Nr postępowania **02/11/2026/TRINAV**

# Załącznik nr 1 Szczegółowy opis przedmiotu zamówienia

## Szczegółowy opis przedmiotu zamówienia

Przedmiotem zamówienia jest wykonanie usług badawczych związanych z opracowaniem warstwy sprzętowej oraz niskopoziomowego oprogramowania systemu nawigacyjnego TRINAV, integrującego nawigację inercyjną, satelitarną (GNSS) oraz optyczną.

Głównym celem usług jest pozyskanie nowej wiedzy i opracowanie metod umożliwiających ograniczenie błędów pomiarowych oraz błędów synchronizacji danych w zintegrowanym systemie wieloczujnikowym. Prace obejmą badania zależności pomiędzy konfiguracją i konstrukcją platformy sprzętowej, warunkami środowiskowymi, odkształceniami mechanicznymi i właściwościami torów pomiarowych a jakością danych wykorzystywanych do wyznaczania położenia i orientacji.

Zakres zamówienia obejmuje badania przemysłowe prowadzone z wykorzystaniem eksperymentalnej platformy sprzętowej i modeli laboratoryjnych, a następnie eksperymentalne prace rozwojowe służące zastosowaniu uzyskanych wyników w zintegrowanym prototypie systemu TRINAV.

Projektowanie i wykonywanie układów elektronicznych, modeli badawczych oraz oprogramowania będzie służyło realizacji eksperymentów, weryfikacji hipotez badawczych i ocenie opracowanych metod. Wykonawca zapewni zasoby sprzętowe, stanowiska i oprogramowanie niezbędne do przeprowadzenia usług oraz dostęp do platform i modeli badawczych w zakresie koniecznym do realizacji powiązanych zadań projektu.

### Najważniejsze cechy badanej platformy sprzętowej

Platforma sprzętowa systemu TRINAV musi umożliwiać:

- pozyskiwanie danych z czujników inercyjnych oraz czujników magnetycznych wspomagających wyznaczanie orientacji;
- pozyskiwanie danych z odbiornika GNSS;
- pozyskiwanie obrazów z kamer na potrzeby nawigacji optycznej;
- pomiar parametrów środowiskowych oraz odkształceń mechanicznych płytki drukowanej, wykorzystywanych w badaniach nad kompensacją błędów pomiarowych;
- wykorzystanie układu FPGA oraz jednostki procesorowej, w tym dopuszczalnie układu SoC łączącego obie funkcje, do akwizycji, synchronizacji i przetwarzania danych;
- eksperymentalną weryfikację metod synchronizacji, przypisywania znaczników czasowych oraz kompensacji opóźnień w torach pomiarowych;
- implementację i badanie metod kompensacji błędów oraz współpracę z algorytmami integracji danych opracowywanymi w pozostałych zadaniach projektu;

- komunikację z urządzeniami zewnętrznymi i rejestrację danych wraz z informacjami o czasie pomiaru, konfiguracji sprzętowej i warunkach eksperymentu.

**1. Badania nad konfiguracją platformy wieloczujnikowej i opracowanie bazowej platformy eksperymentalnej**

Wykonawca przeprowadzi analizę dostępnych rozwiązań sprzętowych i metod akwizycji danych w celu określenia ich ograniczeń w odniesieniu do potrzeb systemu TRINAV. Na tej podstawie opracuje plan badań porównawczych wybranych konfiguracji czujników, jednostek przetwarzających i torów transmisji danych.

Problemem badawczym będzie określenie, w jaki sposób konfiguracja platformy oraz organizacja akwizycji i przetwarzania wpływają na jakość pomiarów, opóźnienia, ich zmienność oraz możliwość zachowania spójności czasowej danych pochodzących z różnych źródeł.

Na potrzeby eksperymentów Wykonawca opracuje i uruchomi modułową platformę badawczą, wykorzystującą w szczególności płytki ewaluacyjne FPGA i procesorów, czujniki inercyjne, magnetyczne i środowiskowe, odbiorniki GNSS oraz kamery. Platforma musi umożliwiać wymianę modułów, zmianę konfiguracji i liczby czujników oraz dołączanie dodatkowych układów pomiarowych.

Wykonawca opracuje niezbędne układy pośredniczące, oprogramowanie akwizycji i rejestracji danych oraz procedury eksperymentalne. Przeprowadzi badania porównawcze konfiguracji i określi ograniczenia istotne dla dalszych prac nad kompensacją błędów i synchronizacją.

Rezultatem będzie udokumentowana wiedza o właściwościach badanych konfiguracji, zbiory danych pomiarowych oraz uzasadnione wymagania dla kolejnych etapów opracowania warstwy sprzętowej TRINAV. Platforma zostanie udostępniona na potrzeby realizacji badań w projekcie.

**2. Badania nad wpływem parametrów środowiskowych i odkształceń mechanicznych na błędy pomiarowe oraz opracowanie metod kompensacji**

Wykonawca przeprowadzi badania przemysłowe mające na celu identyfikację i ilościowy opis zależności pomiędzy temperaturą, wilgotnością, odkształceniami mechanicznymi PCB a błędami czujników wykorzystywanych w systemie TRINAV.

Badania obejmą w szczególności przesunięcie punktu zerowego, zmiany czułości, sprzężenia pomiędzy osiami pomiarowymi oraz zależność tych zjawisk od historii i dynamiki zmian warunków pracy. Wykonawca zbada, w jakim zakresie uwzględnienie pomiarów odkształceń PCB i parametrów środowiskowych pozwala poprawić skuteczność kompensacji w porównaniu z metodami referencyjnymi wybranymi na podstawie analizy stanu wiedzy.

Na potrzeby eksperymentów Wykonawca opracuje testowe płytki drukowane wyposażone w struktury rezystancyjne i pojemnościowe umożliwiające pomiar odkształceń oraz zapewni stanowisko do badań przy kontrolowanych zmianach temperatury, wilgotności i obciążeń mechanicznych.

Prace obejmą identyfikację modeli opisujących badane zależności, porównanie alternatywnych sposobów kompensacji oraz określenie zakresu ich stosowalności. Weryfikacja zostanie

przeprowadzona również na danych i w warunkach niewykorzystanych do identyfikacji modeli, z oceną powtarzalności wyników i niepewności pomiarowej.

Rezultatem będą modele błędów, metody ich kompensacji, implementacje eksperymentalne, zbiory danych oraz raport określający uzyskany efekt względem rozwiązania referencyjnego i ograniczenia opracowanych metod.

**3. Badania nad precyzyjną synchronizacją danych i kompensacją opóźnień w torach pomiarowych**

Wykonawca przeprowadzi badania przemysłowe nad metodami zapewnienia spójności czasowej danych pochodzących z czujników inercyjnych, magnetycznych i środowiskowych, odbiorników GNSS oraz kamer.

Problemem badawczym będzie identyfikacja opóźnień pomiędzy fizycznym wykonaniem pomiaru a jego udostępnieniem w systemie, określenie zmienności tych opóźnień oraz opracowanie metod ich estymacji i kompensacji. Badania uwzględnią wpływ warunków środowiskowych, konfiguracji interfejsów, buforowania i obciążenia jednostek przetwarzających.

Wykonawca opracuje i porówna warianty synchronizacji wykorzystujące FPGA do generowania sygnałów wyzwalających, rejestracji zdarzeń pomiarowych i przypisywania znaczników czasowych. Zbada także zachowanie wspólnej podstawy czasu podczas ograniczenia lub utraty dostępu do sygnału odniesienia GNSS.

Na podstawie eksperymentów Wykonawca opracuje modele opóźnień i ich zmienności oraz metody kalibracji i kompensacji. We współpracy z zespołem odpowiedzialnym za integrację danych określi wpływ błędów czasowych na wyznaczanie położenia i orientacji oraz wynikające z tego wymagania dla warstwy sprzętowej.

Rezultatem będą zweryfikowane metody synchronizacji i kompensacji opóźnień, ich implementacje eksperymentalne w FPGA i oprogramowaniu procesorowym oraz raport porównujący dokładność, stabilność i ograniczenia badanych rozwiązań.

**4. Badania nad zintegrowaną architekturą sprzętową oraz opracowanie i walidacja prototypu**

Prace w tym zadaniu obejmą część badawczą oraz następującą po niej część rozwojową.

W części badawczej Wykonawca zbada możliwość zachowania skuteczności metod kompensacji i synchronizacji po integracji podzespołów na wspólnej platformie sprzętowej. Przedmiotem eksperymentów będzie wpływ rozmieszczenia czujników, konstrukcji PCB, warunków termicznych, odkształceń oraz organizacji przetwarzania na jakość danych pomiarowych.

Wykonawca opracuje i porówna warianty architektury oraz laboratoryjne modele niezbędne do weryfikacji hipotez dotyczących wzajemnego oddziaływania podzespołów. Rezultatem tej części będą zweryfikowane zależności, ograniczenia konstrukcyjne i zalecenia projektowe wynikające z badań.

W części rozwojowej Wykonawca wykorzysta uzyskaną wiedzę do opracowania zintegrowanej konstrukcji prototypowej TRINAV. Zakres obejmie projekty PCB integrujących czujniki, układy

pomiarowe, przetwarzanie i synchronizację danych, interfejsy komunikacyjne oraz zasilanie, a także wykonanie i uruchomienie egzemplarzy eksperymentalnych.

Wykonawca przeniesie i dostosuje opracowane oprogramowanie oraz uzgodnione algorytmy do platformy prototypowej. Przeprowadzi testy laboratoryjne i terenowe obejmujące dokładność nawigacji, niezawodność, pobór energii oraz działanie przy zakłóceniu lub niedostępności sygnałów GNSS. Testy posłużą walidacji rozwiązania i identyfikacji niezbędnych modyfikacji.

Rezultatem będą dokumentacja konstrukcji prototypowej, implementacje oprogramowania oraz wyniki walidacji. Wykonawca zapewni dostęp do prototypów na potrzeby badań i testów przewidzianych w projekcie.

**5. Opracowanie i przekazanie wyników badań oraz dokumentacji technicznej**

Wykonawca przekaże Zamawiającemu dokumentację umożliwiającą ocenę, odtworzenie i wykorzystanie wyników prac, obejmującą:

- opis problemów i hipotez badawczych, analizę stanu wiedzy oraz uzasadnienie wyboru metod referencyjnych;
- plany i procedury eksperymentów, opis stanowisk, konfiguracji sprzętowych i warunków pomiarów;
- dane pomiarowe wraz z metadanymi, wynikami analiz i oceną niepewności;
- opracowane modele, metody kompensacji i synchronizacji oraz opis zakresu ich stosowalności;
- schematy elektroniczne, projekty PCB i wykazy elementów;
- kody źródłowe oprogramowania procesorowego, opisy sprzętu dla FPGA oraz pliki i instrukcje niezbędne do odtworzenia implementacji;
- dokumentację interfejsów, formatów danych i procedur kalibracji;
- raporty z badań i walidacji, obejmujące także hipotezy niepotwierdzone, ograniczenia metod oraz rekomendacje dalszych prac.

Dokumentacja i kody źródłowe zostaną przekazane w formatach umożliwiających dalszą edycję i wykorzystanie na zasadach określonych w umowie. Raportowanie i rozliczenie prac będzie umożliwiało odrębną identyfikację badań przemysłowych oraz eksperymentalnych prac rozwojowych.

**6. Współpraca badawcza przy realizacji pozostałych zadań projektu**

Wykonawca zapewni współpracę z zespołami opracowującymi nawigację optyczną, integrację danych z różnych metod nawigacyjnych oraz automatyczną kalibrację systemu TRINAV.

Współpraca obejmie uzgodnienie interfejsów i formatów danych, konfigurację platform na potrzeby wspólnych eksperymentów, pozyskiwanie i udostępnianie danych pomiarowych oraz analizę wpływu właściwości warstwy sprzętowej na wyniki algorytmów.

Wykonawca będzie uczestniczył w interpretacji wyników wspólnych badań i identyfikacji przyczyn rozbieżności pomiędzy zachowaniem modeli a wynikami eksperymentów. Wnioski zostaną wykorzystane do aktualizacji modeli błędów, metod synchronizacji i wymagań konstrukcyjnych oraz udokumentowane w raportach z realizacji usług.