

Aleksander NOWAK<sup>1</sup>

### **AUTONOMICZNA METODA MONITOROWANIA WIARYGODNOŚCI GNSS W AGLOMERACJACH MIEJSKICH W OPARCIU O ANALIZĘ OBRAZÓW CYFROWYCH**

*W artykule przedstawiono koncepcję metody monitorowania wiarygodności GNSS w aglomeracjach miejskich bazującą na analizie obrazów cyfrowych. Opisano wyniki przemyśleń dotyczących architektury systemu oraz finalny kształt mobilnego stanowiska pomiarowego.*

### **RECEIVER AUTONOMOUS INTEGRITY MONITORING METHOD IN URBAN AREAS BASED ON DIGITAL PICTURES ANALYSIS**

*The paper presents conception of receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) method based on digital pictures analysis. The results of reflections on architecture of the system and final shape of mobile measurement station are described.*

#### **1. WSTĘP**

Niniejszy artykuł stanowi opis wyników badań, które realizowano w ramach pracy naukowo-badawczej, której celem naukowym było opracowanie autonomicznej metody monitorowania wiarygodności GNSS w aglomeracjach miejskich, która zapewniłaby odpowiedni poziom ochrony przed błędami grubymi wyznaczeń, umożliwiając tym samym zastosowanie pozycjonowania satelitarnego w systemach bezpieczeństwa publicznego. Jak wiadomo, występujące w miastach wysokie budynki powodują efekt cienia radiowego i odbijania sygnałów, co z jednej strony prowadzi do dużych błędów wyznaczeń współrzędnych, z drugiej zaś, uniemożliwia stosowanie metod oceny rozwiązania nawigacyjnego z poziomu odbiornika tzw. RAIM (z ang.: Receiver Autonomous Integrity Monitoring), zaprojektowanych dla lotnictwa. Istotą podjętego problemu było zbadanie możliwości wykorzystania analizy obrazów cyfrowych przedstawiających otoczenie poruszającego się obiektu do kontroli poprawności wyznaczeń współrzędnych przy pomocy GNSS na terenach zurbanizowanych. W efekcie realizacji projektu uzyskano zbiór rozwiązań teoretycznych i praktycznych, które umożliwią implementację opracowanej

---

<sup>1</sup>Instituł Nawigacji i Hydrografii Morskiej, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia, e-mail: a.nowak@amw.gdynia.pl, tel. +48 58 626 27 74, +48 883 911 654

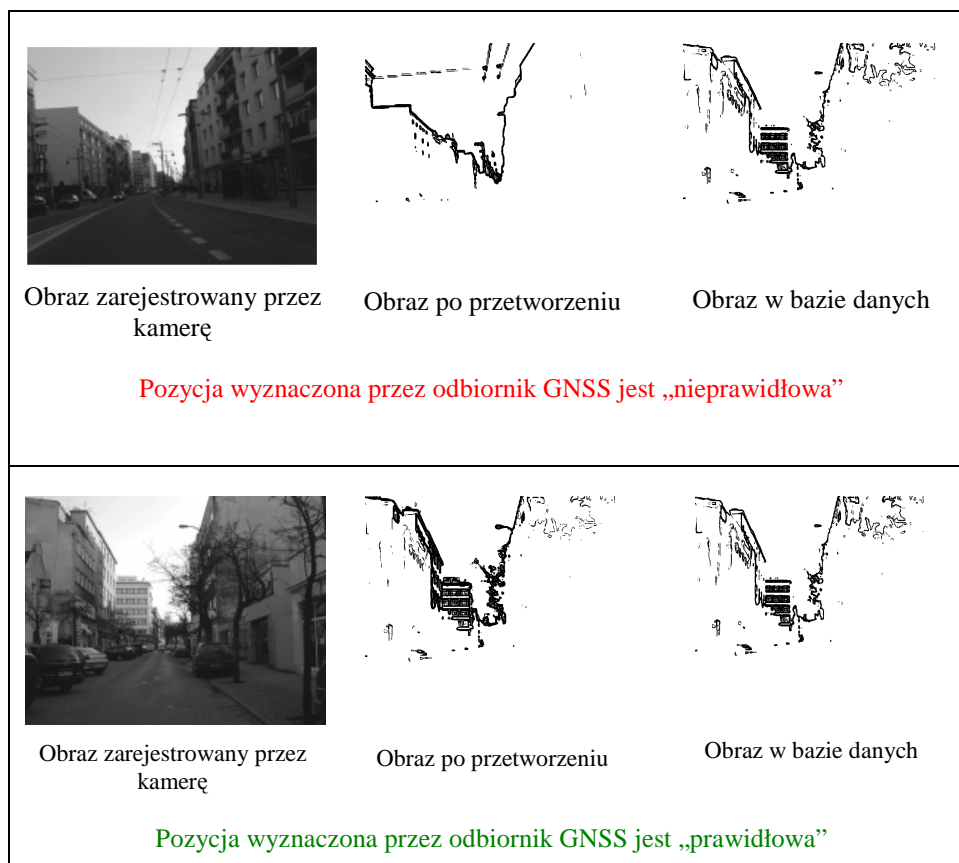
metody i dalsze badania nad jej rozwojem. Poniżej przedstawiono główne wnioski, jakie uzyskano w wyniku prowadzonych prac, dotyczące architektury systemu.

## 2. KONCEPCJA METODY

Idea zaproponowanej metody jest bardzo prosta i można ją ująć w następujący schemat postępowania:

- wyznacz pozycję za pomocą odbiornika GNSS,
- rozejrzyj się wokoło i porównaj to, co widzisz z tym, co powinno znajdować się w miejscu określonym przez odbiornik;
- jeżeli obrazy się zgadzają, to pozycja obliczona przez odbiornik jest „prawidłowa”. Jeżeli nie, to wystąpił błąd wyznaczeń współrzędnych.

Tą prostą ideę zaprezentowano na poniższym rysunku (rys.1).



Rys.1. Idea zaproponowanej metody RAIM

### 3. ARCHITEKTURA MOBILNEGO STANOWISKA BADAWCZEGO

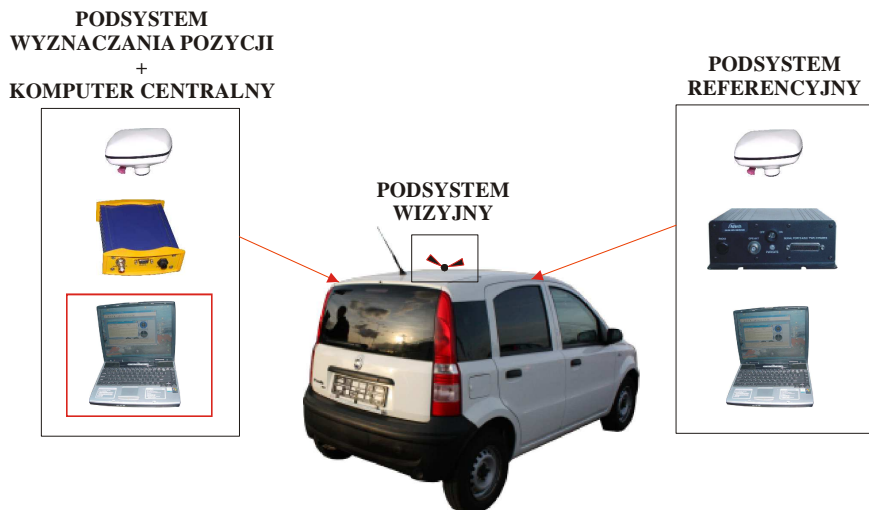
W wyniku przeprowadzonych analiz i eksperymentów wstępnych ustalono rozmieszczenie poszczególnych komponentów mobilnego stanowiska badawczego, w tym podsystemu rejestracji obrazów cyfrowych, ich analizy oraz wyznaczenia współrzędnych pozycji, optymalnych dla celów zaproponowanej metody RAIM oraz sposobu wymiany danych pomiędzy poszczególnymi elementami systemu. Następnie zbudowano mobilne stanowisko badawcze służące rejestracji obrazów na potrzeby budowy bazy danych wybranych ulic miasta Gdyni oraz przeprowadzenia dynamicznych kampanii pomiarowych, służących weryfikacji przyjętych założeń i opracowanych metod. Składało się ono z samochodu, w którym zainstalowano następujące elementy:

- Podsystem wizyjny** – dwie kamery internetowe Live! Cam firmy Creative rozdzielczości 1.3 Mega Pikseli;
- Komputer pokładowy** z bazą danych obrazów wybranych ulic Gdyni, z autorskim oprogramowaniem do rejestracji obrazów, ich analizy i porównywania oraz autorską aplikacją będącą implementacją zaproponowanej metody RAIM;
- Podsystem wyznaczania pozycji** – odbiornik GNSS (GPS/DGPS/EGNOS) MiniMax firmy CSI wireless;
- Podsystem referencyjny** – odbiornik GNSS (GPS+Glonass) GG24 firmy Ashtech z zaimplementowanymi obecnie stosowanymi metodami RAIM i komputer z zainstalowanym oprogramowaniem firmowym Evaluate32. Stanowił on wzorzec służący do oceny skuteczności zaproponowanej metody w porównaniu z metodami RAIM stosowanymi w praktyce.

Cyfrowo zarejestrowany obraz obserwowanego otoczenia poruszającego się obiektu przesyłany był do komputera pokładowego (serca systemu). Zainstalowano na nim autorskie oprogramowanie wykonane w ramach projektu, które służyło do rejestracji, obróbki, analizy, porównywania i rozpoznawania obrazów cyfrowych. Wykonano także program będący komputerową implementacją zaproponowanej metody RAIM. Software został napisany przez wykonawców projektu w środowiskach programistycznych Visual C++ i Visual Basic. Do komputera pokładowego dostarczana była również informacja o pozycji wyznaczonej przez odbiornik GNSS. Komputer pokładowy mógł pracować w dwóch trybach:

- Budowania bazy danych** (rejestracji, obróbki i archiwizacji obrazów ulic);
- Oceny rozwiązania nawigacyjnego** (rejestrowane obrazy w czasie rzeczywistym porównywane były z obrazami z bazy danych).

Złożoność procesów obliczeniowych sprawiła, że do obsługi odbiornika GNSS stanowiącego wzorzec Poziomów Ochrony metod RAIM typu „snapshot” stosowanych w praktyce, wykorzystano dodatkowy komputer. Podłączony był on do komputera pokładowego, do którego transmitował dane o wyznaczonych współrzędnych i decyzji o ich „poprawności” oraz wartości Poziomu Ochrony zapewnianego przez klasyczne metody RAIM typu „snapshot”. Informacje te posłużyły do oceny skuteczności zaproponowanej metody w porównaniu z metodami stosowanymi w praktyce. Architekturę mobilnego stanowiska pomiarowego i przepływ informacji pomiędzy poszczególnymi podsystemami zaprezentowano na poniższym rysunku.



Rys.2. Rozmieszczenie komponentów mobilnego stanowiska pomiarowego

### 3.1. Podsystem wizyjny

Rozmieszczenie elementów podsystemu wizyjnego (kamer internetowych) wymagało szczegółowej analizy, ze względu na kluczową rolę w opracowanej metodzie RAIM. Początkowo rozważano umieszczenie 4 kamer (z osiami optycznymi przesuniętymi o kąt  $90^\circ$  i leżącymi w płaszczyźnie horyzontu), tak jak to pokazano na poniższym rysunku. Rozmieszczenie takie intuicyjnie zdawało się być optymalnym.



Rys.3. Pierwotne rozmieszczenie kamer podsystemu wizyjnego

Jednakże przeprowadzone badania weryfikacyjne i analiza ich wyników pokazały, że rozmieszczenie kamer zgodnie z rys.3 nie jest optymalne. Okazało się, że obrazy rejestrowane przez kamery, których osie optyczne pokrywały się z osią symetrii wzdłużnej

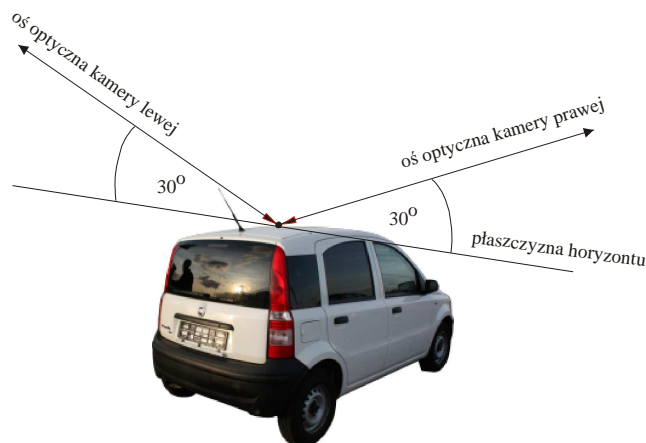
pojazdu (nazwane dalej kamerami wzdłużnymi) nie wnoszą zbyt wielu informacji przydatnych w analizie poprawności wyznaczonych współrzędnych, a komplikują znacznie zarówno proces budowania bazy danych obrazów wzorcowych jak i proces decyzyjny. Po pierwsze, zmienność tego co „widzą” kamery, których osie optyczne pokrywają się z osią wzdłużną symetrii pojazdu jest mała, w porównaniu ze zmiennością obrazów rejestrowanych przez kamery, których osie optyczne są prostopadłe do kierunku jazdy (nazywane dalej kamerami poprzecznymi). Po drugie, zaproponowana metoda ma z definicji służyć ocenie rozwiązania nawigacyjnego w kanionach miejskich, czyli tam, gdzie tradycyjne metody RAIM nie zapewniają właściwego Poziomu Ochrony. Takie warunki to zazwyczaj wąskie ulice z wysoką zabudową. Poruszając się po nich samochód osobowy często znajduje się przed, bądź za pojazdem wyższym od siebie (np. autobusem), co uniemożliwia wykorzystanie rejestrowanego obrazu w procesie decyzyjnym przez dłuższy czas (zazwyczaj na całej długości ulicy ze względu na charakter ruchu miejskiego – brak możliwości wyprzedzania). Przeprowadzone badania pokazały, że taka sytuacja w przypadku kamer poprzecznych trwa krótko (mijanie bądź wyprzedanie wysokiego pojazdu) i rzadko dotyczy obu kamer jednocześnie (ulice w kanionach miejskich to przeważnie ulice jednopasmowe bądź jednokierunkowe).

Kolejnym problemem okazało się zbudowanie odpowiedniej bazy danych obrazów wzorcowych dla kamer wzdłużnych. Proces ten jest dużo bardziej skomplikowany niż w przypadku kamer poprzecznych, za sprawą tego, że w kamerach wzdłużnych często między budynkami kadruje się niebo oraz korony drzew. Algorytmy wykrywania krawędzi na zarejestrowanym obrazie mogą korony drzew i podstawy chmur kłębiastych zaklasyfikować jako elementy stałe otoczenia. O ile kadrowanie się koron drzew sprawiają algorytmom identyfikacji otoczenia kłopoty sezonowe (związane z cyklem wegetacyjnym roślin) to dynamika zmian zachmurzenia jest praktycznie niemożliwa do uwzględnienia. Obniżenie osi optycznej kamer wzdłużnych względem płaszczyzny horyzontu nie rozwiązuje problemu, gdyż w takim przypadku zamiast nieba w kadrze pojawiają się inne samochody. W jednym i w drugim przypadku skutkiem nieprzewidzianej zmiany obiektów w kadrze jest duży procent niewłaściwej klasyfikacji obrazów pochodzących z kamer wzdłużnych.

Przeprowadzone eksperymenty pokazały, że dodatkowe informacje pochodzące od kamer wzdłużnych często nie mogą zostać wykorzystane do oceny poprawności rozwiązania nawigacyjnego, a znacznie podwyższają złożoność obliczeniową procesu.

W związku z powyższym, ostatecznie zdecydowano się na rezygnację z kamer wzdłużnych, a kamery poprzeczne ustawiono pod kątem  $30^\circ$  w stosunku do płaszczyzny horyzontu. Badania weryfikacyjne potwierdziły słuszność przyjętego rozwiązania. Podniesienie osi optycznej eliminuje kadrowanie się pojazdów o podobnej wysokości co nosiciel podsystemu wizyjnego oraz przechodniów. Zatem ostatecznie komponenty podsystemu wizyjnego zostały rozmieszczone zgodnie z rys.4.

Podsystem wizyjny najpierw został wykorzystany do rejestracji otoczenia wybranych ulic Gdyni. Zarejestrowane obrazy posłużyły do budowy bazy danych ulic, na których później przeprowadzono eksperymenty weryfikujące przyjęte założenia i oceniające skuteczność zaproponowanej metody RAIM. Następnie podsystem wizyjny w identycznej konfiguracji został wykorzystany jako część systemu oceny poprawności współrzędnych wyznaczonych przez odbiornik GNSS.

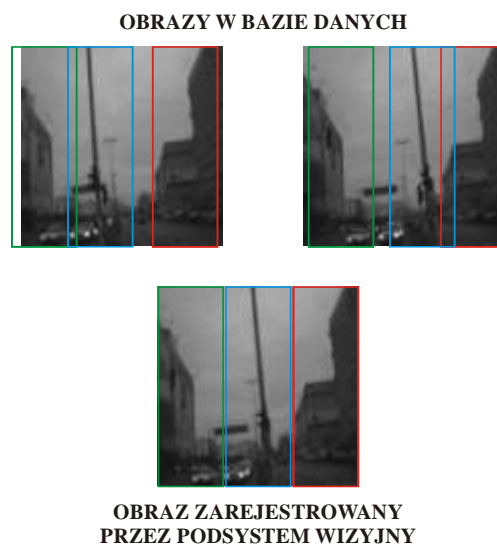


Rys. 4. Ostateczne rozmieszczenie kamer podsystemu wizyjnego

### 3.2. Baza danych

Ponieważ idea zaproponowanej metody opiera się na porównywaniu obrazów rejestrowanych przez pojazd poruszający się w aglomeracji miejskiej z obrazami wzorcowymi przechowywanymi w bazie danych, na wstępie należało dokonać analizy gęstości rejestracji obrazów. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że optymalnym rozwiązaniem, z punktu widzenia zaproponowanej metody RAIM, jest zarejestrowanie całego odcinka ulicy (pomiędzy sąsiednimi skrzyżowaniami) w postaci dwóch quasi-ciągłych obrazów (po jednym na każdą stronę ulicy). Quasi-ciągłe oznacza, że klatki reprezentujące ulice rejestrowane były z rozdzielczością 5 m (zdjęcie ulicy robione było co 5 metrów). Takie rozwiązanie z kilku względów ułatwia proces kontroli poprawności wyznaczanych współrzędnych. Przede wszystkim nie powoduje konieczności dodatkowej synchronizacji (np. rejestrowania obrazu z konkretnego miejsca). Jeżeli pozycja pojazdu została wyznaczona prawidłowo (nie wystąpił błąd grubego wyznaczenia), to kamera umieszczona na pojeździe i rejestrująca obraz w czasie rzeczywistym musi widzieć fragmenty co najmniej dwóch klatek obrazu ulicy znajdującego się w bazie danych. W związku z tym, jeżeli obraz zostanie zarejestrowany pomiędzy punktami, z których zrobione były zdjęcia umieszczone w bazie danych, zostanie on zaklasyfikowany jako jeden z dwóch sąsiednich obrazów wzorcowych, zatem błąd wyznaczenia współrzędnych położenia będzie nie większy niż 2.5 m. Schematycznie sytuację taką przedstawiono na rys.5. Oczywiście większa gęstość rejestracji obrazów umożliwiłaby dokładniejsze wyznaczenie współrzędnych pozycji, jednak przeprowadzone badania pokazały, że zaimplementowane algorytmy porównywania obrazów (zaimplementowano 5 różnych algorytmów) są w stanie, przy możliwości obliczeniowej średniej klasy komputerów (jednostka z dwoma procesorami Intel Core2 2.20 GHz, 2 GB pamięci RAM), porównać 60 obrazów w ciągu 1 sekundy (po 30 z każdej kamery). Zatem w jednej sekundzie można porównać obrazy zarejestrowane przez kamery ze 150 m odcinkiem ulicy. Zakładając, że pojazd porusza się z prędkością 50 km/h to odcinek 150 m pokona w 10.9 s. W tym czasie możliwym jest wykonanie kilku kompletnych ocen rozwiązania nawigacyjnego, co

zdaniem autorów zapewnia właściwy poziom ochrony, nawet w sytuacji gdy nie każdy zarejestrowany przez kamery obraz da się wykorzystać do kontroli poprawności wyznaczonych współrzędnych (np. na skutek chwilowego zasłonięcia ulicy przez przejeżdżający obok wysoki pojazd).



*Rys.5. Obraz rejestrowany przez kamerę w czasie rzeczywistym jako fragment obrazów z bazy danych*

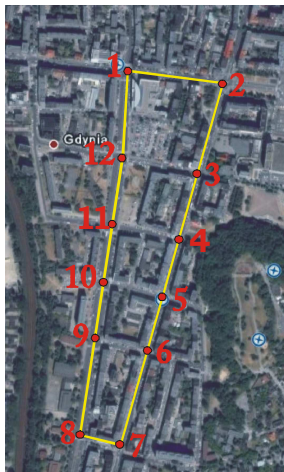
Ulica w kontekście prowadzonych badań rozumiana była jako fragment drogi pomiędzy sąsiednimi skrzyżowaniami. Na potrzeby prowadzonych badań wybrane ulice miasta Gdyni oznaczono symbolami w następującej postaci:

Nr\_p–Nr\_k (np.2-3)

gdzie: Nr\_p – numer skrzyżowania wyznaczającego początek ulicy;  
Nr\_k – numer skrzyżowania wyznaczającego koniec ulicy.

Przykładowe ulice na których prowadzono eksperyment i przypisane im numery skrzyżowań pokazano na rys.6. Każdej ulicy w bazie danych przypisano następujące zbiory elementów:

- Numery ograniczających skrzyżowań (granice ulicy);
- Współrzędne geograficzne skrzyżowań (w układzie WGS-84);
- Długość ulicy w metrach;
- Dwa ciągi obrazów wzorcowych przedstawiające obie strony ulicy;
- Współrzędne geograficzne w (układzie WGS-84) wykonania obrazów wzorcowych.



Rys.6. Przykładowe ulice Gdyni (z numerami skrzyżowań)

### 3.3 Komputer pokładowy

Sercem mobilnego systemu pomiarowego, wykorzystywanego zarówno w procesie budowy bazy danych ulic jak i w ocenie poprawności wyznaczanych przez odbiornik GNSS współrzędnych stanowił komputer Toshiba Satellite z dwoma procesorami Intel Core2 2.20 GHz, 2 GB pamięci RAM i 32-bitowym systemem operacyjnym Vista. Zainstalowano na nim następujące aplikacje:

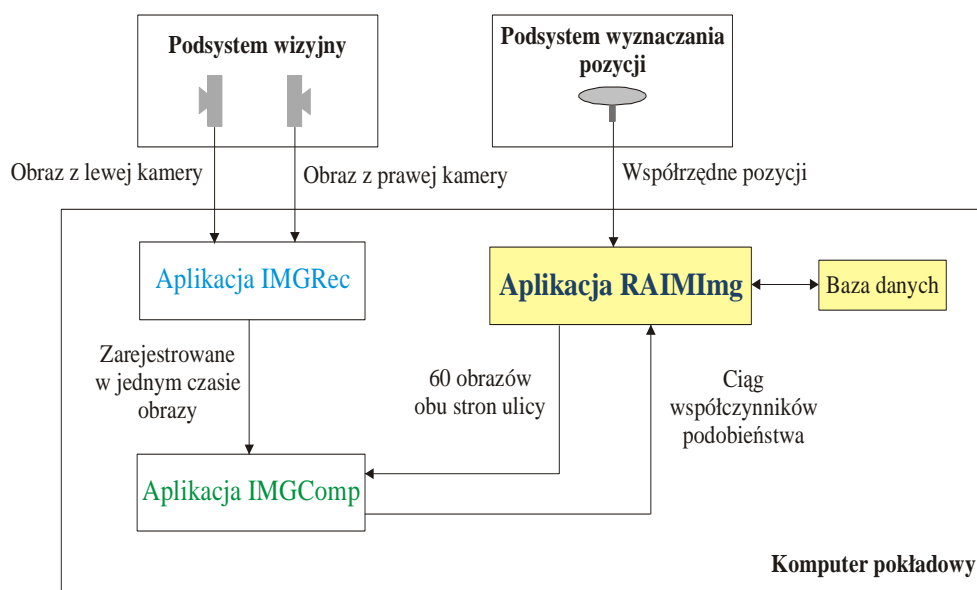
- **IMGRec** – autorskie oprogramowanie do jednoczesnej rejestracji i archiwizacji obrazów cyfrowych pochodzących z 2 kamer Internetowych USB. Wykonano je w środowisku Visual C++. Jego zadaniem jest rejestrowanie obrazów przychodzących z podsystemu wizyjnego i w zależności od trybu pracy, składowanie ich na twardym dysku (tryb budowania bazy danych) bądź przesyłania do aplikacji IMGComp (tryb oceny rozwiązania nawigacyjnego);
- **IMGComp** – autorskie oprogramowanie służące do porównywania obrazów cyfrowych. Wykonano je w środowisku Visual C++. Jego zadaniem było odpowiednie przetworzenie obrazu otrzymanego z aplikacji IMGRec i porównanie go z fragmentem quasi-ciągłego obrazu ulicy (31 obrazów obu stron ulicy zarejestrowanych co 5 m). Danymi wejściowymi dla aplikacji są: 62 obrazy wzorcowe (otrzymane od programu RAIMImg) i dwa obrazy otrzymane z aplikacji IMGRec. W odpowiedzi program wysyła do aplikacji RAIMImg ciąg liczb będących współczynnikami podobieństwa 62 obrazów wzorcowych ulicy z obrazami zarejestrowanymi przez 2 kamery internetowe w trakcie poruszania się pojazdu. Ponadto, aplikacja była wykorzystywana w fazie budowania bazy danych otoczenia wybranych ulic Gdyni. Wykorzystano ją do konwersji zarejestrowanych obrazów do formatów wykorzystywanych przez zaimplementowane metody analizy otoczenia. W aplikacji IMGComp zaimplementowano pięć metod porównywania obrazów:
  - Metodę z funkcją odległości Euklidesa;



- Metodę z funkcją odległości Camberra;
- Metodę z funkcją bliskości Tanimoto;
- Metodę korelacyjną;
- Metoda z rozmytym kryterium dopasowania.

□ **RAIMImg** – autorski program będący implementacją zaproponowanej metody RAIM. Aplikacja otrzymuje współrzędne wyznaczone przez odbiornik GNSS. Na ich podstawie wybiera z bazy danych zbiór 62 obrazów i przesyła go do programu IMGComp. W odpowiedzi uzyskuje ciąg współczynników podobieństwa. Na ich podstawie podejmuje decyzję o poprawności wyznaczonych współrzędnych przez odbiornik GNSS. Ponadto, w celu porównania zaproponowanej metody z metodami RAIM typu „snapshot” stosowanymi w praktyce, aplikacja RAIMImg odbierała następujące dane od podsystemu referencyjnego: wartość Poziomu Ochrony metod klasycznych i decyzję o poprawności wyznaczonych współrzędnych (jeżeli była możliwość oceny wyznaczonych współrzędnych zaimplementowanymi w odbiorniku metodami RAIM).

Sposób wymiany danych pomiędzy opisanymi aplikacjami przedstawiono na poniższym rysunku (rys.7).



Rys.7. Wymiana danych pomiędzy autorskimi aplikacjami komputera pokładowego

### 3.4 Podsystem wyznaczania pozycji

W podsystemie wyznaczania pozycji wykorzystano odbiornik GNSS firmy CSI wireless typu MiniMax. Odbiornik ustawiony był w trybie pracy GPS z częstotliwością

wyznaczeń 1 Hz. Podłączony był on do portu USB komputera pokładowego kablem RS 232 przez przejściówkę typu RS232 to USB Converter. Do ustawienia odbiornika w pożądanym trybie pracy wykorzystano firmowe oprogramowanie dostarczone z odbiornikiem. Odbiornik wymieniał dane z komputerem pokładowym zgodnie z standardem NMEA 0183 - dostarczał informacji o wyznaczonych współrzędnych pozycji za pomocą komunikatu GGA. W czasie pomiarów odbiornik zasilany był z akumulatora 12 V. Antena odbiornika zamontowana była na dachu samochodu (w linii symetrii wzdłużnej) za pomocą przysawki magnetycznej.

#### 4. WNIOSKI

Podstawowym stwierdzeniem, będącym konsekwencją zrealizowanej pracy badawczej i wyników badań jest to, że na podstawie analizy obrazów cyfrowych można prowadzić proces wykrycia i eliminacji błędów grubych wyznaczeń GNSS w aglomeracjach miejskich. Pomimo, że zastosowane kamery cyfrowe umożliwiły osiągnięcie dobrych rezultatów tylko w warunkach dziennych, to jednak otrzymane wyniki są bardzo obiecujące i otwierają perspektywę dalszych badań.

Przeprowadzone symulacje numeryczne i kampania pomiarowa w warunkach rzeczywistych potwierdzają, że stosowane w praktyce metody RAIM typu „snapshot” w warunkach częściowej widzialności nie zawsze zapewniają Poziom Ochrony adekwatny do wykonywanego zadania nawigacyjnego. W związku z tym, słusznym jest podejmowanie prób opracowania nowych metod oceny wyznaczeń GNSS w warunkach niekorzystnej geometrii segmentu kosmicznego.

Zastosowanie odmiennego procesu decyzyjnego sprawia, że zaproponowana metoda może zapewnić dużo lepszy Poziom Ochrony niż klasyczne metody RAIM typu „snapshot”.

Możliwym jest rozszerzenie zakresu stosowania zaproponowanej metody w drodze zastosowania bardziej wyrafinowanych rozwiązań technicznych i zbudowania bazy danych różnego typu obrazów wzorcowych (zarejestrowanych o różnych porach dnia, przy różnych warunkach meteorologicznych, itp.).

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Specht C.: *System GPS*, Biblioteka Nawigacji nr 1, Pelplin, Wydawnictwo „Bernardinum”, 2007.
- [2] Felski A., Urbański J.: *Satelitarne systemy nawigacji i bezpieczeństwa żeglugi*, Gdynia, Akademia Marynarki Wojennej, 1997.
- [3] Januszewski J.: *Systemy satelitarne w nawigacji morskiej*, Gdynia, Fundacja rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, 2002.
- [4] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.: *GPS Theory and practice*, Fourth edition, Wien New York, Springer, 1997.