{θ} , R_{ϕ} są macierzami obrotu odpowiednio wokół osi X , Y , Z układu skanera. Macierz R_{α} wyraża orientację kątową wiązki w układzie skanera w momencie emisji impulsu (kąt α jest kątem, pod którym impuls promień opuszcza układ skanera). Wektor v jest jednostkowym wektorem kierunkowym promienia w układzie skanera w przypadku gdy $\alpha = 0$. Korzystając z danych trajektorii odnajdywany jest punkt zaczepienia wiązki

w momencie jej emisji (X_0) co ostatecznie pozwala na zapis równania prostej/reprezentującej promień lasera:

$$l: X = X_0 + rt \quad (2)$$

gdzie: t stanowi parametr równania kierunkowego. Przecięcie tej prostej z powierzchnią terenu odtwarza położenie mierzonego punktu.

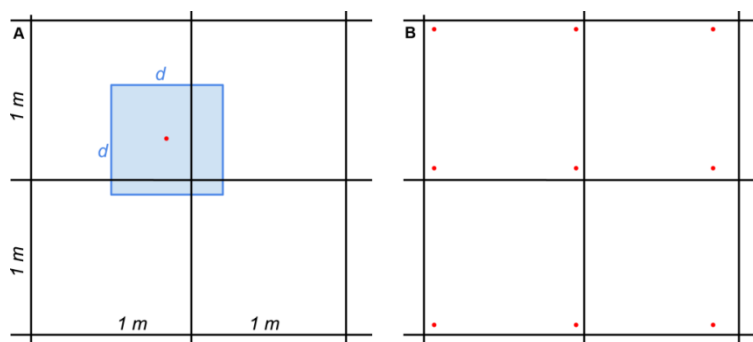
2.3. Koncepcja badania wpływu stabilizacji poszczególnych składowych na parametry danych LiDAR

Idea badania w kolejnych wariantów stabilizacji (tabela 2) opiera się na zerowaniu stabilizowanych składowych kątowych i analizie skanów otrzymanych w wyniku symulowanego nalotu. W bardziej zaawansowanych analizach stosowane mogą być modele tłumienia wychyleń. Aby w trakcie prowadzenia symulacji uwolnić się od innych czynników wpływających na zmiany badanych charakterystyk danych LiDAR, przyjęte zostały następujące założenia:

- skanowany teren jest płaski,
- lot odbywa się po linii prostej,
- lot odbywa się na stałej wysokości,
- lot odbywa się ze stałą prędkością.

2.4. Badanie wpływu stabilizacji na gęstość

Dysponując danymi trajektorii z lotów testowych można uzyskać rozkład gęstości dla wybranych w celu realizacji eksperymentu linii nalotowych przy przyjęciu różnych wariantów stabilizacji. Istnieje wiele metod określania miar gęstości chmury punktów (Shih, Huang, 2006; Lari, Habib, 2012). Na potrzeby prowadzonych symulacji postanowiono utworzyć rastrowe mapy gęstości – takie dane cechuje łatwość prowadzenia wielu analiz przestrzennych. Przyjęto rozdzielczość rastra 1×1 m. Znając równanie prostej (2) można obliczyć punkt jej przecięcia z płaską powierzchnią terenu. Lokalny wzrost gęstości wynikający z pomiaru danego punktu będzie rozkładał się na leżące w jego pobliżu komórki rastra w sposób przedstawiony na rysunku 2A. Wartości zapisane w poszczególnych komórkach rastra zostaną podniesione o wartość reprezentującą udział pola powierzchni kwadratu o boku $d \times d$. Sumaryczny wzrost wartości generowany przez poszczególny punkt wynosi 1. Wartość d dobierana jest tak by była zbliżona do średniej odległości punktów w chmurze. Przyjęcie $d = 0$ oznacza proste inkrementowanie wartości rastra i prowadzi do uzyskania mapy gęstości z dużym udziałem szumu. Dla przykładu z rysunku 2B gęstość lewego górnego piksela wynosiłaby 4 pkt/m^2 , podczas gdy dla lewego dolnego piksela jest to tylko 1 pkt/m^2



Rys. 2. Po lewej (A) - sposób interpolacji wzrostu wartości gęstości dla potrzeb tworzenia mapy rastrowej o rozdzielczości 1×1 m. Po prawej (B) – ilustracja problemów wynikających z prostej inkrementacji wewnątrz komórek rastra. Kropką oznaczono położenie mierzonych punktów.

Mapy gęstości stanowią podstawę do obliczenia histogramów gęstości. Obliczając w dalszej kolejności znormalizowane histogramy skumulowane można określić udział powierzchni szeregu, dla której gęstość wynikowa jest mniejsza niż określony procent gęstości planowanej. Przeprowadzając analizę dla wybranych wariantów stabilizacji (tabela 3) można określić, które składowe wychyleń mają największy wpływ na spadek gęstości poniżej planowanych w projekcie lotu wartości.

2.5. Badanie wpływu stabilizacji na pokrycie

Dysponując danymi trajektorii dla dużej liczby linii nalotowych pozyskiwanych w różnych warunkach atmosferycznych można obliczyć histogramy maksymalnych wartości wychyleń występujących w obrębie szeregów. Pozwoli to na określenie, jaki procent linii nalotowych zostanie zrealizowanych z zachowaniem kompletnego pokrycia planowanej powierzchni szeregu przy zwiększeniu planowanego pokrycia o zadaną wartość.

2.6. Badanie wpływu stabilizacji na równomierności gęstości

Równomierność gęstości definiowana jest jako iloraz odległości sąsiednich punktów położonych na danej linii skanowania i odległości dwóch sąsiednich linii skanowania. Przeprowadzone obliczenia pozwalają na wygenerowanie histogramów równomierności gęstości i sprawdzenie, w którym z wariantów stabilizacji uzyskujemy określony procent nieprawidłowych próbek. Warunki stawiane przed wykonawcami w ramach projektu ISOK zakładają kontrolę równomierności gęstości w 1/3 środkowej części szeregu, dlatego omawianą analizę przeprowadzono również dla takiego przypadku.

Analiz równomierności gęstości nie może pozostawać bez odniesienia do geometrii nalotu oraz parametrów pracy skanera. Przykładowo zauważyć można, że wraz ze wzrostem wysokości lotu (H) będzie zwiększał się wpływ wychyleń w składowej *pitch* na położenie punktów. Zatem im pułap jest wyższy tym większe jest prawdopodobieństwo niezachowania równomiernej gęstości. Ponadto ustawiając parametry pracy skanera (PRR ,

SR) tak by zapewnić większą gęstość, wykonawca naraża się na niezachowanierozumianego dosłownie kryterium równomiernej gęstości. Należy także zauważyć, że przy założeniu niezmienniej prędkości lotu, a także mając na względzie możliwość wyboru parametru *PRR* spośród kilku dopuszczalnych wartości, istnieje ograniczona liczba kombinacji parametrów *PRR*, *SR* oraz *H* zapewniających pozyskanie chmury punktów o określonej gęstości. Analizę wpływu stabilizacji na równomierność gęstości należy zatem przeprowadzić dla przypadku lotu na różnych możliwych dla zachowania określonej gęstości wysokościach. Aby prowadzone analizy w sposób miarodajny nawiązywały do określonych w założeniach projektu ISOK wymagań, parametry pracy skanera przyjęto tak, by osiągnąć zbliżoną do wymaganej w projekcie ISOK gęstość punktów (4 pkt/m²). Na potrzeby symulacji przyjęto ustawienia dające średnią gęstość danych na poziomie 5 pkt/m².

3. CHARAKTERYSTYKA DANYCH

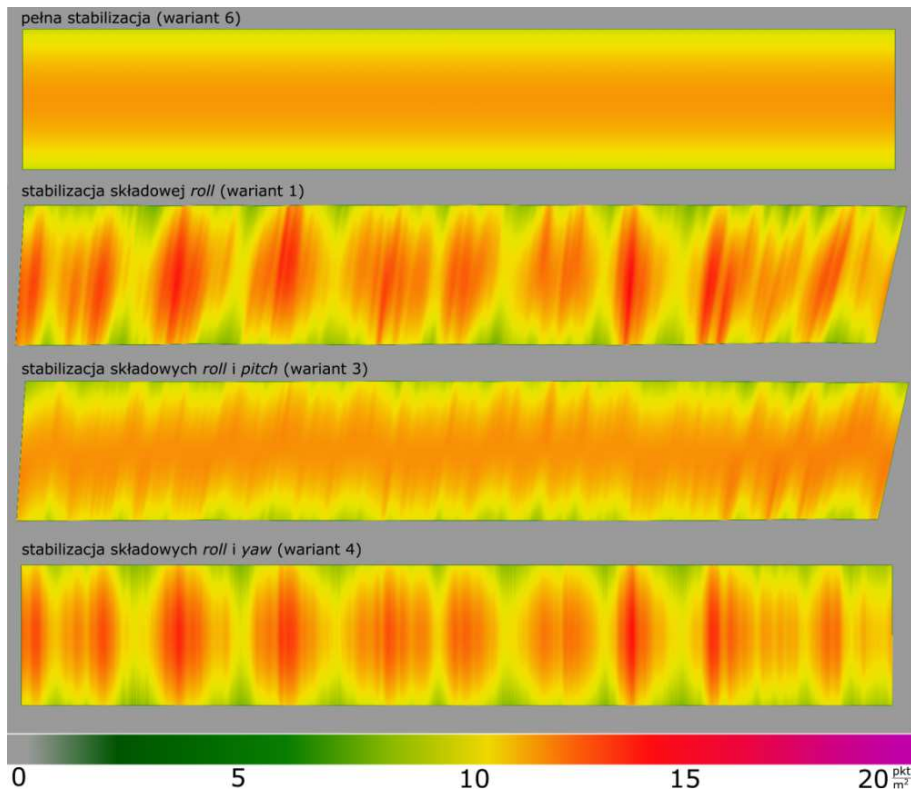
Podczas analiz wykorzystano pliki trajektorii zarejestrowane z wykorzystaniem systemu GPS/INS podczas lotów testowych realizowanych z wykorzystaniem wiatrakowca. Wykorzystywana platforma pomiarowa nie była wyposażona w system stabilizacji. Dla celu analiz pokrycia między szeregami wykorzystano pliki trajektorii dla 176 linii nalotowych. Przed rozpoczęciem analiz dane trajektorii dotyczące poszczególnych linii nalotowych zostały skrócone tak by odrzucić po 10% rekordów zapisanych dla początkowych i końcowych fragmentu. Postąpiono tak, ponieważ dane dla skrajnych części trajektorii mogą nie być w pełni reprezentatywne – pilot mógł kończyć manewr wchodzenia w szereg lub wchodzić w nawrót.

Analizując dane trajektorii zauważono występowanie znacznych drgań platformy pomiarowej wywołane brakiem odpowiedniego systemu wibroizolacji. Aby wyniki analiz uwolnić od wpływu drgań postanowiono przed ich rozpoczęciem dokonać dolnoprzepustowej filtracji danych kątowych.

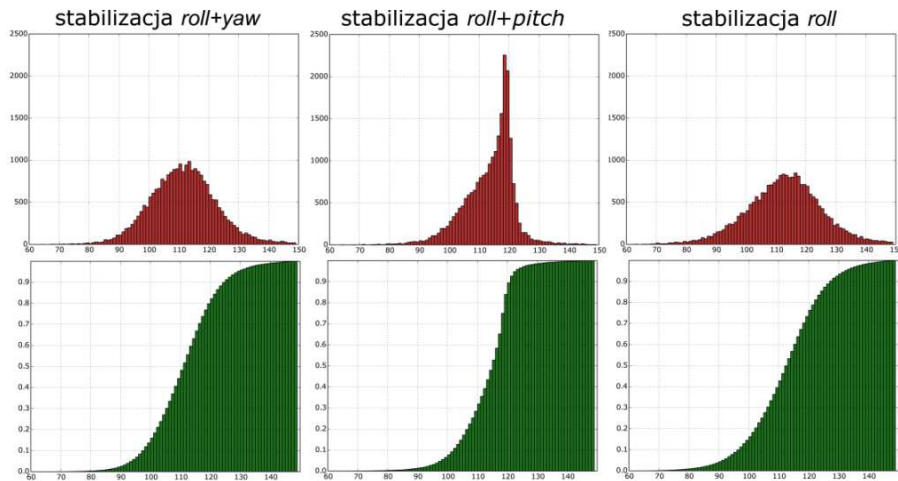
4. WYNIKI

4.1. Wpływ stabilizacji na zmiany gęstość chmury punktów

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe mapy gęstości otrzymane dla wybranych wariantów stabilizacji. Wariant 1 oraz wariant 4 nie przewidują stabilizacji wychyleń w kierunku przód-tył (*pitch*). Dla tych wariantów można zauważyć największe zmiany gęstości. Na rysunku 4 zamieszczono histogramy wartości gęstości, przy czym zamiast podawać wartości gęstości wprost, odniesiono je do gęstości planowanych i podano w procentach (oś pozioma). Za gęstość planowaną przyjęto gęstość na skraju szeregu otrzymaną dla pełnego wariantu stabilizacji. W wariantcie 4 – bez stabilizacji kąta *pitch* – odnotowano, że około 16% obszaru szeregu posiada gęstość mniejszą niż planowana. Dla wariantu 3 (brak stabilizacji kąta *yaw*) wartość ta jest na poziomie około 8%. Jeżeli zmiany gęstości sprawdzane były w środkowej części szeregu – czyli tej efektywnie wykorzystywanej do opracowania – obserwowane zmiany spowodowane brakiem stabilizacji składowej *yaw* byłyby jeszcze mniejsze (rys. 3). Generalnie im bliżej osi szeregu tym wpływ braku stabilizacji kąta *yaw* jest mniejszy.



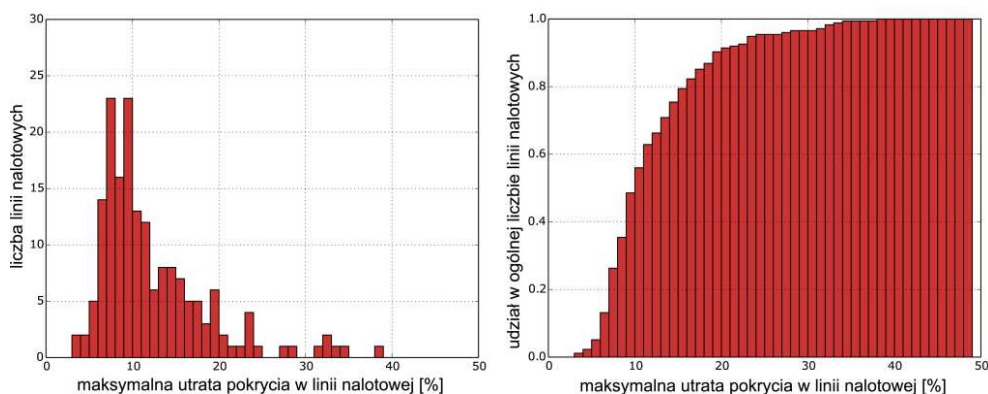
Rys. 3. Mapy gęstości otrzymane dla wybranych wariantów stabilizacji. Szerokość szeregu: 280 m. Planowana gęstość w centralnej części szeregu: 11.5 pkt/m^2 .



Rys. 4. Histogramy gęstości wyrażonej jako procent gęstości planowanej. U góry histogramy zwykłe – na osi pionowej liczba próbek, u dołu skumulowane i znormalizowane – na osi pionowej udział w całkowitej liczbie próbek.

4.2. Wpływ stabilizacji na pokrycie szeregów

Na rysunku 5 przedstawiono histogramy obrazujące wpływ wychyleń w składowej *roll* na maksymalną wartość utraty pokrycia poprzecznego w obrębie analizowanych linii nalotowych. Dla większości linii nalotowych maksymalne notowane wartości utraty pokrycia poprzecznego wyrażone jako udział w zaplanowanej szerokości szeregu wynosiły od 7% do 9%. Stosunkowo wysoka była także liczba szeregów, dla których utrata pokrycia wyniosła od 10% do 20%. Większe spadki pokrycia notowano incydentalnie. Z histogramu skumulowanego (rys. 5) wynika, że stosując pokrycie szeregów równe 20%, czyli takie, jakie wymagane jest Rozporządzeniem, 9 na 10 linii nalotowych będzie miało zapewnione pokrycie. W jednym na 10 przypadków nastąpić może utrata pokrycia skutkująca brakiem danych dla niewielkiego obszaru. W praktyce uzyskiwane wyniki mogą być jednak korzystniejsze – nie wiadomo czym spowodowane mogły być spadki pokrycia z przedziału 30 ÷ 40%. Prawdopodobną przyczyną mogą być np. błędy popełniane przez pilota.

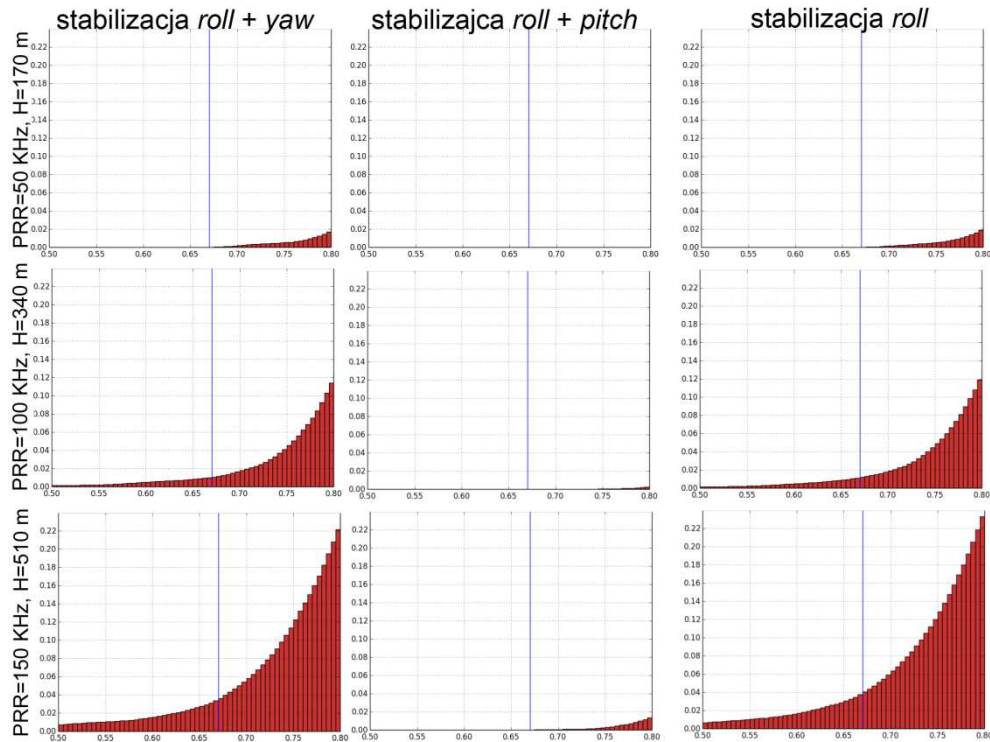


Rys. 5. Histogramy maksymalnych wartości utraty pokrycia w obrębie analizowanych linii nalotowych. Po lewej histogram zwykły. Po prawej histogram skumulowany.

4.3. Wpływ stabilizacji na rozkład gęstości punktów

Na rysunku 6 przedstawiono skumulowane i znormalizowane histogramy równomierności gęstości. Histogramy sporządzono dla 1/3 środkowych części szeregów. Na potrzeby obliczeń w przypadku gdy wartość jednorodności była większa niż 1 uwzględniano jej odwrotność. Przedstawione wykresy pokazują, że kluczowe dla osiągnięcia wymaganej jednorodności jest unikanie wychyleń przód-tył (*pitch*). Przy czym im większa wysokość lotu, tym stabilizacja składowej *pitch* odgrywa coraz większą rolę. Przykładowo dla lotu na wysokości 170 m brak stabilizacji w składowej *pitch* nie będzie w sposób krytyczny wpływał na zachowanie równomiernej gęstości. Jednak dla lotu na wysokości 340 metrów co setny punkt (1%) będzie miał zbyt blisko lub zbyt daleko położonych sąsiadów. Dla lotu na wysokości 510 m wskaźnik ten sięgnie 3%. Brak stabilizacji składowej *yaw* (wariant 4) nie powoduje zmian równomierności gęstości skutkujących przekroczeniem progu 2/3 (względnie 3/2). Należy jednak zaznaczyć, że sytuacja może się zmienić, jeżeli tylko analizie poddamy szersze wycinki szeregów lub

jeżeli lot odbywałby się na jeszcze większej niż najwyższa z analizowanych wysokości (510 m).



Rys. 6. Skumulowane, znormalizowane histogramy jednorodności dla przedziału $0.5 \div 0.8$.

Linia niebieską oznaczono wartość graniczną $2/3$. Na osi pionowej oznaczono udział we wszystkich próbkach. Histogramy sporządzono dla próbek położonych w $1/3$ środkowych części szeregów

5. DYSKUSJA

Zaprezentowane prace badawcze miały na celu pomoc w dobraniu odpowiedniego wariantu stabilizacji platformy pomiarowej uwzględniając dynamikę lotu wiatrakowca zapisaną w postaci danych trajektorii pozyskanych w trakcie lotów bez aktywnej kompensacji wychyleń. Dla zachowania pokrycia szeregów uznano za wystarczające rozpatrywanie stabilizacji składowej *roll*. O ile jednak niebezpieczeństwo braku zachowania pokrycia powierzchni szeregu może być wyeliminowane większym pokryciem planowanym, o tyle utrzymanie kryteriów jakości dla gęstości i jej równomierności, zwłaszcza jeżeli zostały postawione łącznie, jest kwestią dużo trudniejszą. Zwiększenie planowanej gęstości może spowodować przekroczenie literalnie rozumianego kryterium jednorodności (np. wymagania dla projektu ISOK). Dla zachowania wymaganej gęstości oraz jej równomierności bezwzględnie kluczowe jest stabilizowanie składowej *pitch* wychyleń. Dla rozpatrywanych danych trajektorii i przytaczanych wymagań

stabilizacja składowej *yaw* nie była aż tak kluczowa. Wpływ odchyień spowodowany skręceniem wiatrakowca względem planowanego kierunku lotu na gęstość i jej równomierność maleje wraz z przybliżaniem się do osi szeregu. O ile to możliwe można zatem planować nalot ze zwiększonym pokryciem tak by do finalnego opracowania wykorzystać jedynie środkowe części szeregów, pozbawione silnego wpływu wychyleń w składowej *yaw*. Dodatkowo należy zaznaczyć, że w przypadku opracowanej konstrukcji stabilizującej (platforma Stewarta), stabilizacja wychyleń odbywa się na podstawie pomiaru wykorzystującego sensor umieszczony na części platformy przytwierdzonej do wiatrakowca. O ile pomiar kątów *rolli pitch* z dokładnością rzędu 1° jest w łatwy sposób możliwy do uzyskania z wykorzystaniem choćby sensorów inercyjnych typu MEMS, o tyle pomiar kąta *yaw* jest dużo trudniejszy do realizacji. Tańsze rozwiązania opierają się na wykorzystaniu magnetometrów, które cechuje duża wrażliwość na zakłócenia pola magnetycznego czy też jego dobowe zmiany. Alternatywą są rozwiązania oparte o dwuantenowe odbiorniki GNSS, których montaż z wiadomych powodów jest stosunkowo problematyczny, lub też wysokiej klasy jednostki inercyjne, których wykorzystanie w nieakceptowalny sposób podnosiłoby koszty budowy systemu. Na oddzielną uwagę zasługuje wpływ wychyleń w składowej *yaw* na geometrię bloku zdjęć, który w przypadku lotu wiatrakowcem może skutkować niekorzystnym układaniem się obrysów zdjęć w tak zwaną „jodełkę”. Podsumowując, za niezbędne uznać należy stabilizowanie wychyleń w składowej *pitch*. Stabilizację składowych *roll* i *yaw* można uznać za opcjonalną ale jednocześnie wysoce zalecaną.

Praca zrealizowana w ramach projektu: Ultralekka Stabilizowana Platforma Pomiarowa dla Wiatrakowców, nr umowy: UDA-POIG.01.04.00-12-127/11-00

LITERATURA

- Kurczyński Z., Bakula K., 2013. Generowanie referencyjnego numerycznego modelu terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, wydanie specjalne: Monografia „Geodezyjne Technologie Pomiarowe”, s. 59-68.
- Lari Z., Habib A., 2012. Alternative Methodologies for the Estimation of Local Point Density Index: Moving Towards Adaptive Lidar Data Processing, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B3, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia.
- MSWiA, 2011. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 3 listopada 2011 r. w sprawie baz danych dotyczących zobrazowań lotniczych i satelitarnych oraz ortofotomapy i numerycznego modelu terenu, *Dziennik Ustaw*, nr 263, poz. 1571, s. 15307-15394.
- Raber G. T., Jensen J. R., Hodgson M. E., Tullis J. A., Davis B. A., Berglund J., 2007. Impact of Lidar Nominal Post-spacing on DEM Accuracy and Flood Zone Delineation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(7), s. 793-804.
- Shih P. T., Huang C. M., 2006. Airborne Lidar Point Cloud Density Indices, American Geophysical Union, Fall Meeting

Vosselman G., Mass H.-G., 2010. Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Whittles Publishing, CRC Press, Taylor & Francis Group.

STABILIZATION OF THE PHOTOGRAMMETRIC SYSTEM FOR A GYROCOPTER IN TERMS OF THE LIDAR DATA QUALITY

KEY WORDS: stabilization, gyrocopter, airborne laser scanning, scanning density, flight planning, data quality

Summary

The definition of the quality parameters of a point cloud acquired using the airborne laser scanning is the element of almost every terms of reference involving airborne spatial data acquisition. The quality of the LiDAR data should not be identified only with accuracy and should be examined in a wider aspect taking into account other parameters of the point cloud that was acquired as a result of a flight. For instance the Polish legal regulations provide the requirements concerning the coverage of the strips and the point density. The above mentioned parameters of the LiDAR data can be influenced to some extent by many factors concerning the flight itself such as a varying speed as well as the horizontal and vertical deflections from the planned flight line. However, vibrations and angular deflections seem to influence the point cloud quality to the highest extent. LiDAR data acquisition without required stabilizing system makes keeping the required quality parameters very hard. Within the research project which aimed to develop the prototype of the ultralight, stabilized mapping platform for the gyrocopter, a number of analyses concerning the optimal stabilization scenario were carried out. Tools including scripts and computer programs for analyzing the impact of the deflections on the data quality have been developed. The proper stabilization variant has been established taking into account three separate deflection components, i.e.: roll, pitch and yaw.

Dane autorów:

Dr inż., Jakub Kolecki
e-mail: kkolecki@adram.pl
telefon: 12 442 0122, 48 511 088 235

Marcin Prochaska
e-mail: mprochaska@adram.pl
telefon: 12 442 0122

Paweł Piątek
e-mail: piatek.pawel@gmail.com

Jerzy Baranowski
e-mail: jerzybaranowski@gmail.com

Dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński, prof. PW
e-mail: kurczynski@wp.pl
telefon: 22 234 7496

Przesłano 2.10.2015
Zaakceptowano 15.12.2015