



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

II. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2017ko maiatzaren 10, 11 eta 12
Iruñea, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Sentsore Inertzialen
Erabilgarritasuna Trenen
Odometria Sistematan: Tekniken
laburpena eta ezaugarrien
proposamena**

Jon Otegui eta Alfonso Bahillo

133-140 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.ii.03.19>

ANTOLATZAILEA:



ELKARLANEAN:



LAGUNTZAILEAK:



UDALBILTZA



Sentsore Inertzialen Erabilgarritasuna Trenen Odometria Sistematan: Tekniken laburpena eta ezaugarrien proposamena

Jon Otegui Arruti, Alfonso Bahillo Martínez
Deusto Institute of Technology, DeustoTech, University of Deusto,
Avenida de las Universidades 24, 48007 Bilbao, Spain
jon.otegui@deusto.es

Laburpena

Gaur egun tren baten kokapena era zehatz eta seguru batean ematea erronka latza da. Artikulu hau sentsore inertzialetan oinarriturik dago eta beraien erabilgarritasuna aztertzen du trenetako odometria-sistematan kokapena emateko soluzio gisara. Lanaren emaitza gaur egun arte egindako ikerketen laburpena da eta bertan erakusten dira ibilgailuetan eta bereziki trenetan erabili diren teknika desberdinak. Honetan oinarrituz, IMU (Inertial Measurement Unit) sentsoreen integrazio-eskema bat erakusten dugu, trenerako proposena dela arrazoitzen. Horrez gain, odometria-sistema orokor batean nola integratu gaitetik azaltzen dugu. Azkenik, IMU sentsoreen nahitaezko baldintzak zehazten ditugu trenbidearen geometria, trenaren dinamika eta ingurua kontuan hartuz.

Hitz gakoak: Sentsore inertzialak, Trenen kokapena, odometria, IMU diagrama, Datu fusioa

Abstract

Positioning accurately and safety a train is nowadays a great challenge. This paper is focused on the inertial sensors and its applicability in railway safety critical odometry system as a way of train localization. The result is a survey of the techniques developed in land vehicles and specifically in railway to date under the investigation point of view. Based on this survey, an Inertial Measurement Unit (IMU) integration scheme is proposed and discussed as well as a general odometry system is superficially showed. Finally the IMU sensor requirements are listed and justified for railway environment taking into account the track geometry, vehicle dynamics and the surrounding of the train.

Keywords: Inertial Sensors, Train Positioning, Odometry, IMU Architecture, Data Fusion

1. Sarrera eta motibazioa

Gaur egun, arraroa badirudi ere, ez dago trenik bere kokapena erreferentzia-sistema absolutu batean emanda dagoenik; hots, trenbide operadoreek ezin dute tren jakin baten kokapena longitude eta latitude zehatzetan eman. Dena den horrek ez du esan nahi trenbideen kudeaketa-sistema segurua ez denik, beste teknika batzuez baliatzen baita. Egun, sistemarik erabiliena balizetan oinarritutakoa da. Trenbidea kantoi deritzon tartetean banatzen da. Kantoi bakoitzaren hasieran baliza bat jartzen da eta trena gaitetik igarotzean trafiko-kudeaketa zentroak tren bat kantoi jakin batean sartu delako abisua jasotzen du (ohikoa da ardatz kopurua kontatzen dituen sentsore bat ere instalatzea, trenaren luzera jakiteko). Hurrengo kantoiaren beste trenik balego, gidariak abisu bat jasoko luke eta denbora pixka bat pasata, azken honek erantzunik emango ez balu, trena automatikoki geldituko litzateke (emergentziako balaztak aktibatuz behar izanez gero). Metodologia hau seinaleztapen-sistemaren zati da baina odometriatik urrun kokatzen da.

Azken urteetan odometriara bideratutako sentsore kopurua asko hazi da, gehienbat MEMS (Microelectromechanical Systems) bezalako teknologia berriek sentsore mota hauen kostea asko jaitsi dutelako. Odometria mugimendu-sentsoreetako informazioa jasotzean datza, ibilgailu baten kokapena denboran zehar nola aldatu den jakiteko. Nabigazio-sistemetan, ordea, kontzeptua bera ere zabaldu egin da, posizioaz gain abiaduraren balioa ere kalkulatzera. Gauzak horrela, ibilgailu baten kokapena ezagutzeko 6 aldagai erabili behar dira (3 posiziorako eta beste 3 abiadurarako).

Kokapena jakiteko problema berehalakoa ez dela ikusirik, orain arte emandako soluzioen artean, jarraian datozenak dira ezagunenak. Trenen kasuan, esate baterako, Doppler radarra edo

takometroa bezalako gailuek abiadura neurtzen dute. Hala ere, gaur egun eskuragarri daude kokapen absolutua eskaintzen duten teknologiak, GNSS (Global Navigation Satellite System) eta Baliza Irakurgailuak, besteak beste. Azkenik, zeharkako neurketa ematen duten sentsoreak daude; IMU (Inertial Measurement Unit) deritzonak dira ezagunenak, azelerazio eta abiadura angeluar balioak neurtzen dituztenak.

Segurtasuna jokoan den aplikazioetan odometria-sistemaren zehaztasuna (posizio eta abiadura emaitzak alegia) ahalik eta handien izatea beharturik dago (gutxienez trenbideen artean bereizteko gaitasuna eman behar du soluzioak), sistemaren osotasuna bermatuz. Sentsore bakoitza bere aldetik hartuz gero, ezingo litzateke eskaturiko osotasuna bete inolaz, baina datuak fusionatzeko teknikak erabiliz (sentsore askotako neurketak jasoz), baldintzak bete daitezke. Testuinguru honetan, takometro eta IMU sentsoreak bateratzea proposatzen dugu odometria sistema konplexuago bateko lehen pauso bezala.

Ondorengo dokumentuan IMU sentsoreei buruzko arloko egoera jasotzen dugu. Bertan, orain arte egindako ikerketa-lana jasotzen da. Horrez gain, trenen testuinguruko berezitasunak azaltzen ditugu eta sentsore hauek integratzeko baldintzak biltzen ditugu datozen orrialdeetan.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Sentsore inertzialen erabilpena asko hedatu da nabigaziorako aplikazioetan MEMS teknologia garatu denetik. Sentsorearen osagaiak miniaturizatu ahal izateak kostua izugarri jaitsi du. Atal honetan, azken urteotako lan garrantzitsuenak bildu dira, teknologia hau integratzea jomuga dutenak, bai automobilen alorrean baita trenen kasuan ere.

Sentsore mota hauen abantailen artean mugimendu hutsa neurtzen dutela dago; alegia, neurketak ez dira ibilgailuaren dinamikaren eta ibilbidearen menpeko (gurpil eta trenbidearen arteko atxikidura, alboko azelerazio ez konpentsatua bihurguneetan, seinalearen galera tuneletan eta abar). Honek erabilpen malgua eskaintzen du edozein testuingurutara eta horregatik oso ohiko bihurtu dira automobiletako gidatze autonomoan eta hegazkinen nabigazioan.

Hala ere, teknologia honek ere baditu eragozpenak. Garrantzitsuenak MEMS teknologiaz at ere pairatzen den kokapen erlatiboarekin erlazonaturik dago, neurketa bakoitzeko akats gehitzea hain zuzen. MEMS-en kasuan, ordea, errore-mota hau nabarmenago barreiatzen da sentsorearen sentsibilitatea handiago delako.

2.1. Automobiletara bideraturako aplikazioak

Automobilei dagokienez, IMU eta GNSS bateratzen dituen konfigurazioa da gaur egun eskemarik arruntena, alabaina batoren eta bestearen onurak elkartzen ditu. IMU-ak maiztasun handiko informazioa jasotzen du (100Hz nahiko normaltzat hartu daiteke), baina denbora gutxirako balio duen soluzioa eskaintzen du aldiz (errore-gehitzea egotzita). GNSS-ak ordea, posizio absolutua eskaintzen du (ez du erroreak gehitzen aurreko soluzioari) baino maiztasun gutxiagorekin jasotzen da soluzio hori (1Hz litzake ohikoena). Bi sistema hauek bateratuz, bakoitzaren abantailaz goza daiteke. Hori lortzeko *loosely coupled system* eta *tightly coupled systems* deritzen integrazio-eskemak erabil daitezke. Lehenaren kasuan GNSS eta IMU-aren posizio eta abiadura balioak bidaltzen zaizkio algoritmoari; bigarrenaren kasuan neurketa hutsak erabiltzen dira eta iterazio bakoitzeko bi sentsoreek elkar banatzen dituzte bakoitzaren neurketak. Lan asko daude integrazio hauetan zentratuak; (Munguía, 2014)-n aurkitu daiteke momentura arteko lan esanguratsuenen laburpena.

Kostu baxuko 6 askatasun-gradu (DOF) dituen IMU eta GNSS arteko integrazio-eskema proposatzen da (Makloul et al., 2013) lanean, *loosely coupled configuration* deritzon arkitekturan. Mekanizaziorako ekuazioetan (neurketetatik soluziora pasatzeko ekuazioetan alegia) Coriolis-en azelerazioa kontuan hartzen da eta orientazioaren zuzenketa kuaternioi bidez egiten da. Kasu honetan erabilitako fusio-algoritmoa Kalman-Filtroa izan da, zeharkako inplementazio batean.

Magnetometro bat txertatzea proposatzen du (Munguía, 2014)-k, IMU-aren DOF-ak 9-ra zabalduz. IMU eta GNSS arteko integrazioa aurreko lanaren berbera da baina datuen fusioa Kalman-Filtroaren linealizazio teknika bidez egiten da; algoritmoa Kalman-Filtroaren hedapen bat litzateke, EKF akronimoz ezaguna. Bertan 22 aldagai erabiltzen dira (berez 6-kin nahikoa litzakeela gogoan izan), algoritmoaren dinamika eta neurketa-modeloak Taylor-en seriezko garapenarekin lineal bilakatuz.

Orientazioa zuzentzeko teknika bat proposatzen dute (Abyarjoo et al., 2015)-n magnetometroaren neurketak erabiliz eta uneoro lurraren eremu magnetikoa zein den jakinda. Horrela kalkulu bakoitzeko errore-gehitzea zuzentzea lortzen dute. Horrez gain *roll* eta *pitch* angeluak (X eta Y ardatzetako biraketak) kalkulatzeko Kalman-Filtroaren aplikazioa ere erakusten dute.

Temperatura-sensore bat sartzen du IMU-an lehenbizikoz (Denti et al., 2010)-k, tenperaturak eragindako deriba zuzentzeko asmotan. Kasu honetan IMU eta GNSS sensoreak bateratzen dira, baina GNSS-ko informazioa erabiltzea proposatzen dute IMU-aren soluzioa zuzentzeko.

IMU teknologia desberdinak aztertzen dituzte (Godha eta Cannon, 2005) lanean: beraien emaitzen arabera, teknologia bakoitzak eragin nabarmena du fusionaturiko soluzioan. Hala ere, fusio-algoritmoa landuz dezimetro eskaseko diferentzia lortzen dute kostu baxuko IMU baten eta punta-puntako IMU baten emaitzak alderatuz. Hala ere, GNSS seinalea galtzean, kostu baxuko IMU-aren deriba askozaz ere nabarmenagoa dela onartzen dute.

Gutziz bestaldeko lana da (McCarron, 2013)-k aurkezten duena. Bertan, inoiz ez bezalako kostu baxuko arkitektura bat erabiltzen da (osotasunean 70 dolar azpiko plaka elektronikoa bat diseinatuz). Azelerometro (ADXL345) eta giroskopio (ITG3200) bat erabiltzen dira *Arduino* plaka elektronikoa konektatua. Algoritmoa bertan programatzeko aukera dagoenez, sistema benetan sinplea eta merkea lortzeko gai izan da.

2.2. Trenetan aplikaturiko soluzioak

Ikusi bezala, automobiletako aplikazioetarako arkitektura orokorrak nahiko definituta daude; tren kasuan, aldiz, eskemak ez dira batere zehatzak. (Mirabadi et al., 1996)-k hiru aukera posible planteatzen ditu (GNSS/IMU, Doppler radarra/GNSS eta GNSS/IMU/Doppler radarra/Takometroa) baina lan hau nahiko zaharrituta dagoela kontsideratu daiteke GNSS-aren zehaztasuna, grabaziorako maiztasuna eta IMU teknologiei buruzko alorrean.

Lan batzuk GNSS/IMU integrazioan zentratzen dira, automobiletan egindako lanaren emaitza berdintsuak lortuz (B. Cai et al., 2000). Bertan estima bidezko nabigazioan oinarrituz eta errore-kompentsazio modelo bat eraikiz, GNSS eta IMU fusio-eskema bat aurkezten da, EKF algoritmo ezaguna inplementatuz. Ildo beretik, osotasuna monitorizatzeko teknikak ere garatu dira (Allan et al., 2004) non trenen ingurugiroko sensore guztiak biltzen diren (takometroa, IMU, GNSS, Doppler radarra eta Trenbidearen Mapa Digitala). Osotasun kontzeptua zinez da garrantzitsua trenen kasuan, izan ere, honek neurtzen baitu sistemaren segurtasun maila. Horrela, segurtasunaren ikuspuntua gehitzea lortzen zaio nabigazioko problemari.

Informazio-Filtroaren programazio sinple bat egiten du (Larsson, 2014)-k bere lanean IMU, GNSS, takometro eta Doppler radarra erabiliz. Informazio-Filtroa eta Kalman-Filtroa bata bestearen osagarri dira, perspektiba desberdinetatik ondorioztatuak. Lan honetan, 9 aldagai erabiltzen dira soluziora iristeko. Simulazio ingurua *Simulink*-en garatua dago eta inplementazio-lana bereziki azpimarragarria da. Hala ere, autorearen hitzetan emaitzak ez dira ondorioak ateratzeko bezain onak.

Badira lanak Kalman-Filtroaren ordeztu, Partikula-Filtroak erabiltzen dituztenak datuen fusioa egiteko. Horren adibide litzake (Heirich, 2016), non trenbidearen informazio jakinik eta Partikula-Filtroaren algoritmoa erabiliz, gai den tren ibilbidearen %99,3an zer trenbidetan kokatzen den esateko.

Kostu txikiko arkitekturetan zentratuz, (Hemerly eta Schad, 2008)-k takometroa oso erabilgarri dela onartzen dute, bereziki GNSS seinalearen galera jazo daitekeen inguruetan (tuneletan, zubi azpiko ibilbideetan edota baso zerratueta).

Lan honetako autoreek dakigun puntura arte, trenen odometriaren inguruan egin den lanik garrantzitsuenak Florentzia eta Siena-ko unibertsitateek argitaratutakoa da (Malvezzi et al., 2014). Sistema, takometro eta 6 DOF-ko IMU baten integrazioan oinarritzen da. Horrez gain, trenaren modelo dinamiko bat garatzeak eta bi Kalman Filtro erabiltzeak lan hau inoiz egin den onenetariko bat bezala sailkatzea eramaten gaitu. Emaitzen arabera, europar tren kontrol sistemaren (ECTS) baldintzak betetzen dituzte, lorturiko zehaztasuna oso altua izanik. Lan honek hainbat artikulua aitzindari ditu non trenetako sentsoreen arloko egoera erakusten den eta Takometro eta IMU arteko arkitektura eztabaidatzen den, trenaren modelo dinamikoa eraikitzen den (Allotta et al., 2012) eta takometroaren sistema hobetzen den (Allotta et al., 2002).

Egungo ikerketa soluzioaren zehaztasuna lortzean datza (10 metro inguru noranzko longitudinalan eta metro eskasekoa noranzko perpendikularrean), sistemaren osotasuna (zehaztasuna, jarraipena eta erabilgarritasuna) oso altu mantenduz, segurtasun aplikazioetan erabili ahal izateko (Bedrich eta Gu, 2004).

1.Taula. Zehaztasun, erabilgarritasun eta koste desberdineko odometria sistemak.

	Egileak	Zehaztasuna	Erabilgarritasuna	Kostea
Automobiletarako aplikazioak	(Maklouf et al., 2013)	-	-	Crista IMU = 2000\$ Garmin 18 LVS GNSS = 84,99\$
	(Denti et al., 2010)	Roll max/min (RMS) = 2,47°/0,438° Pitch max/min (RMS) = 1,89°/0,45° Yaw max/min (RMS) = 5,15°/0,836°	-	-
	(Godha & Cannon, 2005)	2D Posizioa = 0,38m (<i>Low Cost</i>) 2D Posizioa = 0,32m (<i>High End</i>) 2D Abiadura = 0,071m/s (<i>Low Cost</i>) 2D Abiadura = 0,021m/s (<i>High End</i>)	30s GNSS seinale gabe Crista IMU = 17,3m deriba Honeywell HG1700 IMU = 0,98m deriba	Crista IMU = 2000\$ Honeywell HG1700 IMU = 9000\$ NovAtel OEM4 GPS = 7500\$
	(McCarron, 2013)	-	-	ADXL345 Accelerometer = 3,69\$ ITG3200 gyros = 4,73\$ Integrated ADXL345 & ITG3200 = 64,95\$
Trenetarako aplikazioak	(Larsson, 2014)	Roll max (RMS) = 50° Pitch max (RMS) = 100° Yaw max (RMS) = -400° Iparralde-Posizioa (N) = 3m Ekialde-Posizioa (E) = 5m Behera-Posizioa (D) = -3m	-	-
	(Hemerly & Schad, 2008)	-	1000s GNSS seinale gabe Latitude errorea = 16m Longitude errorea = 29m	-
	(Malvezzi et al., 2014)	Bidaiaturiko distantzia-errorea < 5m Abiadura-errorea < 0,5 m/s	-	-

Ikerketa lan hau IMU motatako sentsoreen aplikazioa aztertzean datza, trenetako odometria-sistemaren zati bilakatu daitekeen ala ez argudiatuz. Horrela, helburu nagusia trenean instalatu ahal izateko zer baldintza bete behar dituen biltzea da.

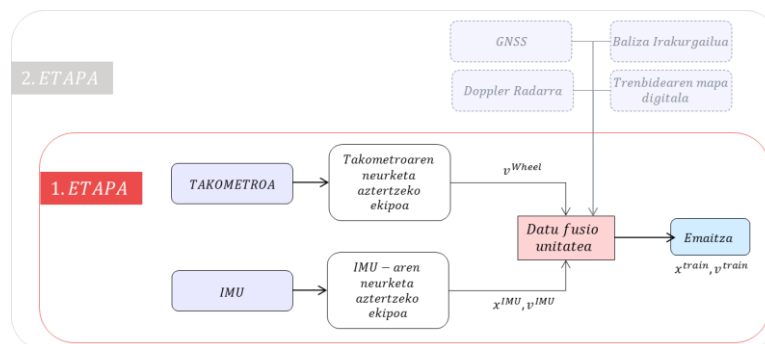
3. Arkitektura proposamena

Atal honetan, odometriako arkitektura orokorra erakusten dugu. Ez da lan honen helburua eskema hau eztabaidatzea baina garrantzizkoa dela ulertzen dugu IMU-a non integratu behar den ikusteko. Lan honetan IMU-aren arkitektura bakarrik landuko dugu; izan ere sentsore mota hau da gutxien erabili dena orain arte trenean testuinguruan (GNSS-arekin batera) eta honen inguruko ezagutza mugatuagoa da. Lan honek bide hau urratu nahi du dagoen jakintza maila areagotuz.

3.1. Eskema orokorra

Odometriako sistemak, esan bezala, IMU eta takometroaz gain, beste motatako sentsoreak ere onartu behar ditu. Hori dela eta, jarraian ikusten den eskemak GNSS, baliza irakurgailuak eta Doppler radarrak ere kontuan hartzen ditu, baita trenbidearen mapa digitalen informazio fidagarria ere. Odometria-sistema orokorraren lehen etapa IMU eta takometroa integratzean datza. Etorkezunean, beste sentsoreak ere integratuko lirateke.

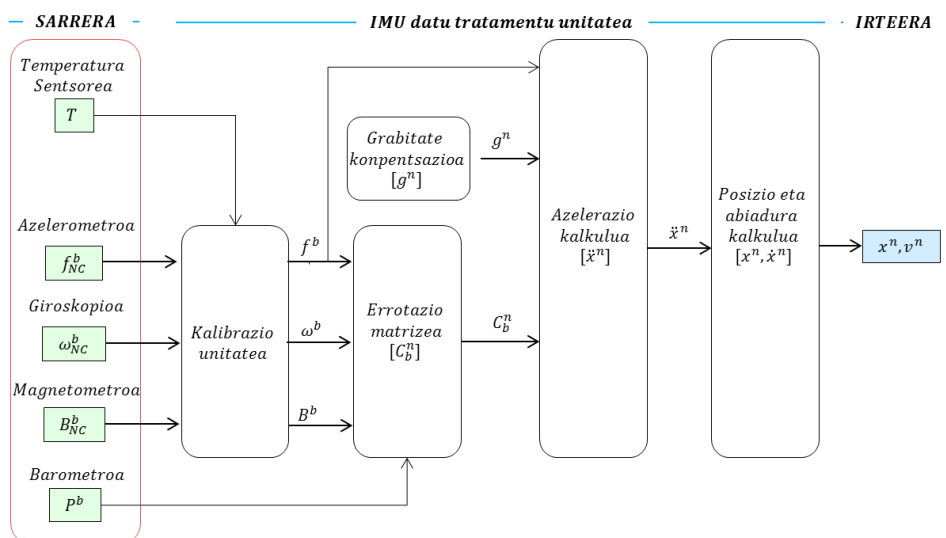
1.Irudia Odometria sistemaren arkitektura orokorra.



3.2. IMU sentsorearen arkitektura

IMU sentsoreak eskema mota ugari onartzen ditu inguruaren arabera. Lan bibliografikoari kasu eginez eta trenean inguruak kontuan hartuz jarraian aurkezten dugu gure proposamena. Kutxa gorrian IMU-aren barruan leudeken sentsoreak azaltzen dira. Kasu honetan IMU-aren 10 DOF- ez gain tenperatura neurtzeko gailua integratzen da, tenperatura-deriba ekidin edota zuzentzeko.

2.Irudia. IMU sentsorearen neurketak eta ondorengo prozesatuaren eskema partikularra.



3.3. Sistemaren ezaugarriak

Diseinatutako IMUaren eskema odometriako arkitektura orokorrean baliogarri izan dadin, jarraian azaltzen diren baldintzak bete beharko ditu.

- IMUak gutxienez 6 DOF izan behar ditu (Azelerometro eta giroskopioaren balioak alegia) baina magnetometroaren eta barometroaren neurketak ere onartu beharko ditu. Orain arteko lanetan ez da azken bi sentsore hauek egin dezaketen ekarpenik zehaztu trenen testuinguruan. Hortaz, bide honetatik jotzea beharrezkoa dela esan daiteke.
- Kostu txikiko ekipoetan interesa izanik (azken helburua odometria-sistema trenetan instalatzea litzake, hortaz, gehienez ehunka euro balio dituen sistema batean pentsatu beharko litzateke), erabilitako teknologia MEMS motakoa izango da eta sentsoreak OEM formatuan erosi beharko dira (integrazio-kostuak altuak dira normalki).
- Datuak grabatzeko gutxieneko maiztasuna 10Hz-takoa izango da, 100Hz gomendagarri izanez (Zhang et al., 2013)-k egindako lanean oinarrituz. Bertan irakurri daitezkeen modura, maiztasun handiagoak erabiltzean Kalman Filtroko aldagaiak edota modeloak aldaketak jasa ditzakete (Coriolis azelerazioa kontuan hartu beharrezkoa izaten baita).
- IMU-aren arkitekturak sistema osoa denboran sinkronizatzea ahalbidetu behar du. Horretarako teknika desberdinak erabil ditzake: PPS, UTC denbora etab. Ezaugarri hau bereziki da garrantzitsua etorkizunean integratu daitezkeen sentsoreak denbora-marka bat izan dezaten.
- Temperatura-sentsore bat izatea gomendagarria da deriba zuzentzeko aukera ematen duelako. Kontuan hartu beharreko aldagaia da temperatura trenen testuinguruan, gauez eta egunez oso aldakorra izan daitekeelako herrialdearen arabera.
- Azelerometroaren neurketa-tartea 2g-ra (20 m/s^2 gutxi gorabehera) mugatu daiteke. Trenen operazioan gehienezko azelerazio balioa $0,6 \text{ m/s}^2$ ingurukoa da, dezeleraziotan $1,0 \text{ m/s}^2$ balioetara iritsiz (Heirich et al., 2011).
- Giroskopioaren kasuan hiru angelu neurtu behar dira:
 - Orientazioa: ingelesezko *heading* izenez ere ezaguna den parametroa erabiltzen da orientazioa neurtzeko eta ipar geografikotik aldenduriko angelua neurtzen da (Heirich et al., 2011). Trena martxan denean orientazioak trenbidearen kurbatura neurtzeko balio izango digu. Trenen kasuan, bihurguneak nahiko kurbatura txikia izaten dute; hala ere, tranbien kasuan 25-50 metroko kurba-erradioak egon daitezke. Zentzu honetan, errepidea eta trenbidea antzekotzat har daitezke.
 - Peraltea: Trenak bihurgune batean sartzean pairatzen duen inklinazioa litzateke peraltea. Oro har, segurtasun eta erosotasun irizpideen arabera diseinatuta egoten da. (Heirich et al., 2011)-n arabera balio maximoa 7° ingurukoa izaten da.
 - Malda: Trenbideak plano horizontalarekiko duen inklinazioa da malda. Trenen ibilbideetan ‰ balioak izaten ditu, izan ere gurgil eta trenbide atxikidura-baldintzek balio txikiak izatera behartzen dute. (Heirich et al., 2011)-n arabera balio maximoa $2,3^\circ$ izaten da. Hala ere, CAF-en proiektu batzuetan 6 gradurainoko balioak ikus daitezke (Zaragozako tranbia eta Bruselako metroa).
- Merkatuko IMU-ak aukeratzeko garaian, irizpide bat jartzekotan azelerometro eta giroskopioaren alborapena ezarri beharko litzateke, hau da, ingelesezko *bias* delakoa (nahiz eta temperatura deriba, egonkortasuna eta banda zabalera ere kontuan hartu beharrekoak diren). Kontuan hartu behar da alborapena denboran integratuz gero deriba bilakatzen dela. Azelerazioa, bitan integratuta posizioa jakiteko, deriba karratura hedatzen da; hortaz, azelerazioaren irakurketan akats bat badago, posizioan errorearen karratua ikusten da. Gomendagarriena, hortaz, ahalik eta alborapen txikiena bilatzea da.

4. Ondorioak eta etorkizunerako planteatutako norabidea

Lan honetan trenetan instalatu nahi diren sensore inertzialen baldintzak jasotzen dira trenaren testuingurua eta orain arte egin diren ikerketa lanak oinarritzat hartuz. Horrez gain, IMU-ak izan beharko lukeen arkitektura proposatzen da sensore kopurua eta motari dagokionez. Proposatutako ideiak kontuan hartuz, jarraian azaltzen dira lanaren ondorio garrantzitsuenak. Erakutsi dugun odometriako sistemak sensore inertzialak onartu behar ditu, baina baita trenetan gaur egun erabiltzen diren bestelako sensoreak ere. Gauzak horrela, posizio absolutua eta erlatiboa eskaintzen duten soluzioak bateratu behar direla ondorioztatu dugu, IMU-a sistema horren zati dela onartuz. IMU-aren arkitekturak 10 DOF izateko prest egon behar du, tren baten testuinguruan magnetometro eta barometroaren informazioa garrantzizko den ala ez demostratu daitekeen arte. Horrez gain, tenperatura-sensorea txertatzea aproposa dela esan daiteke, goizetik gauera 50 graduko aldea egon baitaiteke trenaren kokapenaren arabera. Arazo hau ingurugiroaren araberakoa dela ondorioztatu da, barneko objektuen kokapenean existitzen ez delako adibidez (tenperatura nahiko uniforme den ingurugiroa).

Hemendik aurrerako lana magnetometro eta barometroak odometrian izan dezakeen ekarpena aztertzean datza. Horretarako, trenean bertan saiakuntza bat edo beste egin beharko litzateke, trenaren inguruko eremu magnetikoak eta altitude-aldaketa txikiek eraginik ote duten ikus dadin. Eraginik izatekotan kuantifikatu egin beharko lirateke eta horrekin, baloratu ea ekarpen positibo edo negatiboa egiten duten.

5. Eskerrak

Lan honetako egileek CAF I+D enpresari eskertu nahi diote trenen inguruan duten ezagutza gurekin partekatzeagatik. Dударik gabe, beraien laguntzarik gabe ezin izango genuke lan hau argitaratu.

6. Erreferentziak

- Abyarjoo, F., Barreto, A., Cofino, J., & Ortega, F. R. (2015). Implementing a sensor fusion algorithm for 3D orientation detection with inertial/magnetic sensors. In *Innovations and Advances in Computing, Informatics, Systems Sciences, Networking and Engineering* (pp. 305–310). Springer. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-06773-5_41
- Allan, J. J., & International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (Eds.). (2004). *The high integrity GNSS,INS based train position locator*. Southampton: WIT Press.
- Allotta, B., Colla, V., & Malvezzi, M. (2002). Train position and speed estimation using wheel velocity measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 216(3), 207–225. <https://doi.org/10.1243/095440902760213639>
- Allotta, B., Pugi, L., Ridolfi, A., Malvezzi, M., Vettori, G., & Rindi, A. (2012). Evaluation of odometry algorithm performances using a railway vehicle dynamic model. *Vehicle System Dynamics*, 50(5), 699–724. <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.628681>
- B. Cai, & International Conference on Computers in Railways (Eds.). (2000). *Train positioning via integration and fusion of GPS and Inertial sensors*. Southampton: WIT.
- Bedrich, S., & Gu, X. (2004). GNSS-based sensor fusion for safety-critical applications in rail traffic. *Galileo and EGNOS Information Catalogue*, 8.
- Denti, E., Galatolo, R., & Schettini, F. (2010). An AHRS based on a Kalman filter for the integration of inertial magnetometric and GPS data. In *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*. Retrieved from http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2010/PAPERS/569.PDF
- Godha, S., & Cannon, M. E. (2005). Integration of DGPS with a low cost MEMS-based inertial measurement unit (IMU) for land vehicle navigation application. In *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS05)* (pp. 333–345). Retrieved from http://plan.geomatics.ucalgary.ca/papers/05GNSS_ION_Godha_Cannon.pdf
- Heirich, O. (2016). Bayesian Train Localization with Particle Filter, Loosely Coupled GNSS, IMU, and a Track Map. *Journal of Sensors*, 2016, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2016/2672640>
- Heirich, O., Lehner, A., Robertson, P., & Strang, T. (2011). Measurement and analysis of train motion and railway track characteristics with inertial sensors. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on* (pp. 1995–2000). IEEE. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6082908/>
- Hemerly, E. M., & Schad, V. R. (2008). Implementation of a GPS/INS/Odometer navigation system. In *ABCMSymposium Series in Mechatronics* (Vol. 3, pp. 519–524). Retrieved from http://www.abcm.org.br/symposium-series/SSM_Vol3/Section_IV_Sensors_and_Actuators/SSM3_IV_06.pdf
- Larsson, M. (2014). *Sensor fusion application to railway odometry*. Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:754317>
- Maklouf, O., Ghila, A., Abdulla, A., & Yousef, A. (2013). Low Cost IMU\backslash\$ GPS Integration Using Kalman Filtering for Land Vehicle Navigation Application. *International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering*, 7(2). Retrieved from <http://www.waset.org/publications/9996768>
- Malvezzi, M., Vettori, G., Allotta, B., Pugi, L., Ridolfi, A., & Rindi, A. (2014). A localization algorithm for railway vehicles based on sensor fusion between tachometers and inertial measurement units. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(4), 431–448. <https://doi.org/10.1177/0954409713481769>
- McCarron, B. (2013). *Low-Cost IMU Implementation via Sensor Fusion Algorithms in the Arduino Environment*. Citeseer. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.671.5301&rep=rep1&type=pdf>
- Mirabadi, A., Mort, N., & Schmid, F. (1996). Application of sensor fusion to railway systems. In *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 1996. IEEE/SICE/RSJ International Conference on* (pp. 185–192). IEEE. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/572176/>
- Munguía, R. (2014). A GPS-aided inertial navigation system in direct configuration. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(4), 803–814.
- Zhang, Q., Niu, X., Zhang, H., & Shi, C. (2013). Algorithm Improvement of the Low-End GNSS/INS Systems for Land Vehicles Navigation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2013/435286>