



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Transporto priemonės sekimo įrangai skirtų važiavimo  
stebėjimo ir eismo įvykio nustatymo algoritmų sudarymas ir  
tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Karolis Virbickas**

Projekto autorius

**Prof. dr. Dangirutis Navikas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Transporto priemonės sekimo įrangai skirtų važiavimo  
stebėjimo ir eismo įvykio nustatymo algoritmų sudarymas ir  
tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

---

**Karolis Virbickas**

Projekto autorius

**Prof. dr. Dangirutis Navikas**

Vadovas

**Doc. Vytautas Knyva**

Recenzentas

---

**Kaunas. 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Karolis Virbickas

## **Transporto priemonės sekimo įrangai skirtų važiavimo stebėjimo ir eismo įvykio nustatymo algoritmų sudarymas ir tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Karolio Virbicko, baigiamasis projektas tema „Transporto priemonės sekimo įrangai skirtų važiavimo stebėjimo ir eismo įvykio nustatymo algoritmų sudarymas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Virbickas, Karolis. Transporto priemonės sekimo įrangai skirtų važiavimo stebėjimo ir eismo įvykio nustatymo algoritmų sudarymas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Dangirutis Navikas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: pagreitis, akselerometras, giroskopas, GPS, jutiklių sintezė.

Kaunas 2019. 50 p.

### **Santrauka**

Šio darbo metu buvo parinkti algoritmai ir sprendimai kaip apdorojant transporto priemonės sekimo įrangoje naudojamų jutiklių duomenis gali būti atliekamas važiavimo stebėjimas ir eismo įvykio nustatymas. Darbe iškeliamą problemą, bei įgyvendinami pagrindiniai uždaviniai skirti problemos sprendimui: atlikta techninių ir programinių sprendimų analizė, suprojektuotas ir pagamintas važiavimo stebėjimo sistemos maketas, sudarytas ir ištirtas transporto priemonės judėjimo modelis, sudaryti įrangos valdymo ir duomenų surinkimo bei filtravimo algoritmai, parinkti duomenų sintezės ir eismo įvykio nustatymo algoritmai, atlikti eksperimentiniai sistemos tyrimai ir algoritmų analizė.

Atsižvelgiant į keliamus uždavinius atliekama analizė bei pateikiami pasiūlymai. Naudojant sistemos maketą ir simuliacijai skirtą programinę įrangą surinkti duomenys tyrimams. Pritaikant aprašytus metodus atliktas duomenų apdorojimas bei algoritmų vykdymo laiko matavimas, palyginami ir analizuojami iš skirtingų duomenų šaltinių gauti rezultatai.

Virbickas, Karolis. Research and Development of Driving Track Observation and Crash Detection Algorithms for Vehicle Tracking Equipment. Master's Final Degree Project / prof. dr. Dangirutis Navikas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: acceleration, accelerometer, gyroscope, GPS, sensor fusion.

Kaunas, 2019. 50 pages.

### **Summary**

Main objective of this work algorithms and solutions have been selected for the purpose of how to condition the data from vehicle tracking equipment sensors so that they can be used for tracking and accident detection. The work raises a problem and the main tasks that solve the problem are being fulfilled: technical and software solutions are analyzed; a driving style tracking system development kit is designed and manufactured; the vehicle's movement pattern are designed and analyzed; algorithms for equipment management, data collection and filtering are developed; algorithms for sensor fusion and accident detection are selected; experimental system research and algorithm analysis are performed.

Analysis and suggestions are made based on the challenges. Data for research was collected using system development kit and simulation software. By applying the described methods, data processing and time measurement of the algorithms were performed, the results obtained from different data sources were compared and analyzed.

## Turinys

<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Apžvalginė dalis.....</b>	<b>10</b>
1.1. Konkurentų taikomi eismo įvykio nustatymo algoritmai.....	10
1.1.1. <i>Teltonika FMB900</i> .....	10
1.1.2. <i>Ruptela FM-Eco4 light</i> su UBI programinės įrangos versija.....	11
1.1.3. <i>Quartix TCSV11</i> .....	13
1.2. Inercinės jutiklių sistemos pritaikymas .....	13
1.3. Vietos nustatymo metodų panaudojimas.....	14
1.4. Transporto priemonės judėjimo charakteristikos .....	15
1.5. Judėjimo modelio pritaikymas pozicijos duomenims .....	16
1.6. Inercinių jutiklių signalų sintezė metodai.....	17
1.7. GPS ir inercinių jutiklių duomenų sintezės metodai .....	18
<b>2. Metodinė dalis.....</b>	<b>20</b>
2.1. Matavimų sistemos maketo projektavimas ir gamyba .....	20
2.1.1. Naudojamos įrangos struktūra.....	21
2.1.2. Važiavimo stebėjimo sistemos makete naudojami komponentai.....	21
2.1.3. Duomenų perdavimo sąsajų teorinio apkrovimo skaičiavimas .....	22
2.2. Judėjimą aprašantys skaičiuojamieji modeliai naudojant GPS duomenis.....	22
2.2.1. Atstumo tarp dviejų taškų Žemės paviršiuje skaičiavimas.....	23
2.2.2. Tikslų koordinatų skaičiavimas žinant paskutinę koordinatę, atstumą ir krypties kampą ..	23
2.2.3. Kinematinų parametrų skaičiavimas .....	24
2.3. Judėjimą aprašantys skaičiuojamieji modeliai naudojant inercinių matavimų sistemos duomenis.....	24
2.4. GPS ir inercinių matavimų sistemas vienijantys judėjimo parametrai.....	24
2.5. Tyrimams naudojama programinė įranga.....	25
2.6. Įrenginio algoritmų funkcinė diagrama .....	26
<b>3. Tyrimų rezultatų dalis .....</b>	<b>28</b>
3.1. Pagreičio jutiklio duomenų analizė .....	28
3.1.1. Žemų dažnių neribotos impulsinės reakcijos filtras .....	30
3.1.2. <i>Kalman</i> filtras .....	30
3.1.3. Rezultatų palyginimas .....	30
3.2. Prietaiso padėties nustatymo algoritmo tyrimas.....	31
3.3. GPS duomenų skaičiavimo metodikos palyginimas .....	31
3.4. Jutiklių duomenų sinchronizacijos tyrimas .....	33
3.5. Pagreičio jutiklio savybių parinkimo tyrimas.....	35
3.6. Jutiklių sintezės algoritmo tyrimas .....	38
3.7. Važiavimo sąlygų nustatymo algoritmo analizė.....	39
3.8. GPS ir IMU sintezės algoritmas .....	39
3.9. Algoritmų vykdymo laiko tyrimas .....	40
<b>Išvados .....</b>	<b>41</b>
<b>Informacijos šaltinių sąrašas .....</b>	<b>42</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>44</b>
1 priedas. <i>MadgwickAHRS</i> blokinė diagrama giroskopo ir akselerometro sintezei.....	44

2	priedas. Matavimams ir tyrimams naudojamas maketas .....	44
3	priedas. Formuliu sąrašas .....	45
4	priedas. GPS pagreičių skaičiavimo algoritmas .....	47
5	priedas. Transporto priemonės lėtėjimo parametrų skaičiavimas <i>Matlab</i> .....	48
6	priedas. Greičio ir pagreičio dažnių keitimo funkcijos .....	48
7	priedas. Kampo paklaidos skaičiavimo funkcijos <i>Matlab</i> .....	50

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

EKF (angl. *Extended Kalman Filter*) – išplėstinis Kalman filtras

GPS (angl. *Global Positioning System*) – globali padėties nustatymo sistema

GSM (angl. *Global System for Mobile Communications*) - globalus mobilaus ryšio standartas

IMU (angl. *Inertial Measurement Unit*) – inercinė matavimų sistema

INS (angl. *Inertial Navigation System*) – inercinė navigacijos sistema

KF (angl. *Kalman Filter*) – Kalman filtras

NMEA (angl. *National Marine Electronics Association*) – Nacionalė jūrų elektronikos asociacija

RAM (angl. *Random-Access Memory*) – tiesiogiai adresuojama atmintis arba keičiamoji atmintis

SD (angl. *Secure Digital*) – atminties kortelių formatas

UKF (angl. *Unscented Kalman Filter*) – supaprastintas išplėstinis Kalman filtras

DOP (angl. *Dilution of Precision*) – tikslumo lygio sumažėjimas

OS – operacinė sistema



## Įvadas

Avarijos aptikimo sistemos dažniausiai yra naudojamos saugos oro pagalvių išskleidimui reikiamu metu. Panašiu principu veikiančių programų galima rasti ir nešiojamiems įrenginiams, tokiems kaip mobilieji telefonai, jos gali informuoti skubios pagalbos tarnybas apie įvykusį eismo įvykį. Nors tokios sistemos gali aptikti tiek lengvus, tiek stiprius smūgius, reikalaujančius atitinkamos pagalbos kelyje, jos nesunkiai gali būti suklaidintos dėl neatsargaus naudojimo arba dėl nepakankamos fizinės sąsajos su automobilio kėbulu. Tai stipriai sumažina pasitikėjimą tokios sistemos rezultatais. Šias problemas galima išspręsti įdiegus automobilio salone tvirtinamą matavimų sistemą su jos parametrams ir automobilio charakteristikoms pritaikyta programine įranga, galinčia adaptuotis prie kintančių dinaminių veiksnių.

Įrangą gali būti panaudojama ne tik asmeninėms reikmėms. Draudimo ir transporto valdymo bendrovės yra suinteresuotos žinoti kada nutinka bet koks eismo įvykis, matyti jo stiprumą, tai ypač naudinga kai vairuotojas turi mažai vairavimo patirties. Dažniausiai žala padaroma važiuojant nedideliu greičiu, pavyzdžiui, stovėjimo aikštelėje, net ir tokiu atveju savininkui yra svarbi informacija apie eismo įvykio kilmę. Tradicinės sistemos, dėl GPS signalo silpnumo, tokiu atveju dažniausiai nenustato tikslios buvimo vietos. Tuo tarpu atskirais inerciniais jutikliais užfiksuoti duomenys yra įtakojami aplinkos vibracijų, todėl kai yra siekiama užtikrinti tokį jautrumą, kad būtų aptinkami net ir silpni smūgiai, daug dėmesio turi būti skiriama filtravimo algoritmo parinkimui.

Tuo tarpu tuneliuose ir tankiai apstatytose vietovėse susiduriama su GPS pozicijos deviacija nuo nuvažiuoto kelio bei pozicijos šuoliais. Dėl šios problemos nustatoma klaidinga transporto priemonės buvimo vieta ir bendras nuvažiuotas atstumas. Tai lemia kliento nepasitikėjimą sistemos parodymais. Nuspręsta ieškoti sprendimo kaip naudojant esamas ir papildomas jutiklių sistemas galima būtų sumažinti fiksuojamos pozicijos ir realios pozicijos nuokrypį bei tokiu būdu efektyviau išnaudoti įrangą.

Taigi šio baigiamojo projekto tikslas sukurti transporto priemonės sekimo įrangai skirtus važiavimo stebėjimo ir eismo įvykio nustatymo algoritmus ir atlikti jų tyrimus. Kad būtų visapusiškai išnagrinėtas suformuluotas darbo tikslas keliami tokie uždaviniai:

- atlikti techninių ir programinių sprendimų analizę;
- suprojektuoti ir pagaminti važiavimo stebėjimo sistemos maketą;
- sudaryti ir iširti transporto priemonės judėjimo modelį;
- sudaryti įrangos valdymo ir duomenų surinkimo bei filtravimo algoritmus;
- parinkti duomenų sintezės ir eismo įvykio nustatymo algoritmus;
- atlikti eksperimentinius sistemos tyrimus ir algoritmų analizę.

## 1. Apžvalginė dalis

Kuriamą duomenų apdorojimo sistemą sudaro skirtingos paskirties algoritmai, galintys nustatyti buvimo vietos koordinates, judėjimo greičius bei veikiančius pagreičius, o taikydami skaitmeninio signalų apdorojimo metodus patikslinti ir interpretuoti turimą informaciją. Egzistuoja keletas panašią sistemą naudojančių įrenginių, kuriuose užsibrėžtam funkcionalumui pasiekti yra pritaikomi tiek paprasti, tiek ir sudėtingesni metodai. Duomenų interpretavimo rezultatus galima peržiūrėti jų internetiniuose duomenų serveriuose.

Panašių programinių sprendimų analizė atlikta siekiant nustatyti pagrindinius veikimo principus ir naudojamus algoritmus. Pateikti pasiūlymai kaip galima užtikrinti geresnes signalų apdorojimo savybes.

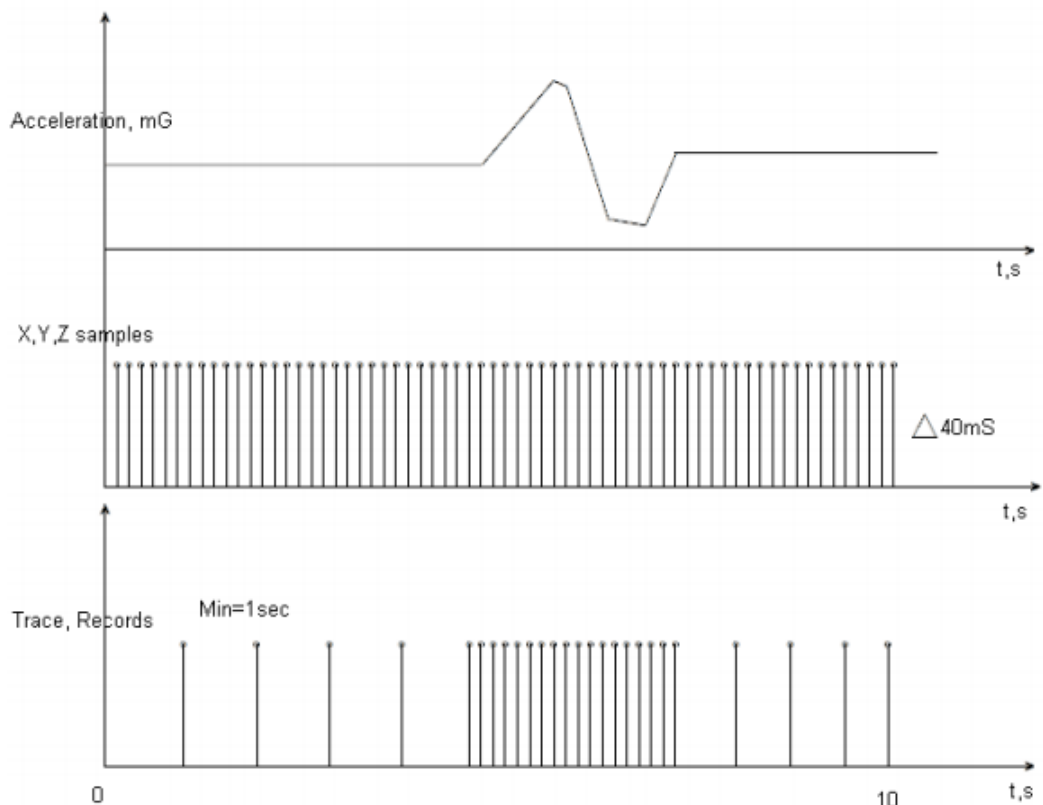
### 1.1. Konkurentų taikomi eismo įvykio nustatymo algoritmai

Apžvelgus rinkoje egzistuojančias alternatyvas buvo išskirtos kelios panašaus pobūdžio sistemos. Aprašomi jų naudojami duomenų surinkimo bei apdorojimo algoritmai ir esminiai parametrai.

#### 1.1.1. *Teltonika FMB900*

Įmonės *Teltonika* įrenginio *FMB900* programinėje sistemoje eismo įvykio nustatymo funkcija apibrėžiama dviem parametrais – slenksčiu (mg) ir trukme (ms) [1]. Šios reikšmės parenkamos pagal tai kokias smūgio jėgas yra norima nustatyti. Įrenginys fiksuoja įvykį, kai per numatytą laiko tarpą buvo stebimos didesnės pagreičio reikšmės nei yra nustatyta slenkstinė vertė. *FMB900* gali nustatyti nežymius barškėjimus (slenkstis – 100 mg, trukmė 1 ms) arba sunkius eismo įvykius (slenkstis – 4000 mg, trukmė – 5 ms).

Įgalinus smūgio tako (angl. *Crash Trace*) saugojimą akcelerometro duomenys gali būti fiksuojami 40 ms intervalais. Atminties laukas gali talpinti iki 5 sekundžių avarijos informacijos (1000 B atminties vietos), jame įprastai talpinami duomenys kas vieną sekundę arba atsiradus didesniai nei 50 mg pagreičio pokyčiui. Kiekvienas įrašas turi akcelerometro X, Y ir Z ašių reikšmes ir laiko žymes milisekundėmis. Įprastai eismo įvykio metu fiksuojama nuo 20 iki 30 įrašų (0,8 – 1,2 s).



**1.1 pav.** „Crash Trace“ veikimo principas [2]

Akselerometro ašių kalibravimas atliekamas rankiniu būdu, gamintojo rekomendacinė procedūra:

- automobilis stovi;
- kelias yra tiesus;
- siunčiama kalibravimo užklauso žinutė;
- penkių sekundžių intervale įsibėgėjama iki daugiau nei 30 km/val.
- įrenginys praneša apie sėkmingą kalibravimą;

Kalibravimo duomenys yra išsaugojami vidinėje energoneprieklausomoje atmintyje ir po įrenginio perkrovimo turi išlikti nepakitę. Būseną galima patikrinti siunčiant žinutę su užklausu.

Netikrų įvykių bandoma išvengti vertinant keletą parametru – stiprus stabdymas ir bėgėjimasis (matuojamas mg) yra fiksuojamas kai degimas yra įjungtas ir transporto priemonės greitis yra didesnis nei 10 km/val.; staigus manevravimas (matuojamas rad/s) fiksuojamas esant įjungtam degimui ir transporto priemonės greičiui viršijant 30 km/val. [2].

### **1.1.2. Ruptela FM-Eco4 light su UBI programinės įrangos versija**

Transporto stebėjimo įrangos gamintojas *Ruptela* deklaruoja, kad *FM-Eco4 light* įrenginys [3] buvimo vietos duomenis renka 2 Hz dažniu, stebėjimas yra atliekamas nuolatos, bet tik paskutiniųjų 5 sekundžių duomenys yra laikomi atmintyje. Atsiradus naujai informacijai seniausia yra perrašoma. Po įvykio įrenginys perkelia surinktus duomenis iš RAM į išorinę energoneprieklausomą atmintį. Jis taip pat išsaugo papildomas 5 sekundes po eismo įvykio. Perkelta abiejų intervalų informacija yra perduodama į duomenų serverį. Įrenginys negali fiksuoti kito įvykio, jei nėra

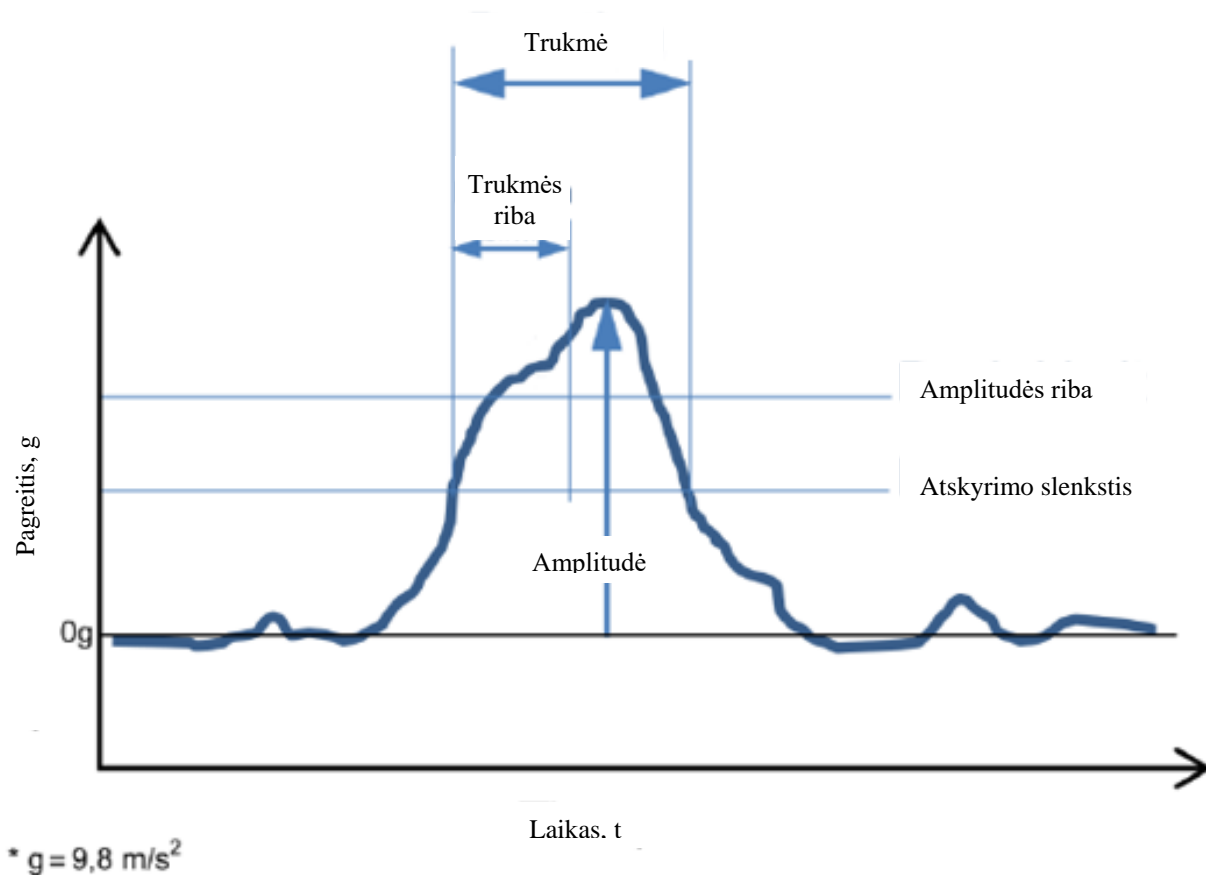
pabaigtas duomenų perdavimas ir su tuo susiję veiksmai. Verta paminėti, kad šis įrenginys negali pereiti į miego režimą įgalinus eismo įvykio nustatymo funkciją.

Įrenginys gali fiksuoti pagreičius visomis trimis ašimis atskirai. Skaičiavimuose yra naudojamas suminio pagreičio vektoriaus ilgis, kurį sudaro x, y ir z ašys:

$$\|a\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}, \quad (1.1)$$

čia  $a_x$  – pagreitis x ašyje,  $a_y$  – pagreitis y ašyje,  $a_z$  – pagreitis z ašyje.

Kai suminis vektorius viršija atskyrimo slenkstį pradedamas registruoti eismo įvykis, o įrašuose yra išsaugomos visų trijų ašių pagreičių reikšmės, nuo jų yra pašalintas Žemės traukos vektorius.



1.2 pav. Eismo įvykio fiksuojimo reikalavimų pavyzdys [4]

Akselerometro ašių kalibravimas atliekamas rankiniu būdu, gamintojo rekomenduojama procedūra. Ramybės būsenos kalibravimas (1 etapas):

1. automobilis stovi;
2. siunčiama kalibravimo užklausa žinutė;
3. įrenginys patikrina ar automobilis stovi;
4. pasirinkto kelio paviršius lygus (statumas neturi viršyti 5 laipsnių);
5. laukiama 1-5 minutes. Turi nebūti jokio judesio kol bus surenkama 1024 įrašai iš eilės (1 įrašas per 10 ms, 6 KB atminties vietos).

Kalibravimas yra atšaukiamas, kai užfiksuojamas GPS greičio ir krypties pasikeitimas. Ramybės būsenos kalibravimą galima atlikti garaže, nes jam nereikalingas GPS signalas. Pagreičio būsenos kalibravimas. Atliekamas išibėgėjimo matavimas:

1. pradedama važiuoti, greitis turi staigiai didėti, naudojama maksimali galia;
2. kalibravimas prasideda, kai GPS greitis didesnis nei 15 km/val.;
3. greitėjimas turi būti nenutrūkstamas bent 3 sekundes;
4. pirmus tris punktus atlikti bent 2 kartus.

Sėkmingam kalibravimui reikia dviejų išibėgėjimo matavimų. Įrenginys palygina abu matavimus ir nustato kalibravimo vertes. Norint patikrinti ar kalibravimas atliktas sėkmingai reikia užklausti įrenginį SMS žinute [4].

### 1.1.3. *Quartix TCSVII*

*TCSVII* naudoja 14 bitų trijų ašių akselerometrą, kuris sukonfigūruotas matuoti pagreičius 100 Hz dažniu. Kartu yra pajungtas ir GPS imtuvas, jis suteikia informaciją apie greitį, vietą, kryptį 10 Hz dažniu ir yra naudojamas tikrinant lėtėjimo matavimus ir išvengiant netikrų suveikimų [5].

Pagrindiniai elementai reikalingi eismo įvykiui nustatyti yra šie:

- įrenginio padėtis yra sukalibruota taip, kad matavimai sutaptų su vertikaliomis šonų ir priekio/galo ašimis;
- žemės traukos jėga yra atskiriama nuo akselerometro parodymų naudojant *Gram-Schmidt* ortogonalizaciją;
- gautos komponentės yra palyginamos su iš anksto tam konkrečiam įrenginiui numatytais slenkstinėmis vertėmis;
- impulso forma yra patikrinama naudojant ribotos impulsinės reakcijos filtrą aukštų dažnių vibracijų eliminavimui;
- jei kriterijai yra patenkinami, įvykis yra perduodamas į realaus laiko komunikacijos serverius, duomenys susideda iš pagreičių, GPS informacijos ir kitų parametrų.

Kiekvienas telematikos įrenginys yra derinama kiekvienos nakties metu priklausomai nuo to kiek kartų buvo užfiksuotas perspėjimas apie galimai įvykusį įvykį. Šis procesas yra atliekamas komunikacijos serveriuose naudojant specializuotą programinę įrangą. Įrenginiai generuojantys didelį kiekį perspėjimų yra derinami keičiant šiuos parametrus:

- eismo įvykio pagreičių laikinės charakteristikos filtro formą;
- minimalų horizontalios plokštumos smūgio lygio slenkstį.

Šie kriterijai yra naudojami kontroliuoti įvykių užfiksavimo skaičių, kylantį dėl „triukšmingų“ transporto priemonių (modifikuota važiuoklė arba žemo profilio padangos). Tačiau jais nėra naudojamosi atliekant išsamų avarijos nustatymą ir filtravimą. Remiantis tam tikrų įvykių skaičiumi galima kontroliuoti algoritmo jautrumą.

## 1.2. Inercinės jutiklių sistemos pritaikymas

Siekiant užtikrinti kiek įmanoma geresnį vietos ir eismo įvykio nustatymo tikslumą yra analizuojami inercinės jutiklių sistemos parametrai, ją sudaro akselerometras ir giroskopas. Ši konfigūracija pasirinkta dėl to, kad kiekvienas jų turi savo trūkumų ir privalumų, pvz. giroskopai

matuoja kampo pokytį, tačiau prastai matuoja inerciją. Akselerometrai gerai matuoja inerciją, todėl šių jutiklių kombinacija suteikia daugiau informacijos apie judėjimą [6].

Svarbus skaitmeninių jutiklių parametras yra analogas-kodas keitiklio skilčių skaičius. Skaitmeninį kodą yra nesunku apdoroti, išsaugoti ar perduoti ryšio kanalais. Deja, bet kokį analoginį signalą verčiant į kodą ir apdorojant skaitmeniniu būdu, neišvengiamai atsiranda paklaidų, turinčių įtaką visų skaitmeninių schemų darbui. Analoginis signalas yra tolydus, t. y. kisdamas nuo minimalios vertės iki maksimalios vertės jis gali įgyti be galo daug reikšmių.

Būtent nuo skilčių skaičiaus priklausys analogas-kodas keitiklio skiriamoji geba:

$$Q = (U_{max} - U_{min})/N, \quad (1.2)$$

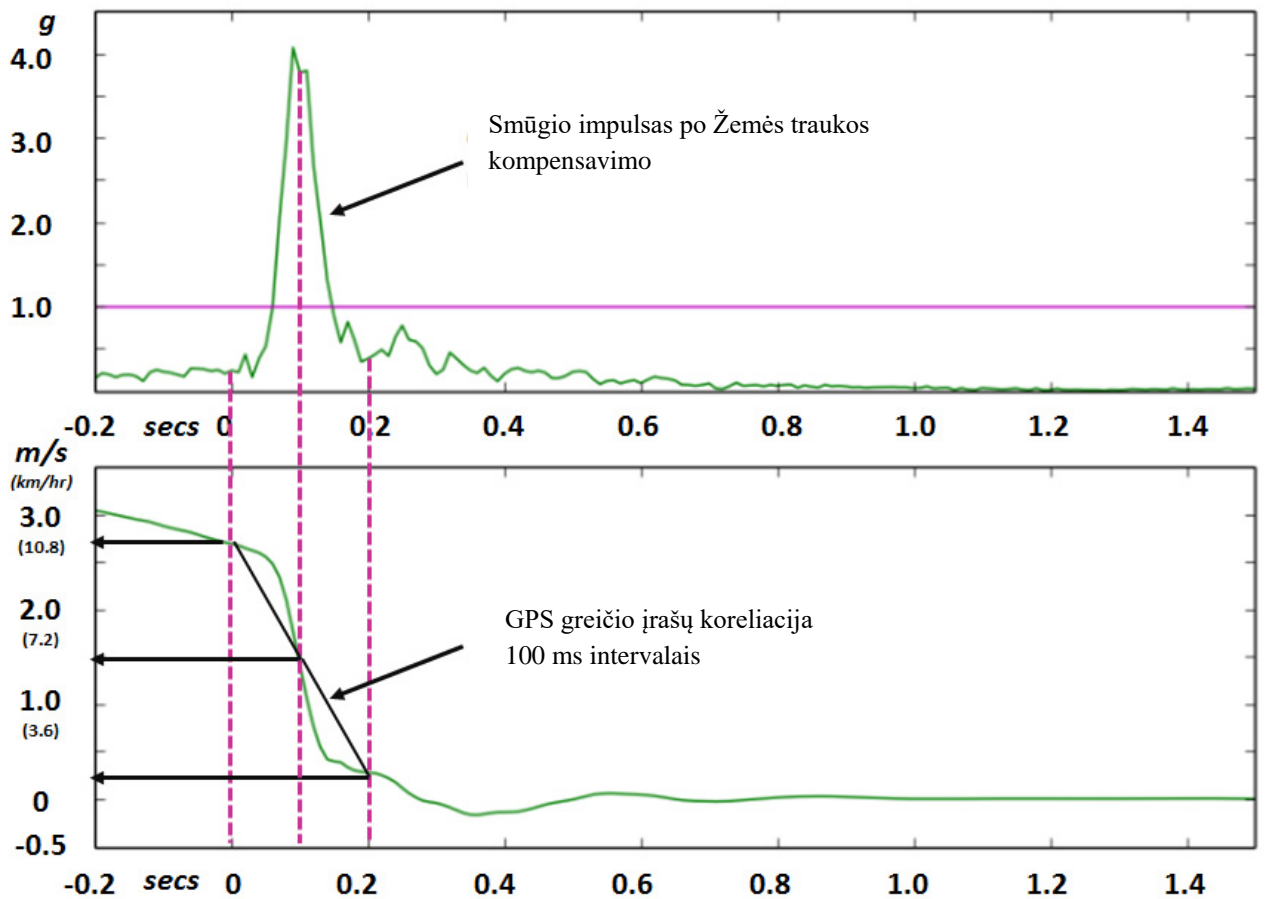
čia  $U_{max}$  – maksimali įėjimo įtampos reikšmė (lygi teigiamai atraminei keitiklio įtampai);  $U_{min}$  – minimali įėjimo įtampos reikšmė (lygi neigiamai atraminei keitiklio įtampai);  $N$  – įtampos intervalų skaičius, priklausantis nuo skilčių skaičiaus  $M$ :  $N = 2M - 1$ . Naudojant 16 skilčių jutiklį gaunamas 4 kartų jautrumo skirtumas, lyginant su 14 skilčių jutikliu.

Eismo įvykio metu yra svarbu užfiksuoti pagreičių pasikeitimą bei maksimalų pagreitį. Pastarasis gali siekti beveik 50 g važiuojant 50 km/val. greičiu [7], tokiu atveju naudojant jutiklį su  $\pm 8g$  matavimų diapazonu išmatuoti pagreičiai yra užriboti ir esant didelėms kelio paviršiaus sukeltoms vibracijoms tampa sudėtinga nustatyti smūgio pagreičius. Šią problemą padeda sumažinti pažangesni jutikliai galintys pagreičius fiksuoti  $\pm 16 g$  ar  $\pm 32 g$  diapazonuose. Reikalingą pagreičio ir kampinio greičio matavimo diapazoną yra galima nustatyti atliekant simuliaciją programine įranga, svarbu pasiekti aukštą eismo įvykio metu fiksuojamo smūgio signalo ir kelio nelygumų sukeltų triukšmų skiriamąją gebą [8].

Jutiklių sistemos išmatuotos reikšmės gali stipriai svyruoti dėl keitiklio triukšmų. Siekiant sumažinti triukšmų įtaką galima pasinaudoti vidiniais inercinės jutiklių sistemos algoritmais [9], kurie matavimus atlikdami didesniu dažniu apskaičiuoja vidutinę arba filtruotą reikšmę, kurią toliau galima nuskaityti mikroprocesoriumi. Taip sumažinama mikroprocesoriaus apkrova, panaudojamas didelis inercinės jutiklių sistemos matavimų dažnis.

### 1.3. Vietos nustatymo metodų panaudojimas

Šiuo metu plačiausiai paplitęs vietos nustatymas naudojant GPS imtuvą. Jo tikslumas gali siekti keletą metrų (su 95% reikšmingumo lygmeniu) atviroje erdvėje [10]. Šis metodas yra labai tikslus užmiestyje, kur dažniausiai yra mažai pravažiuojančių automobilių skaičius, galinčių iškviešti pagalbą. Didesnio tikslumo GPS duomenis taip pat galima panaudoti ir eismo įvykiui nustatyti. Šiuo metu didžiausi gamintojai siūlo imtuvus, kurių duomenų atnaujinimo dažnis nustatomas iki 10 Hz. Pagal vietos pasikeitimą paskaičiuoti tangentinis ir įcentrinis pagreičiai gali padėti įvertinti kitais būdais surinktų duomenų kokybę. Toliau pateiktame 1.3 pav. pavaizduotas silpno smūgio metu patiriamas pagreitis duomenis surenkant 10Hz dažniu. Atliekant GPS greičio pokyčio skaičiavimą kreivėje matomus duomenis yra įmanoma užrašyti tais pačiais matavimo vienetais ir su taikant algoritmus nustatyti eismo įvykį.



1.3 pav. Eismo įvykio metu fiksuojami pagreičiai [11]

Alternatyva vietai nustatyti su GPS yra mobilus ryšio bazinių stočių siunčiamos informacijos interpretavimas. Kai kuriuose GSM ryšio moduluose [12] yra pritaikytas trianguliacija paremtas vietos nustatymo algoritmas. Šio metodo paklaida mieste gali siekti 112 m su 67 % reikšmingumo lygmeniu [13], kuri priklauso nuo bazinių stočių išdėstymo vietovėje. Tačiau reikia papildomų tyrimų norint patikrinti kaip priklauso vietos nustatymo tikslumas nuo išmatuotų signalo parametrų. Žinant priklausomybę yra nesudėtinga parinkti esamu metu tinkamiausią vietos nustatymo būdą.

Abu metodai nėra tobuli universaliam vietos nustatymui mieste ir užmiestyje. Užmiestyje nepalyginamai tiksliau veikia GPS vietos nustatymas, o imtuvu nustatyto vietos pasikeitimo pakanka net ir sunkiems eismo įvykiams fiksuoti. Siaurose gatvėse tarp aukštų pastatų, daugiaaukštėse ar požeminėse stovėjimo aikštelėse, GPS signalas yra labai nuslopintas ir vietos nustatymas yra neįmanomas, todėl negalima pasikliauti imtuvo informacija tikrinant eismo įvykio sąlygas ar buvimo vietą. Šiuo atveju vietai nustatyti yra tinkamesnis GSM ryšys dėl didelio stočių pasiskirstymo mieste [14]. Prieš sudarant universalų vietos nustatymo algoritmą yra svarbu įvertinti ar stebint transporto priemonės buvimo vietą GPS pozicionavimas yra visada tikslesnis.

#### 1.4. Transporto priemonės judėjimo charakteristikos

Panašiuose įrenginiuose išsamesniam transporto priemonės eksploatavimo apibūdinimui dažniausiai naudojamos tik išmatuotos jutiklių reikšmės. Yra svarbu įvertinti galimybę panaudoti prieinamus duomenis išvestinių fizikinių parametrų nustatymui, kurie galėtų suteikti papildomos vertingos informacijos transporto priemonės valdytojui.

Transporto priemonėje tiesiogiai išmatuojamos reikšmės:

- ratų greitis (CAN bus), m/s;
- pozicija erdvėje (GPS/GSM), ilguma, platumą, aukštis virš jūros lygio;
- greitis erdvėje (GPS), m/s;
- judėjimo kryptis (GPS/GSM), laipsniai šiaurės atžvilgiu;
- kampiniai greičiai (giroskopas), °/s;
- pagreičiai (akselerometras), m/s<sup>2</sup>.

Skirtingos transporto priemonės pasižymi nevienodais maksimaliais pasiekiamais pagreičiais. Siekiant tinkamai užfiksuoti eismo įvykį naudojant slenkstines vertes yra svarbu nustatyti transporto priemonės tipines dinamines charakteristikas. Pavyzdžiui, transporto priemonės stabdymo pagreitis priklauso nuo jos masės ir stabdymo jėgos ( $F = ma$ ), jei greitis sumažėjo greičiau, yra suprantama, kad išorinė jėga padėjo stabdyti, t. y. buvo kontaktas su išoriniu kūnu [15]. Dažniausiai išmatuotų reikšmių neužtenka, kad algoritmas būtų universaliai pritaikomas įvairių kategorijų transporto priemonėms. Remiantis fizikos dėsniais galima įvertinti papildomų parametrų svarbą ir atlikti išsamesnę judėjimo analizę.

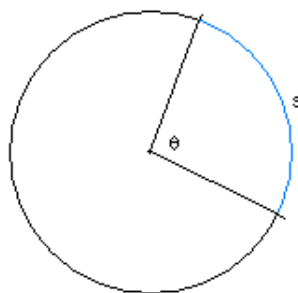
### 1.5. Judėjimo modelio pritaikymas pozicijos duomenims

Vietos nustatymo metodais gauta transporto priemonės buvimo vietos informacija pasižymi nedideliu atnaujinimo dažniu, bet yra pritaikoma didelė dinamika nepasižyminčių sistemų judėjimo charakteristikų stebėjimui. Pagrindiniai GPS imtuvo išvedami duomenys yra vieta, judėjimo kryptis, greitis ir aukštis virš jūros lygio. Pritaikant universalius kūnų judėjimo modelius yra randami papildomi išvestiniai duomenys: horizontalioje plokštumoje – kampinis greitis, įcentrinis pagreitis, linijinis pagreitis; vertikalioje plokštumoje – aukščio kitimo greitis, aukščio kitimo pagreitis, įkalmės kampas ir kiti. Remiantis šiais duomenimis yra atliekamas visos sistemos judėjimo charakteristikų atnaujinimas.

Judėjimo krypties duomenys naudojami važiavimo linijinių ir įcentrinių pagreičių skaičiavimui, kurie gali būti lyginami arba sujungiami su jutiklių sistemos išmatuotomis reikšmėmis. Įcentrinio pagreičio reikšmę nusako greičio kvadrato ir posūkio spindulio santykis (1.3). Formulėse laiko atskaitoms naudojamas vietos nustatymo sistemos siunčiamas laikas.

$$a = \frac{v^2}{r}, \quad (1.3)$$

čia  $v$  – judėjimo greitis,  $r$  – posūkio spindulys,  $a$  – įcentrinis pagreitis.



1.5 pav. Apskritimo parametrų modelis [16]



Kadangi iš GPS posūkio spindulio tiesiogiai gauti negalima, todėl jis skaičiuojamas pasinaudojant greičio, laiko ir krypties duomenimis. Kampo dydį skaičiuojame iš krypties pokyčio:

$$\theta = \frac{\Delta Direction}{\Delta t} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \quad (1.4)$$

čia  $\Delta Direction$  – krypties pokytis,  $\Delta t$  – laiko pokytis,  $\theta$  – posūkio kampas.

Atstumą skaičiuojame iš vidutinio greičio toje atkarpoje ir praėjusio laiko nuo praeito skaičiavimo:

$$s = v \cdot \Delta t, \quad (1.5)$$

čia  $v$  – greitis,  $\Delta t$  – laiko pokytis,  $s$  – atstumas.

Skaičiavimų rezultatus naudojame kitoje formulėje:

$$r = \frac{s}{\theta} = \frac{v\Delta t}{\theta} = \frac{v \cdot \Delta t^2 \cdot 180^\circ}{\Delta Direction \cdot \pi}, \quad (1.6)$$

Todėl įcentrinio pagreičio reikšmė apskaičiuojama panaudojant 1.3 ir 1.6 formules:

$$a = \frac{v^2 \cdot \Delta Direction \cdot \pi}{v \cdot \Delta t^2 \cdot 180^\circ} = \frac{v \cdot \Delta Direction \cdot \pi}{\Delta t^2 \cdot 180^\circ}, \quad (1.7)$$

Tangentinis pagreitis randamas skaičiuojant vidutinio greičio pokyčio santykį su laiko pokyčiu:

$$a_t = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (1.8)$$

Taip pat yra svarbu nustatyti ar judėjimo krypties ir posūkio kampo duomenys normaliomis vairavimo sąlygomis yra pakankamai panašūs. Tokiu atveju atsiradusi trumpalaikė deviacija tarp dviejų nustatymo metodų suteikia informaciją apie slydimą kampu – jutikliai fiksuoja kampo pokytį, tačiau transporto priemonės pozicija rodo, kad važiuojama ta pačia kryptimi.

## 1.6. Inercinių jutiklių signalų sintezė metodai

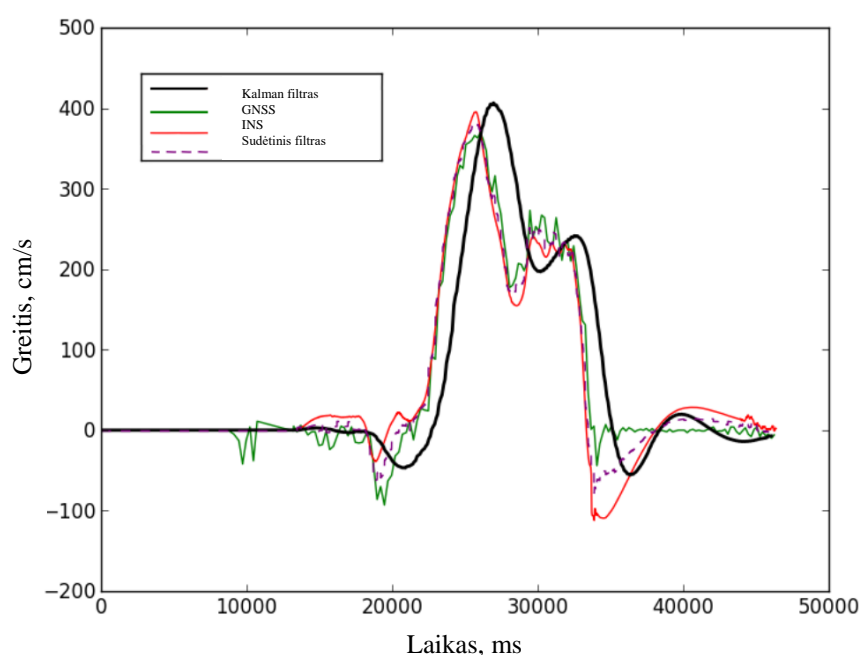
Labiausiai paplitę inercinių jutiklių signalų sintezės metodai naudoja papildomą Žemės magnetinio lauko jutiklį. Dėl papildomo jutiklio tokia sistema gali fiksuoti globalią poziciją nepriklausomai nuo GPS imtuvu fiksuojamų duomenų. Tai pasiekama apjungiant akselerometro fiksuojamą pasipriešinimo Žemės traukos jėgai pagreitį (vertikali ašis paviršiaus atžvilgiu) bei magnetinio lauko jutikliu fiksuojamą kampą tarp įrenginio padėties ir magnetinės šiaurės (horizontali ašis). Tokiu atveju jutikliai turi būti sumontuoti toje pačioje plokštumoje. Paskutinė ašis randama remiantis matematikos teorija, kadangi visos trys ašys yra statmenos. Šie algoritmai plačiai taikomi robotuose, dronuose ir kitose panašiose valdymo sistemose, kurių veikimui tiesiogiai naudojami aprašyti jutikliai. Tačiau transporto priemonėse yra susiduriama su stipriais elektromagnetiniais laukais ir metalinėmis magnetinėmis konstrukcijomis, dėl kurių stipriai sumažėja magnetinio lauko jutiklio efektyvumas. Tolimesniuose skyriuose bus tiriamas vienas iš aprašytose valdymo sistemose naudojamų metodų – *MadgwickAHRS* sensorių sintezės algoritmas [17], jį bandant pritaikyti be magnetinio lauko jutiklio fiksuojamų duomenų (1 priedas).

## 1.7. GPS ir inercinių jutiklių duomenų sintezės metodai

Šiame skyrelyje nagrinėjami inercinės jutiklių sistemos ir GPS imtuvo siunčiamų judėjimo parametrų apdorojimo metodai bei reikšmių tarpusavio ryšys. Atliekant panašios sistemos bandymus buvo pastebėta, kad matuojant pagreitį automobilyje yra susiduriama su didelėmis vibracijomis, todėl yra svarbu nustatyti šio triukšmo priklausomybę nuo aplinkos poveikio [18]. Taip pat buvo pastebėta, kad eismo įvykio įvertinimui dažnai nepakanka remtis tik suminiu pagreičio vektoriumi, todėl yra reikalingas jutiklių sistemos duomenų susiejimo su automobilio judėjimo sistema algoritmas, kuris padėtų nustatyti poveikio šaltinius. Jutiklių sintezė dažniausiai atliekama naudojant filtravimo metodus, pavyzdžiui *Kalmano* filtrą [19, 20, 21]. *Kalmano* filtro idėją 1960 metais tiesinio filtravimo ir prognozės problemoms spręsti pristatė *Rudolfas Kalmanas* [21]. Po straipsnio paskelbimo buvo pasiūlyta įvairių atmainų ir papildymų, kurie buvo aptarti kituose straipsniuose. Alternatyvūs metodai ir jų straipsniai bus aptariami šiame skyriuje.

*Higgins* [22] palygina sudėtinį (angl. *Complimentary*) filtrą su *Kalmano* filtru kaip du skirtingus duomenų sintezės algoritmus. Sudėtinis filtras yra pagrindinis panašių sistemų jutiklių sintezės sprendimas, jo įgyvendinimas yra nesudėtingas, mažos skaičiavimų apkrovos palyginus su kitomis alternatyvomis, pavyzdžiui, *Kalmano* filtru ar išplėstiniu *Kalmano* filtru (angl. *Extended Kalman Filter*). Pastaraisiais metais patobulėjus mikrovaldiklių įrangai sudėtingesnės alternatyvos yra tapusios tinkamu pasirinkimu jutiklių sintezei. *Higgins* [22] pateikia išvadas, kad sudėtinis filtras yra daug paprastesnis įgyvendinimo ir skaičiavimų kiekio atžvilgiu, tačiau jo tikslumas lyginant su matematiškai pagrįstu *Kalmano* filtru išlieka neaiškus.

*Wendel* [19], *Yoo* ir *Ahn* [20] pateikia, kad tiek simuliacijose, tiek ir realaus įrenginio stebėjimo atveju lokalizacijos tikslumas yra žymiai pagerinamas naudojant *Kalmano* filtrą. Šiuose sprendimuose naudojamos bepilotės skraidyklės lokalizacijai pasitelkia GNSS ir INS sprendimus. Straipsniuose aprašomi jutikliai yra mažos kainos, todėl jie gali pasižymėti mažesniu tikslumu ar patikimumu. Laiko tarpai, kai nėra GNSS signalo yra kompensuojami navigacijai naudojant tik INS, čia GNSS signalo nebuvimas yra traktuojamas kaip nuskaitymo klaida.



1.6 pav. Duomenų apdorojimo skirtingais metodais palyginimas [20]

INS pasireiškia augančios paklaidos, todėl be periodinių korekcijų su GNSS jutiklių reikšmės per trumpą laiką tampa klaidingomis. *Yoo* ir *Ahn* [20] parodo, kad GNSS signalo tikslumas yra priklausomas nuo prie imtuvo prisijungusių palydovų skaičiaus. Kai signalo lygis suprastėja sistema teikia aukštesnį prioritetą INS duomenims, todėl bendras navigacijos duomenų tikslumas nukenčia nežymiai. Šiuo atveju įrenginys sugebėjo sėkmingai nustatyti savo buvimo vietą net ir 20 sekundžių po GNSS signalo dingimo.

*Kalmano* filtras yra suprojektuotas spręsti tiesinį modelį turinčius uždavinius. Priklausomai nuo to kokių jutiklių stebėjimas ir kokias prognozes yra norima atlikti, pamatinė sistema gali būti tiesinė ir netiesinė. Kadangi *Kalmano* filtras tinka tik tiesinėms sistemoms yra išplėtota keletas metodų ir netiesinių sistemų aproksimacijai. Pavyzdžiui, įrenginio pozicija trimatėje erdvėje seka kitą objektą toje pačioje erdvėje. Sistemos dinaminiai parametrai yra išreikšti Dekarto sistemoje (pozicija, greitis, pagreitis), dėl to yra gaunamas netiesinis sąryšis tarp matavimų ir sistemos būsenos. Įprastas *Kalmano* filtras šiuo atveju pasižymės prastai rezultatais, todėl tikslesniam netiesinių būsenos prognozių atlikimui yra tinkamesnis neskaidytas (angl. *Unscented*) *Kalmano* filtras [23]. Alternatyvus sprendimas yra nestebėti pagreičių, kurie pamatinę sistemą padaro tiesine jei remiamasi prielaida, kad pagreitis yra pastovus tam tikrame laiko intervale.

Alternatyvus filtravimo metodas, vadinamasis išplėstinis *Kalmano* filtras yra aprašytas *George* ir *Sukkarieh* [24] bei *Mao* [25], jie atkreipia dėmesį į keletą *Kalmano* filtro problemų ir pasak *Julier* ir *Uhlmann* [26] sudaro pagrindą netiesinių būsenų prognozių, navigacinių sistemų ir GPS teorijoje. Tais atvejais kai sistemos yra netiesinės galima naudoti išplėstinį *Kalmano* filtrą vietoje klasikinio *Kalman* filtro, kurio matavimų ir būsenos perėjimo modeliams yra reikalingos tiesinės lygtys. Išplėstinio *Kalman* filtro atveju modeliai privalo būti diferencijuojami, o ne tiesiniai. Išplėstinis *Kalman* filtras kiekvienoje laiko atkarpoje transformuoja netiesinius modelius į tiesines sistemas, kurios gali būti naudojamos standartiniame *Kalman* filtre, tai atliekama pritaikant Teiloro eilutės matematinę išraišką. *Gray* ir *Maybeck* [27] parodo kaip išplėstinio *Kalmano* filtro algoritmas gali būti pritaikytas integruoti GPS, barometrą, INS ir radarinį aukštmatį į vieną sistemą, kad būtų gaunamas aukšto tikslumo navigacinis sprendimas autonomiam orlaivio nusileidimui atlikti. Straipsnyje pateikiama, kad pilotuojamame orlaivyje yra naudojami brangesni, patikimi ir tikslūs jutikliai, tuo tarpu naudotose bepilotėse skraidyklėse yra sumontuoti pigūs ir triukšmingi jutikliai, kurie turi didesnes paklaidas. Ta pati jutiklių sintezės teorija taip pat gali būti pritaikyta transporto priemonės judėjimo stebėjimui tuo atveju, kai įranga yra pajėgi vykdyti išplėstinį *Kalman* filtrą pakankamai greitai, kad būtų užtikrinamas realaus laiko duomenų apdorojimas.

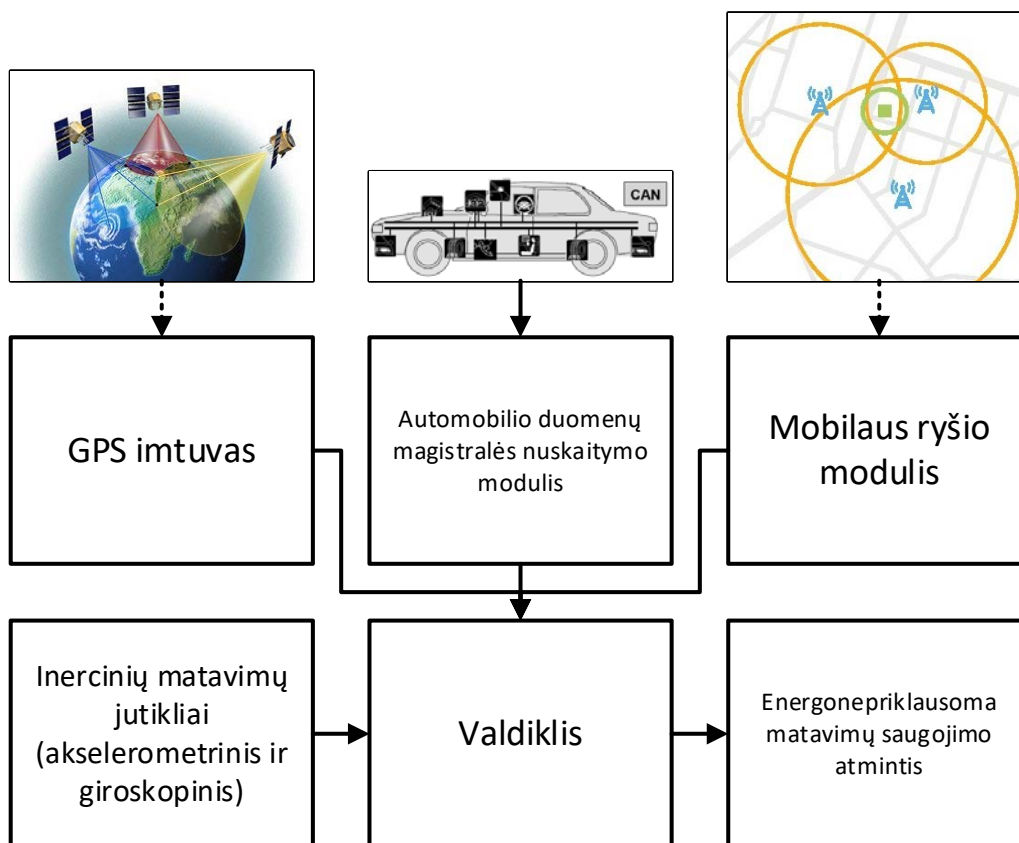
*Julier* ir *Uhlmann* [26], *Wan* ir *van der Menve* [28] aprašo alternatyvą netiesinių sistemų filtravimui - supaprastintą išplėstinio *Kalmano* filtro variantą (angl. *Unscented Kalman Filter*). Jis naudoja „bekvapės“ (angl. *unscented*) transformacijos metodą minimaliam imties taškų (sigma taškų), išsidėsčiusių apie vidurkį, parinkimui. Šie taškai yra naudojami vidurkio ir kovariacijos skaičiavimui prognozuojant sistemos būseną, tokiu būdu išvengiama Jakobi matricos skaičiavimo, reikalingo išplėstinio *Kalmano* filtro atveju. Netiesinis UKF panaudotas *St-Piere* ir *Ing* [23], *Julier* ir *Uhlmann* [26] siekiant pagerinti tikslumą navigacinėse sistemose ir yra palyginimas su (išplėstinio) *Kalmano* filtru. *St-Piere* ir *Ing* [23] teigia, kad skaičiavimo laikas naudojant UKF yra žymiai didesnis (2250% aukštesnis) nors tikslumo pagerėjimas yra nežymus esant GPS signalui bei prastesnis naudojant tik inercines matavimų sistemas. Tai prieštarauja *Wan* ir *van der Menve* [28] rezultatams, jie teigia, kad UKF yra pranašesnis už išplėstinį KF, tačiau visi laikosi bendros nuomonės, kad UKF yra lengviau įgyvendinamas nei išplėstinis KF.

## 2. Metodinė dalis

Šiame skyriuje pristatoma transporto priemonės judėjimo ir sistemos komponentų panaudojimo tyrimų atlikimo metodika, teorija, hipotezės, naudojama įranga, skaičiuojamieji modeliai ir kita. Siekiama informacijos pateikti tiek ir tokia forma, kad jos pakaktų kitam tyrėjui tokiam pačiam tyrimui atlikti ir kad ji leistų įvertinti tyrimo rezultatų patikimumą. Laikomasi principo iširti algoritmų pritaikomumą tiek nesudėtingos struktūros įrenginiams, skirtiems eismo įvykio aptikimui ar vairuotojo važiavimo kokybės įvertinimui, kurie turi GSM ryšio modulį ir pagreičio jutiklį; tiek sudėtingos struktūros įrenginiams, skirtiems papildomai atlikti važiavimo kelio korekcijos ir nuspėjimo operacijas, kurie naudoja pagalbinį giroskopinį jutiklį.

### 2.1. Matavimų sistemos maketo projektavimas ir gamyba

Remiantis iškeltais reikalavimais yra svarbu surinkti išsamią informaciją apie transporto priemonės judėjimą, kad kitame tyrimų etape būtų atsižvelgiama į galimus skirtingomis sistemomis surinktų duomenų sąryšius. Reikalingiems duomenims užfiksuoti yra tinkama 2.1 pav. pavaizduota bendrinė struktūra.

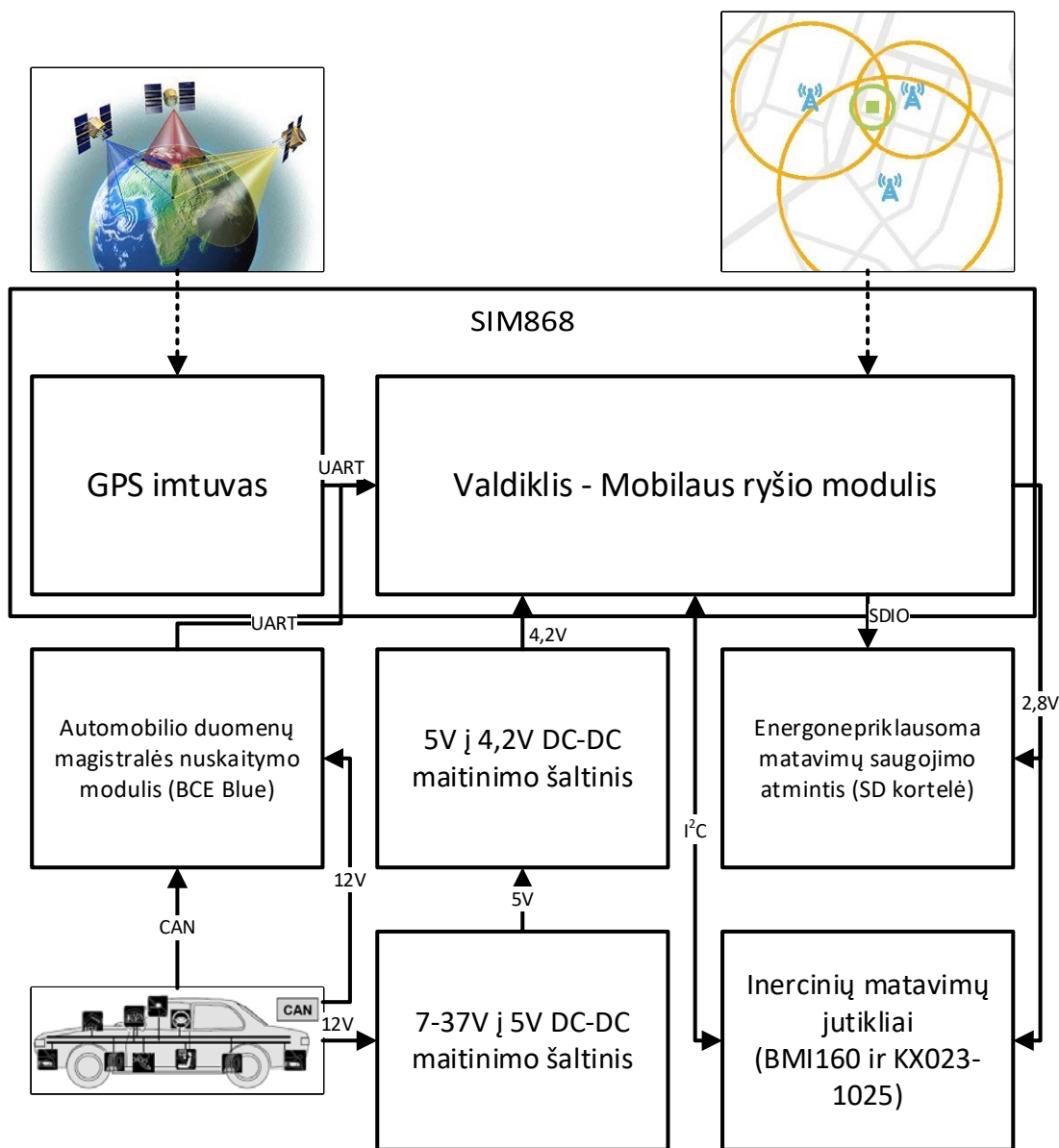


2.1 pav. Matavimų sistemos struktūra

Pagrindinę matavimų įrangą sudaro duomenų priėmimo ir perdavimo įrenginiai – mobilus ryšio modulis, GPS imtuvas, automobilio duomenų magistralės nuskaitymo įrenginys ir inercinių matavimų jutikliai. Duomenų interpretavimui ir sistemos valdymui reikalingas valdiklis, kuris informacijos saugojimui naudoja išorinę energone priklausomą atmintį.

### 2.1.1. Naudojamos įrangos struktūra.

Duomenų surinkimui naudojamas transporto priemonės sekimo įrangos maketas su papildomais jutikliais. Pagrindinės matavimų sistemos sudedamosios dalys pateikiamos 2.1 pav.



2.2 pav. Naudojamo maketo struktūrinė schema

Matavimų sistema yra paremta naujų duomenų pertraukimiais (angl. *data ready interrupt*) aktyvuotu nuskaitymu iš GPS imtuvo, mobilaus ryšio modulis, inercinių jutiklių sistemos bei automobilio duomenų magistralės nuskaitymo modulis, tokiu būdu užtikrinamas minimalus duomenų nuskaitymo vėlinimas. Įsimenamas pertraukčių aktyvacijos laikas supaprastinantis sinchronizavimą duomenų apdorojimo sistemoje. Informacija perkeliama naudojant energonepriklausomą atmintį.

### 2.1.2. Važiavimo stebėjimo sistemos makete naudojami komponentai

Koordinatinių nustatymui remiantis mobilaus ryšio stotimis reikalingas šią funkciją palaikantis GSM ryšio modulis. Matavimų sistemoje didesniai duomenų kiekiui pasiekti svarbu naudoti GPS imtuvą galintį pasiekti 10 Hz duomenų atnaujinimo dažnį. Dideliu dažniu atnaujinamų duomenų

surinkimui ir apdorojimui atlikti pasirinktas aukštą integracijos lygį turintis *SIM868*. Jį sudaro *ARM7EJ-S* branduolys, pagamintas *Mediatek* kompanijos, galintis veikti iki 260MHz dažniu. Modulyje integruotas *Mediatek MT3333* GPS imtuvas, GSM ryšio modulis ir vidinė energonepriklausoma atmintis.

Pagreičio matavimui reikalingas 16 bitų ir  $\pm 16$  g diapazoną palaikantis jutiklis, todėl pasirinkta iširti maža kaina pasižymintį *Kionix KX023-1025* akselerometrą. Siekiant įvertinti giroskopo duomenų įtaką važiavimo stebėjimo ir eismo įvykio aptikimo algoritmų rezultatams naudojama pigiausia rinkoje 16 bitų *Bosch BMI160* inercinių matavimų sistema sudaryta iš giroskopo ir akselerometro. Pigių komponentų panaudojimas leidžia gaminiam, kuriuose bus naudojami sudaryti algoritmai, pasiekti konkurencinį pranašumą sekimo įrangos rinkoje. Maketas pateikiamas 2 priede.

Automobilio duomenų magistralės (angl. *CAN bus*) nuskaitymui tinkamas iki 500 kbit/s sąsajos greitį palaikantis modulis arba įrenginys, galintis perduoti greičio ir kilometražo informaciją universalio asinchronio sąsaja (RS232, RS485) į valdiklį. Kadangi valdiklio modulis turi vidinę energonepriklausomą atmintį, visi duomenys surinkti analizavimui bus perkelti į išorinę atmintį matavimų proceso pabaigoje. Pasirinkta naudoti SD kortelę dėl patogaus prijungimo prie įvairių įrenginių.

### 2.1.3. Duomenų perdavimo sąsajų teorinio apkrovimo skaičiavimas

Tiriant skirtingo duomenų srauto įtaką sistemos veikimo spartai ir skaičiavimo rezultatams yra reikalinga patikrinti platų matavimų atlikimo dažnio intervalą. Numatyta GPS imtuvo perduodama informaciją surinkti 10 Hz dažniu per UART sąsają, inercinių matavimų sistemos – 800 Hz dažniu per I<sup>2</sup>C, transporto priemonės duomenų magistralės – 100 Hz dažniu per UART.

**2.1 lentelė.** Per vieną sekundę perduodamos informacijos skaičiavimai

Sąsaja	Informacijos kiekis per vieną periodą, b	Informacijos kiekis per vieną sekundę, kb/s	Pasirinktas sąsajos greitis, kb/s
GPS UART	2320	22,656	37,5
I <sup>2</sup> C	130	101,5625	400
CAN UART	270	26,367	37,5

Mažesnis nei maksimalus leistinas sąsajos greitis padeda sumažinti klaidingai nuskaitytų bitų skaičių. I<sup>2</sup>C srautas nurodytas naudojant tik inercinių matavimų sistemą, naudojant papildomą pagreičio jutiklį duomenų srautas yra bent 50 % didesnis. Skaičiuojant teorinį greitį atsižvelgta į siunčiamo bauto pradžios, patvirtinimo ir pabaigos bitų skaičių.

### 2.2. Judėjimą aprašantys skaičiuojamieji modeliai naudojant GPS duomenis

Šiame skyrelyje aprašomi skaičiavimai ir formulės GPS duomenų panaudojimui transporto priemonės judėjimo modelio nustatymui. Formulės ir skaičiavimai paremti sferiniu Žemės modeliu (neatsižvelgiant į elipsoidinį efektą), tačiau daugeliu atvejų paklaida tesiekia iki 0,3 % [29].

Kadangi Žemė nėra visiškai sferinė, todėl naudojant sferinę geometriją atsiranda nežymios paklaidos. Spindulys įvairiose platumos linijose yra skirtingas, pavyzdžiui: 6378 km ties pusiauju ir 6357 km ties poliais, todėl 6371 km yra dažniausiai naudojamas kaip vidutinis Žemės spindulys.

Tai reiškia, kad remiantis sferine geometrija paklaida gali siekti 0,55 % kertant pusiaują, tačiau dažniausiai yra mažiau nei 0,3 %, priklausomai nuo platumos ir judėjimo krypties. Siekiant geresnio tikslumo galima naudoti *Vincenty* formulę [29], pritaikytą atstumo skaičiavimui elipsoidės paviršiuje, su kuria pasiekiamas iki 1 mm tikslumas įveikiant 1 km atstumą. Dėl riboto resursų kiekio yra pasirinkta naudoti sferiniu Žemės modeliu pagrįstus skaičiavimus.

Trigonometrinėms funkcijoms perduodami argumentai (ilguma, platumą ir judėjimo kryptis) yra išreikšti radianais, todėl prieš skaičiavimus yra konvertuojami (radianai =  $\pi$ ·laipsniai/180). Konvertuojant radianus atgal į laipsnius (laipsniai = 180·radianai/ $\pi$ ), vakarų kryptis yra neigiamas skaičius jei naudojamas kintamasis su ženklu. Judėjimo kryptis po konvertavimo yra tarp  $-\pi$  ir  $+\pi$  [ $-180^\circ$  ir  $+180^\circ$ ], todėl atliekama papildoma operacija  $\theta = (\theta + 360) \% 360$ , čia % liekanos po dalybos skaičiavimo operatorius.

### 2.2.1. Atstumo tarp dviejų taškų Žemės paviršiuje skaičiavimas

*Haversine* formulė naudojama skaičiuojant trumpiausią atstumą apskritimo paviršiuje tarp dviejų taškų, neatsižvelgiant į kalnus.

***Haversine* formulė:**

$$a = \sin^2(\Delta\varphi/2) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2(\Delta\lambda/2) \quad (2.1)$$

$$c = 2 \cdot \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (2.2)$$

$$d = R \cdot c \quad (2.3)$$

**Sferinis kosinusų dėsnis:**

$$d = \operatorname{acos}(\sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos \Delta\lambda) \cdot R \quad (2.4)$$

Naudojant sferinį kosinusų dėsnį yra sumažinama skaičiavimų trukmė, nes naudojama 6 trigonometrinės operacijos ir nėra šaknies traukimo funkcijų, tačiau suprastėja tikslumas.

**Lygiakampė aproksimacija:**

$$x = \Delta\lambda \cdot \cos \varphi_m \quad (2.5)$$

$$y = \Delta\varphi \quad (2.6)$$

$$d = R \cdot \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (2.7)$$

Lygiakampė aproksimacija paremta Pitagoro teorema, kuri užtikrina žymiai mažesnę skaičiavimo laiką, tačiau esant didesniai atstumui tarp taškų paklaida didėja [28].

### 2.2.2. Tikslas koordinatų skaičiavimas žinant paskutinę koordinatę, atstumą ir krypties kampą

Kuomet papildomais jutikliais patikslinamas greitis, atstumas ir kiti parametrai yra naudojamos koordinatų ir judėjimo kampo skaičiavimo formulės:

$$\varphi_2 = \operatorname{asin}(\sin \varphi_1 \cdot \cos \delta + \cos \varphi_1 \cdot \sin \delta \cdot \cos \theta) \quad (2.8)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \text{atan2}(\sin \theta \cdot \sin \delta \cdot \cos \varphi_1, \cos \delta - \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2) \quad (2.9)$$

čia  $\delta$  yra kampinis atstumas  $d/R$ ;  $d$  įveiktas atstumas.

Judėjimo kampas naujame taške apskaičiuojamas suverčiant reikšmę  $((\theta + 180) \% 360)$  tarp naujo taško ir ankstesnės koordinatė.

### 2.2.3. Kinematinų parametrų skaičiavimas

Šiame skyrelyje apskaičiuoti parametrai panaudojami išvestinių kinematinų lygčių sudarymui. Kai kurių parametrų palyginimui pateikta papildoma formulė, siekiant įvertinti skaičiavimo trukmę ir gautus rezultatus. Šie išvestiniai parametrai reikalingi kaip skaičiavimų pagrindas inercinei matavimų sistemai. Šio skyrelio formulių sąrašas pateiktas 3 priedo 1-oje lentelėje.

Dalyje naudojamų formulių parametrai skaičiuojami neatsižvelgiant į sferinį Žemės modelį (laikoma, kad judama plokštuma), tai atliekama tuomet, kai pozicijos ar krypties pokyčio reikšmės yra artimos nuliui. Atlikus tyrimą pastebėta, kad santykinė paklaida nesiekia 0,1 %, kai yra naudojamas 10 Hz duomenų dažnis  $\Delta d \rightarrow 0$  ir  $\Delta \theta \rightarrow 0$ , todėl nuspręsta naudoti, mažiau skaičiavimo operacijų reikalaujančios funkcijos. Yra pasiremiama iš GPS gaunamais PDOP, HDOP ir VDOP parametrais, kurie nusako duomenų variaciją, bei palydovų skaičiumi, todėl atliekant informacijos sintezę GPS duomenims suteikiama žemesnė ar aukštesnė vertė, o tikslumą padeda išlaikyti inercinių matavimų sistemos jutikliai.

### 2.3. Judėjimą aprašantys skaičiuojamieji modeliai naudojant inercinių matavimų sistemos duomenis

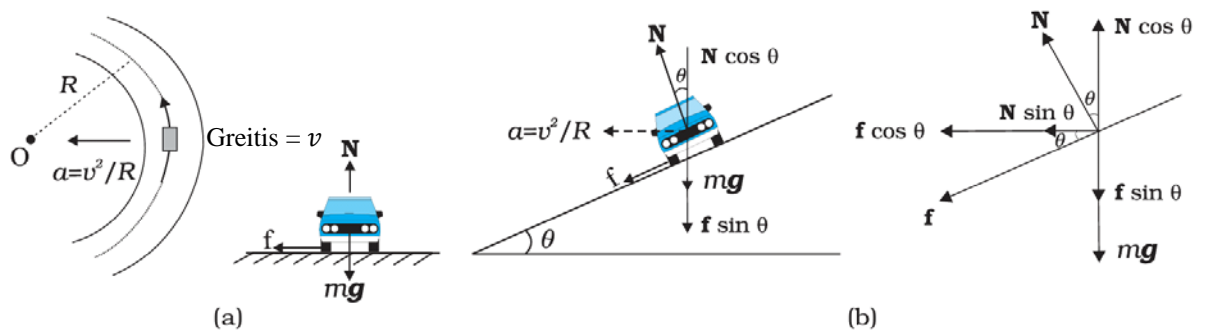
Įvertinant vairavimo kokybę ar tikslinant transporto priemonės buvimo vietą yra naudojami išvestiniai inercinių matavimų sistemos parametrai. Stabilesniems pagreičio duomenims gauti naudojamas giroskopas, kuris esant linijiniams pagreičiams gali padėti atskirti transporto priemonėje fiksuojamas vibracijas nuo judėjimo kreivaeige trajektorija, jų sąryšis pateikiamas 3 priedo 2-oje lentelėje. Skaičiavimus atliekant programine įranga laipsniai konvertuojami į radianus.

Formulės ir kintamųjų paaiškinimai pateikti 3 priedo 2-oje lentelėje. Akselerometro pagreičio duomenų drebėjimas nusako pagreičio netolygumus, tai svarbu nustatant kaip vairuotojas valdo transporto priemonę ir gali padėti nuspėti ar efektyviai greitėjama ir vairuojama. Tuo tarpu pagreičio integravimas leidžia nuspėti sekančią greičio vertę, tačiau tam reikalinga stabili greičio atskaita, pvz.: duomenys iš transporto priemonės duomenų magistralės ar filtruoti GPS duomenys.

### 2.4. GPS ir inercinių matavimų sistemas vienijantys judėjimo parametrai

Naudojantis aprašytomis formulėmis nustatomas sistemą vienijančių parametrų sąryšis, kuris yra reikalingas siekiant įvertinti įvairiais sistemos moduliais surinktų duomenų panaudojimą judėjimo trajektorijos, greičių ir pagreičių patikslinimui bei eismo įvykio nustatymui. Duomenys iš GPS yra suprojektuoti į dvi plokštumas (judėjimo krypties ir aukščio), todėl nustatyti transporto priemonės šoninį pavirtimą yra įmanoma tik naudojant papildomus jutiklius, pavyzdžiui: kuomet važiuojama posūkiu, kurio danga turi šoninį nuolydį (2.3 pav.).



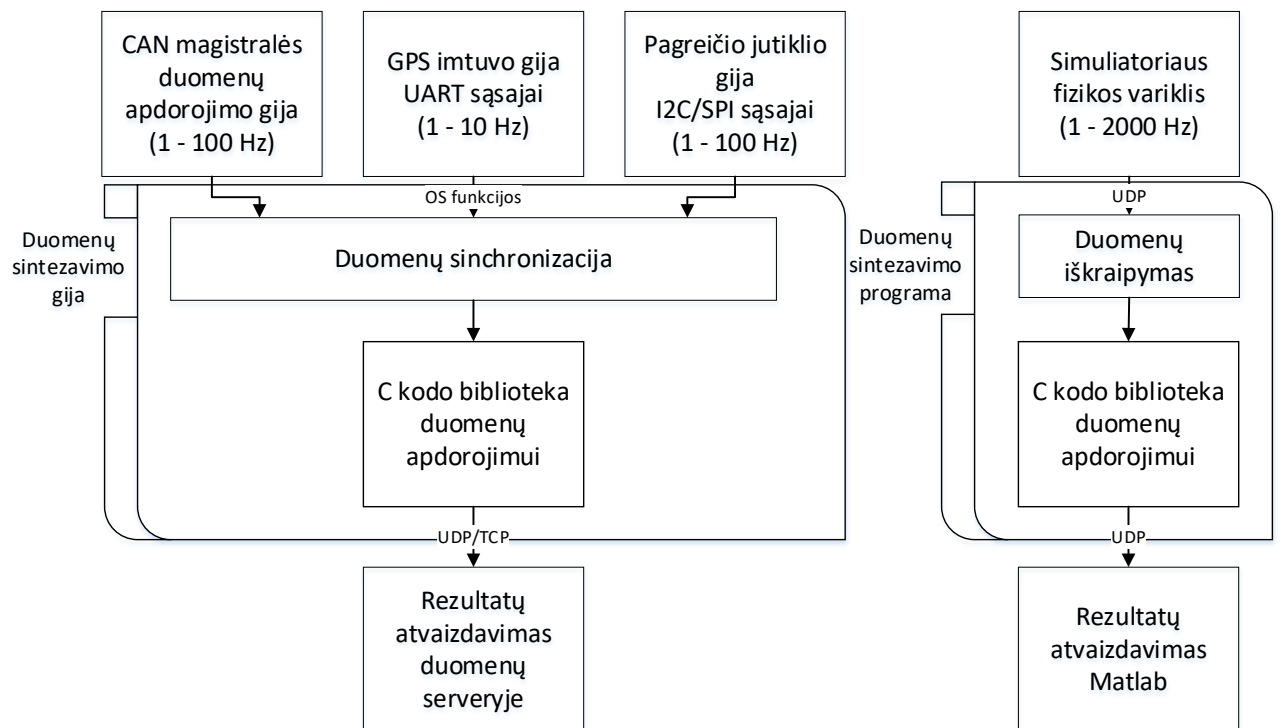


2.3 pav. Transporto priemonės judėjimas posūkyje (a) lygiu paviršiumi, (b) su šoniniu nuolydžiu

Inercinių matavimų sistema yra susieta su transporto priemonės atskaitos sistema, todėl iš GPS duomenų apskaičiuoti kinematiniai parametrai turi būti konvertuojami į transporto priemonės atskaitos sistemą. Atlikus skaičiavimus svarbu patikrinti neatitikimą tarp duomenų, kuris galėtų padėti nuspėti ar transporto priemonė virsta ar slysta. Duomenų sąryšiai randami iš 3-iaame priede pateiktų lentelių. Kadangi transporto priemonės judėjimas yra trimatis, todėl atliekant duomenų sintezę turi būti įvertintos kiekvieno parametro priklausomybės nuo kintančių dinaminių sąlygų.

## 2.5. Tyrimams naudojama programinė įranga

Algoritmų tyrimui naudojama transporto priemonės dinamines charakteristikas simuliuojanti programinė įranga *BeamNG.Drive* [8] su pažangiu fizikos varikliu. Naudojant transporto priemonės dinaminio modelio simuliaciją algoritmų derinimas ir testavimas atliekamas realiu laiku.



2.4 pav. Realios ir simuliuojamos sistemų palyginimas

Toliau pateikiami sistemų generuojamų signalų šaltiniai.

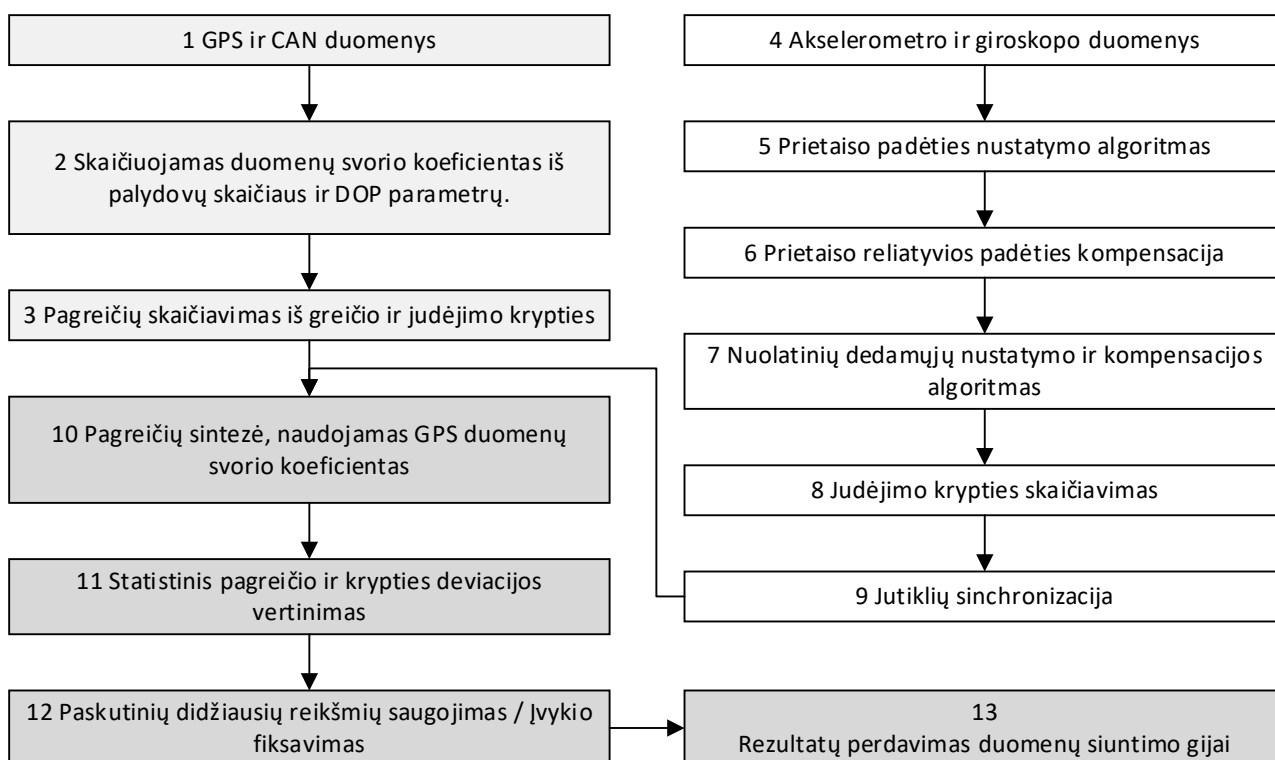
**2.5 lentelė.** Signalų šaltinių palyginimas, reali sistema ir simuliacija.

Signalai	Duomenų šaltinis, reali sistema	Duomenų šaltinis, Simuliacija
Koordinatės	GPS imtuvas	Simuliatorius, skaičiuojama iš pozicijos erdvėje
Aukštis virš jūros lygio	GPS imtuvas	Simuliatorius
Judėjimo kryptis	GPS imtuvas arba GPS koordinatės	Simuliatorius, skaičiuojama iš pozicijos erdvėje
GPS Tikslumas	GPS imtuvas	Duomenų iškraipymo sistema, remiantis matavimais
Laikas	GPS imtuvas	Simuliatorius
Greitis	GPS imtuvas, CAN	Simuliatorius
Pagreitis	Pagreičio jutiklis	Simuliatorius
Kampo kitimo greitis	Giroskopinis jutiklis	Simuliatorius

Norint realistiškai simuliuoti transporto priemonės poziciją reikalingi GPS tikslumo priklausomybės nuo nuokrypio tarp važiuojamo kelio ir GPS rodomo kelio matavimai, kurių rezultatus panaudojame triukšmo generavimui.

## 2.6. Įrenginio algoritmų funkcinė diagrama

Įvertinus apžvalginėje ir metodinėje dalyse aprašytą įrenginio struktūrą ir veikimo principus sudaryta funkcinė diagrama. Ją sudaro algoritmų blokai, kurių veikimas tiriamas 3-iame skyriuje. Skirtingomis fono spalvomis paryškinti blokai gali būti vykdomi lygiagrečiai.



**2.5 pav.** Preliminari sistemos funkcinė diagrama.

Funkcinių blokų aprašymas:

1. GPS ir CAN duomenys – 2.5 lentelėje pateikti signalai su laiko žymėmis, išreiškiami standartiniais matavimo vienetais.
2. Skaičiuojamas duomenų svorio koeficientas iš palydovų skaičiaus ir DOP parametrų – naudojamas pozicijos tikslumo skaičiavimo algoritmas, rezultatas gaunamas remiantis priklausomybe nuo palydovų skaičiaus ir DOP parametrų.
3. Pagreičių skaičiavimas iš greičio ir judėjimo krypties – pritaikant 1.5 poskyryje pateiktą medžiagą.
4. Akselerometro ir giroskopo duomenys – 2.5 lentelėje pateikti signalai su laiko žymėmis, išreiškiami standartiniais matavimo vienetais.
5. Prietaiso padėties nustatymo algoritmas – pritaikant 2.4 poskyryje pateiktą medžiagą.
6. Prietaiso reliatyvios padėties kompensacija – naudojant vektorių sąsukos algoritmus judėjimo perskaičiavimui į globalią atskaitos sistemą bei pritaikant 2.3 poskyryje pateiktą medžiagą.
7. Nuolatinių dedamųjų nustatymo ir kompensacijos algoritmas – integravus pagreičius lyginamas greitis su CAN ir GPS greičiais bei, jei naudojamas ir giroskopas, integravus kampų pokyčius lyginamas kampas su GPS imtuvo skaičiuojama judėjimo kryptimi.
8. Judėjimo krypties skaičiavimas – atliekama inercinių jutiklių sintezė pritaikant 1.6 poskyryje pateiktą medžiagą, o jei naudojamas tik pagreičio jutiklis: pritaikant 2.3 ir 2.4 poskyriuose pateiktą medžiagą.
9. Jutiklių sinchronizacija – įvertinamas matavimo laikų skirtumas tarp jutiklių kai fiksuojamas tas pats dinaminis poveikis.
10. Pagreičių sintezė, naudojamas GPS duomenų svorio koeficientas – pritaikant 1.7 ir 2.2 poskyriuose pateiktą medžiagą.
11. Statistinis pagreičio ir krypties deviacijos vertinimas – jungtinių pagreičių ir kampų pokyčių įvertinimas remiantis istorine važiavimo stebėjimo informacija, tikrinama ar fiksuojami pagreičiai ar kampo pokyčiai yra statistiškai reikšmingai didesni.
12. Paskutinių didžiausių reikšmių saugojimas / Įvykio fiksavimas – įvykio fiksavimas, jei po statistinio įvertinimo užfiksuotas neįprasto dydžio signalas, kitu atveju duomenys saugojami įprasto signalo istorijoje.
13. Rezultatų perdavimas duomenų siuntimo gijai – sistemos būseną paruošiama siuntimui į duomenų serverį.

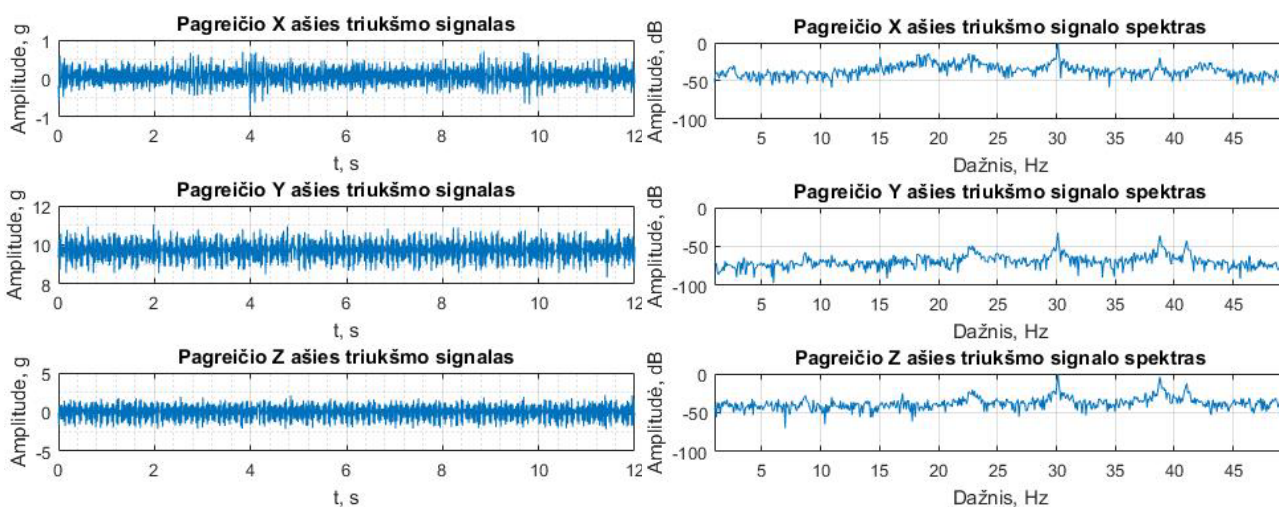
### 3. Tyrimų rezultatų dalis

Šioje dalyje atliekami svarbiausi tyrimo rezultatai, kvalifikuotai derinant aprašomąjį tekstą, lenteles ir diagramas. Nustatomi metodinėje dalyje teoriškai aprašytų fizikinių sąryšių praktiniai pritaikymo būdai. Analizuojamos problemos, su kuriomis yra susiduriama atliekant transporto priemonės eksploatacijos stebėjimą naudojant pagamintą maketą bei simuliacinio įrangą.

#### 3.1. Pagreičio jutiklio duomenų analizė

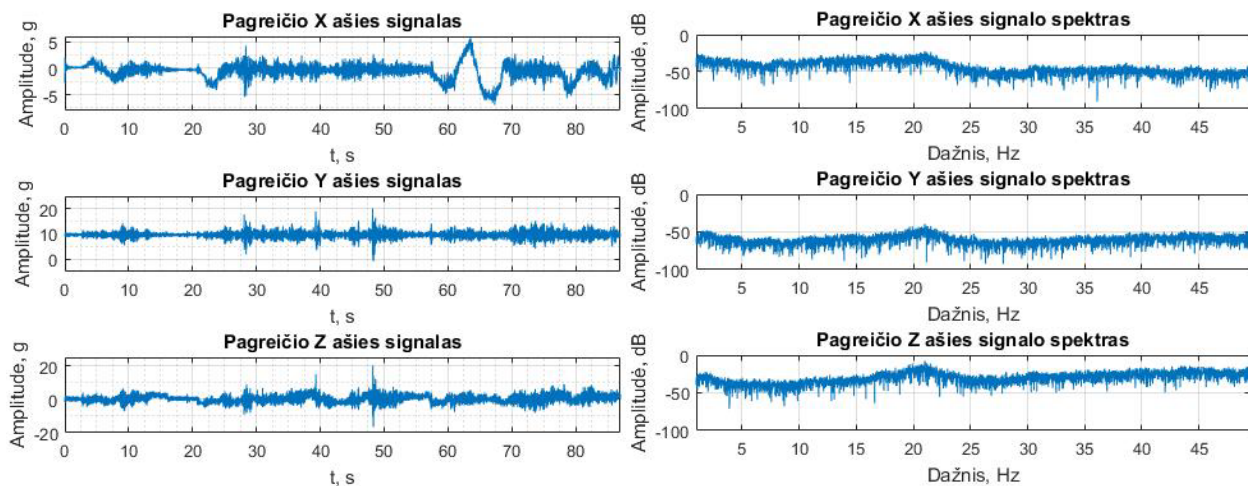
Siekiant geriau suprasti filtrų panaudojimo galimybes buvo fiksuojami transporto priemonės judėjimo metu salone patiriami pagreičiai. Visų jutiklių signalai buvo saugomi transporto priemonės judėjimo metu, buvo nustatytas 100 Hz diskretizavimo dažnis. Surinkti duomenys buvo apdoroti *MATLAB* programinės įrangos paketu siekiant nustatyti dažniausiai naudojamų filtrų savybes. Neapdoroti duomenys ir jų spektras yra pateikti 3.3 pav. Y ašis suteikia informaciją apie vertikalius pagreičius ir Žemės trauko sukeltą pagreitį, X ašis atvaizduoja pagreitį posūkiuose, Z ašis – pagreitį išilgai automobilio (stabdymo/greitėjimo pagreičius).

Gauti duomenys yra užteršti triukšmu, kuris pasižymi skirtinga amplitude priklausomai nuo to ar automobilis stovi, ar važiuoja. Iš šių duomenų yra sudėtinga nustatyti transporto priemonės eksploataavimo sąlygas ir vairavimo kokybę. Dėl šios priežasties buvo nuspręsta įvertinti variklio keliamų vibracijų poveikį matavimams (3.1 pav.).

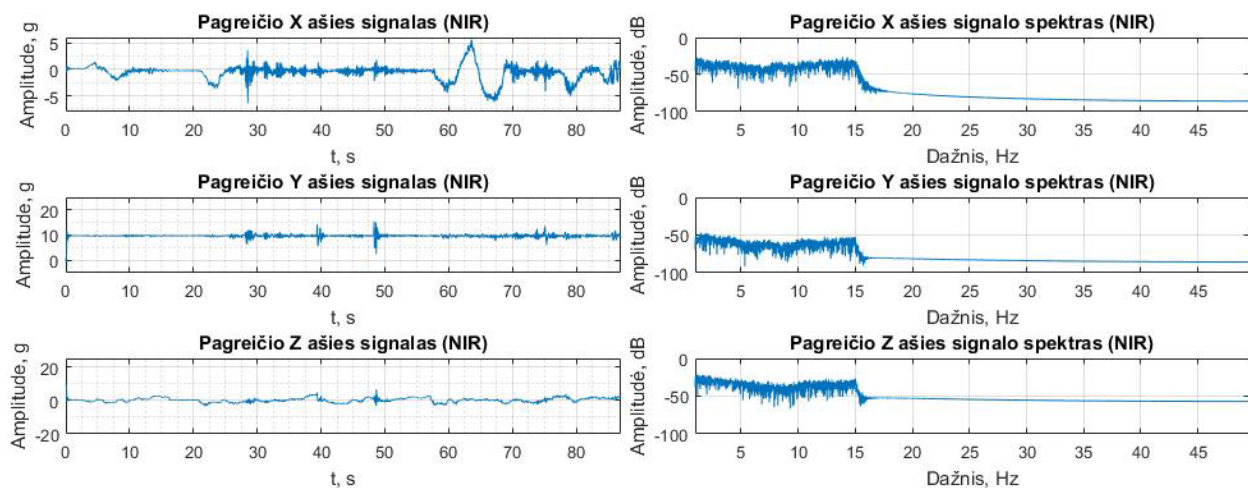


3.1 pav. Užfiksuotas variklio triukšmas nejudant

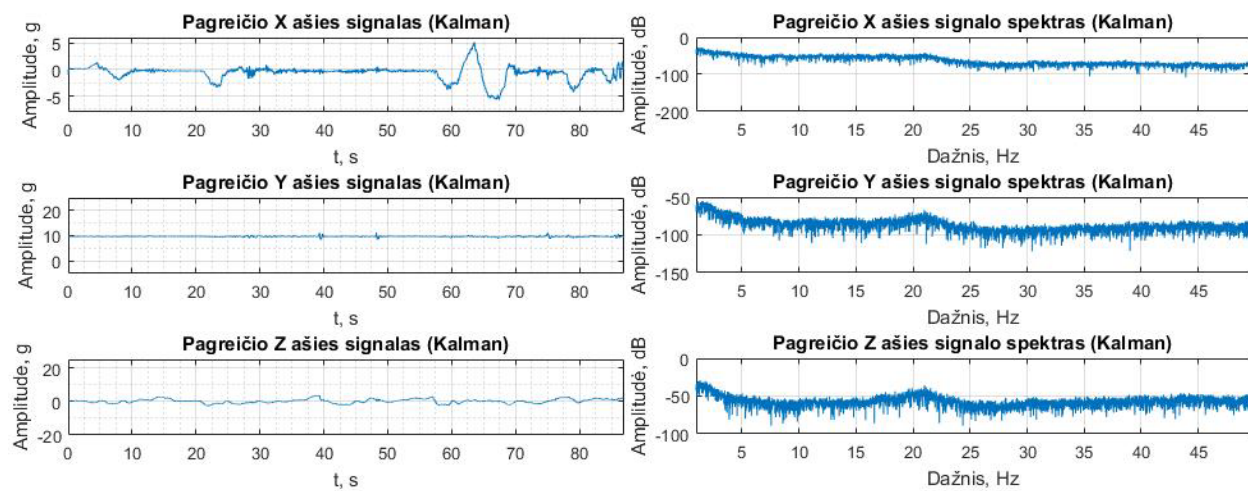
Atlikus signalo spektrinę analizę yra nustatomos pagrindinės triukšmo dedamosios. X ašyje 18, 23, 30, 38 Hz, Y ašyje 23, 30, 38, 41 Hz, Z ašyje 23, 30, 38, 41 Hz. Užfiksuotas triukšmas skirtingose ašyse yra išsidėstęs panašiai, todėl pasirinkta taikyti filtrus su tais pačiais parametrais. Yra tikėtina, kad didelė dalis triukšmo yra sukeliama variklio vibracijų, todėl buvo paskaičiuotas kuro mišinio degimo dažnis. Šiuo atveju variklis yra 4 cilindrų, todėl per vieną veleno apsisukimą įvyksta 2 uždegimai. Laisvoje eigoje įprastinis dyzelinio variklio velenas apsisuka nuo 540 kartų per minutę (9 kartai per sekundę). Todėl per sekundę įvyksta bent 18 uždegimų, kurie sukelia žymias vibracijas. Šis dažnis atitinka vieną iš užfiksuotų triukšmo signalų, todėl jis bus naudojamas neribotos impulsinės reakcijos filtro projektavimo metu.



3.2 pav. Užfiksuoti pagreičiai važiuojant



3.3 pav. NIR filtru apdoroti duomenys



3.4 pav. Kalman filtru apdoroti duomenys

### 3.1.1. Žemų dažnių neribotos impulsinės reakcijos filtras

Tiriamu atveju buvo naudojamas 7 eilės filtras. Atskirai išanalizavus triukšmo signalą buvo pastebėtas amplitudžių didėjimas nuo 18 Hz, todėl parinktas filtras su šiais parametrais:  $F_p = 15$  Hz,  $F_s = 17$  Hz,  $A_p = 1$  dB,  $A_s = 50$  dB. Filtravimo rezultatai pateikiami 3.3 pav.

Filtro išėjimo signalė pastebimi žemo dažnio triukšmo sukelti iškraipymai, tačiau išlieka informacija apie stiprius pagreičio šuolius pervažiuojant per greičio ribojimo kalnelius. Filtruoto signalo spektrinė diagrama atskleidžia, kad filtras veikia pagal nustatytus parametrus.

### 3.1.2. Kalman filtras

Šis filtras remiasi signalo dispersija, todėl filtro koeficientams panaudotos turimo signalo ir variklio triukšmo signalų dispersijos. Filtro klaidos koeficientai yra pastoviai perskaičiuojami trumpais aritmetiniais veiksmis. Filtravimo rezultatai pateikiami 3.4 pav.

Kadangi tiriamu atveju triukšmo variacija nėra pastovi, *Kalman* filtrą galima pritaikyti apdoroti signalą pagal paskutinių signalo reikšmių savybes, tokiu būdu išgaunant geresnį išėjimo signalo filtravimo rezultatą. Dėl to pasiekiamas geresnis skaičiavimo resursų panaudojimas. Išėjimo signalo spektriniame grafike galima pastebėti, jog yra pasiekiamas geros plačiajuosčio triukšmo slopinimo savybės.

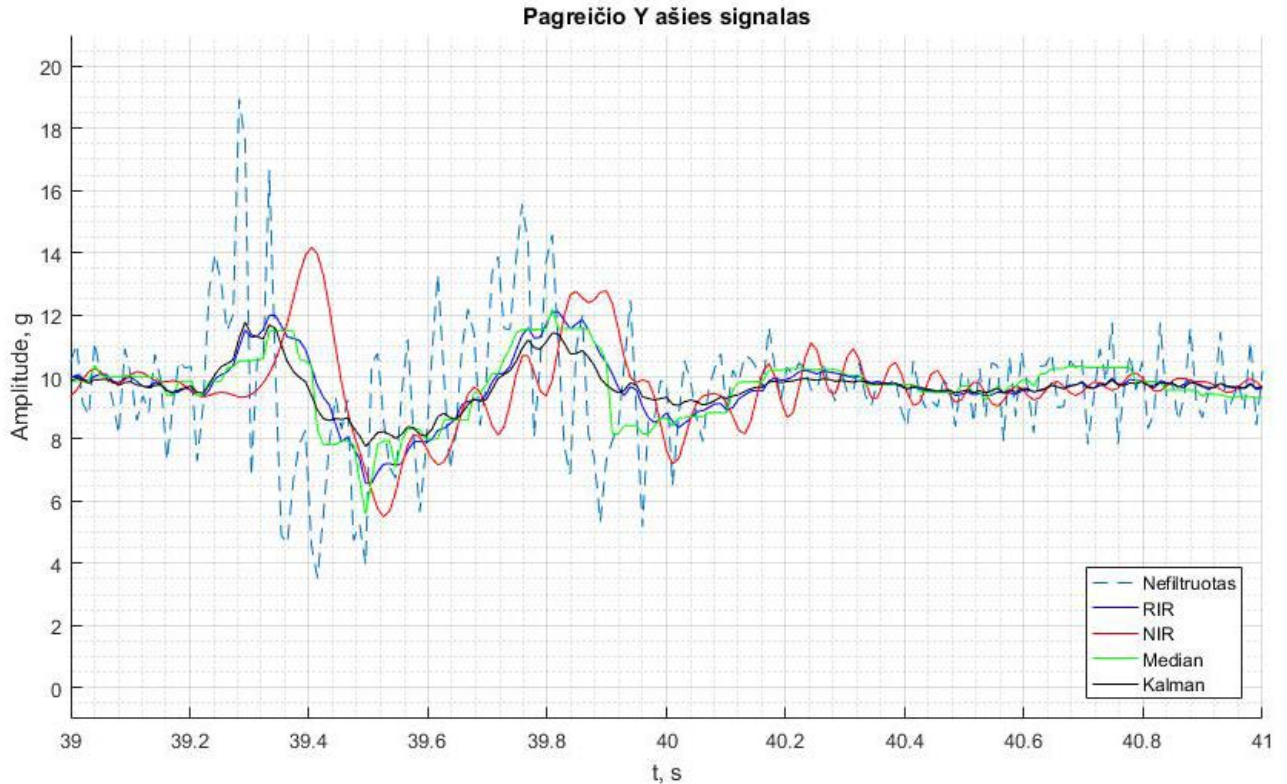
Vienetinio impulso signalas apdorotas *Kalman* filtru pasižymi staigiu atsaku, kurio amplitudė kinta pagal eksponentinį dėsnį. Šiuo atveju filtras veikia kaip pirmos eilės RIR filtras su kintamais koeficientais. Realiomis sąlygomis koeficientai yra nuolat perskaičiuojami priklausomai nuo signalo variacijos. Atsakas į vienetinį šuolį yra staigus, tačiau dėl naudojamo algoritmo laikui bėgant nuslopsta ir nusistovi ties įėjimo signalo lygiu.

### 3.1.3. Rezultatų palyginimas

Nesudėtingus filtras buvo siekiama pritaikyti ribotus resursus turinčiai sistemai, siekiant gautus filtro išėjimo duomenis panaudoti vairavimo kokybės nustatymui. Toliau pavaizduotame grafike (3.5 pav.) matomas triukšmais užterštos informacijos apdorojimo rezultatas visais filtrais.

Šiuo atveju *Kalman* filtras pasižymi greitu atsistatymu po staigaus pagreičio pokyčio, ši savybė gali būti pritaikoma ekrano pavertimo algoritmui, kai yra svarbu greitai nustatyti telefono pozicijos erdvėje pasikeitimą. Tuo tarpu neribotos impulsinės reakcijos filtras tiksliausiai atkartoja informaciją perduodančios atkarpos formą, tačiau įneša didžiausią vėlinimą iš tiriamų filtrų.

Apdorojant stabdymo metu užfiksuotus pagreičius didžiausiu išėjimo signalo netolygumu pasižymėjo medianos filtras. Kiti filtrai atitinka anksčiau pastebėtas savybes.



**3.5 pav.** Y ašies (lygiagrečios važiavimo kryptiai) signalo atkarpa pervažiuojant greičio ribojimo kalnelį

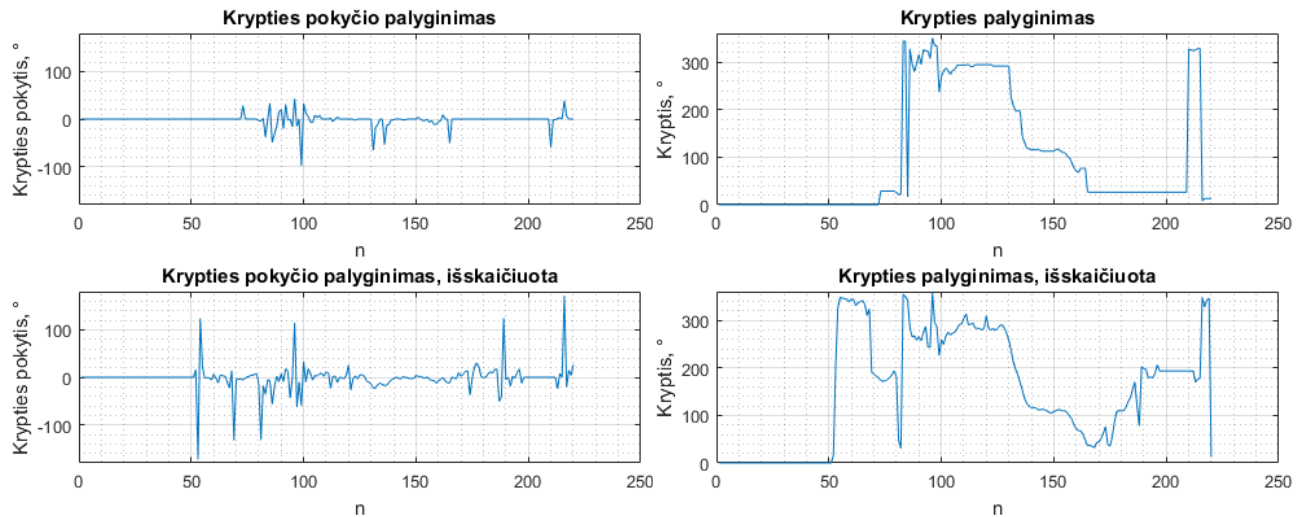
Filtravimo algoritmų eilė buvo pasirinkta taip, kad rezultatus atvaizduojant grafiškai būtų gaunama kuo panašesnė signalo forma. Dėl to nereikia papildomai derinti po filtravimo vykdomų algoritmų.

### 3.2. Prietaiso padėties nustatymo algoritmo tyrimas

Nustatytas sąryšis tarp iš GPS duomenų (greičio ir judėjimo krypties) išskaičiuotų pagreičių (*Mediatek* imtuvas) ir iš pagreičio jutikliu (*Bosch BMI160*) išmatuotų pagreičių. Pritaikomas kros-koreliacijos skaičiavimo algoritmas, kompensuojamas vėlinimas tarp jutiklių, lyginami pagreičio vektoriaus modulių maksimumai. Naudojant signalų kros-koreliacijos skaičiavimo funkcijas užfiksuotas 90-99% amplitudės atitikimas tarp GPS imtuvo ir pagreičio jutikliu išmatuotų reikšmių stipriai stabdant automobilį. Pagreičių iš GPS duomenų skaičiavimo algoritmas pateiktas 4-ame priede.

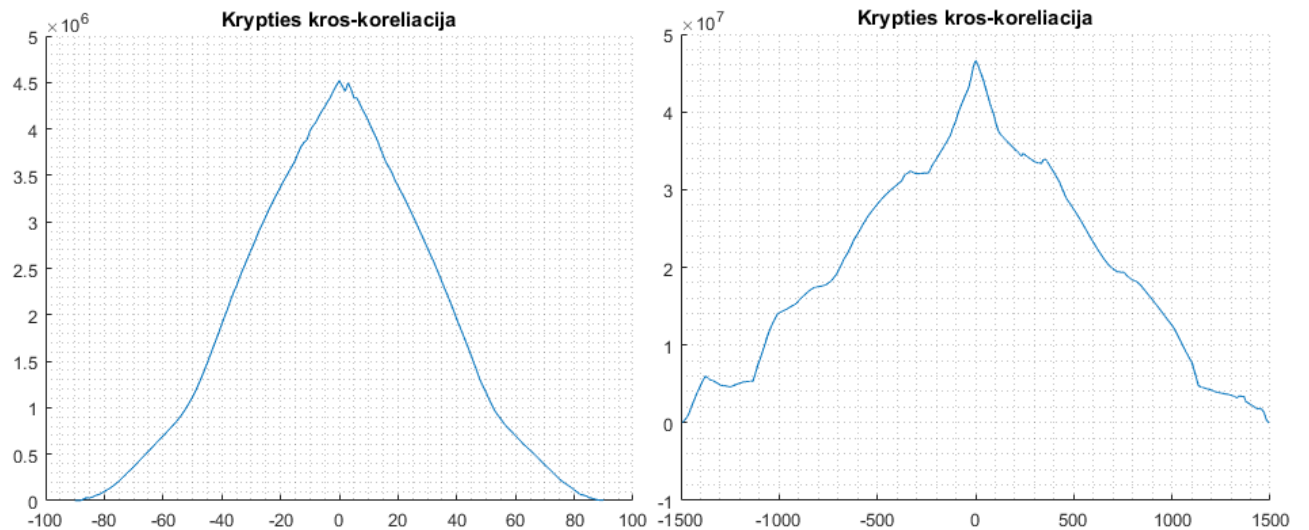
### 3.3. GPS duomenų skaičiavimo metodikos palyginimas

Kaip aprašyta anksčiau, transporto priemonės greitį ir judėjimo kryptį galima paskaičiuoti iš GPS fiksuojamos pozicijos pasikeitimo. Siekiama nustatyti ar vidinis šiuos parametrus skaičiuojantis GPS imtuvo algoritmas vėlina duomenis lyginant su išskaičiuotomis reikšmėmis. Pastebėta, kad dėl mažos koordinatų skiriamosios gebos, apribotos fiksuoto kabelio formatu NMEA protokole (angl. *Fixed-point format*), apskaičiuojami didesni krypties ir greičio pokyčiai nei gaunami iš imtuvo.



3.6 pav. 1 Hz dažniu surinktų duomenų palyginimas

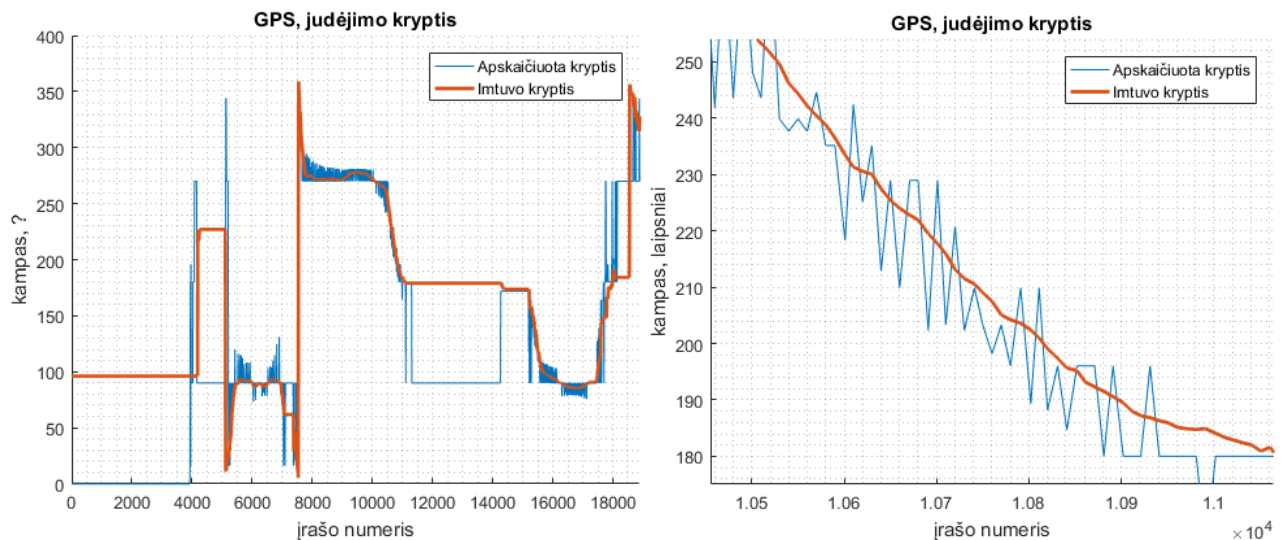
Tuo tarpu duomenų vėlinimas nepasireiškė, apskaičiuotas 0 taškų vėlinimas, kai duomenys diskretizuojami 1 Hz ir 10 Hz dažniu.



3.7 pav. Lyginamų duomenų kros-koreliacijos skaičiavimo rezultatai (1 Hz ir 10 Hz)

Kairėje esančiame paveikslėlyje matomas antras maksimumas. Abejais atvejais buvo naudojamas tas pats algoritmas (pagal 2.2 poskyryje pateiktas formules), todėl daroma prielaida, kad tam įtakos turėjo vidiniai GPS algoritmai, kadangi analizuojant duomenis surinktus 10 Hz dažniu buvo tik vienas aiškiai išreikštas maksimumas.





**3.8 pav.** Skaičiavimų metodu gautos ir imtuvo siunčiamos judėjimo krypties palyginimas

Didinant dažnį stipriau pasireiškė koordinatinių skiriamosios gebos trūkumas. Atlikus papildomą tyrimą nustatyta, kad mažiausias atstumo žingsnis yra apytiksliai 1,85 m. Šį žingsnį lemia mažas *Mediatek* imtuvo siunčiamos NMEA standarto koordinatės simbolių po kablelio skaičius – 3 simboliai:  $\$GPGGA,181009.485,5230.591,N,01322.850,E,1,12,1.0,0.0,M,0.0,M,,*60$ .

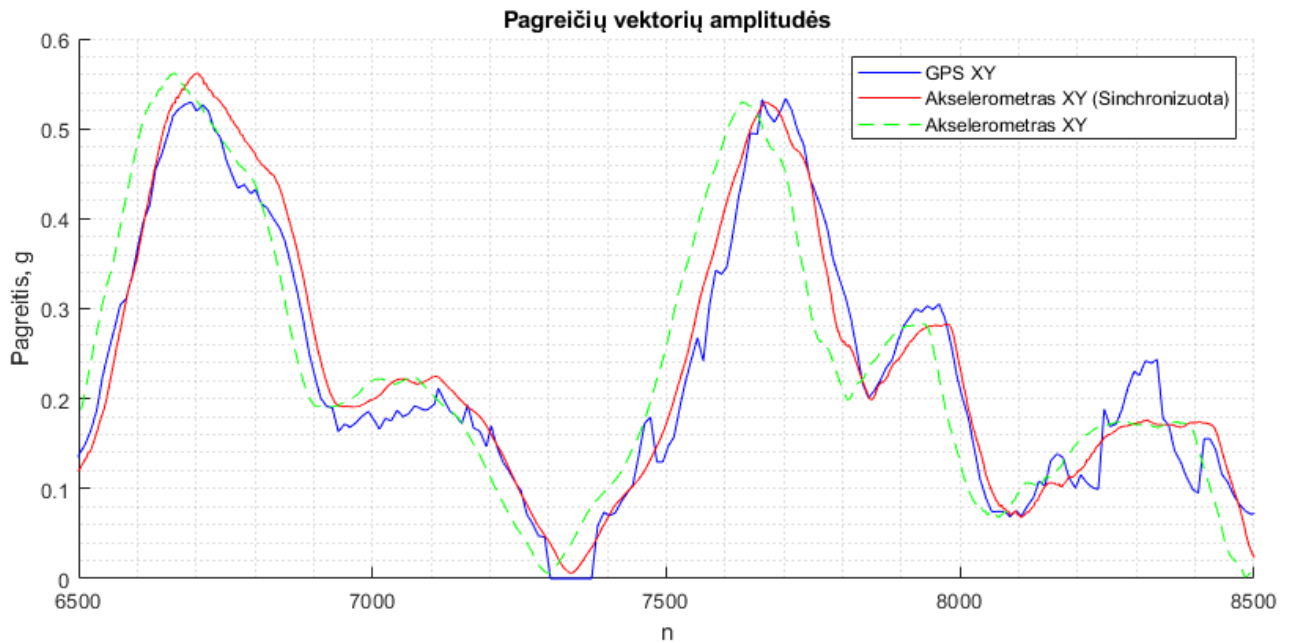


**3.9 pav.** Pozicijos šuoliai dėl mažos skiriamosios gebos

Taip pat buvo patikrintas *uBlox EVA M8M* GPS imtuvo mažiausias atstumo žingsnis – dėl 5 simboliais po kablelio siunčiamos koordinatės atstumo žingsnis yra apytiksliai 1,85 cm. Todėl naudojant iš koordinatinių išskaičiuotą judėjimo kryptį būtų reikalingas papildomas filtravimas duomenims iš turimo *Mediatek* imtuvo. Nuspręsta visuose algoritmuose naudoti imtuvo siunčiamą judėjimo krypties signalą.

### 3.4. Jutiklių duomenų sinchronizacijos tyrimas

Nustatytas iš GPS duomenų (greičio ir judėjimo krypties) išskaičiuotas vėlinimas (*Mediatek* imtuvas) lyginant su pagreičio jutikliu (*Bosch BMI160*). Rezultatas:  $130 \pm 5$  ms. Pritaikomas kros-koreliacijos skaičiavimo algoritmas, lyginami pagreičio vektoriaus modulių maksimumai.



**3.10 pav.** Sinchronizuotų bei kalibruotų GPS ir akselerometro pagreičio vektorių modulių palyginimas

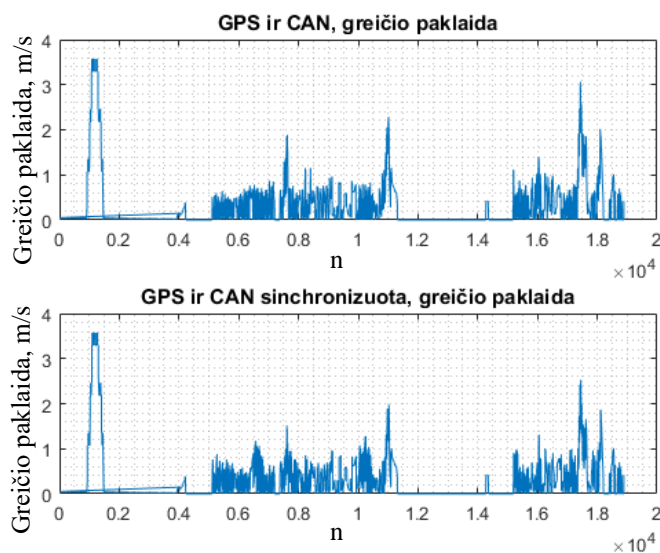
Paveiksle pavaizduoti signalai yra filtruoti slenkančio vidurkio filtru, kurio dydis parinktas taip, kad būtų apdorojami per 1 sekundę surinkti duomenys. Rezultatas rodo, jog sinchronizuoti jutiklių signalai yra panašūs, t. y. skirtingos matavimų sistemos suteikia informacijos apie tuos pačius dinaminis poveikius, todėl nustatant neatsargų vairavimą ar eismo įvykį galima pasikliauti ne tik pagreičio jutiklio signalu.

Taip pat atlikti posūkio kampo bei greičio vėlinimo skaičiavimai, atitinkamai vėlinimas  $130 \pm 5$  ms ir  $300 \pm 50$  ms. Pagal nustatytą vėlinimą kompensuojamas signalas ir atliekami užfiksuotų signalų absoliutinės paklaidos skaičiavimai siekiant nustatyti ar pirminė paklaida yra dėl sinchronizacijos trūkumo.

**3.1 lentelė.** Absoliutinės paklaidos skaičiavimo rezultatas.

Jutkliais užfiksuotų reikšmių skirtumo palyginimas	Absoliutinė paklaida prieš sinchronizaciją		Absoliutinė paklaida po sinchronizacijos	
	Vidurkis	Variacija	Vidurkis	Variacija
GPS ir CAN greitis	0.30 m/s	0.28 m/s	0.29 m/s	0.26 m/s
GPS ir giroskopo posūkio kampas	0.51 °/s	2.38 °/s	0.53 °/s	2.31 °/s

Sinchronizavus pagal maksimalias kros-koreliacijos reikšmes išliko panašus nuokrypis tarp jutiklių. Tikėtina, kad paklaida kyla ne dėl sinchronizacijos trūkumo, o dėl nepastovaus duomenų matavimo periodo. Esant ribotiems resursams pageidautina naudoti tą pačią kompensacijos konstantą vienos aparatinės įrangos versijos gaminiams, kadangi skaičiavimai reikalauja plataus duomenų masyvo, o nauda nėra pastebima.



**3.11 pav.** Sinchronizacijos rezultatas atvaizduojant greičio paklaidą grafiškai.

Atvaizdavus signalus pastebimas bendro paklaidos lygio sumažėjimas.

### 3.5. Pagreičio jutiklio savybių parinkimo tyrimas

Praktiškai patikrinama eismo įvykio nustatymui reikalingų pagreičio jutiklio savybių įtaka (diapazonas, rezoliucija, dažnis). Jutiklių duomenis iš simulatoriaus surinkus 2000 Hz dažniu naudojant P3.1 pateiktą algoritmą nustatomas transporto priemonės sustojimo laikas, kai yra staigiai stabdoma bei įvyksta smūgis į sieną statmenai. Staigaus stabdymo metu užfiksuotas  $9,27 \text{ m/s}^2$  ( $0,95 \text{ g}$ ) vidutinis ir  $36,34 \text{ m/s}^2$  ( $3,7 \text{ g}$ ) maksimalus momentinis (vieno matavimo) lėtėjimo pagreitis transporto priemonėje sveriančioje 1,5 t.

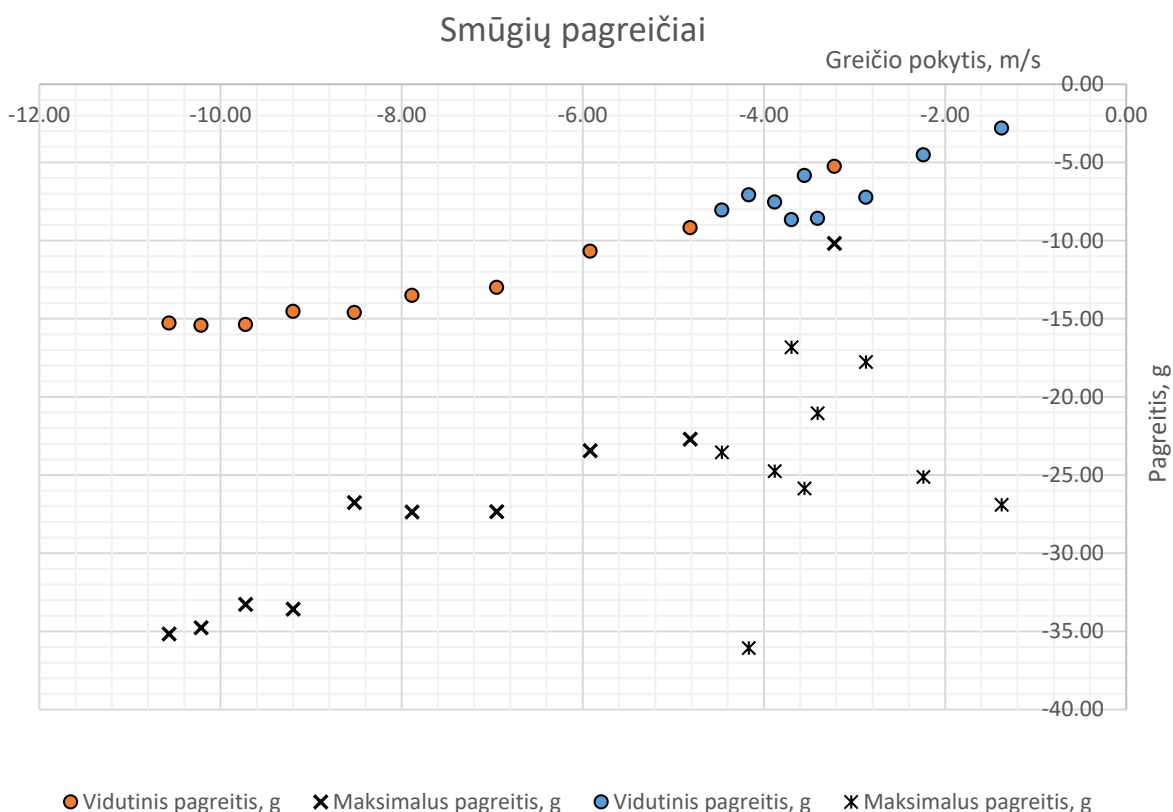
**3.2 lentelė.** Lengvojoje transporto priemonėje smūgio metu fiksuojami pagreičiai.

Matavimas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Laiko langas, s	0.0625	0.0535	0.0565	0.0545	0.0595	0.0595	0.0645	0.0645	0.0675	0.0705
Greičio pokytis, m/s	-3.22	-4.81	-5.92	-6.95	-7.88	-8.52	-9.20	-9.72	-10.21	-10.57
Vidutinis pagreitis, $\text{m/s}^2$	-51.54	-89.98	-104.73	-127.52	-132.51	-143.21	-142.58	-150.74	-151.30	-149.89
Vidutinis pagreitis, g	-5.25	-9.17	-10.68	-13.00	-13.51	-14.60	-14.53	-15.37	-15.42	-15.28
Maksimalus pagreitis, $\text{m/s}^2$	-99.87	-222.73	-229.88	-268.24	-268.44	-262.50	-329.34	-326.39	-341.04	-344.90
Maksimalus pagreitis, g	-10.18	-22.70	-23.43	-27.34	-27.36	-26.76	-33.57	-33.27	-34.76	-35.16
Reikalingas matavimų dažnis, Hz	32.0	37.4	35.4	36.7	33.6	33.6	31.0	31.0	29.6	28.4

Staigaus stabdymo metu užfiksuotas  $5,05 \text{ m/s}^2$  ( $0,52 \text{ g}$ ) vidutinis ir  $359.95 \text{ m/s}^2$  ( $36,69 \text{ g}$ ) maksimalus momentinis (vieno matavimo) lėtėjimo pagreitis transporto priemonėje sveriančioje  $40 \text{ t}$  – sunkvežimis su pakrauta priekaba ir stabdžių antiblokavimo sistema.

**3.3 lentelė.** Krovininėje transporto priemonėje smūgio metu fiksuojami pagreičiai.

Matavimas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Laiko langas, s	0.0500	0.0505	0.0405	0.0405	0.0620	0.0435	0.0525	0.0600	0.0565
Greičio pokytis, m/s	-1.37	-2.24	-2.87	-3.41	-3.55	-3.70	-3.88	-4.17	-4.46
Vidutinis pagreitis, $\text{m/s}^2$	-27.50	-44.33	-70.95	-84.14	-57.29	-84.95	-73.91	-69.44	-78.99
Vidutinis pagreitis, g	-2.80	-4.52	-7.23	-8.58	-5.84	-8.66	-7.53	-7.08	-8.05
Maksimalus pagreitis, $\text{m/s}^2$	-263.87	-246.37	-174.27	-206.39	-253.59	-165.03	-242.75	-353.84	-230.92
Maksimalus pagreitis, g	-26.90	-25.11	-17.76	-21.04	-25.85	-16.82	-24.75	-36.07	-23.54
Reikalingas matavimų dažnis, Hz	40.0	39.6	49.4	49.4	32.3	46.0	38.1	33.3	35.4



**3.12 pav.** Skirtinguose automobiliuose fiksuojamų pagreičiai esant tam tikro greičio pokyčiui

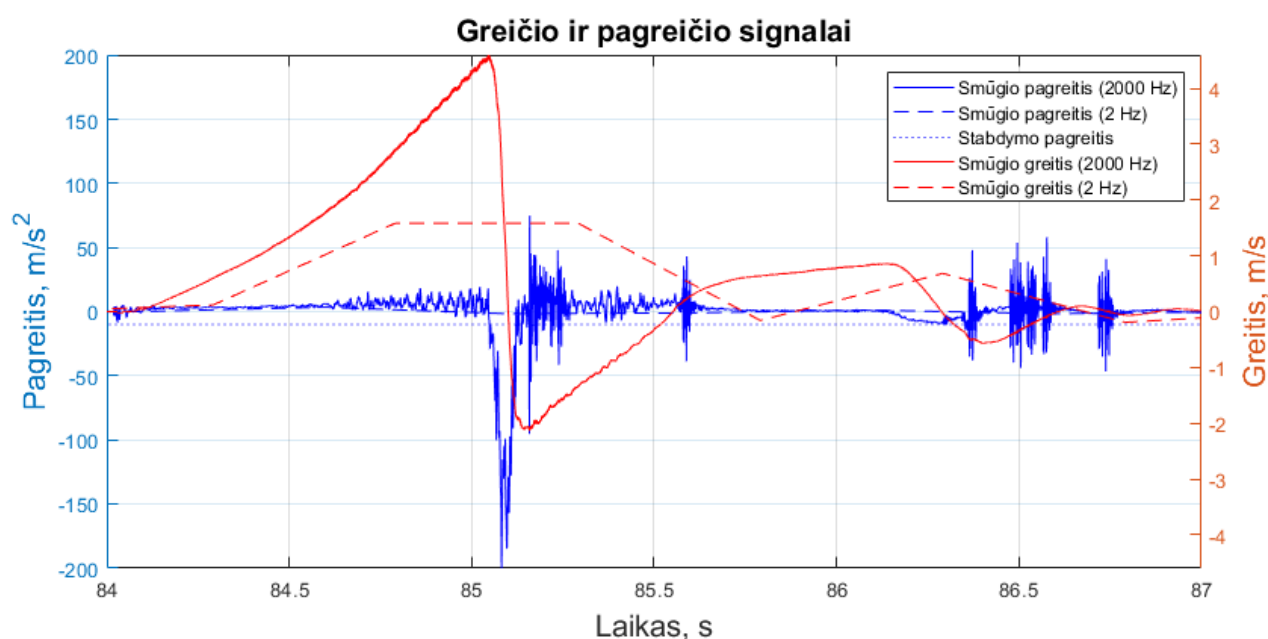
● ir ✕ – lengvojoje transporto priemonėje užfiksuoti pagreičiai.

● ir ✕ – krovininėje transporto priemonėje užfiksuoti pagreičiai.

Pastebėta smūgio trukmės priklausomybė nuo greičio, t. y. važiuojant didesniu greičiu energija išsklaidoma per ilgesnį laiko tarpą. Nustatytas didžiausias reikalingas matavimų dažnis yra 50 Hz, gautas invertuojant trukmę ir padauginant iš dviejų, kad išvengti diskretizavimo metu atsirandančių paklaidų (angl. *aliasing*).

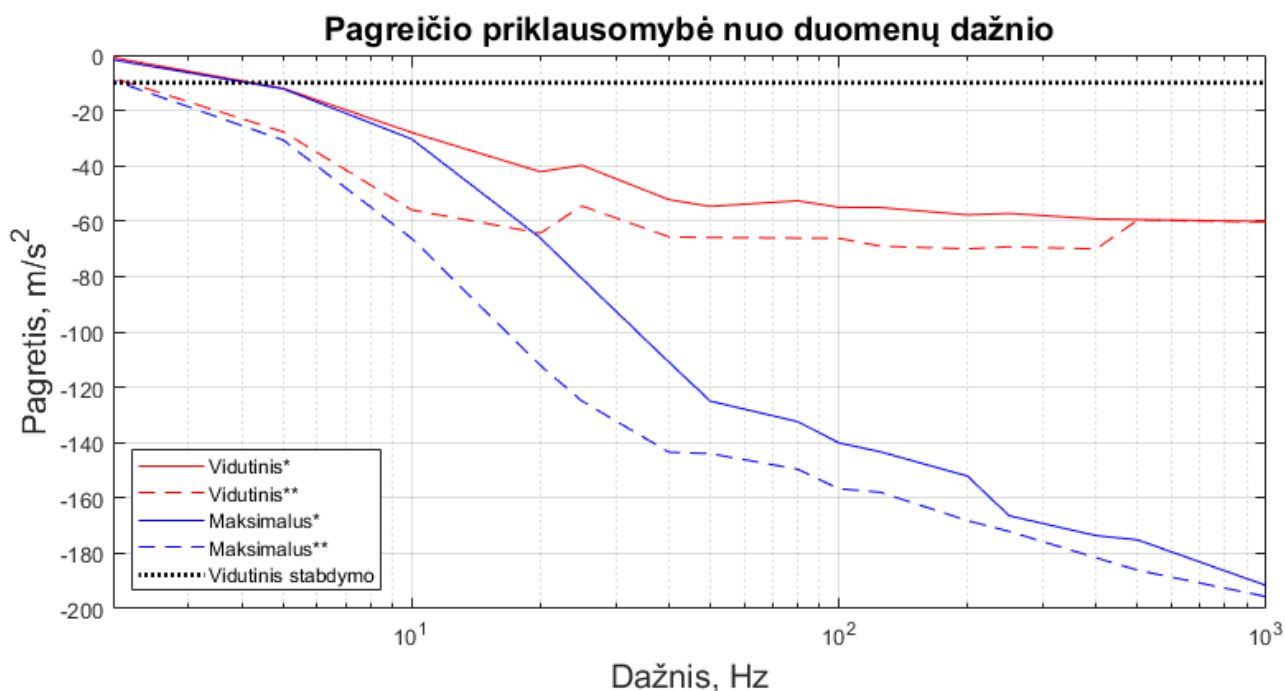
Pasiekus kiekvienai transporto priemonei skirtingą greitį išmatuotas pagreitis didėja netiesiškai, kadangi pasiekama pakankamo dydžio jėga dėl kurios yra gniuždoma konstrukcija ir ilgėja smūgio laikas. Todėl reikalingas matavimų dažnis mažėja didėjant greičiui.

Lentelėse paryškinti laukai rodo, kad momentinio pagreičio vertė viršija dažniausiai sutinkamą pagreičio jutiklių matavimų diapazoną. Viršijus leistinas ribas signalas bus užribotas – esant stipriam smūgiui bus rodomas mažesnis pagreitis. *Bosch* deklaruoja, kad makete naudojamas *BMI160* turėtų nesugesti 1 milisekundę veikiamas 2000 g pagreičio.



**3.13 pav.** Greičio ir pagreičio signalų palyginimas stipriai sumažinus dažnį

Atliktas tyrimas siekiant nustatyti diskretizavimo vėlinimo įtaką kai keičiamas duomenų dažnis. Matuojant mažesniu dažniu atskaitos gali būti paaimamos tuo metu, kai greitis dėl smūgio jau yra sumažėjęs, todėl neužfiksuojamas tikrasis greičio pokytis bei pagreitis. Tyrimui naudojami 2000 Hz surinkti duomenys kai transporto priemonė įsibėgėja iki 4,5 m/s, trenkiasi į sieną ir atšokusi sustoja. Apdorojimas atliktas naudojant *Matlab*, pagrindinės funkcijos pateiktos 6 priede. Mažinant dažnį skaičiuojami vidurkiai, diskretizavimo vėlinimas nusako, kad pradinė vidurkių masyvų reikšmė yra naudojama vėlesnė nei prieš tai perskaičiuojant duomenis tuo dažniu. Taip gaunami nauji signalai, iš kurių vieni užfiksuoja didesnius, o kiti mažesnius pagreičius. Naudojant papildomus metodus atrenkamos silpniausius ir stipriausiu pagreičius užfiksavusios sekos, jų reikšmės tam tikruose dažniuose pateikiamos 3.14 pav.



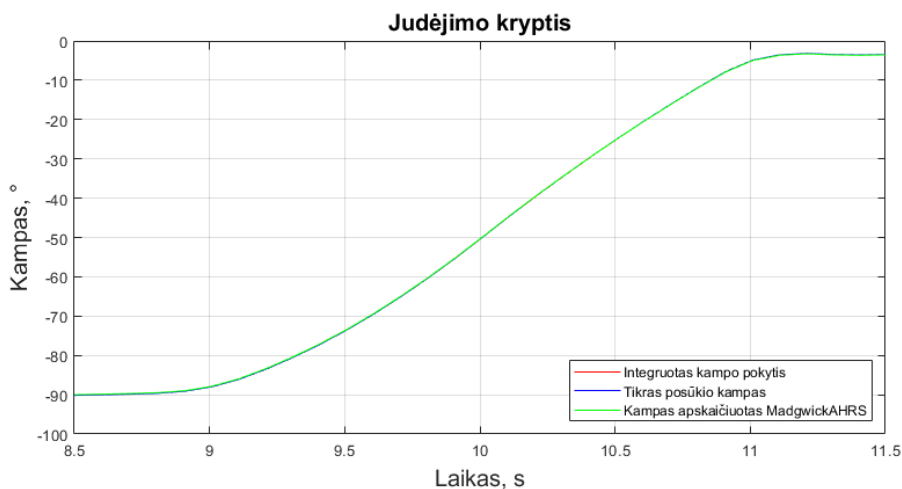
3.14 pav. Fiksuojamų pagreičių vertės prie skirtingo duomenų dažnio

\*Silpniausias pagreitis iš visų tuo dažniu fiksuojamų esant skirtingiems diskretizavimo vėlinimams.  
 \*\*Didžiausias pagreitis iš visų tuo dažniu fiksuojamų esant skirtingiems diskretizavimo vėlinimams.

Duomenis diskretizuojant dažniu tarp 20 ir 400 Hz apskaičiuojamas didesnis vidutinis pagreitis, nes smūgis fiksuojamas mažesniame laiko intervale, kai greičio gradientas yra didžiausias. Smūgio pradžioje greitis mažėja lėtai – slegiamos minkštos plastikinės detalės. Mažiausias dažnis kuomet stabdymą galima atskirti nuo smūgio prie šio greičio yra 5 Hz.

### 3.6. Jutiklių sintezės algoritmo tyrimas

Naudojant simulatoriumi surinktus duomenis palyginamas pasukimo kampas erdvėje su integruotu kampu iš giroskopo ir iš akcelerometro ir giroskopo sintezės algoritmo gautu kampu.

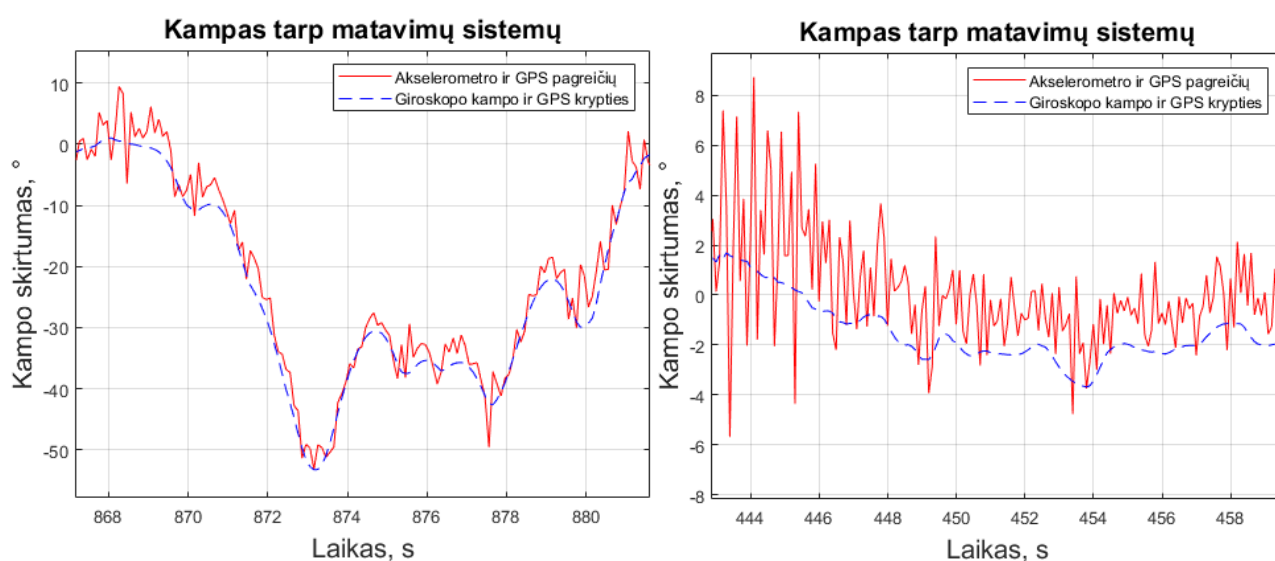


3.15 pav. Skirtingais metodais apskaičiuota judėjimo kryptis

Apskaičiuota vidutinė absoliutinė paklaida 1.2 % tarp *MadgwickAHRS* ir tikro posūkio kampo. Naudojamos *Matlab* funkcijos pateiktos 7 priede. Pritaikytas algoritmas veikia pagal autoriaus aprašymą, todėl nebuvo reikalingas papildomas analizavimas.

### 3.7. Važiavimo sąlygų nustatymo algoritmo analizė

Šoninio slydimo aptikimo algoritmo sudarymui buvo išbandytos skirtingos skaičiavimo metodikos. Geriausi rezultatai gauti skaičiuojant kampą tarp matuojamų akselerometro ir iš GPS judėjimo greičio ir krypties išskaičiuotų pagreičio vektorių. Rezultatai buvo lyginami su skirtumu tarp simulatoriumi matuojamo transporto priemonės pasisukimo plokštumoje (giroskopo kampas) ir pozicijos pasikeitimo kampo plokštumoje (GPS kryptis). Šis skirtumas rodo kokių kampu transporto priemonė yra pasisukusi lyginant su jos judėjimo trajektorija. Tai ypač svarbu nustatant vairavimo kokybę, chuliganišką vairavimą.

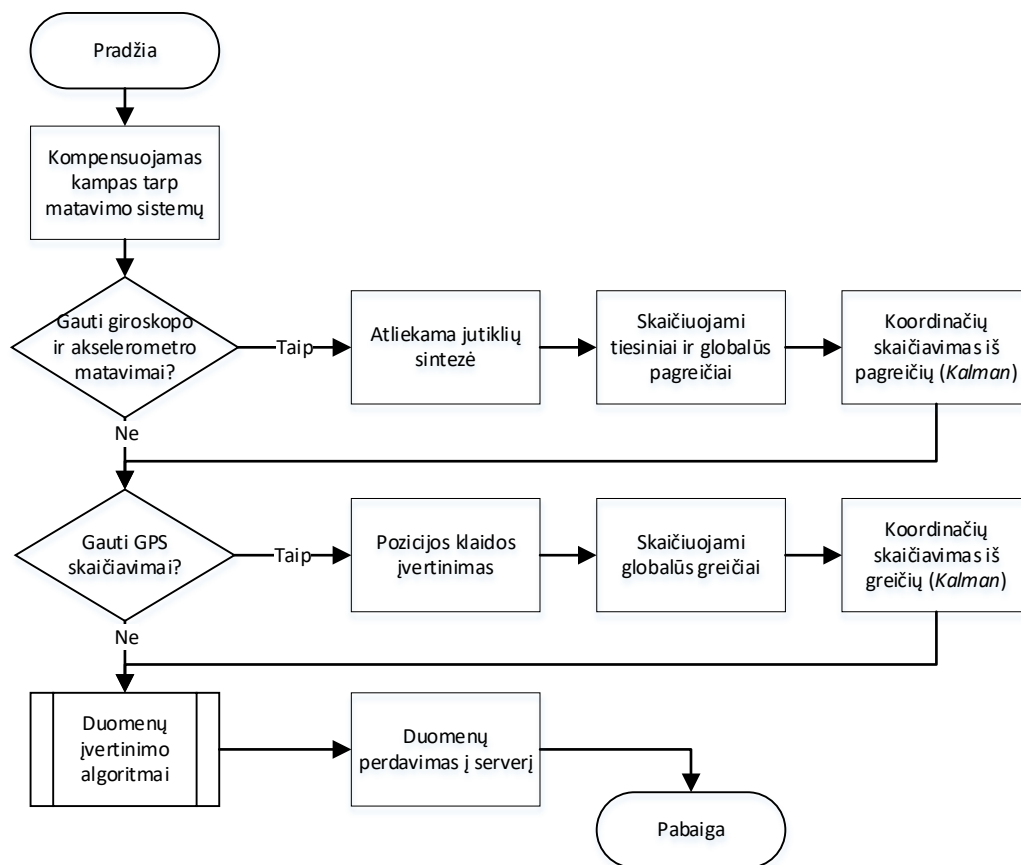


3.16 pav. Kampo palyginimas skirtingomis važiavimo sąlygomis

Kairėje pusėje esančiame paveikslėlyje pavaizduotas skirtumas kai transporto priemonė važiuodama slysta šonu (elektroninė stabilumo sistema išjungta) – tarp globalios ir jutiklinės matavimo sistemų didžiausias skirtumas nesiekia 10 laipsnių. Dešinėje transporto priemonė važiuoja ratu su įjungta stabilumo sistema – tarp globalios ir jutiklinės matavimo sistemų skirtumas nesiekia 8 laipsnių, didelius kampo šuolius sukelia stabilumo sistema stabdydama atskirus ratus. Skirtumas yra daugiausiai dėl nevertinamo pagreičio vertikalioje ašyje, kurioje fiksuojama dalis pagreičio dėl transporto priemonės paviršinimo dėl išcentrinės jėgos. Rezultatas rodo, kad slydimui nustatyti užtenka pagreičio jutiklio.

### 3.8. GPS ir IMU sintezės algoritmas

Algoritmas pateiktas 3.17 pav. Vienu metu apdorojami akselerometro ir giroskopo matavimai, remiantis jais atnaujinama pozicija. Po to atliekamas GPS duomenų apdorojimas, įvertinamas pozicijos pasikeitimo tikrumas remiantis iš kitų jutiklių paskaičiuotu pozicijos pasikeitimu. Algoritmas vykdomas kiekvieną kartą kai yra naujų duomenų iš bet kurios sistemos.



3.17 pav. Jungtinių GPS ir IMU skaičiavimų algoritmas

Prieš atliekant sistemos duomenų sintezę yra reikalinga kampo tarp sistemų kompensacija, kad skirtingais metodais užfiksuota informacija aprašytų bendrus poveikius. Esant šiai jutiklių konfigūracijai galimas tik statinis kompensavimo koeficientų skaičiavimas, t. y. nejudant transporto priemonei, dėl sistemų sąryšio nežinomųjų. Pagrindinių šio algoritmo komponentų laikinis tyrimas aprašytas sekančiame poskyryje.

### 3.9. Algoritmų vykdymo laiko tyrimas

Vykdyto laiko atskaitai gauti buvo atliktas *Dhrystone* atviro kodo spartos matavimas. Kodas C kalba pateiktas 29 šaltinyje. Vidutinis jo vykdymo laikas *SIM868* mikrovaldiklyje yra 82,9  $\mu$ s. Sudarytų algoritmų vykdymo laikai:

- 653,8  $\mu$ s giroskopo ir akselerometro sintezė;
- 449,8  $\mu$ s sintezės rezultato perskaičiavimas į pagreičius Žemės plokštumoje ir tiesinius pagreičius (pašalinamas Žemės traukos sukeliamas pagreitis);
- 221,1  $\mu$ s sintezės rezultato perskaičiavimas į pagreičius Žemės plokštumoje;
- 5677,5  $\mu$ s koordinatų skaičiavimas naudojant inercinių jutiklių pagreičius Žemės plokštumoje, *Kalman* algoritmas;
- 8946,8  $\mu$ s koordinatų atnaujinimas naudojant iš GPS pozicijos pasikeitimo paskaičiuotus pagreičius Žemės plokštumoje, *Kalman* algoritmas.

Tuo tarpu vidutinis *Dhrystone* algoritmo vykdymo laikas *STM32F105RCT6* mikrovaldiklyje – 26,2  $\mu$ s @ 32 Mhz.



## Išvados

1. Pasiūlyti sprendimai transporto priemonės važiavimo stebėjimo problemoms, naudojant vietos nustatymo metodą (GPS ir GSM) kartu su jutiklių sintezės metodu yra pasiekiamas ekonomiškai pagrįstas ir patikimas sprendimas lyginant su aprašytais alternatyvomis. Šis sprendimas atsižvelgia į įrangos technines galimybes. Jei transporto priemonės judėjimo ir vibracijų modelis yra tiesinis, tinkamas pasirinkimas geram prognozavimui yra standartinis *Kalman* filtras.
2. Skirtingus duomenų sintezės metodus aprašantys straipsniai nepateikia vieningos nuomonės kuris sprendimas yra tiksliausias ir ne visuose yra pateikti skaičiavimų sudėtingumo ir apkrovos įvertinimai, dėl to projekto metu yra reikalingas išsamesnis tyrimas. Jei laikomės prielaidos, kad tam tikrame laiko intervale pagreitis yra pastovus, galime modeliuoti tiesinę sistemą ir būsenos prognozėms naudoti paprastą *Kalman* filtrą. Sprendimas pirmiausiai turi būti patikrinamas naudojant kompiuterinę įrangą, jei modelis teisingas – jis integruojamas į transporto stebėjimo įrangą realaus laiko duomenų apdorojimui.
3. Apdorojant surinktus duomenis gauta nežymi sinchronizacijos įtaka signalų iš skirtingų jutiklių kros-koreliacijos koeficientui. Todėl nuspręsta jutiklių sinchronizacijos algoritmo nenaudoti duomenų apdorojimo sistemoje, o taikyti fiksuotus vėlinimo koeficientus, kurie paskaičiuojami visai gaminių serijai.
4. Atlikus papildomą tyrimą nustatyta, kad mažiausias GPS imtuvo rodomos pozicijos pasikeitimo žingsnis yra apytiksliai 1,85 m. Šį žingsnį lemia mažas *Mediatek* imtuvo siunčiamos *NMEA* standarto koordinatės simbolių po kablelio skaičius – 3 simboliai.
5. Mažiausia užfiksuota smūgio trukmė buvo 40 milisekundžių, kai transporto priemonė važiavo beveik 3 m/s greičiu. Nustatytas iš GPS duomenų (greičio ir judėjimo krypties) išskaičiuotas vėlinimas (*Mediatek* imtuvas) lyginant su pagreičio jutikliu (*Bosch BMI160*). Rezultatas:  $130 \pm 5$  ms. Atlikti posūkio kampo bei greičio vėlinimo skaičiavimai, atitinkamai vėlinimas  $300 \pm 50$  ms ir  $130 \pm 5$  ms. Dėl mažos smūgio trukmės duomenų signalai prasilenkia ir smūgis nėra fiksuojamas kaip vienas įvykis, jei neatsižvelgiama į vėlinimą.
6. Pastebėta smūgio trukmės priklausomybė nuo greičio, t. y. važiuojant didesniu greičiu energija išsklaidoma per ilgesnį laiko tarpą. Nustatytas didžiausias reikalingas matavimų dažnis yra 50 Hz. Norint užfiksuoti smūgius lėčiau važiuojančioje transporto priemonėje reikalingas didesnis matavimų dažnis.
7. Kai transporto priemonė važiuodama slysta šonu (40-50 laipsnių kampas) tarp globalios ir jutiklinės matavimo sistemų didžiausias posūkio kampo skirtumas nesiekia 10 laipsnių. Dėl to naudojant kampo skirtumo skaičiavimo algoritmą galima užfiksuoti tik žymius slydimo atvejus.

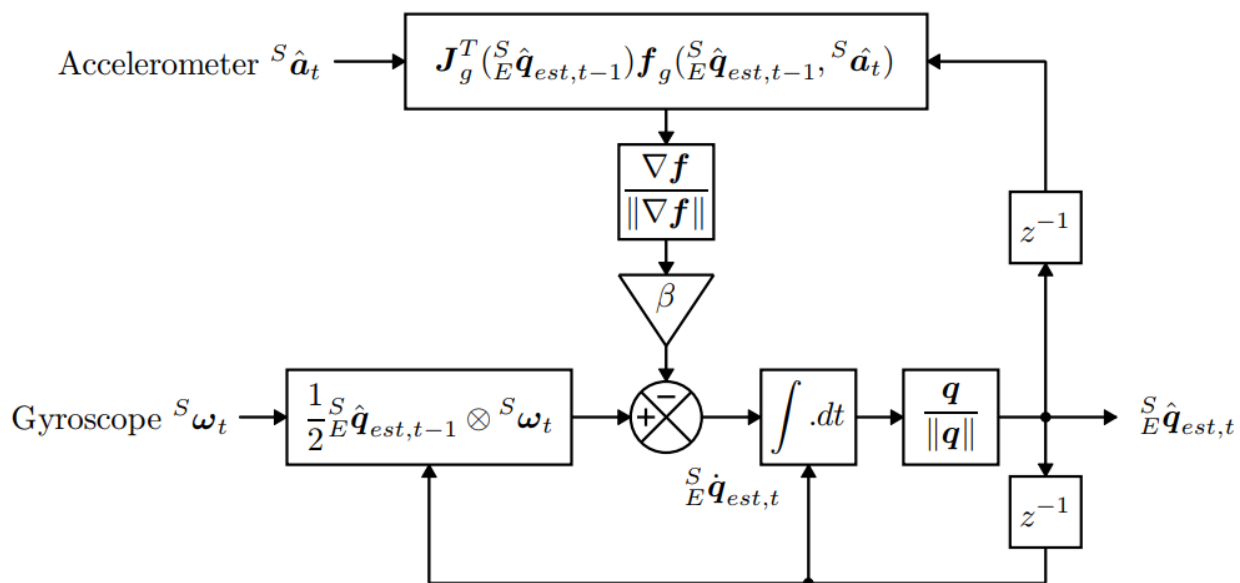
## Informacijos šaltinių sąrašas

1. Teltonika FMB900 [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:  
<http://gpsgate.com/devices/fmb900>
2. FMB900 User Manual V0.19, Teltonika [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:  
<https://drive.google.com/file/d/0B-v5JPzO4a7dVmpRQ1R6VnM1VVU>
3. Ruptela FM-Eco4 Light [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:  
[http://gpsgate.com/devices/fm\\_eco4\\_light](http://gpsgate.com/devices/fm_eco4_light)
4. Accident detection, Ruptela [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:  
<https://drive.google.com/open?id=0B-v5JPzO4a7dcHhxSm1oV0d6M0U>
5. Telematics technology, Quartix [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:  
<https://www.quartix.net/insurance-telematics/telematics-technology.php>
6. Azza Allouch, Anis Koubâa, Tarek Abbes, and Adel Ammar ,RoadSense: Smartphone Application to Estimate Road Conditions Using Accelerometer and Gyroscope, 2017
7. Allain R. The Physics of a High-Speed Crash: 70 MPH vs. 85 MPH. 2011. [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per internetą: <https://www.wired.com/2011/04/crashing-into-wall/>
8. BeamNG.drive user accessible data streams. [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per internetą:  
<https://wiki.beamng.com/Streams#sensors>
9. Bosch BMI160. [žiūrėta 2017-12-20]. Prieiga per internetą:  
<https://www.mouser.com/ds/2/783/BST-BMI160-DS000-07-786474.pdf>
10. GPS Accuracy [žiūrėta 2017-12-19]. Prieiga per internetą:  
<http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>
11. Crash detection [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:  
<https://www.quartix.net/insurance-telematics/crash-detection.php>
12. SIM800 Series\_GSM Location\_Application Note\_V1.01 [žiūrėta 2017-12-19]. Prieiga per internetą:  
[https://www.elecrow.com/download/SIM800%20Series\\_GSM%20Location\\_Application%20Note\\_V1.01.pdf](https://www.elecrow.com/download/SIM800%20Series_GSM%20Location_Application%20Note_V1.01.pdf)
13. B.D.S.Lakmali, Dileeka. Dias, Database Correlation for GSM Location in Outdoor & Indoor Environments, 2006
14. GPS vs aGPS vs WiFi vs GSM localization [žiūrėta 2017-12-15]. Prieiga per internetą:  
<http://radupoenaru.com/gps-vs-agps-vs-wifi-vs-gsm-localization/>
15. Reza N. Jazar, Vehicle Dynamics: Theory and Application
16. Circle Arc Equations Formulas Calculator [žiūrėta 2017-12-20]. Prieiga per internetą:  
[http://www.ajdesigner.com/phpcircle/circle\\_arc\\_length\\_r.php#ajscroll](http://www.ajdesigner.com/phpcircle/circle_arc_length_r.php#ajscroll)
17. Open source IMU and AHRS algorithms [žiūrėta 2019-05-21]. Prieiga per internetą:  
<https://x-io.co.uk/open-source-imu-and-ahrs-algorithms/>

18. B. Y. Amirgaliyev, K. K. Kuvatov, Z. Y. Baibatyr, Road Condition Analysis Using 3-axis Accelerometer And GPS Sensors, 2016
19. Jan Wendel, Oliver Meister, Christian Schlaile, and Gert F. Trommer. An integrated gps/mems-imu navigation system for an autonomous helicopter. Aerospace Science and Technology, 10(6):527–533, September 2006. [žiūrėta 2018-01-17]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963806000484>
20. Changsun Yoo and Lee Ki Ahn. Low cost gps/ins sensor fusion system for uav navigation. IEEE, pages 8.A.1–1 to 8.A.1–9, 2003. [žiūrėta 2018-01-17]. Prieiga per internetą: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1245891](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1245891)
21. Rudolph Emil Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, 82(Series D):35–45, 1960.
22. Walter T Higgins. A comparison of complementary and kalman filtering. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, (3):321–325, May 1975.
23. Mathieu St-Pierre and Denis Gingras Dr. Ing. Comparison between the unscented kalman filter and the extended kalman filter for the position estimation module of an integrated navigation information system. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pages 831–835, June 2004. [žiūrėta 2018-01-17]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1336492>
24. Michael George and Salah Sukkarieh. Tightly coupled ins/gps with bias estimation for uav applications. [žiūrėta 2018-01-17]. Prieiga per internetą: <http://prism2.mem.drexel.edu/~vefa/research/HeliExtLoadStabil/relevantPapers/imu/george.pdf>
25. Guoqiang Mao, Sam Drake, and Brian D. O. Anderson. Design of an extended kalman filter for uav localization. IEEE, Information, Decision and Control, pages 224–229, 2007. [žiūrėta 2018-01-17]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4252506>
26. Simon J. Julier and Jeffery K. Uhlmann. Unscented filtering and nonlinear estimation. Proceedings of the IEE, 92(3):401–421, March 2004. [žiūrėta 2018-01-17]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1271397>
27. Robert A. Gray and Peter S. Maybeck. An integrated gps/ins/baro and radar altimeter system for aircraft precision approach landings. IEEE, 1:161–168, May 1995.
28. Eric A. Wan and Rudolph van der Menve. The unscented kalman filter for nonlinear estimation. Proceedings of Symposium 2000 on Adaptive Systems for Signal Processing, Communication and Control (AS-SPCC), pages 153–158, 2000. [žiūrėta 2018-01-17]. Prieiga per internetą: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=882463](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=882463)
29. Dhrystone spartos matavimo algoritmo kodas [žiūrėta 2019-05-17]. Prieiga per internetą: <https://github.com/Keith-S-Thompson/dhrystone/tree/master/v2.1>

## Priedai

### 1 priedas. *MadgwickAHRS* blokinė diagrama giroskopo ir akcelerometro sintezei



**P1.1 pav.** Inercinių jutiklių orientacijos filtro blokinė diagrama [17]

Diagrama paaiškinta 17 šaltinyje pateikto dokumento 3.3 poskyryje, panaudotas autoriaus rekomenduojamas programinis kodas C kalba.

### 2 priedas. Matavimams ir tyrimams naudojamas maketas



**P2.1 pav.** Matavimams ir tyrimams naudojamas maketas

### 3 priedas. Formulų sąrašas

Duomenys gaunami iš GPS imtuvo:

$\lambda$  – ilguma (angl. *longitude*), radianai;

$\varphi$  – platuma (angl. *latitude*), radianai;

$h$  – aukštis virš jūros lygio, metrai;

$v_{GPS}$  – judėjimo greitis, m/s;

$\theta$  – judėjimo krypties kampas šiaurės atžvilgiu (angl. *track angle*), laipsniai

$t$  – laikas, milisekundės;

Naudojant šiuos duomenis galima apskaičiuoti transporto priemonės judėjimo kinematinės išraiškas.

**3.1 lentelė.** Kinematinio judėjimo modelio parametrų skaičiavimo formulės

Parametras	Formulė	
Posūkio spindulys	$r = \frac{\Delta d}{2 \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)}$	1.1
	$r = \frac{\Delta d}{\Delta\theta}, \text{ kai } \Delta\theta \rightarrow 0$	1.2
Kelias	$s = \Delta\theta \cdot r$	1.3
	$s = d, \text{ kai } \Delta\theta \rightarrow 0$	1.4
Linijinis greitis	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	1.5
	$v = \omega \cdot r$	1.6
	$v_{GPS}$	
Kampinis greitis	$\omega = \frac{v}{r}$	1.7
	$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$	1.8
Aukščio kitimo greitis	$v_h = \frac{\Delta h}{\Delta t}$	1.9
Tangentinis pagreitis	$a_\tau = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	1.10
Normalinis pagreitis	$a_n = \frac{v^2}{r}$	1.11
	$a_n = -\omega^2 \cdot r$	1.12
Kampinis pagreitis	$a_k = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$	1.13
Aukščio kitimo pagreitis	$a_h = \frac{\Delta v_h}{\Delta t}$	1.14
Nuolydžio kampas	$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{-a_\tau}{a_h}\right), \text{ kai } \Delta d \rightarrow 0$	1.15

	$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta h}{\Delta d}\right), \text{ kai } \Delta d \rightarrow 0$	1.16
Patikslintas atstumas įvertinant aukščio virš jūros lygio pokytį	$\Delta d, = \sqrt{\Delta d^2 + \Delta h^2}, \text{ kai } \Delta d \rightarrow 0$	1.17
	$\Delta d, = \frac{\Delta d}{\cos \delta}, \text{ kai } \Delta d \rightarrow 0$	1.18
	$\Delta d, = \sqrt{(R + h_0)^2 + (R + h)^2 - 2(R + h_0)(R + h) \cos \frac{\Delta d}{R + h_0}}$	1.19

Duomenys gaunami iš jutiklių ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ):

$a_x$  – pagreitis akcelerometro x ašyje (stabdymo ar greitėjimo metu atsirandantis pagreitis), g;

$a_y$  – pagreitis akcelerometro y ašyje (įcentrinis pagreitis), g;

$a_z$  – pagreitis akcelerometro z ašyje (aukščio kitimo pagreitis), g;

$\varphi$  – šoninio posvyrio kampo kitimo greitis (angl. *roll rate*), °/s;

$\chi$  – nuolydžio kampo kitimo greitis (angl. *pitch rate*), °/s;

$\psi$  – krypties kampo kitimo greitis (angl. *yaw rate*), °/s;

**3.2 lentelė.** Kinematinio judėjimo modelio parametų skaičiavimo iš inercinių jutiklių formulės

Parametras	Formulė	
Šoninio posvyrio kampas	$\Phi = \Phi_0 + \varphi \cdot \Delta t$	2.1
	$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{a_y}{a_z}\right)$	2.2
Nuolydžio kampas	$X = X_0 + \chi \cdot \Delta t$	2.3
	$X = \tan^{-1}\left(\frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right)$	2.4
Krypties kampas	$\Psi = \Psi_0 + \psi \cdot \Delta t$	2.5
Tiesinis greitis	$v_x = v_{x0} + \sum_{i=1}^n a_{xi} \cdot \Delta t_{GPS}$	2.6
Šoninis greitis	$v_y = v_{y0} + \sum_{i=1}^n a_{yi} \cdot \Delta t_{GPS}$	2.7
Aukščio kitimo greitis	$v_z = v_{z0} + \sum_{i=1}^n (a_{zi} - g) \cdot \Delta t_{GPS}$	2.8
Kampinis pagreitis apie x ašį	$\omega_{gx} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$	2.9
Kampinis pagreitis apie y ašį	$\omega_{gy} = \frac{\Delta \chi}{\Delta t}$	2.10
Kampinis pagreitis apie z ašį	$\omega_{gz} = \frac{\Delta \psi}{\Delta t}$	2.11
Akselerometro pagreičio drebėjimas (angl. <i>jitter</i> ) x ašyje	$j_x = \frac{\Delta a_x}{\Delta t}$	2.12

Akselerometro pagreičio drebėjimas y ašyje	$j_y = \frac{\Delta a_y}{\Delta t}$	2.13
Akselerometro pagreičio drebėjimas z ašyje	$j_z = \frac{\Delta a_z}{\Delta t}$	2.14

čia:

$\Phi$  – šoninio posvyrio kampas (angl. roll angle), laipsniai;

$X$  – nuolydžio kampas (angl. pitch angle), laipsniai;

$\Psi$  – krypties kampas (angl. yaw angle), laipsniai;

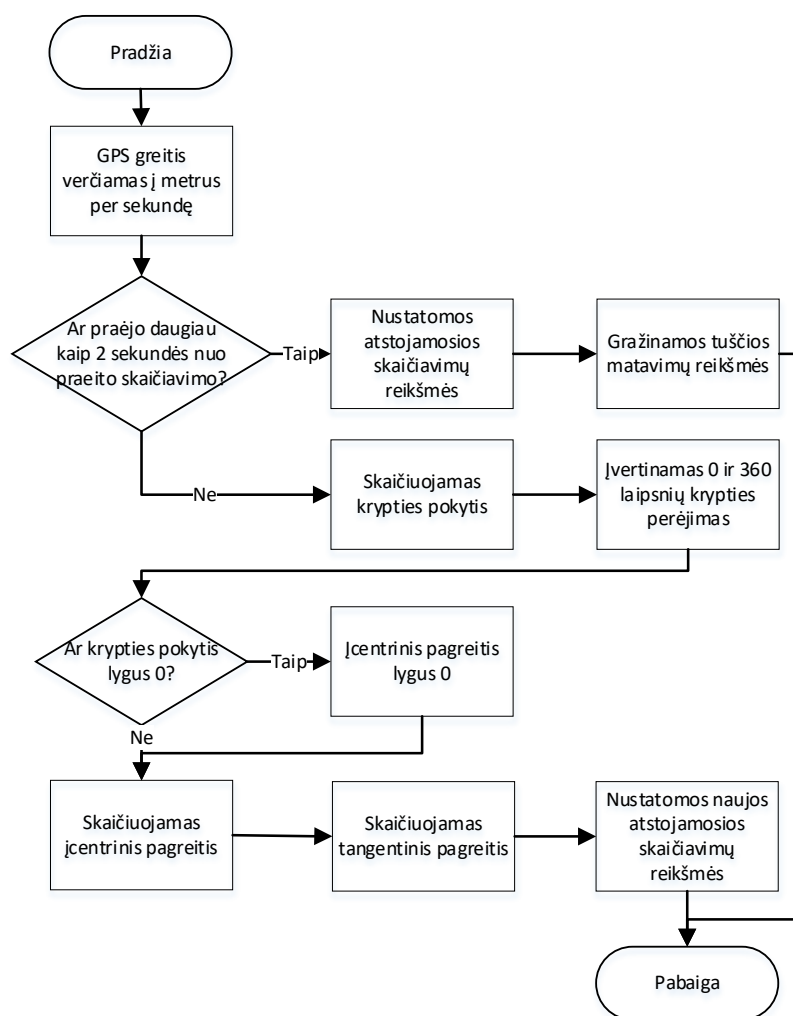
papildomi duomenys iš matavimų sistemos:

$\Delta t$  – sisteminio laiko pokytis tarp matavimų, sekundė;

$\Delta t_{GPS}$  – GPS laiko pokytis tarp atskaitų, sekundė;

$n$  – matavimų skaičius per periodą  $\Delta t_{GPS}$ ;

#### 4 priedas. GPS pagreičių skaičiavimo algoritmas



P4.1 pav. GPS pagreičių skaičiavimo algoritmas

Pagreičiai skaičiuojami kiekvieną kartą kai yra gaunama informacija iš GPS imtuvo. Jei tam tikrą laiką nebuvo GPS signalo – pagreičiai neskaičiuojami.

## 5 priedas. Transporto priemonės lėtėjimo parametrų skaičiavimas *Matlab*

Jutikliais užfiksuoti judėjimo duomenys įkeliami į *Matlab*. Ieškoma didžiausio greičio bei toliau fiksuojamo mažiausio greičio. Iš šių duomenų paskaičiuojamas laiko intervalas, vidutinis pagreitis ir reikalingas duomenų diskretizavimo dažnis.

```
%% DECELERATION CALCULATION
max.speed = 0;
max.time = 0;
max.n = 0;
for ii = 1:n
    if array(ii, 7) >= max.speed
        max.speed = array(ii, 7); % greitis XY plokštumoje
        max.time = array(ii, 2);
        max.n = ii;
    end
end
min.speed = max.speed;
min.time = max.time;
min.n = max.n;
for ii = max.n:n
    if array(ii, 7) <= min.speed
        min.speed = array(ii, 7); % greitis XY plokštumoje
        min.time = array(ii, 2);
        min.n = ii;
    else
        if array(ii, 7) <= 1
            break;
        end
    end
end
deceleration.time = min.time - max.time;
deceleration.val = (min.speed - max.speed)/deceleration.time;
deceleration.fs = 2/deceleration.time;
```

## 6 priedas. Greičio ir pagreičio dažnių keitimo funkcijos

```
freq_array = [1000 500 400 250 200 125 100 80 50 40 25 20 10 5 2];
for i=1:length(freq_array)
    [resampled.x.vel(i).times, resampled.x.vel(i).array] = push_to_array(array(:, 2), vel.x, the_size, fs, freq_array(i));
    [resampled.x.acc(i).times, resampled.x.acc(i).array] = push_to_array(array(:, 2), array(:, 10), the_size, fs,
    freq_array(i));
    number_arrays = length(resampled.x.vel(i).times(:,1));
    length_arrays = length(resampled.x.vel(i).times(1,:));
    for ii = 1:number_arrays
        [resampled.x.stats(i).interval(ii), resampled.x.stats(i).avg(ii), resampled.x.stats(i).peak(ii)] =
        get_deceleration(resampled.x.vel(i).times(ii,:), resampled.x.vel(i).array(ii,:), resampled.x.acc(i).array(ii,:),
        length_arrays);
        %deceleration skaiciavimas
    end
end
```



```

[resampled.x.worst.avg.val(i), resampled.x.worst.avg.idx(i)] = max(resampled.x.stats(i).avg(:)); % nes neigiami
[resampled.x.best.avg.val(i), resampled.x.best.avg.idx(i)] = min(resampled.x.stats(i).avg(:)); % nes neigiami
[resampled.x.worst.peak.val(i), resampled.x.worst.peak.idx(i)] = max(resampled.x.stats(i).peak(:)); % nes
neigiami
[resampled.x.best.peak.val(i), resampled.x.best.peak.idx(i)] = min(resampled.x.stats(i).peak(:)); % nes neigiami
% resampled.x.____.____.idx - indeksai vidurkio masyvø kuriuos reikia atvaizduot
end

function [interval, avg, peak] = get_deceleration(times_in, vel, acc, the_size)
    max_speed= max(vel);
    max_n = find(vel == max_speed, 1, 'last');
    max_time = times_in(max_n);

    [min_speed, min_n] = min(vel);
    min_time = times_in(min_n);

    [peak, peak_n] = min(acc);
    % [peak, peak_n] = min(acc(max_n:min_n));
    % peak_n = peak_n + max_n - 1;
    % peak_time = times_in(peak_n);

    interval = min_time - max_time;
    avg = (min_speed - max_speed)/interval;
end

function [times, arrays] = push_to_array(times_in, values, the_size, f_in, f_out)
    array_size = f_in/f_out;
    array_length = ceil(the_size/array_size);
    arrays = zeros(array_size, array_length);
    times = zeros(array_size, array_length);
    ns = zeros(array_size, 1);
    is = ones(array_size, 1);
    counter = 1;
    for ii = 1:(array_length-1)*array_size
        counter = mod(counter-1, array_size)+1;
        % Resample IMU data to GPS frequency with simple average
        for i = 1:array_size
            ns(i) = ns(i) + 1;
            arrays(i, is(i)) = arrays(i, is(i)) + values(ii);
        end
        arrays(counter, is(counter)) = arrays(counter, is(counter))./ns(counter);
        times(counter, is(counter)) = times_in(ii);

        is(counter) = is(counter) + 1;
        ns(counter) = 0;

        counter=counter+1;
    end
    times(:, end) = [];
    arrays(:, end) = [];
end

```

## 7 priedas. Kampo paklaidos skaičiavimo funkcijos *Matlab*

```
%% array(:, 18) – tikras kampas, array(:, 41) – jutiklių sintezės kampas, angle.z – kampas iš pozicijos pokyčio
error.quat.vals = abs((array(:, 18) - array(:, 41)));
error.quat_abs.vals = error.quat.vals./array(:, 18);
[mean,var]=simple_stats(error.quat_abs.vals);
error.quat_abs.m = mean;
error.quat_abs.v = var;

error.gyro.vals = abs((array(:, 18) - angle.z));
error.gyro_abs.vals = error.gyro.vals./array(:, 18);
[mean,var]=simple_stats(error.gyro_abs.vals);
error.gyro_abs.m = mean;
error.gyro_abs.v = var;

function [M,V] = simple_stats(A)
    sum1=0;
    for i=1:length(A)
        sum1=sum1+A(i);
    end
    M=sum1/length(A); %the mean
    sum2=0;
    for i=1:length(A)
        sum2=sum2+ (A(i)-M)^2;
    end
    V=sum2/length(A); %Varaince
end
```