

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	4
2.2	Systemy GNSS	6
2.2.1	GPS	6
2.2.2	GLONASS	6
2.2.3	GALILEO	6
2.2.4	BaiDou-Compass	6
2.2.5	Indian IRNSS	6
2.3	Algorytmy Pozycjonowania	6
2.3.1	DGPS	6
2.3.2	RTK	6
2.3.3	PPP	6
2.4	Nawigacja Inercjalna	6
2.5	Zaawansowane metody opracowania obserwacji	6
3	Algorytmy sterowania	7
3.1	Podział algorytmów sterowania ze względu na dostarczane dane wejściowe	7
3.2	Podział algorytmów sterowania ze względu na zastosowane algorytmy decyzyjne	8
4	Aktualne badania	10
4.1	Zintegrowane systemy pozycjonowania w czasie rzeczywistym	11
4.2	Specjalistyczne opracowanie obserwacji - postprocessing	14
4.3	Inne zastosowania GNSS w rolnictwie precyzyjnym	15
5	Analiza rynku	17
5.1	Wykorzystanie GNSS	17
5.2	Zastosowanie systemów inercjalnych	17

5.3	Zastosowanie sensorów video	17
5.4	Oprogramowanie telematyczne	17
6	Perspektywy rozwoju	18
6.1	Nadzieje związane z systemem GALILEO	18
6.2	Dynamiczny rozwój elektronicznych sensorów ruchu	18
6.3	Wykorzystanie systemu naziemnych stacji referencyjnych ASG-EUPOS	18
7	Wnioski	19
A	Dodatek	20
A.1	VLBI	20
A.2	DORIS	21
A.3	SLR	23
A.4	LLR	24
A.5	Polski wkład	24
	Bibliografia	27

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 [19]. 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 pól rolnych [9].

TODO trzeba dokończyć wstęp.

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 dalszej części rozdziału opisano pokrótce algorytmy wyznaczania pozycji w nawigacji satelitarnej oraz inercyjnej, 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. [15, 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 VLBI - interferometria długich baz, składa się z zestawu procedur i konwencji oraz odpowiednich zasad modelowania koniecznych do zdefiniowania w dowolnym momencie czasu trzech osi kartezjańskiego układu współ-

rzędnych w przestrzeni kosmicznej [17]. 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 [7, 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 zanedbywalne z punktu widzenia docelowej dokładności wyznaczania współrzędnych.[14, strona 21]. Początek układu współrzędnych w systemie ICRS został zdefiniowany w punkcie barycentrum układu słonecznego. [16, 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 mm na pow. Ziemi), co przy dostępności precyzyjnego modelu precesji - nutacji pozwala stwierdzić, że ICRF jest najlepszym inercjalnym układem odniesienia dostępnym obecnie[16, 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 [16, strona 164] ponieważ z wystarczającą dokładnością możemy przyjąć iż, układ ICRF jest inercjalny, 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.

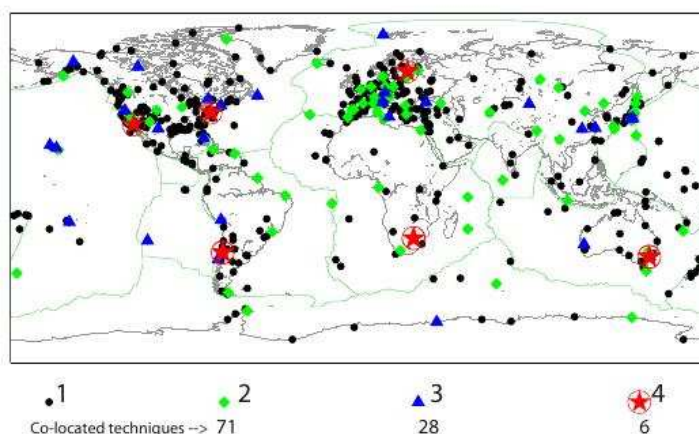
\vec{a}_p wyraża przyspieszenia perturbujące np. pochodzące od promieni słonecznych. Według autorów opracowania [16] po uprzednim scałkowaniu równania różniczkowego 2.1 otrzymujemy chwilową pozycję satelity w inercjalnym systemie ICRS. Jedną z fundamentalnych funkcji systemu ICRS jest zatem dostarczanie 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. (orbity + parametry zegarów). Powyższą transformację opisano np. w monografii [14, 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 $\pm 25cm$ [16, 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 [14, 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 [14].
- TCG - Czas współrzędnych geocentrycznych jako system czasu. Skala układu odniesienia ma być zgodna z definicją czasu TCG. Za jednostkę długości przyjęto metr (SI) [14].
- Orientacja przestrzenna zgodna z wyznaczeniami BIH na epokę 1984. [14].
- Zmienność w czasie orientacji przestrzennej określana na podstawie warunku, iż globalna suma poziomych ruchów tektonicznych nie zawiera składowych obrotu [5].

Fizyczną realizacją systemu ITRS jest Międzynarodowy Ziemski Układ Odniesienia (ITRF). Układ ten powstał z integracji obserwacji wykonanych technikami VLBI, SLR, LLR, DORIS 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: [14, strona 38]

Układ ITRF składa się z współrzędnych oraz prędkości wybranych stacji referencyjnych oraz ich macierzy kowariancji. Parametry te są wyznaczane w centrach obliczeniowych Międzynarodowej Służby Ruchu Obrotowego Ziemi oraz Systemów Odniesienia (IERS) i publikowane w IERS Conventions. [8, 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 podzbiorze stacjach referencyjnych IERS, i wpasowywany następnie za pomocą 14 parametrowej transformacji Helmerta do układu ITRF2008 [2]. 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 [6, 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 ($<100\text{km}$) 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. [6, strona 11]

2.2 Systemy GNSS

2.2.1 GPS

2.2.2 GLONASS

2.2.3 GALILEO

2.2.4 BaiDou-Compass

2.2.5 Indian IRNSS

2.3 Algorytmy Pozycjonowania

2.3.1 DGPS

2.3.2 RTK

2.3.3 PPP

2.4 Nawigacja Inercjalna

2.5 Zaawansowane metody opracowania obserwacji

Jeżeli wykorzystujemy w pomiarach pozycji DGPS – pomiar względny na podstawie pseudoodległości, to dokładność lokalizacji pojazdu wynosi około 2m. Jeżeli natomiast zastosujemy technikę względnego opracowania obserwacji fazowych RTK dokładność wynosi 2cm. Poniżej na rysunku 2.2 przedstawiono komputer z systemem wbudowanym, który zintegrowano z odbiornikiem GPS [21].



Rysunek 2.2: *Komputer z systemem wbudowanym, zintegrowany z odbiornikiem GPS; źródło: [21, strona 952]*

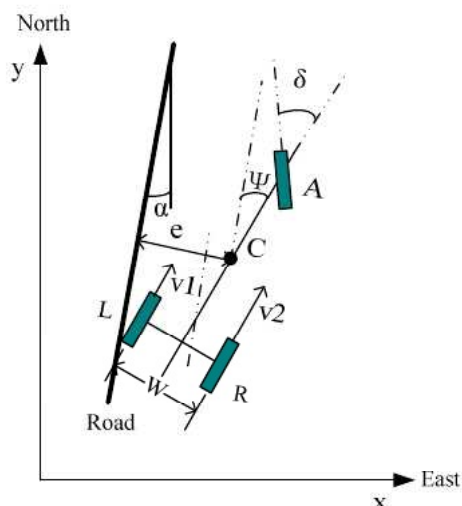
Rozdział 3

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. 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.

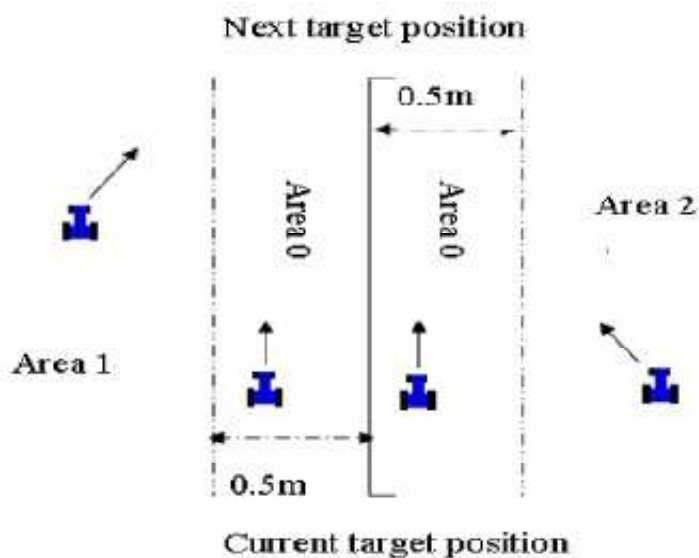
3.1 Podział algorytmów sterowania ze względu na dostarczane dane wejściowe

Jednym z najbardziej popularnych zbiorów parametrów nawigacyjnych, które są następnie wysyłane do algorytmów 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 tą krzywą. Offset natomiast jest to odległość środka ciężkości pojazdu względem zadanej ścieżki [19]. Na rysunku nr 3.1 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 3.1: Azymut oraz offset - Parametry najczęściej używane w celu wyznaczenia pozycji względem zadanej trasy; źródło: [20, strona 464]

W przypadku niskiej dokładności parametrów nawigacyjnych autorzy publikacji [9] zaproponowali algorytm, który korzysta tylko z obliczanego w czasie rzeczywistym offsetu.



Rysunek 3.2: Tylko offset - w przypadku niskiej jakości danych wejściowych; źródło: [9, strona 947]

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 sterowa-

nia [19, strona 770]. Poniżej znajdują się przykłady kilku najbardziej popularnych algorytmów prowadzenia pojazdów: feedforward plus PID steering control algorithm

Rozdział 4

Aktualne badania

W przeciągu ostatniego ćwierćwiecza wynaleziono wiele technik oraz systemów służących do celów nawigacji: systemy satelitarne, systemy inercjalne, 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 [19, 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 [19, 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. - trzeba porównać charakterystyki szeregów czasowych z ciekawych danych INS vs GNSS GNSS – raczej nie występują błędy systematyczne – brak dryftu, czasami dziury w rozwiązaniach, gorsza rozdzielczość pomiarów. INS – dryft który narasta w czasie, wysoka rozdzielczość pomiarów, brak dziur w obserwacjach,

Wniosek – integracja tych dwóch systemów jest super:) TODO trzeba tutaj rysunek wstawić :)

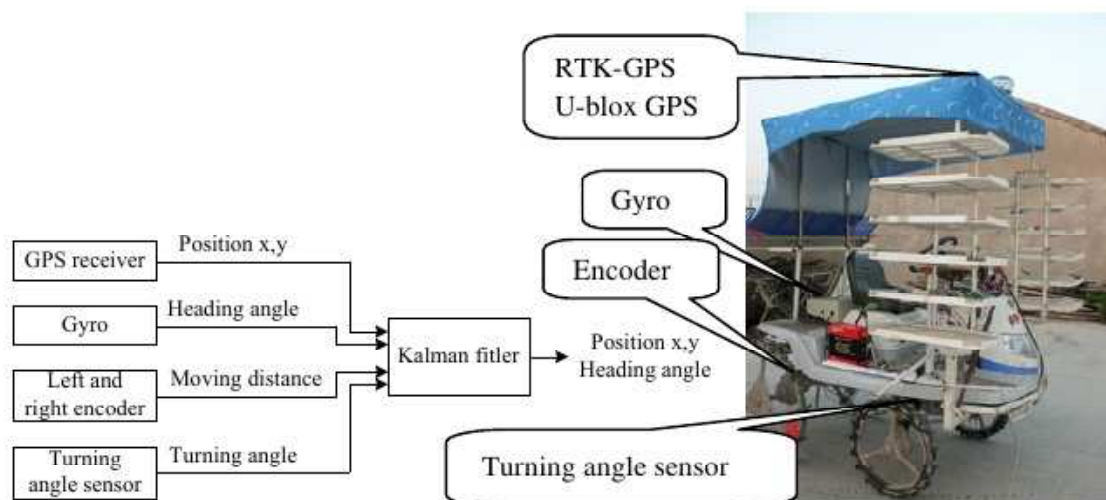
4.1 Zintegrowane systemy pozycjonowania w czasie rzeczywistym

—zastosowanie zintegrowanego systemu pozycjonowania w precyzyjnym nawożeniu. W artykule [13] panowie Guobing Pan oraz Xiao Feng opisują zastosowanie zintegrowanego systemu bazującego na systemie GPS w precyzyjnym nawożeniu roślin. Nawożenie ma czterdzieści 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 [13]. 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 wymiernych korzyści ekonomicznych [13]. 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-Krugera. 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.

—Zbieranie danych o glebie i jej właściwościach na potrzeby systemu precyzyjnego dawkowania nawozów opartego na technologii GIS przy użyciu systemu pozycjonowania GPS (DGPS, RTK) 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 ten artykuł: 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 [10].

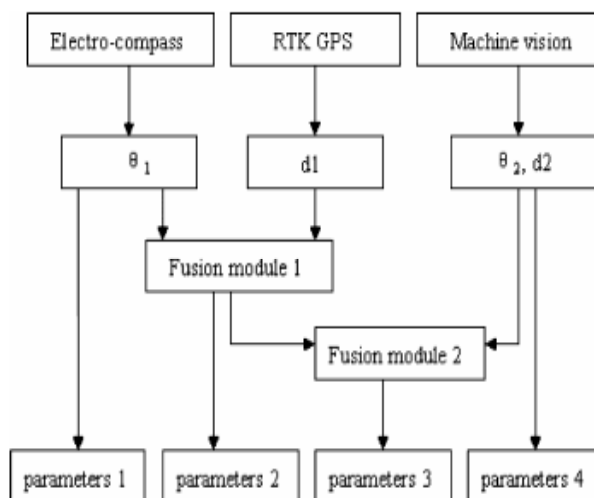
—Tani System równoległego prowadzenia pojazdów rolniczych oparty na filtrze Kalmana. Prowadzenie równoległe jest jedną z najbardziej popularnych obecnie metod ułatwiających prace polowe. W pracy [20] czytamy, że przeprowadzono już wiele badań nad zastosowaniem bardzo dokładnych odbiorników fazowych RTK-GPS 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 [20]. 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: [20, 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 RTK 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 DGPS. Maksymalna odchyłka od równośćności po przebyciu 70 m wyniosła 3m [20].

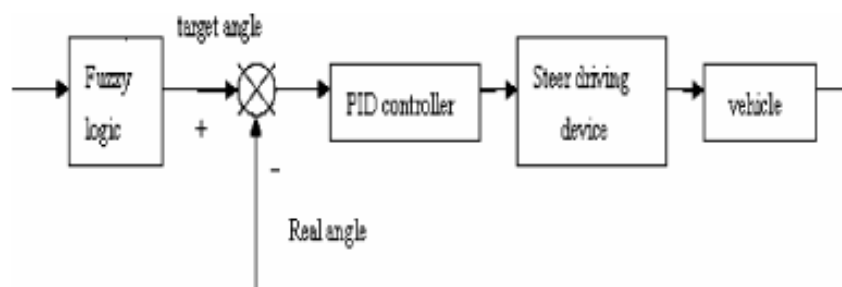
— Integracja danych RTK-GPS z elektronicznym kompasem oraz obrazowaniem cyfrowym z użyciem logiki rozmytej (Fuzzy logic). W artykule pod tytułem “Automatic Navigation System With Multiple Sensors” panowie Wan oraz Liu opisali system automatycznego prowadzenia pojazdów rolniczych bazujący na integracji 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: [19, 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 pa-

rametrów określających położenie pojazdu względem zdefiniowanej uprzednio trasy obliczany był teoretyczny kąt skrętu kół, przekazywany następnie do realizacji w układzie sterującym (target angle), patrz rysunek 4.3.



Rysunek 4.3: Schemat algorytmu znajdującego odpowiedni kąt skrętu kół pojazdu rolniczego; źródło: [19, strona 775]

System sterujący realizował swoje zadania w oparciu o algorytm PID - regulator proporcjonalno-całkująco - różniczkujący. Według autorów pracy [19] opisany system spełnia wymagania automatycznego prowadzenia maszyn rolniczych w warunkach roboczych.

4.2 Specjalistyczne opracowanie obserwacji - post-processing

— szczególnie ważny z punktu widzenia opracowania map plonowania. Pan Xiaochao Zhang wraz z zespołem w artykule [21] 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.



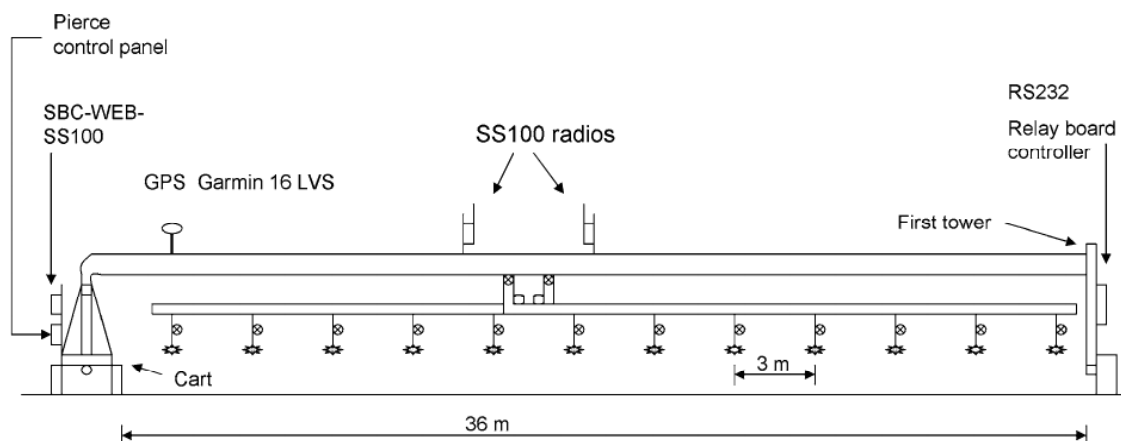
Rysunek 4.4: *System do tworzenia map plonowania*; źródło: [21, strona 954]

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

4.3 Inne zastosowania GNSS w rolnictwie precyzyjnym

— pomiary pól powierzchni na potrzeby rolnictwa precyzyjnego (Computer and Computing Technologies in Agriculture; volume 2; s. 993)

— zastosowanie GPS w automatycznym zmiennym nawadnianiu 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 [4].



Rysunek 4.5: *Schemat systemu służącego do automatycznego nawadniania pól uprawnych*; źródło: [4, strona 04]

Jose L. Chavez i wsp. w artykule [4] 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 H_2O . 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

test cytowania [11]

test cytowania [12]

test cytowania [1]

5.2 Zastosowanie systemów inercjalnych

5.3 Zastosowanie sensorów video

5.4 Oprogramowanie telematyczne

Rozdział 6

Perspektywy rozwoju

6.1 Nadzieje związane z systemem GALILEO

6.2 Dynamiczny rozwój elektronicznych sensorów ruchu

6.3 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 [15, strona 215]

Rozdział 7

Wnioski

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).

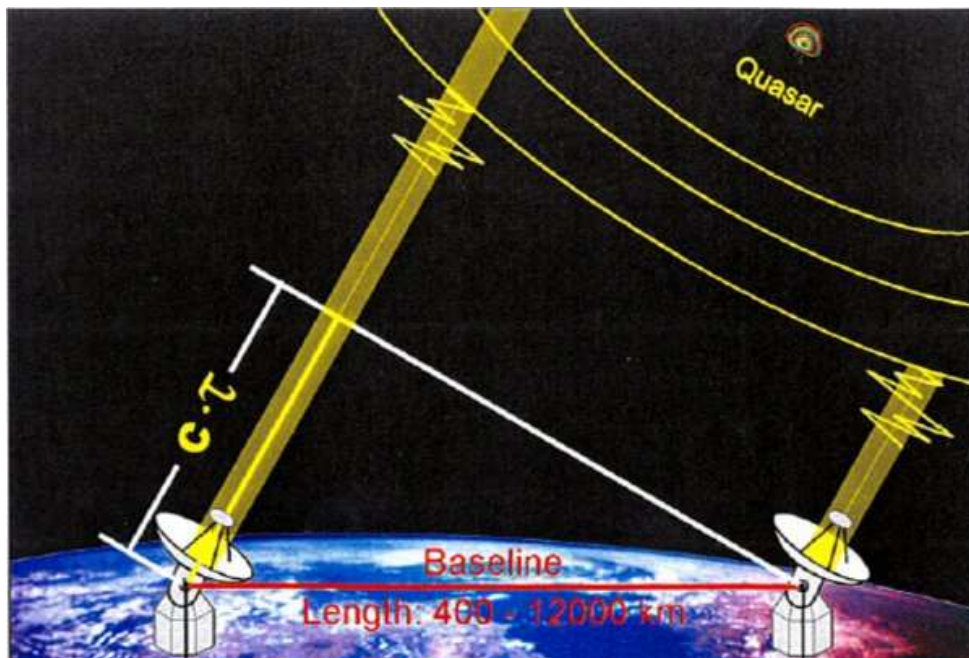
Radio-interferometr złożony z pary anten kierunkowych - radioteleskopów, jak na rysunku A.1, obserwuje w zadanym przedziale czasu tylko jedno źródło pozagalaktyczne. W typowej 24 godzinnej sesji obserwacyjnej VLBI uczestniczy zwykle 8 stacji, które obserwują 60 kwazarów kilkakrotnie w ciągu doby. [15, strona 27].



Rysunek A.1: *Antena VLBI o średnicy 32 metrów w mieście Tsukuba, Japonia.*
źródło: [15, 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 [15, strona 27]. Poniżej opisano procedurę wyznaczania współrzędnych wektora o początku i końcu umieszczonych w centrach fazowych radio-interferometru A.2. Sygnał 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 [15, strona 27]. Na podstawie 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>

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

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

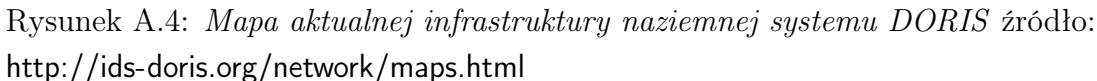
CNES, system bazuje na efekcie Dopplera zmiany częstotliwości fali radiowej rejestrowanej przez odbiornik umieszczony na satelicie będącym w ruchu orbitalnym, względem częstotliwości referencyjnej sygnału wysłanego ze stacji naziemnej sztywno związanej z Ziemią w jej ruchu obrotowym. [18] System składa się z anteny długości 42 cm, radio-odbiornika oraz wysoko stabilnego generatora częstotliwości wzorcowej. Elementy te przedstawia rysunek A.3.



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 wzorec 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 filatracji Kalmana oraz algorytmu całkowania numerycznego Runge-Kutta, oprogramowanie o nazwie DIODE wyznacza precyzyjnie pozycję oraz prędkość satelity w czasie rzeczywistym [18, zakładka: /DORIS system/Diode].

Każdy z odbiorników systemu 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.



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.

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.

- wyznaczanie efemeryd sztucznych satelitów Ziemi z centymetrową dokładnością.
- wyznaczanie zmiennego w czasie położenia geocentrum.
- monitorowanie parametrów rotacji Ziemi (ruch biegunów i długość doby).

Rozdział A

- 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 fotonom.

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

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. [3, 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 [3, zakładka: Stacja IGS]

Spis rysunków

2.1	<i>Sieć stacji referencyjnych tworząca układ ITRF2008</i> źródło: [14, strona 38]	4
2.2	<i>Komputer z systemem wbudowanym, zintegrowanym z odbiornikiem GPS;</i> źródło: [21, strona 952]	6
3.1	<i>Azymut oraz offset - Parametry najczęściej używane w celu wyznaczenia pozycji względem zadanej trasy;</i> źródło: [20, strona 464]	8
3.2	<i>Tylko offset - w przypadku niskiej jakości danych wejściowych;</i> źródło: [9, strona 947]	8
4.1	<i>Przykład zintegrowanego systemu do równoległego prowadzenia;</i> źródło: [20, strona 464]	12
4.2	<i>Zastosowanie narzędzi logiki rozmytej do integracji danych nawigacyjnych;</i> źródło: [19, strona 774]	13
4.3	<i>Schemat algorytmu znajdującego odpowiedni kąt skrętu kół pojazdu rolniczego;</i> źródło: [19, strona 775]	14
4.4	<i>System do tworzenia map plonowania;</i> źródło: [21, strona 954]	15
4.5	<i>Schemat systemu służącego do automatycznego nawadniania pól uprawnych;</i> źródło: [4, strona 04]	15
A.1	<i>Antena VLBI o średnicy 32 metrów w mieście Tsukuba, Japonia.</i> źródło: [15, strona 28]	20
A.2	<i>Zasada działania Interferometrii Długich Baz</i> źródło: http://www.mpifr-bonn.mpg.de/technologie/vlbi	21
A.3	<i>Komponenty systemu DORIS</i> źródło: http://smc.cnes.fr/DORIS/GP_systeme.htm	22
A.4	<i>Mapa aktualnej infrastruktury naziemnej systemu DORIS</i> źródło: http://ids-doris.org/network/maps.html	23
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	24

Bibliografia

- [1] 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).
- [2] Z Altamimi i X Collilieux. "IGS contribution to the ITRF". W: *Journal of Geodesy* 83.3-4 (2009), s. 375–383.
- [3] Obserwatorium Astrogeodynamiczne CBK PAN Borowiec. *Informacje Ogólne*. Czer. 2015. URL: <http://orchid.cbk.poznan.pl/> (term. wiz. 01.06.2015).
- [4] 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.
- [5] Instytut Geodezji i Kartografii. *Międzynarodowy Ziemiński System Odniesienia (ITRS)*. Maj 2015. URL: <http://www.igik.edu.pl/pl/geodezja-i-geodynamika-międzynarodowy-ziemski-system-odniesienia-itsr> (term. wiz. 18.05.2015).
- [6] Jan Kouba. *A guide to using International GNSS Service (IGS) products*. 2009.
- [7] 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.
- [8] J Kryński i M Sękowski. "Rocznik Astronomiczny na rok 2014". W: *Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, (221 pp)* (2013).
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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).

- [12] 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).
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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).
- [18] Centre National d’Etudes Spatiales. *DORIS*. Czer. 2015. URL: <http://www.avisio.altimetry.fr/en/techniques/doris.html> (term. wiz. 01.06.2015).
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.