

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Wydział Rolnictwa i Biologii

Zbigniew Witold Curyło

Systemy nawigacji satelitarnej w rolnictwie precyzyjnym

Satellite navigation systems in precision agriculture

Praca dyplomowa

Praca wykonana pod kierunkiem
Dr Dariusza Gozdowskiego

Warszawa 2015r

Oświadczam, że pracę napisałem samodzielnie i wyrażam zgodę na udostępnienie pracy w bibliotece. Egzemplarz niniejszy jest zgodny z załączoną wersją elektroniczną.

.....
(data)

.....
(podpis autora pracy)

Praca została przygotowana pod moim kierunkiem. Treść jest zgodna z tytułem.

Oceniam ją jako

.....
(data)

.....
(podpis promotora pracy)

Dedykacja

Pracę tę dedykuję wszystkim poległym w obronie Ojczyzny przed najeźdźcami z Niemiec i Rosji Sowieckiej. *Cześć ich pamięci!*

Podziękowania

Dziękuję rodzicom i bratu za udzielone wsparcie.

Dziękuję promotorowi za wyrozumiałość i cierpliwość.

Spis treści

1	Wstęp	1
2	Systemy nawigacyjne	2
2.1	Układ Odniesienia	2
2.1.1	ICRS	2
2.1.2	ITRS	3
2.2	Globalne Systemy Nawigacji Satelitarnej GNSS	5
2.2.1	GPS	5
2.2.2	GLONASS	8
2.2.3	GALILEO	9
2.3	Algorytmy Pozycjonowania	11
2.3.1	DGPS/DGNSS	14
2.3.2	RTK	14
2.3.3	PPP	14
2.4	Nawigacja Inercjalna	14
3	Algorytmy sterowania	15
3.1	Podział algorytmów sterowania ze względu na dostarczane dane wejściowe	16
3.2	Podział algorytmów sterowania ze względu na zastosowane algorytmy decyzyjne	18
4	Aktualne badania	20
4.1	Zintegrowane systemy pozycjonowania w czasie rzeczywistym	20
4.1.1	Zastosowanie GNSS w precyzyjnym nawożeniu gleby	20
4.1.2	Algorytmy wyznaczania pozycji oparte na filtrze Kalmana	21
4.2	Specjalistyczne opracowanie obserwacji - postprocessing	23
4.3	Inne zastosowania GNSS w rolnictwie precyzyjnym	24
5	Analiza rynku	25
5.1	Wykorzystanie GNSS	25
5.2	Zastosowanie systemów inercjalnych	27
5.3	Zastosowanie sensorów video	28
6	Perspektywy rozwoju oraz wnioski	30
6.1	Perspektywy rozwoju	30
6.2	Wnioski	30
A	Dodatek	31
A.1	VLBI	31
A.2	DORIS	32
A.3	SLR	34
A.4	LLR	34
A.5	Polski wkład w rozwój światowej geodezji i nawigacji	34
	Bibliografia	38

Rozdział 1

Wstęp

W obecnym czasie technologia produkcji maszyn bardzo dynamicznie się rozwija. Maszyny stają się coraz większe oraz bardziej wydajne. Ponadto bardzo często wyposażone są w nowoczesne urządzenia elektroniczne. Niestety rolnicy nie mogą w pełni korzystać z rozwoju techniki. Natura ludzka wymusza na farmerach aby odpoczywali w nocy. Maszyny takim ograniczeniom nie podlegają. Wobec powyższych można zaryzykować stwierdzenie, że to operator maszyn staje się granicą która limituje wzrost wydajności wykonywanej pracy. Wynika z tego ogromna potrzeba posiadania zaawansowanych systemów automatycznego sterowania maszynami rolniczymi, w celu zwiększenia wydajności oraz precyzji wykonywanej pracy [33]. Ponadto wykorzystanie wyspecjalizowanych narzędzi rolnictwa precyzyjnego zmniejsza koszty produkcji, zmniejsza negatywny wpływ środków ochrony roślin i nawozów na środowisko naturalne, oraz przyczynia się do wzrostu jakości oraz plonowania płodów rolnych [19].

W pracy szczególnie nacisk położono na przegląd zastosowania nowoczesnych systemów globalnego pozycjonowania GNSS w rolnictwie precyzyjnym zarówno na szczeblu naukowym jak i komercyjnym. W rozdziale drugim omówiono istotność globalnego układu odniesienia ITRF dla geodezji kosmicznej a tym samym pośrednio dla rolnictwa. Opisano także najważniejsze cechy systemów satelitarnego pozycjonowania GNSS, techniki oraz algorytmy pozycjonowania. Opisana została także integracja nawigacji satelitarnej z nawigacją inercjalną (GNSS + INS). W rozdziale trzecim opisano pokrótce algorytmy prowadzenia pojazdów rolniczych na podstawie danych nawigacyjnych. Rozdział czwarty koncentruje się na przeglądzie aktualnych badań naukowych, natomiast w rozdziale piątym opisano aktualny stopień wdrożenia rozwiązań wypracowanych przez świat uniwersytecki na rynku komercyjnym. Rozdział szósty zawiera perspektywy rozwoju oraz wnioski.

Rozwój rolnictwa precyzyjnego na świecie będzie wynikał pośrednio z modernizacji istniejących oraz powstawania nowych systemów satelitarnego pozycjonowania GNSS, rozwoju elektronicznych czujników pomiarowych nawigacji inercjalnej MEMS, a zwłaszcza z opracowania zaawansowanych algorytmów fuzji danych opartych na filtrach Kalmana. Rozwój zaawansowanych technologii przyczyni się do zmniejszenia kosztów technik już istniejących, a dzięki temu rolnictwo precyzyjne stanie się jeszcze bardziej popularne a jego narzędzia tańsze i łatwiej dostępne.

Jeżeli rozpatrujemy rynek polski, to przy średniej wielkości gospodarstw rolnych na poziomie 10.48 ha [22] zakup precyzyjnego dwuczęstotliwościowego odbiornika GNSS jest ekonomicznie niemożliwy. Obecnie niemożliwe jest zatem na szeroką skalę wdrożenie precyzyjnych technik prowadzenia pojazdów. Nadzieję stwarzają algorytmy fuzji danych z kilku niezależnych systemów nawigacyjnych. Dokładność każdego z nich osobno nie musi być bardzo wysoka, ale gdy obserwacje opracujemy łącznie za pomocą filtra kalmana wtedy nawet odbiorniki GNSS gorszej klasy mogą okazać się wystarczające. Dla nielicznych korzystających z zaawansowanych dokładnościowo rozwiązań rolnictwa precyzyjnego nieocenionym wsparciem zapewne jest polska aktywna sieć geodezyjna ASG-EUPOS.

Rozdział 2

Systemy nawigacyjne

W tym rozdziale omówione zostały podstawy teoretyczne dotyczące infrastruktury geodezyjnej niezbędnej do określania położenia punktów a zatem i obiektów w przestrzeni. Na początku zostały omówione zagadnienia dotyczące geodezji kosmicznej, której techniki zrewolucjonizowały możliwości człowieka w dziedzinie nawigacji tak bardzo istotnej dla rolnictwa precyzyjnego. W pracy zdecydowano się opisać tylko trzy najpopularniejsze systemy globalnego pozycjonowania. W dalszej części rozdziału opisano pokrótce algorytmy wyznaczania pozycji w nawigacji satelitarnej oraz inercjalnej, a także metodę integracji tych dwóch jakże uzupełniających się technik.

2.1 Układ Odniesienia

Przykładem obrazującym potrzebę posiadania stabilnego w czasie i przestrzeni układu odniesienia są ścieżki przejazdowe, dzięki którym koła pojazdu nie niszczą upraw. Aby możliwe było tworzenie ścieżek przejazdowych dokładność pozycjonowania traktora bądź innego narzędzia musi być rzędu kilku centymetrów względem poprzednich przejazdów. Jedynym sposobem na uzyskanie wyżej wymienionej dokładności prowadzenia maszyn jest dysponowanie precyzyjnie zdefiniowanym układem, w którym przechowywane będą współrzędne poprzednich przejazdów i w którym będzie dostarczana pozycja w czasie rzeczywistym. Ponieważ dokładność wyznaczenia pozycji w danym układzie zależy od dokładności realizacji tego układu, w praktyce przyjmuje się, że układ odniesienia powinien być zrealizowany o rząd wielkości dokładniej niż wymagana dokładność pozycjonowania. [27, strona 210] Poniżej opisano dwa najważniejsze systemy odniesień przestrzennych oraz ich realizacje.

2.1.1 ICRS

International Celestial Reference System - Międzynarodowy Niebieski System Odniesienia realizowany poprzez technikę VLBI¹, składa się z zestawu procedur i konwencji oraz odpowiednich zasad modelowania koniecznych do zdefiniowania w dowolnym momencie czasu trzech osi kartezjańskiego układu współrzędnych w przestrzeni kosmicznej [29]. Osie tego układu są zdefiniowane w taki sposób aby ich kierunki względem najodleglejszych obiektów kosmosu były stałe. Z punktu widzenia kinematyki system jest quasi-inercjalny [17, strona 23]. System jest zrealizowany fizycznie za pomocą układu odniesienia ICRF - International Celestial Reference Frame, który składa się z zbioru precyzyjnie wyznaczonych współrzędnych pozagalaktycznych obiektów takich jak: kwazary oraz aktywne jądra niektórych galaktyk. Ruchy własne powyższych radioźródeł są zaniedbywalne z punktu widzenia docelowej dokładności wyznaczania współrzędnych.[26, strona 21]. Początek układu współrzędnych w systemie ICRS został zdefiniowany w punkcie barycentrum układu słonecznego. [28, strona 163]. Profesorowie Brzeziński oraz Rogowski powiadają, że dokładność kierunku osi układu ICRF waha się w granicach 20 mikrosekund miary łukowej (50 odpowiada 1.5

¹VLBI - interferometria długich baz, szczegółowo opisana w dodatku A zamieszczonym na końcu pracy

mm na pow. Ziemi), co przy dostępności precyzyjnego modelu precesji - nutacji pozwala stwierdzić, że ICRF jest najlepszym inercyjnym układem odniesienia dostępnym obecnie [28, strona 164]. Warto zadać pytanie: dlaczego system ICRS wraz z jego realizacją w postaci ICRF są takie ważne z punktu widzenia rolnictwa precyzyjnego? Według autorów pracy [28, strona 164] ponieważ z wystarczającą dokładnością możemy przyjąć iż, układ ICRF jest inercyjny, są w nim zatem spełnione równania 2.1 ruchu sztucznych satelitów Ziemi wolne od tzw. pozornych sił bezwładności.

$$\ddot{\vec{r}} + \mu \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|^3} = \vec{a}_p \quad (2.1)$$

Gdzie \vec{r} oznacza pozycję satelity względem środka mas Ziemi.

$\ddot{\vec{r}}$ oznacza drugą pochodną wektora względem czasu.

$\mu = GM$ oznacza ziemską stałą grawitacji.

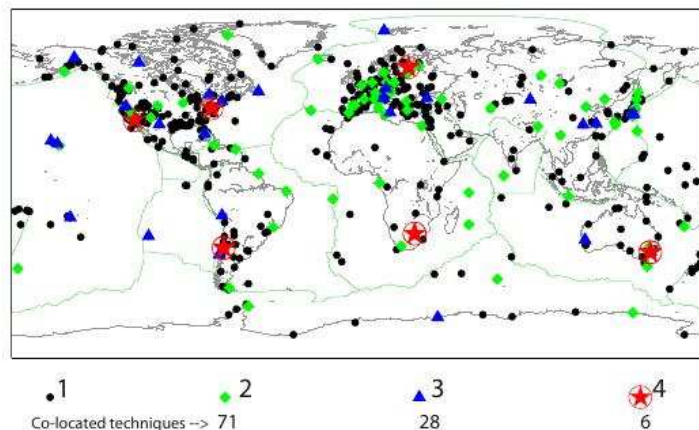
\vec{a}_p wyraża przyspieszenia perturbujące np. pochodzące od promieni słonecznych. Według autorów opracowania [28] po uprzednim scałkowaniu równania różniczkowego 2.1 otrzymujemy chwilową pozycję satelity w inercyjnym systemie ICRS. Jedną z fundamentalnych funkcji systemu ICRS jest zatem dostarczanie odniesienia podczas wyznaczeń orbit sztucznych satelitów Ziemi. Punkty aproksymujące dyskretnie orbitę satelity są transformowane do systemu ITRS (patrz następny paragraf) w którym to systemie są publikowane gotowe produkty IGS. (orbita + parametry zegarów). Powyższą transformację opisano np. w monografii [26, strona 43]. Transformacja jest realizowana w oparciu o ruchy bieguna niebieskiego, model precesji oraz nutacji a także ruchy bieguna ziemskiego. Warto zwrócić uwagę na fakt znacznego pogorszenia dokładności opisanej transformacji, gdy jest ona wykonywana w czasie rzeczywistym w zastosowaniach nawigacyjnych. Dla przykładu wpływ pływów skorupy ziemskiej daje efekt rzędu $\pm 25cm$ [28, strona 166]. W różnicowych algorytmach pozycjonowania (RTK, DGPS etc.) efekty takie nie mają wielkiego znaczenia, natomiast w pomiarach absolutnych (ppp) wymagane jest ich jak najlepsze modelowanie.

2.1.2 ITRS

Terrestrial Reference System - Ziemski System Odniesienia jest to system odniesień przestrzennych wirujący wraz z Ziemią w jej dziennym ruchu w przestrzeni kosmicznej. W systemie tym pozycje punktów są ściśle związane z powierzchnią Ziemi i podlegają niewielkim wariacjom powodowanym przez efekty geofizyczne, takie jak ruchy płyt tektonicznych i pływy skorupy ziemskiej oraz pływy oceaniczne [26, strona 34]. W wielkim skrócie można powiedzieć, że Ziemski System Odniesienia składa się z konwencji regulujących początek, skalę oraz orientację układu odniesienia. International Terrestrial Reference system - Międzynarodowy Ziemski System Odniesienia definiuje powyższe parametry w następujący sposób:

- Początek układu współrzędnych powinien znajdować się w punkcie tzw. geocentrum - środek mas Ziemi wraz z oceanami oraz atmosferą [26].
- TCG - Czas współrzędnych geocentrycznych jako system czasu. Skala układu odniesienia ma być zgodna z definicją czasu TCG. Za jednostkę długości przyjęto metr (SI) [26].
- Orientacja przestrzenna zgodna z wyznaczeniami BIH na epokę 1984. [26].
- Zmienność w czasie orientacji przestrzennej określana na podstawie warunku, iż globalna suma poziomych ruchów tektonicznych nie zawiera składowych obrotu [14].

Fizyczną realizacją systemu ITRS jest Międzynarodowy Ziemski Układ Odniesienia (ITRF). Układ ten powstał z integracji obserwacji wykonanych technikami VLBI, SLR², LLR³, DORIS⁴ oraz szeregów czasowych wyznaczeń pozycji stacji referencyjnych GPS. Aktualną wersją systemu jest ITRF2008, przedstawiony na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1: Sieć stacji referencyjnych tworząca układ ITRF2008 źródło: [26, strona 38]

Układ ITRF składa się ze współrzędnych oraz prędkości wybranych stacji referencyjnych oraz ich macierzy kowariancji. Parametry te są wyznaczone w centrach obliczeniowych Międzynarodowej Służby Ruchu Obrotowego Ziemi oraz Systemów Odniesienia (IERS) i publikowane w IERS Conventions [18, strona 167]. Warto jeszcze raz podkreślić, że dokładność wszystkich produktów służby IGS (International GNSS Service) takich jak orbity satelitów jest determinowana przez dokładność układu odniesienia do którego są one transformowane (z układu niebieskiego ICRF) i następnie publikowane. Dokładność produktów IGS ma bezpośredni wpływ na wynik rozwiązania pozycji podczas nawigacji w czasie rzeczywistym. Układ odniesienia IGS jest determinowany na podstawie tylko obserwacji GNSS wykonywanych na starannie wyselekcjonowanym podzbiore stacji referencyjnych IERS, i wpasowywany następnie za pomocą 14 parametrowej transformacji Helmerta do układu ITRF2008 [3]. Globalny układ odniesienia IGS jest zatem zgodny z układem ITRF2008. Ponadto wszystkie dane powstałe przed rokiem 2008 zostały odpowiednio przetransformowane w celu osiągnięcia jak największej wewnętrznej spójności [15, strona 15]. Dla lepszego zrozumienia dalszych rozdziałów kluczowe wydaje się wyjaśnienie, że współrzędne stacji referencyjnych w układzie ITRF są wolne od wpływu pływów oceanicznych, pływów skorupy ziemskiej, oraz zmian położenia osi obrotu Ziemi (tzw. ruch bieguna). W sensie globalnym pozycja każdej stacji referencyjnej podlega periodycznym fluktuacjom, których amplituda jest rzędu kilku decymetrów. W układzie ITRF powyższe wysokie częstotliwości są eliminowane za pomocą zastosowanych modeli. W pomiarach względnych o krótkich bazach (<100km) fluktuacje są w przybliżeniu takie same, zatem do współrzędnych ITRF nie jest konieczne wprowadzanie poprawek. Poprawki są jednak konieczne gdy wykonujemy pomiary w sensie absolutnym (aktualną pozycję wyznaczamy bezpośrednio względem znanych orbit) w technice PPP, lub w przypadku gdy pomiary różnicowe wykonywane są dla dużych odległości. [15, strona 11]

²Satellite Laser Ranging - technika pomiaru odległości do sztucznych satelitów Ziemi, szczegółowo opisana w dodatku A

³Lunar Laser Ranging - technika precyzyjnego pomiaru odległości do Księżyca, szczegółowy opis znajduje się w dodatku

⁴System pomiarów dopplerowskich do satelitów, szczegółowy opis znajduje się w dodatku

2.2 Globalne Systemy Nawigacji Satelitarnej GNSS

Znaczenie akronimu GNSS (Global Navigation Satellite Systems) nie jest jednoznaczne. Większość środowiska naukowego postrzega ostatni wyraz skrótu w liczbie mnogiej - systemy, takiej też interpretacji przyjęto używać w niniejszej pracy. Dzieje się tak ponieważ, jest kilka systemów satelitarnego pozycjonowania. Większość z nich została opisana pokrótce w dalszej części tego podrozdziału. Jednakże, jeżeli spojrzymy na systemy GNSS z punktu widzenia rozwiązania nawigacyjnego bazującego na sygnałach pochodzących od różnych satelitów (w sensie przynależności do konkretnego systemu), wtedy jako całość tworzą one jeden globalny system nawigacji satelitarnej [13, strona vii].

Systemy GNSS są sukcesorami systemów dopplerowskich - systemu Transit⁵ oraz Cikada⁶, Bazują na od około 30 do 45 satelitów umieszczonych na tzw. średnich orbitach MEO⁷ oraz emitujących fale radiowe w zakresie mikrofalowym na dwóch lub więcej częstotliwościach. Pasma mikrofalowe pozwala na używanie systemów niezależnie od panujących warunków pogodowych, natomiast sygnał emitowany na przynajmniej dwóch częstotliwościach pozwala na eliminację negatywnego wpływu refrakcji jonosferycznej [27, strona 33]. Quasi-symultaniczna obserwacja przez odbiornik kilku różnych satelitów GNSS eliminuje w znacznym stopniu błąd zegara odbiornika. Wszystkie systemy GNSS są pasywne - odbiornik nie musi wysyłać żadnych sygnałów do satelitów w celu wykonania pomiaru. Opisane właściwości uczyniły systemy GNSS niejako "koniami pociągowymi" nawigacji oraz geodezji kosmicznej [27, strona 36].

W każdym systemie GNSS wyróżnić można trzy główne części: segment kosmiczny, segment użytkowników oraz segment kontrolny. Zadaniem segmentu kosmicznego jest zapewnienie takiej konstelacji satelitów, która pozwoli na określanie pozycji oraz prędkości użytkownika niezależnie od jego położenia na Ziemi. Segment kontrolny steruje całym systemem poprzez uaktualnianie danych komputerów pokładowych satelitów oraz ochroną systemu przed nieautoryzowanymi użytkownikami.

Należy dodać, że istanieje cały szereg systemów wspomagania GNSS w zastosowaniach nawigacyjnych, które podobnie dzielimy na kosmiczne - SBAS⁸ oraz naziemne - GBAS⁹. Kosmiczne systemy wspomagania składają się z sieci naziemnych stacji referencyjnych generujących poprawki różnicowe oraz informacje o sprawności systemu GNSS, które są dystrybuowane za pomocą satelitów geostacjonarnych. W systemach GBAS odbiorniki referencyjne montowane są jedynie w pobliżu lotnisk, a poprawki transmitowane są drogą radiową. Przykładami SBAS są Europejski system EGNOS¹⁰ oraz system WAAS¹¹ obejmujący swoim zasięgiem Amerykę Północną.

2.2.1 GPS

System GPS został stworzony przez Departament Obrony USA z myślą o wyznaczaniu pozycji, prędkości oraz synchronizacji czasu obiektów wojskowych w globalnym układzie odniesienia, niezależnie od warunków pogodowych oraz lokalizacji użytkownika na Ziemi [13, strona 309]. System GPS zarządzany przez Siły Powietrzne USA, osiągnął pełną operacyjność 17 lipca 1995r. System składa się z segmentu kosmicznego, kontrolnego oraz z segmentu użytkowników. Segment kosmiczny tworzy konstelacja satelitów GPS transmitujących sygnały radiowe do użytkowników.

⁵Pierwszy działający system nawigacji satelitarnej, używany przez marynarkę wojenną USA do określania pozycji okrętów podwodnych z dokładnością 25m. Działanie oparte na efekcie Dopplera.

⁶Stworzony przez naukowców byłego ZSRR jako odpowiednik systemu Transit

⁷MEO (Medium Earth Orbit) - średnia orbita okołoziemska w której wysokość satelity względem Ziemi waha się od 2000km do 35786km - wysokość orbity geostacjonarnego)

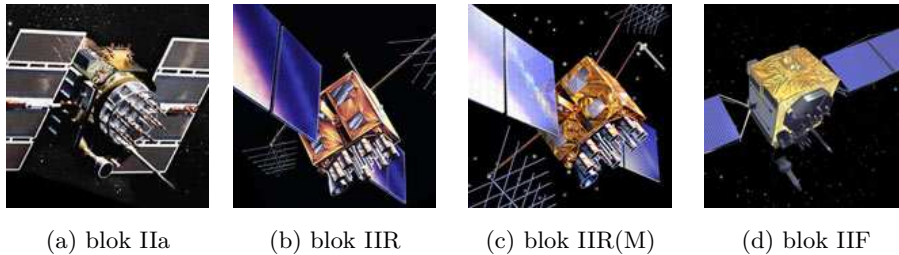
⁸SBAS - space based augmentation systems

⁹GBAS - ground based augmentation systems

¹⁰EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay Service.

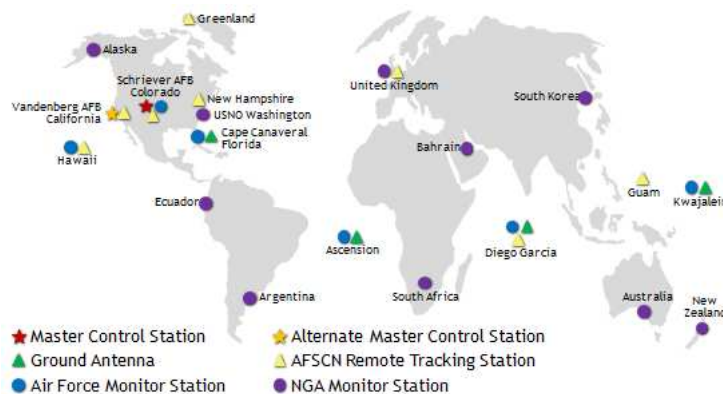
¹¹Wide Area Augmentation System

Rząd Stanów Zjednoczonych zobowiązał się do utrzymywania w przestrzeni kosmicznej minimum 24 satelity w ciągu 95% czasu. Obecnie w przestrzeni znajduje się 31 satelitów krążących wokół Ziemi na wysokości około 20200km, z których wyróżniamy 27 satelitów bazowych czynnych, w załorzeniu nieprzerwanie. Każdy obiega naszą planetę dwukrotnie w ciągu doby, poruszając się na jednej z sześciu orbit kołowych rozmieszczonych równomiernie co 60° , nachylonych względem płaszczyzny równika pod kątem 55° [12]. Poniżej na rysunku 2.2 przedstawiono operacyjne satelity systemu GPS bloku II.



Rysunek 2.2: *Operacyjne satelity systemu GPS* źródło: [12]

Segment kontrolny systemu GPS składa się z sieci stacji przedstawionych na rysunku 2.3 ze stacją główną zlokalizowaną w stanie Colorado. Zadaniem stacji kontrolnych jest śledzenie satelitów systemu GPS, kontrolowanie jakości transmisji danych, uaktualnianie danych oraz komputerów pokładowych znajdujących się na satelitach oraz sterowanie konstelacją GPS. Ze względu na założenia niniejszej pracy segment użytkowników został zawężony głównie do rolnictwa precyzyjnego i traktuje o nim niejako cała praca.



Rysunek 2.3: *Stacje segmentu kontrolnego GPS* źródło: [12]

Sygnały wysyłane przez satelity dzielą się na militarne oraz do zastosowań cywilnych. Sygnały militarne są kodowane, zatem w niniejszej pracy pokrótce opisano tylko sygnały ogólnodostępne. Satelity GPS emitują fale elektromagnetyczne w paśmie radiowym. Wyróżniamy trzy częstotliwości nośne dla sygnałów GPS: L1 - częstotliwość podstawowa, L2 - Początkowo tylko do zastosowań wojskowych, od 2005 roku jest dostępna do zastosowań cywilnych, L5 - od kwietnia 2014r. pojawiła się depesza nawigacyjna dostępna użytkownikom cywilnym. Częstotliwość L5 znajduje się w paśmie radiowym zarezerwowanym dla branży lotniczej [12]. Rysunek 2.4 przedstawia tabelę częstotliwości nośnych GPS.

Link	Factor ($\cdot f_0$)	Frequency [MHz]	Wavelength [cm]	ITU allocated bandwidth [MHz]	Frequency band
L1	154	1 575.42	19.0	24.0	ARNS/RNSS
L2	120	1 227.60	24.4	24.0	RNSS
L5	115	1 176.45	25.5	24.0	ARNS/RNSS

Rysunek 2.4: *Częstotliwości nośne sygnału GPS* źródło: [13, strona 329]

Bazując na powyższych częstotliwościach generowane są dane nawigacyjne w postaci tzw. kodów na których opierają się algorytmy wyznaczania pozycji odbiornika. C/A jest kodem propagowanym na częstotliwości L1 wraz z depeszą nawigacyjną, przeznaczonym dla użytkowników cywilnych do wyznaczania pozycji w czasie rzeczywistym. C/A jest kodem stosunkowo krótkim (297m), co pozwala na bardzo szybką inicjalizację, lecz co za tym idzie sygnał jest bardzo łatwo podatny na interferencje [13, strona 332]. P(Y) - kod którego długość wynosi około 266.4 dni ze względu na tę właśnie cechę charakteryzuje się niemożnością jego odbierania bez apriorycznej znajomości dokładnej poprawki zegara, pozycji oraz efemeryd satelitów. Modulowany na dwóch częstotliwościach L1 oraz L2 kod P(Y) w zastosowaniach nawigacyjnych jest przeznaczony jedynie dla wojska. Kodem, który jest modulowany na częstotliwości nośnej L2 i przeznaczonym do zastosowań komercyjnych jest kod L2C. Kod L2C poprzez kombinację liniową z kodem C/A pozwala na korekcję negatywnego wpływu jonosfery. Użytkownicy cywilni którzy dysponują dwuczęstotliwościowymi odbiornikami dzięki kodowi L2C są w stanie uzyskać porównywalną dokładność jaką uzyskują użytkownicy autoryzowani na kodzie P(Y). L2C pozwala na szybszą inicjalizację odbiornika, podnosi niezawodność oraz niejako dostępność sygnału GPS poprzez transmisję z wyższą efektywną mocą sygnału [12]. Kolejnym kodem jest L5C. Kod L5C modulowany na częstotliwości L5 został specjalnie zaprojektowany aby sprostać wymaganiom aplikacji służących do celów zapewniania bezpieczeństwa życia ludzkiego [13, strona 335]. Kod L5C charakteryzuje się wysoką mocą sygnału oraz przepustowością danych. L5C w kombinacji z kodem C/A zwiększy istotnie dokładność poprzez eliminację wpływu jonosfery. Sygnał na częstotliwości L5 począwszy od 31 grudnia 2014 jest już eksperymentalnie dostępny dla użytkowników. Możliwe jest już zatem wykonywanie obserwacji sygnału GPS na trzech częstotliwościach nośnych, co prawdopodobnie pozwoli na uzyskanie sub-metrowych dokładności bez użycia wsparcia systemów augmentacyjnych [12]. W planach modernizacyjnych systemu GPS jest, także wprowadzenie dodatkowego (oprócz C/A) kodu na częstotliwości L1 - L1C. Wprowadzenie jeszcze jednego kodu na częstotliwości L1 pozwoli na ulepszenie pozycji odbiorników mobilnych w miastach bądź w innych trudnych terenach. Ponadto warto zwrócić uwagę na fakt, że kod L1C został zaprojektowany wspólnie przez Europę oraz Stany Zjednoczone jako wspólny sygnał zarówno dla GPS jak i Galileo. Kod L1C docelowo ma być emitowany przez wszystkie dostępne systemy satelitarne [12].

Układ odniesienia względem, którego jest wyznaczana pozycja GPS to układ WGS84¹², zdefiniowany poprzez wyznaczenie współrzędnych oraz prędkości stacji referencyjnych jako realizacja systemu WGS84. Współrzędne stacji referencyjnych są następnie używane do wyznaczania orbit satelitów GPS. Dokładność układu WGS84 względem aktualnego układu Ziemi ITRF jest centymetrowa [9, strona 51]. Należy zauważyć, że w zależności od kontekstu WGS84 odnosi się do systemu, układu odniesienia lub referencyjnej elipsoidy. Centymetrowa dokładność aktualnej realizacji układu odniesienia systemu GPS względem układu ITRF2008 na epokę 2005 wynika bezpośrednio ze zgodności na poziomie definicyjnym systemów WGS84 oraz ITRS. Drobne róż-

¹²WGS84 (World Geodetic System) geocentryczny ortokartezjański układ współrzędnych zbudowany pocztkowo w oparciu o obserwacje satelitów systemu Transit. Wraz z rozwojem technologii GPS układ został zmodernizowany czterokrotnie. Obecna realizacja to układ WGS84(1674) z lutego 2012 roku. Obecnie układ WGS84 jest zarządzany przez jedną z agencji wywiadu USA - National Geospatial Intelligence Agency.

nice wynikają z tego, że do realizacji systemu WGS84 w celu uzyskania jak największej spójności danych używane są jedynie obserwacje GPS. Elipsoida¹³ WGS84 jest powierzchnią odniesienia aproksymującą kształt oraz rozmiary Ziemi. Różnica między elipsoidą GRS80 złączoną z układem ITRF a elipsoidą WGS84 jest z punktu widzenia dokładności wyznaczeń na potrzeby nawigacji zanedbywalna [9, strona 50].

System czasu Systemu GPS jest oparty o wzorzec czasu atomowego. Nominalnie czas GPS różni się od Międzynarodowego Czasu Atomowego TAI o 19 sekund, i jest ściśle związany z Uniwersalnym Czasem Koordynowanym UTC.

Podsumowując ten paragraf można powiedzieć, że system GPS już od ponad dwóch dekad jest nieocenionym, dla takich dziedzin działalności człowieka jak: Budownictwo, Energetyka, Geodezja z Geodynamiką, Przemysł wydobywczy, Transport, Ratownictwo, Rolnictwo oraz wiele innych.

2.2.2 GLONASS

Podobnie jak system GPS powstał na podstawie doświadczeń z systemem Transit, tak system GLONASS został zbudowany z doświadczeń sowieckich naukowców z systemem Cikada. GLONASS jest systemem wojskowym, i podobnie jak GPS zaprojektowanym do dostarczania nielimitowanej liczbie użytkowników, niezależnie od pogody, trójwymiarowej pozycji, synchronizacji czasu, oraz prędkości w obrębie całego globu [13, strona 342]. Operacyjność systemu ogłoszono w 1993r. jednakże nominalną konstelację 24 satelitów system osiągnął dopiero 18 stycznia 1996r. Z powodu kryzysu ekonomicznego Federacji Rosyjskiej liczba operacyjnych satelitów systematycznie spadała i w roku 2001 osiągnęła minimum w postaci liczby sprawnych satelitów poniżej dziesięciu [13, strona 342]. Do pełnej operacyjności system GLONASS powrócił po około 10 latach 8 grudnia 2011 roku [11].

Segment kosmiczny systemu GLONASS składa się z 24 satelitów poruszających się na orbitach kołowych na wysokości około 19100km nad powierzchnią Ziemi. Okres obiegu wokół Ziemi satelitów systemu GLONASS wynosi 11 godzin 15 minut i 44 sekundy. Konstelacja satelitów jest zgrupowana w trzech płaszczyznach o inklinacji¹⁴ równej 64.8° - w każdej znajdują się orbity ośmiu satelitów równomiernie rozmieszczonych (co 45°). Węzły wstępujące orbit satelitów należących do różnych płaszczyzn różnią się o 120° . Opisana konstelacja pozwala na symultaniczną widoczność minimum pięciu satelitów z około 99% powierzchni Ziemi [13, strona 349].

Segment kontrolny systemu GLONASS dzieli się na 1) centrum sterowania systemem 2) stacje śledzące. Centrum sterowania systemem dzieli się na centralny moduł synchronizacyjny (Schelkowo w regionie moskiewskim) odpowiedzialny za synchronizację czasu systemu GLONASS oraz część kontrolną (Krasnoznamensk 70km od Moskwy) gdzie ma miejsce zarządzanie wszystkimi funkcjami systemu oraz planowanie. Stacje śledzące są podzielone na trzy grupy: a) cztery stacje TT&C wspomagane pięcioma stacjami pomiarów laserowych służące do śledzenia i monitorowania satelitów oraz wysyłania do nich wiadomości. b) cztery stacje służące do kontroli urządzeń elektronicznych. c) stacje optyki kwantowej. Niestety znacząca część informacji dotyczących segmentu kontrolnego systemu GLONASS nie jest dostępna publicznie [13, strona 353].

Czas systemu GLONASS jest zarządzany przez wspomniany powyżej moduł synchronizacyjny za pomocą maserów wodorowych. Czas ten jest ściśle powiązany z czasem uniwersalnym koordynowanym. Stałe przesunięcie wynoszące plus trzy godziny związane jest różnicą między czasem Moskiewskim oraz Greenwich. Ponadto występuje losowa rozbierzość nieprzekraczająca 1ms, która wynika z tego, iż wspomniane skale czasu są utrzymywane przez różne zegary [13, strona

¹³Powierzchnia powstała poprzez obrót elipsy o zadanych parametrach wokół jej krótszej półosi. W tym konkretnym przypadku środek elipsoidy jest umieszczony w środku masy Ziemi, a jej krótsza półoś pokrywa się z osią Z układu odniesienia WGS84.

¹⁴Inklinacja w tym kontekście określa kąt dwuścienny między płaszczyzną orbity satelity a płaszczyzną równika.

346].

Jako system odniesienia systemu GLONASS oryginalnie przyjęto sowiecki SGS-85, który zamieniono w roku 1990 na SGS-90¹⁵. Realizacja systemu to Kartezjański układ współrzędnych ortogonalnych PE-90 zrealizowany poprzez określenie współrzędnych 26 stacji referencyjnych. Różnica układu PE-90 względem układu ITRF jest dość znaczna jeżeli chodzi o wymagania dokładnościowe rolnictwa precyzyjnego. Dla przykładu wielka półoś elipsoidy geocentrycznej PE-90 jest aż o metr krótsza od odpowiadającego parametru elipsoidy GRS80. Należy jednak zaznaczyć, że różnice współrzędnych punktów nie przekraczają 15 metrów (średnio 5m). Współrzędne z układu PE-90 do układu ITRF transformuje się za pomocą transformacji siedmioparametrowej wyznaczanej za pomocą porównania tras satelitów glonas dostępnych w obu układach odniesienia [21].

System GLONASS podobnie jak system GPS dostarcza wysokiej jakości sygnałów dla użytkowników autoryzowanych, oraz standardowej dokładności sygnału dla użytkowników cywilnych. Obecnie sygnały satelitarne systemu są przenoszone za pomocą dwóch pasm częstotliwości fali radiowej: G1 = 1602Mhz oraz G2 = 1246Mhz. W planowanej trzeciej generacji system będzie emitował dodatkowy sygnał modulowany w paśmie częstotliwości G3 = 1204.704Mhz w podobieństwie do trzeciej częstotliwości L5 systemu GPS. Tym co diametralnie różni system GLONASS od systemu GPS jest to, że każdy satelita moduluje swój sygnał na fali radiowej o unikalnej dla niego częstotliwości. Na rysunku 2.5 przedstawiona została tabela według której każdemu satelicie przyporządkowywana jest unikalna częstotliwość.

Link	Factor (·f _i)	Frequency [MHz]	Increment [MHz]	Wavelength [cm]	Frequency band
G1	1	1 602.000	0.5625	18.7	ARNS/RNSS
G2	7/9	1 246.000	0.4375	24.1	RNSS
G3 ⁽¹⁾	94/125	1 204.704	0.4230	24.9	ARNS/RNSS

Rysunek 2.5: *Częstotliwości nośne sygnału GLONASS* źródło: [13, strona 357]

Tak samo jak w systemie GPS odpowiednik kodu C/A jest modulowany w paśmie częstotliwości G1 i jest nośnikiem standardowej usługi pozycjonowania. Wysokiej dokładności sygnał P nie jest kodowany (w przeciwieństwie do GPS) i jest modulowany na obu falach nośnych G1 oraz G2. Począwszy od roku 2004 kod standardowej dokładności jest także dostępny w paśmie G2. Na koniec warto odnotować, że pod pewnymi względami zastosowane w systemie GLONASS rozwiązania są lepsze niż te z systemu GPS. Większa inklinacja orbit pozwala średnio obserwować więcej satelitów, a unikalne częstotliwości sygnału dla każdego satelity znacząco zmniejszają niekorzystne efekty interferencji [13, strona 355].

2.2.3 GALILEO

System GALILEO zaprojektowano głównie na potrzeby Unii Europejskiej w celu ekonomicznego oraz strategicznego uniezależnienia jej od systemu GPS. Ze względu na to, że system GALILEO nie jest jeszcze operacyjny (aktualnie 8 satelitów), w pracy postanowiono opisać tylko jego najważniejsze założenia projektowe.

Segment kosmiczny systemu GALILEO docelowo ma się składać z 30 satelitów (27 + 3 zapasowe) po 9 satelitów operacyjnych na jedną płaszczyznę orbitalną. Inklinacje płaszczyzn mają wynosić 56°. Satelity będą się poruszały po orbitach prawie kołowych na wysokości 23616km równomiernie rozmieszczone co 40° w płaszczyźnie orbity. Tak zaprojektowana konstelacja zapewni

¹⁵SGS (Soviet Geodetic System) Sowiecki System Odniesień Przestrzennych

ma globalną widoczność minimum 6 satelitów na wysokości powyżej 10° nad horyzontem.

Segment naziemny systemu GALILEO został zaprojektowany tak aby składał się z części kontrolnej stanu technicznego konstelacji satelitów oraz części operacyjnej, która ma odpowiadać za całokształt funkcjonowania systemu (depesze satelitów, kontrola danych, kontrola czasu oraz wiele innych). Warto nadmienić, że wśród stacji segmentu naziemnego oprócz klasycznej infrastruktury śledzącej satelity (kilkuczęstotliwościowe odbiorniki) znajdują się także stacje pomiarów laserowych. [13, strona 380]. Ponadto zaprojektowano także budowę lokalnych stacji obserwacyjnych kontrolujących niezawodność systemu.

System GALILEO ma być oparty na geocentrycznym układzie odniesienia GTRF¹⁶, który będzie powiązany z ITRF. Z założeń projektowych wynika, że różnica pomiędzy GTRF oraz ITRF nie może przekraczać trzech centymetrów na poziomie ufności 2σ .

Czas systemu GALILEO GST¹⁷ będzie oparty na ciągłej skali czasu atomowego, zsynchronizowanej z Międzynarodowym Czasem Atomowym TAI i podtrzymywanej za pomocą maserów wodorowych. System czasu GALILEO będzie używał korekt czasu pochodzących od zewnętrznych ośrodków takich jak Międzynarodowe Biuro Miar i Wag w celu bezpośredniej synchronizacji z UTC. Maksymalna różnica między GST a czasem atomowym TAI ma nie przekraczać 50ns na poziomie ufności 95%.

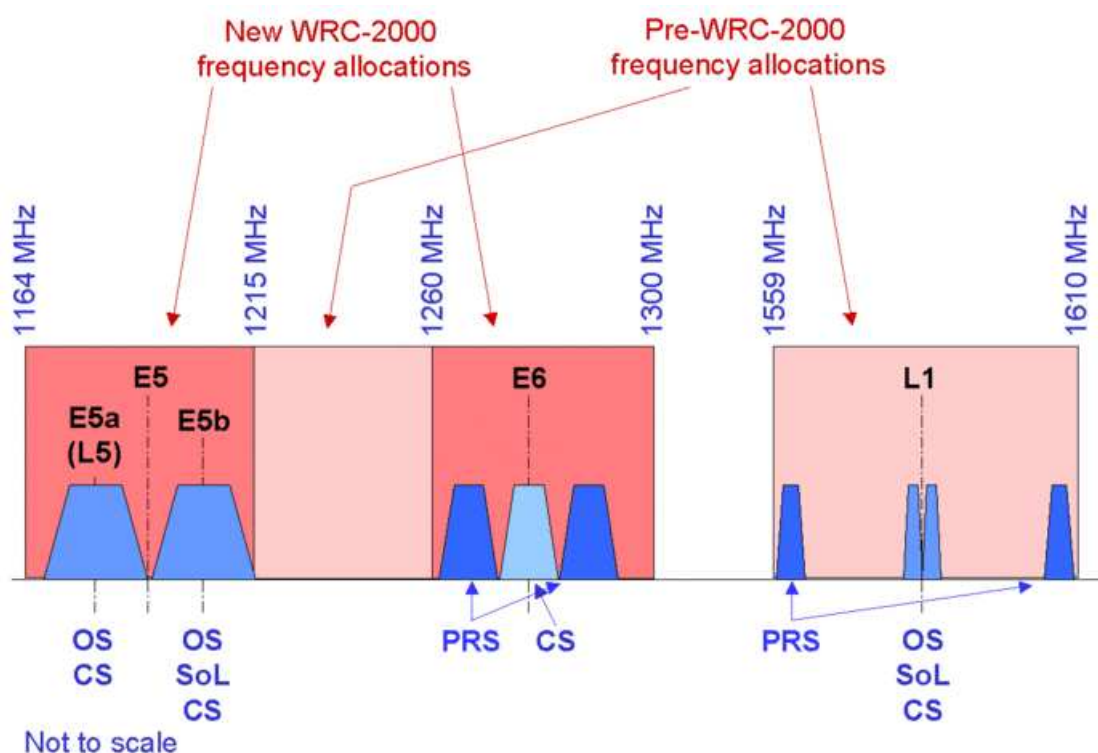
Podczas projektowania systemu GALILEO przyjęto podejście nastawione na serwisy jakich system ma dostarczać użytkownikom. Adekwatnie do potencjalnego zapotrzebowania na usługi wyróżniono następujące grupy:

- Serwis otwarty (OS) - dostępny dla wszystkich użytkowników bezpłatnie. Charakteryzuje się brakiem informacji na temat wiarygodności systemu. Przeznaczony jest do uzyskiwania pozycji oraz referencji czasowej nie wymagających wysokiej dokładności. Sześć jawnych kodów jest modulowanych na fale radiowe o trzech częstotliwościach nośnych. Jednoczęstotliwościowe odbiorniki systemu GALILEO będą wyznaczać pozycję porównywalną z rozwiązaniem opartym o kod C/A GPS.
- Serwis komercyjny (CS) - różniący się od serwisu otwartego gwarancją dostępności oraz dostępem do dodatkowych szyfrowanych danych zawartych w depeszy nawigacyjnej propagowanej za pomocą modulacji sygnału na trzech częstotliwościach nośnych.
- Serwis bezpieczeństwa życia (SoL) - bazuje na tych samych sygnałach co serwis otwarty. W tym trybie w depeszy nawigacyjnej zawarta będzie informacja o wiarygodności systemu GALILEO. Jakikolwiek awarie będą sygnalizowane odpowiednimi ostrzeżeniami wysyłanymi do użytkownika.
- Serwis publiczny regulowany (PRS) - przeznaczony dla służb, agencji rządowych bądź innych podmiotów zajmujących się ochroną obywateli, obronnością oraz dbaniem o respektowanie prawa. Głównym celem serwisu jest dostarczanie silnego ciągłego oraz zakodowanego sygnału, który będzie możliwy do użycia nawet w sytuacjach kryzysowych. Sygnał w tym serwisie będzie modulowany na dwie częstotliwości nośne aby zmaksymalizować odporność na interferencje, przy jednoczesnej minimalizacji ryzyka celowych zakłóceń zewnętrznych. W serwisie tym będzie również dostępna informacja o wiarygodności systemu GALILEO.
- Serwis ratunkowy (SAR) - Serwis polega na wykrywaniu przez satelity systemu sygnałów ratunkowych (406Mhz), a następnie na przesyłaniu tej informacji do centrum segmentu naziemnego, które ma za zadanie powiadomić odpowiednie służby.

¹⁶Galileo Terrestrial Reference Frame

¹⁷Galileo System Time

System GALILEO ma wykorzystywać trzy pasma częstotliwości fali radiowych L1, E5, E6 na, których będzie możliwa modulacja dziesięciu różnych sygnałów. Rysunek 2.6 przedstawia schemat przydziału częstotliwości nośnych poszczególnym sygnałom systemu GALILEO. Trzy sygnały nawigacyjne modulowane na częstotliwości E1: Dwa nieszyfrowane sygnały E1B oraz E1C dostępne dla wszystkich użytkowników. E1B oprócz wiadomości nawigacyjnej przynosić ma szyfrowane dane komercyjne oraz informacje o wiarygodności. Kanał danych E1B oraz kanał pilotażowy E1C mają wspierać usługi: otwartą, komercyjną oraz usługę ratowania życia. Zasyfrowany komponent E1A ma być dostępny tylko dla autoryzowanych użytkowników w serwisie (PRS) [13, strona 387]. Podobnie do pasma częstotliwości E1, pasmo E6 również ma być nośnikiem trzech sygnałów: E6A, E6B, E6C dostępnych komercyjnie. Sygnał E6B ma być nośnikiem depeszy nawigacyjnej oraz szyfrowanych danych komercyjnych. Sygnał E6C ma być kanałem pilotażowym a E6A wspierać serwis regulowany (PRS) [13, strona 389]. Pasma częstotliwości E5 jest nośnikiem czterech sygnałów. W pasmach E5a oraz E5b przenoszone są dwie pary: kanał danych plus kanał pilotażowy.



Rysunek 2.6: Schemat częstotliwości nośnych sygnałów systemu GALILEO źródło:

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2005/04/Galileo_signal_frequencies

2.3 Algorytmy Pozycjonowania

Algorytmy pozycjonowania w nawigacji satelitarnej opierają się głównie na dwóch typach obserwacji:

- pomiarze czasu propagacji sygnału od satelity do odbiornika - obserwacje kodowe
- obserwacje fazowe - obliczane jako różnice fazy fali radiowej docierającej od satelity do odbiornika oraz fazy sygnału referencyjnego generowanego w odbiorniku (chwilowa faza wypadkowego sygnału). Od momentu (epoka t_0) rozpoczęcia śledzenia sygnału wypadkowego o tzw. częstotliwości dudnienia, zliczana jest również przez odbiornik całkowita liczba jego pełnych cykli fazowych.

Równanie obserwacji kodowych tzw. równanie pseldoodległości oparte jest na różnicy momentów czasu emisji t^s oraz odbioru t_r sygnału, pomnożonej przez prędkość światła c [6, strona 11]. Wyraża się następującą zależnością (na podstawie [6]):

$$R_r^s = (t_r - t^s)c = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta T_r^s + \delta I_r^s + \delta_r^s + \epsilon \quad (2.2)$$

Gdzie: t^s, t_r - oznaczają odpowiednio momenty wysłania i odbioru sygnału GNSS [s],

$\delta t^s, \delta t_r$ - oznaczają odpowiednio błąd zegara satelity i odbiornika [s],

c - prędkość światła w próżni równą 299 792 458 [$\frac{m}{s}$],

ρ_r^s - stanowi odległość geometryczną między satelitą a odbiornikiem [m],

δT_r^s - opóźnienie spowodowane refrakcją troposferyczną [m],

δI_r^s - opóźnienie spowodowane refrakcją jonosferyczną [m],

δ_r^s - czynnik reprezentujący błędy systematyczne satelity i odbiornika [m],

ϵ - stanowi błędy przypadkowe o rozkładzie normalnym [m],

W równaniu 2.2 występują cztery niewiadome: δt_r - błąd zegara odbiornika oraz występujące w równaniu odległości geometrycznej¹⁸ współrzędne odbiornika (X_r, Y_r, Z_r). Dlatego do określenia pozycji potrzebne jest wykonanie symultanicznie obserwacji do minimum czterech satelitów. Współrzędne satelity (X^s, Y^s, Z^s) na epokę t^s oraz błąd jej zegara δt^s są w przybliżeniu określane na podstawie danych znajdujących się w depeszy nawigacyjnej [6, strona 11]. Źródła błędów spowodowane propagacją sygnału w atmosferze ($\delta T_r^s, \delta I_r^s$), błędy systematyczne oraz sposoby ich eliminacji zostaną omówione i porównane wspólnie dla obserwacji kodowych oraz fazowych w dalszej części tego podrozdziału. Warto jedynie zaznaczyć, że wpływ jonosfery¹⁹ na obserwacje kodowe powoduje zmniejszenie szybkości grupowej propagacji fali elektromagnetycznej v_{gr} (rozumianej jako prędkość rozchodzenia się czoła fali), a w związku z tym mierzone pseldoodległości obciążone jej wpływem są zawsze zbyt długie. Wpływ troposfery również powoduje nadmiarowość w zmierzonej pseldoodległości. Określanie pozycji anteny odbiornika na podstawie obserwacji kodowych stanowi podstawę rozwiązań nie wymagających dużej dokładności.

W pracy [13] profesor Bernard Hofmann opisał szczegółowo zasadę pomiarów fazowych, włącznie z wyprowadzeniem równania tychże obserwacji. Przy założeniu zaniedbywalnych odchyłeń częstotliwości sygnałów satelity oraz odbiornika od częstotliwości nominalnej, faza sygnału referencyjnego generowanego przez odbiornik wyraża się równaniem 2.3, a faza sygnału odebranego od satelity i zrekonstruowanego równaniem 2.4. Obie częstotliwości są Wyrażone jako liczby rzeczywiste (cykle fazowe).

$$\varphi_r(t) = ft + f\delta t_r \quad (2.3)$$

$$\varphi^s(t) = ft - f\frac{\rho_r^s}{c} + f\delta t^s \quad (2.4)$$

Gdzie: f - oznacza częstotliwość sygnału [Hz],

t - oznacza epokę w referencyjnym zarówno dla zegara satelity jak i odbiornika czasie systemu GNSS satelity [s],

δt_r - stanowi błąd zegara odbiornika [s],

δt^s - stanowi błąd zegara satelity [s],

c - oznacza prędkość światła w próżni równą 299 792 458 [$\frac{m}{s}$],

ρ_r^s - stanowi odległość geometryczną między satelitą a odbiornikiem.

Odbiornik porównuje sygnał, który dociera do niego od satelity z wygenerowanym przez siebie sygnałem referencyjnym tworząc ich różnicę - tzw sygnał dudnienia. Faza wypadkowego sygnału

¹⁸ $\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$

¹⁹Jonosfera w przybliżeniu obejmuje warstwy atmosfery znajdujące się między wysokościami $h_1 = 50km$ oraz $h_2 = 1000km$. Jest ośrodkiem dyspersyjnym (propagacja fali zależy od jej częstotliwości) w stosunku do sygnałów radiowych GNSS.

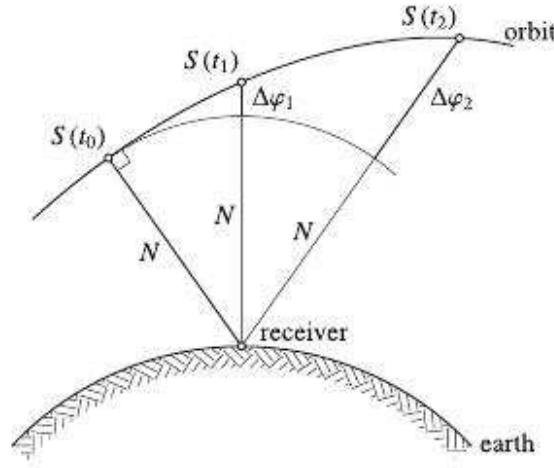
jest wyrażona równaniem 2.5, na podstawie [13, strona 106].

$$\varphi_r^s(t) = \varphi^s(t) - \varphi_r(t) = -f \frac{\rho_r^s}{c} - f(\delta t_r - \delta t^s) \quad (2.5)$$

Kiedy włączamy odbiornik (epoka t_0) chwilowa część fazy dudnienia jest mierzona przez odbiornik. Początkowa liczba całkowitych cykli fazowych N_r^s pomiędzy satelitą a odbiornikiem jest nieznana. Jeżeli jednak żadna przeszkoda terenowa²⁰ nie przerwie śledzenia sygnału satelity przez odbiornik, i nie wystąpi efekt znany w literaturze jako cycle-slip²¹, zatem liczba całkowita N_r^s tzw. nieoznaczoność pozostaje stała i opisywaną wcześniej fazę dudnienia można wyrazić za pomocą poniższego równania 2.6 [13, strona 107].

$$\varphi_r^s(t) = \Delta\varphi_r^s|_{t_0}^t + N_r^s \quad (2.6)$$

W powyższym równaniu $\Delta\varphi_r^s|_{t_0}^t$ oznacza pomierzoną przez odbiornik w chwili t fazę sygnału satelitarnego, plus całkowitą liczbę cykli fazowych zliczaną przez odbiornik od momentu t_0 [13, strona 107]. Geometryczną interpretację równania 2.6 przedstawia poniższy rysunek 2.7.



Rysunek 2.7: *Geometryczna interpretacja obserwacji fazowych* źródło: [13, strona 108]

Jeżeli podstawimy wyrażenie 2.6 do równania 2.5 oraz skorzystamy z zależności $f\lambda = c$, otrzymamy następujące równanie 2.7 fazowej pseudoodległości:

$$\Phi = -\Delta\varphi_r^s|_{t_0}^t = \frac{\rho_r^s}{\lambda} + \frac{c}{\lambda}(\delta t_r - \delta t^s) + N_r^s \quad (2.7)$$

Po pomnożeniu obu stron powyższego równania 2.7 przez długość fali λ oraz wprowadzając dodatkowe parametry opisujące wpływ błędów systematycznych oraz przypadkowych, otrzymujemy równanie ?? opisujące obserwacje fazowe w dziedzinie odległości ($[m]$). Ze względu na charakter niniejszej pracy w równaniu uwzględniono tylko najważniejsze z opisanych w dalszej części błędów systematycznych.

$$\lambda\Phi = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \lambda N_r^s + \delta T_r^s - \delta I_r^s + \epsilon \quad (2.8)$$

Występujące w powyższym równaniu nieoznaczoności N_r^s są arbitralnymi liczbami całkowitymi unikalnymi dla każdego śledzonego przez odbiornik satelity. Istnieją specjalne algorytmy pozwalające na estymowanie nieoznaczoności w dziedzinie liczb całkowitych, a tym samym na wyznaczanie pozycji anteny odbiornika z bardzo wysoką dokładnością rzędu centymetrów a w przypadku pomiarów statycznych nawet milimetrów. Najczęściej jednak czas potrzebny na tzw. uzyskanie zbierczości

²⁰lub inne niechciane zdarzenia

²¹cycle-slip - utrata przez odbiornik pewnej liczby cykli fazowych

rozwiązania jest dłuższy niż 15 minut w pomiarach absolutnych (PPP). W przypadku pomiarów różnicowych (RTK) korzystających z dwóch częstotliwości sygnału GNSS czas potrzebny na estymację nieoznaczoności w dziedzinie liczb całkowitych to średnio kilkadziesiąt sekund.

Błędy występujące w obserwacjach GNSS zarówno kodowych jak i fazowych dzielą się na przypadkowe, których nie można wyeliminować oraz na systematyczne, których wpływ można w dużej mierze ograniczyć. Te ostatnie dzielą się na trzy główne grupy [13, strona 109]:

- Błędy systematyczne związane z satelitami, takie jak błąd zegara oraz niedokładność orbity satelity.
- Błędy systematyczne propagacji sygnału w atmosferze. Głównie refrakcja jonosferyczna oraz troposferyczna.
- Błędy systematyczne odbiornika, do których należy błąd zegara, błąd położenia centrum fazowego anteny oraz błąd wielodrożności.

2.3.1 DGPS/DGNSS

2.3.2 RTK

2.3.3 PPP

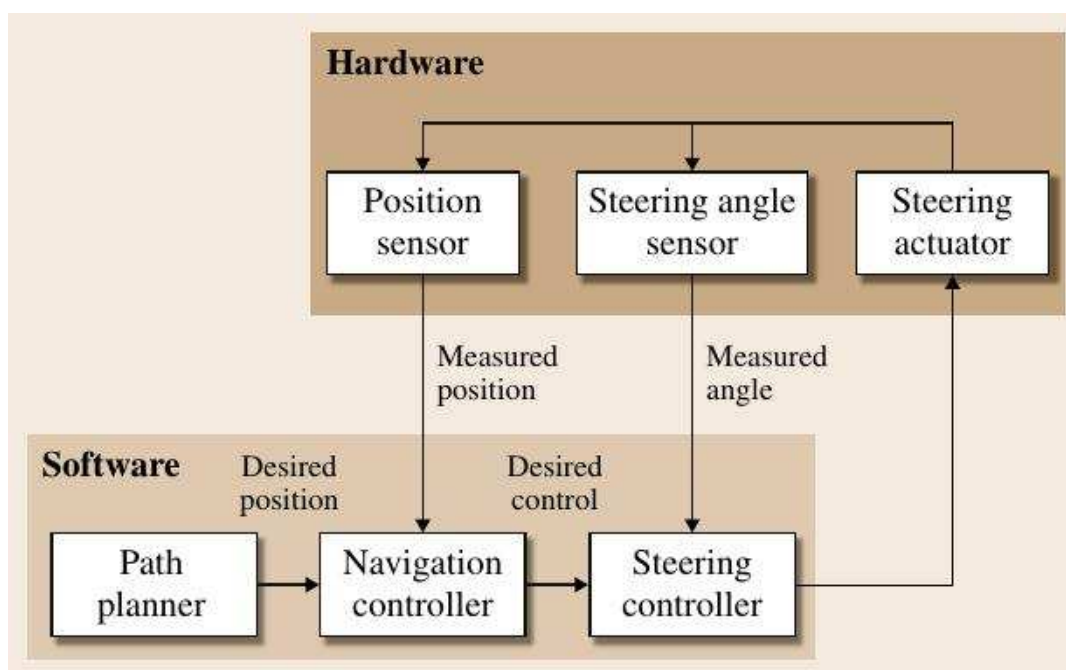
2.4 Nawigacja Inercjalna

Rozdział 3

Algorytmy sterowania

W pracy założono, że pojazdy rolnicze w przybliżeniu są bryłami sztywnymi. Obiekty te charakteryzują się w przestrzeni trójwymiarowej sześcioma stopniami swobody. Jednym ze sposobów matematycznego opisu położenia tychże pojazdów w przestrzeni trójwymiarowej, jest podanie współrzędnych środka ciężkości (x,y,z) oraz trzech parametrów kątowych: azymutu, odchylenia od poziomu w płaszczyźnie poprzecznej oraz podłużnej.

Rysunek 3.1 przedstawia typowy schemat systemu automatycznego prowadzenia pojazdów. Sprzęt komputerowy najczęściej składa się z odbiornika GNSS bądź innego narzędzia do wyznaczania absolutnej pozycji, sensora mierzącego aktualny kąt skrętu kół pojazdu oraz hydrauliki uaktualniającej kierunek kół. Na oprogramowanie składają się: moduł planowania tras, moduł obliczający pożądane zmienne sterujące na podstawie porównania aktualnej pozycji z pozycją teoretyczną, moduł sterujący, który oblicza sygnał sterujący na podstawie porównania zmierzonych oraz pożądanych zmiennych sterujących i wysyła go do hydrauliki uaktualniającej [10, strona 1097].

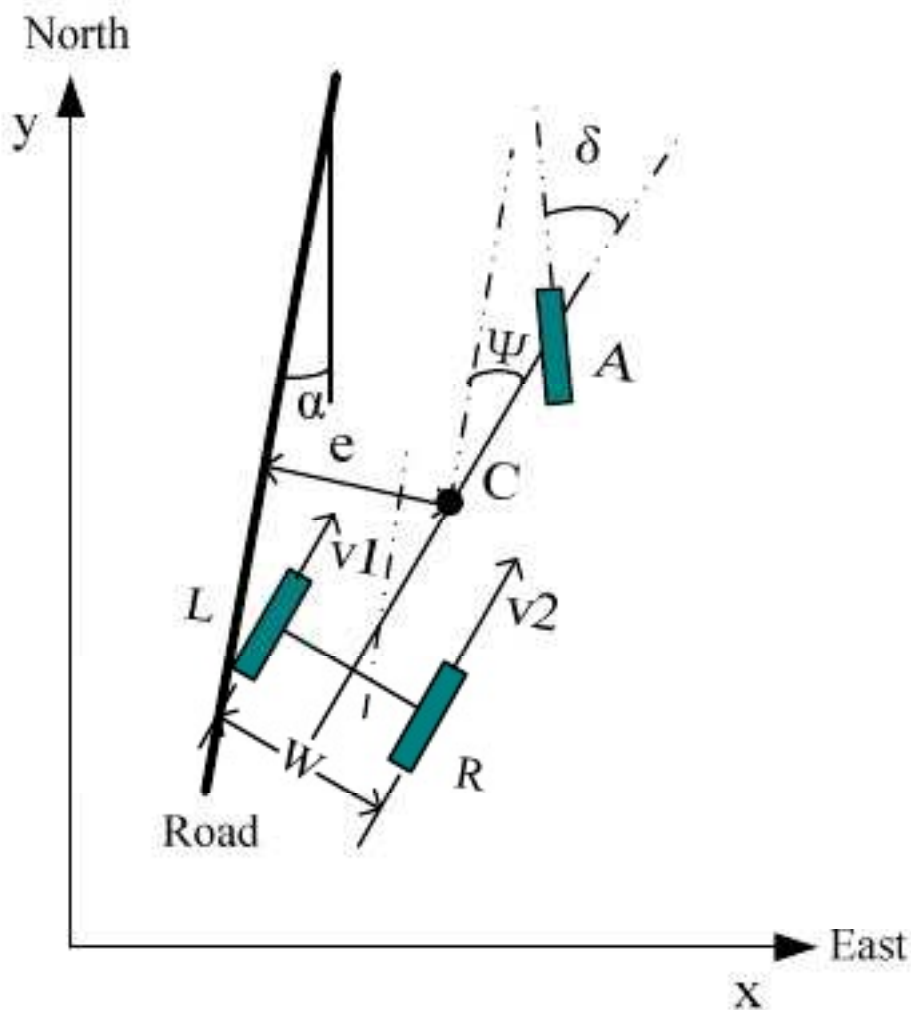


Rysunek 3.1: *Komponenty typowego systemu automatycznego prowadzenia*
źródło: [10, strona 1097]

W dalszej części rozdziału opisano kilka przykładowych rozwiązań algorytmów sterowania, które charakteryzują się różnym podejściem w odniesieniu do parametrów kątowych określania orientacji przestrzennej pojazdów rolniczych.

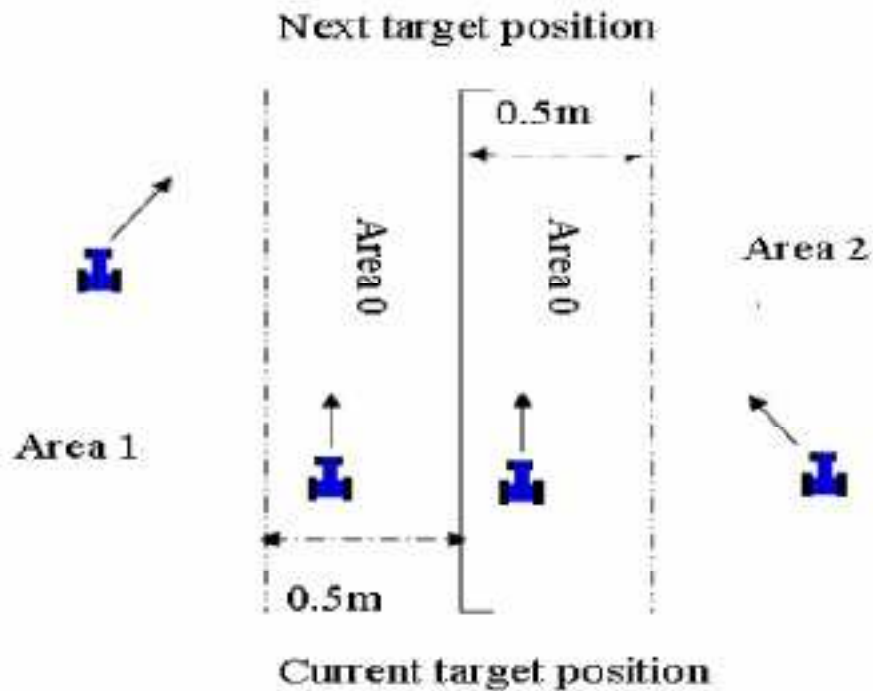
3.1 Podział algorytmów sterowania ze względu na dostarczane dane wejściowe

Jednym z najbardziej popularnych zbiorów parametrów nawigacyjnych obliczanych jako pożądane zmienne sterujące, które są następnie wysyłane do modułów sterowania, jest para: azymut plus offset obliczane względem zadanej trasy. Azymut jest to kąt którego ramionami są: główna oś symetrii pojazdu oraz styczna do krzywej prowadzenia w punkcie, który stanowi rzut prostopadły środka ciężkości na tę krzywą. Offset natomiast jest to odległość środka ciężkości pojazdu względem zadanej ścieżki [33]. Na rysunku nr 3.2 przedstawione są powyższe parametry. Środek ciężkości pojazdu oznaczono jako C, azymut pojazdu względem zadanej ścieżki oznaczono jako ψ . δ oznacza kąt sterujący jako wynik przetwarzania algorytmu sterującego tzw. Target Angle.



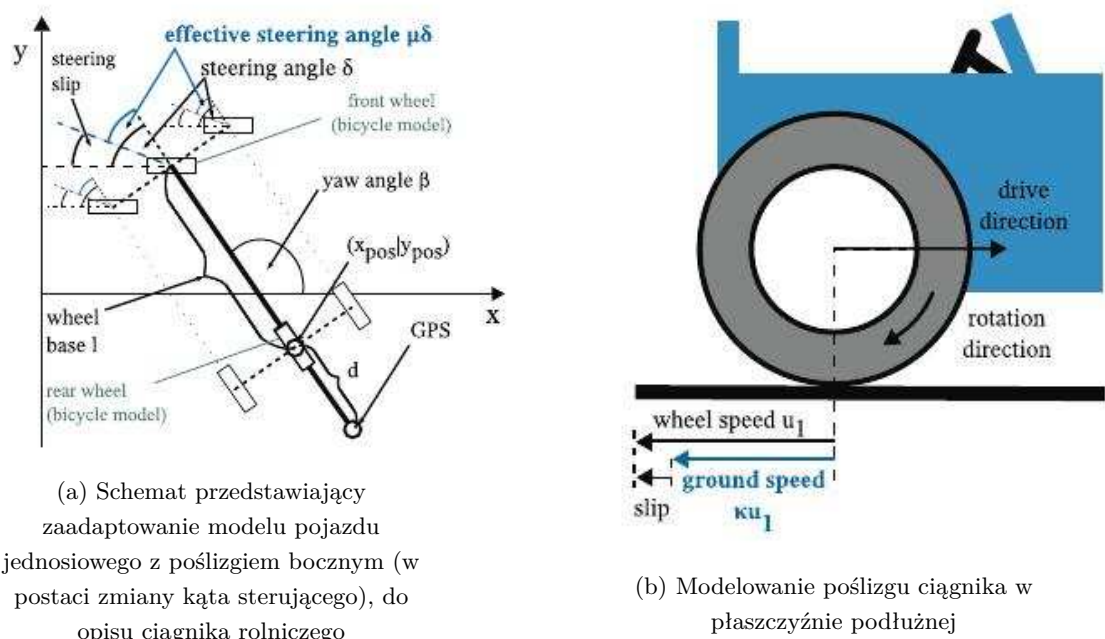
Rysunek 3.2: Azymut oraz offset - Parametry najczęściej używane w celu wyznaczenia pozycji względem zadanej trasy; źródło: [34, strona 464]

W przypadku niskiej dokładności parametrów nawigacyjnych autorzy publikacji [19] zaproponowali algorytm, który korzysta tylko z obliczanego w czasie rzeczywistym offsetu.



Rysunek 3.3: Tylko offset - w przypadku niskiej jakości danych wejściowych;
źródło: [19, strona 947]

W przypadku trudnych warunków pogodowych bądź obecności innych czynników powodujących poślizg kół pojazdu wymagana jest estymacja współczynników korygujących wyniki algorytmu sterującego [16]. Poniższy rysunek 3.4 ilustruje modelowanie poślizgu w płaszczyznach: poprzecznej oraz podłużnej.

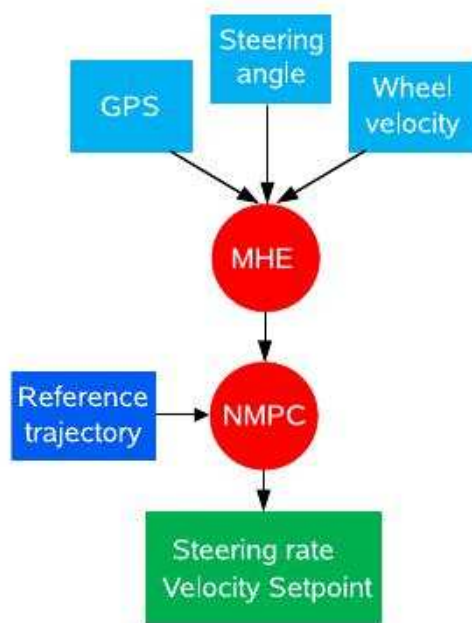


Rysunek 3.4: Estymacja parametrów κ oraz μ pozwalających na poprawne prowadzenie pojazdu w warunkach obecności poślizgu. źródło powyższych rysunków: [16, strona 26]

3.2 Podział algorytmów sterowania ze względu na zastosowane algorytmy decyzyjne

Różnego rodzaju algorytmy sterowania są używane w celu kompensacji zmiennej dynamiki pojazdów oraz w celu osiągnięcia satysfakcjonującej wydajności sterowania [33, strona 770]. Kilka kontrolerów zostało zaadaptowanych na potrzeby prowadzenia maszyn w rolnictwie precyzyjnym. Między innymi: Regulator proporcjonalno - całkująco różniczkujący PID¹, wersja regulatora PID ze sprzężeniem zwrotnym² oraz z predykcją³, algorytmy logiki rozmytej oraz wiele innych [10, strona 1099]. Poniżej podano kilka przykładów wykorzystania różnych algorytmów sterowania w rolnictwie.

W pracy [16] Tom Kraus wraz z współpracownikami opisali zaawansowany matematycznie algorytm wyznaczania parametrów prowadzenia ciągnika rolniczego - zmiany kąta sterowania oraz prędkości kątowej kół pojazdu, przy użyciu estymacji z przesówanym oknem czasowym (MHE⁴) oraz nieliniowym modelem predykcyjnego sterowania (NMPC⁵). Wektor stanu poruszającego się obiektu, zawierający niewiadome κ , μ opisujące poślizg 3.4, oraz orientację, estymowany był za pomocą algorytmu MHE. Na podstawie znajomości aktualnego stanu obiektu oraz trasy referencyjnej algorytm predykcyjny NMPC wyznaczał wynikowe parametry prowadzenia pojazdu [16, strona 30]. Rysunek 3.5 przedstawia schemat blokowy opisanego algorytmu. Sterowanie predykcyjne z przesówanym oknem czasowym, polega na cyklicznym rozwiązywaniu zadania sterowania optymalnego, z warunkiem początkowym równym aktualnej estymacie stanu obiektu [4, strona 2]. Predykcja przyszłych stanów obiektu sterowanego na podstawie nieliniowych równań różniczkowych jest możliwa tylko w stosunkowo krótkim oknie czasowym przyjmowanym arbitralnie - stąd nazwa metody.



Rysunek 3.5: Schemat blokowy zaawansowanego algorytmu prowadzenia pojazdu dostosowanego do występowania poślizgu kół. źródło [16, strona 30]

¹Proportional - Integral - Derivative controller

²feedback PID controller

³feedforward PID controller

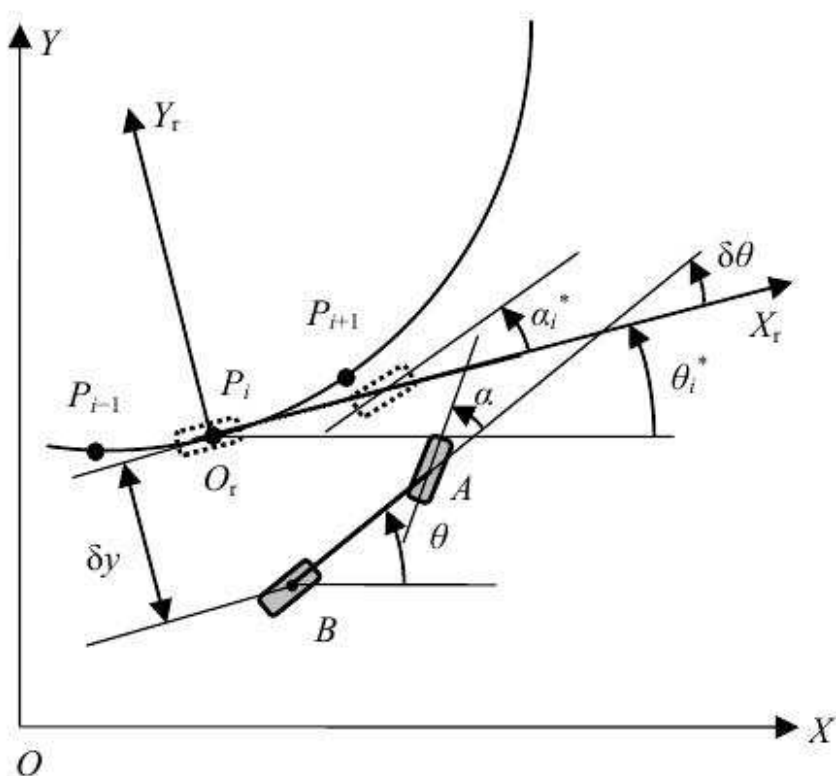
⁴Moving Horizon Estimation

⁵Nonlinear Model Predictive Control

W artykule [36] Zhong-xiang Zhu oraz współpracownicy wykorzystali regulator proporcjonalno całkująco różniczkujący PID w obu wersjach zarówno ze sprzężeniem zwrotnym jak i z predykcją do znajdowania odpowiedniego kąta sterującego ciągnikiem rolniczym. Podobnie jak w poprzedniej pracy powyżej, do opisu dynamiki pojazdu posłużono się modelem kinematycznym z uproszczonym podejściem jednoosiowym. Kąt sterujący α_c obliczano jako sumę wartości predykowanej na podstawie teoretycznej trasy - wersja feedforward algorytmu PID, oraz korekty wynikającej z aktualnego położenia ciągnika - wersja ze sprzężeniem zwrotnym [36, strona 1599].

$$\alpha_c = \alpha_i^* + \delta\alpha \quad (3.1)$$

Gdzie kąt α_i^* oznacza optymalny kąt sterujący wynikający z referencyjnego kursu, a $\delta\alpha$ jest poprawką obliczaną przez algorytm PID ze sprzężeniem zwrotnym na podstawie aktualnego azymutu pojazdu θ oraz offsetu δy , patrz rysunek 3.6 poniżej.



Rysunek 3.6: Rysunek obrazujący model położenia pojazdu w świetle ścieżki referencyjnej
źródło [36, strona 1598]

Według autorów opracowania dokładność powyższego rozwiązania wyniosła średnio około $\pm 9\text{cm}$ na poziomie ufności 65% [36, strona 1602]. Na koniec warto zauważyć, że w rozwiązaniu do wyznaczania azymutu pojazdu wykorzystano żyroskop światłowodowy o wysokiej dokładności (dryft $\pm 1.5^\circ/\text{h}$). Zapewne dlatego otrzymano tak dobrą dokładność finalnego rozwiązania.

Rozdział 4

Aktualne badania

W przeciągu ostatniego ćwierćwiecza wynaleziono wiele technik oraz systemów służących do celów nawigacji: systemy satelitarne, systemy inercyjne, systemy wizyjne oparte na przetwarzaniu obrazów cyfrowych w czasie rzeczywistym, radary wszelkiego typu. Według panów Wan oraz Liu pojedynczy system dostarcza tylko częściowej informacji o środowisku zewnętrznym [33, strona 770]. Ponadto dysponując tylko jednym narzędziem nie jest możliwa ocena jego wiarygodności. Z punktu widzenia statystyki matematycznej, wiarygodność systemu, narzędzia, miernika jesteśmy w stanie określić wtedy i tylko wtedy gdy dysponujemy przynajmniej trzema niezależnymi od siebie źródłami danych. Wtedy wykluczamy z opracowania błędne dane wejściowe. Ponadto im więcej posiadamy obserwacji danej wielkości fizycznej tym większą jesteśmy w stanie uzyskać dokładność. Zatem pośrednio wyższa jest dokładność wyznaczenia pozycji oraz innych parametrów nawigacyjnych (kątowych) w rozwiązaniach opartych na więcej niż jednym niezależnym źródle danych. W związku z powyższym systemy nawigacyjne oparte na fuzji obserwacji pochodzących z kilku sensorów oraz systemów satelitarnych coraz bardziej zyskują na popularności [33, strona 770] i prawdopodobnie w niedalekiej przyszłości zaczną dominować na rynku. Pojedyncze obserwacje pochodzące z systemów GNSS charakteryzują się niską zmiennością ich dokładności w czasie. Błąd wyznaczenia pozycji w przypadku rozwiązań kodowych pozostaje na niemalże stałym poziomie. W przypadku rozwiązań fazowych sytuacja jest podobna przy założeniu, że nie mamy utraty tzw. cykli fazowych. Jeżeli jednak odbiornik utraci chociaż na moment sygnał do satelity, dokładność rozwiązania pogarsza się. Nie spada jednak nigdy poniżej dokładności rozwiązania kodowego. Z poniższego rysunku wynika, że obserwacje GNSS charakteryzują się mniejszą rozdzielczością czasową niż obserwacje INS, ponadto mogą występować miejscowe pogorszenia dokładności lub w ekstremalnych przypadkach brak rozwiązania.

4.1 Zintegrowane systemy pozycjonowania w czasie rzeczywistym

4.1.1 Zastosowanie GNSS w precyzyjnym nawożeniu gleby

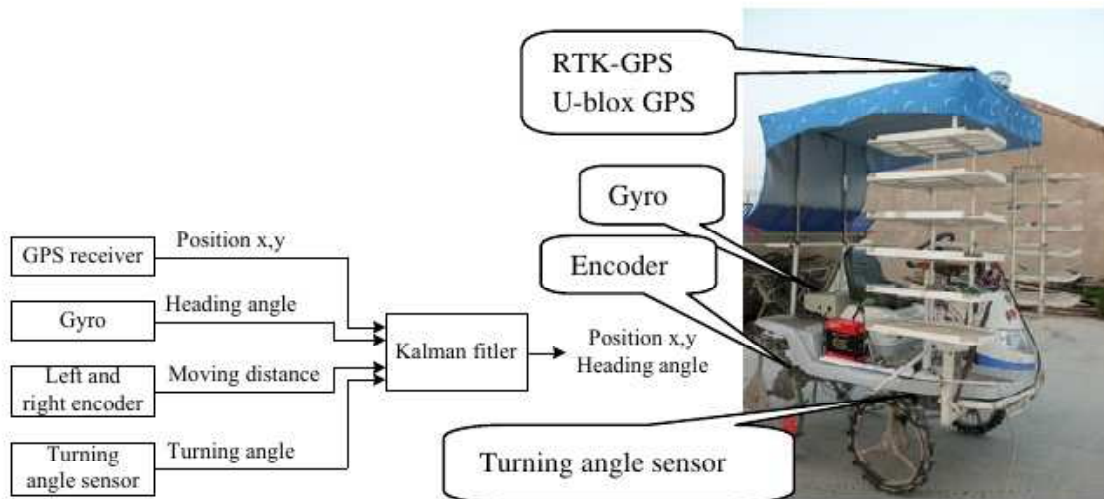
W artykule [25] panowie Guobing Pan oraz Xiao Feng opisują zastosowanie zintegrowanego systemu bazującego na systemie GPS w precyzyjnym nawożeniu roślin. Nawożenie ma czterdziesto procentowy wpływ na wielkość plonowania. Ponadto szalenie ważny jest stopień wykorzystania dawki nawozu przez rośliny. Dawkowanie nawozów charakteryzuje się zmiennością czasową związaną z różnymi etapami wzrostu rośliny oraz zmiennością przestrzenną w obrębie danego pola [25]. Zbyt niski współczynnik wykorzystania nawozu przez rośliny uprawne prowadzi do wzrostu kosztów produkcji oraz negatywnie wpływa na środowisko poprzez zanieczyszczenie wód gruntowych. W związku z powyższym zmienny rozkład przestrzenny nawożenia wydaje się kluczowy do osiągnięcia wymierzonych korzyści ekonomicznych [25]. Według autorów artykułu maszyny rolnicze powinny poruszać się według uprzednio zaprojektowanej trasy w celu automatyzacji oraz zwiększenia wydajności nawożenia. Do realizacji systemu precyzyjnego nawożenia panowie Pan oraz Xiao za priorytet obrali

minimalizację kosztów. System zatem bazuje na kodowych obserwacjach GPS, które są zintegrowane za pomocą filtacji Kalmana z azymutem pochodzącym z elektronicznego kompasu oraz z danymi z precyzyjnych akcelerometrów oraz z żyroskopów. Zaprojektowany system najpierw na podstawie pseudoodległości GPS oblicza współrzędne w układzie WGS-84, następnie transformuje uzyskaną pozycję do współrzędnych płaskich w odwzorowaniu Gaussa-Kruger. Następnie na podstawie danych z żyroskopu oraz kompasu elektronicznego otrzymujemy najbardziej prawdopodobny azymut. Powyższe dane poddawane są następnie poddane obrubce filtrem Kalmana w celu obliczenia ostatecznej pozycji oraz orientacji pojazdu w przestrzeni. Aktualna pozycja pojazdu oraz orientacja przestrzenna jest następnie wykorzystywana w celu obliczenia punktowej dawki nawozu oraz korekty potrzebnej systemowi sterowania do prowadzenia według zadanej ścieżki.

Systemy nawigacji satelitarnej pomagają w zwiększeniu rozdzielczości oraz dokładności danych przestrzennych dla potrzeb systemu dawkowania nawozów. Obecnie szybka akwizycja danych terenowych opisujących właściwości glebowo rolnicze pól uprawnych stanowi ważny aspekt badań nad rozwojem rolnictwa precyzyjnego. Zwiększenie rozdzielczości prubkowania jest możliwe dzięki dynamicznemu rozwojowi nawigacji w czasie rzeczywistym (RTK, DGPS) zwłaszcza poprzez lokalne systemy stacji referencyjnych ASG-EUPOS. Dla przykładu im wyższa jest rozdzielczość prubkowania, tym dokładniejsza jest interpolacja danych (ph, fizyko chemiczne właściwości gleby itp, określana przez system GIS) na potrzeby określania dawek nawozów. Posumowując: Dane przestrzenne zbierane były za pomocą DGPS z wykorzystaniem lokalnych stacji referencyjnych. Następnie wyniki pomiarów parametrów glebowych były wprowadzane do GIS-owej bazy danych. Na podstawie zebranych danych były tworzone mapy nawożenia [20].

4.1.2 Algorytmy wyznaczania pozycji oparte na filtrze Kalmana

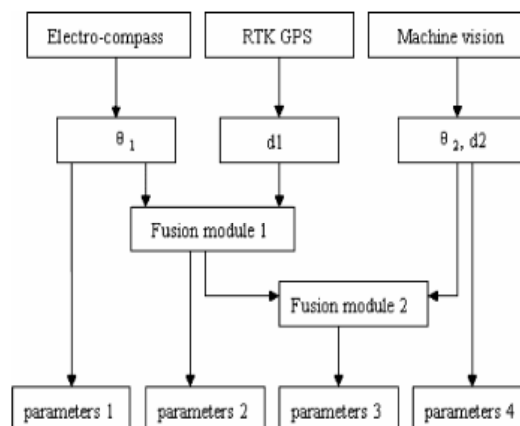
Prowadzenie równoległe jest jedną z najbardziej popularnych obecnie metod ułatwiających prace polowe. W pracy [34] czytamy, że przeprowadzono już wiele badań nad zastosowaniem bardzo dokładnych odbiorników fazowych RTK-GPS przy automatyzacji maszyn rolniczych. Autorzy twierdzą jednak, że koszt precyzyjnych odbiorników GPS jest zbyt wysoki i nie pozwala na ich powszechną adaptację w rolnictwie. Ponieważ, zintegrowane systemy nawigacyjne oparte na filtrze Kalmana znacznie podnoszą dokładność pozycjonowania, a technologia czujników elektronicznych bardzo szybko się rozwija, możliwa jest zatem konstrukcja tanich systemów pozycjonowania atrakcyjnych pod względem zastosowania ich w rolnictwie precyzyjnym [34]. Panowie Zhang, Feng, Li, Rao oraz Di Cui skonstruowali zintegrowany system do równoległego prowadzenia złożony z odbiornika DGPS, z elektronicznych żyroskopów MEMS, z dwóch czujników prędkości oraz z precyzyjnego potencjometru do pomiaru skrętu kół. Schemat blokowy omawianego systemu przedstawiono na rysunku 4.1. Dane z poszczególnych podzespołów przesyłane były do komputera z systemem wbudowanym na którym zainstalowano Filtr Kalmana. Całkowity koszt systemu wyniósł w przybliżeniu około 1500\$.



Rysunek 4.1: Przykład zintegrowanego systemu do równoległego prowadzenia; źródło: [34, strona 464]

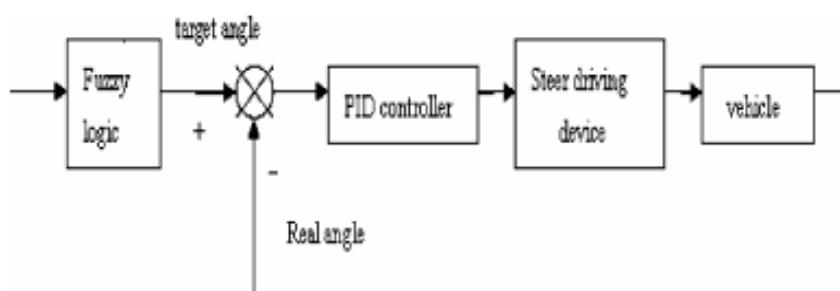
RTK-GPS był używany jako odniesienie w celu porównania otrzymanych wyników. Współrzędne w lokalnym układzie odniesienia, azymut, oraz prędkość były zadane jako wektor stanu w filtrze Kalmana. Wyniki eksperymentu pokazały, że obróbka danych przestrzennych za pomocą filtru Kalmana znacznie podnosi dokładność współrzędnych DGPS. Średnie residua w odniesieniu do pozycji GNSS zostały zredukowane z 2.21m do 0.52m względem osi x oraz z 0.68m do 0.23m względem osi y. Jednakże zaimplementowany algorytm nie usunął całkowicie błędów systematycznych zawartych w danych kodowych DGPS. Maksymalna odchyłka od równośćności po przebyciu 70 m wyniosła 3m [34].

Kolejnym przykładem fuzji danych jest integracja danych RTK-GPS z elektronicznym kompasem oraz obrazowaniem cyfrowym z użyciem logiki rozmytej (Fuzzy logic). W artykule pod tytułem “Automatic Navigation System With Multiple Sensors” panowie Wan oraz Liu opisali system automatycznego prowadzenia pojazdów rolniczych bazujący na integracji obserwacji pochodzących z elektronicznego kompasu, odbiornika GPS oraz kamery cyfrowej z matrycą CCD. W celu obliczenia parametrów prowadzenia pojazdu względem zadanej trasy, dane z wszystkich powyższych mierników były przetwarzane z użyciem narzędzi logiki rozmytej tzw. Fuzzy Logic. Poniżej na rysunku nr 4.2 przedstawiono diagram blokowy opisujący algorytm integracji danych.



Rysunek 4.2: Zastosowanie narzędzi logiki rozmytej do integracji danych nawigacyjnych; źródło: [33, strona 774]

Azymut kierunku jazdy względem zadanej ścieżki oraz offset oznaczono odpowiednio jako θ oraz d . Wszystkie powyższe rezultaty pośrednie zanim przesłano do modułów logiki rozmytej, przetransformowano do układu obrazu cyfrowego, w celu zapewnienia jednolitego układu odniesienia. Jako ostateczną i najbardziej prawdopodobną wersję parametrów (d, θ) przyjęto wyniki z modułu numer 2 (parameters 3), pozostałe rezultaty posłużyły do wybrania jak najlepszych współczynników skalowania obserwacji w modułach wykorzystujących logikę rozmytą. Na podstawie parametrów określających położenie pojazdu względem zdefiniowanej uprzednio trasy obliczany był teoretyczny kąt skrętu kół, przekazywany następnie do realizacji w układzie sterującym (target angle), rysunek 4.3.



Rysunek 4.3: Schemat algorytmu znajdującego odpowiedni kąt skrętu kół pojazdu rolniczego;
źródło: [33, strona 775]

System sterujący realizował swoje zadania w oparciu o algorytm PID - regulator proporcjonalno - całkująco - różniczkujący. Według autorów pracy [33] opisany system spełnia wymagania automatycznego prowadzenia maszyn rolniczych w warunkach roboczych.

4.2 Specjalistyczne opracowanie obserwacji - postprocessing

Opracowanie obserwacji w trybie postprocessingu jest szczególnie ważne z punktu widzenia opracowania map plonowania. Pan Xiaochao Zhang wraz z zespołem w artykule [35] opisali konstrukcję systemu służącego do tworzenia map plonowania. Głównym elementem systemu był poziomo umieszczony czujnik mierzący masę przepływającego ziarna. Surowe wyniki były poprawiane ze względu na wilgotność, a następnie zamieniane na ilość ziarna przez algorytm całkujący. Mapa plonu była tworzona przy wykorzystaniu danych przestrzennych z odbiornika GPS, po uprzedniej synchronizacji czasowej. W celu zwiększenia dokładności mapowania obserwacje GPS były poddane specjalistycznemu opracowaniu tzw. Postprocessing, zanim zintegrowano je z danymi plonowania. Ostateczne wyniki podczas testów charakteryzowały się błędem względnym na poziomie 3.5%. Poniższy rysunek 4.4 przedstawia działający system w trybie operacyjnym.

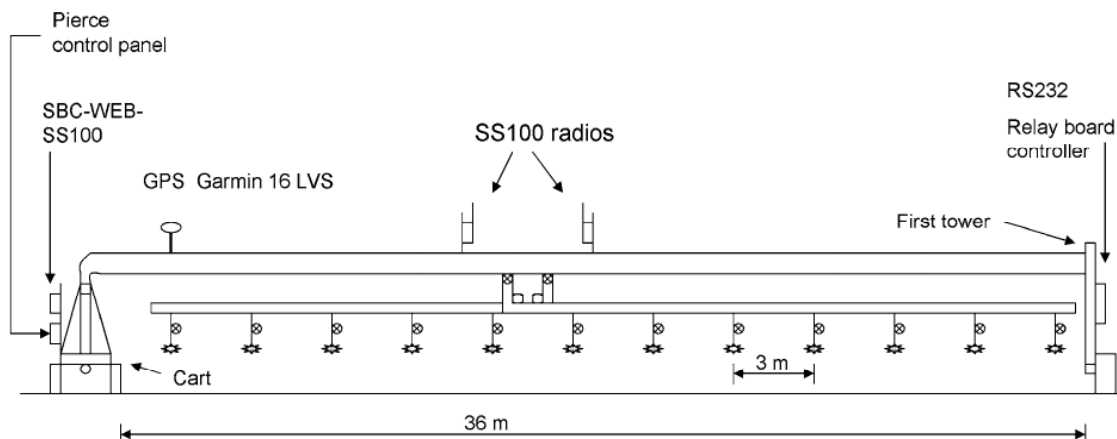


Rysunek 4.4: *System do tworzenia map plonowania*; źródło: [35, strona 954]

Mapy plonów są ważnym źródłem informacji dla rolników. Pomagają w planowaniu zabiegów agrotechnicznych.

4.3 Inne zastosowania GNSS w rolnictwie precyzyjnym

Celem precyzyjnego nawadniania jest minimalizacja użycia zasobów wodnych, przy załorzeniu spełnienia w jak największym stopniu wymagań roślin uprawnych. Dystrybucja przestrzenna wymagań roślinnych względem ilości dodatkowego nawadniania, zależy głównie od warunków glebowych oraz topografii terenu. Dlatego zasadnym jest przeprowadzanie nawadniania pól uprawnych, zgodnie z wcześniej sporządzanymi mapami docelowego rozkładu przestrzennego dawek H₂O [7].



Rysunek 4.5: *Schemat systemu służącego do automatycznego nawadniania pól uprawnych*; źródło: [7, strona 04]

Jose L. Chavez i wsp. w artykule [7] zaprojektowali system precyzyjnego nawadniania, sterujący niezależnie poszczególnymi dyszami, których przepływ determinowano w oparciu o mapy nawadniania. Na rysunku 4.5 przedstawiono schemat systemu. Z punktu widzenia niniejszego opracowania najważniejszym elementem systemu jest odbiornik GPS umieszczony precyzyjnie nad pierwszą dyszą, który pozwala na określenie jej pozycji przestrzennej i obliczenie dawki H₂O. Położenie kolejnych dysz określano za pomocą translacji o zadany wektor względem pierwszej, przy założeniu, że ramię systemu jest zawsze prostopadłe do kierunku ruchu. Mapy nawadniania tworzone były na podstawie danych o wilgotności gleby oraz powietrza zbieranych za pomocą sieci czujników równomiernie rozmieszczonych na polu uprawnym.

Rozdział 5

Analiza rynku

W tym rozdziale przedstawiono przykłady systemów, narzędzi oraz technik nawigacyjnych, które są wykorzystywane w usługach firm komercyjnych oraz w dostarczanych przez te firmy systemach rolnictwa precyzyjnego. Z uwagi na niską dostępność specyfikacji technicznych produktów dostępnych obecnie na rynku, w pracy ograniczono się do analizy ofert marketingowych liderów branży maszyn rolniczych. Jako reprezentatywną próbę dla europejskiego rynku rolnictwa precyzyjnego przyjęto oferty następujących firm: New Holland Agriculture, John Deere oraz Claas.

5.1 Wykorzystanie GNSS

W tym podrozdziale w formie porównania wykorzystywanych systemów pozycjonowania a także oferowanych technik wyznaczania pozycji opisano wykorzystanie systemów GNSS przez firmy komercyjne z grupy wybranej jako reprezentatywna.

Na wstępie należy uściślić pojęcia dokładności, które pojawiały się w broszurach marketingowych, a które nie zawsze były rzetelnie opisywane przez firmy referujące o swoich produktach. Z reguły gdy w broszurach podawana jest dokładność, brakuje informacji odnośnie poziomu ufności¹ oraz czy jest to dokładność w sensie absolutnym czy może dokładność podawana jest relatywnie w stosunku do kolejnych wyznaczeń tym samym odbiornikiem - tzw. dokładność między-przejazdowa (pass to pass accuracy). Typ uzyskiwanej dokładności - względna czy absolutna rzutuje bezpośrednio na rodzaj zabiegów agrotechnicznych, które możemy wykonywać. Dla przykładu przy zakładaniu ścieżek przejazdowych, które mają służyć przez cały sezon wegetacyjny potrzebna jest wysoka dokładność w sensie absolutnym, natomiast w celu eliminacji omijaków bądź nakładek przy zabiegach agrotechnicznych wystarczy dokładność między-przejazdowa. Aby uniknąć nieporozumień nacisk położono na porównanie wykorzystywanych technologii. Wszędzie tam gdzie w broszurach marketingowych nie wyspecyfikowano typu dokładności w pracy zamieszczono oba rodzaje zaczerpnięte z literatury lub strony producenta.

Wszystkie trzy firmy oferują w swoim portfolio odbiorniki mające możliwość odbioru sygnału zarówno GPS jak i GLONASS w dwóch częstotliwościach. Firma John Deere ma w swojej ofercie odbiornik StarFire 3000 rysunek 5.1a. Firma Claas oferuje Antenę GPS PILOT wraz z terminalem S7 5.1b i komputerem nawigacyjnym przedstawionym na rysunku 5.4, natomiast firma New Holland Agriculture w swojej ofercie prezentuje kilka rodzajów anten oraz odbiorników w zależności od wymaganej dokładności. Przykładem jest odbiornik NH 372 przedstawiony na rysunku 5.1c.

¹W przypadku wyznaczania pozycji poziom ufności bezpośrednio określa prawdopodobieństwo zawarcia wartości prawdziwej (prawdziwe położenie) w okręgu o środku w punkcie estymowanym i promieniu równym odpowiednio: 1σ $P=68\%$; 2σ $P=95\%$; 3σ $P=99.7\%$, gdzie σ oznacza odchylenie standardowe estymowanej pozycji.



(a) Odbiornik StarFire 3000
firmy John Deere



(b) antena GPS PILOT firmy
Class



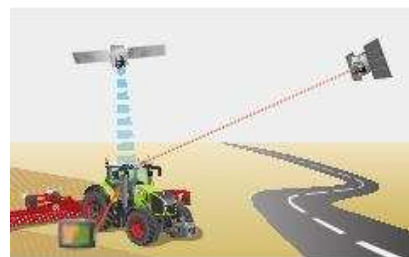
(c) odbiornik NH 372 firmy
New Holland Agriculture

Rysunek 5.1: Przegląd komercyjnych odbiorników GNSS

Jeżeli weźmiemy pod uwagę publicznie dostępne systemy augmentacyjne GNSS, to europejski system EGNOS jest wykorzystywany przez firmy Class oraz New Holland Agriculture. Ponadto firma New Holland oferuje zbliżony dokładnością do systemu EGNOS sygnał korekcyjny OmniStar VBS rysunek 5.2a. Firma John Deere dostarcza swojego własnego rozwiązania w postaci sygnału korekcyjnego SF1. Absolutna dokładność rozwiązania GNSS z sygnałem korekcyjnym EGNOS jest na poziomie trzech metrów (2σ) [1]. Ponieważ, firmy zalecają używanie GNSS z sygnałem korekcyjnym EGNOS do prowadzenia prac uprawowych, w których powtarzalność przejazdów nie ma istotnego znaczenia, zatem w ofercie prezentują dokładność względną (krótkookresową) na poziomie $\pm 30\text{cm}$. Względna (krótkookresowa) dokładność GNSS z sygnałem korekcyjnym SF1 od John Deere jest podawana na poziomie $\pm 23\text{cm}$. System EGNOS transmituje poprawki różnicowe dla częstotliwości L1 sygnału GPS za pomocą łącza satelitarnego. Działanie systemu przedstawia rysunek 5.2b. Dokładność międzyprzejazdowa na poziomie około 20cm pozwala na wykonywanie takich prac agrotechnicznych jak nawożenie, uprawa gleby czy wszelkie czynności związane z ochroną roślin [23, strona 28].



(a) Zasięg sygnału OmniStar VBS źródło
[2, strona 4]



(b) Zasada działania systemu EGNOS
według Class źródło [23, strona 26]

Rysunek 5.2: Wykorzystanie jednoczęstotliwościowego sygnału korekcyjnego

5.2 Zastosowanie systemów inercyjnych

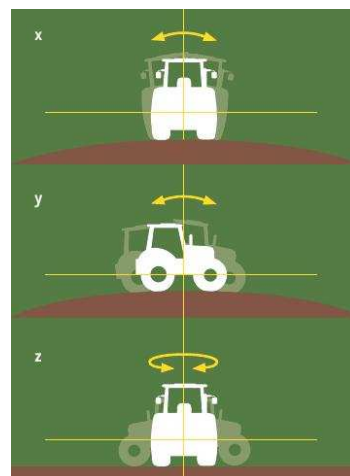
Na podstawie analizy ofert marketingowych firm z grupy przyjętej za referencyjną, można wnioskować, że systemy nawigacji inercyjnej są wykorzystywane na potrzeby budowy systemów służących do kompensacji nierówności terenu przy precyzyjnym prowadzeniu maszyn rolniczych. Firma Trimble w swoich technologiach kompensacji terenu T2, T3 wykorzystuje akcelerometry do wyznaczania kąta inklinacji² oraz żyroskopy w celu kompensacji danych z akcelerometrów ze względu na własną dynamikę pojazdu oraz w celu wyznaczania prędkości z jaką zmienia się położenie pojazdu względem kierunku pionu [8]. Z analizowanej grupy firma John Deere oferuje autorskie rozwiązania w postaci modułu kompensacji terenu TCM. Moduł TCM pozwala na wprowadzanie korekt do pozycji GNSS ze względu na pochyłości terenu w trzech osiach x, y, z. Moduł kompensacji terenu jest domyślnie zintegrowany z odbiornikiem GNSS StarFire 3000. Rysunek 5.3c przedstawia możliwości systemu TCM.



(a) Technologia kompensacji terenu T2 wykorzystywana przez New Holland Agriculture



(b) Technologia kompensacji terenu T3 wykorzystywana przez New Holland Agriculture



(c) Technologia kompensacji terenu TCM od John Deere źródło [24, strona 8]

Rysunek 5.3: Kompensacja wpływu nierówności terenu na pozycję GNSS

Firma New Holland Agriculture również posiada w swojej ofercie system kompensacji terenu w dwóch różnych wersjach: T2 - z pominięciem kompensacji w płaszczyźnie podłużnej, T3 - kompensujący nierówności w obu płaszczyznach (poprzeczna, podłużna) oraz zapobiegający schodzeniu maszyny z kursu [2, strona 7]. Firma New Holland Agriculture najprawdopodobniej wykorzystuje rozwiązania T2 oraz T3 oferowane przez odbiorniki marki Trimble. Na rysunku 5.3a oraz 5.3b przedstawiono schemat działania rozwiązań zaadoptowanych przez New Holland. Firma Class w swoim portfolio również posiada 6 osiowy żyroskop (żyroskop akcelerometr) do uwzględniania ruchów podłużnych i poprzecznych pojazdu. Moduł INS jest wmontowany w specjalny komputer nawigacyjny - rysunek 5.4, który wylicza ślady przejazdów oraz wprowadza korekty ze względu na nierówności terenu.

²kąt zawarty między osią pionową pojazdu a kierunkiem siły ciężkości w danym punkcie na Ziemi.



Rysunek 5.4: Komputer do nawigacji Class z wmontowanymi sensorami do kompensacji nierówności terenu

Warto nadmienić, że firmy obecnie jedynie wykorzystują narzędzia nawigacji inercyjnej (INS) do korekcji rozwiązań GNSS. Z broszur marketingowych wywnioskować można, że komercyjnie nie stosuje się jeszcze filtru kalmana w celu wspólnego opracowania obserwacji GNSS plus INS.

5.3 Zastosowanie sensorów video

Firma CLASS w swojej ofercie posiada systemy wspomagające nawigację GNSS oparte o sensory video. CAM PILOT przedstawiony na rysunku 5.5a jest systemem automatycznego kierowania sterowanym przez kamerę stereoskopową. Został zaprojektowany specjalnie do zbioru traw. Kamera ustala pozycję pokosów i na podstawie tej informacji odbywa się prowadzenie pojazdu [23, strona 7]. W ofercie firmy CLASS jest także system oparty na skaningu laserowym LASER PILOT zobrażowany na rysunku 5.5b zaprojektowany do ustalania krawędzi między polem skoszonym a jeszcze nie omłucanym. System pozwala na prowadzenie pojazdu wzdłuż tej krawędzi z dokładnością 10-20cm [23, strona 6].



(a) CLASS CAM PILOT



(b) CLASS LASER PILOT



(c) CLASS CAM PILOT podczas pracy



(d) CLASS LASER PILOT podczas pracy

Rysunek 5.5: Systemy bazujące na sensorach wideo marki CLASS

Również firma New Holland Agriculture posiada w swej ofercie system oparty na sensorach wideo. System SMARTSTEER przedstawiony na rysunku 5.6 za pomocą skanera laserowego wytycza krawędź dzielącą ściernisko od zborza i na podstawie tej informacji przesyła sygnały do układu kierowniczego [2, strona 18].



Rysunek 5.6: System SMARTSTEER firmy New Holland Agriculture

Firma John Deere jako jedyna firma z trzech wybranych do analizy, nie prezentuje rozwiązań opartych o czujniki optyczne w swojej ofercie dotyczącej systemów prowadzenia.

Podobnie jak w przypadku danych z sensorów INS, tak i dane pochodzące z sensorów wideo nie są jeszcze przetwarzane komercyjnie za pomocą algorytmów fuzji danych łącznie z danymi nawigacyjnymi GNSS.

Na zakończenie tego podrozdziału warto krytycznie spojrzeć na dokładności systemów optycznych w zastosowaniach do zbioru plonów. Jeżeli nawet prawdą jest uzyskanie dokładności 10cm, to na odcinku o długości 100m statystycznie pozostawimy nieomłócony obszar równy $5m^2$. Przy założeniu szerokości hedera 10m otrzymujemy błąd na poziomie pięciu promili, co daje maksymalnie 40kg na hektar. W przypadku pesymistycznym, zakładając błąd prowadzenia rzędu 30cm stracimy około kwintala zborza. W realiach polskiego rolnictwa, przy dużym rozdrobnieniu urzytków rolnych lepiej jest stracić nawet dwa kwintale zborza lub dać zarobić ten ekwiwalent operatorowi kombajnu niż inwestować w drogie systemy prowadzenia.

Rozdział 6

Perspektywy rozwoju oraz wnioski

6.1 Perspektywy rozwoju

Nadzieje związane z systemem GALILEO

Dynamiczny rozwój elektronicznych sensorów ruchu

Wykorzystanie systemu naziemnych stacji referencyjnych ASG-EUPOS Dlaczego wciąż potrzebujemy local augmentation systems: Bo jest duże opóźnienie w dostępie do precyzyjnych produktów IGS takich jak orbity i parametry zegara, a wyznaczenia rapid są zbyt mało dokładne [27, strona 215]

modernizacja już istniejących systemów wielka nadzieja z sygnałem L5 GPS.

6.2 Wnioski

Zintegrowane systemy nawigacyjne integrujące obserwacje nawigacji satelitarnej GNSS, nawigacji intercjelnej INS oraz sensorów wideo, oparte na filtracji kalmana znacznie podnoszą dokładność pozycjonowania. Firmy nie wykorzystują jednak tej techniki w zastosowaniach komercyjnych.

Dodatek A

Dodatek

A.1 VLBI

Very Long Baseline Interferometry - Interferometria Długich Baz jest techniką geodezji kosmicznej która powstała w latach 80 ubiegłego wieku. Polega na obserwacji fali elektromagnetycznej w paśmie częstotliwości radiowych, która jest emitowana przez obiekty pozagalaktyczne (kwazary).

Radio-interferometr złożony z pary anten kierunkowych - radioteleskopów, jak na rysunku A.1, obserwuje w zadanym przedziale czasu tylko jedno źródło pozagalaktyczne. W typowej 24 godzinnej sesji obserwacyjnej VLBI uczestniczy zwykle 8 stacji, które obserwują 60 kwazarów kilkakrotnie w ciągu doby. [27, strona 27].



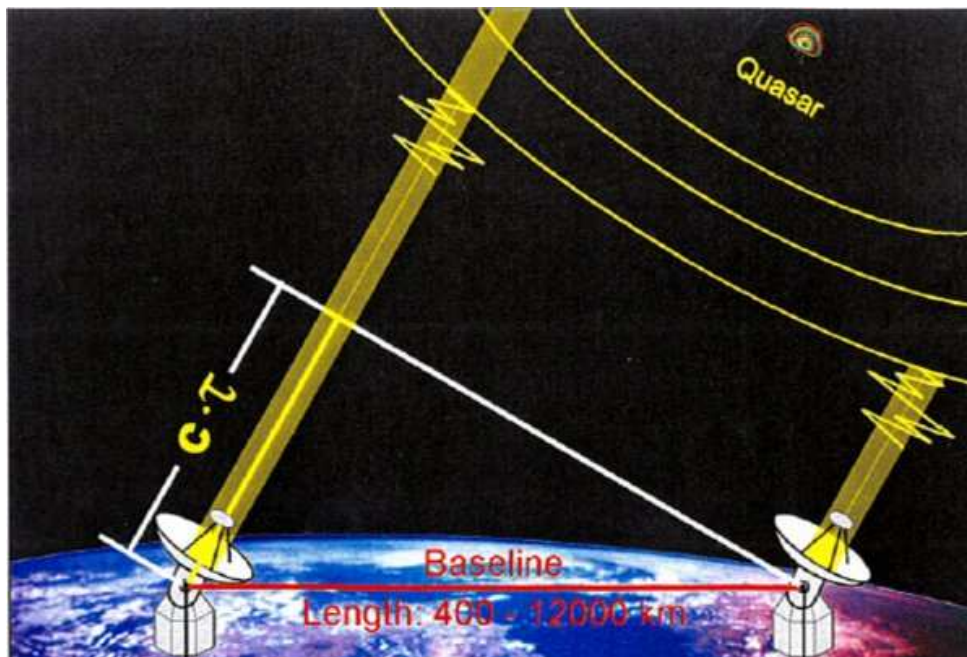
Rysunek A.1: Antena VLBI o średnicy 32 metrów w mieście Tsukuba, Japonia. źródło: [27, strona 28]

Kwazary są tak bardzo oddalone od Układu Słonecznego, że ich ruchy własne są niewykrywalne żadną istniejącą aparaturą. Z punktu widzenia dokładności pomiaru uznajemy je zatem za punkty stałe w przestrzeni kosmicznej. Zbiór pozagalaktycznych radio-źródeł realizuje zatem inercjalny układ odniesienia w oparciu o który precyzyjnie (dokładność rzędu kilku milimetrów) estymowane są pozycje stacji VLBI. Względne prędkości stacji wyznacza się na podstawie kilkuletnich szeregów czasowych obserwacji VLBI [27, strona 27]. Poniżej opisano procedurę wyznaczania współrzędnych wektora o początku i końcu umieszczonych w centrach fazowych radio-interferometru A.2.

Sygnal radiowy odbierany przez radioteleskop stacji VLBI jest nagrywany cyfrowo z bardzo dokładną referencją czasową dostarczaną przez maser wodorowy.¹ Ten sam sygnał przebywa dodatkową drogę $c\tau$ zanim dotrze do centrum fazowego drugiej anteny interferometru. Gdzie c to prędkość światła, a τ stanowi różnicę czasu dotarcia fali radiowej do obu anten interferometru, wyznaczaną za pomocą korelacji nagranych sygnałów. W ten sposób obliczany jest rzut wektora stanowiącego bazę na oś w kierunku do badanego radioźródła [27, strona 27]. Na podstawie

¹Maser to urządzenie o zasadzie działania identycznej jak laser, ale emitujące promieniowanie w innym zakresie częstotliwości, która charakteryzuje się wysoką stabilnością. 1s spóźnienia na ponad 10mln lat

pomiarów sygnałów pochodzących od różnych radioźródeł, wyznacza się wszystkie współrzędne wektora zdefiniowanego między centrami fazowymi anten radiointerferometru w układzie ICRF.



Rysunek A.2: Zasada działania Interferometrii Długich Baz źródło:
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/technologie/vlbi>

Technika VLBI ma fundamentalne znaczenie dla geodezji oraz astronomii poprzez realizację Niebieskiego Układu Odniesienia ICRF. Ponadto przyczynia się do wyznaczania różnicy UT1-UTC² oraz utrzymania długoterminowej stabilności nutacji³. Interferometria Długich Baz poprzez wyznaczone współrzędne stacji oraz prędkości współrealizuje Ziemi Układ Odniesienia ITRF oraz skalę tego układu [27, strona 29].

A.2 DORIS

DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) jest francuskim cywilnym systemem montowanym na satelitach, służącym głównie do precyzyjnego wyznaczania orbit sztucznych satelitów Ziemi oraz pozycjonowania aktywnych stacji referencyjnych. Zaprojektowany przez Francuską Agencję Kosmiczną CNES, system bazuje na efekcie Dopplera zmiany częstotliwości fali radiowej rejestrowanej przez odbiornik umieszczony na satelicie będącym w ruchu orbitalnym, względem częstotliwości referencyjnej sygnału wysłanego ze stacji naziemnej sztywno związanej z Ziemią w jej ruchu obrotowym. [30] System składa się z anteny długości 42 cm, radioodbiornika oraz wysoko stabilnego generatora częstotliwości wzorcowej. Elementy te przedstawia rysunek A.3.

²UT1-UTC oraz UT1-TAI określają relacje między skalą czasu astronomicznego obrotowego i skalami czasu atomowego - regularnie wyznaczanie i publikowane przez IERS

³Drganie ziemskiej osi obrotu w jej ruchu precesyjnym



Rysunek A.3: *Komponenty systemu DORIS* źródło: http://smc.cnes.fr/DORIS/GP_systeme.htm

Kiedy satelita z zainstalowanym na pokładzie systemem DORIS zbliża się w kierunku stacji emitującej sygnał referencyjny, częstotliwość odbieranego przez odbiornik sygnału ulega zwiększeniu. Gdy satelita oddala się od źródła sygnału wtedy odbiornik systemu DORIS odbiera sygnał o częstotliwości niższej niż referencyjna. Wykorzystując super stabilny wzorzec częstotliwości referencyjnej system w każdym pomiarze (interwał 10s) porównuje częstotliwość fali elektromagnetycznej odbieranego sygnału z częstotliwością wzorca. Na podstawie pomiarów dopplerowskiej zmiany częstotliwości, przy wykorzystaniu filtracji Kalmana oraz algorytmu całkowania numerycznego Runge-Kutta, oprogramowanie o nazwie DIODE wyznacza precyzyjnie pozycję oraz prędkość satelity w czasie rzeczywistym [30, zakładka: /DORIS system/Diode].

Każdy z odbiorników sytemu DORIS przechowuje w pamięci wewnętrznej wszystkie wyniki pomiarów. W momencie gdy satelita wraz z odbiornikiem znajdują się nad stacją referencyjną, wszystkie dane są wysyłane transmisją radiową na ziemię. Obecnie segment naziemny systemu DORIS tworzy około 60 stacji permanentnych, nieprzerwanie emitujących sygnał referencyjny, równomiernie rozmieszczonych na powierzchni całego Globu. Wśród stacji permanentnych, których głównym zadaniem jest umożliwianie precyzyjnego wyznaczania orbit, wyróżnić można trzy stacje główne (Toulouse, Kourou, Harthebeesthoek), których zadaniem jest synchronizacja czasu systemu z Międzynarodowym Czasem Atomowym (TAI). Poniżej na rysunku A.4 zilustrowano sieć stacji referencyjnych opisywanego systemu.



Rysunek A.4: *Mapa aktualnej infrastruktury naziemnej systemu DORIS* źródło:
<http://ids-doris.org/network/maps.html>

Wszystkie dane zebrane przez stacje segmentu naziemnego są wysyłane do centrum obliczeniowego Ssalto ⁴ w Tuluzie. W centrum obliczeniowym wyznaczane są trajektorie ruchu satelitów wyposażonych w odbiorniki systemu DORIS. Ssalto jest również odpowiedzialne za gromadzenie oraz dystrybucję danych pozyskanych za pomocą DORIS [30, zakładka: Control and processing

⁴SSALTO multi-mission altimetry, orbit determination and location ground segment (Segment-Sol multi-missions ALTimetrie, Orbitographie et localisation precise)

centre].

Precyzyjne orbity satelitów wyznaczone za pomocą systemu DORIS znalazły szerokie zastosowanie w altimetrii geodezyjnej (badanie poziomu mórz i oceanów), na potrzeby badania zmian klimatycznych tak bardzo istotnych dla rolnictwa.

A.3 SLR

SLR (Satellite Laser Ranging) Pomiary laserowe w których mierzy się odległości z stacji referencyjnej do satelitów. Wiązka laserowa odbija się od reflektorów zwrotnych umieszczonych na satelicie. Odległość do satelity wyznacza się mierząc czas jaki przebywa fala elektromagnetyczna o precyzyjnie określonej częstotliwości do satelity i z powrotem. Na podstawie pomiarów SLR wyznacza się precyzyjnie parametry orbit sztucznych satelitów systemów GNSS.

Poniżej na podstawie [5, zakładka: Stacja Laserowa/informacje ogólne] zaostały wypunktowane najważniejsze zastosowania obserwacji SLR:

- wyznaczanie efemeryd sztucznych satelitów Ziemi z centymetrową dokładnością.
- wyznaczanie zmiennego w czasie położenia geocentrum.
- monitorowanie parametrów rotacji Ziemi (ruch biegunów i długość doby).
- wyznaczanie współrzędnych oraz prędkości stacji referencyjnej wykonującej pomiar.
- wyznaczanie parametrów Międzynarodowego Ziemijskiego Układu Odniesienia ITRF oraz jego poprawę.

A.4 LLR

LLR (Lunar Laser Ranging) Polega na pomiarze laserowym odległości do naturalnego satelity Ziemi - Księżyca. Kosmonauci z misji Apollo15 umieścili na Księżycu reflektor zwrotny który odbija światło. w tym samym kierunku z którego pada źródło. Pomiar odległości wyznacza się wedle tej samej zasady jak w SLR. Jako ciekawostkę należy wspomnieć, że moc lasera jest rzędu kilku gigawatów, a do Ziemi udaje się powrócić tylko pojedynczym fotonem.

Pomiary te wykorzystywane są w celu wyznaczania chwilowego położenia środka ciężkości naszej planety. Poniżej na rysunku A.5 są przedstawione pomiary laserowe wykonywane w obserwatorium Greenbelt w USA.



(a)



(b)

Rysunek A.5: Nocne pomiary do księżyca w obserwatorium NASA na stacji GGAO/GSFC w Greenbelt, Maryland, USA źródło:

<http://space-geodesy.gsfc.nasa.gov/multimedia/GeodesyNetwork/GeodesyNetworkImages.html>

A.5 Polski wkład w rozwój światowej geodezji i nawigacji

Warto nadmienić, że w Borowcu niedaleko Poznania znajduje się obserwatorium astrogeodynamiczne Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, w którym prowadzone są globalne

i lokalne badania geodynamiczne z wykorzystaniem technik GPS oraz SLR. W ramach obserwatorium działa także grupa Służby Czasu, która partycypuje w tworzeniu międzynarodowej skali czasu atomowego TAI oraz UTC. Utrzymanie wysokiej dokładności pomiaru czasu (błąd jest obecnie mniejszy niż 2ns) ma kluczowe znaczenie w celu zapewnienia wysokiej dokładności pomiarów GNSS. [5, zakładka: informacje ogólne] W ramach pomiarów SLR stacja badawcza w Borowcu prowadzi pomiary do kilkunastu sztucznych satelitów Zimi. W obserwatorium znajduje się także permanentna stacja IGS (jest zaangażowana w dostarczanie najwyższej jakości danych i wyników jako standardu dla Globalnego Systemu Nawigacji Satelitarnej) której odbiorniki zbierają obserwacje z satelitów GPS w sposób ciągły. Permanentna stacja wchodzi w skład International GNSS service oraz EUREF. W ramach powyższych organizacji definiuje i realizuje Polski oraz Europejski Układ Odniesienia [5, zakładka: Stacja IGS].

Katedra Radioastronomii Centrum Astronomii na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu dysponuje radioteleskopem o średnicy 32 metrów. W Piwnicach 15km od Torunia znajduje się zatem polska stacja światowej sieci VLBI [31]. Zaprojektowany i wykonany w Polsce pomimo swoich średnich rozmiarów, jest jednym z najlepszych radioteleskopów swojej klasy na świecie [32]. Poniżej na rysunku A.6 przedstawiono polską stację VLBI A.6a oraz jej radioteleskop A.6b.



(a) Stacja VLBI



(b) radioteleskop

Rysunek A.6: *Rysunek przedstawia polską stację VLBI w Piwnicach koło Torunia wraz z jej radioteleskopem* źródło: [31]

W planach Katedry Radioastronomii jest budowa bardzo dużego nowoczesnego radioteleskopu o średnicy 90m.

Podsumowując, można powiedzieć, że Polska posiadając pięć permanentnych stacji IGS (Borowiec, Józefosław, Borowa Góra, Lamkówko i Wrocław), stację VLBI oraz stację pomiarów laserowych do satelitów, posiada dość znaczny potencjał zarówno infrastrukturalny jak i kadrowy godnie reprezentujący nasz kraj na arenie międzynarodowej. Wymienione powyżej przykłady są tylko niewielkim podzbiorem dorobku polskiej geodezji i astronomii dla nauki światowej.

Spis rysunków

2.1	<i>Sieć stacji referencyjnych tworząca układ ITRF2008</i> źródło: [26, strona 38]	4
2.2	<i>Operacyjne satelity systemu GPS</i> źródło: [12]	6
2.3	<i>Stacje segmentu kontrolnego GPS</i> źródło: [12]	6
2.4	<i>Częstotliwości nośne sygnału GPS</i> źródło: [13, strona 329]	7
2.5	<i>Częstotliwości nośne sygnału GLONASS</i> źródło: [13, strona 357]	9
2.6	<i>Schemat częstotliwości nośnych sygnałów systemu GALILEO</i> źródło: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2005/04/Galileo_signal_frequencies	11
2.7	<i>Geometryczna interpretacja obserwacji fazowych</i> źródło: [13, strona 108]	13
3.1	<i>Komponenty typowego systemu automatycznego prowadzenia</i> źródło: [10, strona 1097]	15
3.2	<i>Azymut oraz offset - Parametry najczęściej używane w celu wyznaczenia pozycji względem zadanej trasy; źródło: [34, strona 464]</i>	16
3.3	<i>Tylko offset - w przypadku niskiej jakości danych wejściowych; źródło: [19, strona 947]</i>	17
3.4	<i>Estymacja parametrów κ oraz μ pozwalających na poprawne prowadzenie pojazdu w warunkach obecności poślizgu. źródło powyższych rysunków: [16, strona 26]</i>	17
3.5	<i>Schemat blokowy zaawansowanego algorytmu prowadzenia pojazdu dostosowanego do występowania poślizgu kół. źródło [16, strona 30]</i>	18
3.6	<i>Rysunek obrazujący model położenia pojazdu w świetle ścieżki referencyjnej</i> źródło [36, strona 1598]	19
4.1	<i>Przykład zintegrowanego systemu do równoległego prowadzenia; źródło: [34, strona 464]</i>	22
4.2	<i>Zastosowanie narzędzi logiki rozmytej do integracji danych nawigacyjnych; źródło: [33, strona 774]</i>	22
4.3	<i>Schemat algorytmu znajdującego odpowiedni kąt skrętu kół pojazdu rolniczego; źródło: [33, strona 775]</i>	23
4.4	<i>System do tworzenia map plonowania; źródło: [35, strona 954]</i>	24
4.5	<i>Schemat systemu służącego do automatycznego nawadniania pól uprawnych; źródło: [7, strona 04]</i>	24
5.1	<i>Przegląd komercyjnych odbiorników GNSS</i>	26
5.2	<i>Wykorzystanie jednoczęstotliwościowego sygnału korekcyjnego</i>	26
5.3	<i>Kompensacja wpływu nierówności terenu na pozycję GNSS</i>	27
5.4	<i>Komputer do nawigacji Class z wmontowanymi sensorami do kompensacji nierówności terenu</i>	28
5.5	<i>Systemy bazujące na sensorach wideo marki CLASS</i>	28
5.6	<i>System SMARTSTEER firmy New Holland Agriculture</i>	29
A.1	<i>Antena VLBI o średnicy 32 metrów w mieście Tsukuba, Japonia. źródło: [27, strona 28]</i>	31
A.2	<i>Zasada działania Interferometrii Długich Baz źródło: http://www.mpifr-bonn.mpg.de/technologie/vlbi</i>	32

A.3	<i>Komponenty systemu DORIS</i> źródło: http://smc.cnes.fr/DORIS/GP_systeme.htm	33
A.4	<i>Mapa aktualnej infrastruktury naziemnej systemu DORIS</i> źródło: http://ids-doris.org/network/maps.html	33
A.5	<i>Nocne pomiary do księżyca w obserwatorium NASA na stacji GGAO/GSFC w Greenbelt, Maryland, USA</i> źródło: http://space-geodesy.gsfc.nasa.gov/multimedia/GeodesyNetwork/GeodesyNetworkImages.html	34
A.6	<i>Rysunek przedstawia polską stację VLBI w Piwnicach koło Torunia wraz z jej radioteleskopem</i> źródło: [31]	35

Bibliografia

- [1] European GNSS Agency. *EGNOS Open Service (OS) Service Definition Document*. Czer. 2015. URL: http://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_os_sdd_v2_2.pdf (term. wiz. 23.06.2015).
- [2] New Holland Agriculture. *Gospodarstwo z precyzją New Holland*. Mar. 2015. URL: http://agriculture.newholland.com/poland/pl/PLM/Documents/PLM_138009_POL.pdf (term. wiz. 23.03.2015).
- [3] Z Altamimi i X Collilieux. "IGS contribution to the ITRF". W: *Journal of Geodesy* 83.3-4 (2009), s. 375–383.
- [4] P Bania. "Algorytmy sterowania optymalnego w nieliniowej regulacji predykcyjnej". W: *Rozprawa doktorska. AGH Kraków* (2008).
- [5] Obserwatorium Astrogeodynamiczne CBK PAN Borowiec. *Informacje Ogólne*. Czer. 2015. URL: <http://orchid.cbk.poznan.pl/> (term. wiz. 01.06.2015).
- [6] J Bosy. "Precise processing of satellite GPS observations in local networks located in mountain areas". W: *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Rozprawy (Poland)* (2005).
- [7] José L Chávez i in. "A remote irrigation monitoring and control system (RIMCS) for continuous move systems. Part B: Field testing and results". W: *Precision agriculture* 11.1 (2010), s. 11–26.
- [8] Trimble Agriculture division. *Trimble T2 and T3 Technology*. Czer. 2015. (Term. wiz. 24.06.2015).
- [9] Nic Donnelly i in. "Dynamic Datum Transformations in Australia and New Zealand". W: *Proceedings of Surveying and Spatial Sciences Conference (LOCATE14)*. 2013, s. 7–9.
- [10] Yael Edan, Shufeng Han i Naoshi Kondo. "Automation in agriculture". W: *Springer handbook of automation*. Springer, 2009, s. 1095–1128.
- [11] geoforum.pl. *glonas*. Czer. 2015. URL: http://geoforum.pl/?menu=46813,46834,47127&part=1&link=gnss-systemy-nawigacyjne-glonass#page_top (term. wiz. 22.06.2015).
- [12] Official U.S. Government. *Information about the Global Positioning System (GPS) and related topics*. Czer. 2015. URL: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/> (term. wiz. 20.06.2015).
- [13] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger i Elmar Wasle. *GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [14] Instytut Geodezji i Kartografii. *Międzynarodowy Ziemi System Odniesienia (ITRS)*. Maj 2015. URL: <http://www.igik.edu.pl/pl/geodezja-i-geodynamika-miedzynarodowy-ziemski-system-odniesienia-itrs> (term. wiz. 18.05.2015).
- [15] Jan Kouba. *A guide to using International GNSS Service (IGS) products*. 2009.
- [16] Tom Kraus i in. "Moving horizon estimation and nonlinear model predictive control for autonomous agricultural vehicles". W: *Computers and electronics in agriculture* 98 (2013), s. 25–33.

- [17] J Kryński i JERZY B Rogowski. "Systemy i układy odniesienia w geodezji, geodynamice i astronomii". W: *Seria monograficzna Instytutu Geodezji i Kartografii* 10 (2004), s. 11–35.
- [18] J Kryński i M Sękowski. "Rocznik Astronomiczny na rok 2014". W: *Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, (221 pp)* (2013).
- [19] Zhaoxiang Liu i Gang Liu. "Autonomous Navigation System Based on GPS". W: *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume II*. Springer, 2008, s. 943–950.
- [20] Zhimin Liu, Weidong Xiong i Xuwei Cao. "Design of precision fertilization management information system on GPS and GIS technologies". W: *Computer and Computing Technologies in Agriculture V*. Springer, 2012, s. 268–277.
- [21] Pratap N Misra, Richard I Abbot i EM Gaposchkin. "Integrated Use of GPS and GLONASS: Transformation between WGS 84 and PZ-90". W: *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*. 1996, s. 307–314.
- [22] Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa. *Średnia powierzchnia gospodarstwa*. Czer. 2015. URL: <http://www.arimr.gov.pl/dla-beneficjenta/srednia-powierzchnia-gospodarstwa.html> (term. wiz. 25.06.2015).
- [23] CLAAS Polska Sp. z o. o. *Broszura Systemy Prowadzenia*. Mar. 2015. URL: <http://www.claas.pl/blueprint/servlet/blob/353304/0a1537526737bcec9c9ae1223ade8311/227945-dataRaw.pdf> (term. wiz. 23.03.2015).
- [24] John Deere Polska Sp. z o.o. *Rozwiązania rolnictwa precyzyjnego John Deere*. Mar. 2015. URL: http://www.deere.pl/pl_PL/docs/product/equipment/agricultural_management_solutions/brochure/ams_fullline_brochure.html (term. wiz. 23.03.2015).
- [25] Guobing Pan i Xiao Feng. "Research on Control System of Variable Rate Fertilizer Applicator in Precision Farming Based on Combined Positioning of GPS, Electronic Compass and Gyroscope". W: *Computer and Computing Technologies in Agriculture V*. Springer, 2012, s. 188–192.
- [26] G Petit i B Luzum. *IERS Conventions 2010, IERS Technical Note; 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie*. Spraw. tech. ISBN 3-89888-989-6, 2010.
- [27] Hans-Peter Plag i Michael Pearlman. *Global geodetic observing system: meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [28] Jerzy Rogowski i Aleksander Brzeziński. "The celestial reference system and its role in the epoch of global geodetic technologies". W: *Reports on Geodesy and Geoinformatics* 92 (2012), s. 163–174.
- [29] International Earth Rotation i Reference System Service. *The International Celestial Reference System (ICRS)*. Maj 2015. URL: <http://www.iers.org/iers/EN/DataProducts/ICRS/icrs.html> (term. wiz. 11.05.2015).
- [30] Centre National d'Etudes Spatiales. *DORIS*. Czer. 2015. URL: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/doris.html> (term. wiz. 01.06.2015).
- [31] Katedra Radioastronomii Centrum Astronomii UMK. *Katedra Radioastronomii*. Czer. 2015. URL: <http://www.astro.uni.torun.pl/index.php?page=home&tab=home> (term. wiz. 08.06.2015).
- [32] Katedra Radioastronomii Centrum Astronomii UMK. *Nowy Polski Radioteleskop*. Czer. 2015. URL: <http://www.astro.uni.torun.pl/index.php?page=RT90> (term. wiz. 08.06.2015).

- [33] Xiaojun Wan i Gang Liu. “Automatic Navigation System with Multiple Sensors”. W: *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume II*. Springer, 2008, s. 769–776.
- [34] Fangming Zhang i in. “A Low-Cost Positioning System for Parallel Tracking Applications of Agricultural Vehicles by Using Kalman Filter”. W: *Computer and Computing Technologies in Agriculture V*. Springer, 2012, s. 461–470.
- [35] Xiaochao Zhang, Xiaolan Hu i Wenhua Mao. “Development of Intelligent Equipments for Precision Agriculture”. W: *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume II*. Springer, 2008, s. 951–958.
- [36] Zhong-xiang Zhu i in. “Path tracking control of autonomous agricultural mobile robots”. W: *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 8.10 (2007), s. 1596–1603.