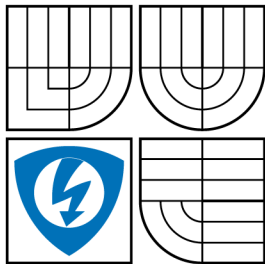


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

POKROČILÁ NAVIGACE V HETEROGENNÍCH MULTIROBOTICKÝCH SYSTÉMECH VE VNĚJŠÍM PROSTŘEDÍ

ADVANCED NAVIGATION IN HETEROGENEOUS MULTI-ROBOT SYSTEMS IN
OUTDOOR ENVIRONMENT

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. TOMÁŠ JÍLEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2015

ABSTRAKT

Dizertační práce pojednává o současných možnostech navigace pozemních mobilních robotů se zaměřením na dosažení vysoké absolutní shody žádané a skutečné trajektorie jejich pohybu. V práci jsou rozebrány současné možnosti klíčových sebelokalizačních metod – globálních družicových navigačních systémů, inerciálních navigačních systémů a odometrie. V jádru práce je popsána navigační metoda umožňující dosáhnout s uvedenými sebelokalizačními metodami centimetrové přesnosti sledování žádané trajektorie jízdy mobilního robotu. Nová navigační metoda je navržena s ohledem na její velmi snadnou parametrizovatelnost, respektující omezení použitého podvozku. Po vhodné parametrizaci navigační metody tak může být tato metoda nasazena na jakýkoliv typ podvozku. Koncepce navigační metody umožňuje integrovat a využívat současně více sebelokalizačních systémů a externích navigačních metod, což přispívá ke zvýšení celkové robustnosti procesu navigace mobilního robotu. Práce se dále zabývá řešením kooperované jízdy skupiny heterogenních mobilních robotů v konvoji. Navržené algoritmy byly ověřeny v reálných podmínkách provozu ve třech odlišných experimentech.

KLÍČOVÁ SLOVA

mobilní robot, sebelokalizace, navigace, RTK GNSS, INS, kinematika robotu, odometrie, datová fúze, konvoj

ABSTRACT

The doctoral thesis discusses current options for the navigation of unmanned ground vehicles with a focus on achieving high absolute compliance of the required motion trajectory and the obtained one. The current possibilities of key self-localization methods, such as global satellite navigation systems, inertial navigation systems, and odometry, are analyzed. The description of the navigation method, which allows achieving a centimeter-level accuracy of the required trajectory tracking with the above mentioned self-localization methods, forms the core of the thesis. The new navigation method was designed with regard to its very simple parameterization, respecting the limitations of the used robot drive configuration. Thus, after an appropriate parametrization of the navigation method, it can be applied to any drive configuration. The concept of the navigation method allows integrating and using more self-localization systems and external navigation methods simultaneously. This increases the overall robustness of the whole process of the mobile robot navigation. The thesis also deals with the solution of cooperative convoying heterogeneous mobile robots. The proposed algorithms were validated under real outdoor conditions in three different experiments.

KEYWORDS

mobile robot, self-localization, navigation, RTK GNSS, INS, robot kinematics, odometry, data fusion, convoy

JÍLEK, Tomáš *Pokročilá navigace v heterogenních multirobotických systémech ve vnějším prostředí*: dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2015. 176 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Pokročilá navigace v heterogenních multirobotických systémech ve vnějším prostředí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího doktorské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené doktorské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této doktorské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu dizertační práce panu doc. Ing. Luďkovi Žaludovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Také bych rád poděkoval Ing. Františku Burianovi, Ph.D. za technickou výpomoc při realizaci experimentů.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

1	Úvod	18
2	Navigace v mobilní robotice	22
2.1	Souřadnicové systémy a výpočty v nich	22
2.2	Sebelokalizace	24
2.2.1	Globální družicové navigační systémy	25
2.2.2	Inerciální navigační systémy	28
2.2.3	Odometrie a gyrodometrie	31
2.2.4	Metodiky vyjádření chyb pozice	33
3	Cíl dizertační práce	35
4	Navigační metoda	36
4.1	Reprezentace žádané trajektorie	40
4.2	Řešení navigační úlohy	42
4.3	Určení souřadnic aktuálního navigačního bodu	46
4.3.1	Nedosažená část žádané trajektorie	46
4.3.2	Minimální vzdálenost od navigačního bodu	47
4.3.3	Limit poloměru trajektorie	48
4.3.4	Konvergence k žádané trajektorii	49
4.4	Řízení pohybu mobilního robotu	51
4.5	Estimace a predikce sebelokalizačních řešení	54
4.6	Datová fúze sebelokalizačních řešení	56
4.7	Datová fúze na úrovni řízení pohybu robotu	56
5	Kinematika podvozků mobilních robotů	57
5.1	Smykem řízený podvozek	57
5.2	Šestikolový podvozek s nezávisle řízenými koly	61
6	Navigace v režimu konvoje	71
6.1	Podmínky navigace	71
6.2	Přenos dat mezi roboty	72
7	Popis použitých sebelokalizačních systémů	74
7.1	Inerciální navigační systém iMAR iTraceRT-F400E	75
7.2	GNSS přijímač Trimble BD982	76
7.3	Inerciální navigační systém SBG Ellipse-E	78
7.4	Inerciální navigační systém Xsens MTi-G-700	79

8	Realizované experimenty	81
8.1	Ověření přesnosti GNSS přijímače BD982	81
8.2	Plošné měření intenzity gama záření	84
8.3	Porovnání sebelokalizačních metod	89
8.4	Použití více navigačních metod pro režim konvoje	97
9	Zhodnocení a závěr	103
	Literatura	105
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	110
	Seznam příloh	116
A	Mobilní robotický mapovací systém envMap	117
B	Plošné měření intenzity gama záření	119
C	Porovnání sebelokalizačních metod	121
C.1	Experiment č. 1	122
C.2	Experiment č. 2	124
C.3	Experiment č. 3	126
C.4	Experiment č. 4	128
C.5	Experiment č. 5	130
C.6	Experiment č. 6	132
C.7	Experiment č. 7	134
C.8	Experiment č. 8	136
C.9	Experiment č. 9	138
C.10	Experiment č. 10	140
C.11	Experiment č. 11	142
C.12	Experiment č. 12	144
C.13	Experiment č. 13	146
C.14	Experiment č. 14	148
C.15	Experiment č. 15	150
C.16	Experiment č. 16	152
C.17	Experiment č. 17	154
C.18	Experiment č. 18	156
C.19	Experiment č. 19	158
C.20	Experiment č. 20	160
C.21	Experiment č. 21	162
C.22	Experiment č. 22	164

C.23 Experiment č. 23	167
C.24 Experiment č. 24	169
C.25 Experiment č. 25	171
C.26 Experiment č. 26	173
C.27 Experiment č. 27	175
C.28 Experiment č. 28	176

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Dostupné mobilní roboty – Orpheus-Explorer, Orpheus-AC, Scorpio . . .	20
1.2	Mobilní roboti Orpheus-X3 a Taros 6x6 V2 [2]	21
2.1	Zobrazení geodetické křivky Γ na referenční kouli	24
2.2	Využití RTK řešení k přesné 5DOF sebelokalizaci	28
2.3	Základní princip strap-down INS – řešení orientace	29
2.4	Základní princip strap-down INS – řešení pozice	30
2.5	Transformace změny Δs_R ujeté vzdálenosti a změny $\Delta \alpha_R$ azimutu do souřadnic horizontální roviny	32
2.6	Význam pravdivosti, preciznosti a přesnosti měření	34
4.1	Ideové blokové schéma navržené navigační metody	36
4.2	Rozšířené blokové schéma realizované navigační metody	37
4.3	Zobrazení oblasti změn vlastností trajektorie, při kterých dochází ke vzorkování bodů	42
4.4	Schéma řešení navigační úlohy	44
4.5	Statická převodní funkce mezi veličinami l_{RN} a $ v_{R,lim} $	45
4.6	Nedosažená část žádané trajektorie	46
4.7	Vyhovující (vlevo) a mezní (vpravo) uspořádání bodů R a N vzhledem k žádané trajektorii	47
4.8	Nevyhovující pozice bodu N	47
4.9	Vzdálenost mezi aktuální pozicí robotu a aktuálním navigačním bodem	48
4.10	Určení poloměru kruhového oblouku, po kterém lze dojet do bodu N . .	49
4.11	Odvození limitu $l_{RN,min}^k$ pro potlačení oscilací	50
4.12	Definice dopředné v_R a úhlové ω_R rychlosti robotu	51
4.13	Profil maximální velikosti dopředné rychlosti v_R robotu	51
4.14	Typická přenosová charakteristika použitého regulátoru azimutu	52
4.15	Příklad rychlostního profilu a přenosové charakteristiky regulátoru azimutu pro různé hodnoty $\beta_R^{r,min}$	53
4.16	Naměřená zpoždění získaných sebelokalizačních dat v řídicím systému navigace	54
5.1	Kinematický model smykem řízeného podvozku	58
5.2	Nalezení řešení kinematické úlohy vyhovujícího fyzikálním omezením použitého podvozku mobilního robotu	60
5.3	Kinematický model šestikolového podvozku v režimu kruh	62
5.4	Orientace limitujících veličin při natočení kol vpravo	63
5.5	Orientace limitujících veličin při natočení kol vlevo	63
5.6	Schéma pro odvození rychlosti a stranového natočení kola č. 1	64
5.7	Schéma pro odvození rychlosti a stranového natočení kola č. 2	64

5.8	Nalezení řešení kinematické úlohy vyhovujícího fyzikálním omezením použitého podvozku mobilního robotu	66
5.9	Schéma pro odvození přímé kinematiky pro kolo č.1 při jeho natočení vpravo	68
5.10	Schéma pro odvození přímé kinematiky pro kolo č.1 při jeho natočení vlevo	68
5.11	Schéma pro odvození přímé kinematiky pro kolo č.2 při jeho natočení vpravo	69
5.12	Schéma pro odvození přímé kinematiky pro kolo č.2 při jeho natočení vlevo	69
6.1	Stavový diagram procesu navigace robotu v konvoji	71
6.2	Povolená zóna pohybu při podkročení limitní vzdálenosti mezi navigovaným a nejbližším okolním robotem	73
6.3	Převodní funkce pro velikost externí limitní dopředné rychlosti robotu	73
7.1	Fotografie použitých sebelokalizačních systémů	74
7.2	Fotografie GNSS/INS systému iMAR iTraceRT-F400E	76
7.3	Fotografie GNSS přijímače Trimble BD982	78
7.4	Fotografie INS SBG Ellipse-E	78
7.5	Fotografie INS Xsens MTi-G-700	80
8.1	Zaměrování referenčních bodů na střeše budovy E objektu T12	81
8.2	Mapa referenčních bodů v areálu T12	82
8.3	Hustoty pravděpodobnosti výskytu odchylek pro jednotlivé souřadnice	83
8.4	Distribuční funkce velikosti odchylek pro jednotlivé souřadnice	83
8.5	Orpheus-X3 upravený pro měření gama záření – pohled zepředu	84
8.6	Orpheus-X3 upravený pro měření gama záření – pohled zezadu	85
8.7	Referenční GNSS stanice a stanoviště pro řízení experimentu	85
8.8	Mapa intenzity gama záření integrovaná do leteckého snímku	86
8.9	Skutečná trajektorie hrubého mapování (vlevo) a výsledná mapa intenzity gama záření (vpravo) získané na základě RTK řešení pozice z BD982	87
8.10	Skutečná trajektorie hrubého mapování (vlevo) a mapa intenzity gama záření (vpravo) získané z L1 GPS přijímače integrovaného ve snímači gama záření	87
8.11	Skutečná trajektorie detailního mapování (vlevo) a výsledná mapa intenzity gama záření (vpravo) získané na základě RTK řešení pozice z BD982	88
8.12	Skutečná trajektorie detailního mapování (vlevo) a mapa intenzity gama záření (vpravo) získané z L1 GPS přijímače integrovaného ve snímači gama záření	88

8.13	Mobilní robot Orpheus-X3 upravený pro experimenty	91
8.14	Odchytky pozice při hodnocení výsledků sebelokalizace	92
8.15	Odchytky pozice při hodnocení výsledků navigace	92
8.16	Střední hodnota velikosti odchylek pozice mobilního robotu při hodnocení kvality sebelokalizace a navigace	93
8.17	Hodnoty absolutního koeficientu a_0 polynomiální náhrady vývoje velikosti odchylek sebelokalizace a navigace v závislosti na ujeté vzdálenosti	94
8.18	Hodnoty lineárního koeficientu a_1 polynomiální náhrady vývoje velikosti odchylek sebelokalizace a navigace v závislosti na ujeté vzdálenosti	95
8.19	Hodnoty koeficientu a_2 kvadratického členu polynomiální náhrady vývoje velikosti odchylek sebelokalizace a navigace v závislosti na ujeté vzdálenosti	97
8.20	Mobilní robot Taros 6x6 V2 použitý v experimentu	98
8.21	Mobilní robot Orpheus-X3 použitý v experimentu	99
8.22	Mobilní roboti Orpheus-X3 a Taros 6x6 V2 v konvoji	100
8.23	Trajektorie (žlutá) vedoucího robotu (Orpheus-X3) konvoje a trajektorie (modrá) druhého robotu (Taros 6x6 V2) v konvoji	100
8.24	Přepínání navigačních metod v průběhu jízdy	101
8.25	Blokové schéma realizace experimentu	101
8.26	Operátor s robotem Orpheus-X3 a bezdrátovým ovládacím terminálem	102
A.1	Mobilní robotický mapovací systém envMap	118
A.2	Blokové schéma měřicí části systému envMap	118
A.3	Blokové schéma řídicí části systému envMap	118
B.1	Definování oblasti k mapování	119
B.2	Skutečné trajektorie hrubého mapování – podélné a příčné	120
B.3	Skutečné trajektorie detailního mapování – podélné a příčné	120
C.1	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	122
C.2	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	122
C.3	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	123
C.4	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	124
C.5	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	124
C.6	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	125
C.7	Odchytky $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	125
C.8	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	126

C.9	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	126
C.10	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	127
C.11	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	127
C.12	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	128
C.13	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	128
C.14	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	129
C.15	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	129
C.16	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	130
C.17	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	130
C.18	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	131
C.19	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	131
C.20	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	132
C.21	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	132
C.22	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	133
C.23	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	133
C.24	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	134
C.25	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	134
C.26	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	135
C.27	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	135
C.28	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	136
C.29	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	136
C.30	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	137

C.31	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	137
C.32	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	138
C.33	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	138
C.34	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	139
C.35	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	139
C.36	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	140
C.37	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	140
C.38	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	141
C.39	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	141
C.40	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	142
C.41	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	142
C.42	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	143
C.43	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	143
C.44	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	144
C.45	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	144
C.46	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	145
C.47	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	145
C.48	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	146
C.49	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	146
C.50	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	147
C.51	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	148
C.52	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	148

C.53	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . . .	149
C.54	Odchytky $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	149
C.55	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	150
C.56	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	150
C.57	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . . .	151
C.58	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	152
C.59	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	152
C.60	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . . .	153
C.61	Odchytky $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	153
C.62	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	154
C.63	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	154
C.64	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . . .	155
C.65	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	156
C.66	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	156
C.67	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . . .	157
C.68	Odchytky $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	157
C.69	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	158
C.70	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	158
C.71	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . . .	159
C.72	Odchytky $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	159
C.73	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	160
C.74	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	160

C.75	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . . .	161
C.76	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	161
C.77	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	162
C.78	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	162
C.79	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	163
C.80	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	163
C.81	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	164
C.82	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	165
C.83	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	165
C.84	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	166
C.85	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	167
C.86	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	167
C.87	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	168
C.88	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	168
C.89	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	169
C.90	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	169
C.91	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	170
C.92	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	170
C.93	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	171
C.94	Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	171
C.95	Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	172
C.96	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	173

C.97	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	173
C.98	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	174
C.99	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	174
C.100	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	175
C.101	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	175
C.102	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	176
C.103	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	176
C.104	2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ	176
C.105	Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu	176
C.106	Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . .	177
C.107	Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy	177

SEZNAM TABULEK

2.1	Vybrané statistické chybové charakteristiky [18]	34
4.1	Konfigurovatelné parametry procesu vzorkování trajektorie	43
4.2	Konfigurovatelné parametry výpočtu navigačního řešení	45
4.3	Konfigurovatelné parametry řízení pohybu mobilního robotu	53
7.1	Základní parametry iMAR iTraceRT-F400E dle specifikace [20]	75
7.2	Předpokládané přesnosti (1σ) při výpadku RTK řešení [20]	76
7.3	Základní parametry použitého přijímače BD982 dle specifikace [31]	77
7.4	Přesnost (1σ) přijímače BD982 dle specifikace [31]	77
7.5	Základní parametry použitého zařízení Ellipse-E dle specifikace [30]	79
7.6	Předpokládané přesnosti (1σ) při výpadku RTK řešení [30]	79
7.7	Základní parametry použitého INS MTi-G-700 dle specifikace [34]	80
7.8	Přesnost (1σ) použitého INS MTi-G-700 dle specifikace [34]	80
8.1	Seznam provedených experimentů pro srovnání sebelokalizačních metod	89
8.2	Seznam provedených experimentů pro vyhodnocení navigace	90
8.3	Seznam provedených experimentů pro ověření přepínání sebelok. metod	90

1 ÚVOD

Dlouhodobým trendem mobilní robotiky je snaha dosáhnout úplné nebo alespoň částečné autonomie mobilních robotů. Jedním z autonomních principů jejich chování je i schopnost autonomně řízeného pohybu na základě definovaného úkolu. V současnosti již existuje řada komerčních realizací, které využívají pro navigaci mobilních prostředků přesné metody určení absolutní pozice a orientace v globálním souřadnicovém systému. Tyto metody však obvykle předpokládají specifické pracovní podmínky, které jsou pro danou aplikaci dosažitelné a relativně snadno splnitelné. Jako typický příklad můžeme jmenovat obdělávání polí částečně nebo plně autonomními zemědělskými stroji [25]. Tyto aplikace jsou často založeny pouze na využití GNSS přijímačů s RTK řešením pozice nebo s jiným způsobem zpřesnění základního principu určení pozice. Dosažení centimetrové přesnosti řešení pozice na otevřeném terénu s dobrou dostupností GNSS signálů již dnes nečiní větší problémy.

Komplikace ovšem nastávají v prostředích se zhoršeným příjmem GNSS signálů, při řešení náročnějších nebo obecnějších problémů spadajících do oblasti, souhrnně pojmenované jako *servisní robotika (field robotics)*. Příkladem může být široce zkoumaný problém vyhledávání osob v neštěstím postižené oblasti. Je evidentní, že má-li být robot schopen úspěšné autonomní činnosti v tomto typu misí, musí být schopen se nejen pohybovat, ale také přesně sebelokalizovat ve velmi širokém spektru situací – od otevřené krajiny přes vegetací pokryté plochy až po urbanistické oblasti s množstvím budov či sutin, s částečně nebo úplně zakrytým výhledem nejen na oblohu, ale i na okolí, elektromagnetickým rušením a dalšími nežádoucími vlivy. To vše klade mnohem vyšší nároky na sebelokalizační systém robotu ve srovnání s dříve jmenovanými jednoduchými specifickými situacemi. Prakticky vždy to v současnosti s sebou nese nutnost získávat a zpracovávat data z více zdrojů a výslednou pozici určovat na základě datové fúze.

Autonomní pohyb mobilního robotu v sobě zahrnuje řešení několika dílčích problémů [8]. Zcela klíčovou úlohou je již zmíněné určení dostatečně přesné pozice a orientace mobilního robotu ve zvoleném souřadnicovém systému. Druhou z dílčích úloh je stanovení pozice cíle. Poslední z úloh řeší způsob dosažení cílové pozice z místa aktuální pozice mobilního robotu. V případě operátorem dálkově řízeného mobilního robotu vychází řešení většiny nebo všech jmenovaných úloh ze schopností operátora. Nároky na přesnost určení pozice robotu jsou v tomto případě menší, než pro autonomní režim. Operátor dokáže na základě svých znalostí a zkušeností stanovit nejvhodnější postup pro dosažení zvoleného cíle. Řízení pohybu robotu nevychází jen z pozice robotu v mapě terénu, ale využívá v případě potřeby, také data z dalších osazených zařízení, jako jsou např. kamery pracující ve viditelné nebo infračervené části spektra elektromagnetického záření, dálkoměrné skenery a senzory

dalších fyzikálních veličin. Je tedy jasně patrné, že nahrazení operátora přímou strojovou realizací jeho postupů řízení je značně komplikovaná úloha. Strojové řízení ale obecně ve srovnání s lidským přináší značné výhody – vysoká opakovatelnost prováděných dějů, omezení lidského faktoru (únava, nepozornost, apod.) a v neposlední řadě také rychlost odezvy a rychlost celkového řešení dané úlohy. Výhodami lidské obsluhy stále zůstává její univerzálnost.

Dostupnost přesné autonomní navigace mobilního robotu po žádané trajektorii jeho pohybu je přínosem pro mnoho aplikací. Malé průzkumné roboty mohou provádět vzdálený průzkum prostředí po předem známé průjezdné trase, bez potřeby autonomního přeplánování trajektorie vlivem nepřesné navigace. V úloze mapování prostředí je často požadováno dodržet přesnou trajektorii, na které jsou měřené veličiny získávány. Z opakovaných měření v časových rozestupech lze potom stanovit vývoj změn hodnot měřené veličiny.

Přesná navigace je také přínosem v situacích, kdy již byla daná trajektorie jednou mobilním robotem úspěšně projeta. Může tak být snadno řešen např. problém náhlé ztráty bezdrátového spojení s mobilním robotem. Robot se může v této situaci automaticky navrátit zpět po trajektorii, po které se do problematického místa dostal. Vzhledem k možné existenci úzkých koridorů (mosty apod.) musí být v takovéto aplikaci zajištěna vysoká opakovatelnost trajektorie pohybu.

Upravenou trajektorii, získanou z pohybu malého průzkumného robotu nebo osoby provádějící průzkum, je možné také použít pro navigaci větších mobilních robotů, které disponují možností přepravy materiálu nebo osob. Dopravení podpůrného vozidla do potřebného místa, tak již kromě vydání samotného pokynu, nevyžaduje žádný další uživatelský zásah do celého procesu.

Dizertační práce se zabývá řešením autonomní jízdy pozemních mobilních robotů na základě známé žádané trajektorie jejich pohybu s důrazem na dosažení vysoké shody žádané a skutečné trajektorie. Pohyb mobilního robotu je předpokládán v obecném neznámém terénu, který není možné předem modifikovat (umístěním orientačních bodů, změnou geometrické dispozice apod.). Koncept zvolené navigace proto stojí na využití globálních lokalizačních systémů poskytujících pozici a orientaci mobilního robotu ve zvoleném souřadnicovém systému. Navržené metody uvažují aspekty navigace mobilních prostředků v reálných podmínkách vnějšího prostředí. Mezi ně obecně patří výpadek nebo selhání některé z lokalizačních metod, selhání výpočetního systému apod. Pro zajištění dostatečné robustnosti, vyhovující danému účelu je proto nutné použít prvky, které zajistí bezproblémovou funkčnost i v uvedených nestandardních situacích. V práci je proto zohledněna možnost použití více samostatných sebelokalizačních systémů. Pro další zvýšení robustnosti je umožněna i kombinace jednotlivých řešení pohybu mobilního robotu získaných z odlišných, samostatně pracujících navigačních metod.

Vyvinutá a v této dizertační práci prezentovaná nová navigační koncepce byla průběžně testována s mobilními roboty, které byly dostupné na Ústavu automatizace a měřicí techniky FEKT VUT v Brně. Všechny tyto roboty je možné teleprezenčně ovládat prostřednictvím jednotného uživatelského rozhraní CASSANDRA [35][11], jenž je pro tento účel speciálně dlouhodobě vyvíjeno. V práci popsaná navigační metoda umožní významně rozšířit portfolio dostupných schopností celého robotického systému. Fotografie některých mobilních robotů, které jsou začleněny do systému CASSANDRA, jsou uvedeny na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Dostupné mobilní roboty – Orpheus-Explorer, Orpheus-AC, Scorpio

Pro ověřování vlastností sebelokalizačních metod a implementovaných algoritmů navigační metody vznikl speciálně pro tuto aplikaci mobilní robot envMap (viz příloha A). Experimenty verifikující reálná nasazení byly prováděny s roboty Orpheus-X3 [5] (obrázek 1.2 vlevo), Orpheus-AC (obrázek 1.1 uprostřed) a Taros 6x6 V2 [2] (obrázek 1.2 vpravo). Taros 6x6 V2 je vyvíjen podnikem VOP CZ, s. p.

Je třeba uvést, že tato celá práce je součástí širšího celku. Již dříve zmíněný multiplatformní robotický systém CASSANDRA je ve skupině Robotika a umělá inteligence na Ústavu automatizace a měřicí techniky vyvíjen více než deset let a zde prezentované řešení navigace určené pro vnější prostředí je jednou z jeho součástí. V současnosti je dále vyvíjen systém pro vnitřní sebelokalizaci pomocí optických proximitních skenerů (řeší Ing. Aleš Jelínek), systém pro multispektrální datovou fúzi (řeší Ing. Petra Kocmanová) a multispektrální mapování v multirobotických systémech (řeší Ing. František Burian, Ph.D.). Dále jsou rozvíjeny i jednotlivé robotické platformy, především roboty Orpheus experimentální řady (Orpheus-X3,



Obr. 1.2: Mobilní roboti Orpheus-X3 a Taros 6x6 V2 [2]

Orpheus-X4 a Orpheus XTA). Navíc je možné pro potřeby experimentů do systému zahrnout i další mobilní prostředky, například již dříve zmiňovaný mobilní robot Taros 6x6 V2. Zde prezentovaná práce tedy již nyní je, a v budoucnu bude, využívána jako součást širšího celku. To však také znamená, že nepochybně nejde o dokončený projekt, který bude nutné dále vyvíjet a modifikovat podle aktuálních potřeb.

2 NAVIGACE V MOBILNÍ ROBOTICE

Navigace v pojetí mobilní robotiky představuje proces automatického řízení pohybu mobilního robotu za účelem dosažení zvoleného cíle [6],[18]. Obecně se tato úloha dělí na jednotlivé části [8], které samostatně řeší:

- **sebelokalizaci** – kde se robot aktuálně nachází
- **cíl cesty** – koncový bod trajektorie nebo účel této trajektorie
- **realizaci trajektorie** – plánování pohybu mobilního robotu

Způsobů řešení uvedených částí existuje v současnosti nespočet. Velmi často jsou tato řešení založena na použití [28]:

- globálních družicových navigačních systémů
- inerciálních navigačních systémů
- dead-reckoning metod založených na kinematice stroje
- laserových skenerů a dálkoměrných kamer
- pozemních radiofrekvenčních systémů lokalizace
- strojového zpracování obrazu z kamer

2.1 Souřadnicové systémy a výpočty v nich

Pro úlohu sebelokalizace mobilního robotu musí být nejprve definován souřadnicový systém, ve kterém bude lokalizace mobilního robotu realizována. Souřadnicové systémy lze rozdělit podle rozsahu použití na globální a lokální a také podle jejich typu na prostorové a rovinné. Globální souřadnicové systémy se používají pro popis pozice v kontextu celé zeměkoule. Typickým globálním souřadnicovým systémem je WGS-84 [3], který je využíván systémem GPS. Součástí tohoto standardu je definice referenčního aproximujícího elipsoidu a odchylky od něj popisujícího geoidu EGM84. Dalším často používaným systémem je *univerzální transversální Mercatorův systém souřadnic* (UTM) [23], který dělí zemský povrch do 60ti zón. Tento systém představuje zobrazení zón (část povrchu rotačního elipsoidu) do roviny. Výhodou tohoto systému je možnost přímé realizace metrických operací s jednotlivými body oproti systémům s polárními souřadnicemi – např. WGS-84, který využívá dvě polární souřadnice a jednu metrickou souřadnici. Vzhledem k tomu, že tyto systémy jsou platné celosvětově, vzniká problém s časovou stabilitou souřadnic bodů, ležících na odlišných kontinentálních deskách. Proto jsou pro jednotlivé kontinentální desky definovány souřadnicové systémy, které jsou ukotveny k dané kontinentální desce v několika definovaných bodech, které jsou součástí definičního rámce daného souřadnicového systému. Změna souřadnic daného bodu, ke které dochází vlivem po-

hybu kontinentální desky, na které daný bod leží, je tímto přístupem řádově snížena. Pro euroasijskou kontinentální desku se používá systém ETRS-89. Způsob realizace tohoto systému na základě GNSS technologií je popsán v [10].

Na úrovni států se používají specifické souřadnicové systémy, definující postupy, které minimalizují transformační chybu mezi vyjádřením pozice polárními souřadnicemi a metrickými souřadnicemi pravoúhlé souřadnicové sítě. Tyto systémy využívají bodových polí pro definici transformačního klíče pro danou oblast. Na území České a Slovenské republiky se pro tyto účely používá systém S-JTSK.

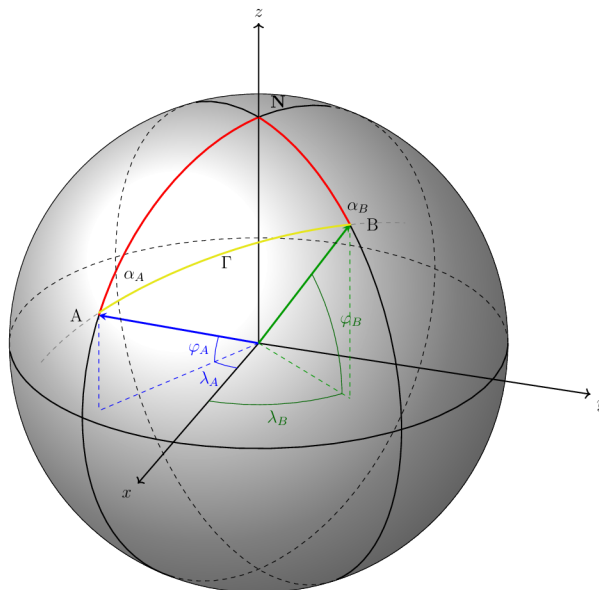
Pro účely mobilní robotiky se často používají lokální kartézské souřadnicové systémy (*local level frame*) s rozsahem platnosti jednotlivých os v řádu stovek metrů. V těchto případech lze použít pro transformaci mezi polárními souřadnicemi a souřadnicemi pravoúhlé mřížky, lineárních náhrad vybraných částí transformačního postupu. Tím dojde ke zjednodušení celého transformačního procesu.

Pro popis umístění senzorů na mobilním robotu je použit souřadnicový systém, který je fixován k mobilnímu robotu (*vehicle frame*). Souřadnicový systém spojený s tělem senzoru je označován jako *body frame*.

Výpočty v globálních souřadnicových systémech

Obecně je vyžadována možnost realizace dvou typů výpočtů, jenž jsou vzájemně inverzními úlohami. První z úloh, tzv. přímá geodetická úloha [32] má zadány souřadnice výchozího bodu a parametry spojnice mezi počátečním a koncovým bodem (typicky délka a počáteční azimut spojnice). Úloha řeší nalezení souřadnic koncového bodu. Tuto úlohu lze použít např. při výpočtu pozice mobilního robotu v globálním souřadnicovém systému na základě aktualizace jeho polohy některou z relativních lokalizačních metod (odometrie apod.). Druhá, tzv. inverzní geodetická úloha řeší výpočet parametrů spojnice mezi dvěma zadanými body. Tuto úlohu lze použít pro řešení navigace mobilního robotu – při výpočtu jeho žádaného směru pohybu.

Uvedená spojnice mezi dvěma body ležícími na referenčním elipsoidu daného souřadnicového systému může být představována mnoha křivkami odlišných vlastností. Praktický význam mají zejména dvě křivky nazývané loxodroma a ortodroma [32]. Pro další úvahy bude referenční elipsoid aproximován náhradní koulí pro danou oblast. Toto zjednodušení je možné provést, protože uvažované vzdálenosti na elipsoidu budou zanedbatelné vzhledem k rozměrům jeho poloos. Loxodroma protíná poledníky vždy pod stejným azimutem. Rozšířením této křivky, podle její definice, za daný počáteční a koncový bod vznikne neuzavřená křivka, jejíž oba konce směřují k pólům. Ortodroma je částí kružnice, na které leží počáteční a koncový bod. Ortodroma neprotíná poledníky pod stejným úhlem a nikdy není delší než loxodroma.



Obr. 2.1: Zobrazení geodetické křivky Γ na referenční kouli

Postupy jednotlivých výpočtů, na kterých lze založit implementaci, je možné nalézt v publikacích [29],[32],[33],[14].

2.2 Sebelokalizace

Obecná úloha lokalizace řeší určení souřadnic pozice a úhlů orientace daného objektu. Nejčastěji je pro určování pozice mobilního robotu zvolen počátek jeho lokálního souřadnicového systému. Pozice mobilního robotu potom představuje pozici uvedeného počátku souřadnicového systému v předem zvoleném souřadnicovém systému, který je spojen s prostorem, ve kterém se robot pohybuje. V mobilní robotice se často setkáváme se speciálním případem lokalizace a to sebelokalizací, kdy robot autonomně určuje souřadnice své pozice a úhly své orientace. Sebelokalizace má v obecném prostředí šest stupňů volnosti. Ve specifických případech může být ale počet stupňů volnosti menší – např. uvnitř budov se často uvažují pouze tři stupně volnosti – dvě poziční souřadnice horizontální roviny a jeden úhel orientace (typicky azimut).

Sebelokalizace mobilního robotu může být řešena mnoha odlišnými způsoby. Každý ze způsobů je ale vždy určitým kompromisem mezi zvolenými kritérii. Univerzální a dobře fungující řešení za všech okolností v současné době stále neexistuje.

Pro navigační metodu popsanou v této dizertační práci jsou v kontextu jejího nasazení důležité sebelokalizační systémy, jejichž funkce není plošně omezena a nevyžadují předchozí uživatelskou modifikaci prostředí, ve kterém se robot pohybuje,

ani exaktní znalost jeho prostorového uspořádání (digitální 3D mapa). Základní sebelokalizační metody, se kterými se počítá při použití navigační metody, jsou:

- **globální družicové navigační systémy** (GNSS)
- **inerciální navigační systémy** (INS)
- **dead-reckoning metody** – odometrie a gyrodometrie

2.2.1 Globální družicové navigační systémy

Globální družicové navigační systémy představují celosvětově dostupné služby, které umožňují autonomní určení pozice uživatelských GNSS přijímačů. Pro určení globální pozice jsou použity elektromagnetické vlny vysílané nestacionárními družicemi, které obíhají zemi ve výšce přibližně 20 km nad zemským povrchem [22].

V současné době lze považovat za plně použitelné globální družicové navigační systémy americký systém GPS a ruský systém GLONASS. V dohledné době se předpokládá také zahájení funkčnosti evropského systému GALILEO. V budoucnu lze také předpokládat rozšíření funkčnosti čínského systému Compass (Beidou-2) tak, aby bylo možné získat celosvětově samostatné poziční řešení z tohoto systému bez nutnosti kombinace signálů z ostatních systémů.

Režimy řešení pozice

Současné pokročilé GNSS přijímače mohou poskytovat poziční řešení získané v různých režimech své funkce. Klíčovým rozdílem je princip měření vzdálenosti mezi družicí a anténou GNSS přijímače. Měření vzdálenosti využívá buď tzv. kódový nebo fázový princip měření. Kódové měření vzdálenosti je založeno na hledání časového zpoždění přijímaného signálu jeho korelací s předem známou kódovou sekvencí. Na základě takto určené doby šíření elektromagnetické vlny z dané družice a předpokládané rychlosti šíření vlny v prostředí je určena vzdálenost mezi družicí a přijímací anténou GNSS přijímače. Dalším z možných způsobů určení vzdálenosti je určení souhrnného fázového posuvu nosné elektromagnetické vlny. Toto měření přináší řádově lepší rozlišení. Délka jednoho bitu v prostoru je u kódového měření pro L1 GPS C/A kód přibližně 300 m, pro L1 GPS P(Y) kód přibližně 30 m. Délka nosné elektromagnetické vlny v prostoru je přibližně 0,19 m pro pásmo L1 a přibližně 0,24 m pro pásmo L2 [22]. Zde je patrná teoretická možnost dosažení podstatně lepší přesnosti měření vzdálenosti při předpokladu stejné procentuální přesnosti měření dané primární veličiny. Měření fázového zpoždění GNSS signálů, způsobeného dobou jejich šíření, ale zahrnuje několik poměrně velkých komplikací. Předním problémem je velmi nízká úroveň samotného nosného signálu, která je často pod úrovní šumu. Kódové měření se také potýká s tímto problémem, ale tam je možné úspěšně daný kód identifikovat na základě znalosti jeho průběhu a použití korelace. Druhým

problémem je krátká perioda nosné vlny, takže signál pro dálkoměrné měření se na měřeném úseku několikrát opakuje. Pro celkový fázový posuv je tedy nutné určit celkový počet period nosného signálu a tzv. fázový doměrek.

Autonomní řešení pozice je založeno pouze na příjmu signálů z družic GNSS systémů, bez využívání jakýchkoli doplňujících nebo korekčních dat. Tento typ řešení využívá vždy pouze kódové měření vzdálenosti. Přesnost tohoto řešení závisí výrazněji na aktuálních podmínkách – obecně se pohybuje v jednotkách metrů.

Diferenciální řešení pozice, často označované jako DGNSS, pracuje s korekčními daty určenými pro kódové měření. Korekční data mohou být získána jejich příjmem z družice nebo z pozemní korekční stanice nebo sítě. Přesnost tohoto řešení pozice nebývá lepší než 0,25 m (horizontální DRMS) při použití GBAS. Pro SBAS jsou typicky výsledky horší z důvodu použití korekcí platných pro rozsáhlejší území a nikoliv pro rozsah jednotek kilometrů jako u GBAS. Typická přesnost horizontální pozice je 0,5 m (DRMS).

RTK řešení pozice je založeno na fázovém měření vzdálenosti a použití korekčních dat v reálném čase pro měření fáze. Jedná se o nejpokročilejší režim určení pozice v reálném čase, kterým disponují současné GNSS přijímače. Korekční data bývají nejčastěji získána přenosem pomocí datových sítí přímo z pozemního podpůrného systému (GBAS). Jedná se vždy o služby třetích stran, které jsou často zpoplatněny.

Existují i další řešení využívající převážně korekčních dat distribuovaných přes družice. Tyto systémy buď nedosahují přesnosti RTK řešení, nebo jsou primárně určeny pro měření statických bodů. Jejich výhodou je celosvětová dostupnost korekčních dat, která nevyžaduje externí přijímače korekčních dat, jako je tomu např. u RTK řešení.

Podpůrné systémy

Podpůrné systémy pro existující GNSS umožňují dosažení vyšší přesnosti určení pozice než při použití samotných GNSS. Tyto systémy jsou často samostatně provozovány třetími stranami. Jejich rozdělení lze provést na základě použitého způsobu přenosu dat.

Rozšiřující systémy využívající pro distribuci korekčních dat geostacionární družice jsou označovány jako SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*). Výhodou těchto systémů je, že jejich uživatelé nepotřebují další vybavení pro získání korekčních dat a často také celosvětová dostupnost těchto dat. Nevýhodou ovšem může být omezený příjem signálu, daný nevhodnou observací z daného měřicího místa. Korekce jsou typicky určeny pro větší území, není možné distribuovat individuální

řešení pro každého uživatele. Existuje několik komerčních služeb, některé nabízí celosvětové pokrytí, jiné jsou určeny pouze pro specifickou oblast. Pro oblast Evropy lze použít:

- **Omnistar** – celosvětová služba, korekční data pro obě frekvenční pásma, nutnost počáteční konvergence, přesnost až 5/10 cm
- **StarFire** – celosvětová služba, použití proprietárních uživatelských přijímačů, přesnost až 5 cm, provozovatelem je Navcom
- **Egnos** – služba určená pro zlepšení vlastností GPS na evropském kontinentu, provozovatelem je ESA, přesnost 0,5/1 m

Pozemní podpůrné systémy (GBAS – *Ground Based Augmentation Systems*) mohou být realizovány samostatnými GNSS přijímači se známou pozicí jejich přijímačích antén nebo skupinou plošně rozmístěných GNSS přijímačů tvořící síť permanentních stanic. Síť permanentních stanic může poskytovat korekce z vypočítané tzv. virtuální referenční stanice (VRS).

V České republice je dostupných několik sítí permanentních stanic odlišných provozovatelů. Mezi plnohodnotné sítě s celoplošným pokrytím patří:

- **CZEPOS** – česká síť stanic provozovaná Zeměměřičským úřadem
- **VRS Now** – evropská síť stanic provozovaná společností Trimble
- **TopNet** – česká síť stanic provozovaná společností GB-geodezie

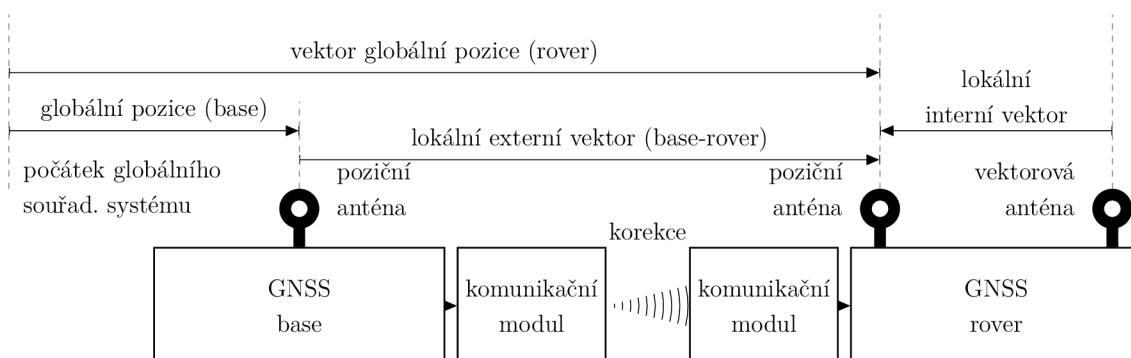
Režimy použití

Referenční stacionární stanice se typicky využívá v situaci, kdy je potřeba přesně měřit absolutní pozici mobilního přijímače v globálním souřadnicovém systému. GNSS přijímač základny generuje korekční data v reálném čase pro kódové nebo fázové měření, případně obojí na základě znalosti přesné pozice své přijímačích antény, která je určena jinou metodou nebo dlouhodobým GNSS měřením. Přesnost určení pozice na mobilním přijímači se skládá z přesnosti použitých souřadnic stacionární základny a přesnosti měření relativního pozičního vektoru mezi anténou základny a anténou mobilního přijímače. Přesnost určení tohoto vektoru je tvořena pevnou složkou a lineární složkou, která je závislá na vzdálenosti od referenční stanice.

Pohyblivá referenční stanice je určena zejména pro případ, kdy je požadována znalost vektoru, jehož počáteční a koncový bod je pohyblivý. Koncový bod vektoru je definován přijímačích anténou druhého GNSS přijímače. V této situaci není typicky předmětem měření absolutní pozice počátečního a koncového bodu vektoru, ale pouze měření samotného vektoru, tedy měření relativní pozice tzv. poziční antény vůči tzv. vektorové anténě. Při dostupnosti RTK řešení lze úspěšně tento režim využít pro měření azimutu a elevace, i při malých velikostech uvedeného vektoru.

Mobilní měřicí přijímač (*rover*) je používán pro samotné určování pozice měřených bodů. Přijímač může pracovat samostatně nebo využívá data z referenční stanice nebo sítě permanentních stanic.

Některé současné GNSS přijímače disponují možností kombinovat v jeden časový okamžik režim rover i funkci pohyblivé referenční stanice. Tyto přístroje jsou interně vybaveny dvěma nezávislými GNSS přijímači. V této konfiguraci je vyhodnocována současně pozice jedné z antén v globálním souřadnicovém systému a pozice druhé z antén v lokálním souřadnicovém systému, jehož počátek je definován druhou anténou. Toto uspořádání lze použít pro 5DOF sebelokalizaci. Pozice objektu je určena na základě řešení pozice poziční antény a dva úhly orientace objektu jsou určeny z vektoru mezi oběma anténami. Antény se obvykle instalují v horizontální rovině, kdy je možné určit dvojici úhlů azimut/pitch nebo azimut/roll. Měření interního vektoru je často založeno pouze na RTK řešení, aby bylo možné používat malé vzdálenosti antén připojených k jednotce rover. Některé realizace RTK řešení vyžadují externí znalost alespoň jednoho stupně volnosti tohoto vektoru (typicky jeho velikost) [7]. Schéma použití uvedené koncepce měření je uvedeno na obrázku 2.2.



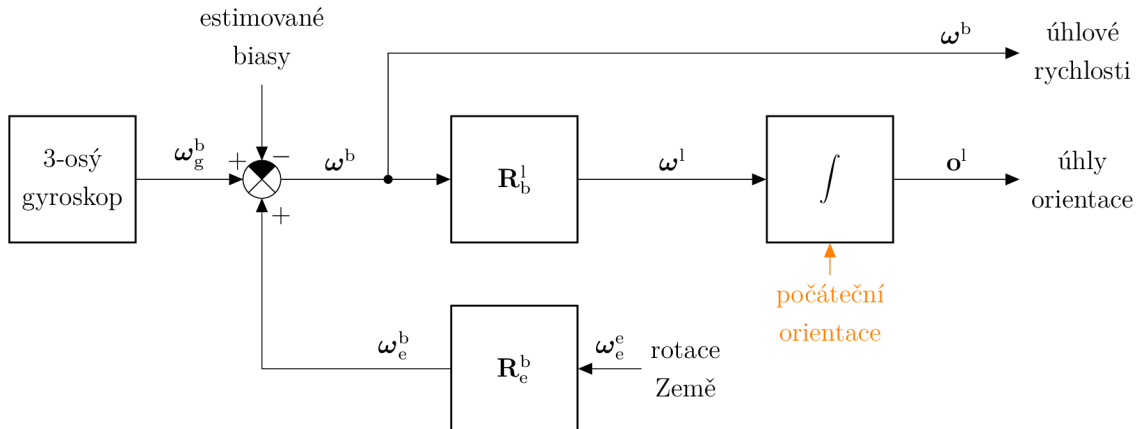
Obr. 2.2: Využití RTK řešení k přesné 5DOF sebelokalizaci

2.2.2 Inerciální navigační systémy

Inerciální navigační systémy používají inerciální snímače (akcelerometry a gyroskopy) pro určování úhlů orientace a souřadnic pozice měřeného objektu. Aby bylo možné určit kompletní soubor souřadnic pozice a úhlů orientace, používá se vždy trojice akcelerometrů a gyroskopů. Snímače dané fyzikální veličiny jsou vzájemně prostorově ortogonálně uspořádané. Původní systémy využívaly mechanicky stabilizovanou základnu, na které byly inerciální senzory osazeny. Jedná se tzv. *gim-balled* konstrukci. Rozvoj digitálního zpracování signálů umožnil vznik tzv. *strap-*

down konstrukce, u které jsou inerciální senzory mechanicky pevně spojeny s tělem INS. Potřebná transformace měřených inerciálních veličin v souřadnicovém systému spojeném s tělem INS do lokálního souřadnicového systému spojeného s prostorem, ve kterém je pohyb určován, je realizována matematicky a nikoliv mechanicky jako u gimballed konstrukce. Jednotlivými aspekty inerciální navigace se podrobně zabývají knihy [16],[17],[18].

Zjednodušený princip zpracování dat z gyroskopu pro určení úhlů orientace je uveden na obrázku 2.3. Ze souboru tří úhlových rychlostí, které jsou naměřeny třemi vzájemně ortogonálními gyroskopy, je odstraněna hodnota aktuálně estimovaných biasů a hodnota úhlové rychlosti Zemské rotace. Výsledná trojice úhlových rychlostí je transformována do lokálního souřadného systému, ve kterém je pohyb objektu určován. Matice \mathbf{R}_b^l představuje aktuální matici rotace pro realizaci rotace souřadnicového systému spojeného s tělem INS (*body frame*) do lokálního souřadnicového systému (*local frame*). Tyto transformované úhlové rychlosti jsou následně v čase integrovány. Pro získání absolutních úhlů rotace je nutné z externího zdroje zajistit počáteční hodnoty integrátorů (počáteční úhly rotace). Bez znalosti těchto konstant je možné měřit jen změnu orientace od počátku měření.

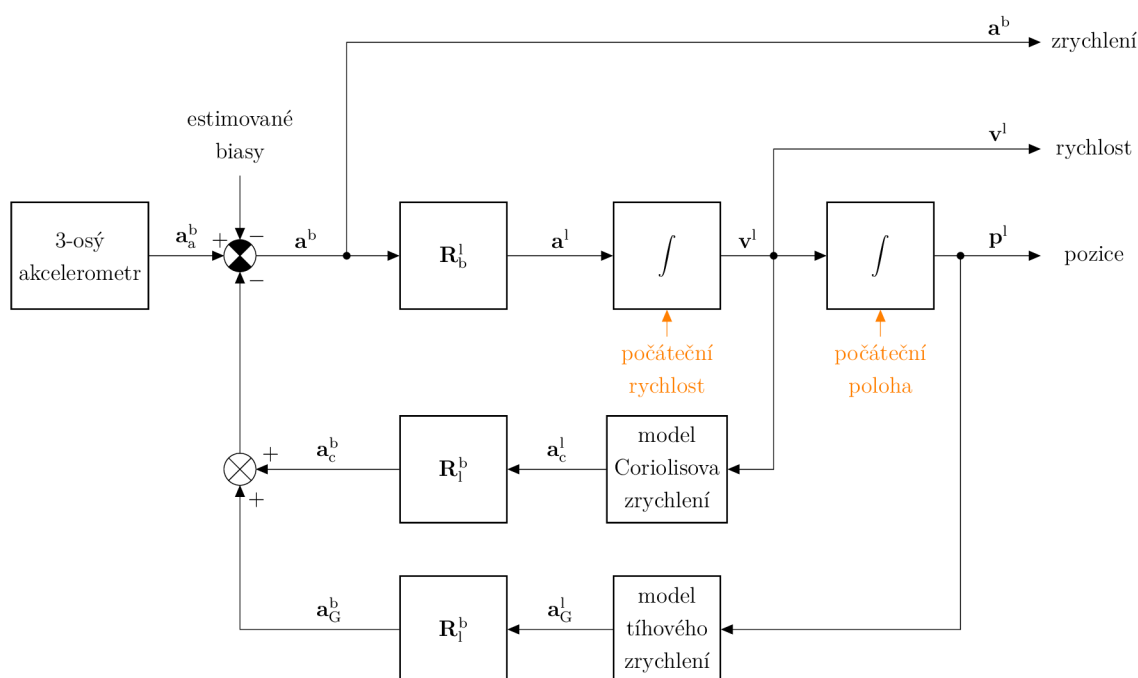


Obr. 2.3: Základní princip strap-down INS – řešení orientace

Vzhledem k tomu, že úhly orientace jsou získány integrací úhlových rychlostí v čase, jejich chyba v čase narůstá vlivem chyby měření úhlových rychlostí. Pro limitování chyby orientace je proto nutné zajistit průběžnou opravu stavu integrátorů na základě absolutních úhlů orientace získaných z jiného zdroje.

Na obrázku 2.4 je uveden zjednodušený princip zpracování dat z akcelerometru. Akcelerometrem je měřeno celkové zrychlení, které na něj působí. Od tohoto vektoru je odečten vektor reprezentující aktuální estimované biasy jednotlivých akcelerometrů. Dále je odečten transformovaný vektor Coriolisova zrychlení a trans-

formovaný vektor tíhového zrychlení. Oba vektory jsou primárně určeny v lokálním souřadnicovém systému, a proto jsou pomocí transformace \mathbf{R}_l^b transformovány do souřadného systému akcelerometrů. Získaná výslednice zrychlení je transformována do lokálního souřadnicového systému a dvakrát v čase integrována pro získání souřadnic pozice. Pro získání pozice v globálním souřadnicovém systému je nutné opět zajistit počáteční podmínky pro trojici integrátorů zrychlení a trojici integrátorů rychlosti. V schématu není z důvodu zjednodušení zahrnuta estimace dynamických zrychlení způsobených rotačním pohybem, které je třeba také kompenzovat. Transformační matice rotace \mathbf{R} jsou získány z úhlů orientace uvedených ve schématu na obrázku 2.3.



Obr. 2.4: Základní princip strap-down INS – řešení pozice

Uvedený princip určení souřadnic pozice vykazuje také růst jejich chyby s rostoucím časem měření. Růst chyby má kvadratický charakter, za předpokladu konstantního charakteru chyby měření zrychlení a současně zanedbatelné chyby orientace. V reálných situacích chyba ale narůstá strměji než kvadraticky s časem právě vlivem narůstající chyby orientace, pokud není zajištěna její korekce z absolutního zdroje orientace. Dalším vlivem, který zvyšuje strmost růstu je růst chyby měření zrychlení. K tomu dochází po výpadku estimace biasů akcelerometrů při výpadku externích pozičních referencí.

Řešení pozice a orientace získané ze samotných inerciálních navigačních systémů má časově omezenou použitelnost. Proto se přistupuje ke vzájemné integraci INS

a systémů pro měření absolutní pozice a orientace. Nejčastěji se jedná o vzájemnou integraci GNSS a INS systémů. Výsledkem této integrace je potom systém, který přináší výhody obou systémů. GNSS zajišťuje zdroj absolutní pozice a orientace, které nevykazují drift, ovšem jejich řešení má malou obnovovací frekvenci (typicky 5 až 20 Hz, existují ale i systémy se 100 Hz). Tyto data zajišťují opravu stavů integrátorů a současně je na jejich základě prováděna estimace biasů akcelerometrů a gyroskopů. INS přináší vyšší obnovovací frekvenci (běžně stovky Hz) než GNSS a umožňuje překlenout dočasný výpadek GNSS řešení. Problematice integrace GNSS a INS se rozsáhle věnují knihy [16][17]. Způsob integrace GNSS a INS lze zařadit do jedné z následujících koncepcí:

- **loosely coupled** – pouze pozice a rychlost z GNSS slouží pro korekci INS
- **tightly coupled** – pro korekci INS jsou použita i surová data z GNSS (pseudovzdálenosti, fázové vzdálenosti apod.)
- **deeply coupled** – surová data z GNSS jsou použita pro korekci INS a opačně INS provádí korekci stavu GNSS

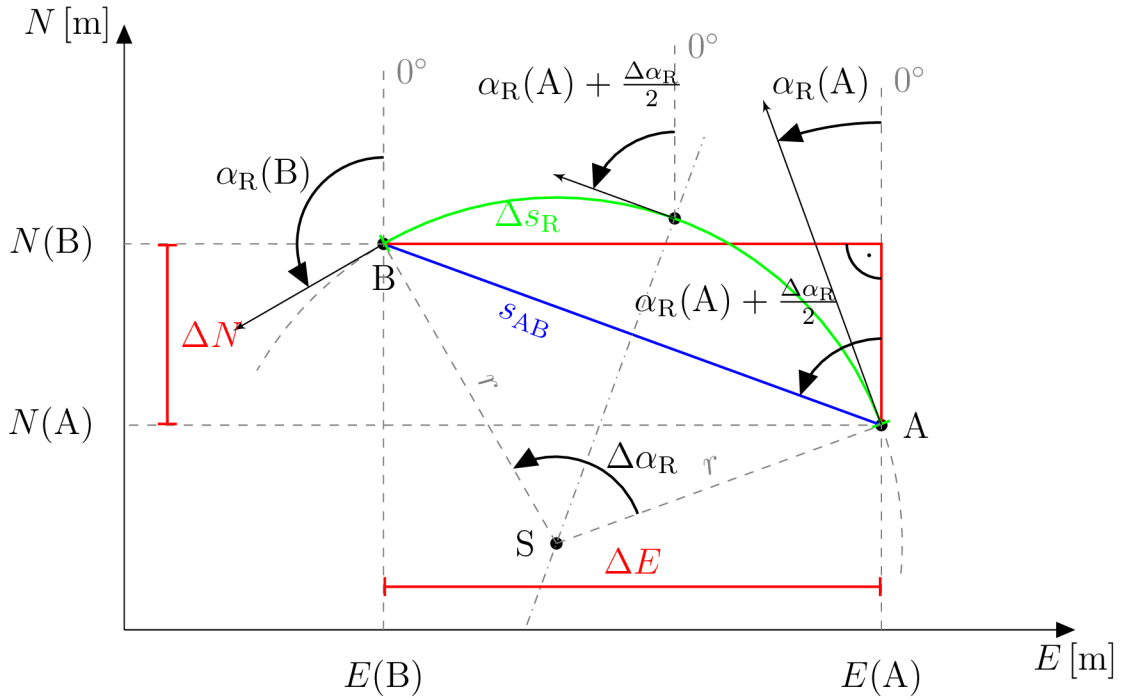
2.2.3 Odometrie a gyrodometrie

Odometrie patří mezi typické dead-reckoning metody a jedná se proto o relativní metodu sebelokalizace [13][17]. Změna odhadu pozice a orientace mobilního robotu je provedena na základě změny stavů jeho jednotlivých kol. Stavovou veličinou kola je vždy jeho absolutní úhlové natočení a v případě možnosti jeho stranového natáčení je druhou stavovou veličinou úhel jeho stranového vytočení. Úhel natočení kola nebo hřídele příslušného pohonu je měřen snímačem úhlového natočení (inkrementální optický senzor, resolver apod.). Na základě známé kinematiky pohybu daného podvozku je možné transformovat uvedené změny stavových veličin kol na změnu pozice a orientace mobilního robotu v jeho zvoleném bodě. Pokročilé metody zahrnují mezi stavové veličiny modelu kola [12] i další jeho veličiny – např. rychlost, obvod apod. Princip transformace změny ujeté vzdálenosti a změny azimutu do souřadnic horizontální roviny při pohybu mobilního robotu v této rovině je uveden na obrázku 2.5. Uvedenou transformaci je možné realizovat pomocí vztahů 2.1 až 2.3.

$$E(B) = E(A) + s_{AB} \sin \left(\alpha_R(A) + \frac{\Delta\alpha_R}{2} \right) \quad (2.1)$$

$$N(B) = N(A) + s_{AB} \cos \left(\alpha_R(A) + \frac{\Delta\alpha_R}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$\alpha_R(B) = \alpha_R(A) + \Delta\alpha_R \quad (2.3)$$



Obr. 2.5: Transformace změny Δs_R ujeté vzdálenosti a změny $\Delta\alpha_R$ azimutu do souřadnic horizontální roviny

V reálných implementacích probíhá výpočet transformace na krátkém úseku trajektorie, na které je rozdíl mezi délkou kruhového oblouku a délkou jeho tětivy zanedbatelný, proto se považuje za velikost s_{AB} velikost ujeté vzdálenosti Δs_R . V případě, že by rozdíl významně ovlivňoval přesnost výsledku, je možné použít vztah 2.4, který řeší transformaci mezi oběma veličinami. V tomto případě je potřeba zvážit přesnost použité implementace výpočtů na daném systému, aby zahrnutí této operace nepřineslo ve výsledku nižší přesnost.

$$s_{AB} = 2\Delta s_R \frac{\sin \frac{\Delta\alpha_R}{2}}{\Delta\alpha_R} \quad (2.4)$$

V případě řešení výpočtu souřadnic pozice v obecném třídímenzionálním prostoru je potřeba pro transformaci znát i ostatní úhly orientace mobilního robotu. Tyto úhly ale není možné metodou odometrie určit a musí být získány z jiného zdroje lokalizačních dat, např. z INS. Tato metoda, která kombinuje informace o ujeté vzdálenosti a úhlů orientace z externího systému se často označuje jako gyrodometrie [9]. Při použití všech úhlů orientace z externího systému, jež nevykazují významný drift, je možné získat významně lepší výsledky pozice, protože citlivost přesnosti pozice na

přesnost azimutu mobilního robotu je velmi významná. Výpočet 3D gyrodometrie lze maticově zapsat vztahem 2.5.

$$\begin{pmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta h \end{pmatrix} = \mathbf{R}_v^l \cdot \mathbf{s}_R^v \quad (2.5)$$

Kde jednotlivé symboly označují:

ΔE změna východní souřadnice E

ΔN změna severní souřadnice N

Δh změna výškové souřadnice h

\mathbf{R}_b^l matice rotace ze souřadnicového systému robotu do lokálního systému

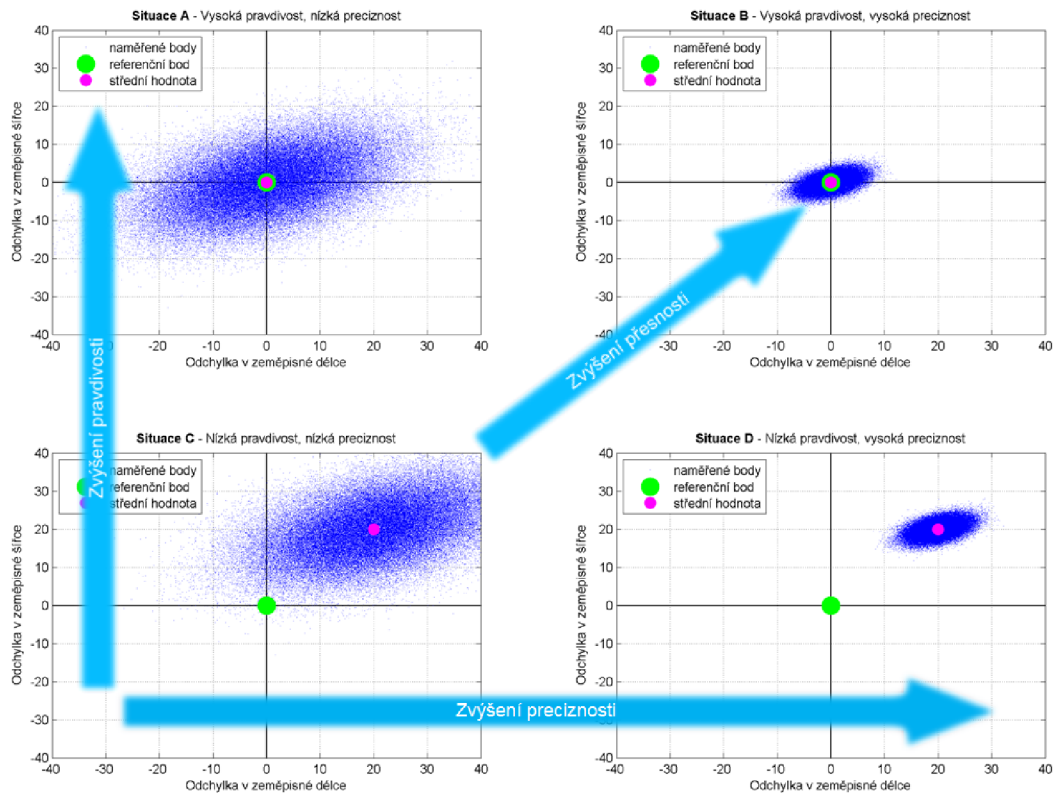
\mathbf{s}_R^v vektor ujeté vzdálenosti v souřadnicovém systému robotu

Obdobně jako INS vykazují růst chyby jejich řešení s rostoucím časem, tak i gyrodometrie vykazuje růst chyby a to s ujetou vzdáleností. Příčinou je sumace jednotlivých dílčích elementů trajektorie. K růstu chyby odometrie dochází nejen s růstem ujeté vzdálenosti, ale i se souhrnnou hodnotou úhlu rotace kolem vertikální osy mobilního robotu.

2.2.4 Metodiky vyjádření chyb pozice

Trendem posledních období měřicí techniky je přechod od klasického přístupu vyjádření chyb měření pomocí limitních odchylek k pravděpodobnostnímu modelu ve formě nejistot měření [19]. Komerčně dostupné sebelokalizační systémy často ani informaci o aktuální chybě lokalizačních dat v reálném čase neposkytují. V těchto případech je uživatel odkázán jen na specifikaci přístroje. Zde uvedené chyby jsou ale většinou platné jen pro specifické měřicí podmínky. Většina přístrojů disponuje informací o aktuální přesnosti poskytovaných údajů. Často jsou ale použity specifické metriky, které jsou mezi zařízeními neslučitelné. Ve většině případů zahrnuje poskytovaný údaj o přesnosti jak systematickou složku chyby měření tak i náhodnou složku měření. Systematickou složkou se rozumí tzv. pravdivost (*trueness*) měření a náhodnou složku tzv. preciznost (*precision*) měření. Výsledná přesnost (*accuracy*) měření zahrnuje obě tyto složky. Význam uvedených pojmů je ukázán na obrázku 2.6 pro měření pozice v horizontální rovině. I když je význam těchto pojmů ustanoven mezinárodním metrologickým slovníkem [1], někteří výrobci uvedených zařízení tuto stanovenou terminologii nerespektují.

Vybrané, často používané chybové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 2.1. Uváděné hodnoty pravděpodobnosti předpokládají normální rozdělení.



Obr. 2.6: Význam pravdivosti, preciznosti a přesnosti měření

Tab. 2.1: Vybrané statistické chybové charakteristiky [18]

Typ	Označení	Pravděpodobnost
1D	LEP	50 %
	RMS	68 %
	2RMS	95 %
2D	CEP	50 %
	DRMS	63 %
	2DRMS	98 %
	Elipsa chyb (1σ)	39 %
	Elipsa chyb (2σ)	86 %
	R95	95 %
3D	SEP	50 %
	Elipsoid chyb (1σ)	20 %
	Elipsoid chyb (2σ)	74 %
	MRSE	61 %

3 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce si klade za cíl navrhnout způsob řešení navigace autonomních pozemních mobilních robotů ve vnějších prostředích, který bude dosahovat vysoké přesnosti sledování žádané trajektorie jejich jízdy. Řešení by mělo umožňovat funkčnost i v komplikovaných terénech se špatnou dostupností GNSS signálů. Metoda předpokládá obecný, předem neznámý terén, který není možné jakkoliv modifikovat pro zajištění správné funkce sebelokalizačních systémů. Navržený koncept by měl reflektovat aspekty reálného nasazení a obsahovat proto prvky podporující vysokou spolehlivost řešení v reálných podmínkách. Především se jedná o snadnou realizovatelnost redundance, dynamického přepínání metod v závislosti na aktuálních pracovních podmínkách a snadnou rozšiřitelnost systému v budoucnu. Konfigurace samotné metody by měla být co nejjednodušší, nevyžadující složitou parametrizaci a estimaci konstant, které nemají přímou fyzikální interpretovatelnost. Celkové řešení by mělo být uzpůsobeno aplikačním potřebám, ve kterých je nutné zajistit rychlou a snadnou nasaditelnost řešení v praxi.

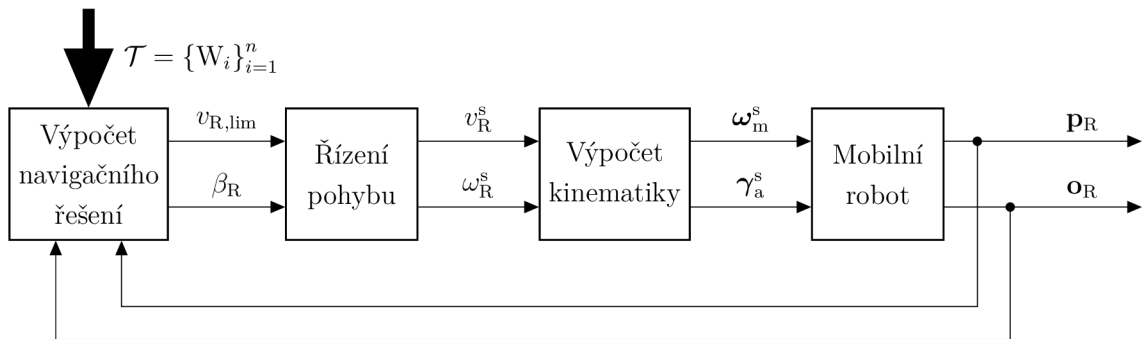
Navigační metoda předpokládá využití současných GNSS přijímačů s RTK řešením. Použití RTK GNSS zajistí zdroj přesné absolutní pozice v obecném terénu, které nevyžaduje jeho předchozí uživatelskou modifikaci. V podmínkách, kdy nevyhovuje přesnost použitého GNSS systému, se předpokládá využití metod typu *dead-reckoning*, především gyrodometrie a odometrie, založených na kalibrovaném kinematickém modelu podvozku mobilního robotu.

Významné vlastnosti navrhované navigace jako celku lze shrnout do následujících bodů:

- přesnost sledování trajektorie žádaného pohybu
- funkčnost v oblastech s nevyhovujícím řešením získaným z GNSS
- možnost integrace samostatných, externě realizovaných navigačních metod
- snadná nasaditelnost řešení v praxi

4 NAVIGAČNÍ METODA

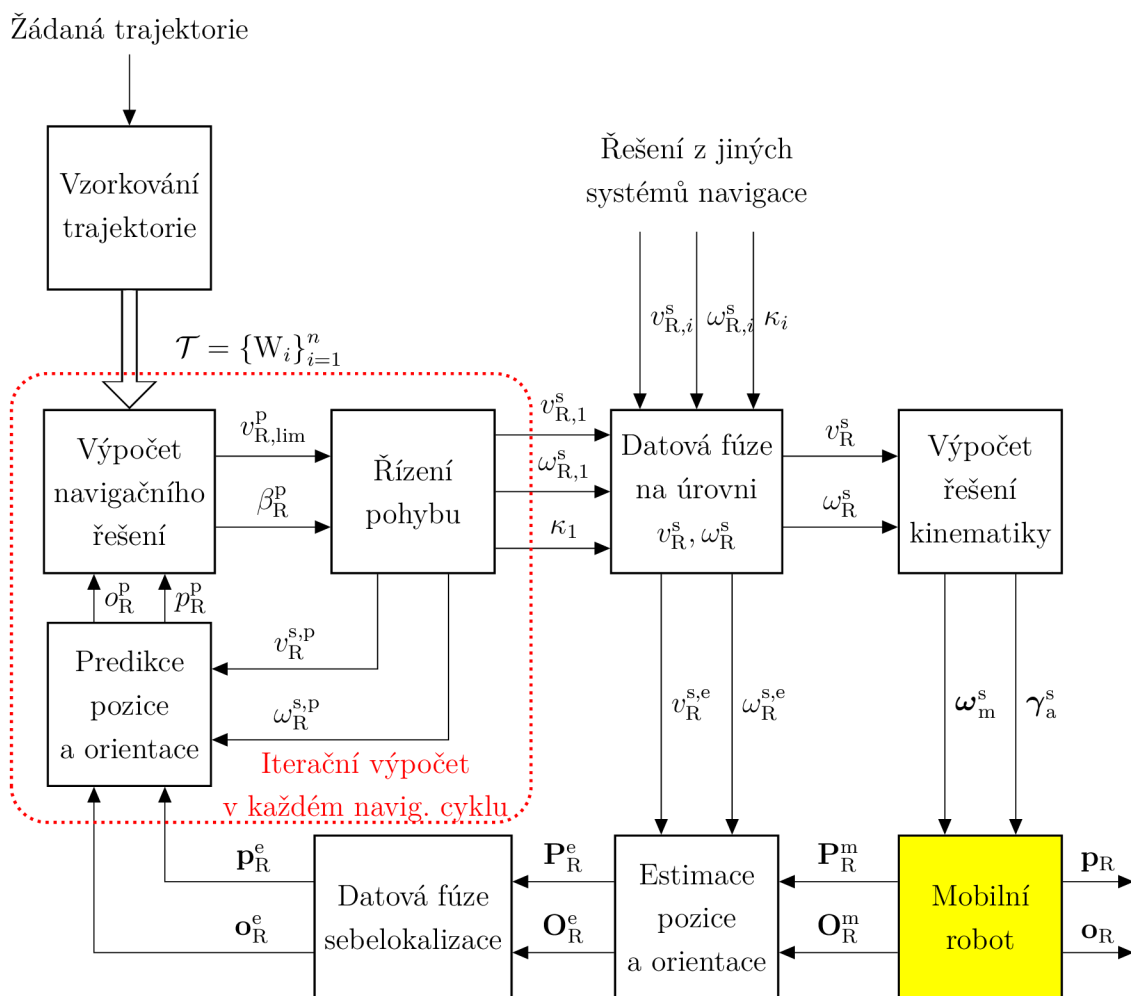
Koncepce navržené navigační metody umožňuje realizovat navigaci bezposádkových strojů v obecném tří-dimenzionálním prostoru. Implementována a v reálných experimentech byla ověřena její dvou-dimenzionální varianta, určená pro navigaci pozemních mobilních robotů (UGV) s neholonomním podvozkem. Zvolená koncepce navigační metody vyžaduje dostupnost souřadnic pozice mobilního robotu a popisu jeho žádané trajektorie pohybu ve zvoleném souřadnicovém systému. Všechny použité funkční bloky byly od počátku koncipovány jako plně parametrizovatelné, což přináší snadnou konfiguraci celé navigační metody pro rozdílné typy a parametry podvozků mobilních robotů.



Obr. 4.1: Ideové blokové schéma navržené navigační metody

Ideové blokové schéma navržené navigační metody je uvedeno na obrázku 4.1. Do bloku *Výpočet navigačního řešení* vstupuje posloupnost \mathcal{T} bodů W , která popisuje žádanou trajektorii pohybu mobilního robotu. Výsledkem řešení navigační úlohy je dvojice veličin: $v_{R,lim}$ – limitní dopředná rychlost mobilního robotu a β_R – aktuální odchylka azimutu α_R mobilního robotu od jeho žádané hodnoty. Tyto dvě veličiny jsou vstupem pro výpočet parametrů žádaného pohybu mobilního robotu. Pohyb uvažovaných mobilních robotů lze popsat pomocí jejich dopředné rychlosti v_R a úhlové rychlosti ω_R . Ze žádaných hodnot dopředné a úhlové rychlosti (v_R^s a ω_R^s) je proveden výpočet žádaných hodnot říditelných veličin jednotlivých říditelných kol daného mobilního robotu na základě jeho kinematického modelu. Tuto skupinu veličin tvoří vždy vektor ω_m^s žádaných úhlových rychlostí pohonů jednotlivých říditelných kol a v případě existence aktuátorů pro jejich natáčení, také vektor γ_a^s žádaných úhlů jejich natočení. Tyto uvedené veličiny představují akční zásahy pro změnu vektoru \mathbf{p}_R souřadnic pozice a vektoru \mathbf{o}_R úhlů orientace mobilního robotu. Vektory \mathbf{p}_R a \mathbf{o}_R jsou z pohledu regulace výstupními regulovanými veličinami, a proto jsou ve zpětné vazbě zavedeny zpět do bloku *Výpočet navigačního řešení*. Celý

řetězec výpočtů se periodicky opakuje se zvolenou frekvencí f_c navigačního cyklu. Uvedené blokové schéma neuvažuje existenci žádných dopravních zpoždění, využití více než jednoho sebelokalizačního systému, možnost integrace výsledných řešení externích navigačních metod a v neposlední řadě také omezení dynamiky pohybu mobilního robotu (zejména existenci rozběhových a doběhových ramp u použitých pohonů a aktuátorů apod.). Rozšířené blokové schéma, zahrnující uvedené aspekty, jež mají významný vliv na dosahovanou přesnost sledování žádané trajektorie, je proto uvedeno na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Rozšířené blokové schéma realizované navigační metody

Převod vstupní specifikace žádané trajektorie pohybu mobilního robotu do posloupnosti \mathcal{T} diskrétních navigačních bodů W je proveden v bloku *Vzorkování žádané trajektorie*.

$$v_{R,lim}^p(t) = \{v_{R,lim}(t + \tau_c), \dots, v_{R,lim}(t + \Delta t_p)\}, \quad \tau_c < \Delta t_p \quad (4.1)$$

$$\beta_R^p(t) = \{\beta_R(t + \tau_c), \dots, \beta_R(t + \Delta t_p)\}, \quad \tau_c < \Delta t_p \quad (4.2)$$

V bloku *Výpočet navigačního řešení* se iterativně počítají prvky posloupnosti $v_{R,\text{lim}}^p$ 4.1 predikovaných limitních dopředných rychlostí $v_{R,\text{lim}}$ pro časový interval $\langle t + \tau_c, t + \Delta t_p \rangle$ a prvky posloupnosti β_R^p 4.2 predikovaných odchylek β_R pro stejný časový interval. Dopravní zpoždění τ_c představuje délku časového intervalu mezi okamžikem zahájení navigačního cyklu a provedením fyzického akčního zásahu na pohonech a aktuátorech. Do uvedeného časového intervalu je zahrnut alokovaný čas na veškeré výpočty v navigačním cyklu, přenos dat do řídicí jednotky pohonů a čas potřebný k vykonání akčních zásahů na pohonech a aktuátorech podvozku mobilního robotu. Konec časového okna definovaný veličinou Δt_p je počítán v bloku *Řízení pohybu*. Hodnota této veličiny závisí na aktuálním stavu pohonů a aktuátorů mobilního robotu.

Blok *Řízení pohybu* počítá posloupnost $v_R^{s,p}$ 4.3 predikovaných žádaných dopředných rychlostí $v_{R,1}^s$ a posloupnost $\omega_R^{s,p}$ 4.4 predikovaných žádaných úhlových rychlostí $\omega_{R,1}^s$ mobilního robotu. Obě uvedené posloupnosti jsou počítány pro aktuální predikční interval $\langle t + \tau_c, t + \Delta t_p \rangle$. Výstupem bloku *Řízení pohybu* jsou žádané hodnoty dopředné a úhlové rychlosti ($v_{R,1}^s$ a $\omega_{R,1}^s$), které jsou platné pro predikovaný časový okamžik $t + \tau_c$. Hodnoty těchto veličin odpovídají hodnotám prvních prvků v posloupnostech $v_R^{s,p}$ a $\omega_R^{s,p}$. Vektory $\mathbf{v}_{R,f}^s$ 4.5 resp. $\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s$ 4.6 jsou tvořeny veličinami $v_{R,1}^s, \dots, v_{R,n}^s$ resp. $\omega_{R,1}^s, \dots, \omega_{R,n}^s$. Dvojice veličin $v_{R,i}^s$ a $\omega_{R,i}^s$ pochází z i -té navigační metody, která je v dané aplikaci použita. Tímto je umožněna i integrace navigačních metod s odlišnou koncepcí.

$$v_R^{s,p}(t) = \{v_{R,1}^s(t + \tau_c), \dots, v_{R,1}^s(t + \Delta t_p)\} \quad (4.3)$$

$$\omega_R^{s,p}(t) = \{\omega_{R,1}^s(t + \tau_c), \dots, \omega_{R,1}^s(t + \Delta t_p)\} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{v}_{R,f}^s(t) = (v_{R,1}^s(t + \tau_c), \dots, v_{R,n}^s(t + \tau_c)) \quad (4.5)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s(t) = (\omega_{R,1}^s(t + \tau_c), \dots, \omega_{R,n}^s(t + \tau_c)) \quad (4.6)$$

V bloku *Datová fúze řešení pohybu* je proveden výběr nejlepšího řešení nebo výpočet nového řešení pohybu z vektorů $\mathbf{v}_{R,f}^s$ a $\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s$, které obsahují řešení pohybu získaná z jednotlivých dostupných navigačních metod. Z vektorů $\mathbf{v}_{R,f}^s$ a $\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s$ jsou tedy vytvořeny veličiny v_R^s a ω_R^s na základě zvoleného fúzního algoritmu popsánoho funkcemi 4.7 a 4.8. Míra očekávané validnosti řešení poskytovaných jednotlivými navigačními metodami je uložena v konfidenčním vektoru $\boldsymbol{\kappa}_{R,f}$. V bloku jsou rovněž

uchovávány i historické hodnoty veličin v_R^s a ω_R^s z časového intervalu $\langle t - \tau_{m,\max}, t \rangle$, které jsou potřebné pro estimaci matice \mathbf{P}_R^e aktuálních vektorů \mathbf{p}_R souřadnic pozice a matice \mathbf{O}_R^e aktuálních vektorů \mathbf{o}_R úhlů orientace pro čas t z matic \mathbf{P}_R^m a \mathbf{O}_R^m , které jsou získány z jednotlivých použitých sebelokalizačních systémů. Délka časového okna je dána hodnotou $\tau_{m,\max}$, která je určena aktuálním nejdelším zpožděním, které vykazují získané vektory pozice a orientace mobilního robotu.

$$v_R^s = f\left(\mathbf{v}_{R,f}^s, \boldsymbol{\kappa}_{R,f}\right) \quad (4.7)$$

$$\omega_R^s = f\left(\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s, \boldsymbol{\kappa}_{R,f}\right) \quad (4.8)$$

Výpočet kinematického řešení realizuje transformaci parametrů v_R^s a ω_R^s žádaného pohybu mobilního robotu na vektory $\boldsymbol{\omega}_m^s$ (definice 4.9) a $\boldsymbol{\gamma}_a^s$ (definice 4.10) říditelných veličin použitého podvozku mobilního robotu. Vypočítané akční zásahy jsou platné pro časový okamžik $t + \tau_c$.

$$\boldsymbol{\omega}_m^s(t) = \left(\omega_{w,1}^s(t + \tau_c), \dots, \omega_{w,n}^s(t + \tau_c)\right) \quad (4.9)$$

$$\boldsymbol{\gamma}_a^s(t) = \left(\gamma_{a,1}^s(t + \tau_c), \dots, \gamma_{a,n}^s(t + \tau_c)\right) \quad (4.10)$$

Výstupními veličinami regulované soustavy jsou z pohledu regulace vektor \mathbf{p}_R souřadnic pozice a vektor \mathbf{o}_R úhlů orientace mobilního robotu. Pro zpětnou vazbu není možné uvedené vektory získat přímo z důvodu existence dopravních zpoždění, která jsou tvořena dobou trvání výpočtu jednotlivých sebelokalizačních řešení a jejich přenosem po komunikačních linkách do řídicích systémů, ve kterých je spuštěn daný navigační proces.

Matice \mathbf{P}_R^m resp. \mathbf{O}_R^m jsou tvořené vektory \mathbf{p}_R^m resp. \mathbf{o}_R^m , které jsou získány z použitých sebelokalizačních systémů. Každý ze získaných vektorů je platný pro jiný časový okamžik. Proto je v bloku *Estimace pozice a orientace* prováděna estimace vektorů pozice a orientace mobilního robotu pro aktuální čas t , která využívá historických hodnot v_R^s a ω_R^s . Tyto hodnoty jsou uloženy v posloupnostech $v_R^{s,e}$ (definice 4.11) a $\omega_R^{s,e}$ (definice 4.12).

$$v_R^{s,e}(t) = \{v_R^s(t - \tau_{m,\max}), \dots, v_R^s(t)\} \quad (4.11)$$

$$\omega_R^{s,e}(t) = \{\omega_R^s(t - \tau_{m,\max}), \dots, \omega_R^s(t)\} \quad (4.12)$$

Z matice \mathbf{P}_R^e resp. \mathbf{O}_R^e estimovaných vektorů souřadnic pozice resp. úhlů orientace jednotlivých sebelokalizačních řešení pro aktuální čas t je v bloku *Datová fúze* vybráno nebo vypočítáno nejlepší řešení vektoru souřadnic pozice resp. vektoru úhlů

orientace mobilního robotu na základě předpokládaných přesností jednotlivých vektorů souřadnic pozice resp. úhlů orientace. Matice $\mathbf{S}_{p,R}^e$ resp. $\mathbf{S}_{o,R}^e$ obsahuje očekávané směrodatné odchylky jednotlivých souřadnic pozice resp. úhlů orientace mobilního robotu.

$$\mathbf{p}_R^e = f(\mathbf{P}_R^e, \mathbf{S}_{p,R}^e) \quad (4.13)$$

$$\mathbf{o}_R^e = f(\mathbf{O}_R^e, \mathbf{S}_{o,R}^e) \quad (4.14)$$

Vektory \mathbf{p}_R^e a \mathbf{o}_R^e jsou v bloku *Predikce pozice a orientace* rozšířeny na predikované posloupnosti p_R^p a o_R^p pro predikční interval $\langle t + \tau_c, t + \Delta t_p \rangle$. Pro výpočet predikovaných hodnot jsou použity posloupnosti $v_R^{s,p}$ a $\omega_R^{s,p}$. Výpočet jednotlivých hodnot v predikovaných posloupnostech p_R^p a o_R^p probíhá vždy znovu s každým cyklem navigačního algoritmu.

$$p_R^p = \{\mathbf{p}_R^p(t + \tau_c), \dots, \mathbf{p}_R^p(t + \Delta t_p)\} \quad (4.15)$$

$$o_R^p = \{\mathbf{o}_R^p(t + \tau_c), \dots, \mathbf{o}_R^p(t + \Delta t_p)\} \quad (4.16)$$

Algoritmy použité ve funkčních blocích popisovaného blokového schématu jsou detailněji popsány v následujících kapitolách.

4.1 Reprezentace žádané trajektorie

Žádaná trajektorie pohybu mobilního robotu je v obecném případě popsána analyticky nebo posloupností bodů v daném souřadnicovém systému. Realizace uložení obecné trajektorie podle výchozích specifikací může představovat komplexní problém, jehož řešení nemusí přinášet dostatečnou přidanou hodnotu v porovnání s převodem vstupní specifikace žádané trajektorie do unifikovaných způsobů její reprezentace. Pro navrženou metodu bylo použito uložení žádané trajektorie pohybu mobilního robotu do posloupnosti \mathcal{T} 4.17 navigačních bodů W , jenž jsou prvky této trajektorie.

$$\mathcal{T} = (W_i)_{i=1}^n \quad (4.17)$$

Každý navigační bod W je popsán odpovídajícím počtem souřadnic, které vycházejí ze zvolené varianty navigační metody. V obecné tří-dimenzionální variantě je každý bod v prostoru jednoznačně definován trojicí souřadnic – např. pro zeměpisné vyjádření pozice se jedná o zeměpisnou šířku φ , zeměpisnou délku λ a výšku h nad referenčním elipsoidem. Tato varianta je vhodná např. pro navigaci létajících

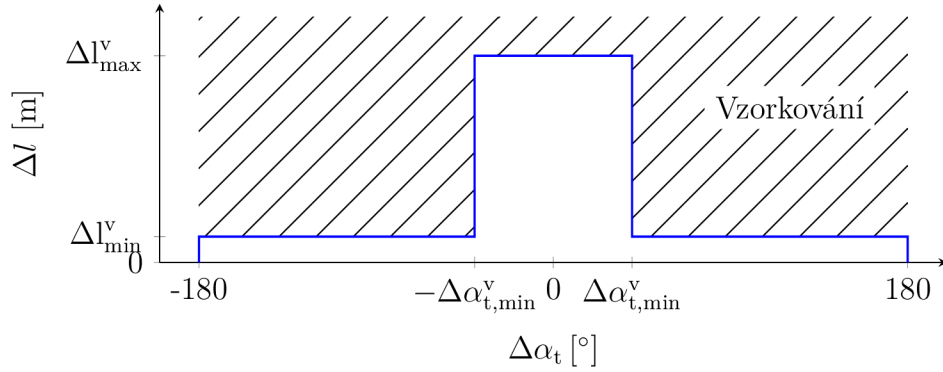
mobilních prostředků, které mají z pohledu řízení jejich pozice tři stupně volnosti. V případě navigace pozemních mobilních robotů pozbývá jejich výšková souřadnice z pohledu navigace platnosti, protože tato souřadnice je funkcí pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ . Zmíněná funkce je výškovou mapou terénu. Pro navigaci pozemních mobilních robotů tedy postačují pro popis jejich žádané trajektorie souřadnice horizontální roviny ρ .

V realizované implementaci jsou použity zeměpisné souřadnice bodů W v souřadnicovém systému WGS-84. Každý bod W navzorkované trajektorie žádaného pohybu je reprezentován vektorem \mathbf{p}_W 4.18 souřadnic bodu W , ve kterém φ_W odpovídá zeměpisné šířce ($-90^\circ \div 90^\circ$) a λ_W odpovídá zeměpisné délce ($-180^\circ \div 180^\circ$). Spojnice bodů v tomto zvoleném souřadnicovém systému je třeba ale obecně uvažovat jako křivky na elipsoidu (viz kapitola 2.1). Ve vybraných případech je možné výpočet zjednodušit výpočtem na sféře bez významného snížení přesnosti výsledku.

$$\mathbf{p}_W = (\varphi_W, \lambda_W) \quad (4.18)$$

V případě, kdy je žádaná trajektorie mobilního robotu popsána spojitě, je provedeno její navzorkování do posloupnosti \mathcal{T} . Navzorkování trajektorie je procesem diskretizace spojitě trajektorie do posloupnosti diskrétních bodů W . Vzorkování spojitě trajektorie může být obecně provedeno na základě odlišných kritérií. Body spojitě trajektorie je výhodné vzorkovat při ekvivalentních změnách jejích vybraných parametrů, kdy je potom možné snadněji stanovit maximální požadované prostředky pro uložení trajektorie apod. Vzorkování může být odvozeno od času, vzdálenosti mezi krajními body úseku trajektorie, azimutu tečny k trajektorii apod. Posloupnost bodů tedy může být ekvidistantní např. z pohledu vzdáleností mezi krajními body úseků trajektorie, změny azimutu tečny k trajektorii apod. Jediná podmínka ovšem nemusí být efektivní z pohledu počtu členů výsledné posloupnosti bodů. Např. použijeme-li vzorkovacího kritéria odvozeného pouze od vzdálenosti mezi navzorkovanými body, mohou být přímkové úseky žádané trajektorie zbytečně reprezentovány několika navigačními body W . Optimální výsledky z hlediska počtu členů posloupnosti \mathcal{T} v obecných případech dávají kombinace jednotlivých elementárních vzorkovacích kritérií.

Popisovaná navigační metoda využívá ve výchozím nastavení pro získání posloupnosti \mathcal{T} jako kritérium pro odběr vzorků vzájemný vztah vzdálenosti mezi navzorkovanými body a změny azimutu tečny k trajektorii od posledního navzorkovaného bodu. Oblast změn vlastností trajektorie, ve které dochází ke vzorkování hodnot souřadnic nového bodu, je zobrazena na obrázku 4.3. K navzorkování bodu spojitě trajektorie dochází v případě, kdy je velikost změny azimutu $|\Delta\alpha_t|$ tečny k trajektorii větší než nastavené minimum $\Delta\alpha_{t,\min}^v$ a současně je vzdálenost Δl mezi



Obr. 4.3: Zobrazení oblasti změn vlastností trajektorie, při kterých dochází ke vzorkování bodů

krajními body úseku trajektorie větší než nastavené minimum Δl_{\min}^v , nebo v případě, kdy je vzdálenost Δl mezi krajními body úseku trajektorie větší než nastavené maximum Δl_{\max}^v . Matematicky je možné zapsat popsanou skupinu nerovností výrazem 4.19.

$$(|\Delta\alpha_t| > \Delta\alpha_{t,\min}^v \wedge \Delta l > \Delta l_{\min}^v) \vee \Delta l > \Delta l_{\max}^v \quad (4.19)$$

Uvedenou podmínku 4.19 je možné použít např. i pro převzorkování časově ekvidistantní posloupnosti bodů, která byla získána ze sebelokalizačního systému.

V některých režimech navigačního algoritmu může být vyžadována zpětná rekonstrukce do analytického vyjádření úseků trajektorie nebo převzorkování na vyšší počet bodů. V těchto situacích je nutné použít vhodnou interpolační metodu, jejíž volba vychází z účelu použití navigační metody. V případě obecné jízdy terénem je možné využít některou z běžných interpolačních metod (kvadratická, splajnová, Beziéova křivka, apod.), které odstraní, popř. sníží velikost nespojitosti azimutu tečny k trajektorii v bodech W . Ve vybraných případech může být naopak výhodné použít výhradně metodu lineární interpolace, aby nedocházelo v okolí bodů W k lokálnímu porušení předpokládané geometrie trajektorie – např. v situaci přesného projíždění definované mřížky (typická situace při plošném mapování vybrané oblasti, viz provedený experiment Plošné měření úrovně gama záření uvedený v kapitole 8.2).

4.2 Řešení navigační úlohy

Navigační úloha představuje výpočet požadované změny β_R azimutu α_R mobilního robotu pro dosažení aktuálního navigačního bodu N z bodu R (aktuální pozice mobilního robotu) po předem zvoleném typu křivky. Tento výpočet je obecně proveden

Tab. 4.1: Konfigurovatelné parametry procesu vzorkování trajektorie

Parametr	Význam
$\Delta\alpha_{t,\min}^y$	Minimální velikost změny azimutu tečny k trajektorii
Δl_{\min}^v	Minimální vzdálenost navzorkovaných bodů
Δl_{\max}^v	Maximální vzdálenost navzorkovaných bodů

na základě aktuálního azimutu α_R mobilního robotu a bodů R, N a příp. navazujících bodů W v posloupnosti \mathcal{T} (viz funkce 4.20). Postup určení vektoru \mathbf{p}_N souřadnic pozice bodu N je uveden v následující kapitole 4.3. Použití obecných křivek komplikuje fakt, že jejich výpočty je většinou nutné provádět v kartézském souřadnicovém systému. Pro zjednodušení výpočtů a urychlení výpočetního cyklu je proto možné body R a N spojit některou ze základních geodetických křivek (loxodromou nebo ortodromou) a výpočet tak nativně provádět přímo v zeměpisných souřadnicích. Výpočet veličiny β_R potom bude popsán funkcí 4.21.

$$\beta_R = f(\alpha_R, \varphi_R, \lambda_R, \varphi_N, \lambda_N, \varphi_{W,i}, \lambda_{W,i}, \dots, \varphi_{W,i+j}, \lambda_{W,i+j}) \quad (4.20)$$

$$\beta_R = f(\alpha_R, \varphi_R, \lambda_R, \varphi_N, \lambda_N) \quad (4.21)$$

Při numerických výpočtech parametrů křivek je nutné verifikovat numerickou stabilitu výpočtů, zejména je nutné uvažovat konečné rozlišení použitých datových typů a způsoby implementace goniometrických funkcí. Postup výpočtů pro loxodromu, respektující omezení numerických výpočtů [4], je uveden ve vztazích 4.22 až 4.27. Hodnotu koeficientu ξ_{lim} je potřeba zvolit dostatečně blízkou nule, kdy je odchylka mezi původní a limitní funkcí již zanedbatelná. V reálné implementaci v .NET/C# 4.0 při použití typu *double* vyhovovala již hodnota 10^{-12} . Azimut loxodromy α_{lox} je definován vztahem 4.26 a její délka l_{lox} je definována vztahem 4.27.

$$\Delta\varphi_{\text{lox}} = \varphi_N - \varphi_R \quad (4.22)$$

$$\Delta\lambda_{\text{lox}} = \lambda_N - \lambda_R \quad (4.23)$$

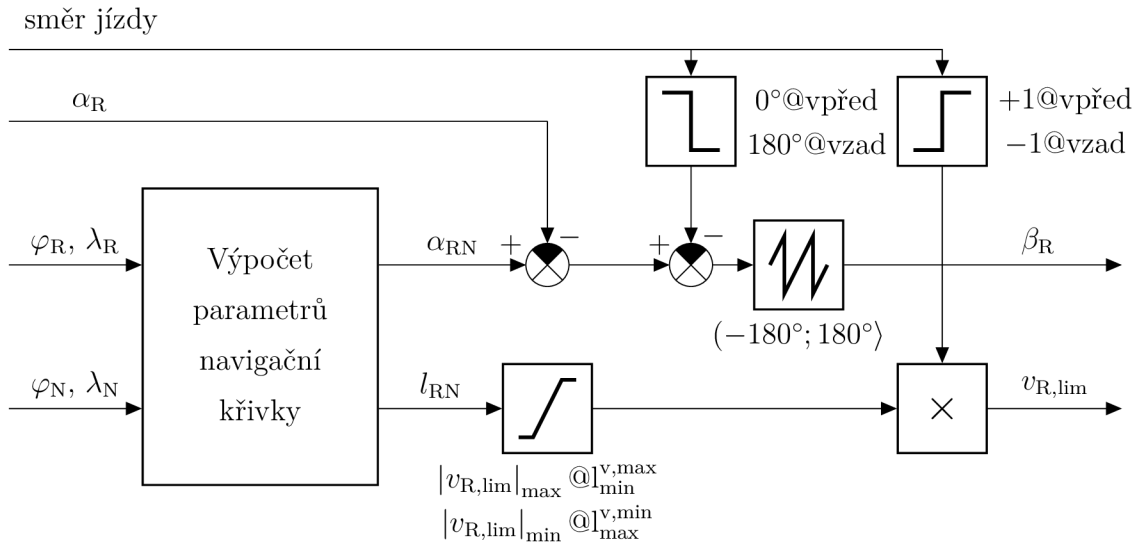
$$\Delta\Psi = \ln \frac{\tan\left(\frac{\varphi_N}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{\tan\left(\frac{\varphi_R}{2} + \frac{\pi}{4}\right)} \quad (4.24)$$

$$|\Delta\Psi| > \xi_{\text{lim}} : q = \frac{\Delta\varphi_{\text{lox}}}{\Delta\Psi}$$

$$|\Delta\Psi| \leq \xi_{\text{lim}} : q = \lim_{\varphi_R \rightarrow \varphi_N} \ln \frac{\tan\left(\frac{\varphi_N}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{\tan\left(\frac{\varphi_R}{2} + \frac{\pi}{4}\right)} = \cos \varphi_N \quad (4.25)$$

$$\alpha_{\text{lox}} = \arctan2(\Delta\lambda_{\text{lox}}, \Delta\Psi) \quad (4.26)$$

$$l_{\text{lox}} = r_s \sqrt{(\Delta\varphi_{\text{lox}})^2 + (q\Delta\lambda_{\text{lox}})^2} \quad (4.27)$$



Obr. 4.4: Schéma řešení navigační úlohy

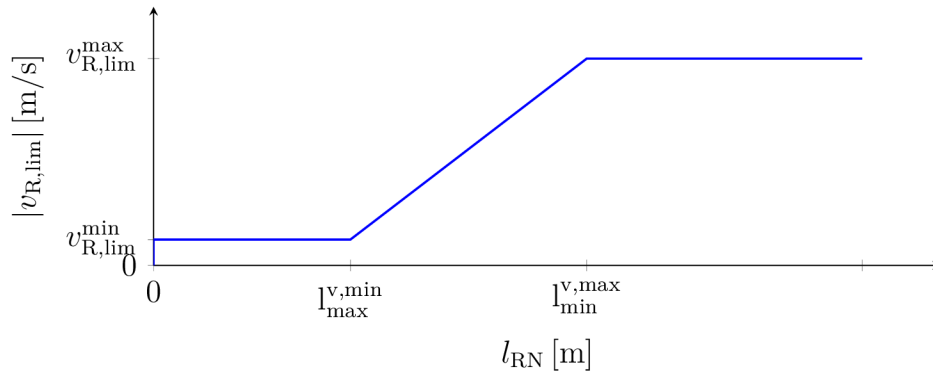
Schéma řešení navigační úlohy v navrženém navigačním algoritmu je uvedeno na obrázku 4.4. Ve výpočetním cyklu se nejdříve určí parametry křivky Γ (loxodroma nebo ortodroma), která vychází z bodu R a končí v bodě N, na který se aktuálně naviguje. Volba výpočetní metody parametrů křivky není kritická, protože výchozí délka křivky Γ je maximálně v řádu metrů a během navigace se její délka postupně snižuje až na úroveň jednotek až desítek centimetrů. Při těchto podmínkách použití je dopad volby výpočetní metody na přesnost navigace zcela zanedbatelný. Smysl má uvažovat např. výpočetní náročnost jednotlivých metod. Mezi počítané parametry křivky Γ mezi body R a N patří její počáteční azimut α_{RN} a její délka l_{RN} , jež jsou obecně určeny na základě funkcí 4.28 a 4.29. Od počátečního azimutu α_{RN} (žádaná hodnota azimutu α_R) křivky Γ je odečten aktuální efektivní azimut α'_R mobilního robotu, který respektuje směr jeho jízdy. Ten azimut odpovídá v případě jízdy vpřed

přímo azimutu α_R mobilního robotu, v případě jízdy vzad se jedná o opačný azimut k α_R . Rozdíl uvedených azimutů je normalizován do rozsahu $-180^\circ \div 180^\circ$. Výsledkem této operace je regulační odchylka β_R azimutu α_R mobilního robotu.

$$\alpha_{RN} = f_\alpha(\varphi_R, \lambda_R, \varphi_N, \lambda_N) \quad (4.28)$$

$$l_{RN} = f_l(\varphi_R, \lambda_R, \varphi_N, \lambda_N) \quad (4.29)$$

Druhou veličinou, která je výstupem řešení navigační úlohy je maximální aktuálně povolená dopředná rychlost $v_{R,\text{lim}}$ mobilního robotu. Tato veličina je nejčastěji konstantní, ale může být i odvozena od vzdálenosti l_{RN} . Aktivací uvedené smyčky lze dosáhnout projíždění vybranými kontrolními navigačními body s vysokou přesností. Ostatní nevýznamné body lze projíždět rychleji, ale s nižší přesností. Převodní funkce mezi veličinami l_{RN} a $|v_{R,\text{lim}}|$ je uvedena na obrázku 4.5. Hodnota absolutní velikosti $v_{R,\text{lim}}$ je následně limitována externě zadanou hodnotou, čehož je využíváno při jízdě robotů v konvoji. Polarita rychlosti $v_{R,\text{lim}}$ je odvozena od požadovaného směru jízdy (vpřed/vzad).



Obr. 4.5: Statická převodní funkce mezi veličinami l_{RN} a $|v_{R,\text{lim}}|$

Tab. 4.2: Konfigurovatelné parametry výpočtu navigačního řešení

Parametr	Význam
$v_{R,\text{lim}}^{\text{min}}$	Minimální velikost dopředné rychlosti mobilního robotu
$v_{R,\text{lim}}^{\text{max}}$	Maximální velikost dopředné rychlosti mobilního robotu
$l_{\text{max}}^{v,\text{min}}$	Maximální vzdálenost, při které je uplatňována $v_{R,\text{lim}}^{\text{min}}$
$l_{\text{min}}^{v,\text{max}}$	Minimální vzdálenost, při které je uplatňována $v_{R,\text{lim}}^{\text{max}}$

4.3 Určení souřadnic aktuálního navigačního bodu

V každém navigačním cyklu je nutné nejprve správně určit vektor \mathbf{p}_N souřadnic navigačního bodu N, pro který se bude provádět výpočet navigačního řešení. V následujících podkapitolách jsou uvedeny nejdůležitější podmínky, které musí bod N splňovat.

4.3.1 Nedosažená část žádané trajektorie

Zcela základní podmínkou, která je kladena na pozici navigačního bodu N je, že bod N leží v doposud nedosažené části žádané trajektorie. Část trajektorie, která je považována za nedosaženou, je zobrazena na obrázku 4.6.



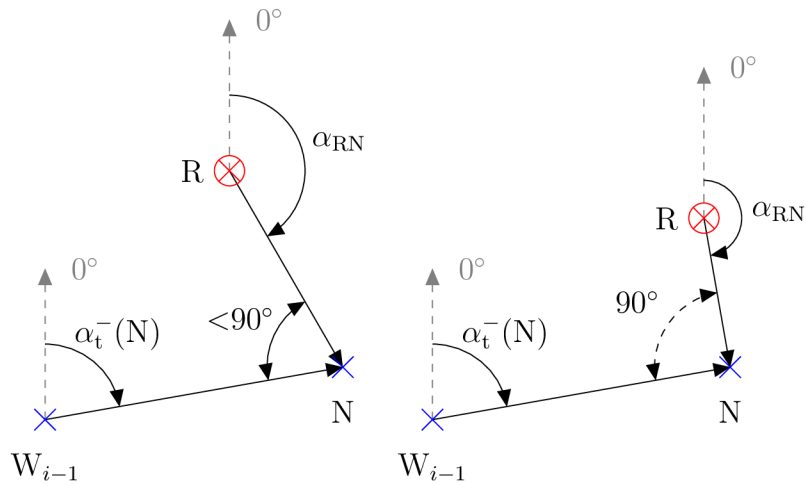
Obr. 4.6: Nedosažená část žádané trajektorie

Z obrázku 4.6 plyne, že velikost rozdílu azimutu tečny k trajektorii respektující směr trajektorie v bodě N a azimutu křivky z aktuální pozice mobilního robotu do bodu N musí být menší jako 90° . Tato podmínka je popsána nerovnicí 4.30.

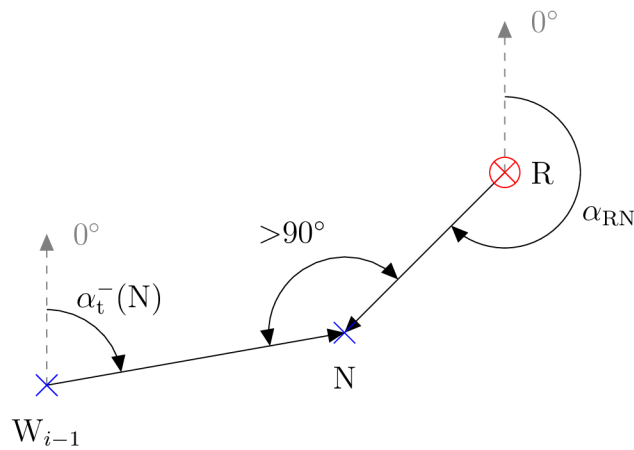
$$|\alpha_t(N) - \alpha_{RN}| < 90^\circ \quad (4.30)$$

Jednotlivé situace, které mohou nastat, jsou ukázány na obrázcích 4.7 a 4.8, ve kterých je předpokládáno použití lineární interpolace mezi jednotlivými body W posloupnosti \mathcal{T} . Na obrázku 4.7 (vlevo) leží bod N v nedosažené části žádané trajektorie, na obrázku 4.7 (vpravo) bod leží na hranici polorovin (normála k trajektorii v bodě N). Na obrázku 4.8 již není splněna podmínka 4.30. Průběh azimutu tečny k trajektorii může při použití lineární interpolace obsahovat body nespojitosti. Pro uplatnění podmínky 4.30 lze v bodech nespojitosti použít hodnotu azimutu tečny zleva (vztah 4.31) nebo střední hodnotu azimutů tečen v bodě N zleva a zprava (vztah 4.32).

$$\alpha_t^-(N) = f_\alpha(\lambda_{i-1}, \varphi_{i-1}, \varphi_N, \lambda_N) \quad (4.31)$$



Obr. 4.7: Vyhovující (vlevo) a mezní (vpravo) uspořádání bodů R a N vzhledem k žádané trajektorii



Obr. 4.8: Nevyhovující pozice bodu N

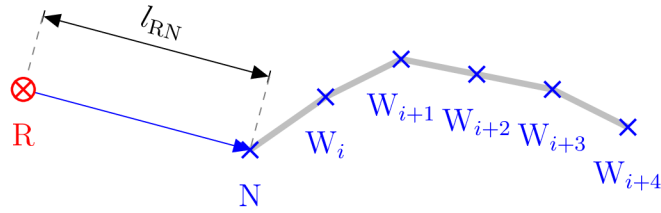
$$\alpha_t(N) = \frac{f_\alpha(\lambda_{i-1}, \varphi_{i-1}, \varphi_N, \lambda_N) + f_\alpha(\varphi_N, \lambda_N, \lambda_i, \varphi_i)}{2} \quad (4.32)$$

4.3.2 Minimální vzdálenost od navigačního bodu

Další z podmínek, kterou musí pozice bodu N splňovat, je minimální vzdálenost mezi tímto bodem a aktuální pozicí mobilního robotu. Podmínka je stanovena nerovnicí 4.33

$$l_{RN} > l_{RN, \min} \quad (4.33)$$

Zavedení tohoto omezení má filtrační charakter. Použití nízkých hodnot konstanty $l_{RN,\min}$ může způsobovat vysokou amplitudu kmitů azimutu α_R mobilního robotu, které může způsobit neakceptovatelné zvlnění trajektorie jeho jízdy. Vysoké hodnoty limitní vzdálenosti potlačují kmitání kolem žádané trajektorie, dochází ale pochopitelně ke snížení přesnosti sledování žádané trajektorie. Vyznačení vzdálenosti l_{RN} mezi aktuální pozicí mobilního robotu a aktuálním navigačním bodem N je uvedeno na obrázku 4.9. Hodnota konstanty $l_{RN,\min}$ vychází z typu terénu, ve kterém se robot pohybuje a z požadované přesnosti sledování žádané trajektorie.



Obr. 4.9: Vzdálenost mezi aktuální pozicí robotu a aktuálním navigačním bodem

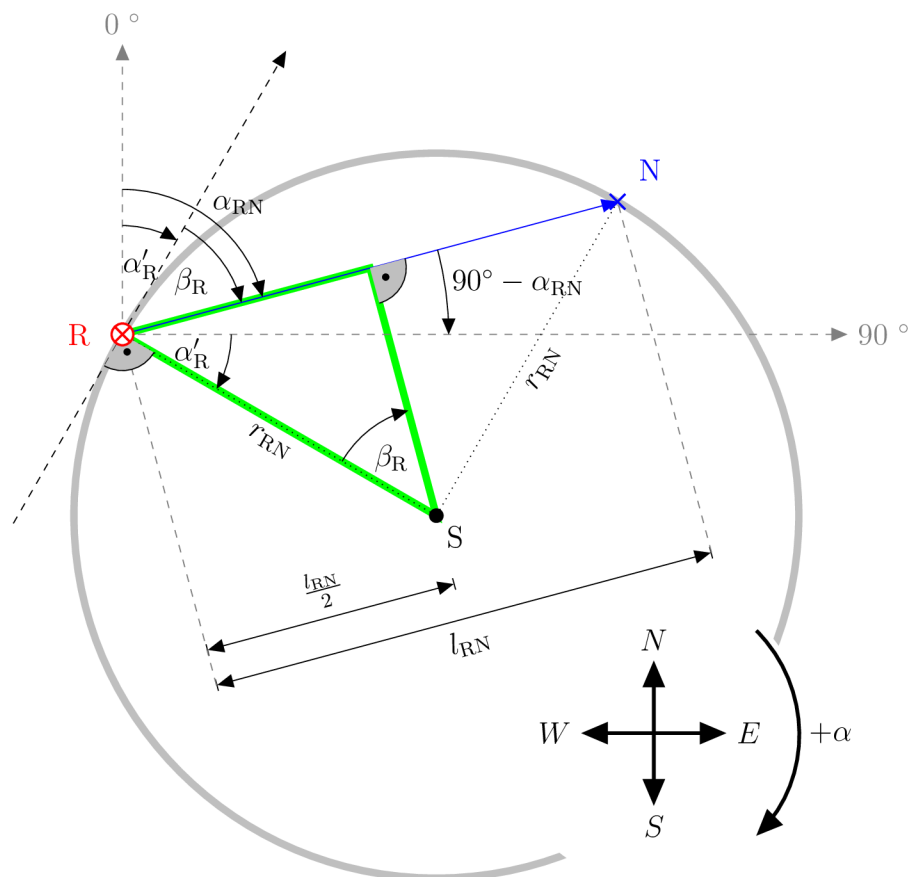
4.3.3 Limit poloměru trajektorie

Dalším z omezení, které je vhodné aplikovat, je limitování poloměru kruhového oblouku, který tvoří trajektorii z aktuální pozice mobilního robotu do aktuálního navigačního bodu N, respektující aktuální efektivní azimut α'_R mobilního robotu. Situace je vyobrazena na obrázku 4.10. Bod R odpovídá pozici mobilního robotu a jeho efektivní azimut v tomto bodě je α'_R . Azimut tečny ke kruhovému oblouku v bodě R tedy odpovídá efektivnímu azimutu α'_R robotu. Parametry α_{RN} a l_{RN} přímé spojnice mezi body R a N jsou určeny na základě již uvedených funkcí 4.28 a 4.29. Poloměr r_{RN} uvedeného kruhového oblouku lze určit ze zeleně zvýrazněného trojúhelníku, který je uveden na obrázku 4.10. Poloměr r_{RN} kruhového oblouku tvořící trajektorii je potom dán vztahem 4.34.

$$r_{RN} = \frac{l_{RN}}{2 \sin |\alpha_{RN} - \alpha'_R|} = \frac{l_{RN}}{2 \sin |\beta_R|} \quad (4.34)$$

Při určování pozice bodu N je uplatňována podmínka 4.35. Použití této podmínky limituje vysoké změny azimutu mobilního robotu při jeho malých vzdálenostech od žádané trajektorie, a tak přispívá k omezení kmitání trajektorie mobilního robotu kolem jeho žádané trajektorie.

$$r_{RN} > r_{RN,\min} \quad (4.35)$$

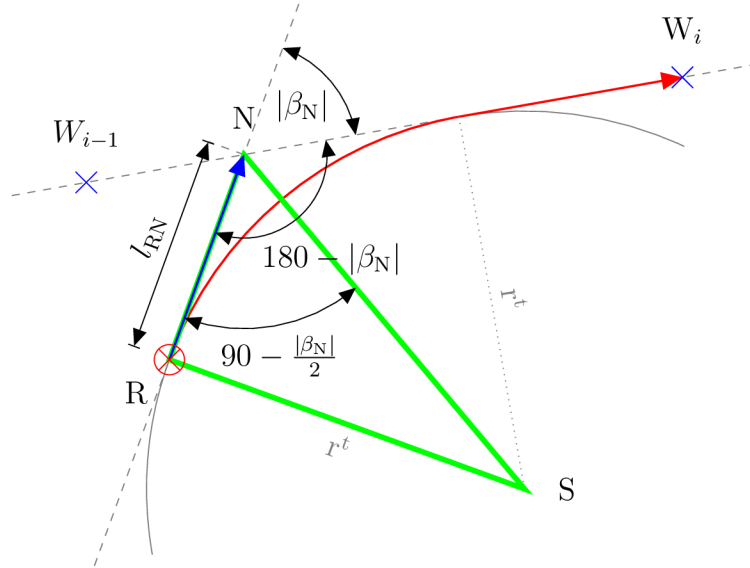


Obr. 4.10: Určení poloměru kruhového oblouku, po kterém lze dojet do bodu N

4.3.4 Konvergence k žádané trajektorii

Trajektorie pohybu mobilního robotu osciluje kolem jeho žádané trajektorie. S doposud uvedenými podmínkami může dojít k situaci, kdy dochází k výrazným netlumeným oscilacím pohybu mobilního robotu kolem jeho žádané trajektorie. Amplituda kmitů může dosahovat až hodnot minimálního poloměru zatáčení mobilního robotu. V této extrémní situaci je azimut α_R mobilního robotu významně rozdílný od azimutu tečny k trajektorii v místě průtnutí žádané trajektorie. Tlumení oscilací je možné provést zvýšením hodnoty limitní vzdálenosti $l_{RN,min}$, jak bylo uvedeno v kapitole 4.3.2. Trvalé zvýšení hodnoty limitu $l_{RN,min}$ je nepřijatelné z hlediska požadavku vysoké přesnosti sledování žádané trajektorie. Hodnota limitu $l_{RN,min}$ tedy musí být dynamicky měněna v závislosti na aktuální situaci. Odvození minimální hodnoty nového limitu $l_{RN,min}^t$, který v ideálním případě zamezí těmto oscilacím, je možné provést na základě obrázku 4.11.

Pro uplatnění tohoto omezení je nutné nejprve stanovit poloměr r_t kruhového oblouku trajektorie, která bude zajišťovat napojení na žádanou trajektorii z aktuální



Obr. 4.11: Odvození limitu $l_{RN,min}^t$ pro potlačení oscilací

pozice mobilního robotu tak, aby v bodě Q napojení platil vztah 4.36.

$$\alpha_R(Q) = \alpha_t(Q) \quad (4.36)$$

Minimální hodnota vzdálenosti l_{RN} je na základě obrázku 4.11 dána vztahem 4.37.

$$l_{RN,min}^t = r_t \tan \frac{|\beta_N|}{2} = r_t \tan \frac{|\alpha_{RN} - \alpha_t(N)|}{2} \quad (4.37)$$

Pozice bodu N tedy musí splňovat podmínku 4.38.

$$l_{RN} > l_{RN,min}^t \quad (4.38)$$

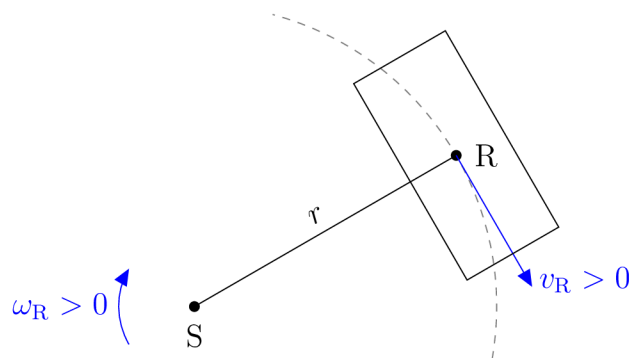
Uvedené omezení nabývá platnosti pouze při splnění předpokladu 4.39, který je během jízdy zajištěn podmínkou uvedenou v kapitole 4.3.1. Při nájezdu na začátek trajektorie, ale tato podmínka nemusí být vždy automaticky splněna, proto je nutné aplikaci podmínky 4.38 podmínit platností podmínky 4.39.

$$|\beta_N| < 90^\circ \quad (4.39)$$

V případě, kdy je r_t nastaven na menší hodnotu, než je nastavené omezení minimálního poloměru pohybu mobilního robotu, dojde ke kmitavé konvergenci trajektorie pohybu robotu k jeho žádané trajektorii, protože mobilní robot nezvládne sledovat žádaný kruhový oblouk, který vede pro splnění podmínky 4.36.

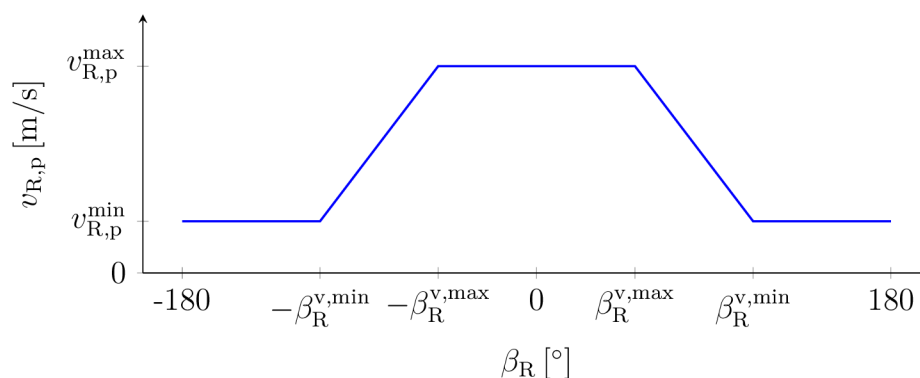
4.4 Řízení pohybu mobilního robotu

Výsledkem řešení navigační úlohy je limitní povolená dopředná rychlost mobilního robotu $v_{R,\text{lim}}$ a regulační odchylka β_R azimutu α_R mobilního robotu. Na základě těchto dvou veličin je proveden výpočet parametrů pohybu mobilního robotu. Řízeními parametry pohybu jsou dopředná rychlost v_R a úhlová rychlost ω_R . Význam těchto veličin je uveden na obrázku 4.12.



Obr. 4.12: Definice dopředné v_R a úhlové ω_R rychlosti robotu

Pro daný mobilní robot je definován profil $v_{R,p} = f(\beta_R)$, který definuje závislost maximální velikosti dopředné rychlosti v_R na regulační odchylce β_R azimutu α_R mobilního robotu. Typický tvar rychlostního profilu je uveden na obrázku 4.13. Při nízkých hodnotách regulační odchylky azimutu není dopředná rychlost omezoována. Při středních velikostech β_R dochází k poklesu dopředné rychlosti až na minimální nastavenou hodnotu, která může být pro podvozky s nulovým poloměrem zatačení i nulová. Pro vysoké velikosti veličiny β_R je použita minimální velikost dopředné rychlosti, definovaná parametrem $v_{R,p}^{\text{min}}$



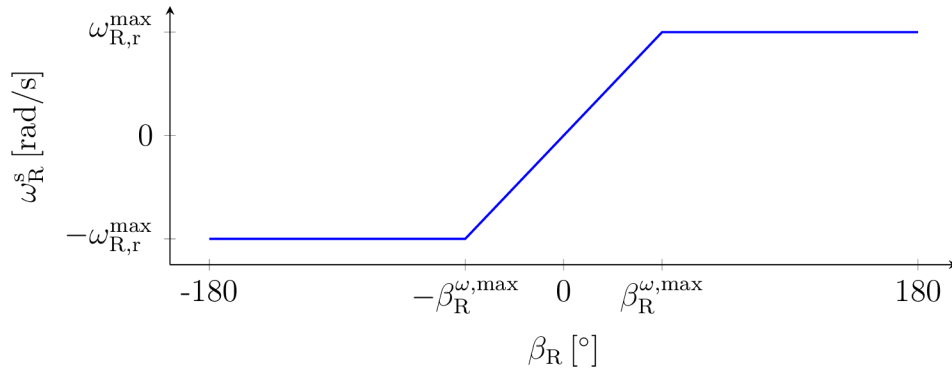
Obr. 4.13: Profil maximální velikosti dopředné rychlosti v_R robotu

Hodnota výsledné velikosti použité dopředné rychlosti mobilního robotu je určena jako menší z velikosti rychlostí, které jsou získány z rychlostního profilu pro aktuální hodnotu regulační odchylky azimutu a limitní dopředné rychlosti získané z bloku, který realizuje výpočet navigačního řešení.

Pro regulaci azimutu mobilního robotu prostřednictvím úhlové rychlosti jeho pohybu je použit proporcionální regulátor. Typická použitá přenosová charakteristika pro tento regulátor je uvedena na obrázku 4.14. Body zlomu se primárně volí hodnotou parametru $\beta_R^{r,\min}$, který určuje mezní regulační odchylku azimutu, při jejímž překročení dochází k jízdě po trajektorii s minimálním povoleným poloměrem r_R^{\min} . Pro vyšší regulační odchylky azimutu je část přenosové charakteristiky definována vztahem 4.40. Pro regulační odchylky, pro které platí $\beta_R < \beta_R^{r,\min}$ je tato část přenosové charakteristiky regulátoru dána vztahem 4.41.

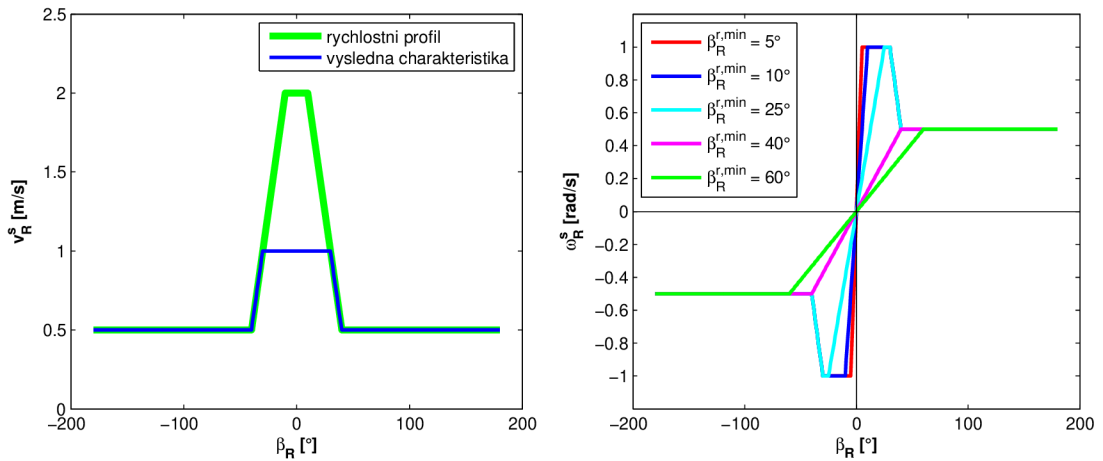
$$\omega_R^s = \frac{v_R^s}{r_R^{\min}} \quad \beta_R > \beta_R^{r,\min} \quad (4.40)$$

$$\omega_R^s = \frac{\beta_R}{\beta_R^{r,\min}} \frac{v_R^s(\beta_R^{r,\min})}{r_R^{\min}} \quad \beta_R < \beta_R^{r,\min} \quad (4.41)$$



Obr. 4.14: Typická přenosová charakteristika použitého regulátoru azimutu

Tvar výsledné přenosové charakteristiky regulátoru azimutu závisí na vzájemné poloze zlomového bodu $\beta_R^{r,\min}$ vůči zlomovým bodům, definovaným koeficienty $\beta_R^{v,\min}$ a $\beta_R^{v,\max}$. Na obrázku 4.15 vlevo, je uveden příklad rychlostního profilu (zelená křivka), jehož parametry jsou: $\beta_R^{v,\max} = 10^\circ$, $\beta_R^{v,\min} = 40^\circ$, $v_{R,p}^{\min} = 0,5$ m/s, $v_{R,p}^{\max} = 2$ m/s. Modrá křivka určuje výslednou charakteristiku velikosti žádané dopředné rychlosti mobilního robotu po aplikaci limitní dopředné rychlosti $v_{R,\lim} = 1$ m/s. Na obrázku 4.15 vpravo, jsou uvedeny možné průběhy přenosové charakteristiky regulátoru azimutu pro různé hodnoty $\beta_R^{r,\min}$, při které dochází k jízdě po trajektorii s poloměrem r_R^{\min} . V tomto grafu lze vidět výraznou nelineární závislost pokud je $\beta_R^{r,\min} < \beta_R^{v,\min}$.



Obr. 4.15: Příklad rychlostního profilu a přenosové charakteristiky regulátoru azimutu pro různé hodnoty $\beta_R^{r,\min}$

Maximální hodnoty akčního zásahu ve formě žádané úhlové rychlosti pohybu jsou navíc omezeny jejím zadaným limitem ω_R^{\max} . K uplatnění tohoto limitu dochází především při malém nebo v krajním případě nulovém zadaném minimálním poloměru zatáčení. Maximální velikost akčního zásahu je v těchto případech limitována touto hodnotou. Přehled parametrů použitých k parametrizaci řízení pohybu mobilního robotu je uveden v tabulce 4.3.

Tab. 4.3: Konfigurovatelné parametry řízení pohybu mobilního robotu

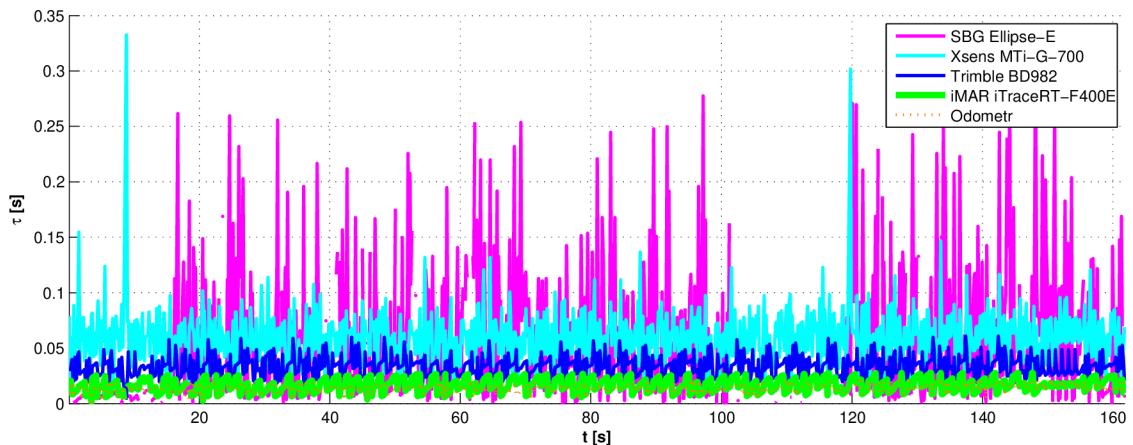
Parametr	Význam
$\beta_R^{v,\min}$	Minimální regulační odchylka, při které je uplatňována $v_{R,p}^{\min}$
$\beta_R^{v,\max}$	Maximální regulační odchylka, při které je uplatňována $v_{R,p}^{\max}$
$v_{R,p}^{\min}$	Minimální velikost dopředné rychlosti v rychlostním profilu
$v_{R,p}^{\max}$	Maximální velikost dopředné rychlosti v rychlostním profilu
$\beta_R^{r,\min}$	Minimální regulační odchylka, při které je uplatňován r_R^{\min}
r_R^{\min}	Minimální poloměr zatáčení pro daný podvozek
ω_R^{\max}	Maximální povolená úhlová rychlost pohybu při zatáčení

V popisovaném bloku řízení pohybu jsou také prováděny kontroly na překročení dynamických limitů pohonů a aktuátorů v následujícím časovém horizontu. Kontrola je prováděna na limitní hodnotu zrychlení pro rozjezd a brzdění mobilního robotu a na limitní hodnotu rychlosti přestavení aktuátorů kol. V případě detekce překročení některého ze zadaných omezení v období predikčního intervalu jsou aktuálně vypočítané žádané hodnoty akčních zásahů omezeny tak, aby nedošlo v následujícím

časovém horizontu k překročení dynamických možností pohonů a aktuátorů a tím pádem k nedosažení žádaných parametrů pohybu mobilního robotu.

4.5 Estimace a predikce sebelokalizačních řešení

V řídicím systému navigačního procesu je potřeba získat pozici a orientaci mobilního robotu platnou k aktuálnímu časovému okamžiku. To ale není technicky možné z důvodu existence zpoždění v přenosových kanálech. Data přijatá ze sebelokalizačních systémů v řídicím systému navigace jsou vždy platná k některému z minulých časových okamžiků. Na obrázku 4.16 je uveden příklad naměřených časových zpoždění sebelokalizačních dat z jednotlivých použitých zařízení během jednoho z provedených experimentů. Z grafu je patrná rozdílnost tohoto zpoždění pro jednotlivá použitá zařízení a současně jeho nestabilita v průběhu času. Rozdíly jsou způsobeny především použitým typem komunikačního rozhraní. Nejnižší hodnoty mají zařízení připojená přes Ethernet 100 Mbit/s. Jedná se o zařízení iMAR iTraceRT-F400E, Trimble BD982 a interní odometr robotu Orpheus-X3. Odometr a iTraceRT-F400E vykazují nejmenší zpoždění dat. U GNSS přijímače BD982 je zpoždění vyšší, které zahrnuje navíc i čas výpočtu lokalizačních dat, který je uveden ve specifikaci přijímače [31]. Zbývající dvě zařízení SBG Ellipse-E a Xsens MTi-G-700 vykazují zpoždění až 300 ms. Tato zařízení byla připojena sběrnici USB2.0. Z uvedeného grafu je patrné, že pro dosažení vysoké přesnosti navigace je třeba v navigačním algoritmu tato proměnná zpoždění kompenzovat.



Obr. 4.16: Naměřená zpoždění získaných sebelokalizačních dat v řídicím systému navigace

Ze všech úhlů orientace je přesnost navigace nejvíce citlivá na přesnost azimutu mobilního robotu, proto je v estimačním bloku řešen jen tento úhel. Estimace azimutu $\alpha_{R,i}^e$ platného k aktuálnímu časovému okamžiku t_0 na základě získaného azimutu $\alpha_{R,i}^m$ z i -tého sebelokalizačního systému platného k časovému okamžiku $t_0 - \tau_m$ je provedena na základě vztahu 4.42. Realizace tohoto výpočtu je potom založena na numerickém výpočtu uvedeného integrálu na základě dat posloupnosti $\omega_R^{s,e}$.

$$\alpha_{R,i}^e(t_0) = \alpha_{R,i}^m(t_0 - \tau_{m,i}) + \int_{t_0 - \tau_{m,i}}^{t_0} \omega_R^s(t) dt \quad (4.42)$$

Obdobným způsobem jsou kompenzovány i dopravní zpoždění jednotlivých řešení souřadnic pozice mobilního robotu. Princip kompenzace je možné popsat vztahem 4.43. V implementaci metody je tento výpočet realizován na základě dat posloupnosti $v_R^{s,e}$. Matice rotace \mathbf{R}_v^1 je pro jednotlivé okamžiky počítána na základě nekompenzovaných úhlů roll a pitch a azimutu získaného vztahem 4.42.

$$\mathbf{p}_{R,i}^e(t_0) = \mathbf{p}_{R,i}^m(t_0 - \tau_{m,i}) + \int_{t_0 - \tau_{m,i}}^{t_0} \mathbf{R}_v^1(t) \mathbf{v}_R^s(t) dt \quad (4.43)$$

Kde jednotlivé symboly označují:

$\mathbf{p}_{R,i}^e$ estimovaný vektor pozice pro i -tý sebelokalizační systém

$\mathbf{p}_{R,i}^m$ vektor pozice získaný z i -tého sebelokalizačního systému

t_0 aktuální časový okamžik

$\tau_{m,i}$ dopravní zpoždění vektoru pozice získaného z i -tého sebelokalizačního systému

\mathbf{R}_v^1 matice rotace ze souřadného systému robota do lokálního systému

\mathbf{v}_R^s vektor žádané rychlosti robotu v jeho souřadném systému

Uvedené kompenzace dopravních zpoždění jsou provedeny pro všechny použité sebelokalizační systémy. Velikost aktuálního dopravního zpoždění je určena na základě časové značky daných sebelokalizačních dat a synchronizovaného času řídicího systému s těmito sebelokalizačními systémy. Součástí výpočtů pro kompenzaci dopravního zpoždění sebelokalizačních dat je i úprava příslušných odhadů jejich chyb. Implementace šíření chyb realizovanými výpočty je založena na postupech uvedených v publikaci [19].

Totožný způsob výpočtu je použit i pro predikci sebelokalizačních dat v predikčním intervalu $\langle t + \tau_c, t + \Delta t_p \rangle$. Výpočty jsou založeny na znalosti posloupností $v_R^{s,p}$ a $\omega_R^{s,p}$. Jednotlivé hodnoty predikovaných sebelokalizačních dat jsou iteračně počítány během každého navigačního cyklu. Jejich znalost je nutná pro zajištění nepřekročení dynamických omezení použitých pohonů a aktuátorů kol mobilního robotu.

4.6 Datová fúze sebelokalizačních řešení

Po estimaci všech sebelokalizačních řešení do aktuálního časového okamžiku je proveden výběr nejpřesnějšího řešení pozice a orientace na základě předpokládané chyby jednotlivých těchto veličin. Odhadovaná chyba prochází celým řetězcem zpracování stejně jako samotná lokalizační data. Všechny odhady chyb jsou na začátku výpočtů převedeny na RMS chybu. U orientace probíhá výběr nejpřesnějšího úhlu odděleně na základě jejich předpokládané přesnosti. Výběr nejpřesnějšího řešení pozice je rozdělen na současný výběr souřadnic horizontální roviny na základě DRMS chyby pozice v horizontální rovině. Výšková souřadnice je vybírána odděleně. Celý výběr je rozdělen do několika etap. V první etapě jsou se seznamu sebelokalizačních řešení odfiltrována řešení, která nevyhovují z hlediska požadovaného limitu přesnosti nebo aktuálního stavu sebelokalizačního systému (nevhodný měřicí režim apod.). V druhé fázi jsou jednotlivá řešení sloučena do skupin podle jejich přiřazených priorit a tyto skupiny jsou seřazeny podle jejich priorit. Výsledkem výběru je řešení, které pochází ze skupiny s nejvyšší prioritou a má nejvyšší přesnost v této skupině. V případě, že žádné z řešení nevyhovuje hraničním podmínkám, řešení není nalezeno a pohyb mobilního robotu je zastaven. Výsledná validní řešení jsou následně použita k opravě stavu řešení použité odometrie nebo gyrodometrie.

4.7 Datová fúze na úrovni řízení pohybu robotu

Dalším způsobem zvýšení robustnosti celého procesu navigace je kromě použití více nezávislých sebelokalizačních metod také integrace externě realizovaných navigačních metod, které jsou založeny na jiném principu, než navigační metoda uvedená v této dizertační práci. Může se jednat o výsledky řešení pohybu mobilního robotu založených např. na SLAM algoritmech, strojovém zpracování obrazu z kamer a dalších metod. Vzhledem k tomu, že ostatní metody nemusí obecně pracovat s navigačními body jako metoda prezentovaná v této dizertační práci, je nutné datovou fúzi realizovat právě až na úrovni řízení pohybu mobilního robotu.

Každá dvojice parametrů (v_R^s , ω_R^s) žádaného pohybu pocházející z dané navigační metody je doplněna hodnotou tzv. konfidence daného řešení, která nabývá hodnot z rozsahu 0 až 1. Vhodné interní mapování aktuální odhadované přesnosti dané metody do uvedeného rozsahu je klíčovým předpokladem pro správnou funkci. Je tedy potřeba zejména sesouhlasit mezi navigačními metodami stav, kdy je konfidence blízká nule. Pokud je tohoto dosaženo, jsou aktuální žádané hodnoty pohybu mobilního robotu brány z metody, která má aktuálně nejvyšší hodnotu konfidence. Pro přepínání mezi metodami je vhodné zavést malou hysterezi (např. 5 %).

5 KINEMATIKA PODVOZKŮ MOBILNÍCH ROBOTŮ

V této kapitole je uvedeno odvození vztahů pro kinematické modely používaných podvozků. V mobilní průzkumné robotice je velmi často pro malé roboty používán smykem řízený podvozek, který umožňuje otáčení mobilního robotu s nulovým poloměrem a současně je jeho mechanická konstrukce velmi jednoduchá. Pro velké mobilní roboty není tento podvozek již tak vhodný z důvodu vysokého stranového namáhání kol. Pro tyto roboty jsou proto používány podvozky, které disponují stranovým natáčením kol. V realizovaných experimentech použitý mobilní robot Orpheus-X3 je postaven na smykem řízeném podvozku a mobilní robot Taros 6x6 V2 je postaven na podvozku se šesti plně řízenými koly.

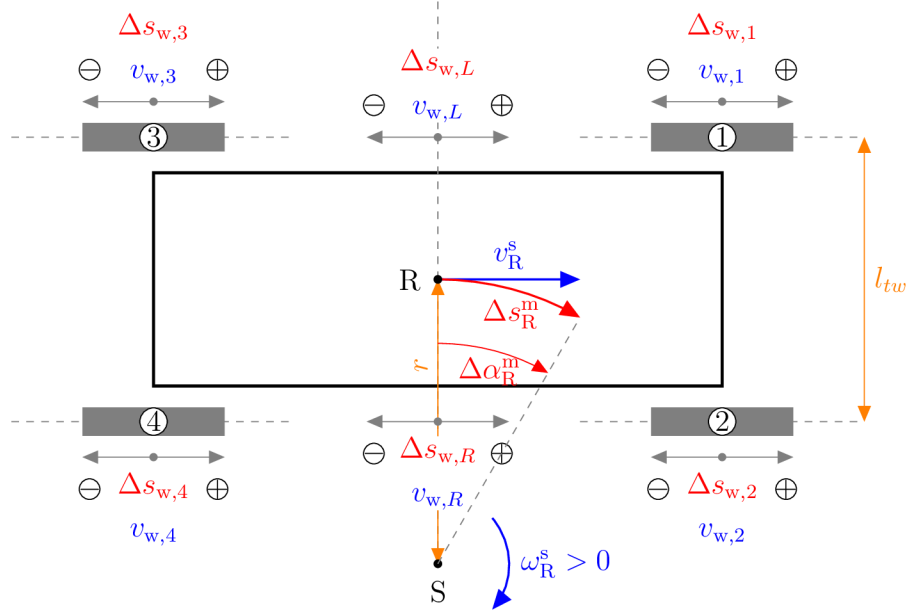
Kinematika mobilních robotů zahrnuje dvě úlohy. Příímá úloha řeší transformaci naměřených hodnot stavových veličin jednotlivých kol na veličiny popisující pohyb zvoleného bodu mobilního robotu. Této transformace je nejčastěji využíváno při odhadu pohybu mobilního robotu z měřených stavových veličin jednotlivých kol. Inverzní úloha řeší transformaci parametrů žádaného pohybu mobilního robotu do říditelných veličin jednotlivých říditelných kol. Tato transformace je využívána zejména při řízení pohybu mobilního robotu. Parametry kinematických modelů byly získány na základě jejich identifikace z několika trajektorií pohybu daného mobilního robotu, které byly naměřeny pomocí RTK GNSS.

5.1 Smykem řízený podvozek

Přístup k řešení kinematiky smykem řízeného podvozku vychází z článku [27]. Kinematický model smykem řízeného podvozku je uveden na obrázku 5.1. Nejprve budou odvozeny vztahy pro řízení pohybu mobilního robotu, tedy funkce 5.1 a 5.2 inverzní kinematiky, které představují transformaci parametrů v_R^s a ω_R^s žádaného pohybu mobilního robotu na žádané úhlové rychlosti (vektor ω_m^s) jeho jednotlivých pohonů. Parametry žádaného pohybu jsou platné pro bod R (viz obrázek 5.1), který leží ve středu horizontální roviny, která je definována body dotyku kol s touto rovinou. Žádané úhlové rychlosti pohonů jsou vyjádřeny v nativních jednotkách použité řídicí jednotky pohonů mobilního robotu. Obecně se jedná o změnu úhlové míry za jednotku času (inc/s, rad/s apod.).

$$\omega_{m,1}^s = f(v_R^s, \omega_R^s), \quad \omega_{m,3}^s = f(v_R^s, \omega_R^s) \quad (5.1)$$

$$\omega_{m,2}^s = f(v_R^s, \omega_R^s), \quad \omega_{m,4}^s = f(v_R^s, \omega_R^s) \quad (5.2)$$



Obr. 5.1: Kinematický model smykem řízeného podvozku

Obvodové rychlosti kol na dané straně mobilního robotu musí být totožné, aby nedocházelo k jejich vzájemnému prokluzu vlivem chybného řízení. Musí tedy platit podmínky 5.3 a 5.4.

$$v_{w,1}^s = v_{w,3}^s = v_{w,l}^s \quad (5.3)$$

$$v_{w,2}^s = v_{w,4}^s = v_{w,r}^s \quad (5.4)$$

Pro obvodové rychlosti kol levé a pravé strany mobilního robotu lze odvodit vztahy 5.5 a 5.6. Veličina ξ^c představuje efektivní rozteč kol pro dané rychlosti v_R^s a ω_R^s . Tato veličina je ekvivalentem rozteče kol u diferenciálně řízeného podvozku, u kterého nedochází k prokluzu kol při zatáčení. Vzhledem k tomu, že u smykem řízeného podvozku dochází k částečnému prokluzu kol při jeho zatáčení, je efektivní rozteč kol v kinematickém modelu větší než je skutečná hodnota. Z důvodu obtížně modelovatelného procesu smýkání při změně směru jízdy mobilního robotu je použita kalibrace hodnot veličiny ξ^c pro celý rozsah používaných žádaných dopředných rychlostí v_R^s a úhlových rychlostí ω_R^s mobilního robotu.

$$v_{w,l}^s = v_R^s + \frac{1}{2} \xi^c \omega_R^s \quad (5.5)$$

$$v_{w,r}^s = v_R^s - \frac{1}{2} \xi^c \omega_R^s \quad (5.6)$$

$$\xi^c = f(v_R^s, \omega_R^s) \quad (5.7)$$

Obvodovou rychlost jednotlivých kol nejde typicky řídit přímo, ale prostřednictvím úhlové rychlosti hřídelí poháněcích motorů. Pro vektor ω_m^s žádaných úhlových rychlostí jednotlivých pohonů platí vztah 5.8. Vektory \mathbf{c}_w^c a $\mathbf{c}_w^{c,\omega}$ jsou tvořeny převodními konstantami mezi žádanou hodnotou úhlové rychlosti otáčení motoru a žádanou obvodovou rychlostí jednotlivých kol v metrech za sekundu. Žádaná úhlová rychlost pohonů je často udávána počtem inkrementů za sekundu.

$$\omega_m^s = \mathbf{c}_w^c \cdot v_R^s + \frac{1}{2} \xi^c \mathbf{c}_w^{c,\omega} \cdot \omega_R^s = \begin{pmatrix} \left(v_R^s + \frac{1}{2} \xi^c \omega_R^s \right) c_{w,1}^c \\ \left(v_R^s - \frac{1}{2} \xi^c \omega_R^s \right) c_{w,2}^c \\ \left(v_R^s + \frac{1}{2} \xi^c \omega_R^s \right) c_{w,3}^c \\ \left(v_R^s - \frac{1}{2} \xi^c \omega_R^s \right) c_{w,4}^c \end{pmatrix}^T \quad (5.8)$$

$$\mathbf{c}_w^c = \left(c_{w,1}^c, c_{w,2}^c, c_{w,3}^c, c_{w,4}^c \right) \quad (5.9)$$

$$\mathbf{c}_w^{c,\omega} = \left(c_{w,1}^c, -c_{w,2}^c, c_{w,3}^c, -c_{w,4}^c \right) \quad (5.10)$$

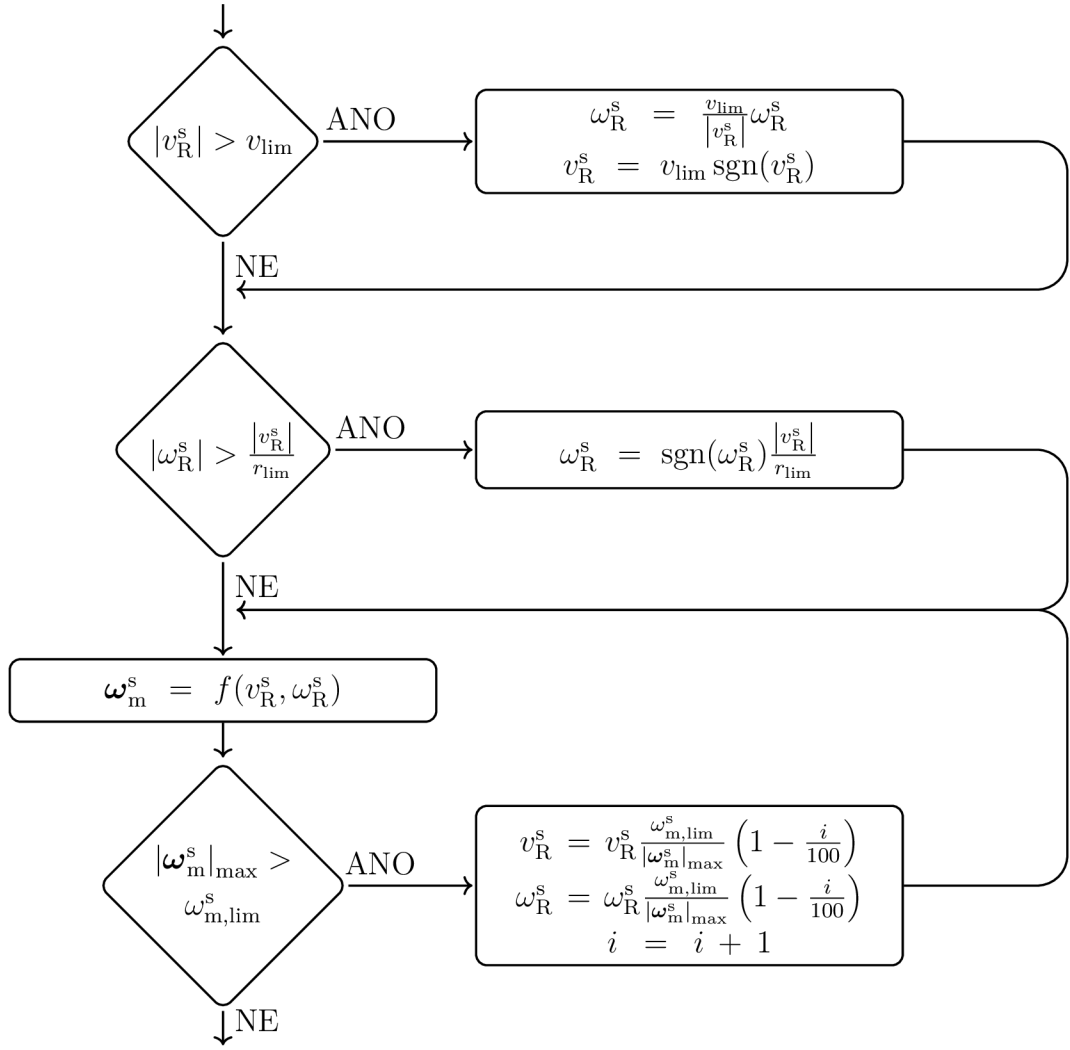
Motory pohonů mobilního robotu mají také své fyzikální limity. V kontextu kinematiky se jedná především o jejich maximální povolené úhlové rychlosti. Vypočítané žádané úhlové rychlosti je třeba kontrolovat na tyto limity. V případě jejich překročení je třeba nalézt vyhovující řešení pro omezený pohyb. Vzhledem k použití nelineární funkce ξ^c je vztah mezi v_R^s a jednotlivými složkami vektoru ω_m^s nelineární. V případě omezení úhlové rychlosti pohybu mobilního robotu nemusí být řešení nalezeno prostým poměrovým řešením, ale může být provedeno několik iterací k nalezení vyhovujícího řešení. Rychlost konvergence je zvýšena použitím koeficientu poměrného snížení, jehož hodnota se s každou neúspěšnou iterací zvyšuje. Vývojový diagram postupu řešení inverzní kinematické úlohy je na obrázku 5.2.

Pro odhad pozice a orientace mobilního robotu z naměřených absolutních úhlů otočení jednotlivých kol je nutné provést inverzní proces zpracování, než který byl uveden v předešlé části. Je tedy třeba odvodit vztahy dané funkcemi 5.11 a 5.12.

$$\Delta s_R^m = f \left(\Delta \gamma_{m,1}^m, \Delta \gamma_{m,2}^m, \Delta \gamma_{m,3}^m, \Delta \gamma_{m,4}^m \right) \quad (5.11)$$

$$\Delta \alpha_R^m = f \left(\Delta \gamma_{m,1}^m, \Delta \gamma_{m,2}^m, \Delta \gamma_{m,3}^m, \Delta \gamma_{m,4}^m \right) \quad (5.12)$$

$$\Delta \gamma_{m,i}^m(t) = \gamma_{m,i}^m(t) - \gamma_{m,i}^m(t - \Delta t) \quad (5.13)$$



Obr. 5.2: Nalezení řešení kinematické úlohy vyhovujícího fyzikálním omezením použitého podvozku mobilního robotu

$$\Delta s_R^m = \frac{1}{4} \left(c_{w,1}^m \Delta \gamma_{m,1}^m + c_{w,2}^m \Delta \gamma_{m,2}^m + c_{w,3}^m \Delta \gamma_{m,3}^m + c_{w,4}^m \Delta \gamma_{m,4}^m \right) \quad (5.14)$$

$$\Delta \alpha_R^m = \frac{1}{2\xi^m} \left(c_{w,1}^m \Delta \gamma_{m,1}^m - c_{w,2}^m \Delta \gamma_{m,2}^m + c_{w,3}^m \Delta \gamma_{m,3}^m - c_{w,4}^m \Delta \gamma_{m,4}^m \right) \quad (5.15)$$

$$\mathbf{c}_w^m = \left(c_{w,1}^m, c_{w,2}^m, c_{w,3}^m, c_{w,4}^m \right) \quad (5.16)$$

$$\xi^m = f \left(\omega_{m,1}^m, \omega_{m,2}^m, \omega_{m,3}^m, \omega_{m,4}^m \right) \quad (5.17)$$

Kalibraci kinematického modelu je nutné provést pro oba uvedené procesy. Proces řízení pohybu mobilního robotu zahrnuje stanovení vektoru \mathbf{c}_w^c konstant určujících vztah mezi úhlovou rychlostí otáčení hřídele motoru a obvodovou rychlostí poháněného kola. Dále je nutné stanovit hodnoty funkce ξ^c v závislosti na celém používaném rozsahu žádaných dopředných a úhlových rychlostí mobilního robotu. Odhad pozice a orientace z naměřených absolutních natočení hřídelí motorů je inverzí předchozího problému. Pro tento proces je nutné určit vektor \mathbf{c}_w^m konstant určujících vztah mezi ujetou vzdáleností daným kolem a úhlovým natočením hřídele příslušného motoru. I pro tento proces je nutné určit průběh funkce ξ^m v závislosti na úhlových rychlostech jednotlivých motorů. Dimenzi této funkce je možné snížit přepočtem rychlostí motorů kol dané strany na střední rychlost kol dané strany. V ideálním případě by přenosy v uvedených procesech měly být navzájem inverzní. U reálného podvozku není tento předpoklad není splněn např. z důvodu existence nenulových regulačních odchylek. Proto není možné použít společné konstanty pro oba procesy a je nutné provést kalibraci konstant pro oba procesy odděleně. Hodnoty složek kalibračních vektorů jsou dány především převodním poměrem použité převodovky a aktuálním tlakem v pneumatikách, který ovlivňuje její obvod.

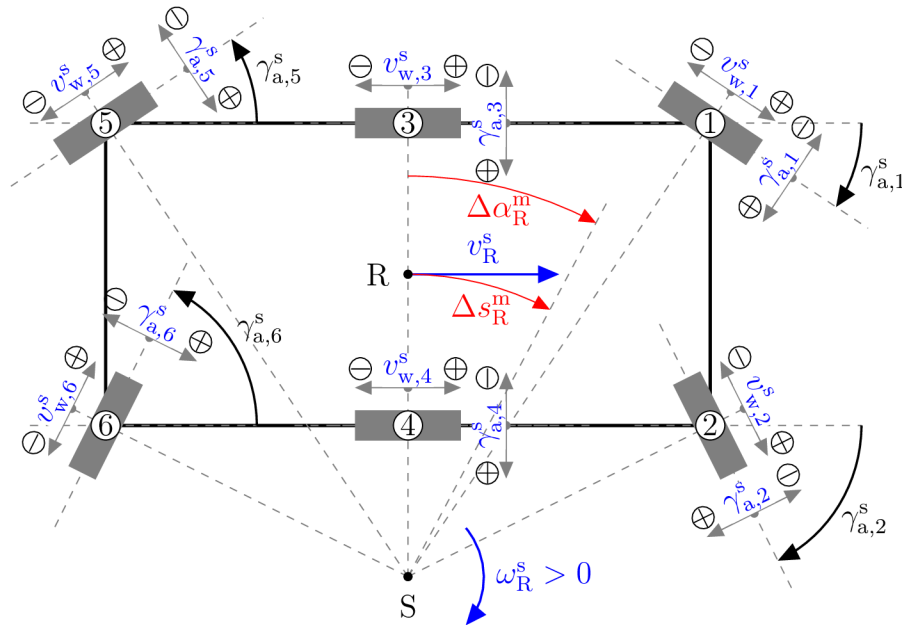
5.2 Šestikolový podvozek s nezávisle řízenými koly

V této kapitole je popsána kinematika pro podvozek se šesti nezávisle řízenými koly. Přístup k řešení kinematiky vychází z článku [24], ve kterém ale uvedené vztahy nekorespondují se schématem podvozku. V dizertační práci zvolený přístup nevyužívá virtuální řízené kolo, ale vztahy obsahují přímo parametry žádaného pohybu.

Uvedený typ podvozku umožňuje realizaci několika druhů řízení. V základním režimu vycházejícím z Ackermanova řízení jsou natáčena kola přední a prostřední nápravy. Kola zadní nápravy nejsou v tomto režimu natáčena. Střed otáčení podvozku leží na přímce procházející středem kol zadní nápravy. Režim je označen jako *Tatra*. Dalším režimem, který je odvozen v předchozího, je *Kruh*, ve kterém dochází k natáčení kol přední a zadní nápravy. Kola prostřední nápravy nejsou natáčena. Výhodou tohoto režimu je nižší hodnota minimálního poloměru zatáčení. Střed otáčení leží na přímce procházející koly prostřední nápravy. Třetím režimem je tzv. *Krab*, ve kterém jsou všechna kola vytočena pod stejným úhlem. V tomto režimu je umožněn částečný pohyb do strany, nikoliv pouze v ose podvozku jako u režimů *Tatra* a *Kruh*, což přináší celkově lepší manévrovatelnost. V tomto režimu nedochází ke změně azimutu mobilního robotu. Dalším z režimů je *Střed*, ve kterém se robot může pouze otáčet na místě. Kola na přední i zadní nápravě jsou vytočena pod stejnou velikostí úhlu. Protilehlá kola na úhlopříčce podvozku jsou vždy vytočena pod stejným

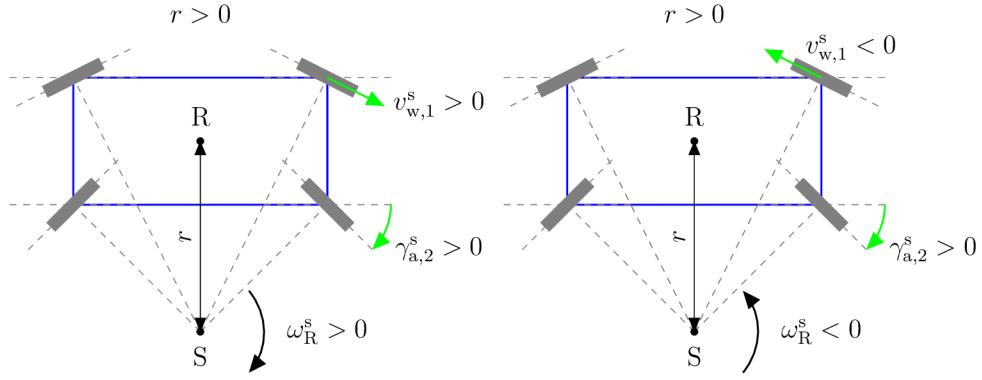
úhlem. Kola ležící na stejné nápravě jsou vytočena pod vzájemně opačným úhlem. Středová kola nejsou v tomto režimu vytáčena. Podvozek je možné teoreticky řídit i způsobem uvedeným v předchozí kapitole, ale takovýto režim nemá příliš velký praktický přínos, přináší jen vyšší mechanické namáhání náprav.

Pro automatickou navigaci podél obecné trajektorie je nejvhodnější režim *Kruh*, který umožňuje změnu azimutu mobilního robotu během jeho jízdy a současně umožňuje dosáhnout nejmenšího poloměru zatáčení v průběhu jízdy. V následujícím textu jsou odvozeny vztahy pro režim *Kruh*. Kinematický model pro tento režim je uveden na obrázku 5.3. Rovina kol je vždy kolmá se spojnicí středu kola a středu otáčení S.

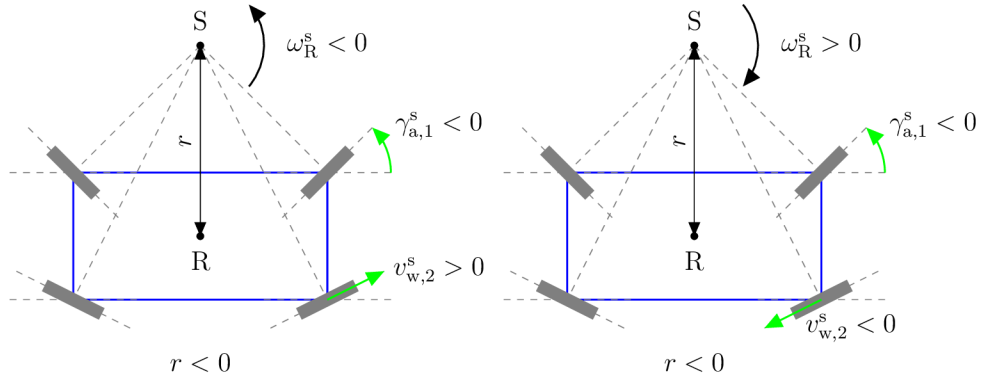


Obr. 5.3: Kinematický model šestikolového podvozku v režimu kruh

Nejprve budou opět odvozeny vztahy inverzní kinematiky pro řízení pohybu mobilního robotu. Ta je tvořena vztahy pro žádané úhlové rychlosti motorů jednotlivých kol a úhly stranového natočení kol na základě žádané dopředné rychlosti v_R^s a úhlové rychlosti ω_R^s robotu. Při odvození je nutné uvažovat všechny čtyři kvadranty řízení, jež jsou uvedeny na obrázcích 5.4 a 5.5. Na těchto obrázcích jsou rovněž zeleně vyznačeny veličiny, které limitují maximální parametry výsledného pohybu mobilního robotu v daných kvadrantech řízení. Odvození úhlové rychlosti hřídele motoru kola č. 1 a úhlu stranového natočení kola je možné provést na základě obrázku 5.6. Situace pro kolo č. 2 je uvedena na obrázku 5.7. Analogicky je možné určit vztahy pro kola č. 5 a 6. Kola č. 3 a 4 jsou řízena obdobně jako u diferenciálně řízeného podvozku, tedy natočení těchto kol je nulové a jejich žádaná obvodová rychlost je dána rychlostí v_R^s , která je zvýšena/snížena o rychlost vyvolanou rotačním pohybem.



Obr. 5.4: Orientace limitujících veličin při natočení kol vpravo



Obr. 5.5: Orientace limitujících veličin při natočení kol vlevo

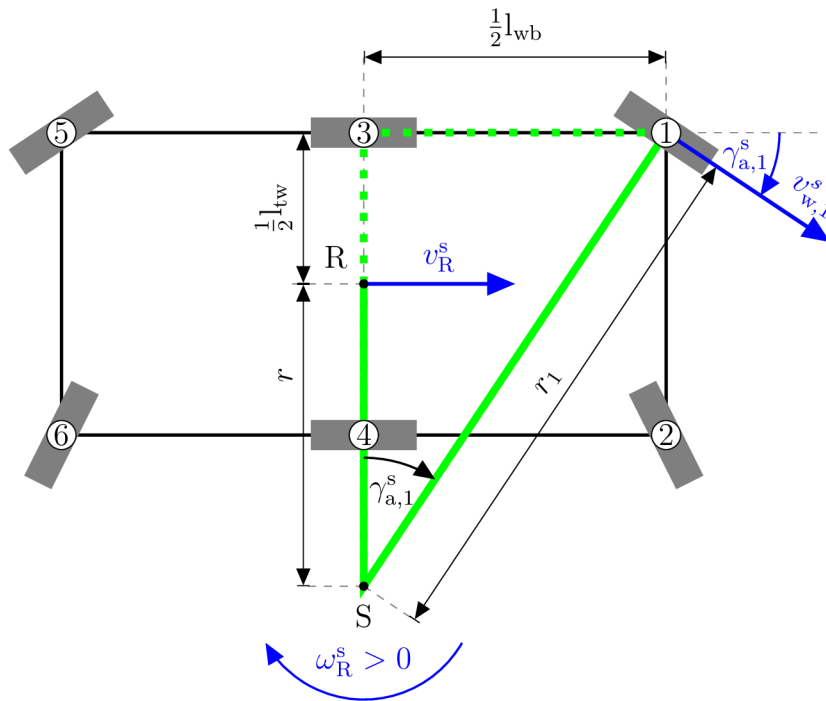
$$\omega_{m,1}^s = c_{w,1}^c \frac{r_1}{r} v_R^s = c_{w,1}^c \operatorname{sgn}(v_R^s) |\omega_R^s| \sqrt{\left(\frac{l_{wb}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_R^s}{\omega_R^s} + \frac{l_{tw}}{2}\right)^2} \quad (5.18)$$

$$\omega_{m,2}^s = c_{w,2}^c \frac{r_2}{r} v_R^s = c_{w,2}^c \operatorname{sgn}(v_R^s) |\omega_R^s| \sqrt{\left(\frac{l_{wb}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_R^s}{\omega_R^s} - \frac{l_{tw}}{2}\right)^2} \quad (5.19)$$

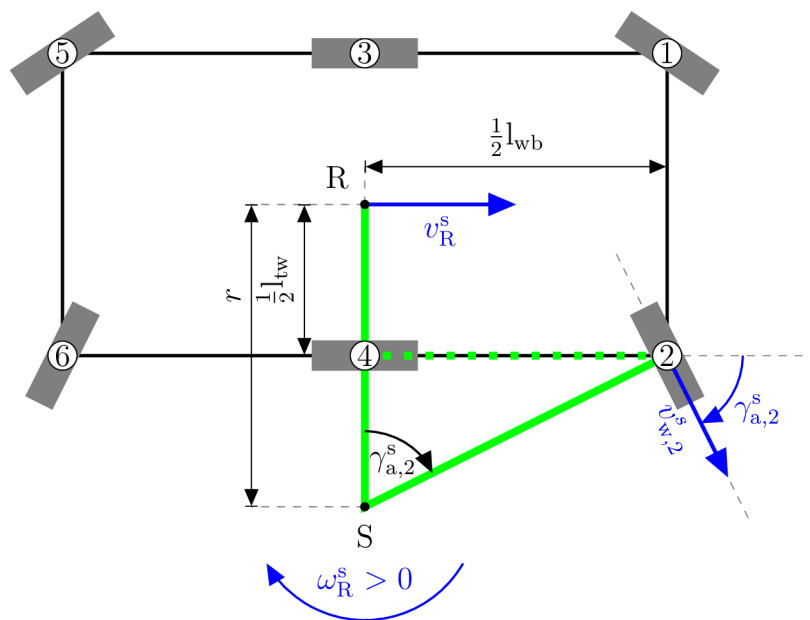
$$\omega_{m,3}^s = c_{w,3}^c \frac{r_3}{r} v_R^s = c_{w,3}^c \left(v_R^s + \frac{l_{tw}}{2} \omega_R^s \right) \quad (5.20)$$

$$\omega_{m,4}^s = c_{w,4}^c \frac{r_4}{r} v_R^s = c_{w,4}^c \left(v_R^s - \frac{l_{tw}}{2} \omega_R^s \right) \quad (5.21)$$

$$\omega_{m,5}^s = c_{w,5}^c \frac{r_5}{r} v_R^s = c_{w,5}^c \operatorname{sgn}(v_R^s) |\omega_R^s| \sqrt{\left(\frac{l_{wb}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_R^s}{\omega_R^s} + \frac{l_{tw}}{2}\right)^2} \quad (5.22)$$



Obr. 5.6: Schéma pro odvození rychlosti a stranového natočení kola č. 1



Obr. 5.7: Schéma pro odvození rychlosti a stranového natočení kola č. 2

$$\omega_{m,6}^s = c_{w,6}^c \frac{r_6}{r} v_R^s = c_{w,6}^c \operatorname{sgn}(v_R^s) |\omega_R^s| \sqrt{\left(\frac{l_{wb}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_R^s}{\omega_R^s} - \frac{l_{tw}}{2}\right)^2} \quad (5.23)$$

$$\gamma_{a,1}^s = c_{a,1}^c \arctan \frac{l_{wb}}{2 \frac{v_R^s}{\omega_R^s} + l_{tw}} \quad (5.24)$$

$$\gamma_{a,2}^s = c_{a,2}^c \arctan \frac{l_{wb}}{2 \frac{v_R^s}{\omega_R^s} - l_{tw}} \quad (5.25)$$

$$\gamma_{a,3}^s = 0 \quad (5.26)$$

$$\gamma_{a,4}^s = 0 \quad (5.27)$$

$$\gamma_{a,5}^s = -c_{a,5}^c \arctan \frac{l_{wb}}{2 \frac{v_R^s}{\omega_R^s} + l_{tw}} \quad (5.28)$$

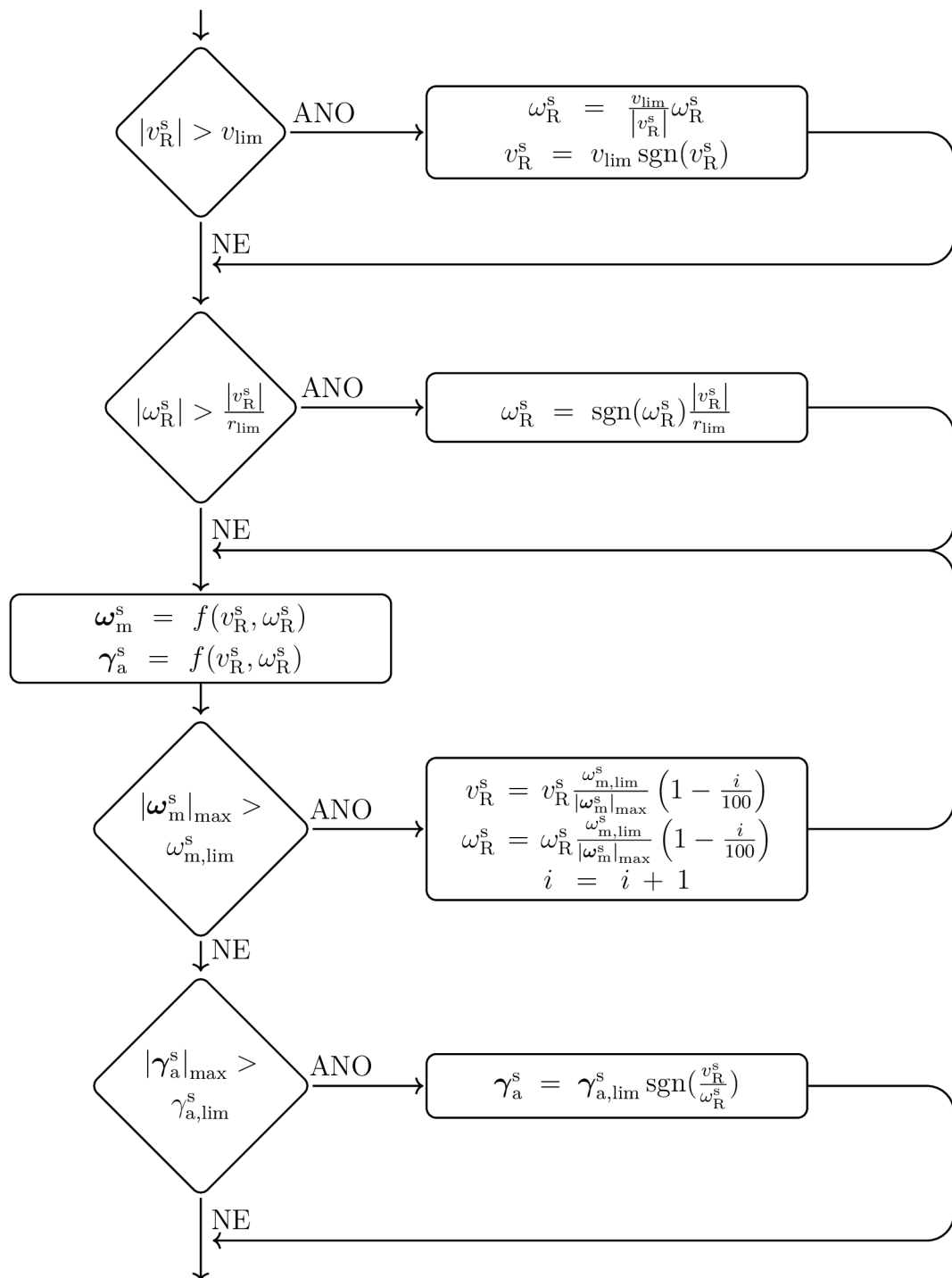
$$\gamma_{a,6}^s = -c_{a,6}^c \arctan \frac{l_{wb}}{2 \frac{v_R^s}{\omega_R^s} - l_{tw}} \quad (5.29)$$

$$\boldsymbol{\omega}_m^s = (\omega_{m,1}^s, \omega_{m,2}^s, \omega_{m,3}^s, \omega_{m,4}^s, \omega_{m,5}^s, \omega_{m,6}^s) \quad (5.30)$$

$$\boldsymbol{\gamma}_a^s = (\gamma_{a,1}^s, \gamma_{a,2}^s, \gamma_{a,3}^s, \gamma_{a,4}^s, \gamma_{a,5}^s, \gamma_{a,6}^s) \quad (5.31)$$

Žádaný pohyb bodu R mobilního robotu popsany parametry v_R^s a ω_R^s je realizován vektorem $\boldsymbol{\omega}_m^s$ (viz definice 5.30) žádaných úhlových rychlostí hřídelí motorů příslušných kol a vektorem $\boldsymbol{\gamma}_a^s$ (viz definice 5.31) žádaných stranových natočení těchto kol. Jednotlivé složky vektoru $\boldsymbol{\omega}_m^s$ jsou definovány vztahy 5.18 až 5.23. Jednotlivé složky vektoru $\boldsymbol{\gamma}_a^s$ jsou definovány vztahy 5.24 až 5.29.

Doposud uvedené vztahy neuvažovaly existenci fyzikálních omezení kinematiky konkrétního podvozku. Jedná se především o limit $\omega_{m,\lim}^s$ úhlových rychlostí hřídelí použitých motorů a limit $\gamma_{a,\lim}^s$ stranového natočení kol. Vypočtené vektory $\boldsymbol{\omega}_m^s$ a $\boldsymbol{\gamma}_a^s$ je třeba validovat na daná omezení použitého podvozku. Postup validace a případné modifikace původních žádaných parametrů pohybu mobilního robotu je uveden na obrázku 5.8. V prvním kroku se kontrolují hrubé limity stanovené pro žádanou dopřednou a úhlovou rychlost mobilního robotu a v případě jejich překročení dojde k úpravě hodnot veličin, tak aby splňovaly stanovené limity. Po tomto kroku je proveden výpočet žádaných hodnot říditelných veličin podvozku. Vypočítané žádané hodnoty úhlových rychlostí hřídelí motorů jsou kontrolovány na jejich limity.



Obr. 5.8: Nalezení řešení kinematické úlohy vyhovujícího fyzikálním omezením použitého podvozku mobilního robotu

V případě překročení limitů jsou v odpovídajícím poměru sníženy žádané hodnoty rychlostí v_R^s a ω_R^s . Pokud je použitý vztah mezi veličinami v_R^s a ω_m lineární, je výpočet nových hodnot veličin v_R^s a ω_R^s jednokrokový. Pro případ nelineárního chování uvedené závislosti je rychlost konvergence iteračního procesu zvýšena zavedením koeficientu poměrného snížení, jehož hodnota se zvyšuje s každým neúspěšným cyklem výpočtu nových hodnot veličin v_R^s a ω_R^s . Po získání vyhovujícího vektoru ω_m^s je provedena kontrola limitů natočení kol. V případě jejich překročení je použit vektor limitních natočení $\gamma_{m,\text{lim}}^s$. Výpočet nejvyšší hodnoty prvku každého z vektorů ω_m^s a γ_a^s je možné provést na základě vztahů 5.32 a 5.33.

$$|\omega_m^s|_{\text{max}} = |\omega_R^s| \sqrt{\left(\frac{l_{wb}}{2}\right)^2 + \left(\left|\frac{v_R^s}{\omega_R^s}\right| + \frac{l_{tw}}{2}\right)^2} \quad (5.32)$$

$$|\gamma_a^s|_{\text{max}} = \arctan \frac{l_{wb}}{2 \left|\frac{v_R^s}{\omega_R^s}\right| - l_{tw}} \quad (5.33)$$

Pro odhad pozice a orientace mobilního robotu na základě znalosti absolutních úhlových natočení hřídelí motorů použitých pro pohon robotu a znalosti úhlů stranového natočení jednotlivých kol je potřebné nalézt vztahy procesu inverzního k předchozímu. Je třeba odvodit funkce 5.34 a 5.35. Schémata pro odvození vztahů pro kola č. 1 a 2 jsou uvedena na obrázcích 5.9 až 5.12.

$$\Delta s_R^m = f(\Delta \gamma_m^m, \overline{\gamma_a^m}) \quad (5.34)$$

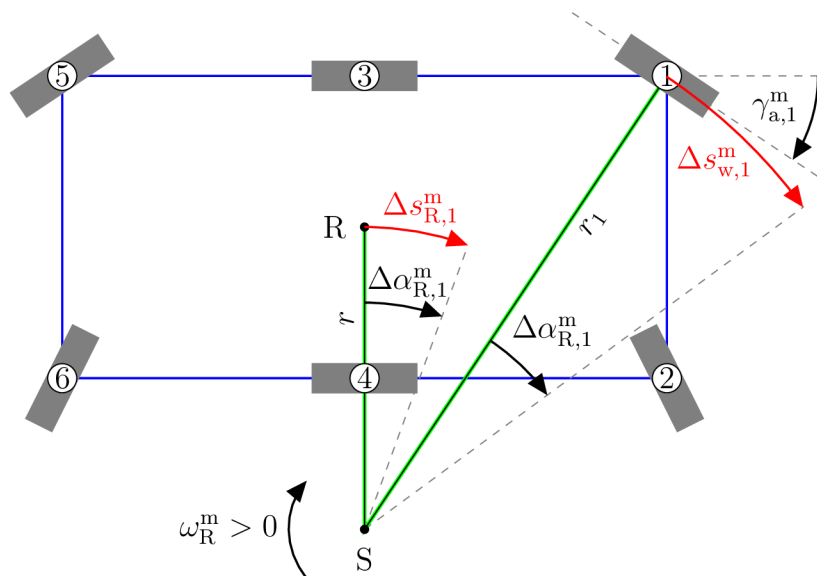
$$\Delta \alpha_R^m = f(\Delta \gamma_m^m, \overline{\gamma_a^m}) \quad (5.35)$$

$$\Delta \gamma_{m,i}^m = \gamma_{m,i}^m(t) - \gamma_{m,i}^m(t - \Delta t) \quad (5.36)$$

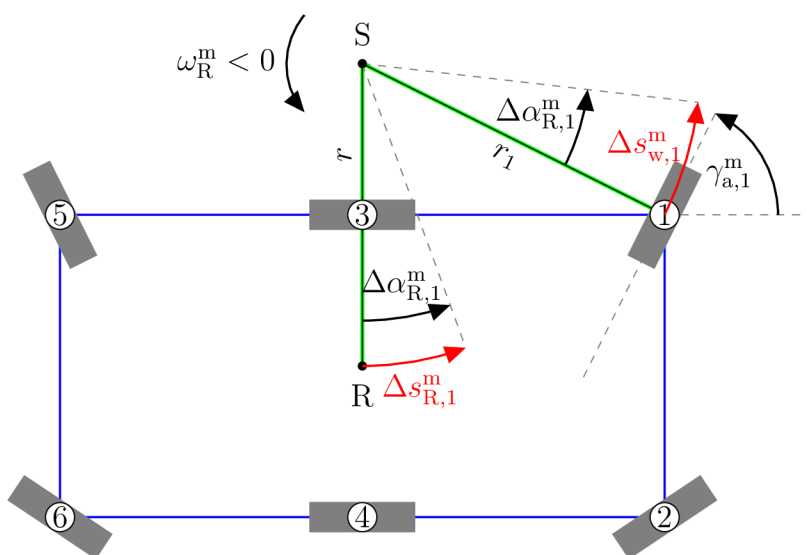
$$\overline{\gamma_{a,i}^m} = \frac{1}{2} (\gamma_{a,i}^m(t) + \gamma_{a,i}^m(t - \Delta t)) \quad (5.37)$$

Na základě stavových informací i -tého kola je možné určit ujetou vzdálenost $\Delta s_{R,i}^m$ bodem R mobilního robotu a změnu azimutu $\Delta \alpha_{R,i}^m$ mobilního robotu během daného časového intervalu. Výjimku tvoří dvojice kol č. 3 a 4, která nejsou natáčena, a proto z jednoho samotného kola z této dvojice nelze určit změnu ujeté vzdálenosti ani změnu azimutu mobilního robotu. Pro výpočet těchto veličin jsou proto použity informace z obou těchto kol současně. Tyto vztahy pro kola č. 3 a 4 potom odpovídají diferenciálně řízenému podvozku.

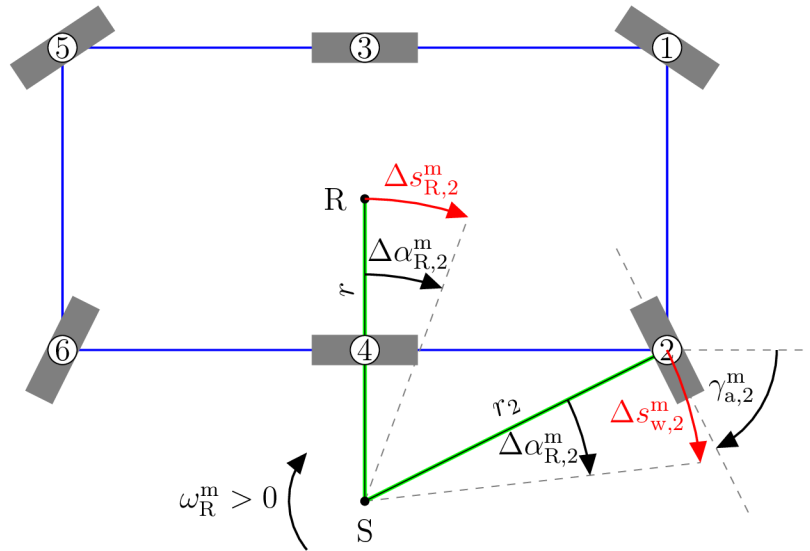
$$\Delta s_{R,1}^m = \frac{r}{r_1} \Delta s_{w,1}^m = \left(\cos(c_{a,1}^m \overline{\gamma_{a,1}^m}) - \frac{l_{tw}}{l_{wb}} \sin(c_{a,1}^m \overline{\gamma_{a,1}^m}) \right) c_{w,1}^m \Delta \gamma_{m,1}^m \quad (5.38)$$



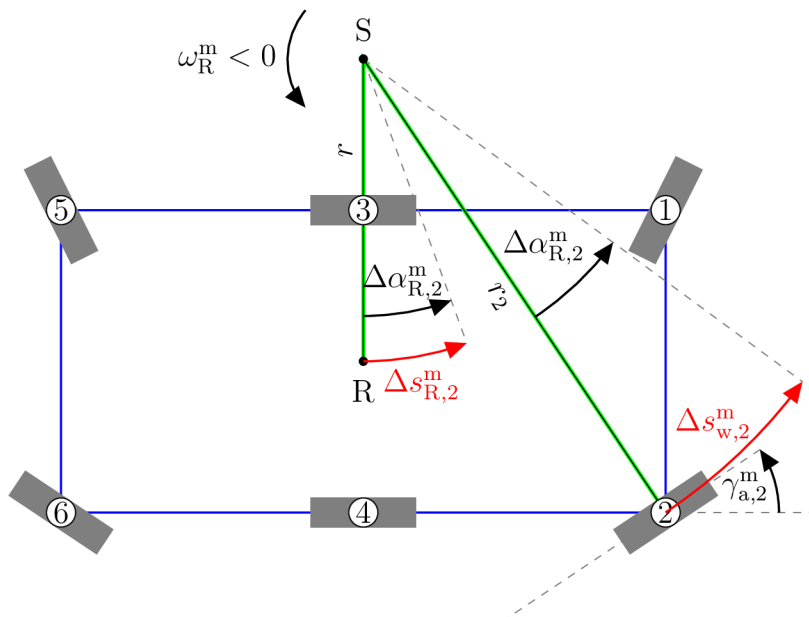
Obr. 5.9: Schéma pro odvození přímé kinematiky pro kolo č.1 při jeho natočení vpravo



Obr. 5.10: Schéma pro odvození přímé kinematiky pro kolo č.1 při jeho natočení vlevo



Obr. 5.11: Schéma pro odvození přímé kinematiky pro kolo č.2 při jeho natočení vpravo



Obr. 5.12: Schéma pro odvození přímé kinematiky pro kolo č.2 při jeho natočení vlevo

$$\Delta s_{R,2}^m = \frac{r}{r_2} \Delta s_{w,2}^m = \left(\cos \left(c_{a,2}^m \overline{\gamma_{a,2}^m} \right) + \frac{l_{tw}}{l_{wb}} \sin \left(c_{a,2}^m \overline{\gamma_{a,2}^m} \right) \right) c_{w,2}^m \Delta \gamma_{m,2}^m \quad (5.39)$$

$$\Delta s_{R,3}^m = \frac{r}{r_3} \Delta s_{w,3}^m = \frac{1}{2} \left(c_{w,3}^m \Delta \gamma_{m,3}^m + c_{w,4}^m \Delta \gamma_{m,4}^m \right) \quad (5.40)$$

$$\Delta s_{R,4}^m = \frac{r}{r_4} \Delta s_{w,4}^m = \frac{1}{2} \left(c_{w,3}^m \Delta \gamma_{m,3}^m + c_{w,4}^m \Delta \gamma_{m,4}^m \right) \quad (5.41)$$

$$\Delta s_{R,5}^m = \frac{r}{r_5} \Delta s_{w,5}^m = \left(\cos \left(c_{a,5}^m \overline{\gamma_{a,5}^m} \right) + \frac{l_{tw}}{l_{wb}} \sin \left(c_{a,5}^m \overline{\gamma_{a,5}^m} \right) \right) c_{w,5}^m \Delta \gamma_{m,5}^m \quad (5.42)$$

$$\Delta s_{R,6}^m = \frac{r}{r_6} \Delta s_{w,6}^m = \left(\cos \left(c_{a,6}^m \overline{\gamma_{a,6}^m} \right) - \frac{l_{tw}}{l_{wb}} \sin \left(c_{a,6}^m \overline{\gamma_{a,6}^m} \right) \right) c_{w,6}^m \Delta \gamma_{m,6}^m \quad (5.43)$$

Výsledná změna ujeté vzdálenosti Δs_R^m 5.44 je určena jako střední hodnota z jednotlivých provedených odhadů definovaných vztahy 5.38 až 5.43.

$$\Delta s_R^m = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \Delta s_{R,i}^m \quad (5.44)$$

Ve vztazích 5.45 až 5.50 jsou uvedeny transformace stavových informací jednotlivých kol pro odhad změny azimutu mobilního robotu.

$$\Delta \alpha_{R,1}^m = \frac{\Delta s_{w,1}^m}{r_1} = \frac{2}{l_{wb}} c_{w,1}^m \Delta \gamma_{m,1}^m \sin \left(c_{a,1}^m \gamma_{a,1}^m \right) \quad (5.45)$$

$$\Delta \alpha_{R,2}^m = \frac{\Delta s_{w,2}^m}{r_2} = \frac{2}{l_{wb}} c_{w,2}^m \Delta \gamma_{m,2}^m \sin \left(c_{a,2}^m \gamma_{a,2}^m \right) \quad (5.46)$$

$$\Delta \alpha_{R,3}^m = \frac{\Delta s_{w,3}^m}{r_3} = \frac{1}{l_{tw}} \left(c_{w,3}^m \Delta \gamma_{m,3}^m - c_{w,4}^m \Delta \gamma_{m,4}^m \right) \quad (5.47)$$

$$\Delta \alpha_{R,4}^m = \frac{\Delta s_{w,4}^m}{r_4} = \frac{1}{l_{tw}} \left(c_{w,3}^m \Delta \gamma_{m,3}^m - c_{w,4}^m \Delta \gamma_{m,4}^m \right) \quad (5.48)$$

$$\Delta \alpha_{R,5}^m = \frac{\Delta s_{w,5}^m}{r_5} = -\frac{2}{l_{wb}} c_{w,5}^m \Delta \gamma_{m,5}^m \sin \left(c_{a,5}^m \gamma_{a,5}^m \right) \quad (5.49)$$

$$\Delta \alpha_{R,6}^m = \frac{\Delta s_{w,6}^m}{r_6} = -\frac{2}{l_{wb}} c_{w,6}^m \Delta \gamma_{m,6}^m \sin \left(c_{a,6}^m \gamma_{a,6}^m \right) \quad (5.50)$$

Výsledná změna azimutu $\Delta \alpha_R^m$ 5.51 je určena jako střední hodnota provedených odhadů z jednotlivých kol.

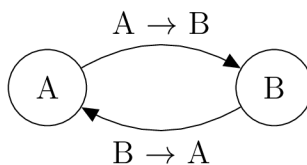
$$\Delta \alpha_R^m = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \Delta \alpha_{R,i}^m \quad (5.51)$$

6 NAVIGACE V REŽIMU KONVOJE

Při navigaci v režimu konvoje vedoucí robot konvoje definuje svou jízdou žádanou trajektorii pohybu navázaných robotů v konvoji. Tito roboti se snaží udržovat od vedoucího robotu vzdálenost měřenou na trajektorii pohybu v zadaném rozsahu, který je definován pro každý robot. Současně ale roboti dodržují i vzájemné bezpečné vzdálenosti pro zamezení kolizím. Navržený režim konvoje umožňuje i specifický režim pro dva roboty, ve kterém může být druhý robot vyslán z výchozího místa se zpožděním a v průběhu jízdy být zase povolán zpět na výchozí místo, ze kterého vyjel. Tento režim vychází z požadavků reálných misí, ve kterých je použit malý průzkumný mobilní robot pro definování trajektorie pohybu většího robotu, který disponuje možností přepravy materiálu nebo osob na rozdíl od průzkumného robotu. Větší robot je povolán do potřebného místa až v případě potřeby. Po jeho dojetí do žádaného místa proběhne naložení/vyložení nákladu a tento robot může následně pokračovat dále po trajektorii průzkumného robotu nebo se navracet zpět do místa, ze kterého vyjel.

6.1 Podmínky navigace

Vzhledem k povaze tohoto navigačního režimu nemusí být umožněna kontinuálnost jízdy mobilního robotu během vybraného časového úseku. Při zastavení některého z robotů musí roboti za ním v konvoji následující zastavit. Každý robot se tedy může nacházet v jednom ze dvou stavů – A/ čekání na splnění podmínek a nebo B/ navigace je aktivní. Pro přechod ze stavu A do stavu B u i -tého robotu je nutné splnit podmínku definovanou výrazem 6.1 pro každý okolní robot. Pro opačný přechod ze stavu B do stavu A postačí, když je splněna podmínka definovaná výrazem 6.2 pro libovolný z okolních robotů.



Obr. 6.1: Stavový diagram procesu navigace robotu v konvoji

$$l_{i,j} > l_{\text{lim}} + l_{\text{hyst}} \vee \left(l_{i,j} > l_{\text{krit}} \wedge \left| \alpha'_{\text{R},i} - \alpha_{i,j} \right| > 90^\circ \wedge \left| \alpha_{\text{RN},i} - \alpha_{i,j} \right| > 90^\circ \right) \quad \forall j \neq i \quad (6.1)$$

$$\exists j \neq i : l_{i,j} < l_{\text{krit}} \vee l_{i,j} < l_{\text{lim}} \wedge \left(\left| \alpha'_{\text{R},i} - \alpha_{i,j} \right| < 90^\circ \vee \left| \alpha_{\text{RN},i} - \alpha_{i,j} \right| < 90^\circ \right) \quad (6.2)$$

Kde jednotlivé veličiny označují:

$l_{i,j}$ vzdálenost mezi i -tým a j -tým robotem

l_{lim} limitní povolená vzdálenost mezi roboty

l_{hyst} hystereze limitní vzdálenosti mezi roboty pro přechod mezi stavy A, B

l_{krit} kritická vzdálenost mezi roboty, při které dochází k nouzovému zastavení

$\alpha'_{\text{R},i}$ efektivní azimut i -tého mobilního robotu

$\alpha_{i,j}$ azimut spojnice ze středu i -tého do středu j -tého robotu

$\alpha_{\text{RN},i}$ žádaná hodnota azimutu i -tého robotu

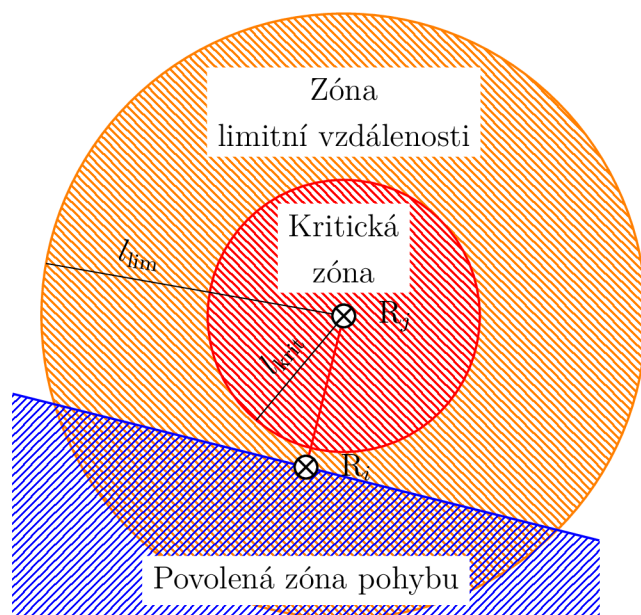
Situace při podkročení limitní vzdálenosti mezi navigovaným a nejbližším robotem je ukázána na obrázku 6.2. Zóna, ve které není pohyb navigovaného robotu jakkoliv limitován, je oblast vně kruhu o poloměru l_{lim} se středem v aktuální pozici daného okolního robotu. V případě, že se navigovaný robot nachází uvnitř uvedeného kruhu, je jeho pohyb omezen pouze do modře vyšrafované zóny, která zajistí zvýšení vzdálenosti od daného okolního robotu.

Ve stavu B je aktuální externí limitní dopředná rychlost $v_{\text{R,lim}}^{\text{ext}}$ navigovaného robotu odvozena od jeho vzdálenosti k nejbližšímu okolnímu robotu podle převodní funkce zobrazené na obrázku 6.3. Použití této rampové funkce zajistí postupné snižování rychlosti během přibližování se navigovaného robotu k okolním robotům.

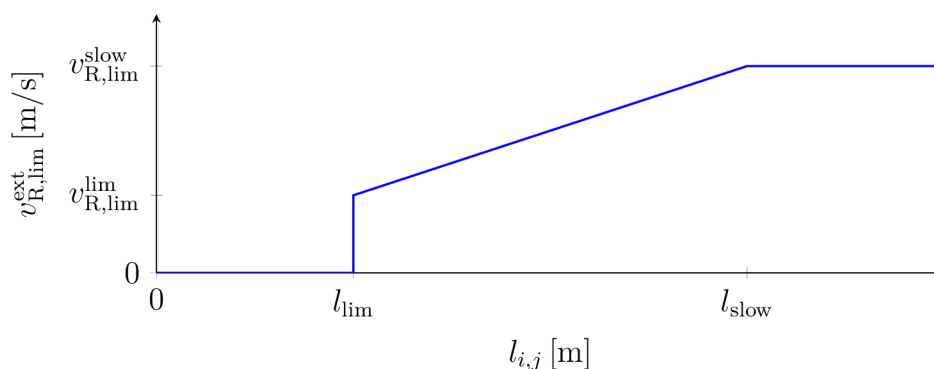
Ve specifickém režimu, kdy se mobilní robot vrací po trajektorii, po které přijel do daného místa, zpět do výchozího místa svého výjezdu, je posloupnost \mathcal{T} navigačních bodů interpretována v obráceném pořadí. Mobilní robot se může vracet pozpátku, v tomto případě je použita záporná dopředná rychlost a efektivní azimut α'_{R} mobilního robotu je opačným úhlem k azimutu α_{R} mobilního robotu. V případě dostatku místa kolem robotu může být použito i otočení a následná přímá jízda zpět do výchozího místa.

6.2 Přenos dat mezi roboty

Trajektorie pohybu vedoucího robotu konvoje musí být přenášena do všech navázaných robotů v konvoji. Současně musí být také distribuována informace o pozici daného robotu všem ostatním robotům. V základní variantě je možné použít



Obr. 6.2: Povolená zóna pohybu při podkročení limitní vzdálenosti mezi navigovaným a nejbližším okolním robotem



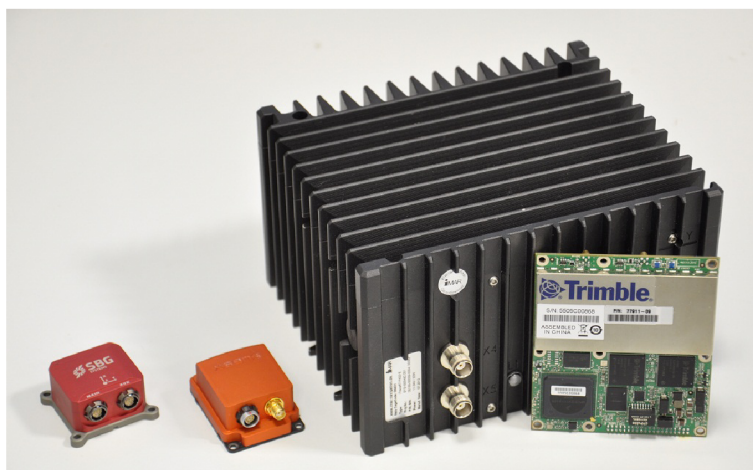
Obr. 6.3: Převodní funkce pro velikost externí limitní dopředné rychlosti robotu

pro přenos dat pozice mobilních robotů jednoho centrálního komunikačního uzlu (např. na vedoucím robotu konvoje). Nejvhodnější pro daný účel se ale jeví komunikační síť typu *mesh*, které disponují redundancí spojení i retranslací a zajišťují tak spolehlivější přenosovou platformu pro tento účel. Vysílání aktuálních pozic mobilních robotů a žádané trajektorie pohybu je vhodné řešit jako skupinové (*multicast*). U vysílání dat pro skupinu ovšem nelze použít potvrzování přijatých dat na úrovni transportního protokolu, proto je opětovný přenos detekovaných chybějících částí posloupnosti \mathcal{T} iniciován příjemci těchto dat na úrovni použitého proprietárního aplikačního protokolu.

7 POPIS POUŽITÝCH SEBELOKALIZAČNÍCH SYSTÉMŮ

Pro získání lokalizačních dat mobilního robotu bylo v provedených experimentech použito několik sebelokalizačních systémů, jenž jsou popsány v následujících kapitolách. Za zdroj referenčních dat byl považován kombinovaný systém GNSS/INS iMAR iTraceRT-F400E z důvodu jeho nejvyšší přesnosti z dostupných zařízení. Dále byl využit samostatný GNSS RTK přijímač Trimble BX982 obsahující OEM modul BD982 téhož výrobce. Použity byly také dva miniaturní inerciální navigační systémy s MEMS senzory – Xsens MTi-G-700 a SBG Ellipse-E. Xsens MTi-G-700 je kompletní INS bez možnosti připojení externích senzorů. SBG Ellipse-E disponuje kompletním INS řešením, obsahuje ale pouze tříosý akcelerometr, gyroskop a magnetometr. Pro získání plného řešení veličin pohybu (pozice i rychlosti) je nutné externě připojit doplňující senzory (typicky min. GNSS přijímač). Koncept zařízení typu Ellipse-E tak přináší modularitu výsledného řešení oproti systémům s pevným sensorickým vybavením. Pro Ellipse-E byla použita potřebná externí data z GNSS přijímače BD982. Všechny použité komerční sebelokalizační systémy jsou uvedeny na obrázku 7.1.

Pro zařízení BX982 a iTraceRT-F400E použitá na mobilním robotu byla dostupná korekční data pro fázové i kódové měření z vlastní nezávislé permanentní GNSS referenční základny, postavené na dalším kusu GNSS přijímače BD982.



Obr. 7.1: Fotografie použitých sebelokalizačních systémů

7.1 Inerciální navigační systém iMAR iTraceRT-F400E

Kombinovaný inerciální navigační systém iTraceRT-F400E německého výrobce iMAR představuje kompletní zařízení pro měření veličin pohybu. Zařízení je typu *strap-down* a je vybaveno tříosým servoakcelerometrem, tříosým gyroskopem typu FOG a GNSS RTK přijímačem s možností připojení dvou přijímacích antén. Zařízení má integrován výkonný výpočetní modul pro zpracování měřených dat a jejich následnou datovou fúzi, která je založena na Kalmanových filtrech. Koncepce architektury systému je *deeply-coupled*, což znamená, že k aktualizaci INS filtru jsou použita data z GNSS filtrů a naopak. Informační výměna tedy probíhá mezi INS a GNSS filtry v obou směrech. Zařízení je dostupné v několika konfiguracích, lišících se parametry osazených akcelerometrů a parametry použitého GNSS přijímače [20].

Zařízení iTraceRT-F400E bylo dostupné v konfiguraci, která umožňovala připojení dvou GNSS antén pro vyhodnocení azimutu a úhlu Roll/Pitch. Integrované GNSS přijímače umožňovaly příjem systémů GPS a GLONASS ve dvou frekvenčních pásmech a disponovaly RTK řešením. Pro příjem GNSS signálů byly použity dvě aktivní dvoupásmové antény Trimble AV34, namísto dodávaných antén Antcom 3GO1216A, především z důvodu jejich nevyhovujících parametrů pro příjem signálů ve frekvenčním pásmu L2. Základní parametry použitého systému shrnují tabulky 7.1 a 7.2. Fotografie zařízení je na obrázku 7.2.

Tab. 7.1: Základní parametry iMAR iTraceRT-F400E dle specifikace [20]

Veličina	Hodnota
Obnovovací frekvence	max. 400 Hz
Rozsah úhlových rychlostí	± 450 °/s
Rozsah zrychlení	± 5 g
Přesnost úhlové rychlosti	0,75 °/h (1σ) 0,2 °/h (1σ , 5 min @ RTK GNSS)
Přesnost zrychlení	2 mg (1σ) 0,1 mg (1σ , 5 min @ RTK GNSS)
Konektivita	Ethernet, CAN, USB 2.0, RS-232, RS-422
Hmotnost	3,6 kg
Spotřeba	32 W

Tab. 7.2: Předpokládané přesnosti (1σ) při výpadku RTK řešení [20]

Veličina	Délka výpadku		
	0 s	10 s	60 s
Úhly Roll a Pitch	0,01°	0,01°	0,02°
Azimut	0,025°	0,03°	0,04°
Horizontální pozice	0,02 m + 2 ppm	0,10 m + 2 ppm	0,9 m + 2 ppm
Výška	0,05 m + 2 ppm	0,12 m + 2 ppm	0,3 m + 2 ppm
Rychlost	0,01 m/s	0,02 m/s	0,07 m/s



Obr. 7.2: Fotografie GNSS/INS systému iMAR iTraceRT-F400E

7.2 GNSS přijímač Trimble BD982

BD982 je OEM přijímač signálů globálních navigačních družicových systémů vyráběný společností Trimble. Přijímač v plné konfiguraci umožňuje příjem signálů ze systémů GPS (L1 C/A, L2E, L2C, L5), GLONASS (L1 C/A, L2 C/A, L2 P, L3 CDMA), Galileo (L1 BOC, E5A, E5B, E5AltBOC), BeiDou (B1, B2) a QZSS (L1 C/A, L1 SAIF, L2C, L5). Přijímač disponuje několika módy provozu. Pro získání lokalizačních dat je určen mód *Rover*. V tomto módu může přijímač pracovat v autonomním režimu (bez externích korekčních dat), v režimu SBAS (s korekčními daty ze satelitu) nebo v režimu GBAS (s korekčními daty z pozemní permanentní stanice nebo virtuální základnové stanice ze sítě permanentních stanic). V režimu GBAS je poskytováno DGNSS nebo RTK řešení pozice. Mód permanentní stanice (*Base station*) disponuje dvěma variantami – stacionární (*Static Base*) a pohyblivá (*Moving Base*). V tomto módu je přijímač používán pro generování korekčních dat pro DGNSS a RTK řešení jednotek pracujících v módu *Rover*. Přijímač je na trhu dostupný v několika variantách, které se liší množinou aktivovaných funkcí [31].

V experimentech, které jsou popsány v této práci, byl přijímač na mobilním robotu použit v módu *Rover*. Příjem signálů byl realizován z obou připojených antén. Dostupné tedy bylo jak přesné řešení pozice mobilního robotu, tak i řešení dvou úhlů jeho orientace. Přijímací antény byly umístěny na jeho podélné rovině. V tomto uspořádání byl tedy měřen azimut a klopení mobilního robotu. Obě antény přijímaly signály z družicových systémů GPS a GLONASS. Absolutní pozice v souřadnicovém systému WGS-84 byla získána RTK řešením, pokud to bylo umožněno. Vektor mezi vektorovou a poziční anténou byl také získán RTK řešením. Pro dobrou stabilitu RTK řešení byl zvolen příjem signálů GPS i GLONASS ve dvou frekvenčních pásmech – L1 a L2 pro GPS a G1, G2 pro GLONASS. Pro samotný příjem GNSS signálů byla použita dvojice dvoupásmových antén AG25GNSS s integrovaným 42 dBm zesilovačem. Korekční data pro RTK řešení byla získána z vlastní stacionární GNSS základnové stanice, tvořené stejným modulem BD982 a anténou AG25GNSS. Frekvence poskytování lokalizačního řešení byla 50 Hz. Přehled základních parametrů přijímače použitého na mobilním robotu je uveden v tabulkách 7.3 a 7.4. Fotografie GNSS přijímače je na obrázku 7.3.

Tab. 7.3: Základní parametry použitého přijímače BD982 dle specifikace [31]

Parametr	Hodnota
Obnovovací frekvence	max. 50 Hz
Latence	< 20 ms
Podporované signály GPS	L1 C/A, L2E, L2C
Podporované signály GLONASS	G1 C/A, G2 C/A
Konektivita	Ethernet, USB 2.0, CAN, RS-232, UART
Hmotnost	92 g
Spotřeba	2,3 W

Tab. 7.4: Přesnost (1σ) přijímače BD982 dle specifikace [31]

	Typ řešení	Přesnost
Pozice	RTK	0,008 m (H) / 0,015 m (V) + 1 ppm
	DGNSS	0,25 m (H) / 0,50 m (V) + 1 ppm
	SBAS	0,50 m (H) / 0,85 m (V)
Orientace	RTK	0,09° @ 2 m, 0,05° @ 10 m



Obr. 7.3: Fotografie GNSS přijímače Trimble BD982

7.3 Inerciální navigační systém SBG Ellipse-E

Modely *Ellipse* francouzského výrobce SBG Systems představují skupinu miniaturních INS. Řada *Ellipse-E* obsahuje IMU tvořenou 3-osým MEMS akcelerometrem a gyroskopem. Dále má interně osazen 3-osý magnetometr a senzor tlaku. V této konfiguraci je možné dlouhodobě poskytovat referencované úhly roll, pitch a azimut referencovaný na základě dat z magnetometru. Pro zajištění poskytování veškerých veličin pohybu lze externě připojit libovolný systém, který poskytuje informaci o aktuální pozici, rychlosti, azimutu a času v komunikačním protokolu NMEA 0183. Typicky se pro tento účel používá GNSS přijímač [30].

Profil pohybu měřeného objektu byl nastaven jako obecný, bez zadaných omezení. Externí informace o pozici, rychlosti, azimutu a času byly získány z GNSS přijímače BD982. Data z magnetometru, senzoru tlaku a informace o kurzu pohybu z GNSS nebyla zahrnuta do zpracování. Základní parametry použitého typu zařízení jsou uvedeny v tabulkách 7.5 a 7.6. Fotografie přístroje je na obrázku 7.4.



Obr. 7.4: Fotografie INS SBG Ellipse-E

Tab. 7.5: Základní parametry použitého zařízení Ellipse-E dle specifikace [30]

Parametr	Hodnota
Obnovovací frekvence	max. 200 Hz
Rozsah úhlových rychlostí	± 450 °/s
Rozsah zrychlení	± 8 g
Stabilita biasu gyroskopu	0,2 °/s 8 °/h (AVAR, za běhu)
Stabilita biasu akcelerometru	5 mg 20 μ g (AVAR, za běhu)
Konektivita	RS232
Hmotnost	49 g
Spotřeba	0,46 W

Tab. 7.6: Předpokládané přesnosti (1σ) při výpadku RTK řešení [30]

Veličina	Délka výpadku		
	0 s	10 s	60 s
Úhly Roll a Pitch	0,2°	0,2°	0,25°
Azimut	0,4°	0,5°	0,6°
Horizontální pozice	0,02 m + 1 ppm	0,8 m	8 m
Výška	0,04 m + 1 ppm	0,8 m	6 m
Rychlost	0,07 m/s	0,2 m/s	0,6 m/s

7.4 Inerciální navigační systém Xsens MTi-G-700

Zařízení MTi-G-700 představuje kompletní miniaturní inerciální navigační systém od holandské společnosti Xsens. Zařízení obsahuje IMU tvořenou tříosým MEMS akcelerometrem a gyroskopem. Zařízení je dále vybaveno tříosým magnetometrem, senzorem tlaku a přijímačem signálů GPS v pásmu L1 [34].

Tento INS neumožňuje využití externích dat z dostupných referencí, proto bylo nutné pro referencování azimutu použít výrobcem implementované metody, které jsou založené na datech z magnetometru nebo v případě použití neholonomního podvozku, kurzu získaného z průběhu jeho jízdy. Vzhledem k aplikaci lze předpokládat stabilnější výsledky z odvozeného kurzu než z měření magnetického pole Země. Důvodem je vysoká citlivost takto získaného azimutu na změny magnetického pole vyvolaného externími zdroji a celkově významná nehomogenita tohoto pole v blízkosti magneticky vodivých materiálů. Přístroj bohužel neumožňuje auto-

matické přepínání mezi oběma režimy, a proto je nutné pevně zvolit jeden z nich. Pokud použijeme *Automotive* režim a dojde-li k výpadku řešení GPS pozice, azimut je aktualizován pouze na základě integrovaných signálů z gyroskopů. Základní parametry použitého modelu jsou uvedeny v tabulkách 7.7 a 7.8. Fotografie přístroje je uvedena na obrázku 7.5.

Tab. 7.7: Základní parametry použitého INS MTi-G-700 dle specifikace [34]

Parametr	Hodnota
Obnovovací frekvence	max. 400 Hz
Rozsah úhlových rychlostí	± 450 °/s
Rozsah zrychlení	± 5 g
Stabilita biasu gyroskopu	0,2 °/s 10 °/h (za běhu)
Stabilita biasu akcelerometru	3 mg 40 μ g (za běhu)
Konektivita	USB 2.0, RS-232
Hmotnost	55 g
Spotřeba	0,96 W

Tab. 7.8: Přesnost (1σ) použitého INS MTi-G-700 dle specifikace [34]

Veličina	Hodnota
Úhly Roll a Pitch	0,3 °
Azimut	< 1 °
Horizontální pozice	1 m @ SBAS
Výška	2 m @ SBAS



Obr. 7.5: Fotografie INS Xsens MTi-G-700

8 REALIZOVANÉ EXPERIMENTY

Pro ověření funkčnosti navržených metod byla provedena jejich implementace, která byla nasazena v několika odlišných experimentech. Klíčové dosažené výsledky z některých těchto experimentů jsou uvedeny v této kapitole. Detailní výsledky z těchto vybraných experimentů jsou uvedeny v přílohách B a C. V jednom z prvních experimentů byla také ověřena přesnost získaného RTK řešení pozice z používaného GNSS přijímače. Použité přístroje s RTK řešením pozice vždy využívaly korekční data generovaná v reálném čase z vlastní nezávislé GNSS referenční stanice.

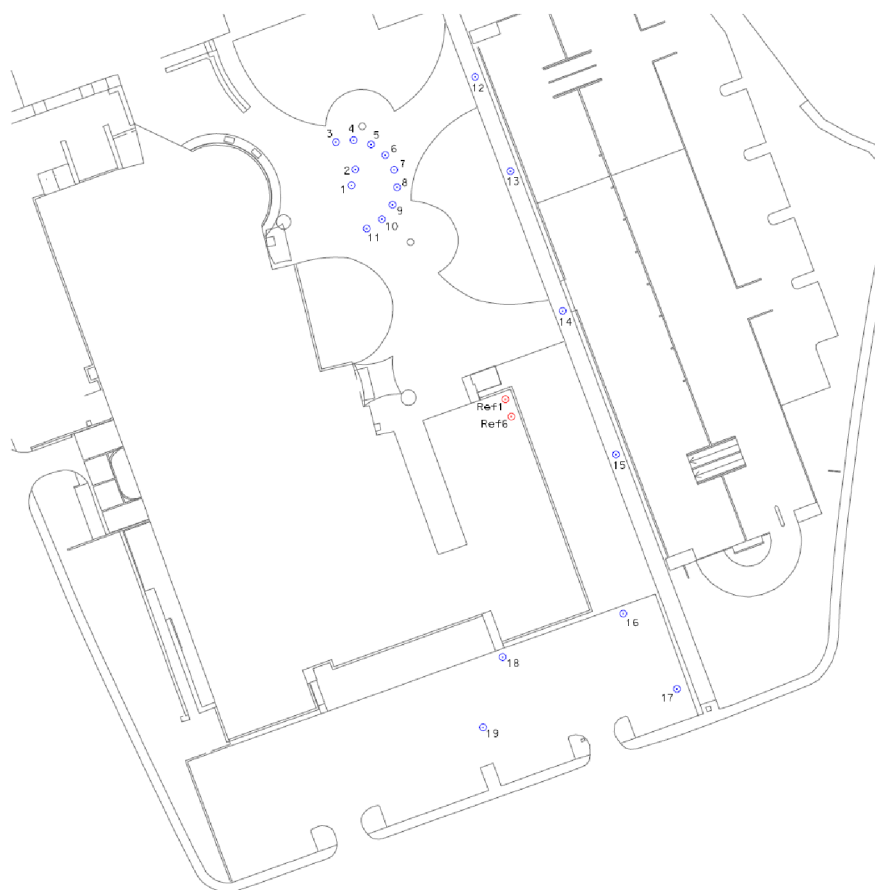
8.1 Ověření přesnosti GNSS přijímače BD982

Na počátku experimentování s RTK řešením pozice a jeho správné konfigurace pro účely mobilní robotiky, bylo nutné ověřit přesnost tohoto režimu měření v reálných podmínkách. Pro účely ověřování přesnosti byl realizován testovací polygon s několika referenčními body, které mají velmi přesně stanoveny jejich souřadnice v globálních souřadnicových systémech. Zaměření souřadnic bodů proběhlo v rámci výuky ústavu geodézie fakulty stavební VUT v Brně. Výsledkem je skupina 21 referenčních bodů s předpokládanou střední kvadratickou chybou 5 mm. Mapa areálu Technická 12 s vyznačenými referenčními body je uvedena na obrázku 8.2. Pro umístění přijímací antény vlastní GNSS referenční stanice byla zřízena dvě referenční místa na střeše budovy E objektu Technická 12. Tyto body jsou v mapce zobrazeny červenou barvou. Ostatní, modře označené body, jsou pozemní, které jsou v okolí budov. Fotografie z průběhu zaměřování bodů je na obrázku 8.1.

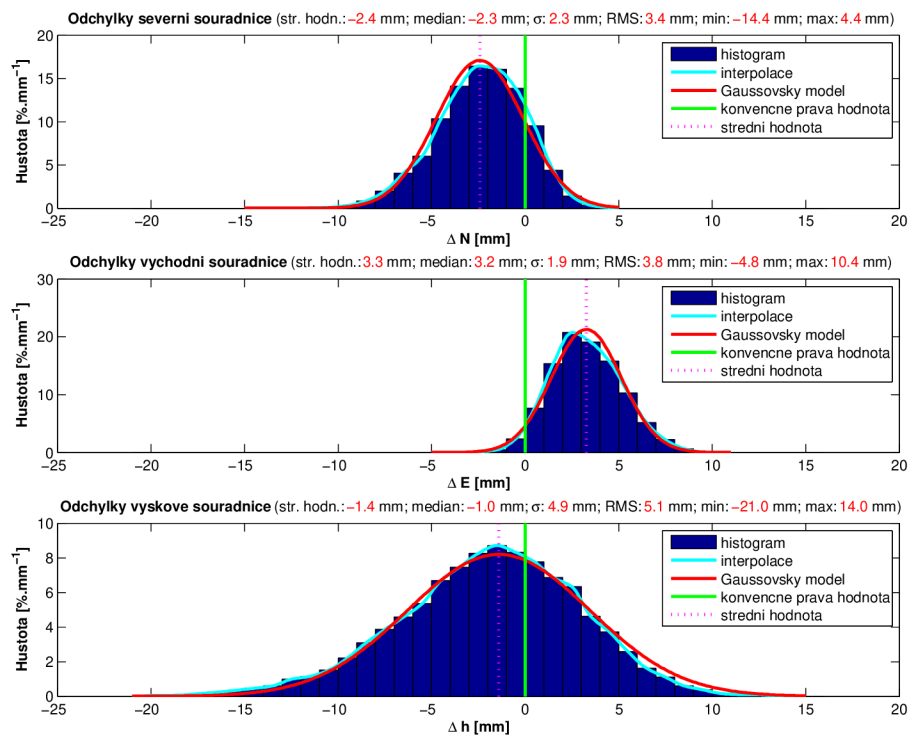


Obr. 8.1: Zaměřování referenčních bodů na střeše budovy E objektu T12

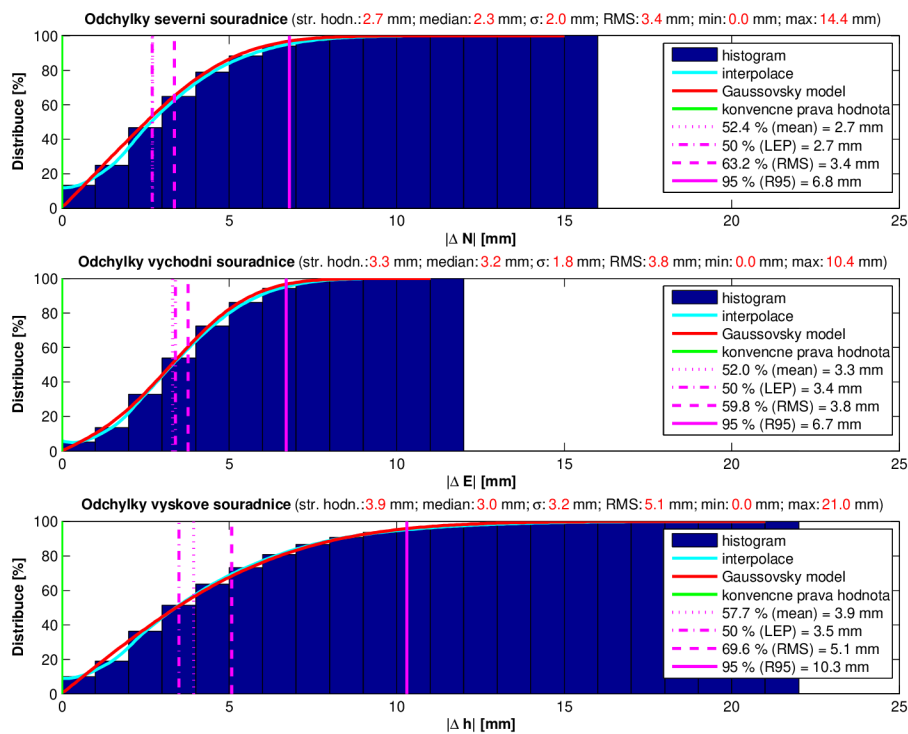
Výsledky jednoho z provedených experimentů ověřujícího absolutní přesnost pozice získané z GNSS přijímače BD982 v RTK režimu jsou uvedeny v grafech na obrázcích 8.3 a 8.4. Na obrázku 8.3 jsou uvedeny četnosti vyhodnocených odchylek souřadnic z měření bodu, na kterém byla identifikována nejvyšší maximální velikost odchylky 2D pozice v horizontální rovině. Jedná se o soubor 30 tisíc opakovaných měření (10 min @ 50 Hz) v daném bodě. Souhrnné distribuční funkce (kumulativní histogramy) pro soubor získaných velikostí odchylek na každém z deseti zvolených bodů testovacího polygonu jsou uvedeny na obrázku 8.4. Z těchto grafů je možné snadno získat i jednotlivé standardizované chybové charakteristiky (LEP, R95 apod.). Výrobce přijímače BD982 specifikuje přesnost pro RTK řešení pomocí limitní RMS chyby pozice v horizontální rovině a výškové souřadnice. Výsledkem ověření je RMS chyba horizontální pozice 5 mm a výškové souřadnice shodně také 5 mm. Uvedené hodnoty nepřekračují specifikaci výrobce (8 mm + 1 ppm / 15 mm + 1 ppm [31]).



Obr. 8.2: Mapa referenčních bodů v areálu T12



Obr. 8.3: Hustoty pravděpodobnosti výskytu odchylek pro jednotlivé souřadnice



Obr. 8.4: Distribuční funkce velikosti odchylek pro jednotlivé souřadnice

8.2 Plošné měření intenzity gama záření

Tento experiment byl proveden ve spolupráci se Státním ústavem radiální ochrany, v.v.i. (SÚRO). Experiment byl proveden za účelem ověření parametrů nově vyvíjeného snímače gama záření v reálném terénu vnějšího prostředí. Vstupním požadavkem bylo přesné pozicování snímače v terénu a současně přesné georeferencování dat měřených tímto snímačem. Pro experiment byla použita upravená verze mobilního robotu Orpheus-X3 bez hlavičky s kamerami. Fotografie upraveného robotu pro účely tohoto experimentu jsou uvedeny na obrázcích 8.5 a 8.6. Pro navigaci mobilního robotu bylo použito řešení sebelokalizace založené pouze na RTK řešení pozice i azimutu získaných z GNSS přijímače Trimble BD982. Poziční GNSS anténa byla umístěna vertikálně nad senzorem gama záření. Tím byla zajištěna maximální dosažitelná přesnost lokalizace senzoru gama záření v prostoru. Fotografie z průběhu experimentu je uvedena na obrázku 8.7.



Obr. 8.5: Orpheus-X3 upravený pro měření gama záření – pohled zepředu

Hranice oblasti určené k měření byla definována na základě operátorem řízené jízdy mobilního robotu kolem této oblasti. Z trajektorie byly vybrány čtyři rohové body a následně byla sestavena čtyřúhelníková oblast (viz obrázek B.1 v příloze). Definovaná oblast byla postupně projížděna v liniích, které byly od sebe vzdáleny přibližně 1 m. Po dokončení těchto linií byly provedeny příčné linie vzdálené přibližně 5 m od sebe. Rozměry oblasti byly přibližně 90 x 15 m. Celková trajektorie pohybu mobilního robotu v horizontální rovině je na obrázku 8.9 vlevo. Na základě georeferencovaných dat intenzity gama záření je možné sestavit intenzitní mapu, která je uvedena na obrázku 8.9 vpravo. Použitý senzor gama záření obsahoval i základní GPS přijímač pracující v autonomním režimu (bez korekčních dat) pouze



Obr. 8.6: Orpheus-X3 upravený pro měření gama záření – pohled zezadu



Obr. 8.7: Referenční GNSS stanice a stanoviště pro řízení experimentu

se signálem L1 C/A a určujícím polohu na základě kódového měření vzdálenosti. Trajektorie pohybu mobilního robotu získaná z tohoto GNSS přijímače je uvedena na obrázku 8.10 vlevo. Intenzitní mapa gama záření sestavená na základě uvedených pozičních dat je na obrázku 8.10 vpravo. Při srovnání trajektorií pohybu na obrázcích 8.9 a 8.10 lze vidět významný přínos použití RTK řešení polohy, který se pochopitelně promítá i do přesnosti výsledné mapy intenzity gama záření.

V druhé části experimentu bylo provedeno mapování dílčí části původně definované oblasti. Pro tuto dílčí oblast byla zvolena rozteč linií 1 m pro podélný i příčný směr mapování. Současně byly použity parametry navigace optimalizované pro dosažení vyšší přesnosti, ovšem za cenu vyšší energetické náročnosti, které není vhodné

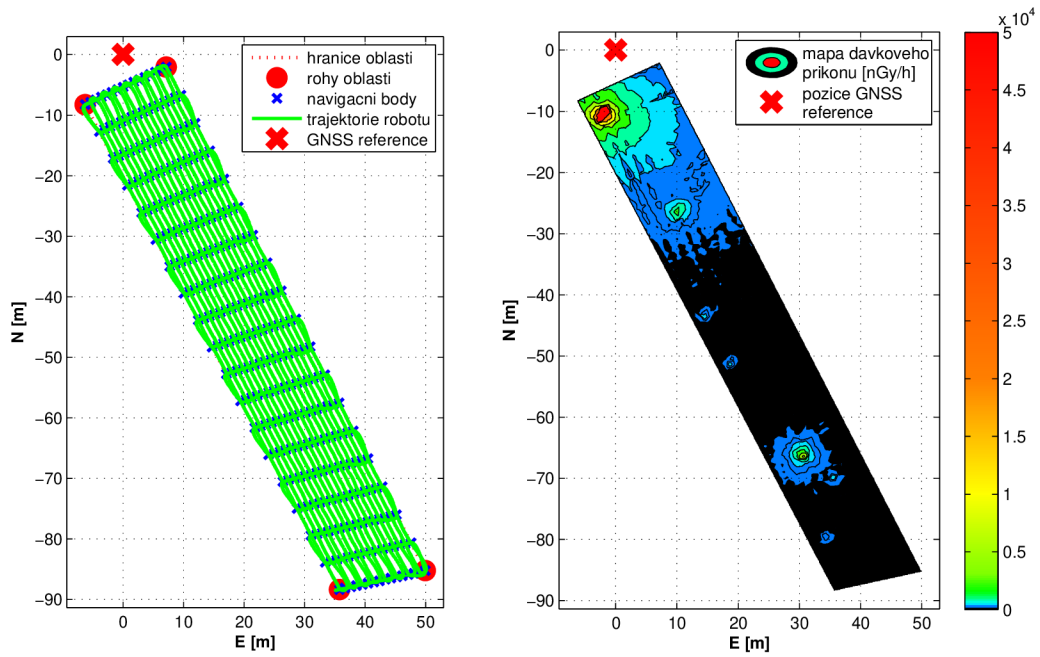
používat na velkých oblastech, kde je limitujícím faktorem dojezd mobilního robota. Dosažené výsledky při použití RTK řešení z přijímače BD982 jsou uvedeny na obrázku 8.11. Výsledky při použití integrovaného L1 GPS přijímače pouze pro georeferencování měřených dat jsou uvedeny na obrázku 8.12.

V případě, že jsou dostupné mapové podklady pro danou oblast, je možné výsledek měření automaticky integrovat do vybraného mapového podkladu pro jeho lepší interpretovatelnost. Intenzitní mapa získaná z prvotního hrubého měření, integrovaná do leteckého snímku, je uvedena na obrázku 8.8. Detailnější popis principu metody je uveden v článku [21].

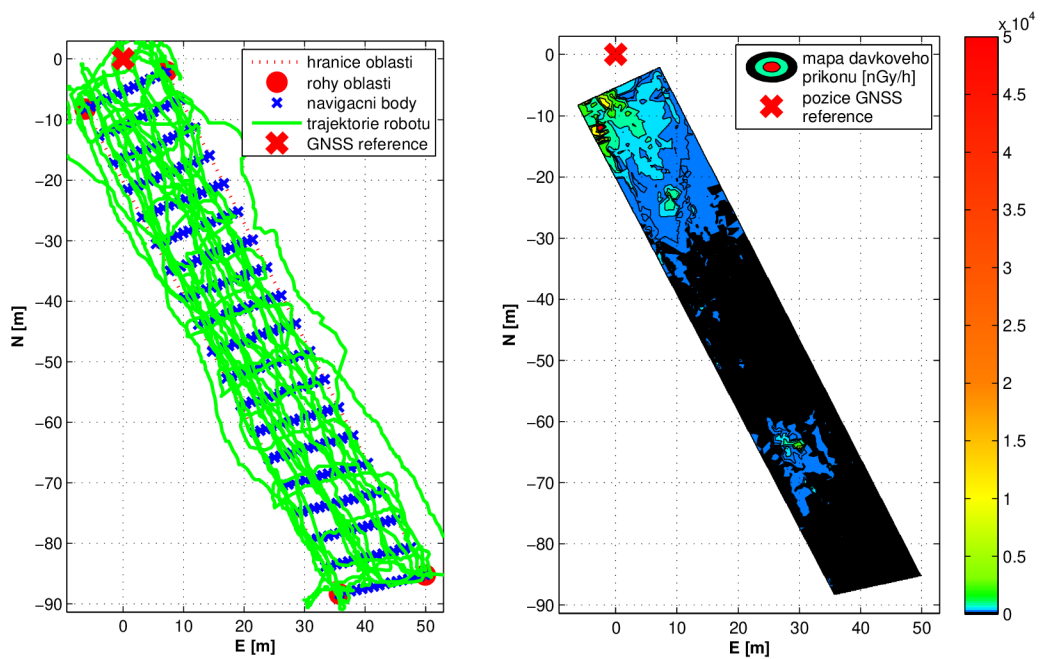
Přínosy aplikace GNSS přijímačů s RTK řešením pozice pro přesnou automatizovanou lokalizaci zdrojů radioaktivního záření nejsou v dostupné literatuře blíže popsány. Články [15][26] řeší obdobnou problematiku, ovšem bez zaměření na vysokou přesnost lokalizace zdrojů záření. Pro celkově úspěšné řešení dané úlohy pochopitelně nepostačuje jen přesná lokalizace senzoru radioaktivního záření. Nutným základem je dostatečně citlivý senzor radioaktivního záření s rychlou výstupní odezvou.



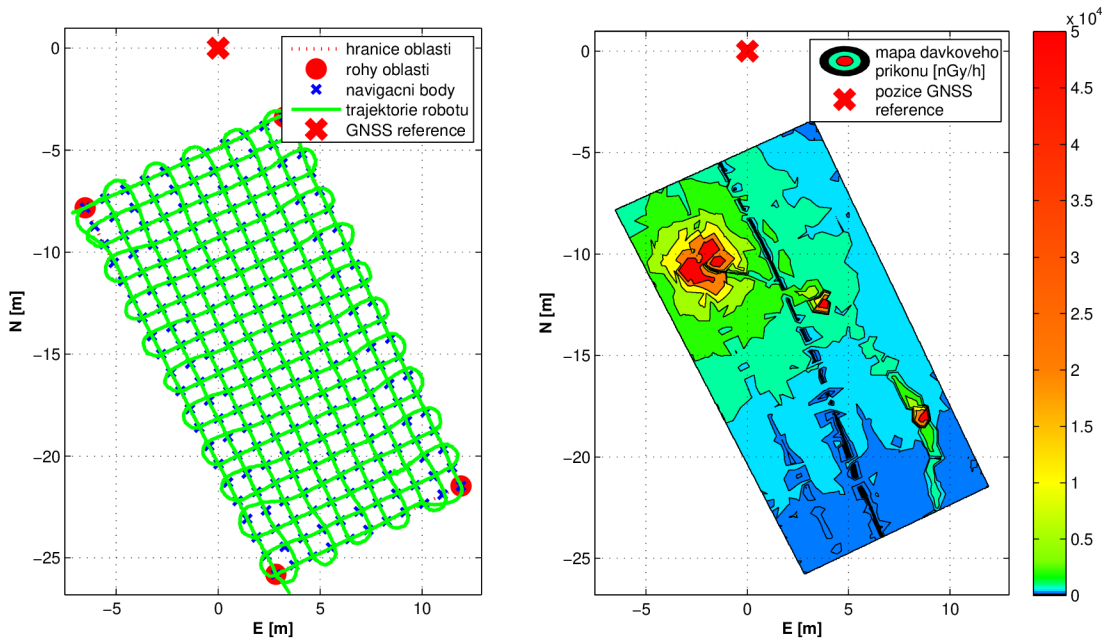
Obr. 8.8: Mapa intenzity gama záření integrovaná do leteckého snímku



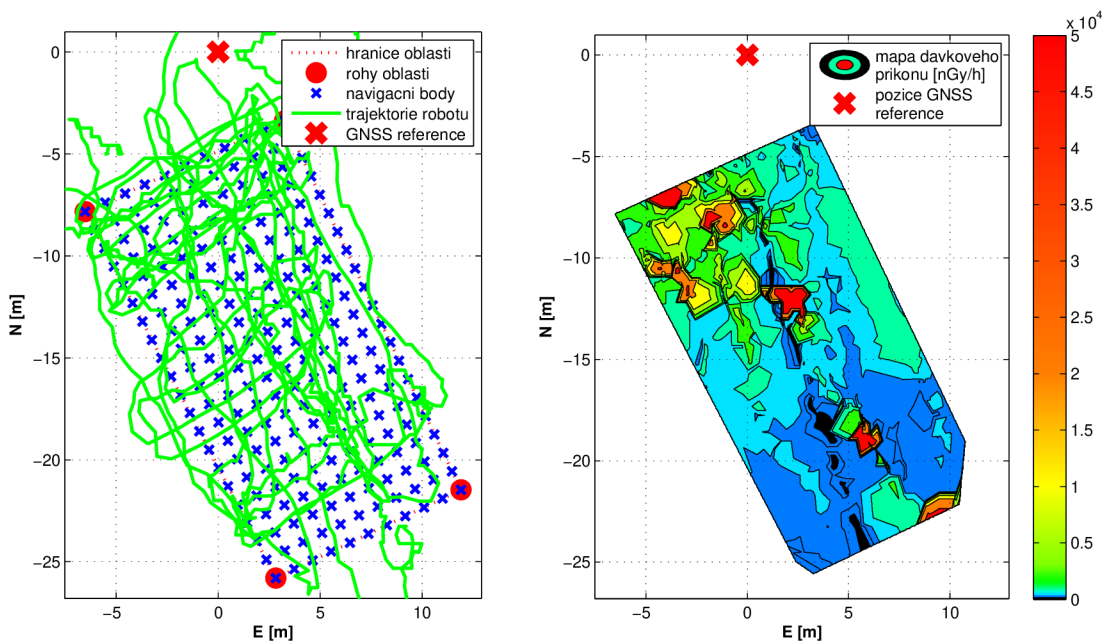
Obr. 8.9: Skutečná trajektorie hrubého mapování (vlevo) a výsledná mapa intenzity gama záření (vpravo) získané na základě RTK řešení pozice z BD982



Obr. 8.10: Skutečná trajektorie hrubého mapování (vlevo) a mapa intenzity gama záření (vpravo) získané z L1 GPS přijímače integrovaného ve snímači gama záření



Obr. 8.11: Skutečná trajektorie detailního mapování (vlevo) a výsledná mapa intenzity gama záření (vpravo) získané na základě RTK řešení pozice z BD982



Obr. 8.12: Skutečná trajektorie detailního mapování (vlevo) a mapa intenzity gama záření (vpravo) získané z L1 GPS přijímače integrovaného ve snímači gama záření

8.3 Porovnání sebelokalizačních metod

Tato série experimentů byla provedena za účelem srovnání výsledků jednotlivých sebelokalizačních metod, porovnání dosažených výsledků při jejich použití pro navigaci mobilního robotu a ověření funkčnosti automatického výběru nejlepšího sebelokalizačního řešení v daných podmínkách. Referenční trajektorie o délce přibližně 75 m byla pro tuto sérii experimentů získána na základě pohybu mobilního robotu, který byl řízen operátorem. Referenční trajektorie pohybu byla naměřena systémem iMAR iTraceRT-F400E.

První skupina experimentů (viz tabulka 8.1) byla provedena pro srovnání výsledků jednotlivých sebelokalizačních metod v situacích s omezeným příjmem GNSS signálů oproti stavu, kdy je příjem GNSS signálů ideální. V tabulkách používané označení „!GNSS!“ vyjadřuje omezenou dostupnost GNSS signálů v daném experimentu u zařízení uvedeného za symbolem „@“. Druhá skupina experimentů (viz tabulka 8.2) byla zaměřena na vyhodnocení přesnosti sledování žádané trajektorie pohybu mobilního robotu při použití jednotlivých sebelokalizačních metod. Třetí skupina experimentů ověřovala správnou funkčnost automatické volby nejvhodnější sebelokalizační metody pro dané pracovní podmínky. V této skupině experimentů byla vždy pro daný experiment vybrána určitá skupina sebelokalizačních metod, s nimiž byla navigační metoda testována. V průběhu každého z těchto experimentů došlo vždy ke zhoršení podmínek příjmu GNSS signálů u zvoleného sebelokalizačního systému a následně došlo k obnovení výchozího stavu. Seznam těchto experimentů je uveden v tabulce 8.3. Detailní výsledky z jednotlivých provedených experimentů jsou uvedeny v příloze C.

Tab. 8.1: Seznam provedených experimentů pro srovnání sebelokalizačních metod

ID	Zdroj dat pro navigaci	Podmínky experimentu
1	iMAR iTraceRT-F400E	
13	Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)	!GNSS! @ iTraceRT-F400E
15	Gyrodometr(Ellipse-E + Odometr)	!GNSS! @ BD982
17	Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)	!GNSS! @ MTi-G-700
25	iMAR iTraceRT-F400E	Travnatý svah

Tab. 8.2: Seznam provedených experimentů pro vyhodnocení navigace

ID	Zdroj dat pro navigaci	Podmínky experimentu
2	iMAR iTraceRT-F400E	BD982 bez GBAS
3	Trimble BD982	
4	Trimble BD982	
5	SBG Ellipse-E	
6	Xsens MTi-G-700	
7	Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)	
8	Gyrodometr(BD982 + Odometr)	
9	Gyrodometr(Ellipse-E + Odometr)	
10	Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)	
11	Odometr	
12	Odometr	
14	Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)	
16	Gyrodometr(Ellipse-E + Odometr)	!GNSS! @ BD982
18	Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)	!GNSS! @ MTi-G-700
19	iMAR iTraceRT-F400E	!GNSS! @ iTraceRT-F400E
26	iMAR iTraceRT-F400E	Travnatý svah
27	Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)	!GNSS! @ iTraceRT-F400E
28	Gyrodometr(Ellipse-E + Odometr)	!GNSS! @ BD982

Tab. 8.3: Seznam provedených experimentů pro ověření přepínání sebelok. metod

ID	Zdroje dat pro navigaci	Podmínky experimentu
20	iMAR iTraceRT-F400E Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)	!GNSS! @ iTraceRT-F400E
21	Trimble BD982 Odometr	!GNSS! @ BD982
22	Xsens MTi-G-700 Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)	!GNSS! MTi-G-700
23	Trimble BD982 Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)	!GNSS! @ BD982, MTi-G-700
24	Trimble BD982 Gyrodometr(BD982 + Odometr)	Výpadek GBAS @ BD982

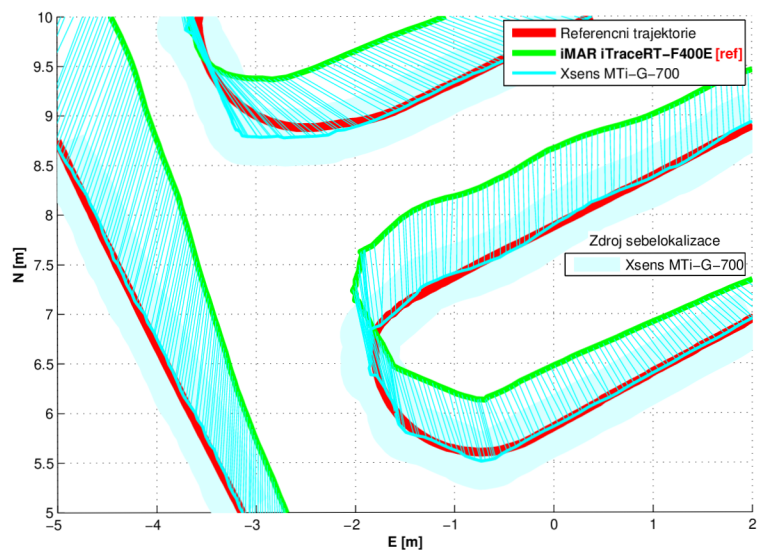
Pro popisovanou sérii experimentů byl použit upravený mobilní robot Orpheus-X3. Kamerová hlavice robotu nebyla v těchto experimentech použita. Na mobilním robotu byly osazeny všechny sebelokalizační systémy uvedené v kapitole 7. Fotografie mobilního robotu vybaveného všemi sebelokalizačními systémy je uvedena na obrázku 8.13.



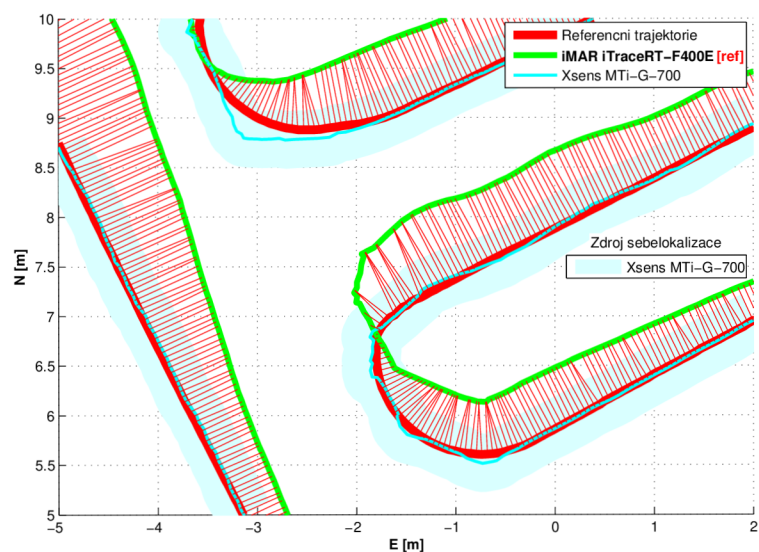
Obr. 8.13: Mobilní robot Orpheus-X3 upravený pro experimenty

Z naměřených trajektorií pohybu mobilního robotu v horizontální rovině jednotlivými sebelokalizačními systémy byly vyhodnoceny odchylky pro každou sebelokalizační metodu. Jako referenční data pro vyhodnocení odchylek byla použita data ze systému iMAR iTraceRT-F400E. V případě, že tento systém nepracoval v optimálních pracovních podmínkách, byl použit GNSS přijímač BD982 jako zdroj referenčních dat. Pro vyhodnocení souboru odchylek sebelokalizačních metod byl proveden rozdíl dat pocházejících ze stejného časového okamžiku. Příklad, ukazující metodiku určení odchylek pro vybranou sebelokalizační metodu, je uveden na obrázku 8.14. Soubor odchylek pro vyjádření kvality navigace byl získán jako vzdálenost mezi body žádané trajektorie a pozicí mobilního robotu získanou z referenčního systému. Graf trajektorií, ve kterém jsou vyznačeny odchylky mezi žádanou a skutečnou trajektorií, je uveden na obrázku 8.15. Z tohoto obrázku je patrná jiná metodika určení odchylek, která plyne z vlastností vstupních dat. Při porovnávání dvou sebelokalizačních metod je možné pro výběr korespondujících vektorů souřadnic ze srovnávaných metod zvolit jako kritérium korespondence čas. V úloze vyhodnocení výsledků navigace je žádaná trajektorie popsána pouze posloupností bodů bez časových značek, proto není možné použít pro korespondenci časovou informaci. Zvolená metodika pro vyhodnocení kvality navigace hodnotí proto jen rozdílnost pozice korespondujících

si bodů v obou trajektoriích podle použité metodiky. Průběh rychlostí v jednotlivých úsecích žádané trajektorie nevstupuje do hodnocení. Jako korespondující body žádané a skutečné trajektorie jsou vybrány body, které leží na normále k žádané trajektorii v daném navigačním bodě.



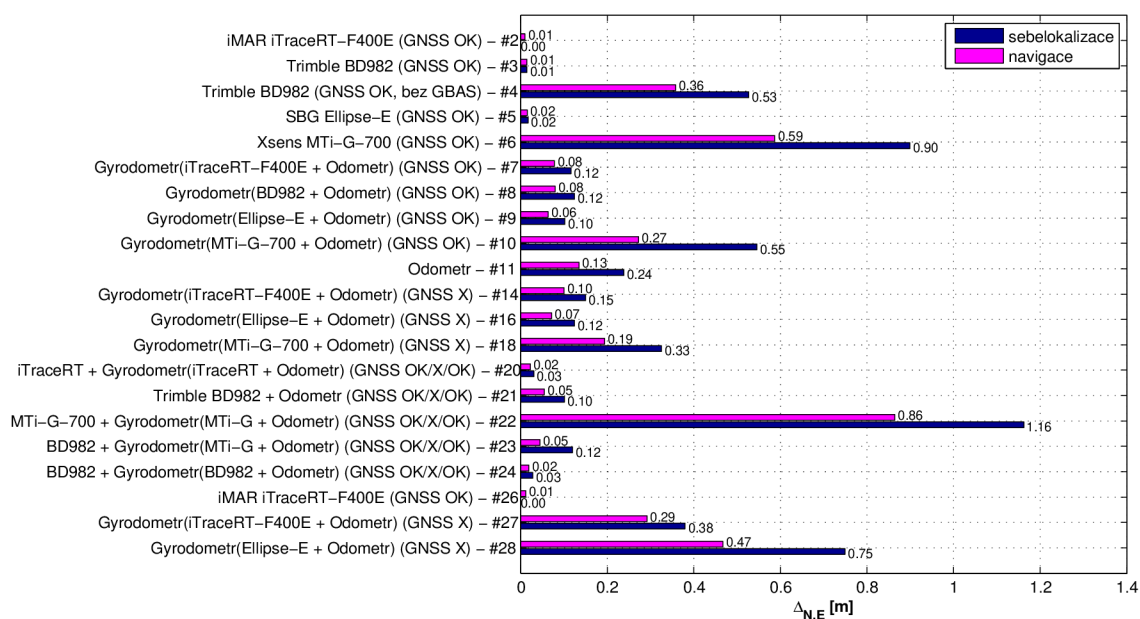
Obr. 8.14: Odchyly pozice při hodnocení výsledků sebelokalizace



Obr. 8.15: Odchyly pozice při hodnocení výsledků navigace

Na obrázku 8.16 jsou v grafu uvedeny souhrnné výsledky hodnocení sebelokalizace a navigace v provedených experimentech při použití jednotlivých sebelokali-

začnících metod s ideální a omezenou dostupností GNSS signálů. V grafu jsou vynešeny střední hodnoty velikosti odchylek pozice při hodnocení kvality sebelokalizace a navigace podle uvedené metodiky pro použitou referenční trajektorii. Pro obecné závěry má tento způsob hodnocení význam jen pro soubor odchylek nevykazujících trend a pocházejících z experimentů, ve kterých nedocházelo k významným změnám pracovních podmínek. V opačném případě je možné učinit závěry jen pro konkrétní experiment. Výsledky uvedené v grafu na obrázku 8.16 potvrzují dosažitelnost vysoké přesnosti sebelokalizace i navigace při použití RTK řešení pozice (experimenty č. 2, 3, 5, 26). Střední hodnota velikosti odchylek podle zvolené metodiky je 1 až 2 cm. Naproti tomu metody založené na GNSS řešení pozice, které využívají pro měření vzdáleností kódové měření, vykazují očekávatelnou střední odchylku 0,5 až 1,2 m (experimenty č. 4, 6, 22). V ostatních experimentech byly použity dead-reckoning metody, takže dosažené výsledky nelze nijak zobecnit. Pouze lze zhodnotit, že na zvolené trajektorii o délce přibližně 75 m nebyla překročena střední hodnota odchylek 0,4 m v příznivém terénu, vyjma experimentu č. 10. Jízda v travnatém svahu při nevyhovujícím příjmu GNSS signálů (experimenty č. 27 a 28) způsobila významně vyšší odchylky, než jízda po pevném podkladu za jinak stejných podmínek (experimenty č. 14 a 16).



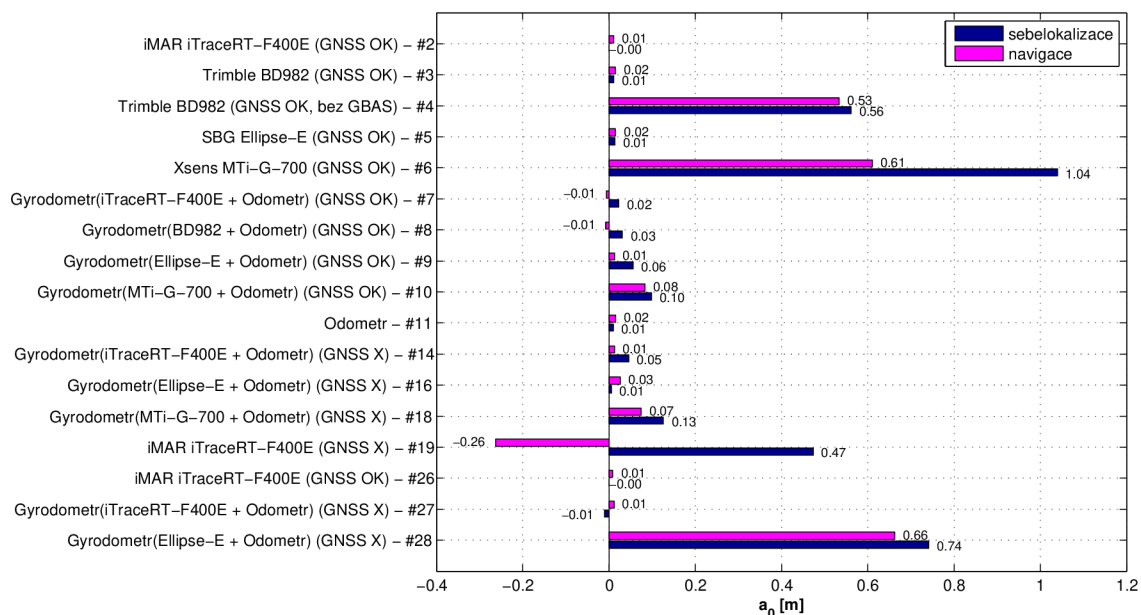
Obr. 8.16: Střední hodnota velikosti odchylek pozice mobilního robotu při hodnocení kvality sebelokalizace a navigace

Z předchozího uvedeného způsobu hodnocení ovšem není patrný vývoj velikosti odchylek pozice během narůstající ujeté vzdálenosti. Proto jsou na obrázcích 8.17,

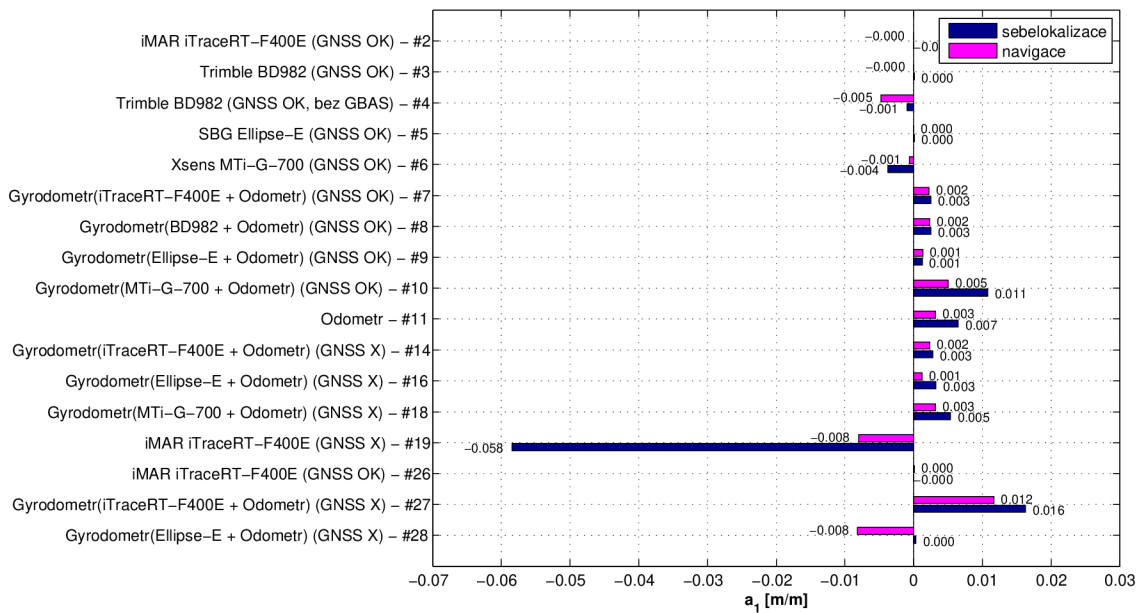
8.18 a 8.19 v grafech uvedeny hodnoty koeficientů polynomiální náhrady 8.1 vývoje velikosti odchylky pozice získané z dané sebelokalizační metody a vývoje odchylky skutečné trajektorie od žádané trajektorie pohybu mobilního robotu. Pro všechny experimenty, vyjma experimentu č. 19, byla zvolena lineární náhrada, tedy vyhodnocení velikosti trvalé odchylky a_0 nezávislé na ujeté vzdálenosti l a koeficientu a_1 lineárního členu. Vzhledem k povaze vývoje odchylek v experimentu č. 19 byl pro tento experiment použit i koeficient a_2 kvadratického členu polynomiální náhrady 8.1. Do tohoto způsobu zpracování jsou zahrnuty pouze experimenty, u kterých má uvedený způsob zpracování smysl. Jsou to experimenty, ve kterých nedocházelo ke změně pracovních podmínek (např. dočasné zhoršení příjmu GNSS signálů apod.).

$$\Delta_{N,E}'(l) = a_2 l^2 + a_1 l + a_0 \quad (8.1)$$

Pro získání hodnot koeficientů polynomiální náhrady vykazujících vysokou spolehlivost by bylo nutné jednotlivé typy experimentů několikrát opakovat pro odlišné trajektorie a každý typ experimentu statisticky zpracovat. Tento způsob stanovení koeficientů polynomiální náhrady nebyl z realizačních důvodů možný, proto byl každý typ experimentu proveden pouze jednou. Nicméně získané výsledky minimálně řádově vyjadřují chování jednotlivých metod, až na výjimky, na které bude upozorněno.



Obr. 8.17: Hodnoty absolutního koeficientu a_0 polynomiální náhrady vývoje velikosti odchylek sebelokalizace a navigace v závislosti na ujeté vzdálenosti



Obr. 8.18: Hodnoty lineárního koeficientu a_1 polynomiální náhrady vývoje velikosti odchylek sebelokalizace a navigace v závislosti na ujeté vzdálenosti

V grafu na obrázku 8.17 jsou uvedeny hodnoty absolutního členu a_0 polynomiální náhrady, který vyjadřuje velikost konstantní odchylky, nezávislé na ujeté vzdálenosti. V grafu na obrázku 8.18 jsou uvedeny hodnoty lineárního členu a_1 polynomiální náhrady pro jednotlivé realizované experimenty, jenž slouží k popisu lineární složky vývoje chyb. Koeficient lze také interpretovat jako velikost navýšení odchylky na každý 1 m ujeté vzdálenosti.

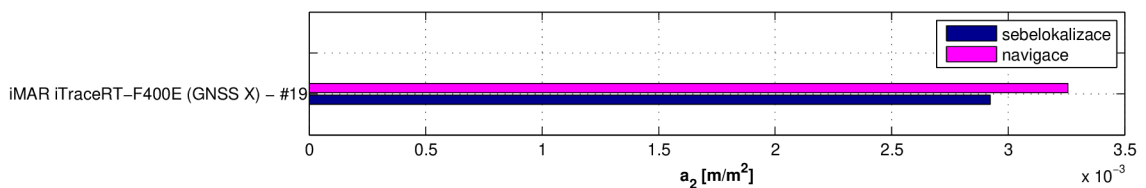
Výsledky skupiny experimentů č. 2, 3, 5 a 26 potvrzují očekávatelné výsledky. Sebelokalizační metody založené na RTK řešení se zafixovanými ambiguitami dosahují v hodnocení kvality sebelokalizace a navigace trvalých odchylek 1 až 2 cm a jsou bez závislosti na ujeté vzdálenosti, protože z principu jejich funkce u nich nedochází k integraci chyb. V experimentech č. 4 a 6, u nichž byla sebelokalizace založená na pozici určené z GNSS, jsou znatelné trvalé odchylky 0,5 až 1,2 m, které jsou způsobeny nepoužitím korekčních dat z pozemního korekčního systému (GBAS), ale pouze ze systému SBAS. Dle specifikace výrobce je pro GNSS přijímač BD982 velikost očekávané chyby (1σ) pozice v horizontální rovině rovna 0,5 m. Vyhodnocená velikost odchylky je tedy v toleranci. Totéž platí i pro INS MTi-G-700, u které výrobce udává pro režim SBAS dvojnásobnou hodnotu oproti BD982. Hodnoty koeficientu a_1 jsou malé záporné, nepřevyšující hodnotu -5 mm/m, jenž svědčí o mírně se zlepšujícím GNSS řešení pozice v průběhu experimentu, což ale nelze považovat za dlouhodobý trend metody.

Další skupina tvořená experimenty č. 7, 8, 9, 10, 14, 16, 18 má určení pozice založené na kombinaci informace z odometru o ujeté vzdálenosti a úhlů orientace získaných z inerciálního navigačního systému nebo GNSS přijímače. V experimentech č. 14, 16 a 18 došlo před zahájením měření k významnému zhoršení příjmu GNSS signálů u daných přístrojů. Výsledky vyhodnocení trvalé odchylky (koeficient a_0) odpovídají předpokladům – nejsou významně vysoké (hodnoty nepřekračují 13 cm). Mírně záporné hodnoty (-1 cm) u experimentů č. 7 a 8 lze považovat za nulové hodnoty. Významně horší hodnoty nelze pozorovat ani při srovnání podskupiny tvořené experimenty č. 7, 9 a 10 s podskupinou experimentů č. 14, 16 a 18, které se liší pouze kvalitou příjmu GNSS signálů. V dlouhodobějším horizontu (desítky minut) by ovšem rozdílly byly znatelnější z důvodu výpadku reference nutné pro účinnou estimaci biasů gyroskopů. To by způsobilo především růst odchylky azimutu vlivem integrace nepřesných úhlových rychlostí. Dosažené výsledky v tomto ohledu korespondují se specifikacemi [30], [34] použitých INS, které deklarují očekávatelné chyby pod $10^\circ/\text{h}$ (1σ) po uplynutí doby nutné k vyhovující estimaci biasů gyroskopů. U vyhodnocení lineárního koeficientu a_1 je situace odlišná. Zde jsou již patrné kladné hodnoty, které popisují růst odchylek se zvyšující se ujetou vzdáleností. Při použití úhlů orientace ze systémů iTraceRT-F400E a BD982 byl vyhodnocen růst odchylky 2 až 3 mm na 1 m ujeté trajektorie. Výsledky metod využívající MTi-G-700 ukazují na celkově horší estimaci azimutu v tomto INS, která nemusí být nutně způsobena jen výpadkem GNSS řešení. Dosažované horší výsledky měření azimutu odpovídají pracovním podmínkám a principu použité metody uvnitř MTi-G-700, která byla v průběhu experimentu aktivní. U tohoto přístroje nebylo dostupné referencování azimutu na základě jeho přesné hodnoty, ale bylo založeno na předpokladu použití neholonomního podvozku a tedy možnosti estimace azimutu z kurzu pohybu odvozeného z průběhu trajektorie pohybu. Poměrně nízká hodnota (1 mm / 1m) u experimentu č. 9 nenasvědčuje nižší závislosti odchylky na ujeté vzdálenosti, ale na nevhodná data pro vytvoření obecných závěrů. Obecně lze říci, že je nutné očekávat nárůst odchylky pozice v horizontální rovině minimálně 3 až 5 mm na 1 m ujeté vzdálenosti na pevných površích při tzv. gyrodometrii.

Dva poslední experimenty č. 27 a 28 byly provedeny v travnatém svahu při zhoršeném příjmu GNSS signálů. Jinak to jsou ekvivalenty experimentů č. 14 a 16. Opět se jedná o gyrodometrii kombinující informaci o ujeté vzdálenosti s úhly orientace získaných z daného INS. Při použití úhlů orientace z iTraceRT-F400E zůstává zanedbatelná velikost trvalé odchylky, ovšem strmost nárůstu chyby je přibližně 6krát vyšší, než pro pevný povrch, pro který byla provedena kalibrace konstant podvozku. V případě experimentu č. 28, využívajícího úhlů orientace z Ellipse-E, došlo k prudkému nárůstu chyby v úvodní části trajektorie, což znemožnilo vyhodnotit celkovou strmost nárůstu odchylky s ujetou vzdáleností.

V experimentu č. 11 je sebelokalizace založena pouze na odometrii. Velikost trvalé odchylky je zanedbatelná, což odpovídá povaze metody. Strmost růstu odchylky s ujetou vzdáleností je 3 a 7 mm na 1 m ujeté vzdálenosti.

V experimentu č. 19 je pro sebelokalizaci použit pouze systém iTraceRT-F400E, jenž má omezen příjem GNSS signálů. V této situaci je pozice získána dvojitou integrací měřených zrychlení, z čehož plyne nutnost použití kvadratického členu v polynomiální aproximaci růstu velikosti odchylky s ujetou vzdáleností. Ve skutečnosti bude z dlouhodobějšího hlediska v této situaci růst více než kvadratický, z důvodu růstu chyby estimace biasů akcelerometrů. Tuto skutečnost potvrzuje i záporná velikost koeficientu a_1 lineárního členu, která snižuje strmost růstu velikosti odchylky při nízkých hodnotách ujeté vzdálenosti. Růst odpovídající kvadratickému členu se projeví až při vyšších ujetých vzdálenostech, nikoliv krátce po výpadku GNSS řešení pozice. Velikost koeficientu a_2 kvadratického členu je uvedena v grafu na obrázku 8.19. Jeho hodnota je přibližně 3 mm pro kvadrát vzdálenosti. Je potřeba ale dodat, že uvedená hodnota koeficientu platí pouze pro použitou rychlost 0,6 m/s, kterou se robot pohyboval. Vývoj odchylky v této situaci je primárně pouze funkcí času, proto velikost odchylky vyjádřená jako funkce ujeté vzdálenosti, je navíc závislá i na rychlosti pohybu mobilního robotu.



Obr. 8.19: Hodnoty koeficientu a_2 kvadratického členu polynomiální náhrady vývoje velikosti odchylek sebelokalizace a navigace v závislosti na ujeté vzdálenosti

8.4 Použití více navigačních metod pro režim konvoje

Tento experiment se konal ve vojenském újezdu Libavá, v rámci testování mobilního robotu Taros 6x6 V2. V tomto experimentu se ověřovala funkčnost datové fúze na úrovni žádaných parametrů (v_R^s , ω_R^s) pohybu mobilního robotu při navigaci šestikolového mobilního robotu Taros 6x6 V2. Výběr nejlepšího řešení žádaného pohybu podle zvolených kritérií byl prováděn ze dvou použitých metod. První navigační metodou byla metoda popisovaná v této práci. Druhá z metod byla založena na

strojovém zpracování obrazu z kamery a informaci o ujeté vzdálenosti z odometru. Tato metoda byla realizována skupinou inteligentní a mobilní robotiky ČVUT v Praze. Referenční trajektorie pro mobilní robot Taros 6x6 V2 byla v reálném čase definována jízdou mobilního robotu Orpheus-X3. Pro sebelokalizaci mobilního robotu Taros 6x6 V2 byl použit pouze GNSS přijímač BD982 se dvěma anténami AG25GNSS. Sebelokalizace mobilního robotu Orpheus-X3 zahrnovala pouze řešení souřadnic jeho pozice a byla realizována GNSS přijímačem BD982 s jednou anténou AG25GNSS. Oba použité GNSS přijímače BD982 poskytovaly RTK řešení pozice. Fotografie navigovaného robotu Taros 6x6 V2 upraveného pro experiment je na obrázku 8.20. Fotografie robotu Orpheus-X3 použitého pro definování žádané trajektorie jízdy robotu Taros 6x6 V2 je uvedena na obrázku 8.21.



Obr. 8.20: Mobilní robot Taros 6x6 V2 použitý v experimentu

Funkčnost řešení byla ověřena v situaci, kdy první robot (Orpheus-X3) byl řízen manuálně operátorem a druhý robot (Taros 6x6 V2) byl v reálném čase navigován na základě trajektorie jízdy robotu vedoucího konvoje. Fotografie obou robotů v konvoji je na obrázku 8.22.

V první části experimentu byla pro navigaci robotu Taros 6x6 V2 použita pouze metoda uvedená v této práci. Část oblasti projeté oběma roboty a trajektorie jejich pohybu je uvedena na obrázku 8.23. Žlutá křivka reprezentuje trajektorii pohybu vedoucího robotu (Orpheus-X3) a modrá křivka odpovídá trajektorii pohybu druhého robotu v konvoji (Taros 6x6 V2). Na trajektorii robotu Taros 6x6 V2 lze pozorovat zvlnění oproti žádané trajektorii. Uvedené zvlnění trajektorie bylo způsobeno zejména nekompenzovaným proměnným zpožděním mezi řídicím systémem realizujícího navigaci a řídicími jednotkami pohonů a aktuátorů mobilního robotu. Taktéž dynamické parametry pohonů a aktuátorů nebyly přesně známy. Přítomnost



Obr. 8.21: Mobilní robot Orpheus-X3 použitý v experimentu

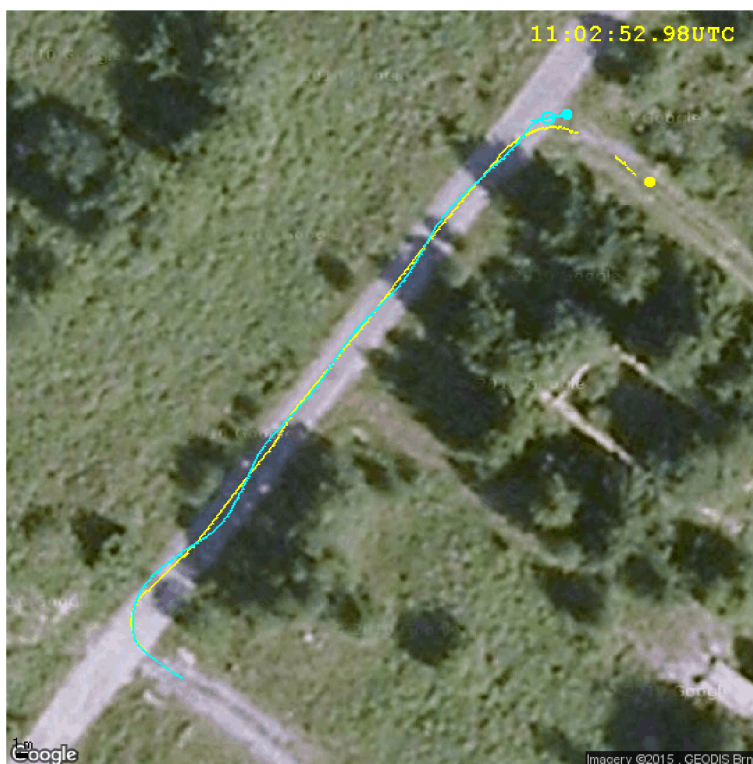
poměrně vysokého zpoždění (stovky ms) byla způsobena kaskádním řazením několika řídicích systémů a použitím nevhodných komunikačních sběrnic (např. USB) a převodníků během testování. Možnost přímého přístupu k nízkoúrovňovému řízení nebyla dostupná. Rychlost jízdy robotu Orpheus-X3 byla přibližně 7 km/h a robotu Taros 6x6 V2 byla přibližně 10 km/h. V těchto neoptimálních podmínkách řízení je ale dobře znatelná konvergence skutečné trajektorie k žádané trajektorii, které napomáhají podpůrné konvergenční algoritmy.

Ve druhé části experimentu byla do navigačního procesu zařazena i druhá navigační metoda vyvíjená kolegy z ČVUT. Výhodou této metody je její nezávislost na GNSS. Kritériem použitým pro přepínání mezi oběma metodami byla aktuální hodnota konfidence obou metod. U metody založené na GNSS byla konfidence odvozena od aktuální predikované směrodatné odchylky pozice v horizontální rovině. U metody založené na strojovém zpracování obrazu z kamery byla konfidence odvozena od aktuálního detekovaného počtu příznaků v obraze z kamery.

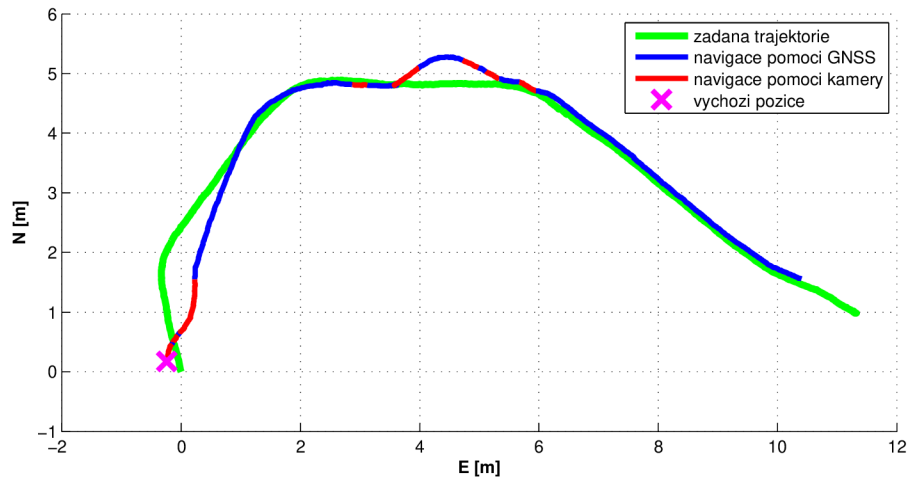
Ukázka části trajektorie pohybu robotu Taros 6x6 V2, na které docházelo k přepínání mezi oběma navigačními metodami, je uvedena na obrázku 8.24. Zelená křivka představuje žádanou trajektorii pohybu mobilního robotu Taros 6x6 V2, která byla získána z trajektorie jízdy robotu Orpheus-X3. Modré a červené úseky reprezentují trajektorii pohybu robotu Taros 6x6 V2 naměřenou GNSS přijímačem BD982. V modrých úsecích trajektorie bylo použito navigační řešení založené na GNSS a v červených úsecích trajektorie bylo použito řešení založené na strojovém zpracování obrazu z kamery. Z obrázku je patrná poměrně rychlá konvergence skutečné trajektorie k žádané trajektorii při přepnutí na metodu založenou na GNSS.



Obr. 8.22: Mobilní roboti Orpheus-X3 a Taros 6x6 V2 v konvoji



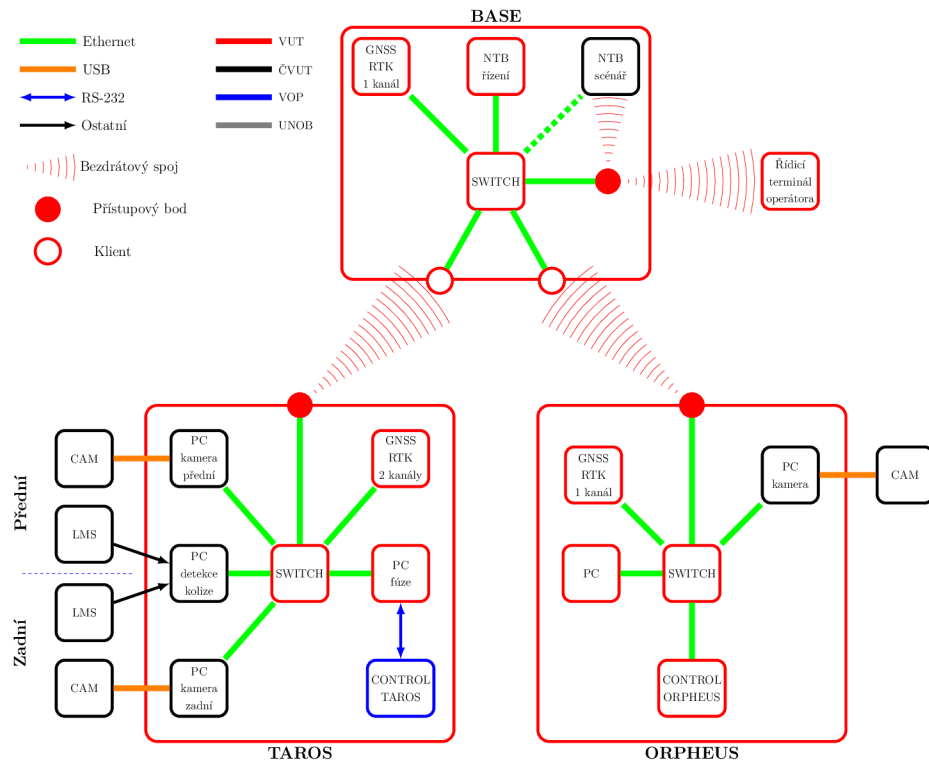
Obr. 8.23: Trajektorie (žlutá) vedoucího robotu (Orpheus-X3) konvoje a trajektorie (modrá) druhého robotu (Taros 6x6 V2) v konvoji



Obr. 8.24: Přepínání navigačních metod v průběhu jízdy

Technické řešení experimentu

Blokové schéma řešení uspořádání jednotlivých funkčních bloků experimentu je na obrázku 8.25.



Obr. 8.25: Blokové schéma realizace experimentu



Obr. 8.26: Operátor s robotem Orpheus-X3 a bezdrátovým ovládacím terminálem

Operátor má umožněno manuální řízení obou robotů pomocí joysticku. Současně má také dostupný nezávislý bezdrátový terminál pro ovládání autonomních funkcí celého systému. Bezdrátový terminál, který byl v experimentu realizován pomocí mobilního telefonu, lze vidět na fotografii na obrázku 8.26. Z tohoto terminálu je možné rychle realizovat několik předdefinovaných akcí. Jedná se především o definování a správu žádané trajektorie použitého většího UGV pro přepravu materiálu nebo osob, odeslání pokynu k příjezdu tohoto robotu do žádaného místa a zpětný návrat do výchozího místa. Současně lze na tomto terminálu sledovat důležité stavové informace celého systému.

9 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

V dizertační práci je uveden přehled současných sebelokalizačních metod vhodných pro realizaci velmi přesné navigace pozemních mobilních robotů ve vnějších prostředích. V práci je popsána nově vyvinutá navigační metoda, která s uvažovanými sebelokalizačními systémy založenými na RTK GNSS umožňuje dosáhnout centimetrové přesnosti sledování žádané trajektorie. Metoda byla navržena s ohledem na její jednoduchou parametrizovatelnost, takže je možné ji velmi snadno použít pro libovolné UGV. Tato vlastnost byla ověřena v reálných experimentech při navigaci mobilních robotů Orpheus-X3 a Taros 6x6 V2.

Pro zvýšení robustnosti celé navigační metody byly navrženy, implementovány a v reálných experimentech ověřeny metody datové fúze v různých úrovních navigačního procesu. První datová fúze je prováděna nad daty sebelokalizačních systémů, která poskytuje navigačnímu algoritmu nejlepší souřadnice pozice a vektor orientace podle nastavených kritérií. Druhá datová fúze je prováděna na úrovni jednotlivých řešení pohybu mobilního robotu, která jsou získána ze všech dostupných navigačních metod. Integrace obou datových fúzí značně zvyšuje celkovou robustnost navigace UGV při náročných misích v komplikovaném terénu, ve kterém není obvykle zajištěna plná dostupnost RTK řešení v celém průběhu mise. Datová fúze na úrovni řešení pohybu mobilního robotu přináší také snadnou realizovatelnost redundance, kdy je možné stejná navigační řešení počítat na různých výpočetních systémech a v reálném čase z nich vybírat jen validní řešení. Uvedené řešení koncepce navigace současně přináší i možnost dynamické distribuovatelnosti výpočtu navigačních řešení podle dostupných prostředků na použitých výpočetních systémech.

Provedené experimenty dokazují dosažitelnost centimetrové přesnosti sledování trajektorie v příznivém terénu. Z experimentů je také patrný vývoj chyb navigace pro jednotlivé použité sebelokalizační metody. Experimenty ukazují, že v případě špatného příjmu GNSS signálů, řešení pozice založené pouze na datové fúzi GNSS+INS a s cenou jednotek milionů nedosahuje přesnosti, která by byla dostatečná pro použití v uvažovaných aplikacích. Estimace pozice mobilního robotu založená na datech z jeho pohonů je stále pro reálné nasazení v obecném terénu, ve kterém je komplikovaný příjem GNSS signálů, klíčová. Metody kombinující informaci o ujeté vzdálenosti s orientací získanou z INS v experimentech dosahovaly střední hodnoty růstu chyby přibližně od 2 mm do 2 cm na 1 m ujeté vzdálenosti v závislosti na typu terénu. Nejperspektivnější se proto pro reálné použití jeví kombinace dvoufrekvenčního RTK GNSS přijímače se dvěma anténami, levnějšího INS s MEMS senzory a odometrů instalovaných na každém kole. Použití cenově méně dostupných a energeticky náročnějších INS s optickými gyroskopy nepřináší adekvátní přínosy pro popisovanou aplikaci.

Vyvinutá metoda byla použita i ve dvou reálných aplikacích. První z nich bylo přesné autonomní mapování intenzity gama záření v zadané oblasti a tvorba intenzitní mapy s vysokým rozlišením a následné určení pozic center oblastí se zvýšenou intenzitou. Tento experiment byl proveden ve spolupráci se Státním ústavem pro radiační ochranu, v.v.i. Druhou z testovaných aplikací byla navigace většího UGV na základě dat z malého průzkumného robotu, kdy větší UGV přijíždí po trajektorii malého průzkumného robotu do problematického místa, kde proběhne naložení/vyložení nákladu a velké UGV následně směřuje zpět na základnu v době, kdy malý průzkumný robot pokračuje v průzkumu prostředí. Tato aplikace byla otestována v rámci několikadenního pobytu ve vojenském újezdu Libavá při testování UGV Taros 6x6 V2 vyvíjeného podnikem VOP s.p.

Budoucí vývoj uvedené koncepce navigace bude směřovat zejména k vylepšení používaných dead-reckoning metod, které jsou využívány po výpadku RTK řešení pozice. To bude zahrnovat automatickou kalibraci konstant kinematického modelu pro aktuální terén a obecně změnu zpracování všech redundantních dat, které má ještě významný potenciál pro dosažení lepších výsledků. Dále lze zvážit přechod od současných kinematických modelů podvozku s vybranými dynamickými omezeními k jejich plným dynamickým modelům. Jedním z několika dalších aspektů reálného nasazení je řešení automatické volby parametrů navigační metody pro minimalizaci energetické spotřeby pohonů u smykem řízených mobilních robotů dle aktuálního terénu. V průběhu experimentů bylo zjištěno, že k minimalizaci této spotřeby vedou v travnatých terénech zcela jiné přístupy řešení než na pevných površích (beton, asfalt apod.). Další zajímavou realizací může být automatické přepínání režimů kinematiky u podvozků, které to umožňují (např. v experimentech použitý Taros 6x6 V2). Celkově je možné se tímto přístupem přiblížit manévrovatelnosti smykem řízeného podvozku. Realizace tohoto typu řízení vyžaduje již ale podporu na úrovni řešení navigační úlohy.

Poděkování

Tato práce vznikla v rámci Středoevropského technologického institutu (CEITEC) s pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje, za podpory Technologické agentury České republiky projektem č. TE01020197 „Centrum aplikované kybernetiky 3“ a grantu VG 2012 2015 096 „Koooperativní robotický průzkum nebezpečných oblastí“ Ministerstva vnitra České republiky, v rámci „Programu bezpečnostního výzkumu České republiky v letech 2010 až 2015“ (BV II/2-VS).

LITERATURA

- [1] *JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. BIMP, třetí vydání, 2012.
- [2] TAROS V2 Unmanned Ground Vehicle (UGV), Czech Republic. Army Technology. <http://www.army-technology.com/projects/taros-v2-unmanned-ground-vehicle-ugv>, 12 2014, [cit. 8. 8. 2015].
- [3] World Geodetic System 1984. National Geospatial-Intelligence Agency. <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84>, 5 2014, [cit. 10. 8. 2015].
- [4] Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. Movable Type Scripts. <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>, 2015, [cit. 11. 8. 2015].
- [5] Žalud, L.: Orpheus X1, X2, X3. Laboratory of Telepresence and Robotics. <http://www.orpheus-project.cz/orpheus-x>, 2015, [cit. 8. 8. 2015].
- [6] Andersen, J.: *Mobile Robot Navigation*. Dizertační práce, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2006.
- [7] Ashtech: *MB100 Reference Manual*. 2011.
- [8] Borenstein, J.; Everett, H.; Feng, L.: *Where am I?: Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. University of Michigan, 1996.
- [9] Borenstein, J.; Feng, L.: Gyrodometry: a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots. In *1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*, ročník 1, 4 1996, ISSN 1050-4729, s. 423–428.
- [10] Boucher, C.; Altamimi, Z.: *Memo : Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. 2011.
- [11] Burian, F.; Zalud, L.; Kocmanová, P.; aj.: Multi-Robot System for Disaster Area Exploration. In *Flood Recovery, Innovation and Response IV*, Great Britain: WIT Press, 2014, ISBN 978-1-84564-785-8, s. 263–274.
- [12] Chong, K. S.; Kleeman, L.: Accurate odometry and error modelling for a mobile robot. In *1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*, ročník 4, 4 1997, s. 2783–2788, doi:10.1109/ROBOT.1997.606708.
- [13] Choset, H.; Lynch, K.; Hutchinson, S.; aj.: *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. MIT Press, 2005, ISBN 978-0-262-03327-5.

- [14] Cimbálník, M.; Mervart, L.: *Vyšší geodézie 1, skriptum*. ČVUT Praha, 2002.
- [15] Frankenberg, F.; McDougall, R.; Nokleby, S.; aj.: A Mobile Robotic Platform for Generating Radiation Maps. In *Intelligent Robotics and Applications, Lecture Notes in Computer Science*, ročník 7507, Springer Berlin Heidelberg, 2012, ISBN 978-3-642-33514-3, s. 407–416, doi:10.1007/978-3-642-33515-0_41.
- [16] Grewal, M.; Weill, L.; Andrews, A.: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Wiley, druhé vydání, 2007, ISBN 978-0-470-04190-1.
- [17] Groves, P.: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Artech House, druhé vydání, 2013, ISBN 978-1-60807-005-3.
- [18] Hofmann-Wellenhof, B.; Legat, K.; Wieser, M.: *Navigation: Principles of Positioning and Guidance*. Springer, 2003, ISBN 3-211-00828-4.
- [19] Hruška, K.; Bradík, J.: *Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti*. Vysoké učení technické v Brně, druhé vydání, 2001, ISBN 80-214-1656-4.
- [20] iMAR GmbH: *iTraceRT-F400 – Interface description and user manual (DOC110207001)*. 2012, revize 2.03.
- [21] Jilek, T.: Radiation intensity mapping in outdoor environments using a mobile robot with RTK GNSS. In *2015 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 5 2015, s. 695–701, doi:10.1109/MILTECHS.2015.7153755.
- [22] Kaplan, E.; Hegarty, C.: *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House, druhé vydání, 2006, ISBN 1-58053-894-0.
- [23] Karney, C.: Transverse Mercator with an accuracy of a few nanometers. *Journal of Geodesy*, ročník 85, č. 8, 2011: s. 475–485, ISSN 0949-7714, doi:10.1007/s00190-011-0445-3.
- [24] Keiji, N.; Yamasaki, A.; Yoshida, K.; aj.: Development and Control Method of Six-Wheel Robot with Rocker Structure. In *Safety, Security and Rescue Robotics, 2007. SSRR 2007. IEEE International Workshop on*, 9 2007, s. 1–6.
- [25] Láska, Z.; Tešnar, M.; Slabý, J.; aj.: *Globální navigační satelitní systémy a jejich využití v praxi*. VUT v Brně, 2010.
- [26] Miller, A.; Machrafi, R.; Mohany, A.: Development of a semi-autonomous directional and spectroscopic radiation detection mobile platform. *Radiation Measurements*, ročník 72, 2015: s. 53–59, ISSN 1350-4487.

- [27] Šolc, F.; Neužil, T.; Hrabec, J.; aj.: Kinematický model kolového, smykem řízeného robota. In *AT&P journal Plus1*, 5 2008, s. 1–5.
- [28] Penelope, S.: *Active Sensors for Local Planning in Mobile Robotics*. World Scientific Publishing, 2001, ISBN 981-02-4681-1.
- [29] Rapp, R.: *Geometric Geodesy, Part I*. The Ohio State University, Department of Geodetic Science and Surveying, třetí vydání, 1991.
- [30] SBG Systems: *Ellipse AHRS & INS – High Performance, Miniature Inertial Sensors – User Manual*. Říjen 2014, revize 1.
- [31] Trimble: *Trimble BD982 GNSS Receiver Module – User Guide*. Duben 2011, revize B.
- [32] Vykutil, J.: *Vyšší geodézie: geometrická geodézie*. Kartografie Praha, 1982.
- [33] Weigel, J.; Machotka, R.: *Základy vyšší geodézie a kosmické geodézie*. Fakulta stavební VUT v Brně, 2006.
- [34] Xsens: *MTi User Manual (MT0605P)*. Prosinec 2012, revize B.
- [35] Zalud, L.; Kopecny, L.; Burian, F.; aj.: CASSANDRA – heterogeneous reconnaissance robotic system for dangerous environments. In *2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Kyoto: IEEE, 12 2011, ISBN 978-1-4577-1523-5, s. 1275–1280.

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

JÍLEK, T.; ŽALUD, L. Evaluation of real accuracy of azimuth measurement in the external environment using GNSS compass. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*. 2011. Vienna, Austria: DAAAM International Vienna, 2011. p. 1493-1494. ISBN: 978-3-901509-83-4.

JÍLEK, T.; ŽALUD, L. Security of remote management of embedded systems running MikroTik RouterOS operating system using proprietary protocols. In *Proceedings of 11th IFAC/ IEEE International Conference on Programmable Devices and Embedded Systems*. 2012. 10344 Virginia Lee Dr. Centerville, OH 45458, USA: IFAC-PapersOnLine / Elsevier, 2012. p. 138-142. ISBN: 978-3-902823-21-2.

BURIAN, F.; ŽALUD, L.; FLORIÁN, T.; JÍLEK, T. Unified storage for laser scanner data. In *Proceedings of 11th IFAC/ IEEE International Conference on Programmable Devices and Embedded Systems*. 10344 Virginia Lee Dr. Centerville, OH 45458, USA: IFAC-PapersOnLine / Elsevier, 2012. p. 56-59. ISBN: 978-3-902823-21-2.

JÍLEK, T.; ŽALUD, L.; BURIAN, F. Mobilní robot pro přesnou sebelokalizaci. In *Workshop Perspektivní projekty vývoje řídicích a senzorických technologií 2012 – Sborník příspěvků*. 2012. Brno: FEKT VUT, 2012. s. 84-88. ISBN: 978-80-214-4527-7.

JÍLEK, T.; ŽALUD, L. Vyhodnocení přesnosti určení polohy. In *Workshop Perspektivní projekty vývoje řídicích a senzorických technologií září 2012 – Sborník příspěvků*. 2012. Brno: FEKT VUT, 2012. s. 50-54. ISBN: 978-80-214-4547-5.

JÍLEK, T.; ŽALUD, L. Polygon pro testování sebelokalizace mobilních robotů. In *Sborník anotací konference Juniorstav 2013*. 2013. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2013. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-4669-4.

ŽALUD, L.; KOČMANOVÁ, P.; BURIAN, F.; JÍLEK, T. Color and Thermal Image Fusion for Augmented Color and Thermal Image Fusion for Augmented Reality in Rescue Robotics. In *The 8th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing & Power Applications: Innovation Excellence Towards Humanistic Technology (Lecture Notes in Electrical Engineering) [Hardcover]*. 2014. Springer, 2014. p. 47-56. ISBN: 978-981-4585-42-2.

ŽALUD, L.; BURIAN, F.; KOPEČNÝ, L.; KOCMANOVÁ, P.; JÍLEK, T. Remote Robotic Exploration of Contaminated and Dangerous Areas. In *Proceedings of INTERNATIONAL CONFERENCE ON MILITARY TECHNOLOGIES 2013*. Brno: Military Academy, Czech Republic, 2013. p. 1309-1316. ISBN: 978-80-7231-918-3.

BURIAN, F.; ŽALUD, L.; KOCMANOVÁ, P.; JÍLEK, T.; KOPEČNÝ, L. Multi-Robot System for Disaster Area Exploration. In *Flood Recovery, Innovation and Response IV*. Great Britain: WIT Press, 2014. p. 263-274. ISBN: 978-1-84564-785-8.

KOCMANOVÁ, P.; ŽALUD, L.; BURIAN, F.; JÍLEK, T. Multispectral Data Fusion for Robotic Reconnaissance and Mapping. In *ICINCO 2014 Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics Volume 2*. Portugal: 2014. p. 459-466. ISBN: 978-989-758-040-6.

ŽALUD, L.; KOCMANOVÁ, P.; BURIAN, F.; JÍLEK, T.; KALVODA, P.; KOPEČNÝ, L. Calibration and evaluation of parameters in a 3D proximity rotating scanner. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 2015, vol. 21, no. 1, p. 3-12. ISSN: 1392-1215.

JÍLEK, T. Autonomous field measurement in outdoor areas using a mobile robot with RTK GNSS. In *IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems*. Krakow, Polsko: 2015. p. 491-496. ISSN: 1474-6670.

JÍLEK, T. Radiation intensity mapping in outdoor environments using a mobile robot with RTK GNSS. In *International Conference on Military Technologies Proceeding, ICMT'15*. Brno: IEEE, 2015. p. 695-701. ISBN: 978-80-7231-976-3.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AVAR	Allanova odchylka
GALILEO	Evropský GNSS
GBAS	Rozšiřující systém GNSS využívající pozemní stanice (Ground-based Augmentation System)
GLONASS	Ruský GNSS (Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistěma)
GNSS	Globální družicový navigační systém (Global Navigation Satellite System)
GPS	Americký GNSS (Global Positioning System)
INS	Inerciální navigační systém
NMEA	National Marine Electronics Association
RTK	Typ GNSS řešení pozice na základě fázového měření s korekcemi v reálném čase (Real-time kinematic)
SBAS	Rozšiřující systém GNSS využívající družice (Satellite-based Augmentation System)
SLAM	Simultánní lokalizace a mapování (Simultaneous localization and mapping)
UGV	Bezposádkový pozemní prostředek (Unmanned Ground Vehicle)
VRS	Virtuální referenční stanice
α	Azimut
α_{lox}	Azimut loxodromy
α_{R}	Azimut mobilního robotu
α'_{R}	Efektivní azimut mobilního robotu respektující směr jízdy
α_{RN}	Počáteční azimut křivky z bodu R do bodu N
α_{t}	Azimut tečny k trajektorii
α_{t}^{-}	Azimut tečny k trajektorii zleva
$\Delta\alpha$	Změna azimutu

$\Delta\alpha_t$	Změna azimutu tečny k trajektorii mezi krajními body úseku trajektorie
$\Delta\alpha_{t,\min}^y$	Minimální velikost $\Delta\alpha_t$ pro navzorkování bodu
$\Delta\alpha$	Odchyška azimutu od referenční hodnoty
β	Rozdíl dvou azimutů
β_N	Rozdíl azimutů α_{RN} a $\alpha_t(N)$
β_R	Rozdíl azimutů α_{RN} a α_R
β_R^p	Posloupnost predikovaných odchylek β_R
$\beta_R^{r,\min}$	Minimální hodnota regulační odchylky, při které je uplatňován r_R^{\min}
$\beta_R^{v,\max}$	Maximální hodnota regulační odchylky, při které je uplatňována $v_{R,p}^{\max}$
$\beta_R^{v,\min}$	Minimální hodnota regulační odchylky, při které je uplatňována rychlost $v_{R,p}^{\min}$
γ_a^s	Vektor žádaných úhlů natočení aktuátorů kol mobilního robotu
Γ	Geodetická křivka mezi dvěma body na elipsoidu nebo sféře
$\kappa_{R,f}$	Vektor aktuálních konfidencí jednotlivých navigačních metod
λ	Zeměpisná délka
λ_N	Zeměpisná délka aktuálního navigačního bodu N
λ_R	Zeměpisná délka aktuální pozice mobilního robotu
λ_W	Zeměpisná délka navigačního bodu W
ξ^c	Efektivní rozchod kol pro výpočet inverzní kinematiky
ξ^m	Efektivní rozchod kol pro výpočet přímé kinematiky
ρ	Horizontální (north-east) rovina
σ	Směrodatná odchylka
τ	Časové zpoždění
τ_c	Časové zpoždění provedení akčního zásahu na pohonech a aktuátorech
$\tau_{m,\max}$	Maximální časové zpoždění získané naměřené pozice a orientace

φ	Zeměpisná šířka
φ_N	Zeměpisná šířka aktuálního navigačního bodu N
φ_R	Zeměpisná šířka aktuální pozice mobilního robotu
φ_W	Zeměpisná šířka navigačního bodu W
ω	Úhlová rychlost pohybu
ω_m^s	Vektor žádaných úhlových rychlostí hřídelí motorů pohonů
ω_R	Úhlová rychlost pohybu robotu
ω_R^{\max}	Maximální úhlová rychlost pohybu při zatáčení
ω_R^s	Žádaná úhlová rychlost robotu
$\omega_R^{s,e}$	Posloupnost historických žádaných úhlových rychlostí robotu pro estimaci pozice a orientace
$\omega_R^{s,p}$	Posloupnost žádaných úhlových rychlostí robotu pro predikci pozice a orientace
$\omega_{R,1}^s$	Žádaná úhlová rychlost robotu získaná z interního řešení
$\omega_{R,f}^s$	Vektor žádaných úhlových rychlostí získaných z jednotlivých navigačních metod
$\omega_{R,i}^s$	Žádaná úhlová rychlost robotu získaná z i -tého (externího) řešení
$\omega_{R,n}^s$	Žádaná úhlová rychlost robotu získaná z n -tého (externího) řešení
\mathbf{c}_w^c	Vektor konstant kol pro výpočet inverzní kinematiky
\mathbf{c}_w^m	Vektor konstant kol pro výpočet přímé kinematiky
E	Východní souřadnice
f	Frekvence
f_c	Frekvence navigačního cyklu
h	Výška nad referenčním elipsoidem
l	Délka
l_{lox}	Délka loxodromy

l_{RN}	Délka křivky Γ mezi body R a N
$l_{\max}^{v,\min}$	Maximální vzdálenost od navigačního bodu, kdy je použita minimální rychlost
$l_{\min}^{v,\max}$	Minimální vzdálenost od navigačního bodu, kdy je použita maximální rychlost
$l_{RN,\min}$	Minimální délka křivky Γ mezi body R a N
$l_{RN,\min}^t$	Minimální délka křivky Γ mezi body R a N pro zajištění nekmitavé konvergence
l_{tw}	Rozchod kol (track width)
l_{wb}	Rozvor kol (wheel base)
Δl	Délka úseku na křivce
Δl_{\max}^v	Maximální velikost Δl pro navzorkování bodu
Δl_{\min}^v	Minimální velikost Δl pro navzorkování bodu
$\Delta_{N,E}$	Odchylka pozice od referenční pozice
N	Aktuální navigační bod
N	Severní souřadnice
\mathbf{o}_R	Vektor úhlů orientace mobilního robotu
\mathbf{o}_R^e	Vektor estimované orientace mobilního robotu
\mathbf{O}_R^e	Matice estimovaných orientací mobilního robotu
\mathbf{o}_R^m	Vektor orientace mobilního robotu získaný z měřicího zařízení
\mathbf{O}_R^m	Matice řešení orientace mobilního robotu získaných ze sebelokalizačních systémů
\mathbf{o}_R^p	Posloupnost predikovaných úhlů orientace
\mathbf{o}_R^p	Vektor predikovaných úhlů orientace mobilního robotu
\mathbf{p}	Vektor souřadnic pozice
\mathbf{p}_N	Vektor souřadnic aktuálního navigačního bodu N

\mathbf{p}_R	Vektor souřadnic pozice mobilního robotu
\mathbf{p}_R^e	Vektor estimované pozice mobilního robotu
\mathbf{P}_R^e	Matice estimovaných pozic mobilního robotu
p_R^p	Posloupnost predikovaných souřadnic pozice
\mathbf{p}_R^m	Vektor pozice mobilního robotu získaný z měřicího zařízení
\mathbf{P}_R^m	Matice řešení pozice mobilního robotu získaných ze sebelokalizačních systémů
\mathbf{p}_R^p	Vektor predikovaných souřadnic pozice mobilního robotu
\mathbf{p}_W	Vektor souřadnic navigačního bodu W
r	Poloměr
r_R^{\min}	Minimální poloměr zatáčení mobilního robotu
r_{RN}	Poloměr kruhového oblouku z bodu R do bodu N
$r_{RN,\min}$	Minimální poloměr kruhového oblouku z bodu R do bodu N
r_s	Náhradní poloměr křivosti pro zvolený bod na elipsoidu
r_t	Poloměr kruhového oblouku použitý pro konvergenci k žádané trajektorii
R	Bod reprezentující pozici mobilního robotu
$\mathbf{S}_{o,R}^e$	Matice předpokládaných směrodatných odchylek estimovaných úhlů orientace
$\mathbf{S}_{p,R}^e$	Matice předpokládaných směrodatných odchylek estimovaných souřadnic pozice
v	Obvodová rychlost pohybu
v_R	Dopředná rychlost pohybu robotu
v_R^s	Žádaná dopředná rychlost robotu
$v_R^{s,e}$	Posloupnost historických žádaných dopředných rychlostí robotu pro estimaci pozice
$v_R^{s,p}$	Posloupnost žádaných dopředných rychlostí robotu pro predikci pozice

$\mathbf{v}_{R,f}^s$	Vektor žádaných dopředných rychlostí získaných z jednotlivých navigačních metod
$v_{R,lim}$	Limitní dopředná rychlost robotu
$v_{R,lim}^{ext}$	Externí omezující limitní dopředná rychlost robotu
$v_{R,lim}^p$	Posloupnost predikovaných limitních žádaných dopředných rychlostí $v_{R,lim}$
$v_{R,lim}^{max}$	Maximální hodnota velikosti limitní dopředné rychlosti robotu
$v_{R,lim}^{min}$	Minimální hodnota velikosti limitní dopředné rychlosti robotu
$v_{R,1}^s$	Žádaná dopředná rychlost robotu získaná z interního řešení
$v_{R,i}^s$	Žádaná dopředná rychlost robotu získaná z i -tého (externího) řešení
$v_{R,p}^{max}$	Maximální velikost dopředné rychlosti v rychlostním profilu
$v_{R,p}^{min}$	Minimální velikost dopředné rychlosti v rychlostním profilu
$v_{R,n}^s$	Žádaná dopředná rychlost robotu získaná z n -tého (externího) řešení
$v_{w,l}$	Obvodová rychlost kol na levé straně mobilního robotu
$v_{w,r}$	Obvodová rychlost kol na pravé straně mobilního robotu
$v_{w,l}^s$	Žádaná obvodová rychlost kol na levé straně mobilního robotu
$v_{w,r}^s$	Žádaná obvodová rychlost kol na pravé straně mobilního robotu
W	Navigační bod
W_i	i -tý navigační bod
t	Čas
Δt	Délka časového intervalu
Δt_p	Délka predikčního časového intervalu
\mathcal{T}	Navzorkovaná žádaná trajektorie mobilního robotu (posloupnost bodů W)

SEZNAM PŘÍLOH

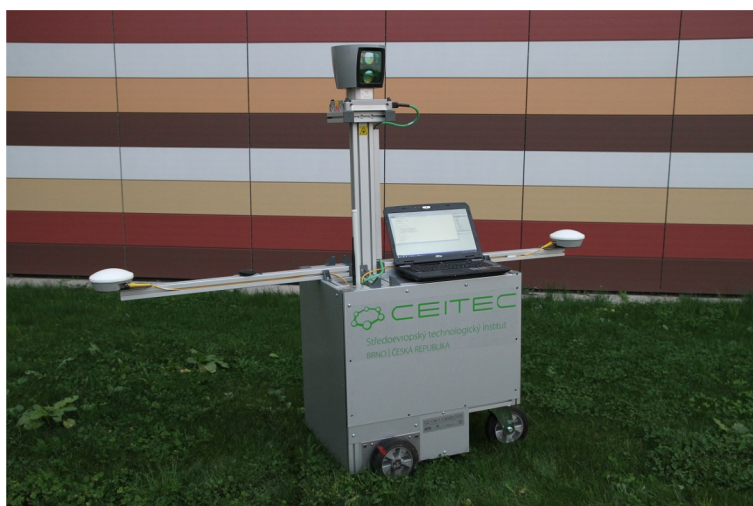
A	Mobilní robotický mapovací systém envMap	117
B	Plošné měření intenzity gama záření	119
C	Porovnání sebelokalizačních metod	121
C.1	Experiment č. 1	122
C.2	Experiment č. 2	124
C.3	Experiment č. 3	126
C.4	Experiment č. 4	128
C.5	Experiment č. 5	130
C.6	Experiment č. 6	132
C.7	Experiment č. 7	134
C.8	Experiment č. 8	136
C.9	Experiment č. 9	138
C.10	Experiment č. 10	140
C.11	Experiment č. 11	142
C.12	Experiment č. 12	144
C.13	Experiment č. 13	146
C.14	Experiment č. 14	148
C.15	Experiment č. 15	150
C.16	Experiment č. 16	152
C.17	Experiment č. 17	154
C.18	Experiment č. 18	156
C.19	Experiment č. 19	158
C.20	Experiment č. 20	160
C.21	Experiment č. 21	162
C.22	Experiment č. 22	164
C.23	Experiment č. 23	167
C.24	Experiment č. 24	169
C.25	Experiment č. 25	171
C.26	Experiment č. 26	173
C.27	Experiment č. 27	175
C.28	Experiment č. 28	176

A MOBILNÍ ROBOTICKÝ MAPOVACÍ SYSTÉM ENVMAP

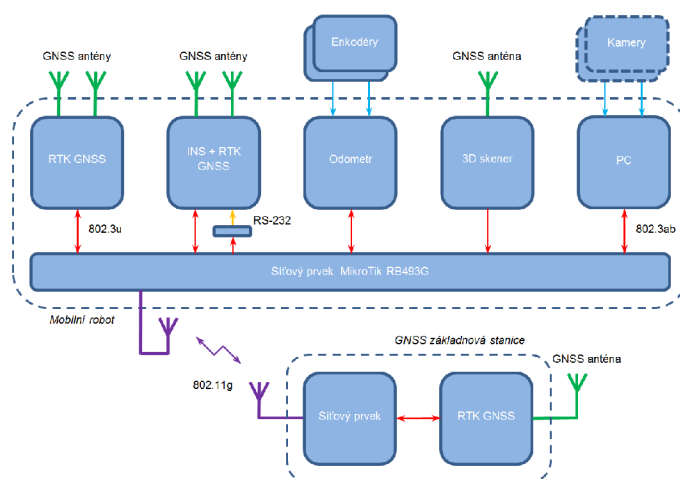
Typ díla	Funkční vzorek
Interní označení	envMap
Tvůrci	Ing. Tomáš Jílek (podíl: 90 %) Ing. František Burian, Ph.D. (podíl: 5 %) doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D. (podíl: 5 %)
Umístění produktu	Laboratoř teleprezence a robotiky – místnost SE1.112 Technická 3082/12, 616 00 Brno

Mobilní robotický mapovací systém envMap (obrázek A.1) je určen pro přesnou 6DOF sebelokalizaci a 3D mapování vnějších prostředí nebo prostor uvnitř budov. Systém obsahuje několik velmi přesných zařízení pro sebelokalizaci a mapování (RTK GNSS přijímač, kombinovaný systém INS/GNSS, 3D laserový proximitní skener). Pro všechny GNSS přijímače jsou dostupná korekční data v reálném čase z vlastní GNSS referenční stanice. Celá mobilní platforma může být uživatelem ovládána pomocí lokálně nebo vzdáleně připojených ovládacích prvků. Systém může také pracovat v autonomních režimech. Pro přenos dat je použita datová síť založená na standardech 802.3 a 802.11. Blokové schéma měřicí části systému je uvedeno na obrázku A.2 a blokové schéma jeho řídicí části je na obrázku A.3.

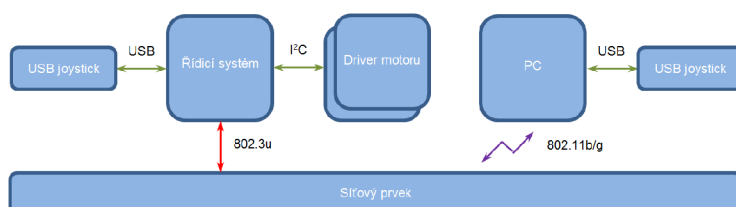
Systém lze využít k několika účelům. Jednou z aplikací je úloha vzájemného srovnání lokalizačních systémů ve statických i dynamických režimech s referenčním systémem, který má řádově vyšší přesnost. Mobilní systém je uzpůsoben pro snadnou integraci dalších měřicích zařízení, včetně možnosti osazení několika GNSS antén na vodorovná ramena. Tím je umožněno použití GNSS přijímačů s více anténami, které umožňují statické i dynamické měření orientace. Další z významných aplikací je mobilní 3D mapování jak uvnitř budov, tak i ve vnějších prostředích pomocí 3D dálkoměrného skeneru. Systém envMap lze rovněž použít pro rychlé ověřování algoritmů autonomní lokalizace a navigace, díky jeho modulární koncepci a unifikovaným rozhraním, čehož bylo několikrát využito při řešení bakalářských a diplomových prací.



Obr. A.1: Mobilní robotický mapovací systém envMap



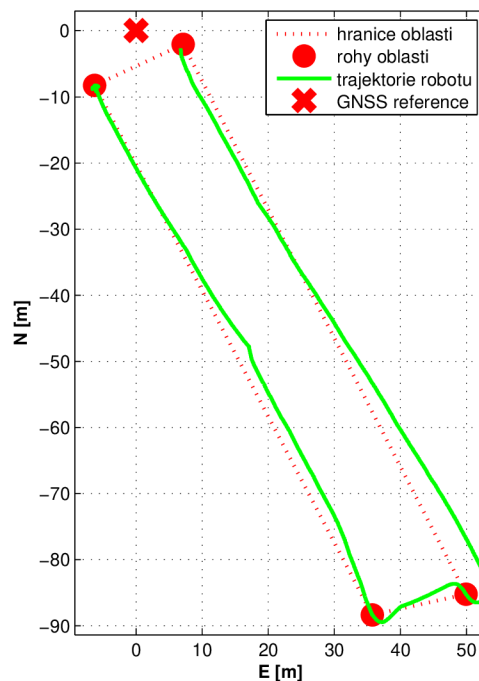
Obr. A.2: Blokové schéma měřicí části systému envMap



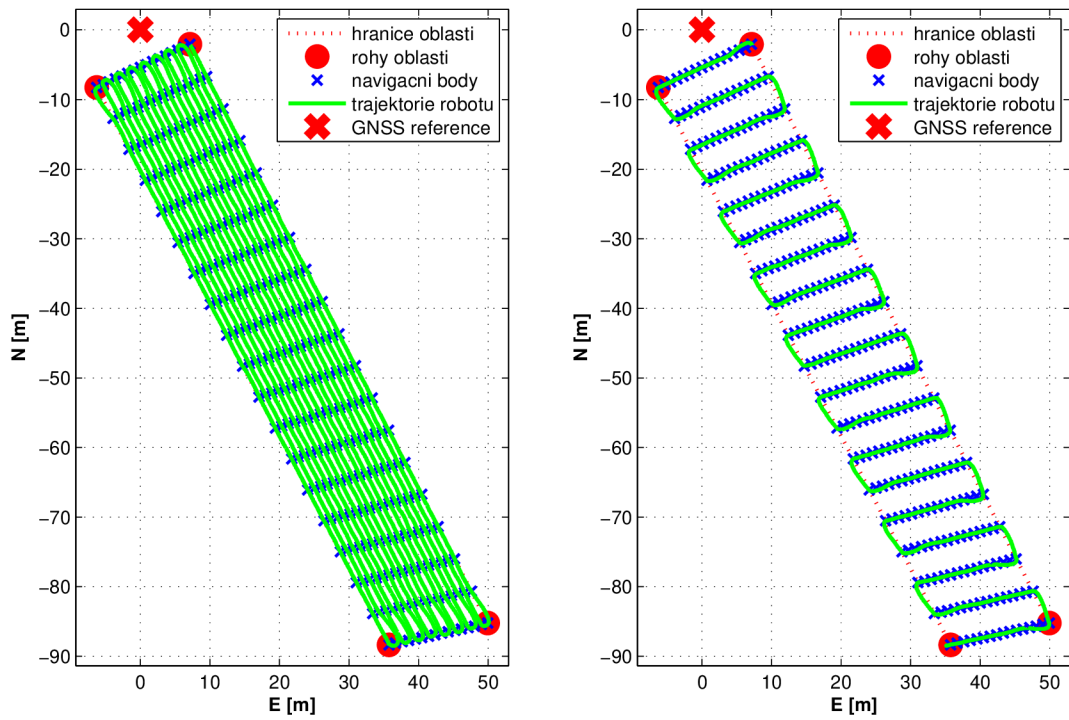
Obr. A.3: Blokové schéma řídicí části systému envMap

B PLOŠNÉ MĚŘENÍ INTENZITY GAMA ZÁŘENÍ

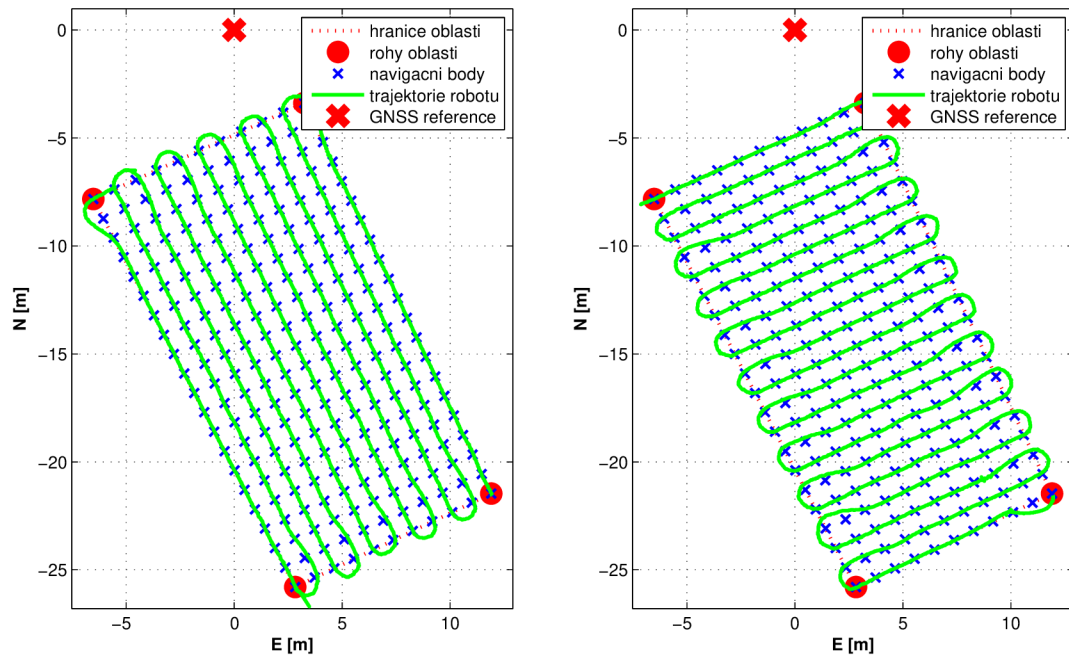
V této příloze jsou uvedeny doplňující grafy k provedenému plošnému měření intenzity gama záření (viz kapitola 8.2). Na obrázku B.1 je uvedena trajektorie mobilního robotu v horizontální rovině, ze které je odvozena žádaná oblast k mapování. Definovaná oblast byla nejprve mapována v podélném směru (obrázek B.2 vlevo) a následně v příčném směru (obrázek B.2 vpravo). Na základě provedeného hrubého měření byla vybrána část původní oblasti a ta byla znovu mapována s jemnějším krokem mřížky. Obě trajektorie (pro podélné i příčné detailní mapování) jsou uvedeny na obrázku B.3.



Obr. B.1: Definování oblasti k mapování



Obr. B.2: Skutečné trajektorie hrubého mapování – podélné a příčné



Obr. B.3: Skutečné trajektorie detailního mapování – podélné a příčné

C POROVNÁNÍ SEBELOKALIZAČNÍCH METOD

V následujících grafech jsou uvedeny výsledky z několika provedených experimentů za účelem srovnání jednotlivých sebelokalizačních systémů a metod a také ověření správné funkce volby nejlepšího zdroje souřadnic pozice a úhlů orientace mobilního robotu v daném okamžiku. Typ experimentu definuje jeho primární význam – vyhodnocení kvality sebelokalizace nebo navigace. V případě vyhodnocení sebelokalizace se jedná o vzájemné srovnání výsledků všech používaných sebelokalizačních metod. Vyhodnocení navigace slouží pro srovnání trajektorie získané z referenčního sebelokalizačního systému se žádanou trajektorií pohybu, která je vykreslena červeně. Jako zdroj referenčních dat je primárně zvolen iMAR iTraceRT-F400E. Pokud se tento systém nacházel v neoptimálních pracovních podmínkách, byl použit GNSS přijímač Trimble BD982 jako zdroj referenčních dat.

V prvním z grafů je uvedena trajektorie pohybu v horizontální rovině. Odstín podbarvení trajektorie popisuje použitý zdroj sebelokalizačních dat pro navigaci mobilního robotu v dané části trajektorie. V grafu jsou dále v tabulce uvedeny priority jednotlivých použitých zdrojů pozice a orientace mobilního robotu.

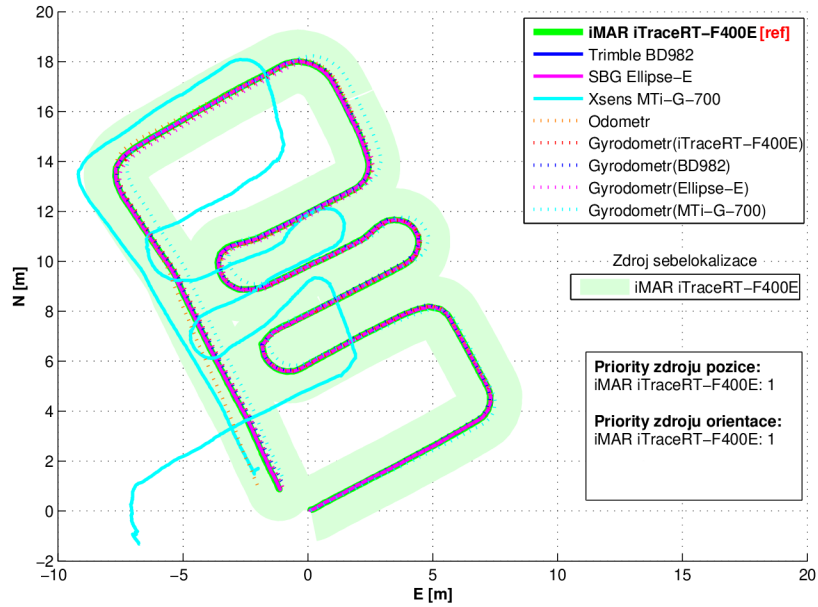
Druhý graf zobrazuje časový vývoj odchylky Δ_α azimutu α_R mobilního robotu pro jednotlivé použité sebelokalizační metody. Tato odchylka je definována jako rozdíl mezi azimutem získaným z dané sebelokalizační metody a azimutem získaným ze zvoleného referenčního systému.

Třetí graf zobrazuje časový vývoj odchylky $\Delta_{N,E}$ 2D pozice v horizontální rovině od pozice získané z referenčního systému pro jednotlivé sebelokalizační metody.

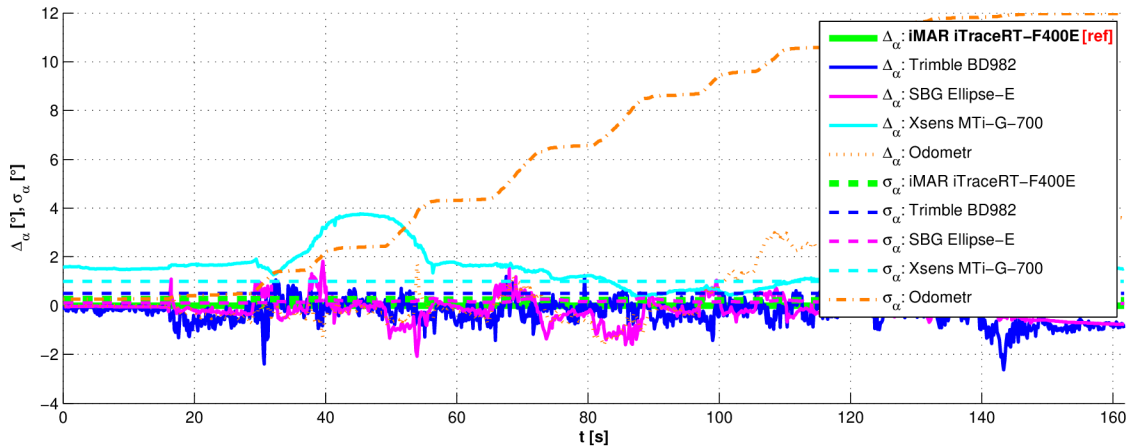
V případě experimentu zaměřujícího se na výsledky navigace je uveden i čtvrtý graf, jenž zobrazuje průběh odchylky skutečné trajektorie mobilního robotu získané z referenčního systému od žádané trajektorie v horizontální rovině. Odchylky jsou vyneseny v závislosti na délce splněného úseku žádané trajektorie. V případě, že se robot pohyboval vpravo od žádané trajektorie ve směru jízdy, je odchylka považována za zápornou. V případě, že vlevo, je odchylka považována za kladnou. Použitá metodika pro určení odchylek dvou trajektorií v horizontální rovině je uvedena v kapitole 8.3.

C.1 Experiment č. 1

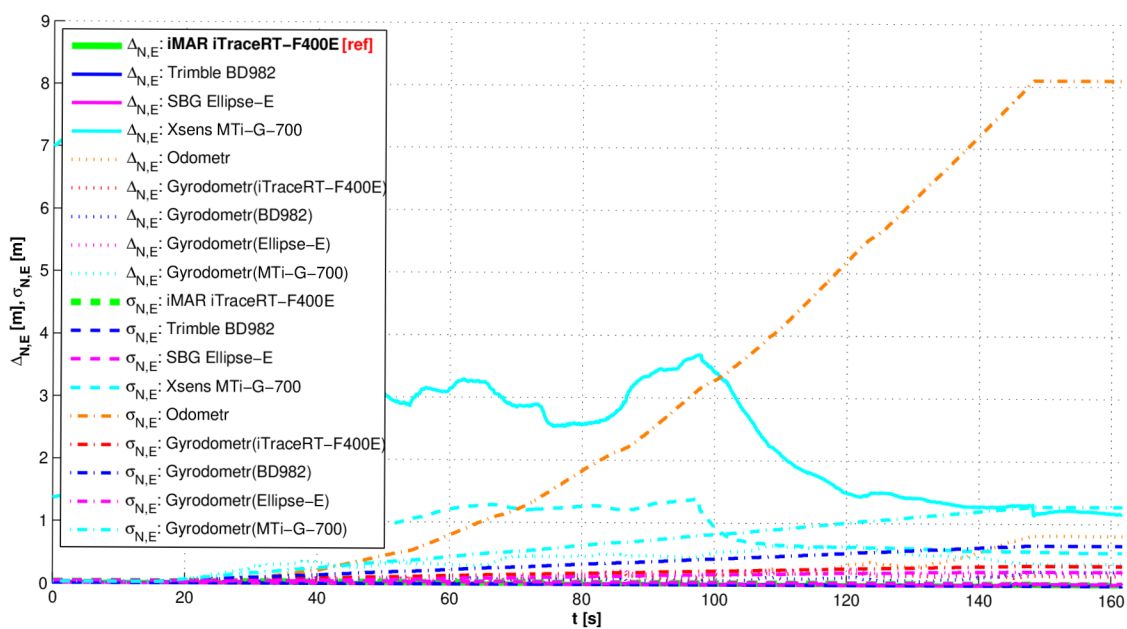
Typ experimentu	Vyhodnocení sebelokalizace
Použitá zařízení pro navigaci	iMAR iTraceRT-F400E
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



Obr. C.1: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



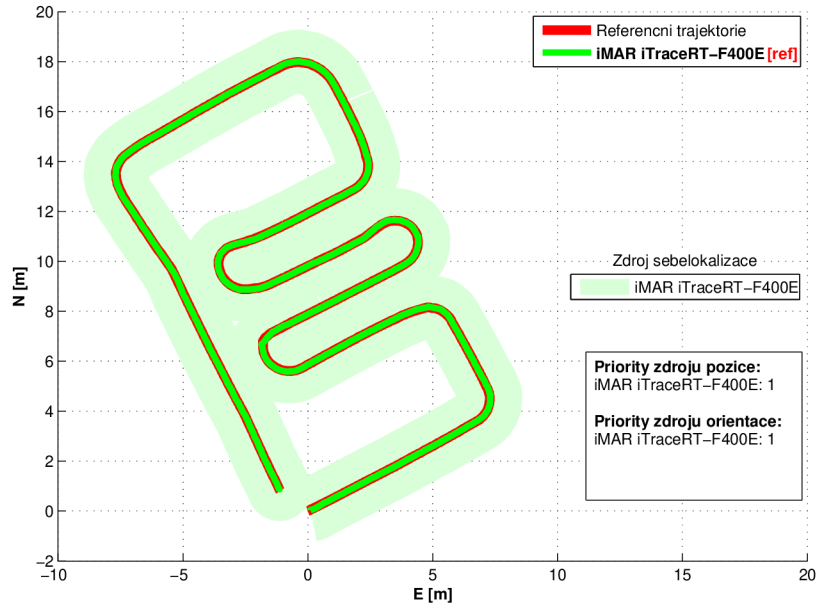
Obr. C.2: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



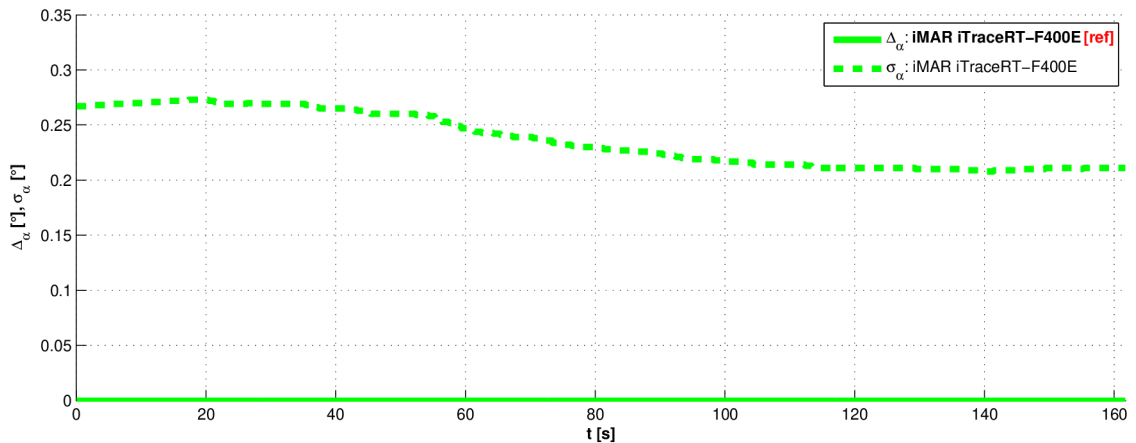
Obr. C.3: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ

C.2 Experiment č. 2

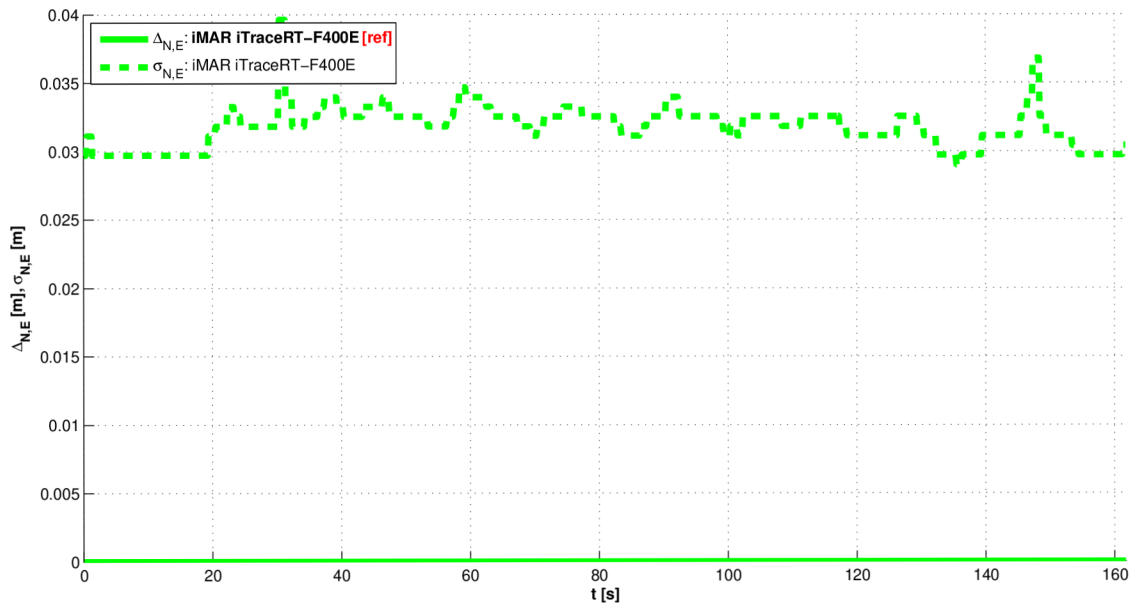
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	iMAR iTraceRT-F400E
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



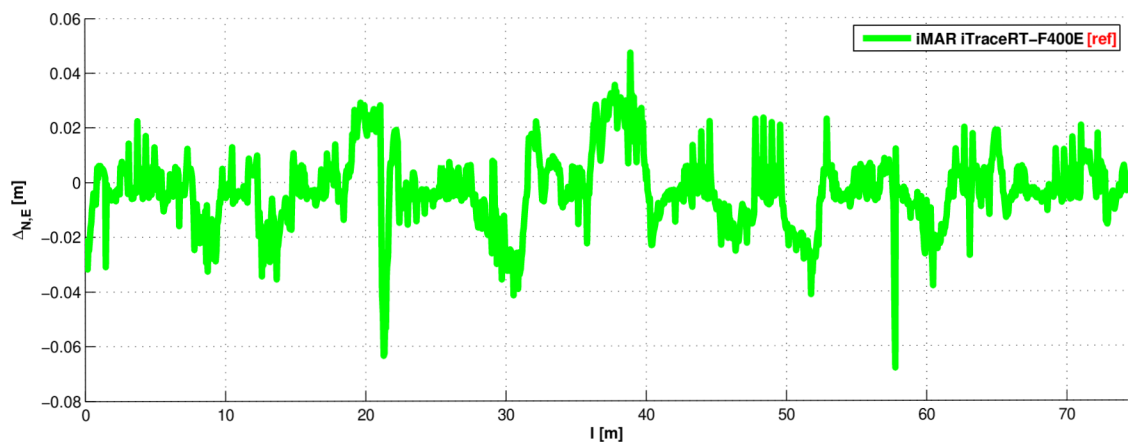
Obr. C.4: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.5: Naměřené odchyly Δ_α a predikované směrodatné odchyly σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



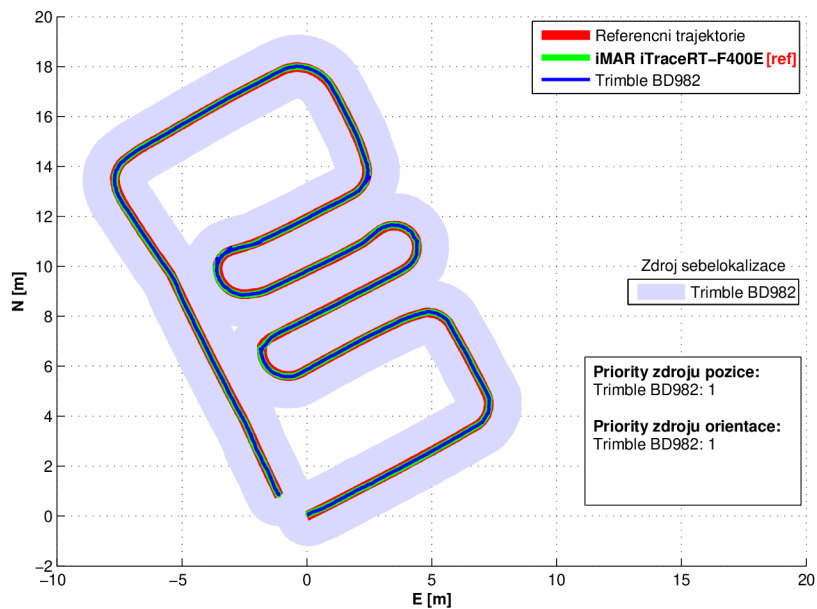
Obr. C.6: Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



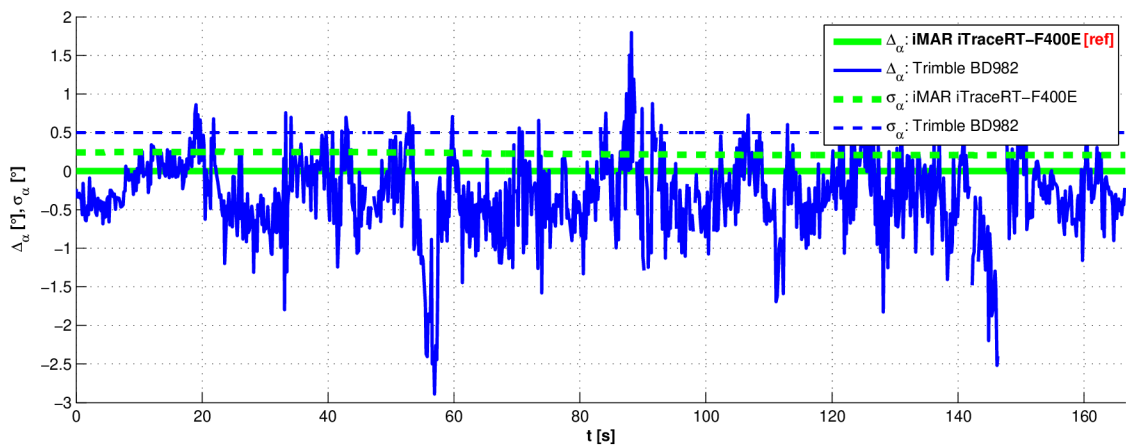
Obr. C.7: Odchytka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.3 Experiment č. 3

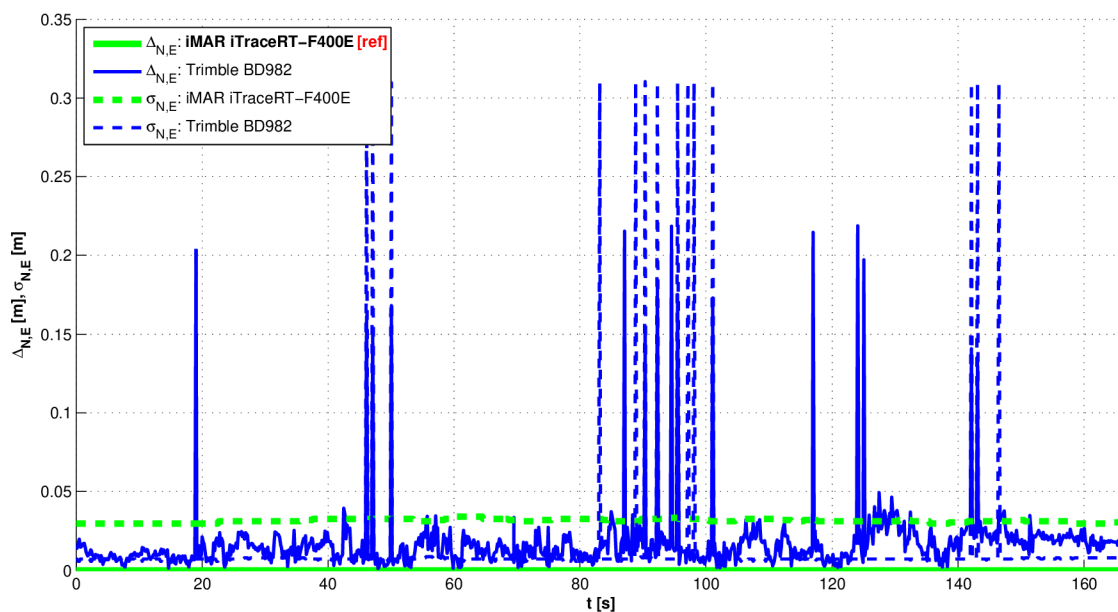
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Trimble BD982
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



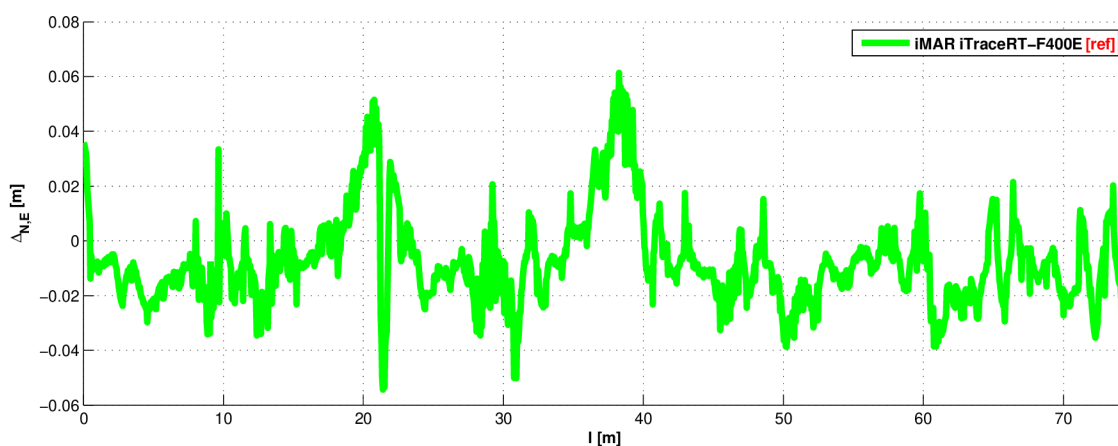
Obr. C.8: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.9: Naměřené odchytky Δ_α a predikované směrodatné odchytky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



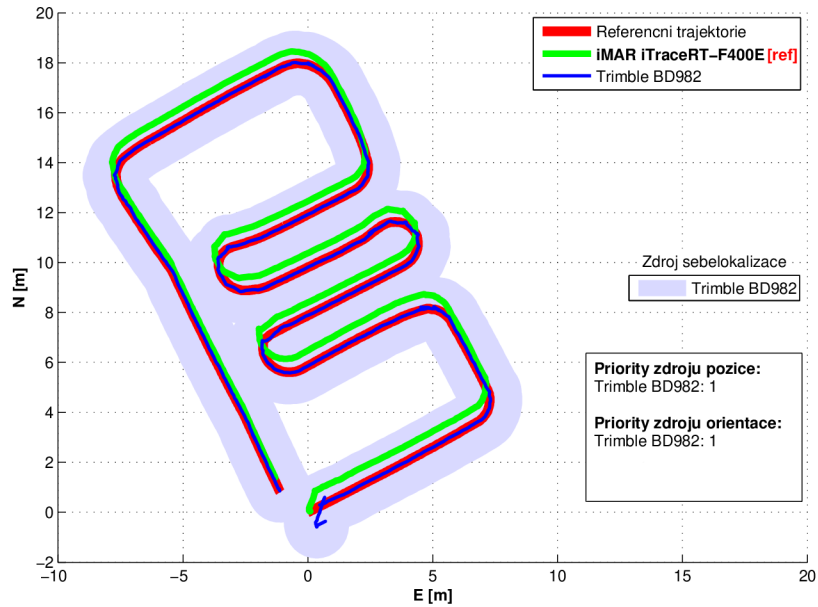
Obr. C.10: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



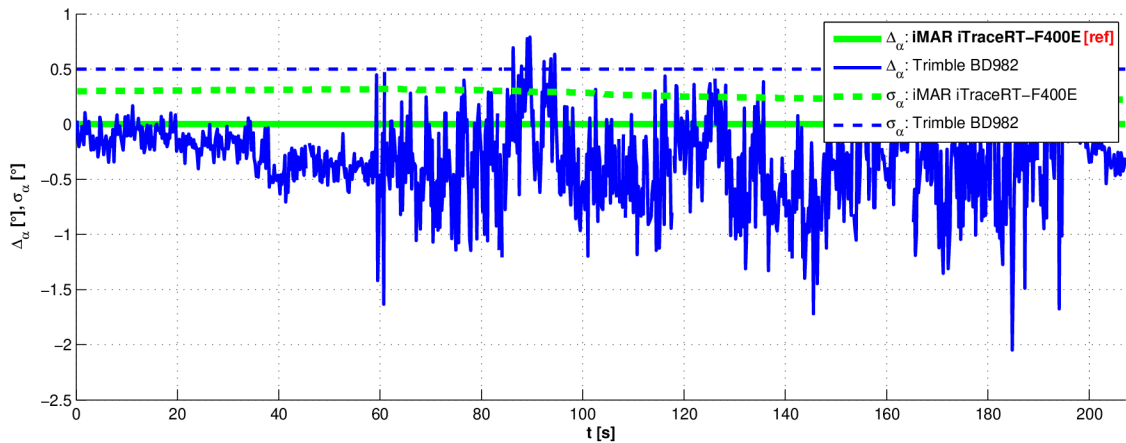
Obr. C.11: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.4 Experiment č. 4

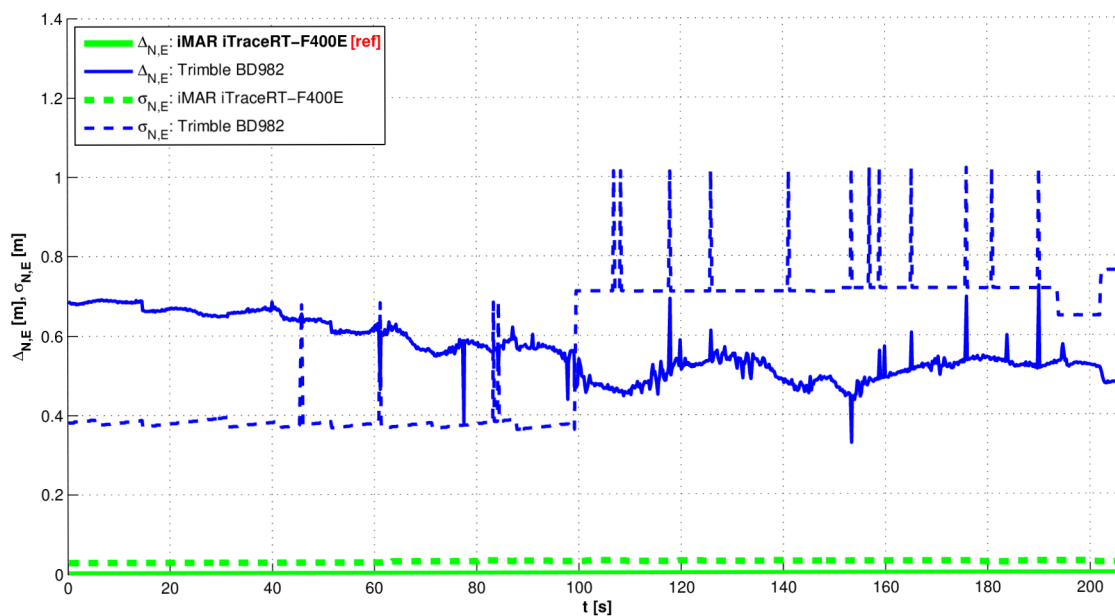
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Trimble BD982
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen BD982 bez GBAS



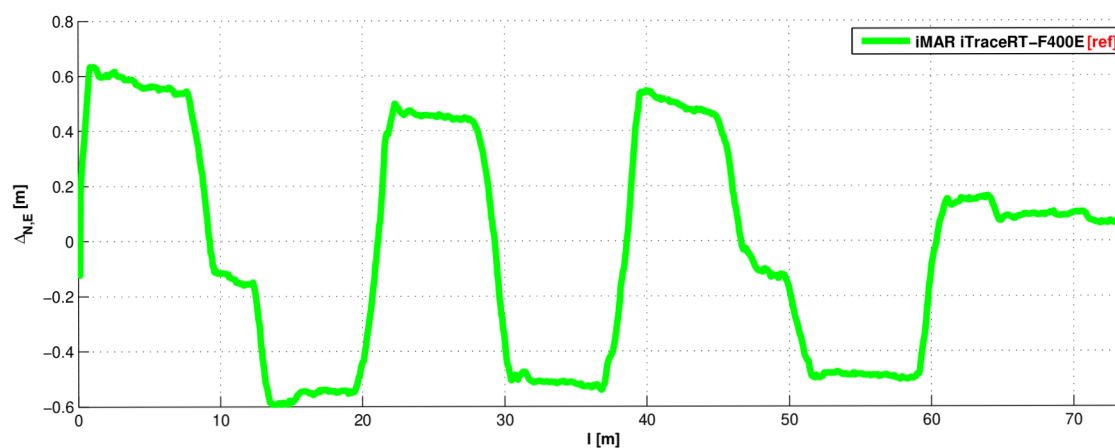
Obr. C.12: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.13: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



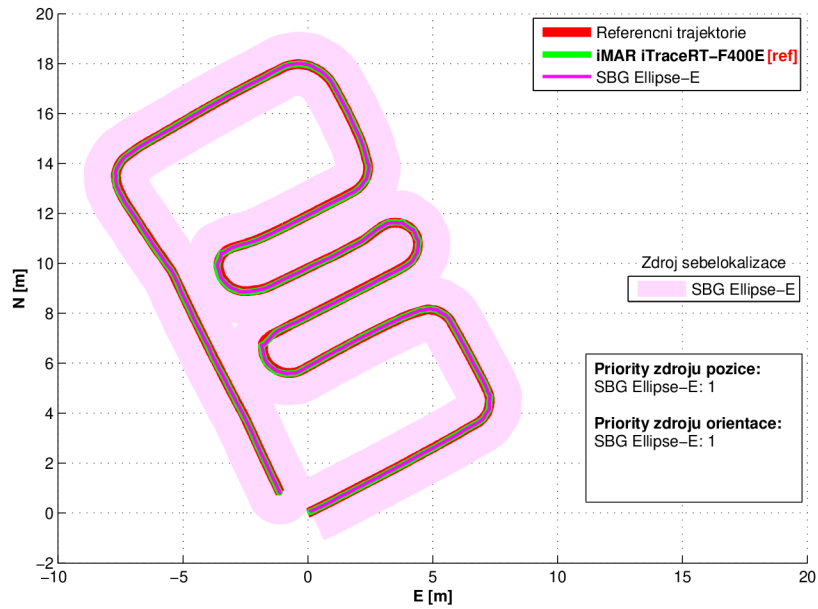
Obr. C.14: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



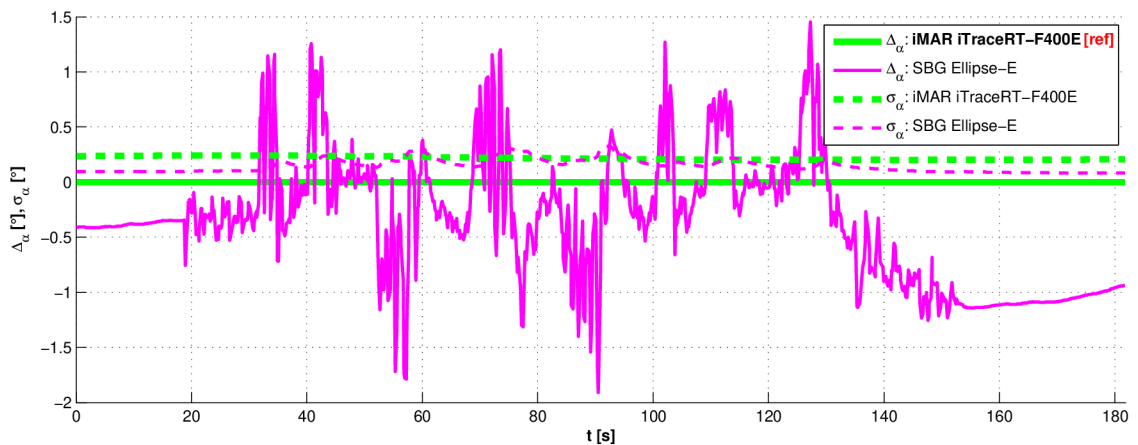
Obr. C.15: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.5 Experiment č. 5

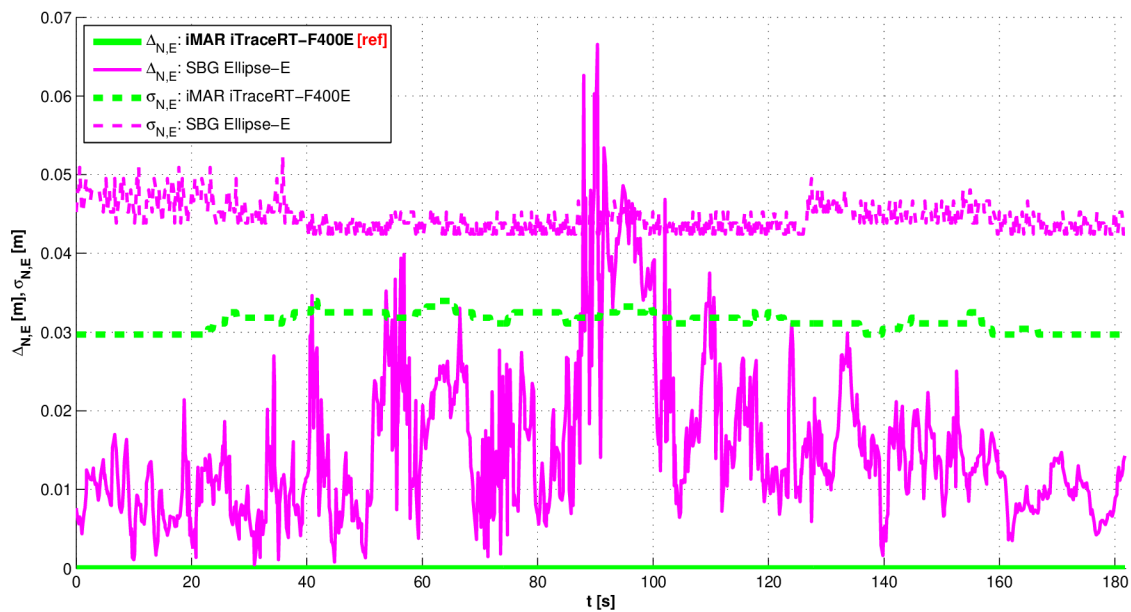
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	SBG Ellipse-E
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



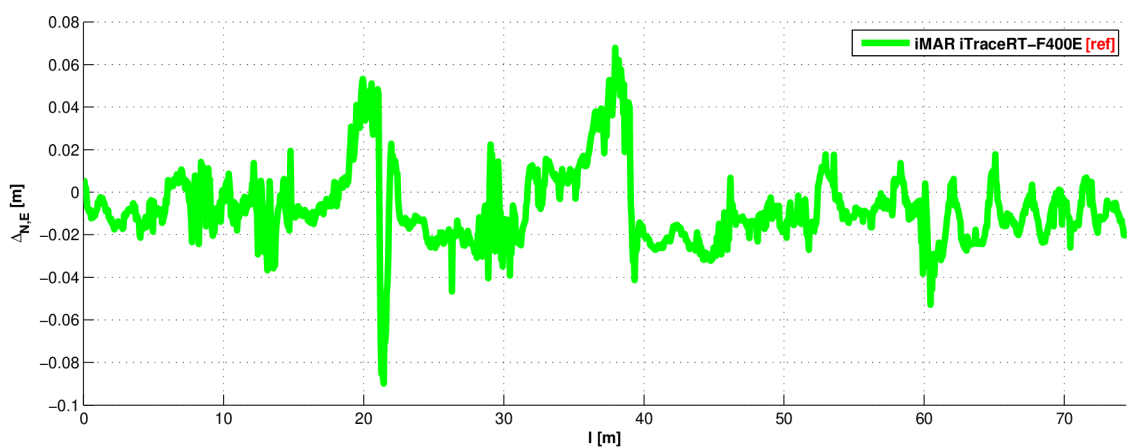
Obr. C.16: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.17: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



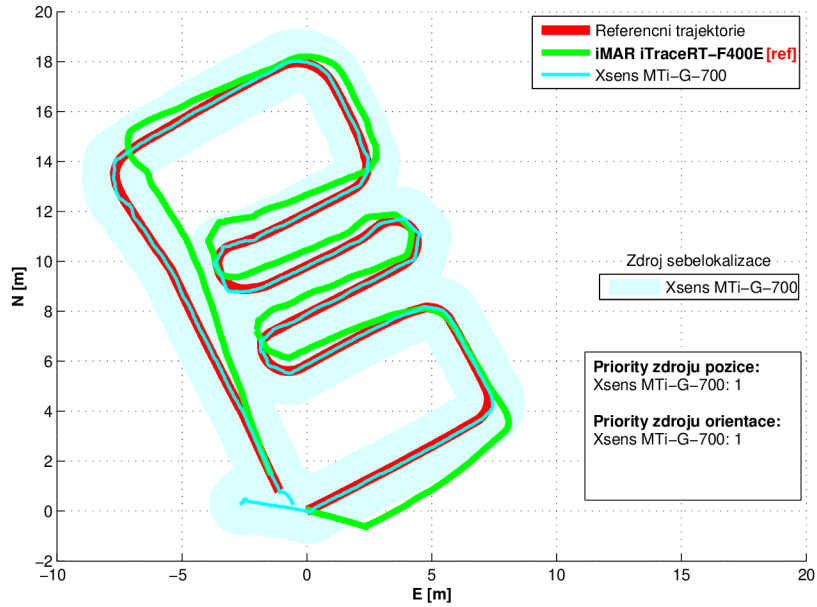
Obr. C.18: Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



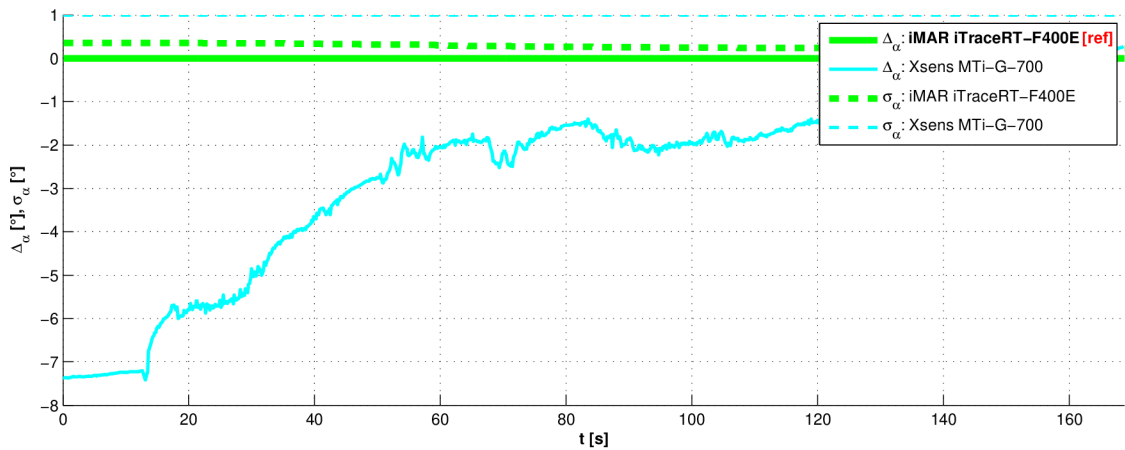
Obr. C.19: Odchytka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.6 Experiment č. 6

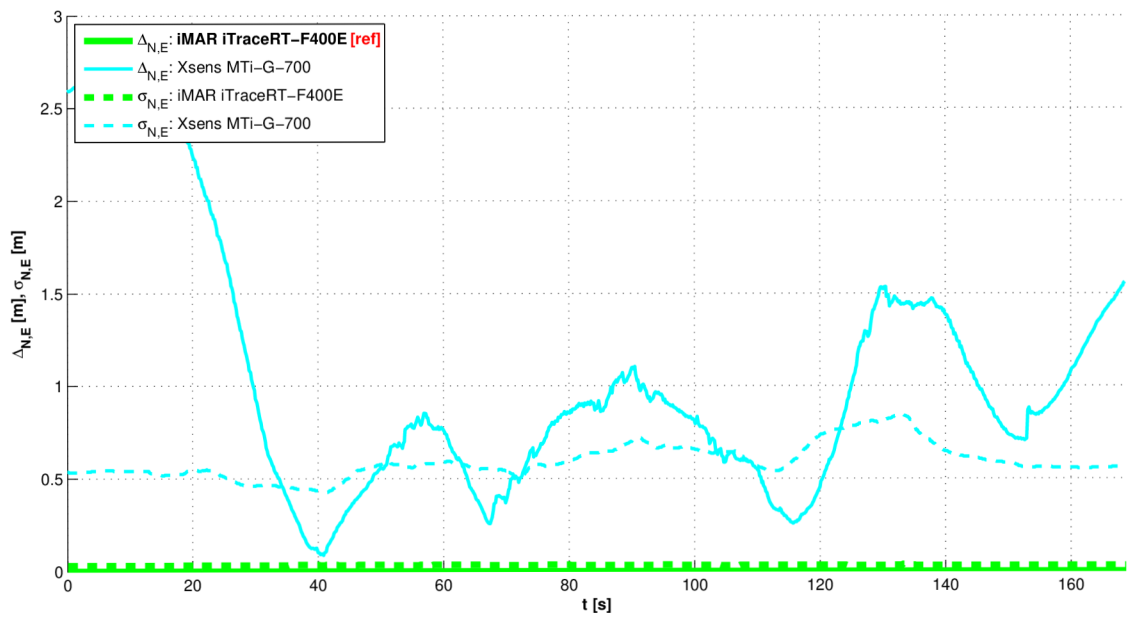
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Xsens MTi-G-700
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



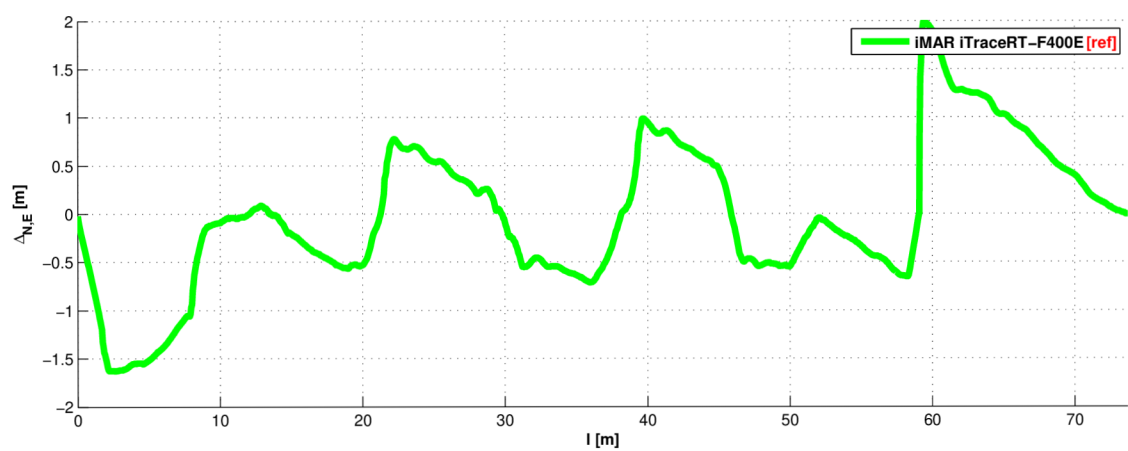
Obr. C.20: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.21: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



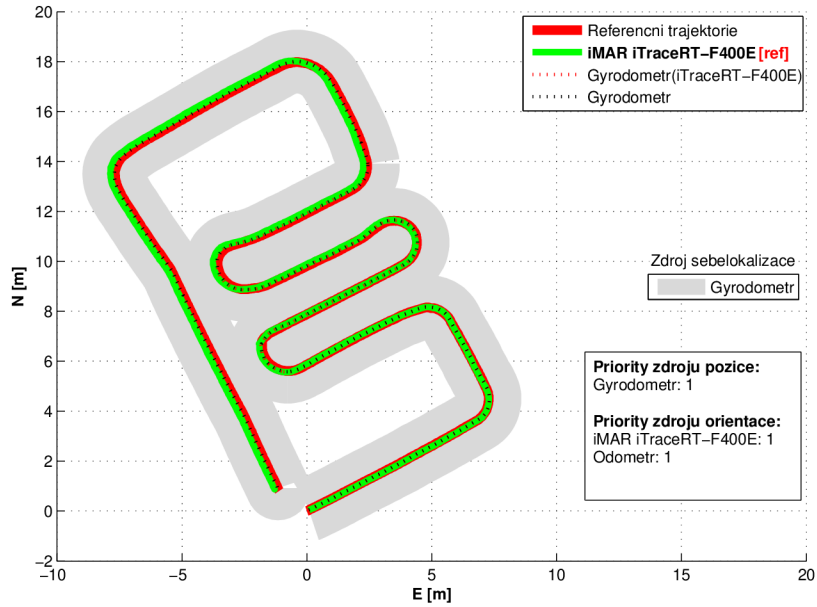
Obr. C.22: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



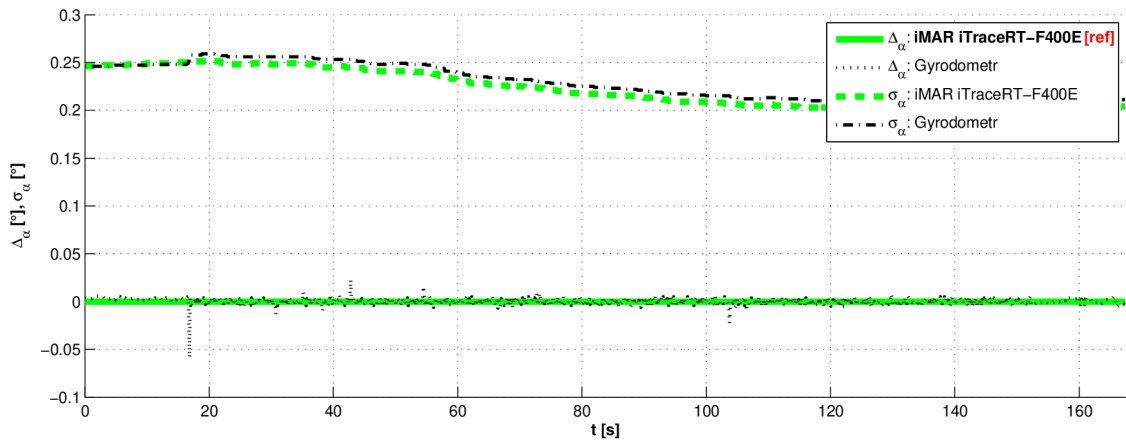
Obr. C.23: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.7 Experiment č. 7

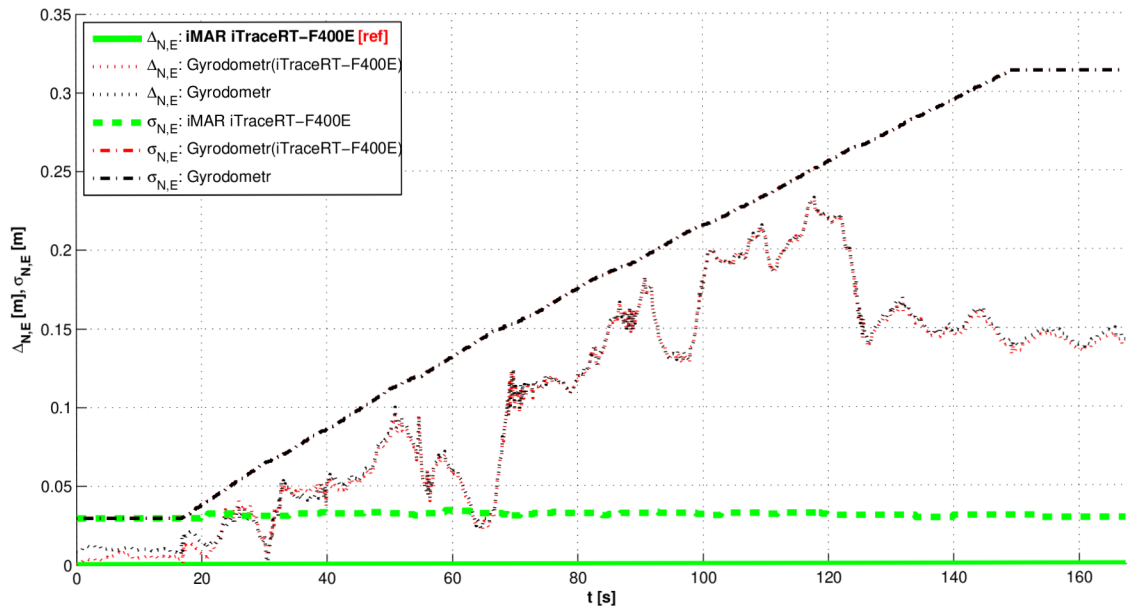
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



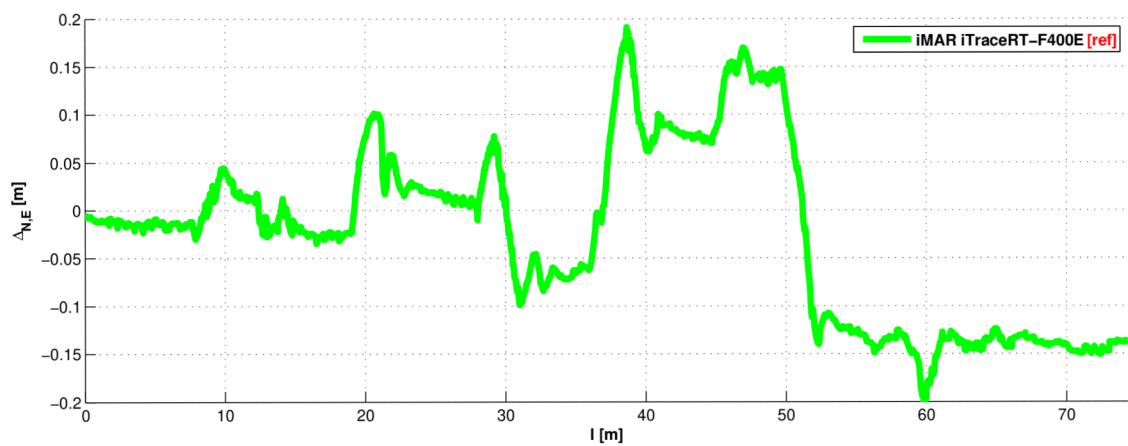
Obr. C.24: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.25: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



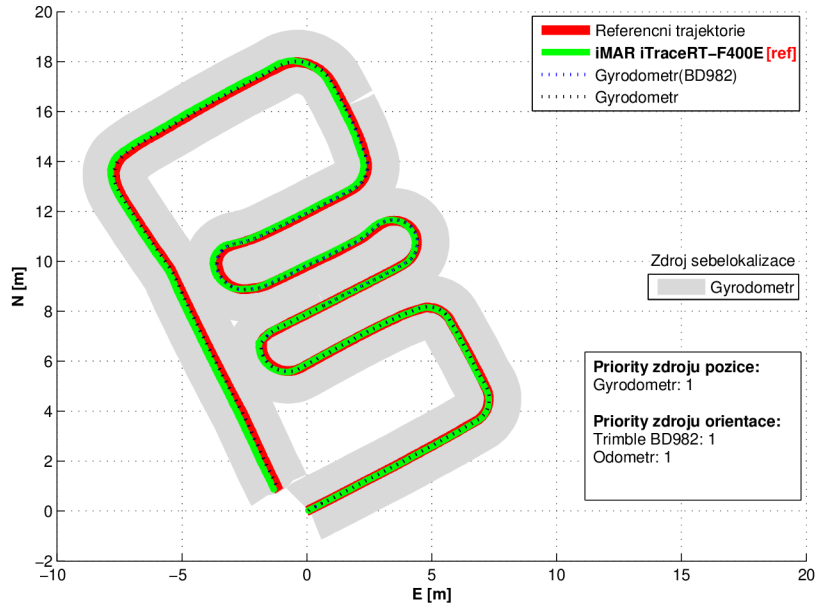
Obr. C.26: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



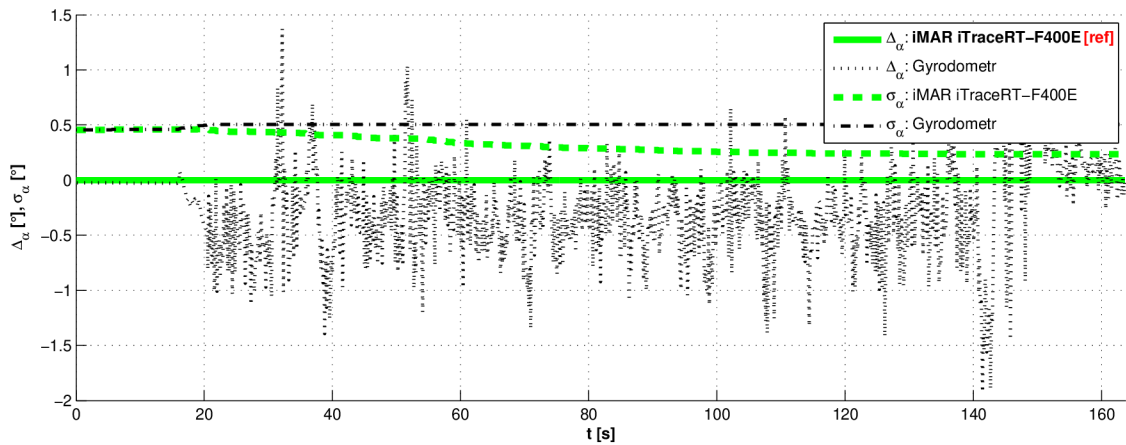
Obr. C.27: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.8 Experiment č. 8

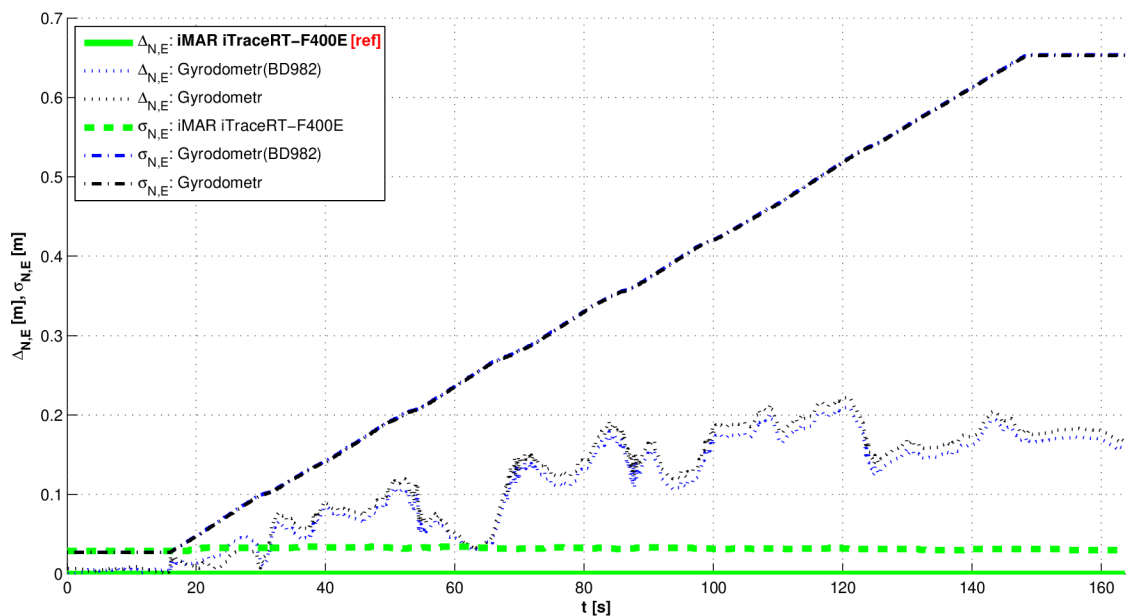
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(BD982 + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



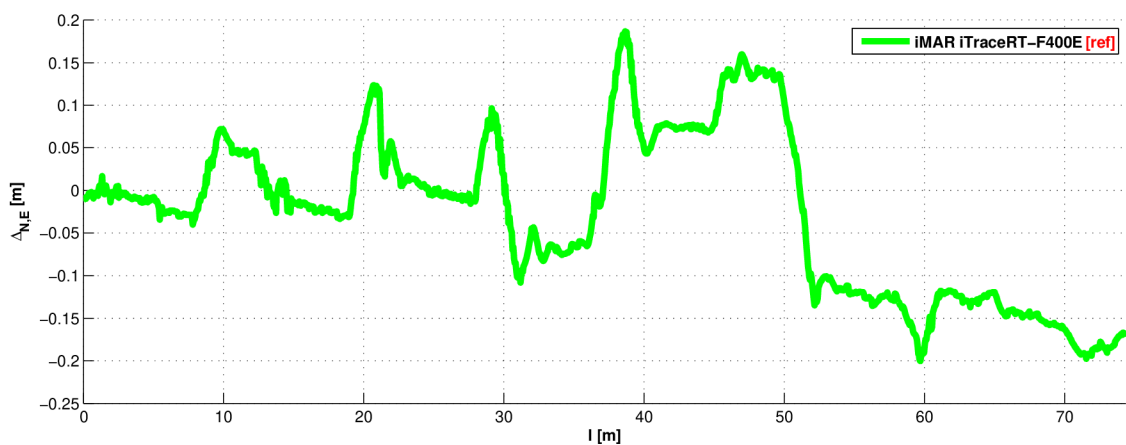
Obr. C.28: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.29: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



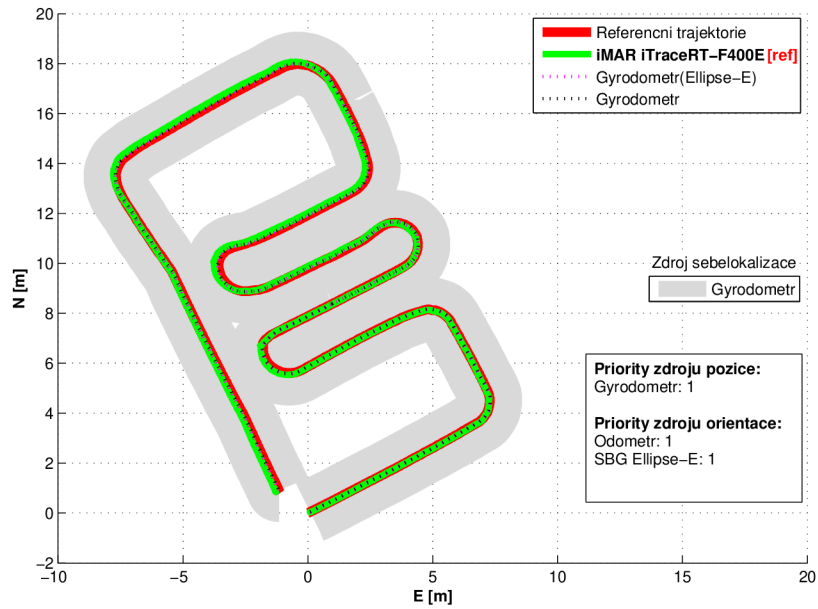
Obr. C.30: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



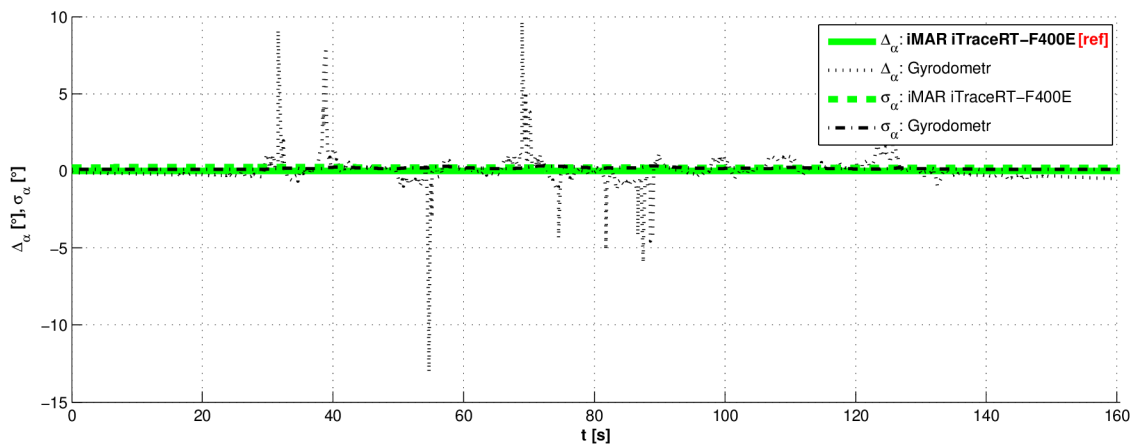
Obr. C.31: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.9 Experiment č. 9

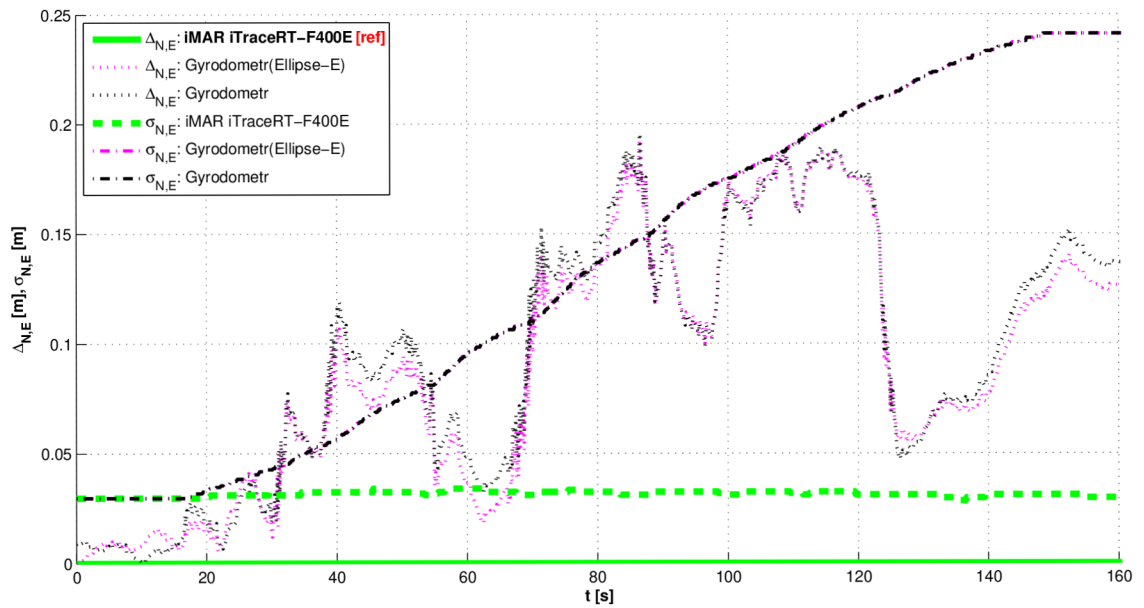
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(Ellipse-E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



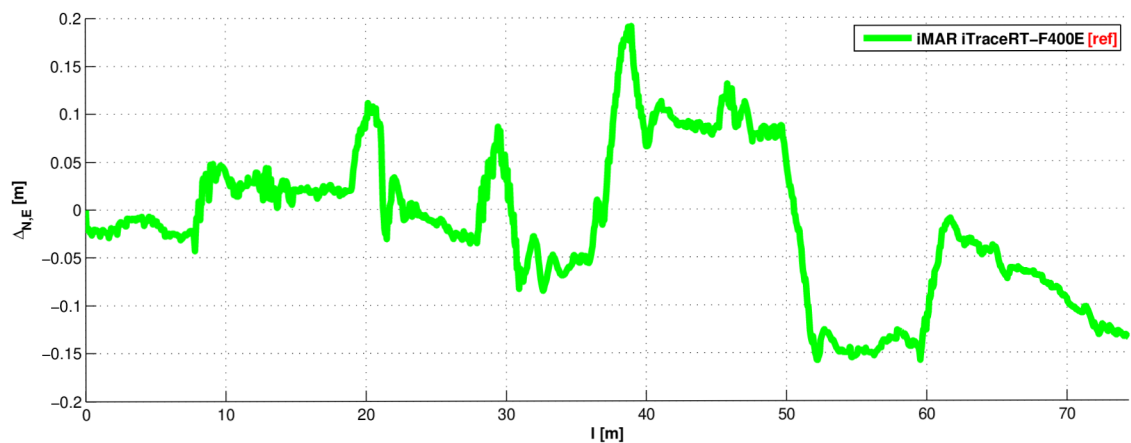
Obr. C.32: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.33: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



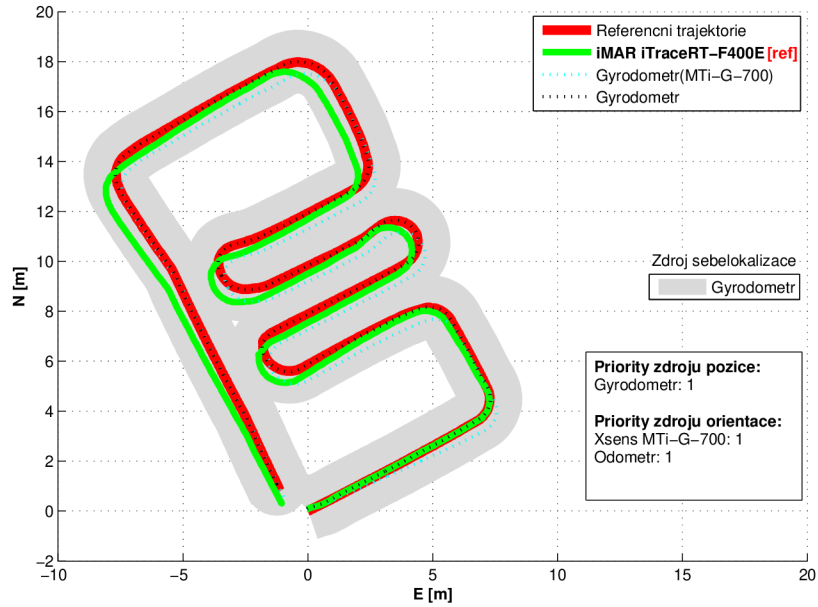
Obr. C.34: Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



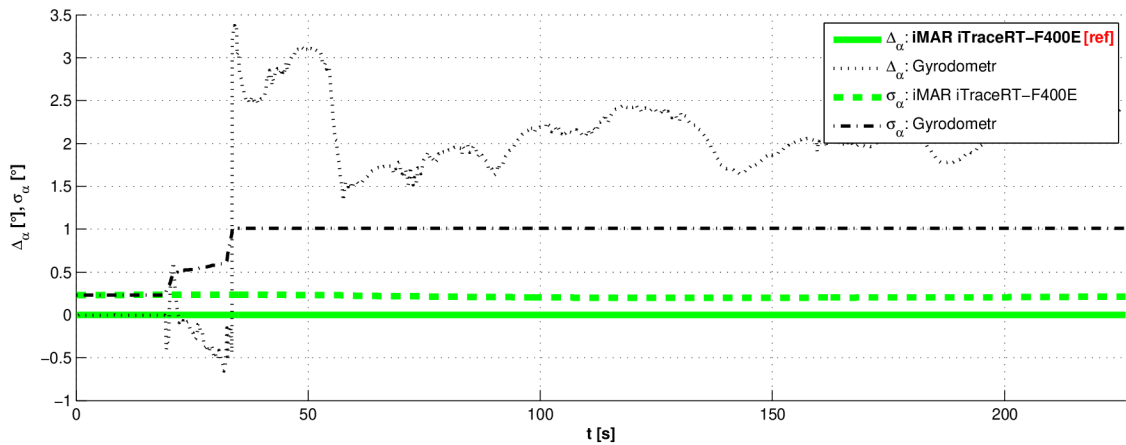
Obr. C.35: Odchytka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.10 Experiment č. 10

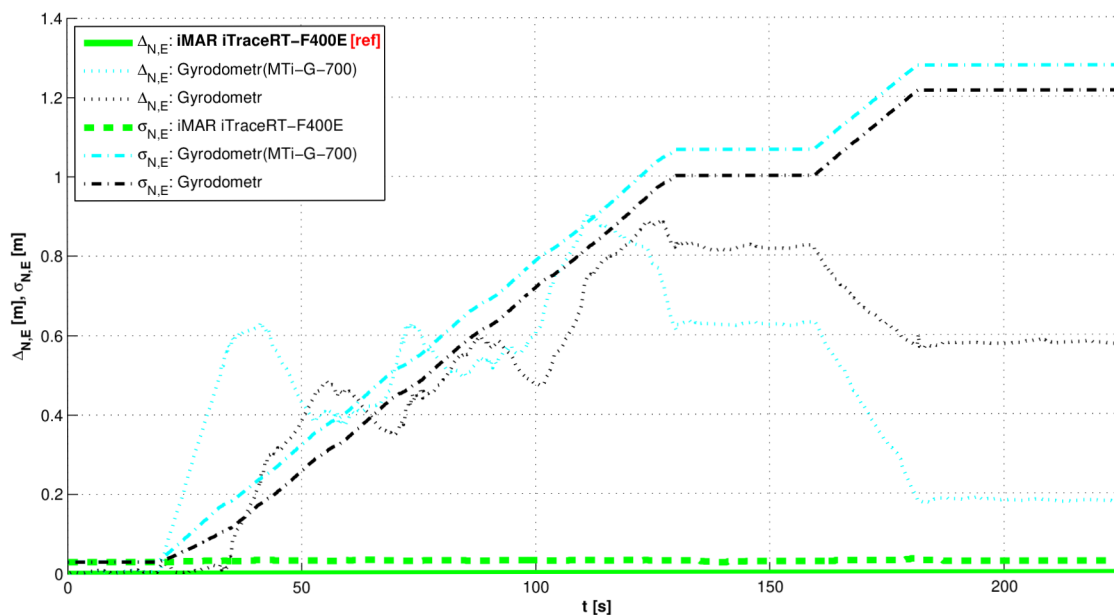
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



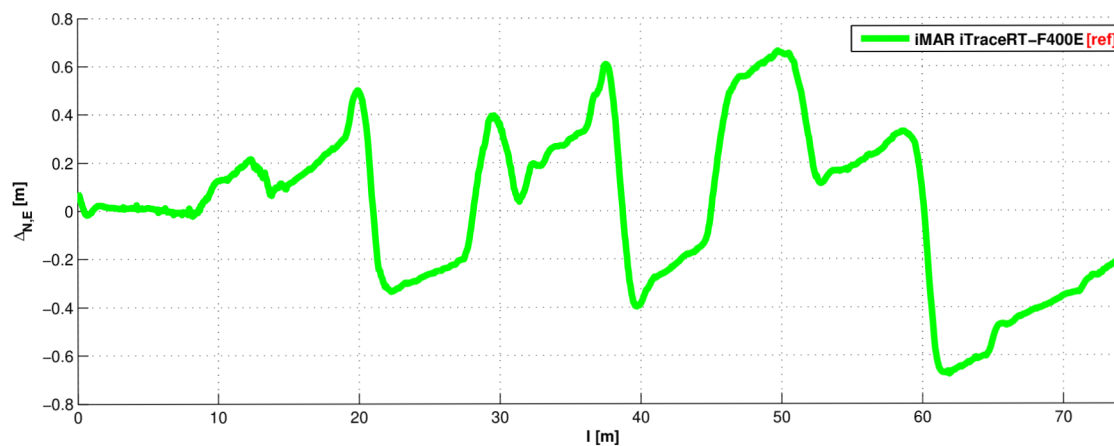
Obr. C.36: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.37: Naměřené odchylky Δ_{α} a predikované směrodatné odchylky σ_{α} jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



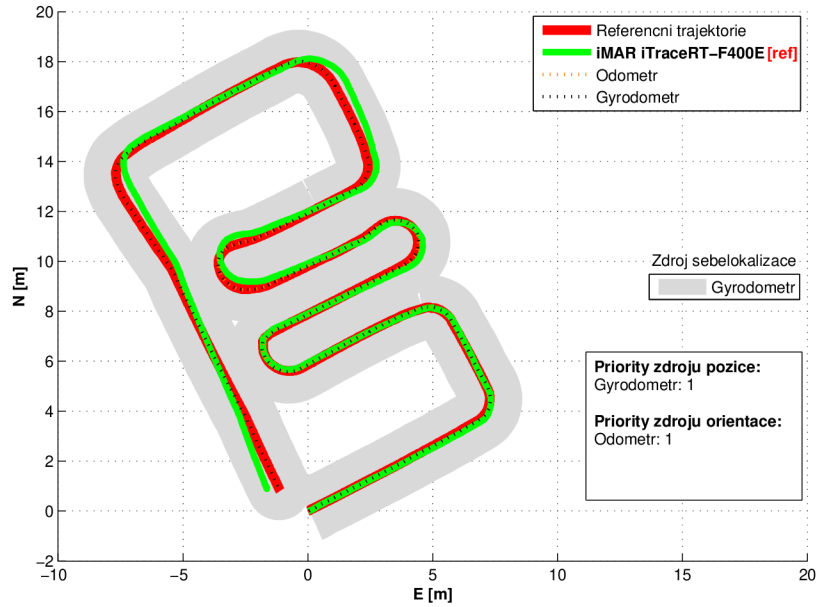
Obr. C.38: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



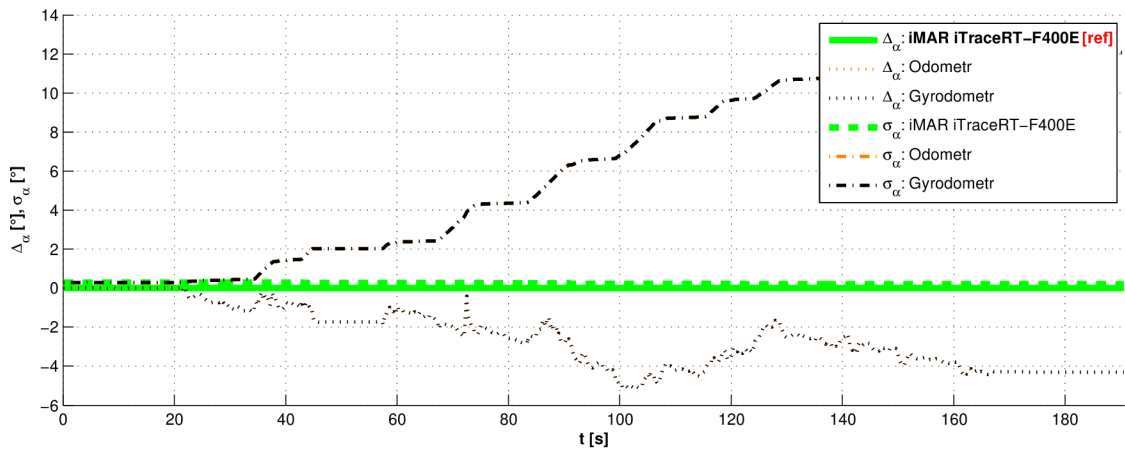
Obr. C.39: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.11 Experiment č. 11

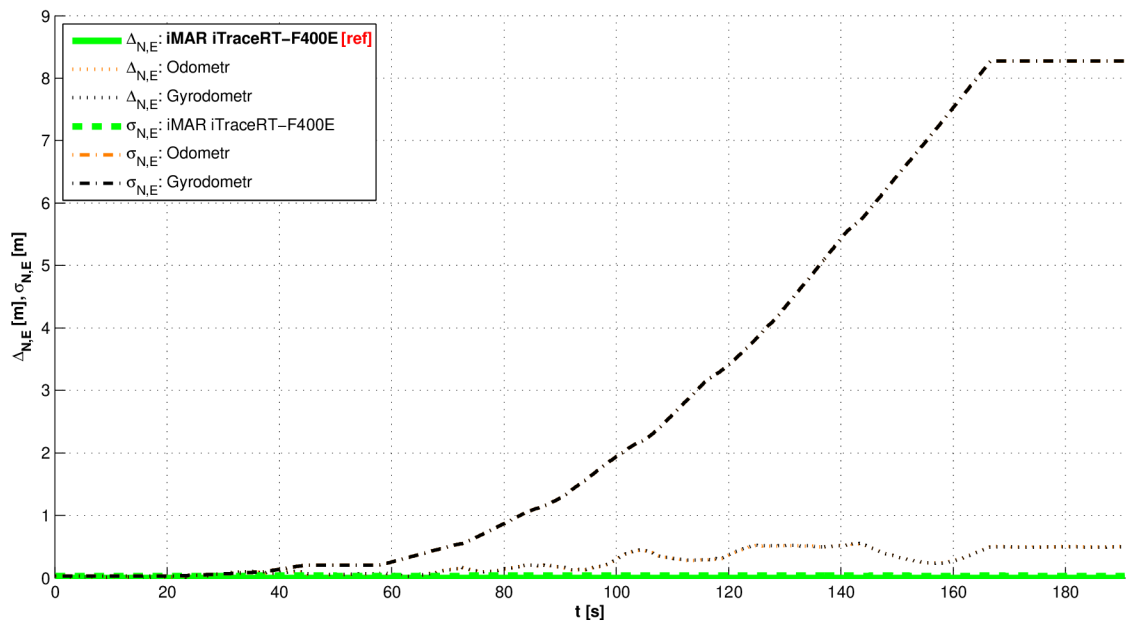
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Odometr
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen



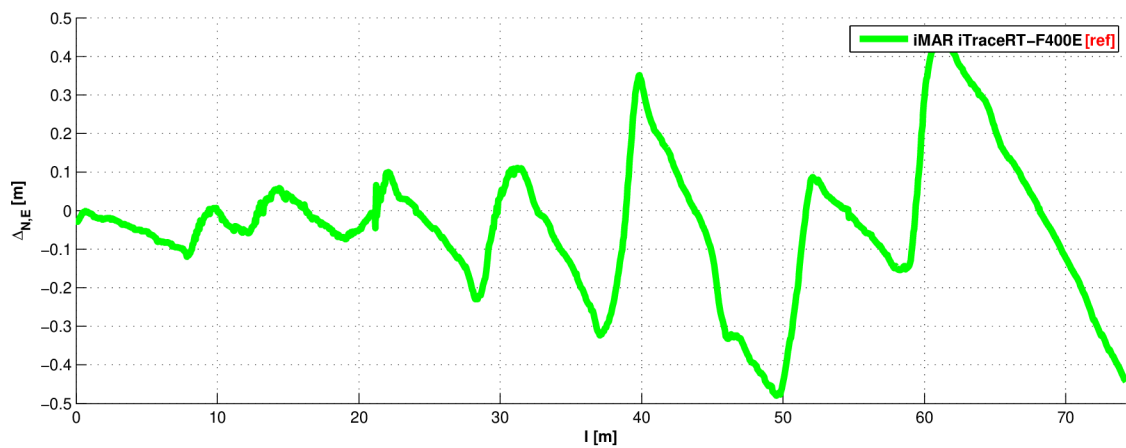
Obr. C.40: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.41: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



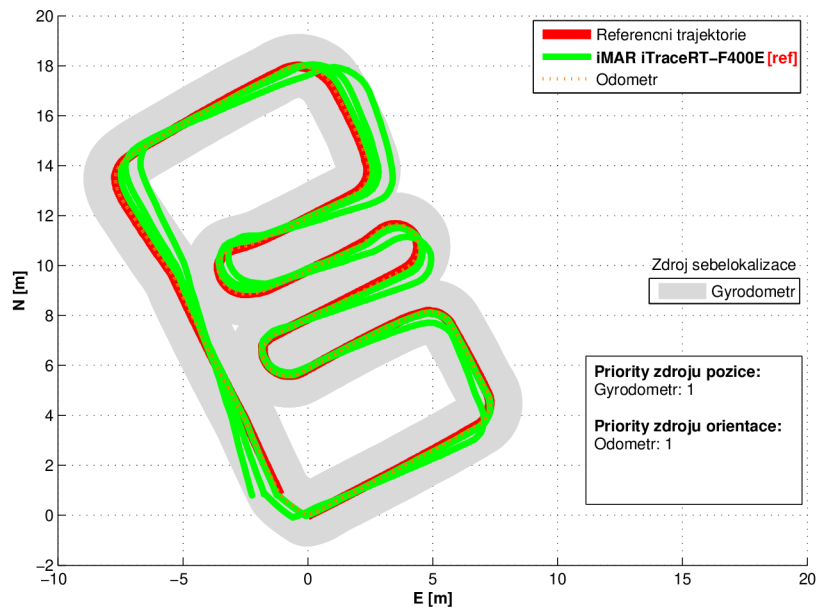
Obr. C.42: Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



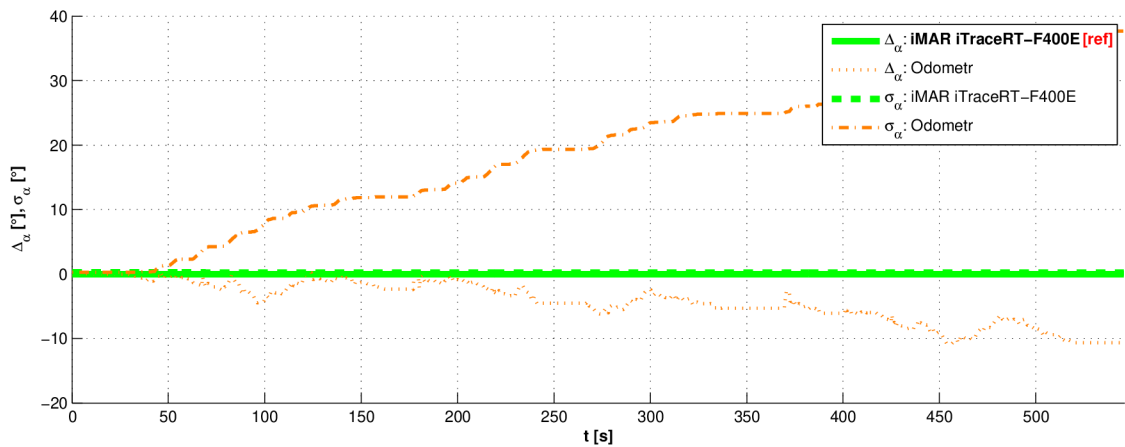
Obr. C.43: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.12 Experiment č. 12

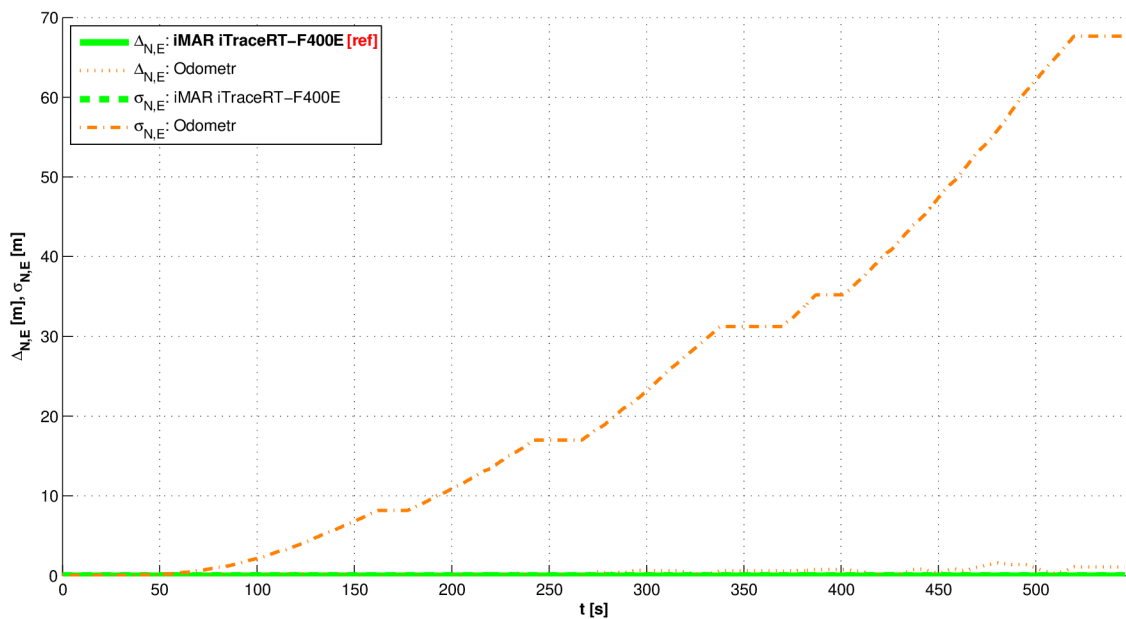
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Odometr
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen 3x průjezd žádané trajektorie



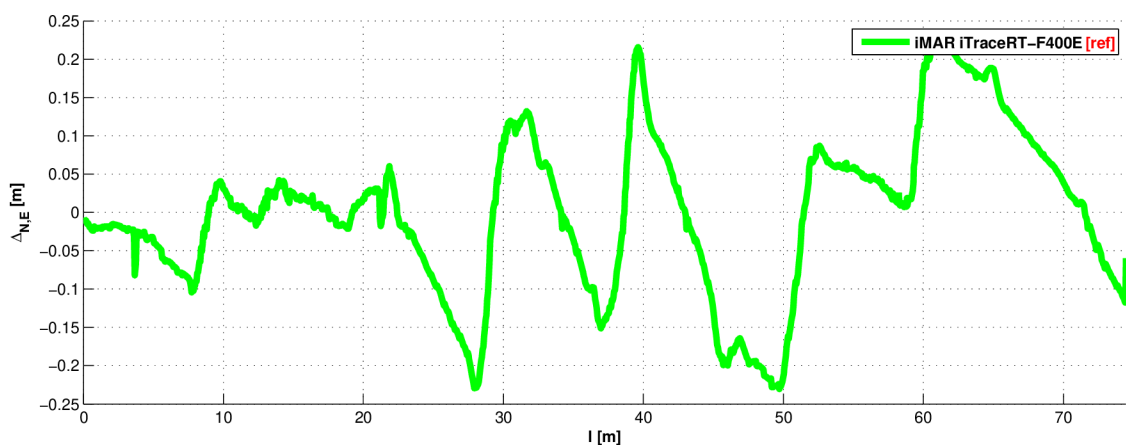
Obr. C.44: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.45: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



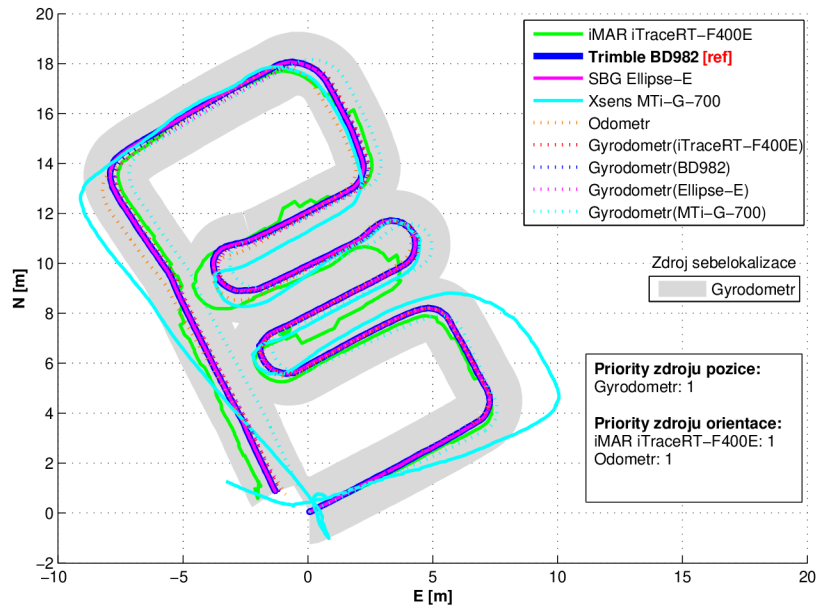
Obr. C.46: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



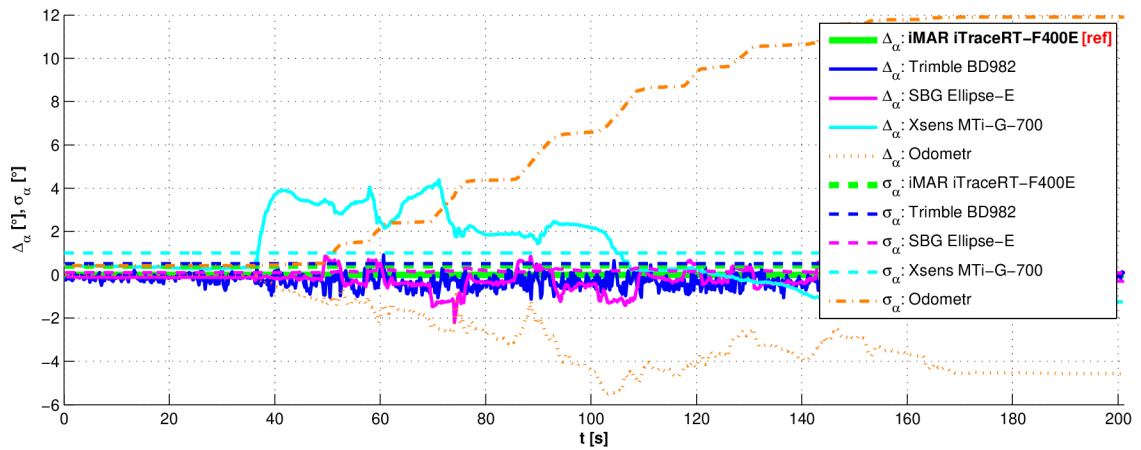
Obr. C.47: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.13 Experiment č. 13

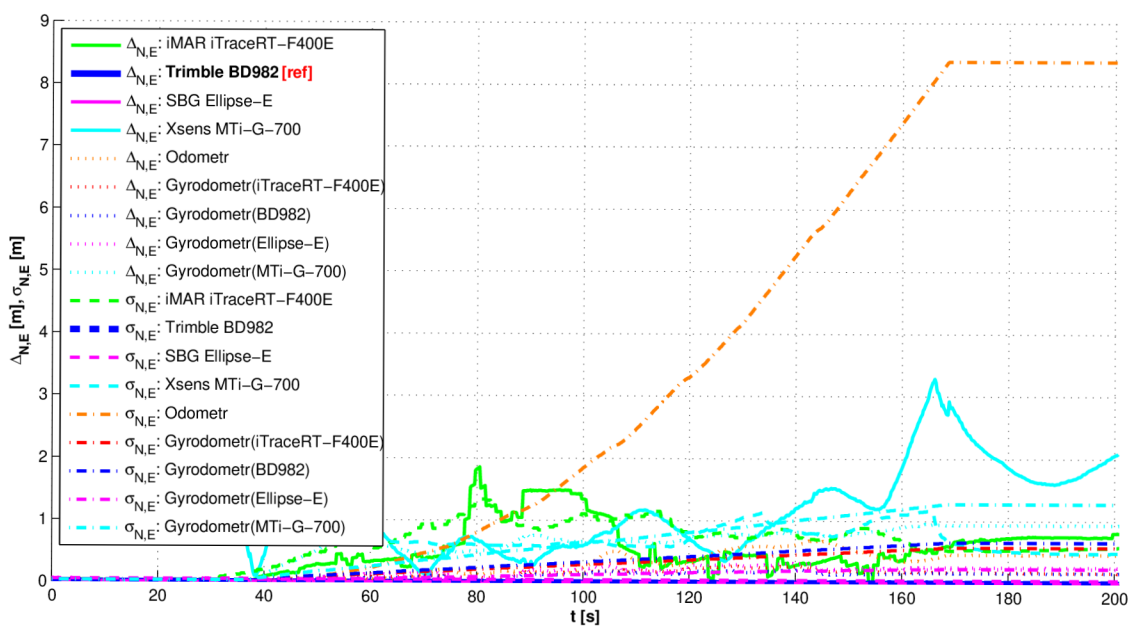
Typ experimentu	Vyhodnocení sebelokalizace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS sig. omezen u iTraceRT-F400E



Obr. C.48: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



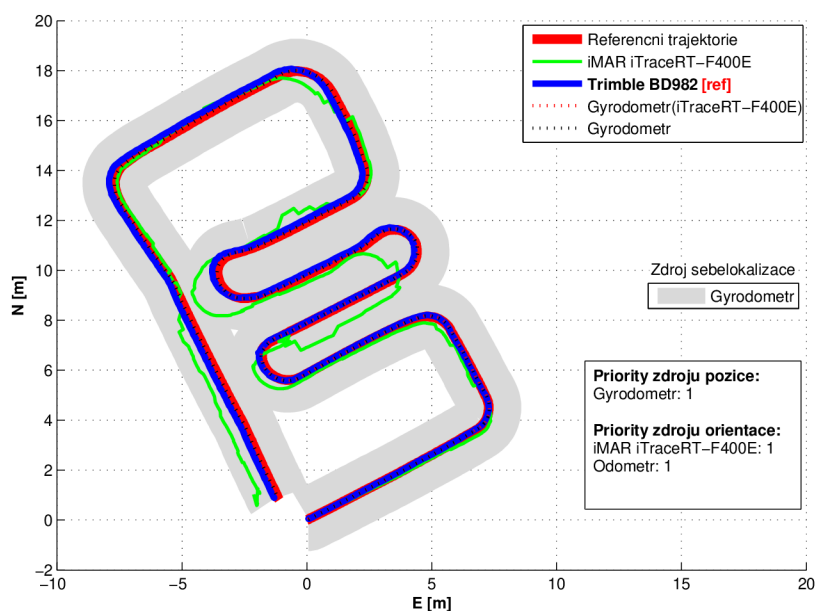
Obr. C.49: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



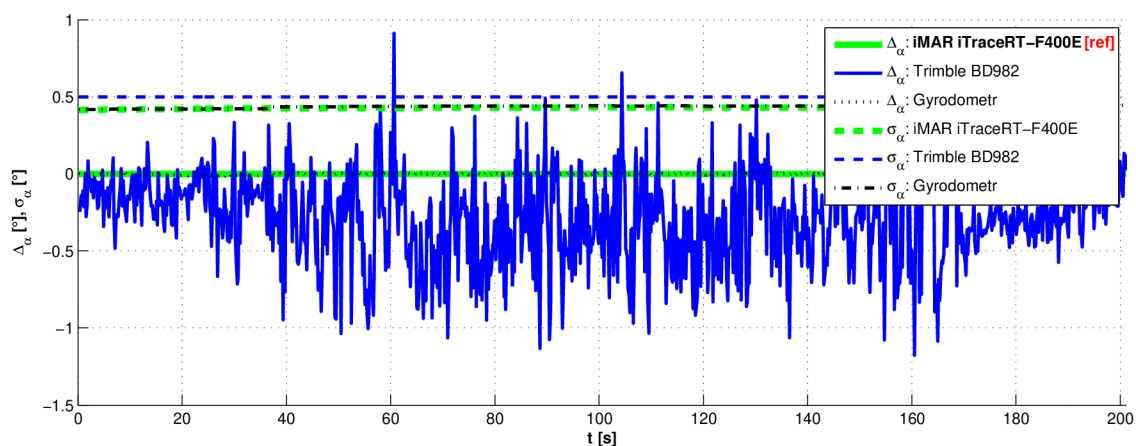
Obr. C.50: Naměřené odchyly $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchyly $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ

C.14 Experiment č. 14

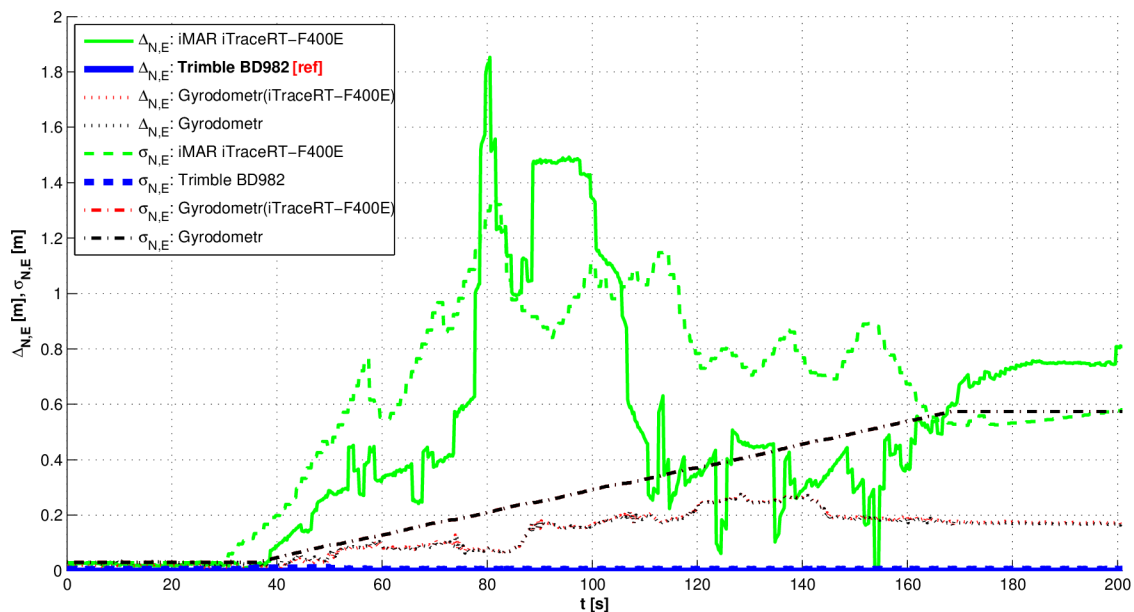
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS sig. omezen u iTraceRT-F400E



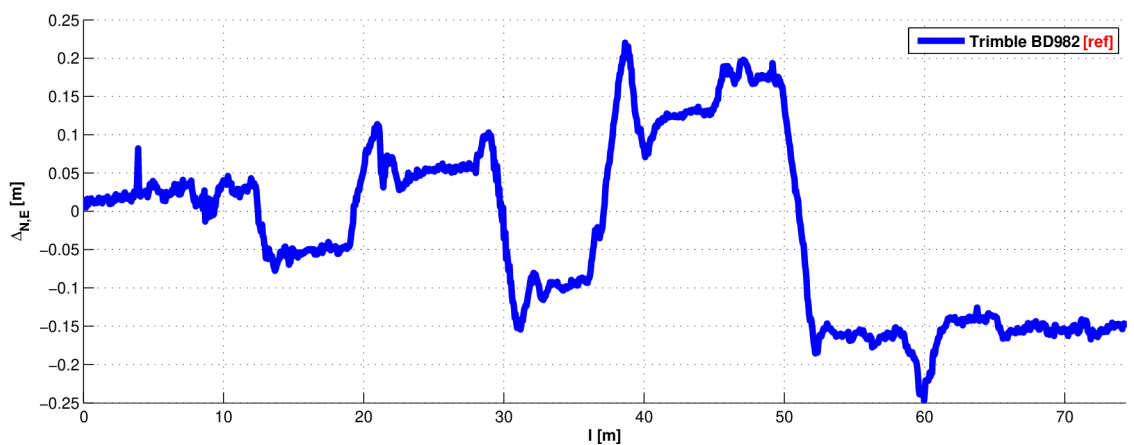
Obr. C.51: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.52: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



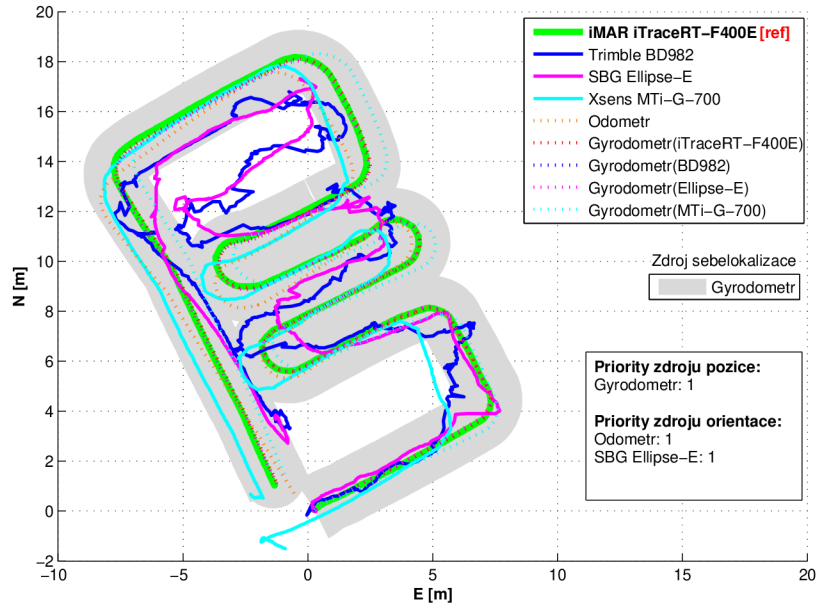
Obr. C.53: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



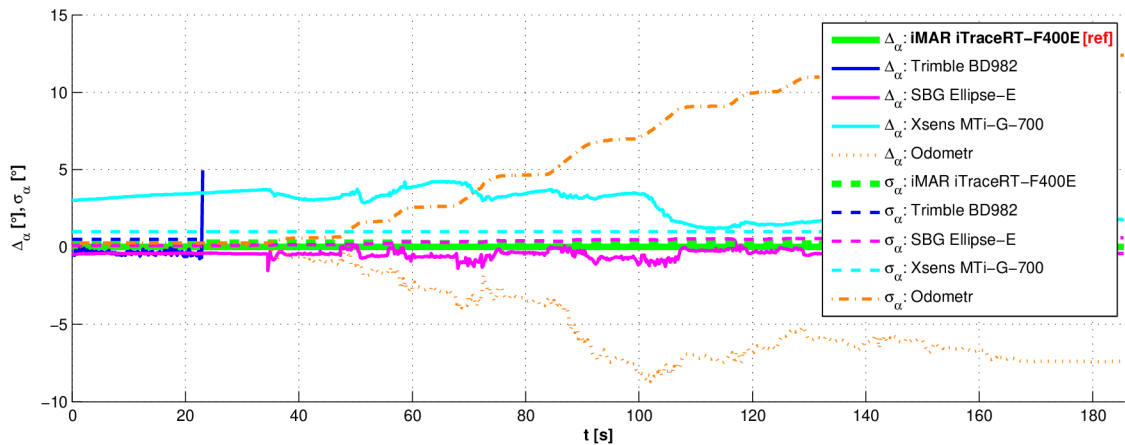
Obr. C.54: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.15 Experiment č. 15

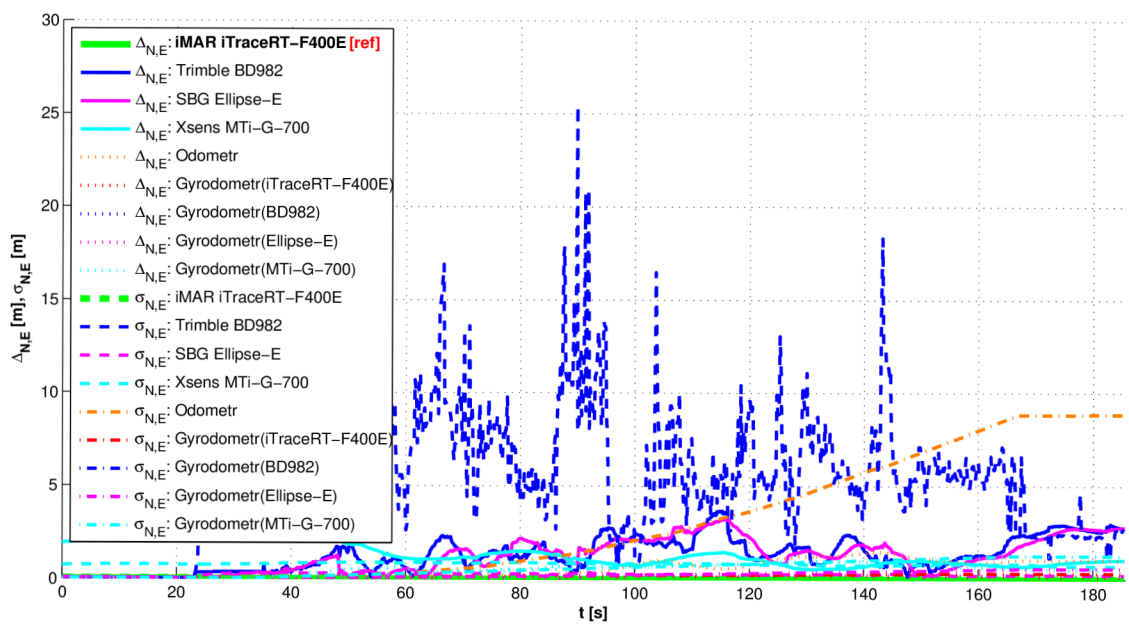
Typ experimentu	Vyhodnocení sebelokalizace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(Ellipse-E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u BD982



Obr. C.55: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



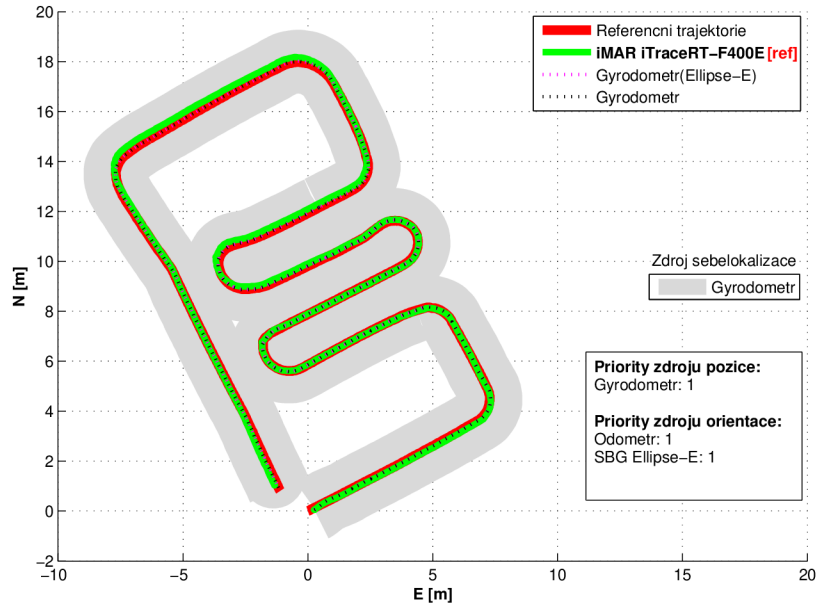
Obr. C.56: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



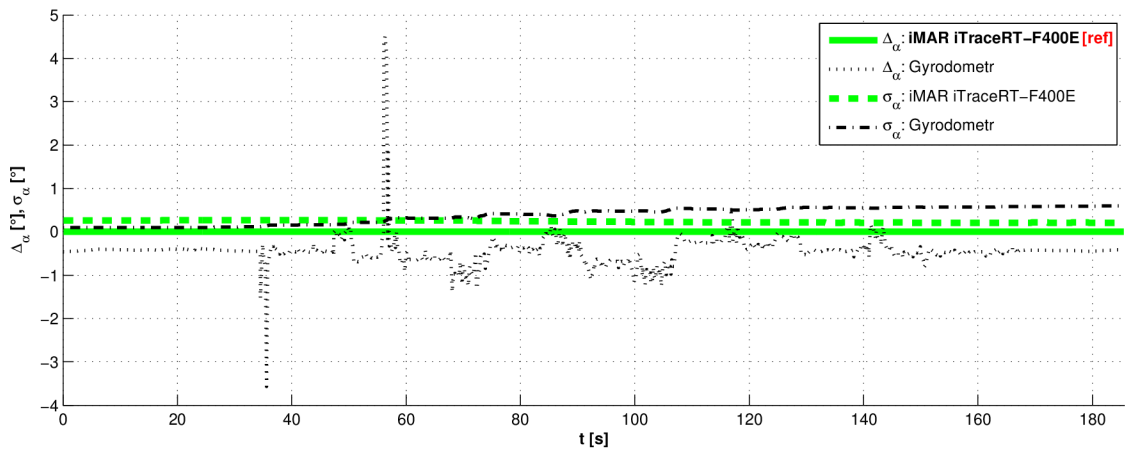
Obr. C.57: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ

C.16 Experiment č. 16

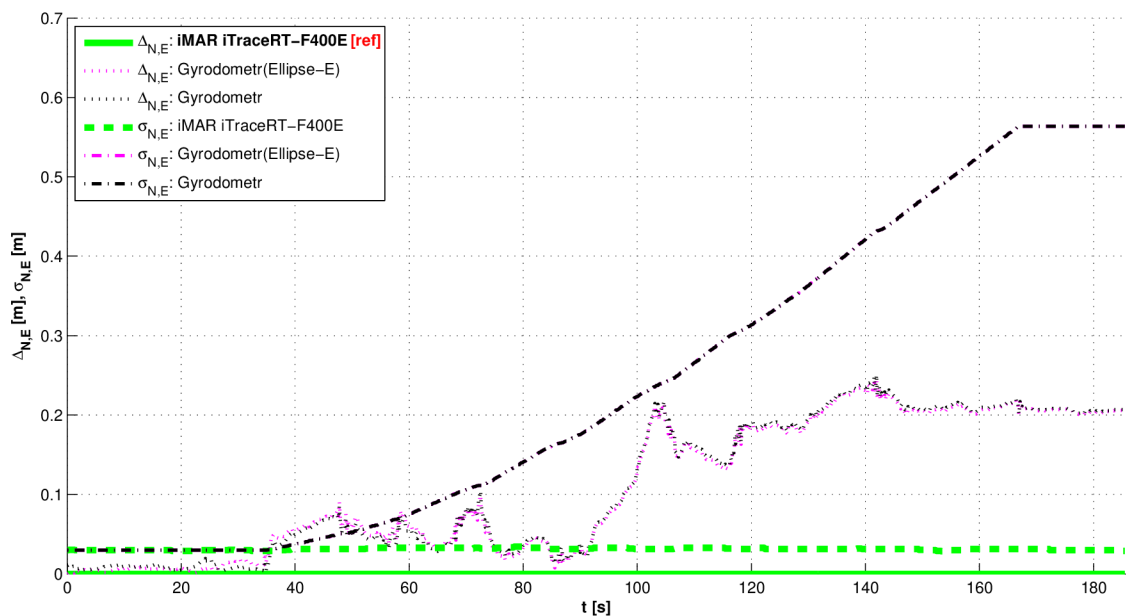
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(Ellipse-E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u BD982



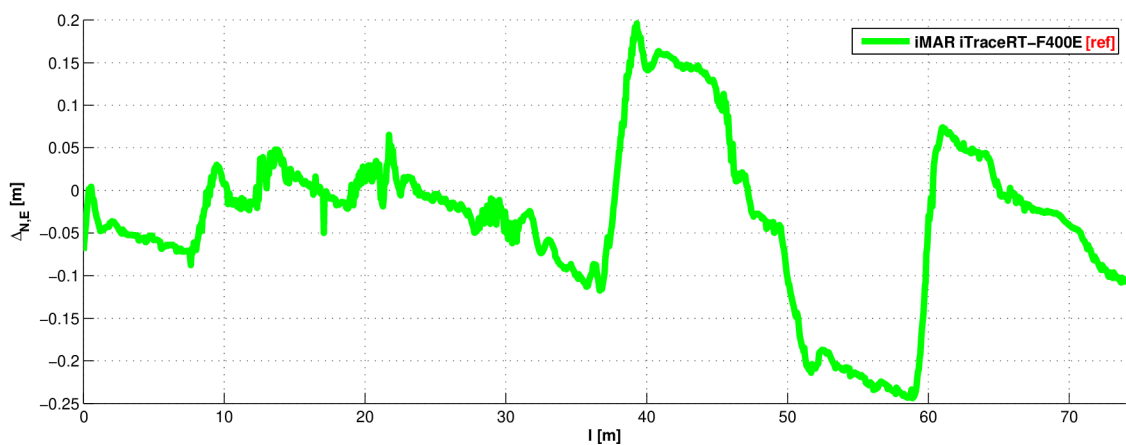
Obr. C.58: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.59: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



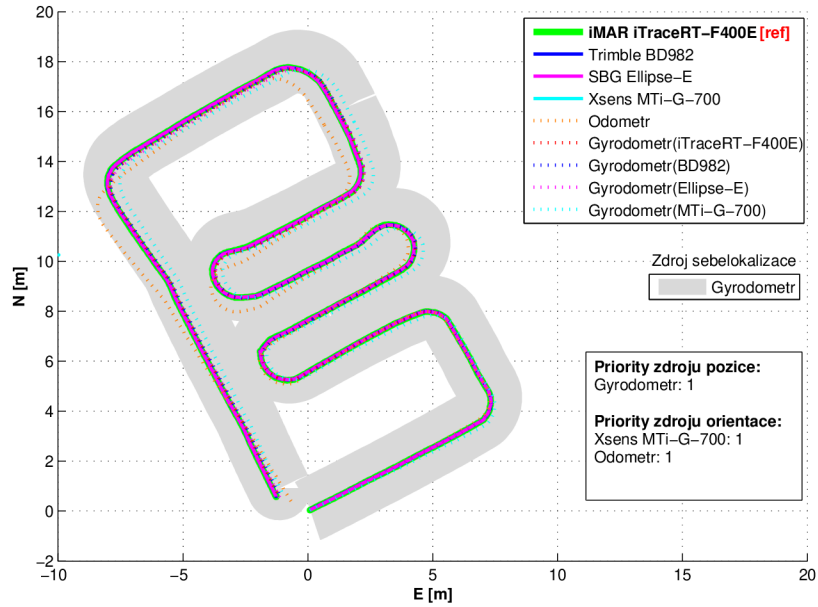
Obr. C.60: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



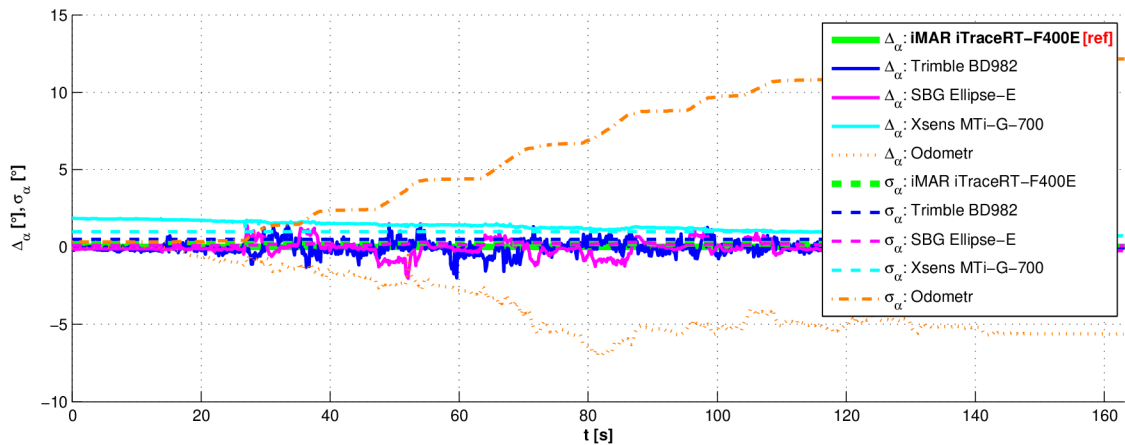
Obr. C.61: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.17 Experiment č. 17

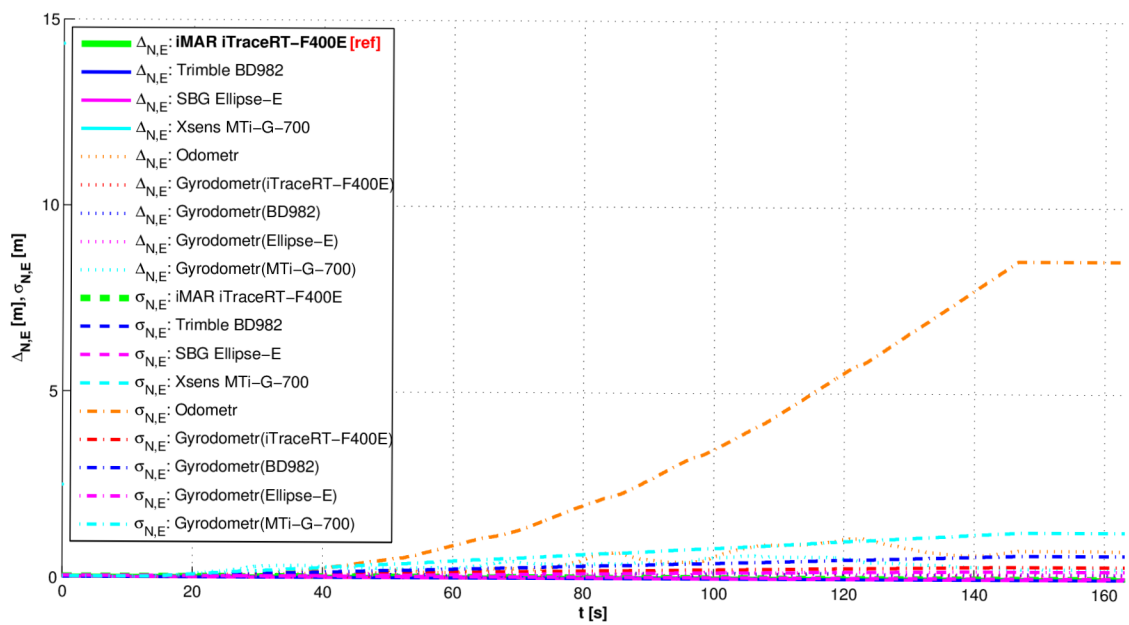
Typ experimentu	Vyhodnocení sebelokalizace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u MTi-G-700



Obr. C.62: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



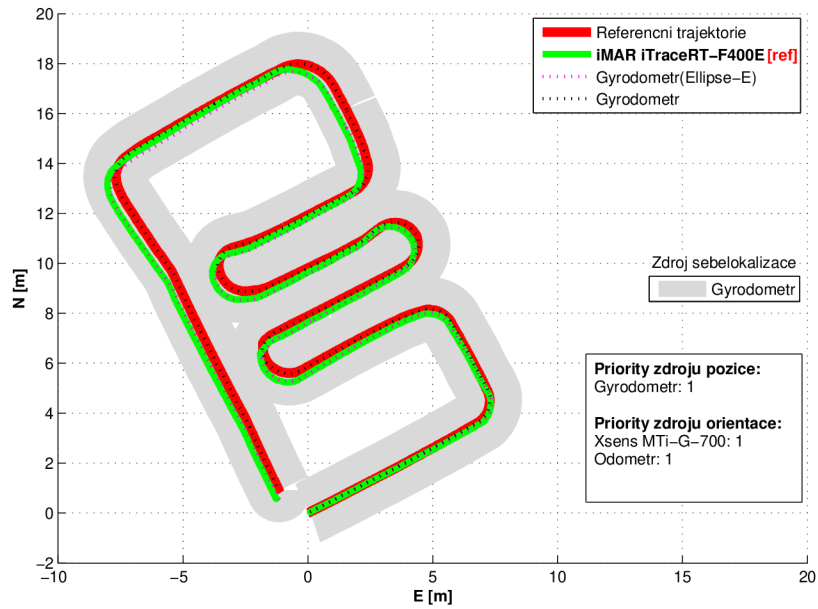
Obr. C.63: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



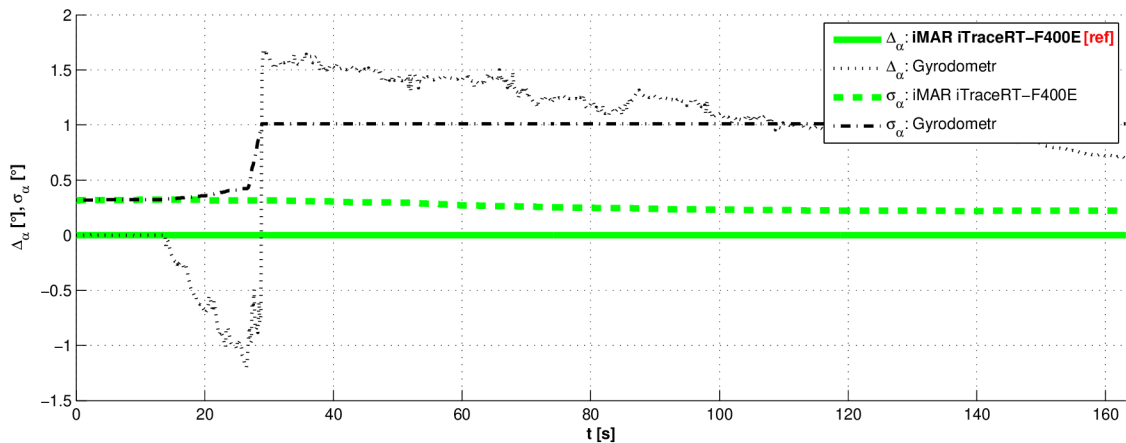
Obr. C.64: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ

C.18 Experiment č. 18

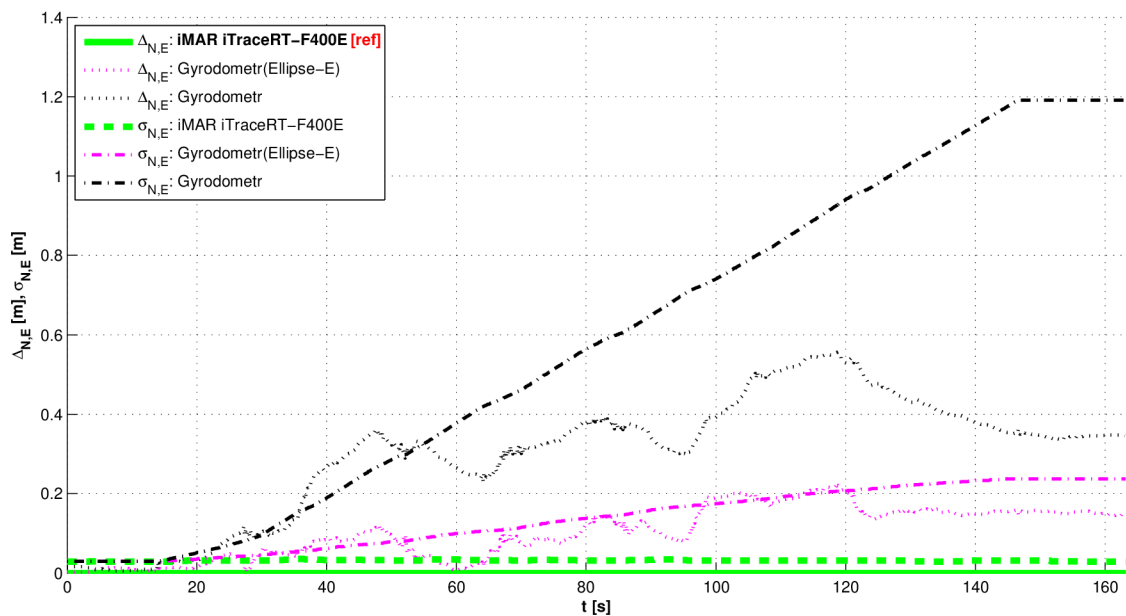
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u MTi-G-700



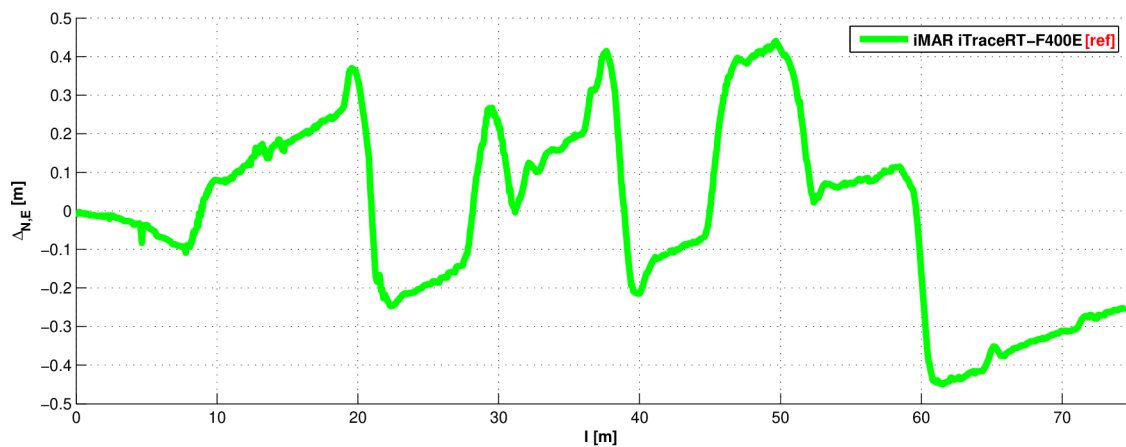
Obr. C.65: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.66: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



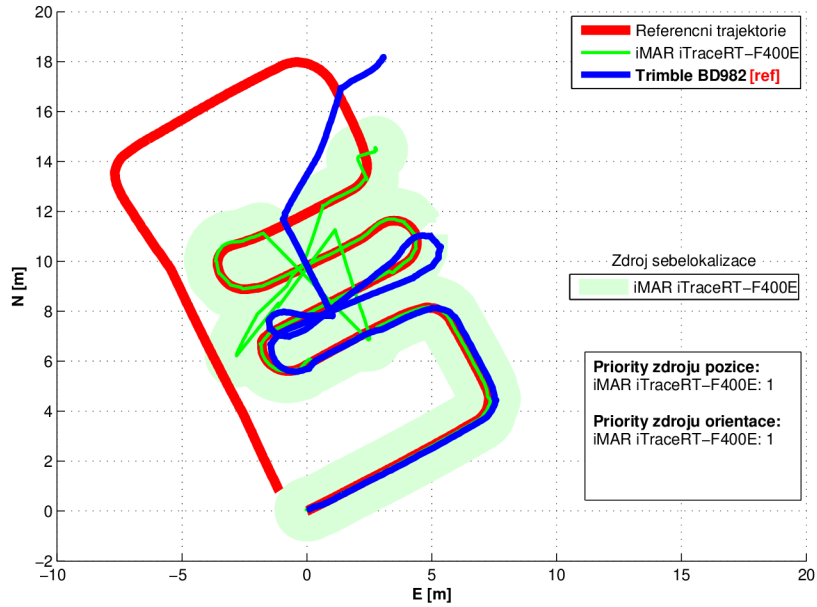
Obr. C.67: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



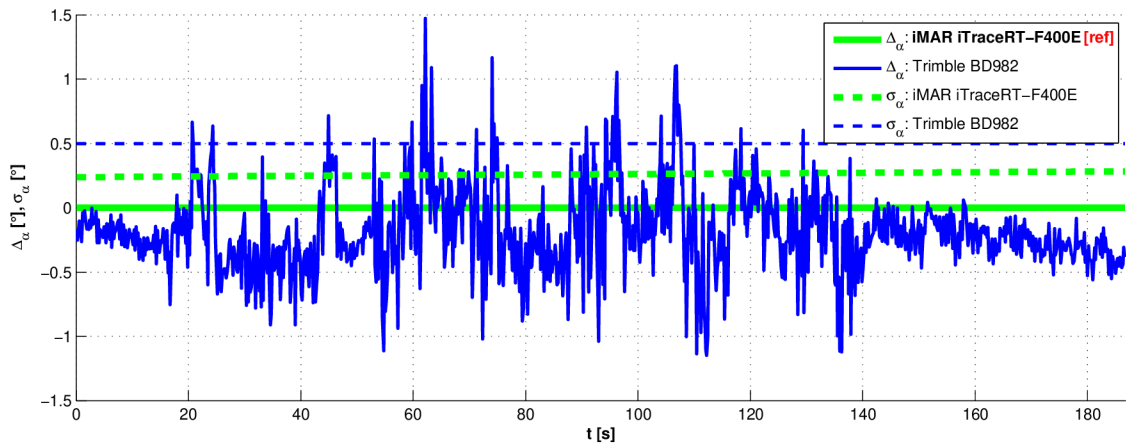
Obr. C.68: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.19 Experiment č. 19

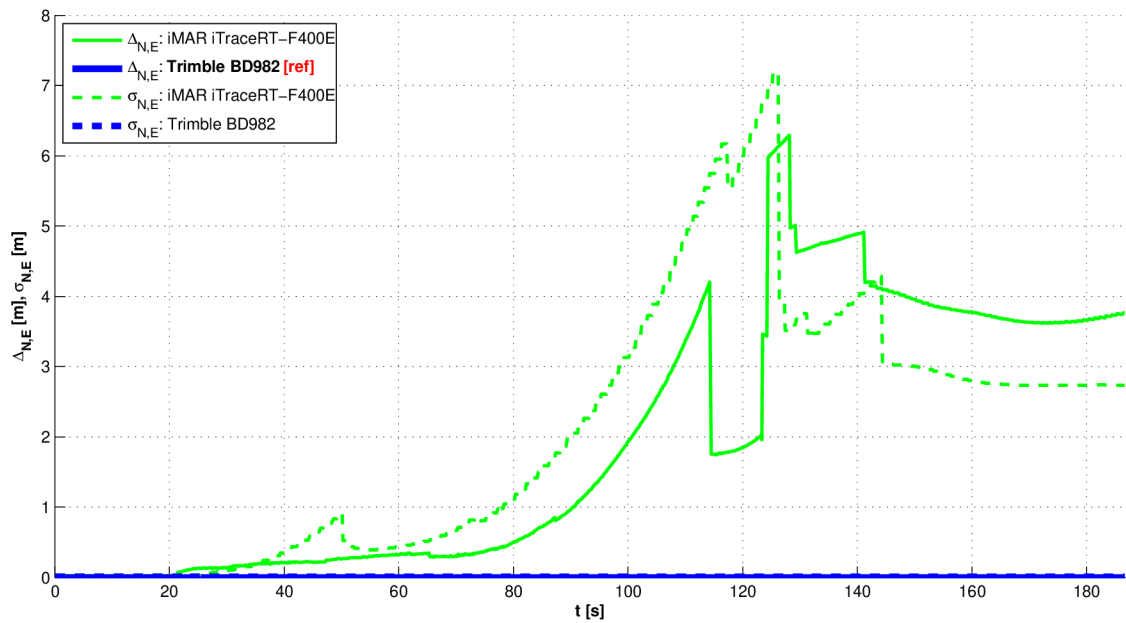
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	iMAR iTraceRT-F400E
Podmínky experimentu	Příjem GNSS sig. omezen u iTraceRT-F400E



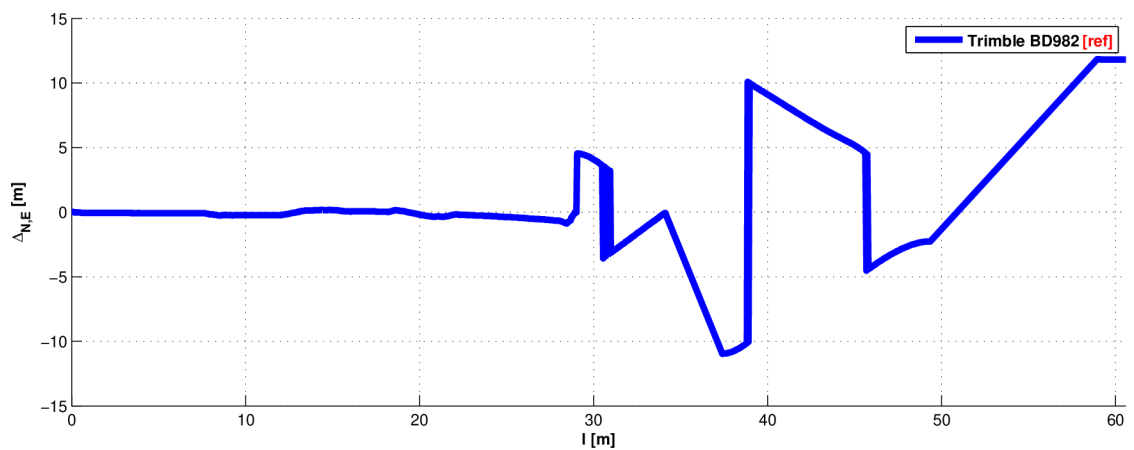
Obr. C.69: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.70: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



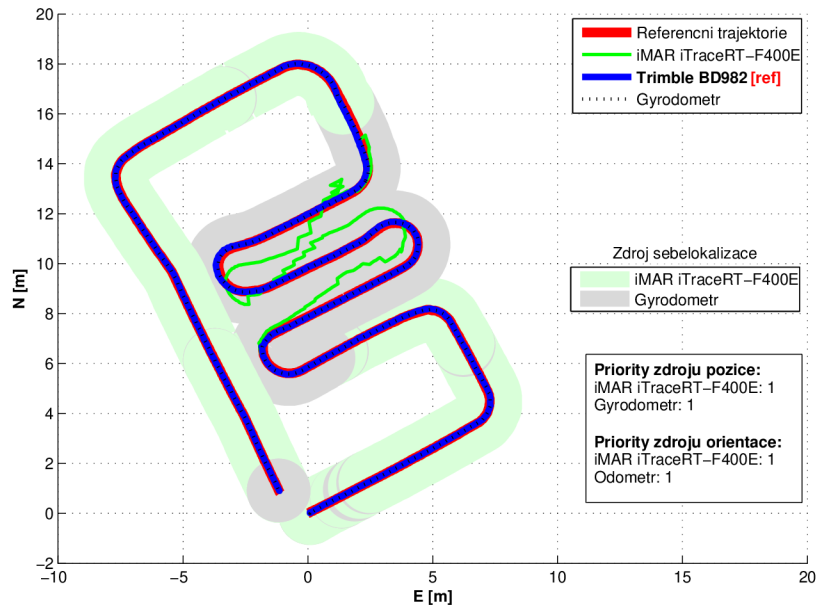
Obr. C.71: Naměřené odchytky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchytky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



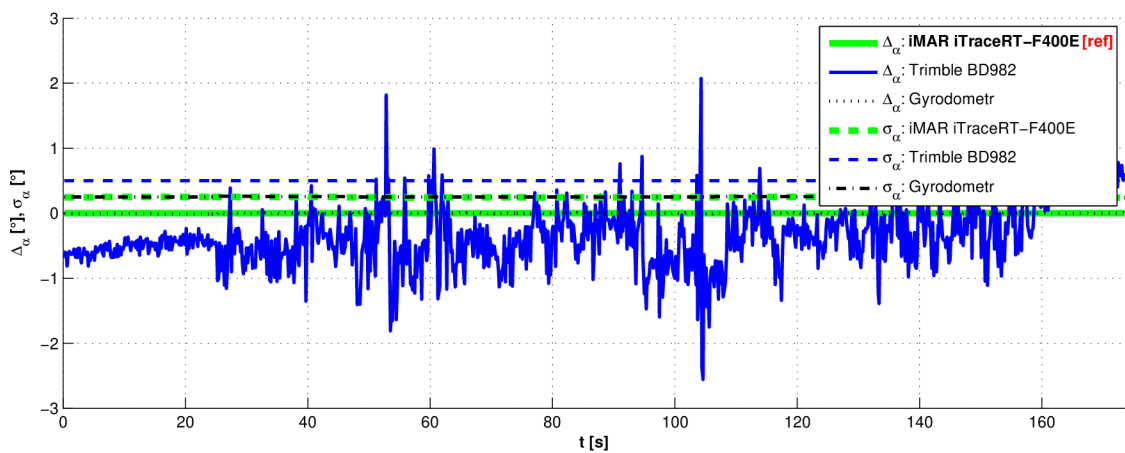
Obr. C.72: Odchytka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.20 Experiment č. 20

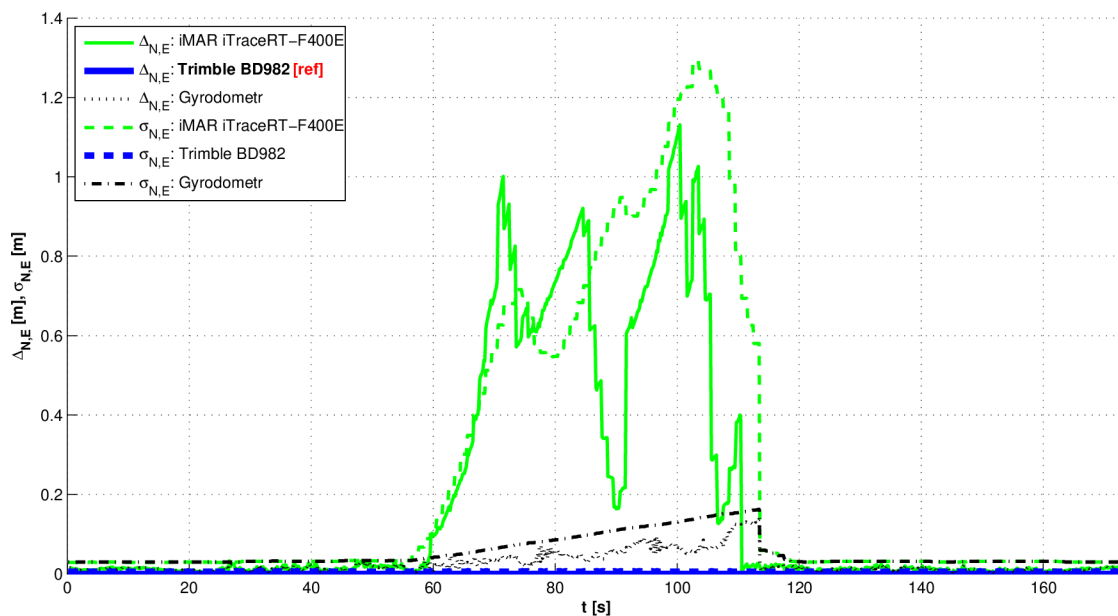
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	iMAR iTraceRT-F400E Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u iTraceRT-F400E v části trajektorie



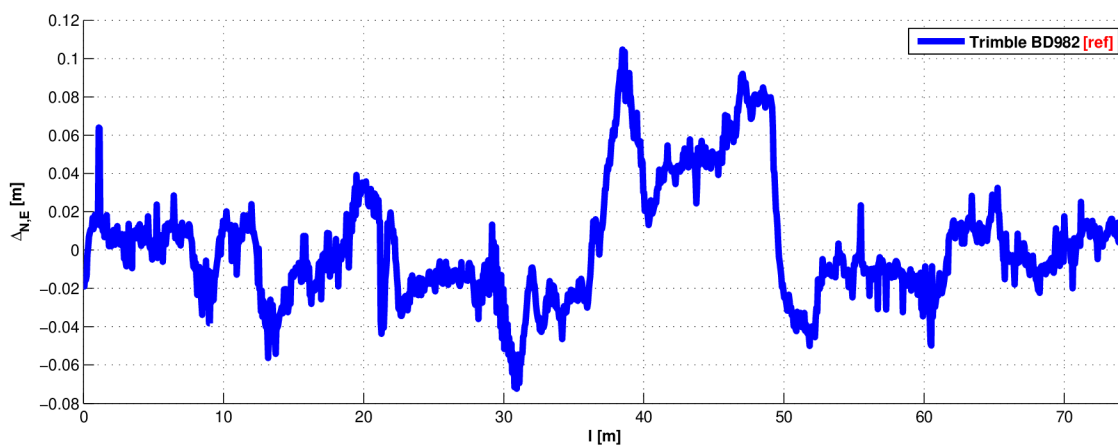
Obr. C.73: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.74: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



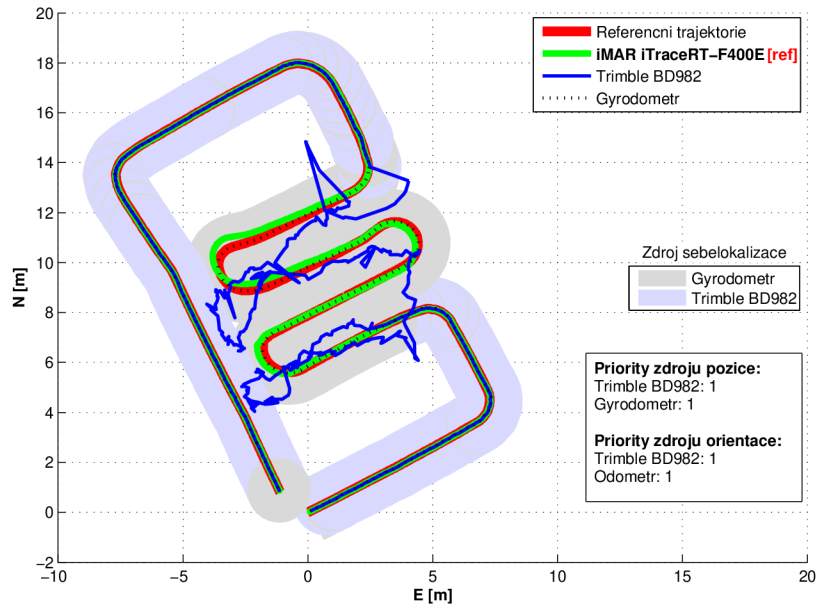
Obr. C.75: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



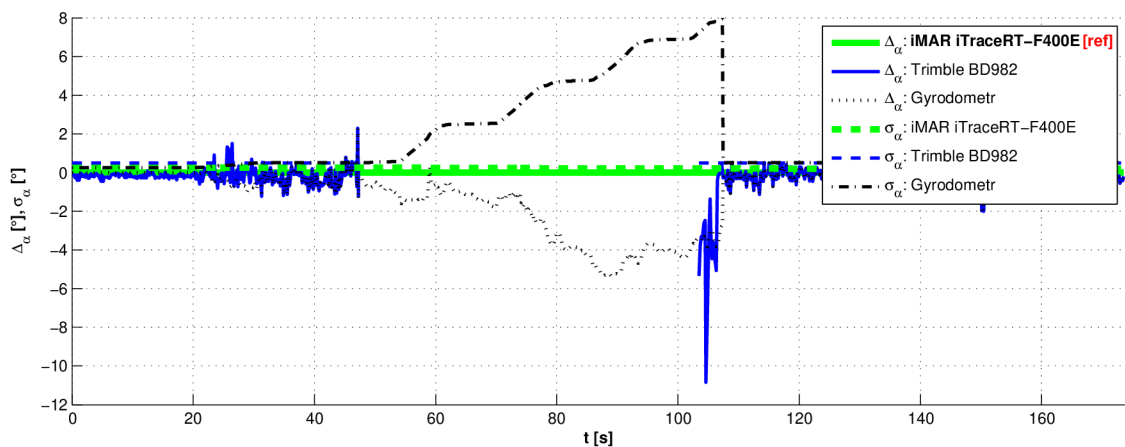
Obr. C.76: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.21 Experiment č. 21

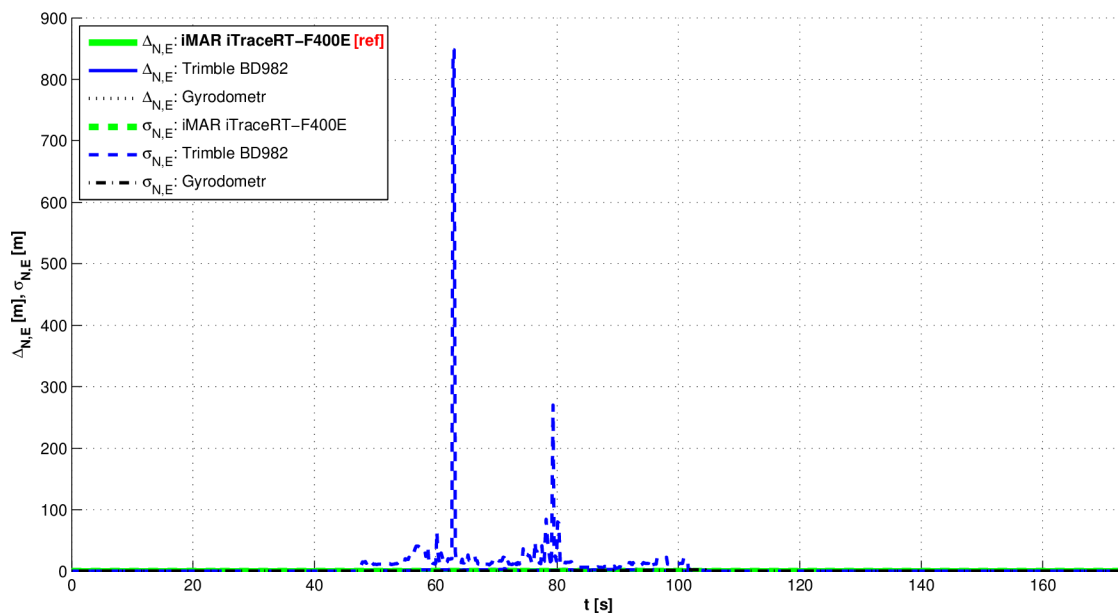
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Trimble BD982 Odometr
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u BD982 v části trajektorie



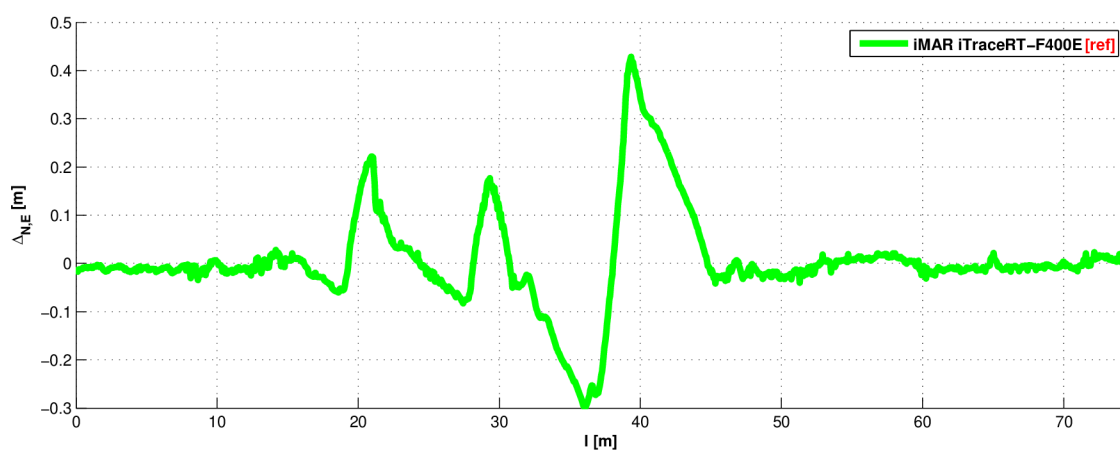
Obr. C.77: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.78: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



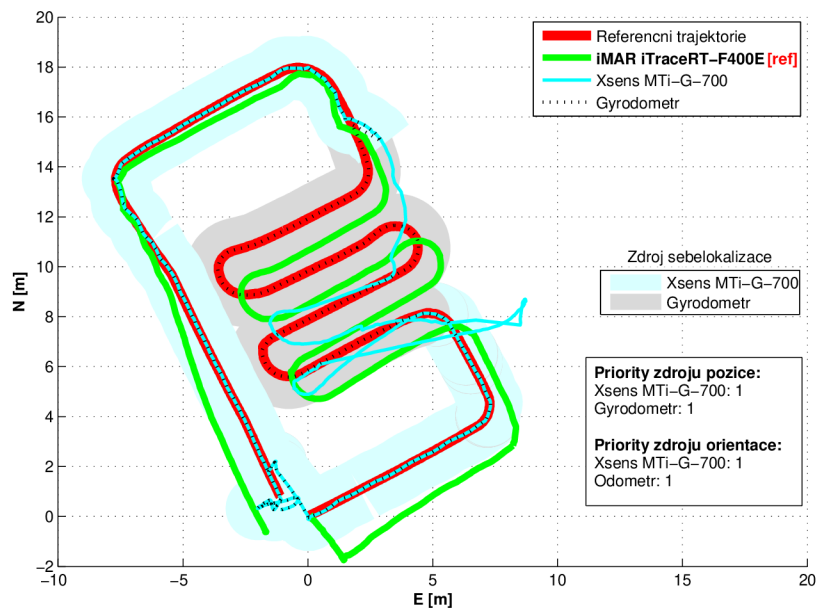
Obr. C.79: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



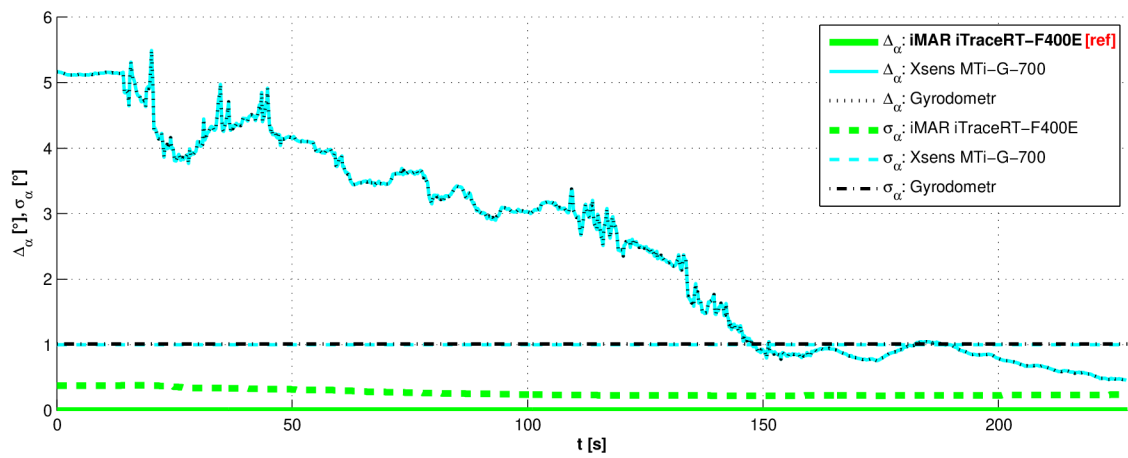
Obr. C.80: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.22 Experiment č. 22

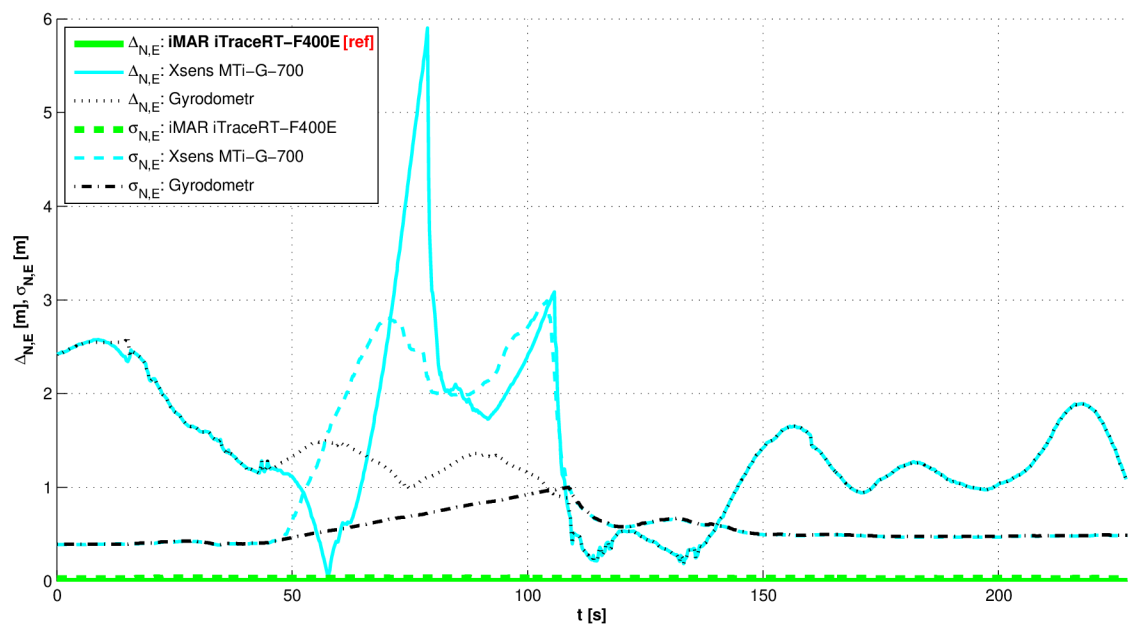
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Xsens MTi-G-700 Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u MTi-G-700 v části trajektorie



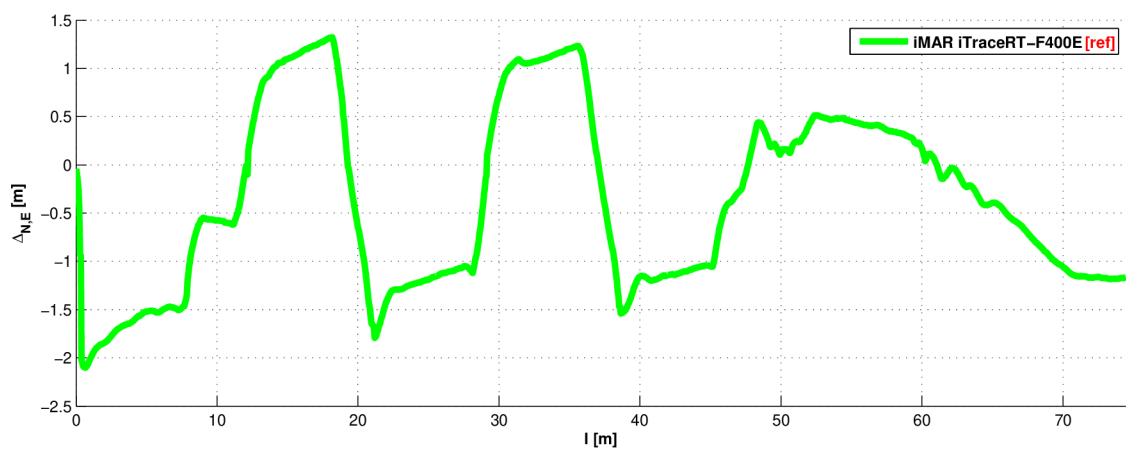
Obr. C.81: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.82: Naměřené odchyly Δ_α a predikované směrodatné odchyly σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



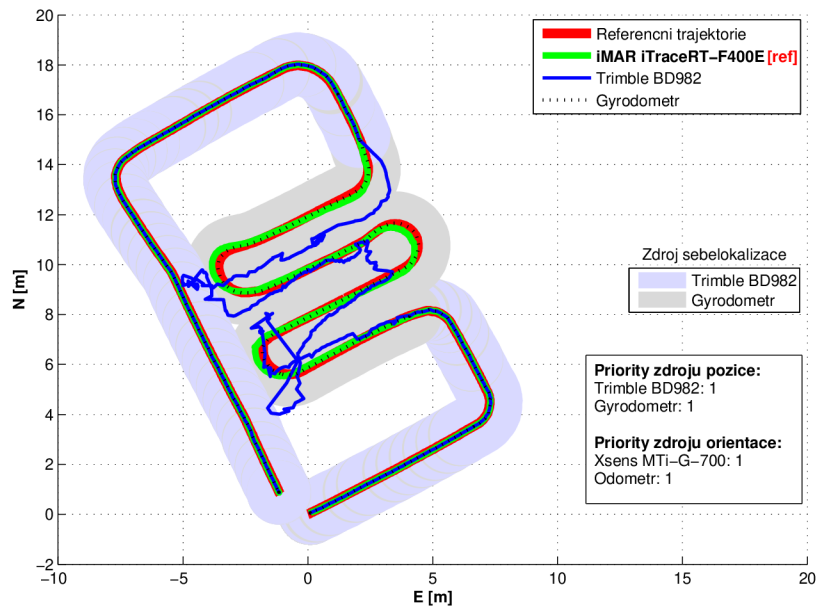
Obr. C.83: Naměřené odchyly $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchyly $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



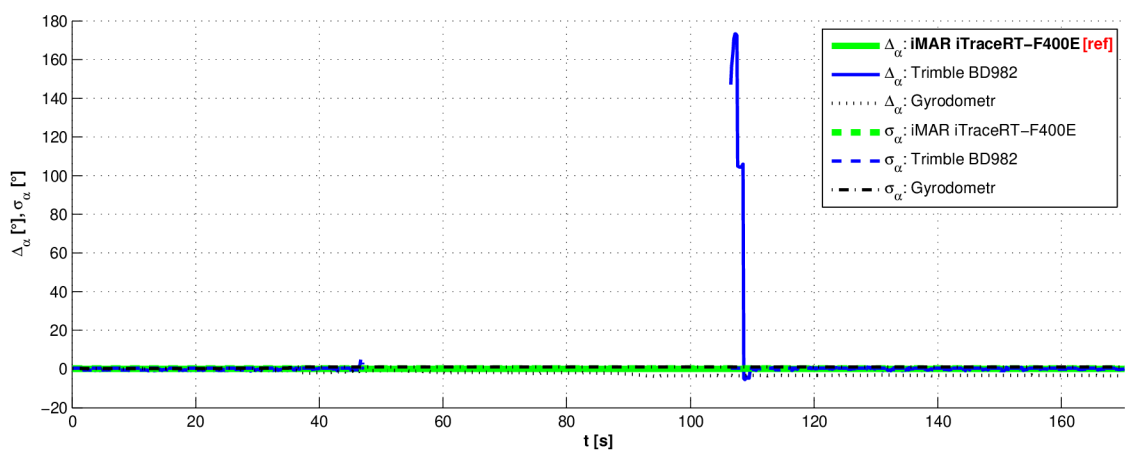
Obr. C.84: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.23 Experiment č. 23

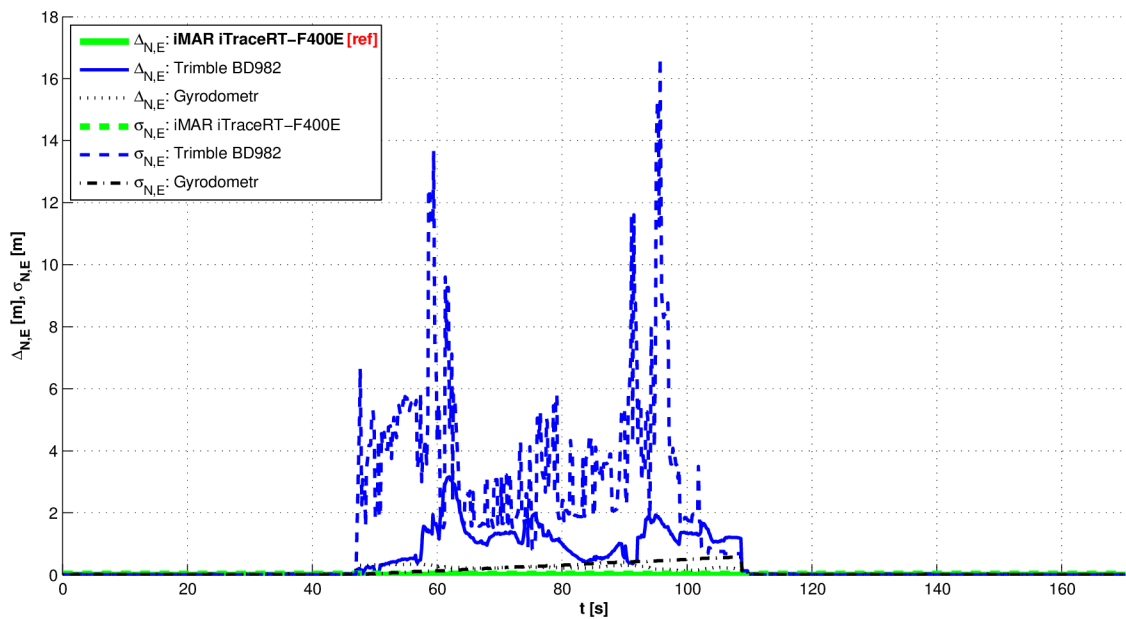
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Trimble BD982 Gyrodometr(MTi-G-700 + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u BD982 a MTi-G-700 v části trajektorie



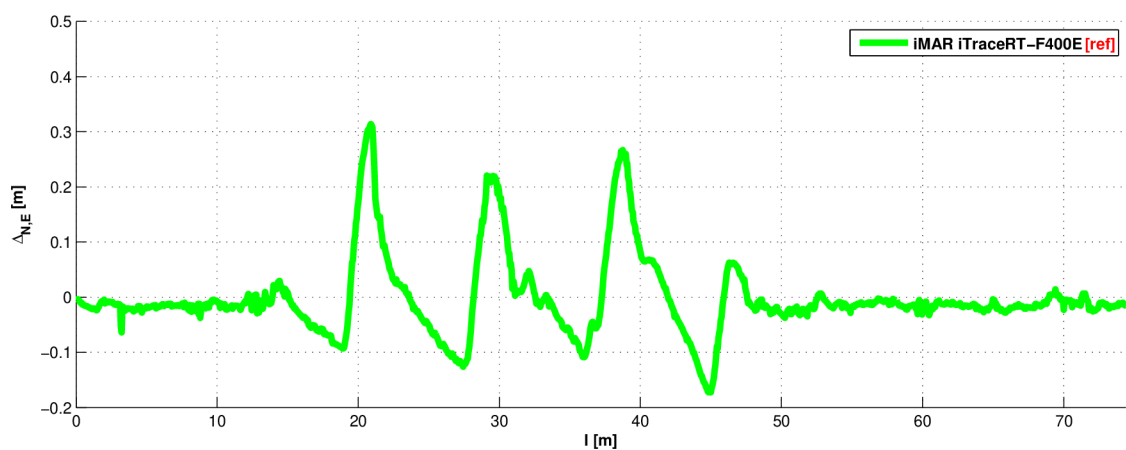
Obr. C.85: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.86: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



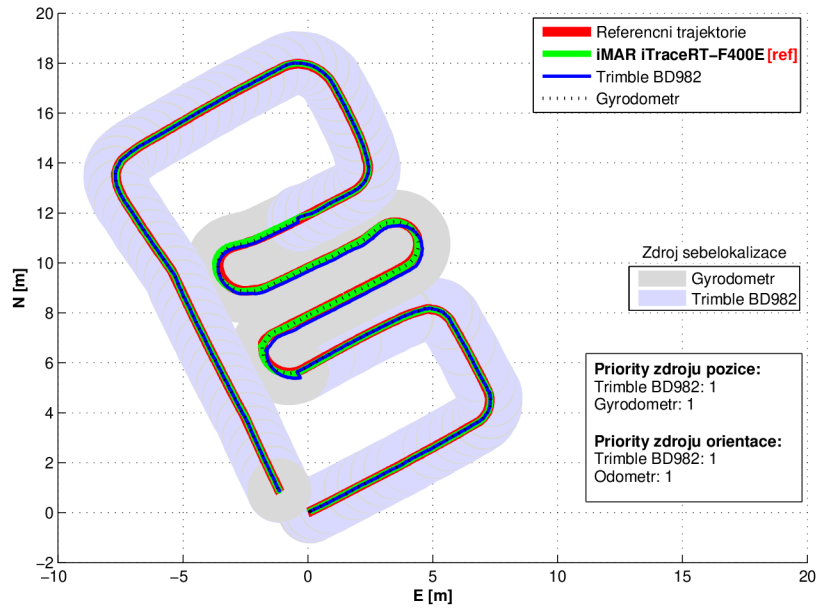
Obr. C.87: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



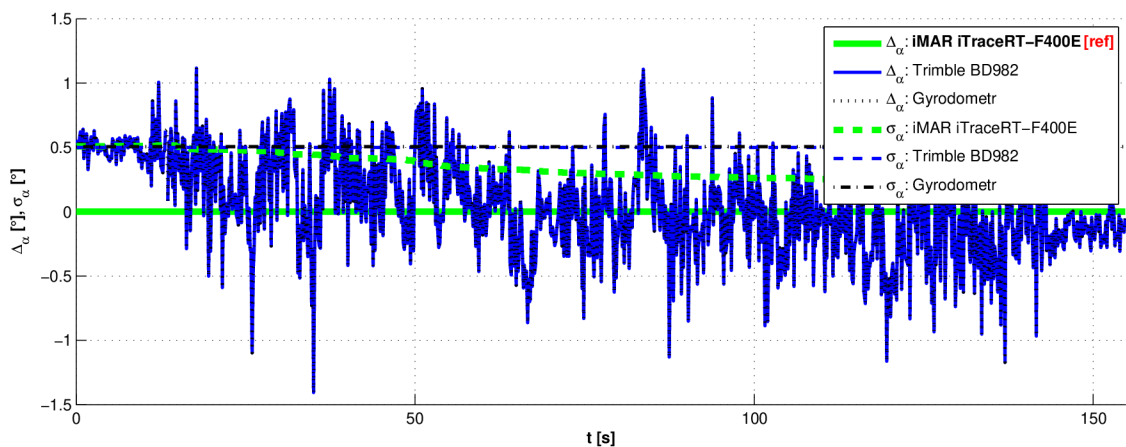
Obr. C.88: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.24 Experiment č. 24

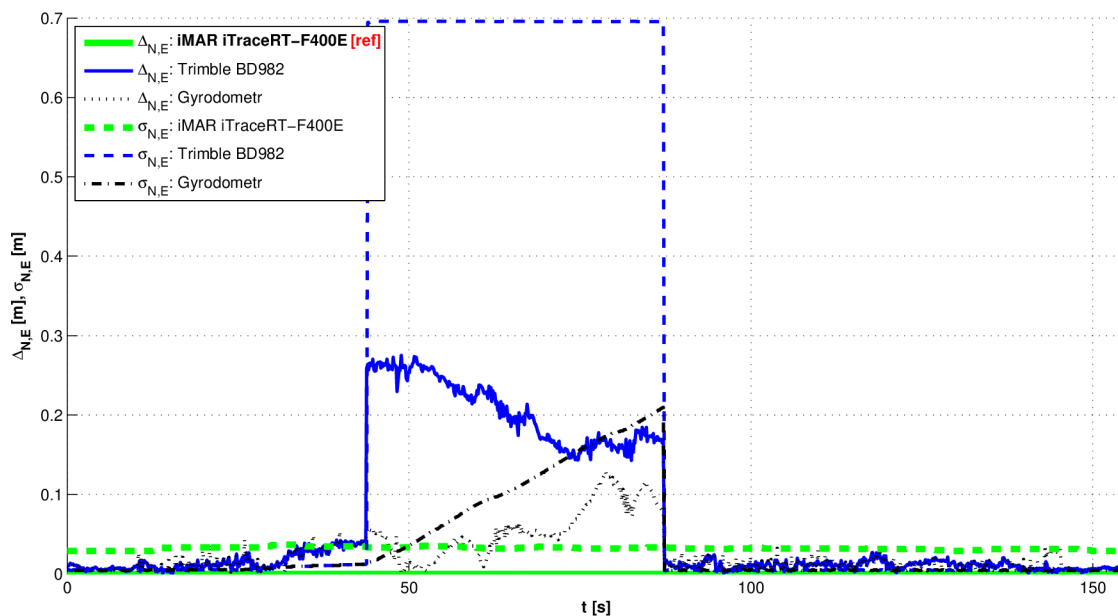
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Trimble BD982 Gyrodometr(BD982 + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen Výpadek GBAS u BD982 v části trajektorie



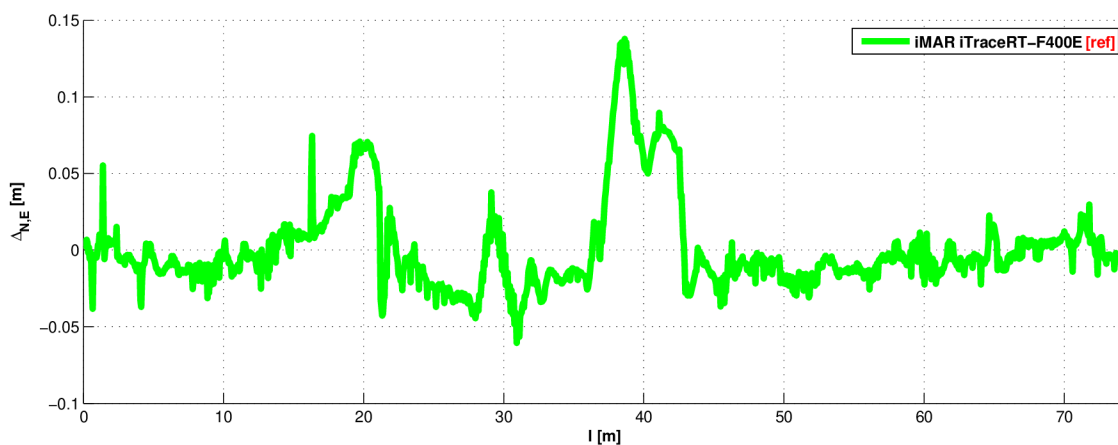
Obr. C.89: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.90: Naměřené odchylky Δ_{α} a predikované směrodatné odchylky σ_{α} jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



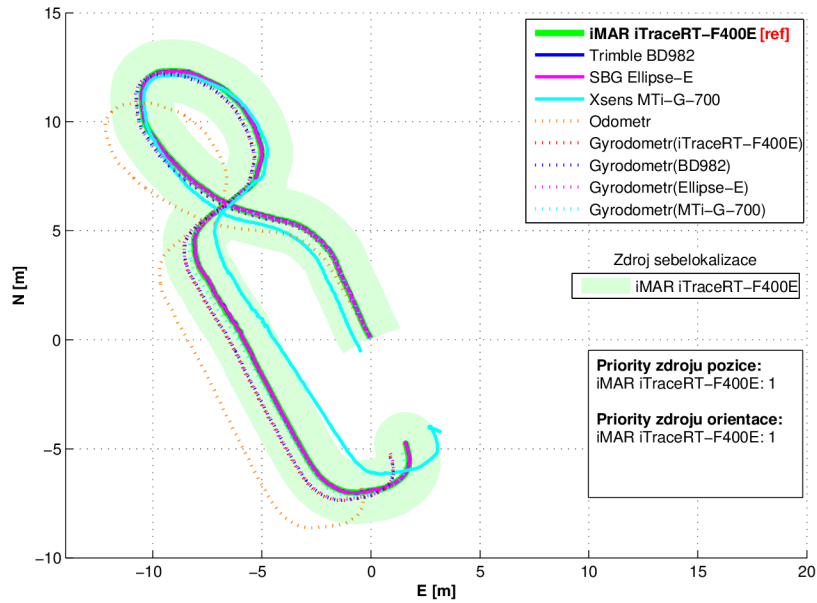
Obr. C.91: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



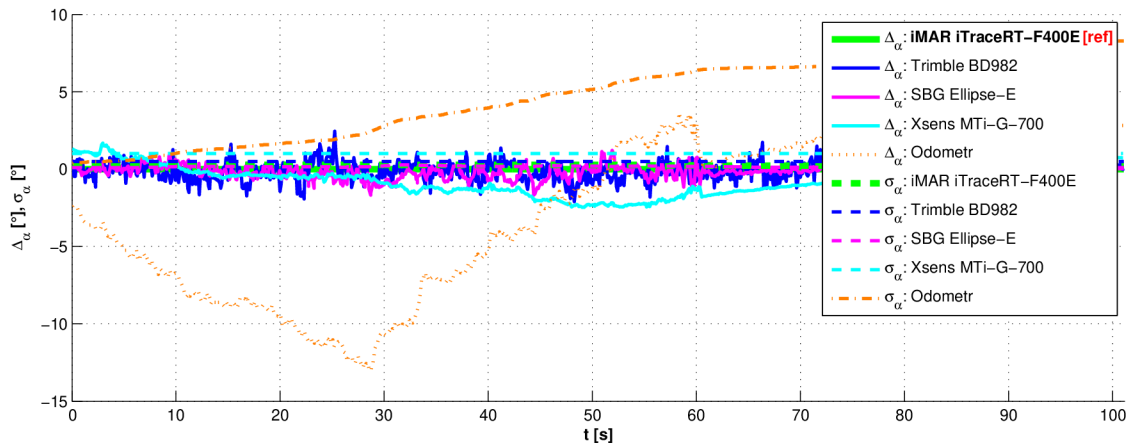
Obr. C.92: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.25 Experiment č. 25

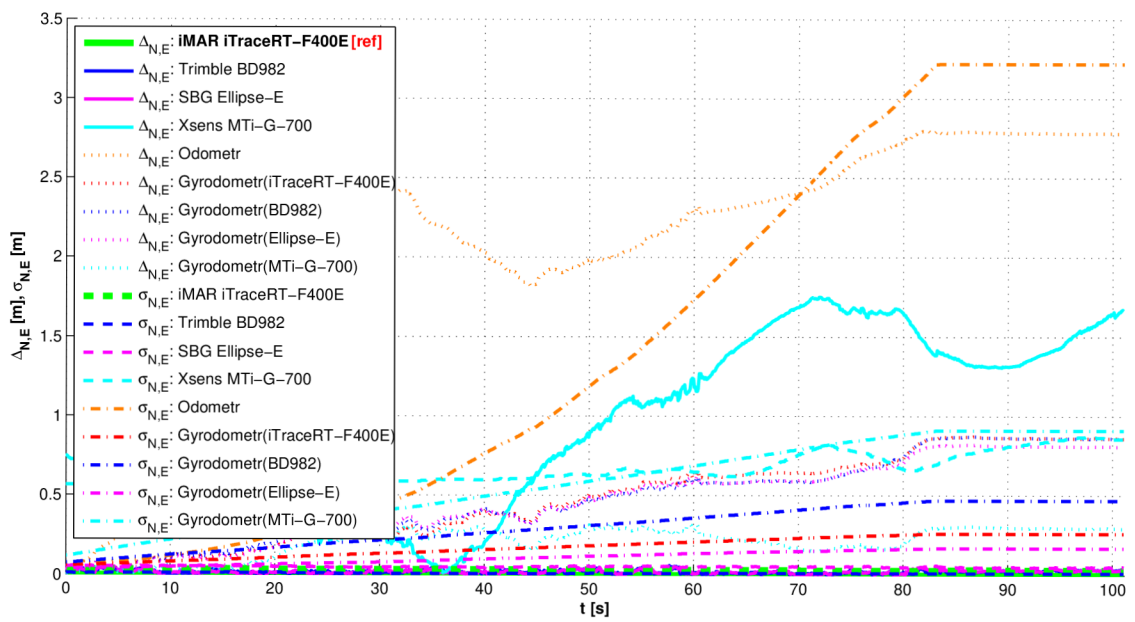
Typ experimentu	Vyhodnocení sebelokalizace
Použitá zařízení pro navigaci	iMAR iTraceRT-F400E
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen Jízda v travnatém svahu



Obr. C.93: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



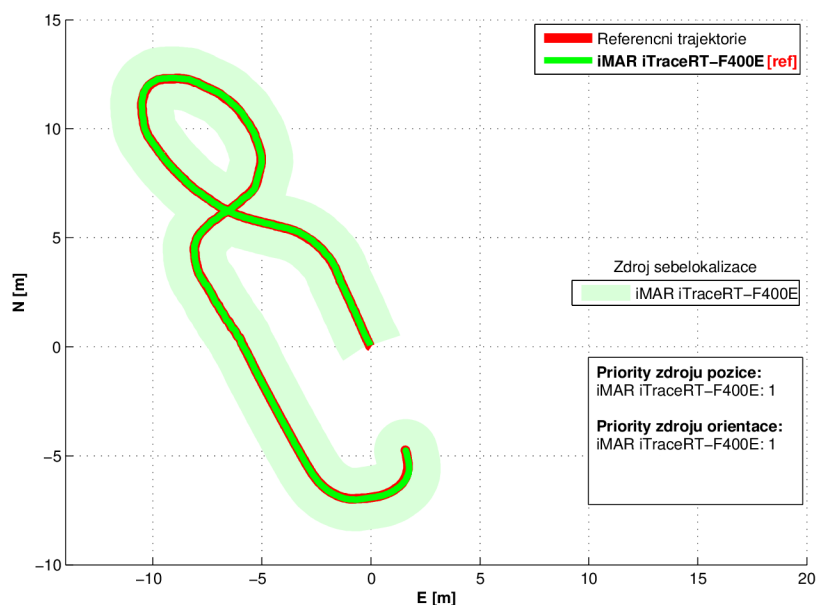
Obr. C.94: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



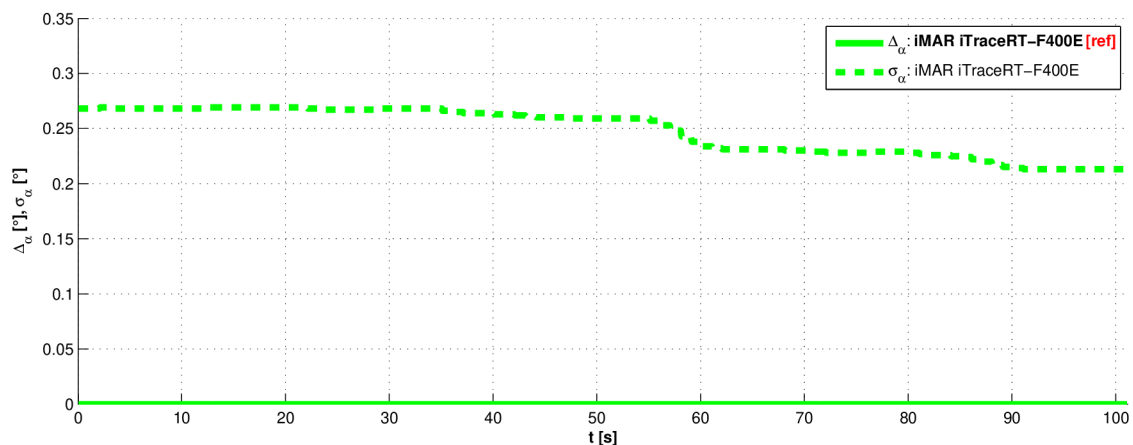
Obr. C.95: Naměřené odchyly $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchyly $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ

C.26 Experiment č. 26

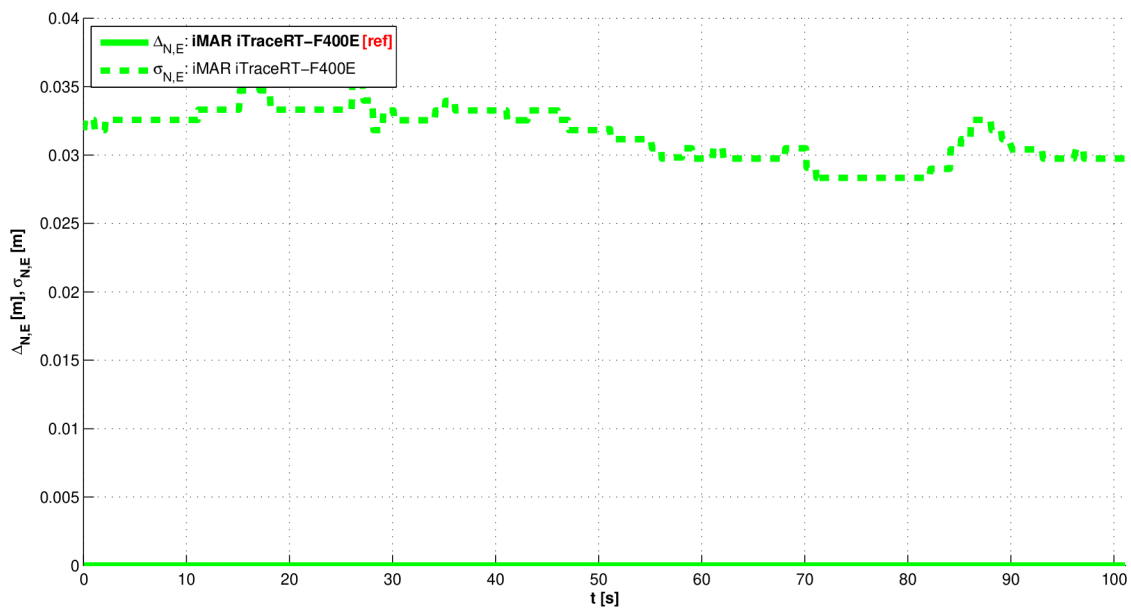
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	iMAR iTraceRT-F400E
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů neomezen Jízda v travnatém svahu



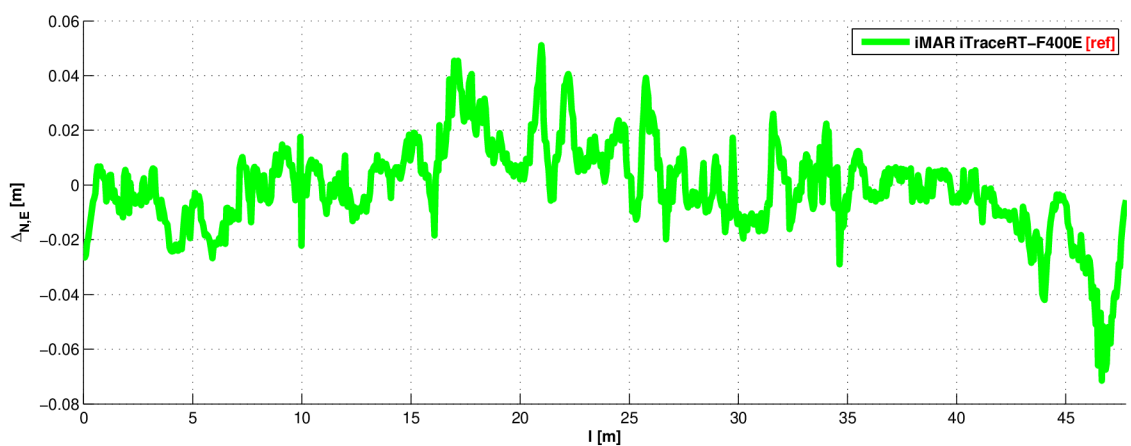
Obr. C.96: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.97: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



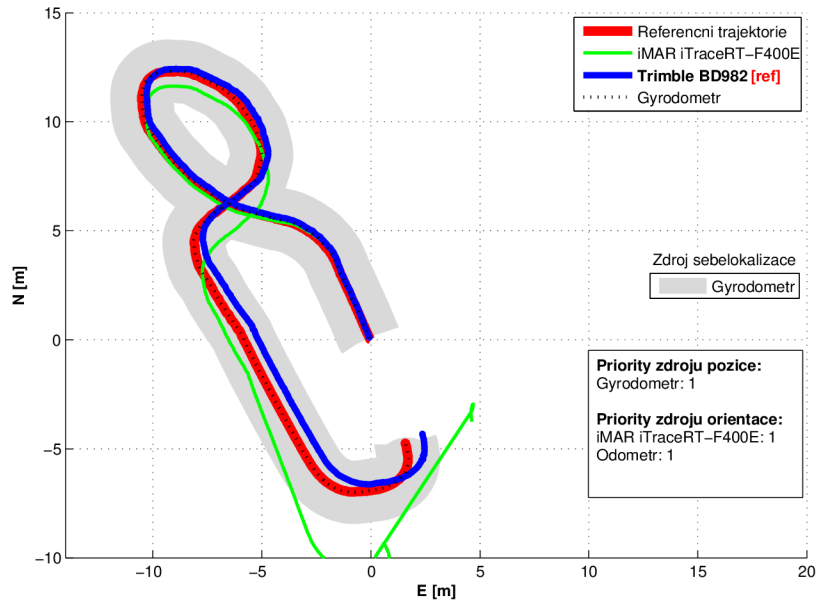
Obr. C.98: Naměřené odchyly $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchyly $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



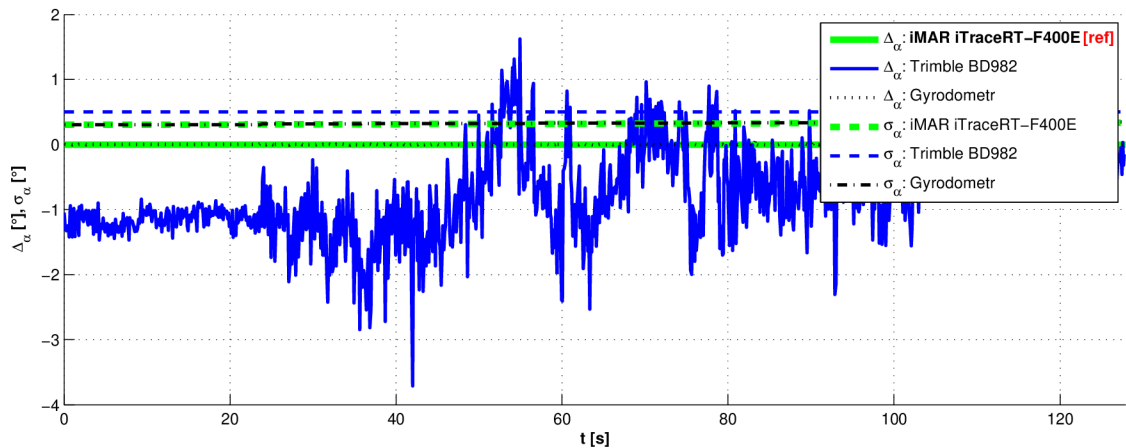
Obr. C.99: Odchylna $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.27 Experiment č. 27

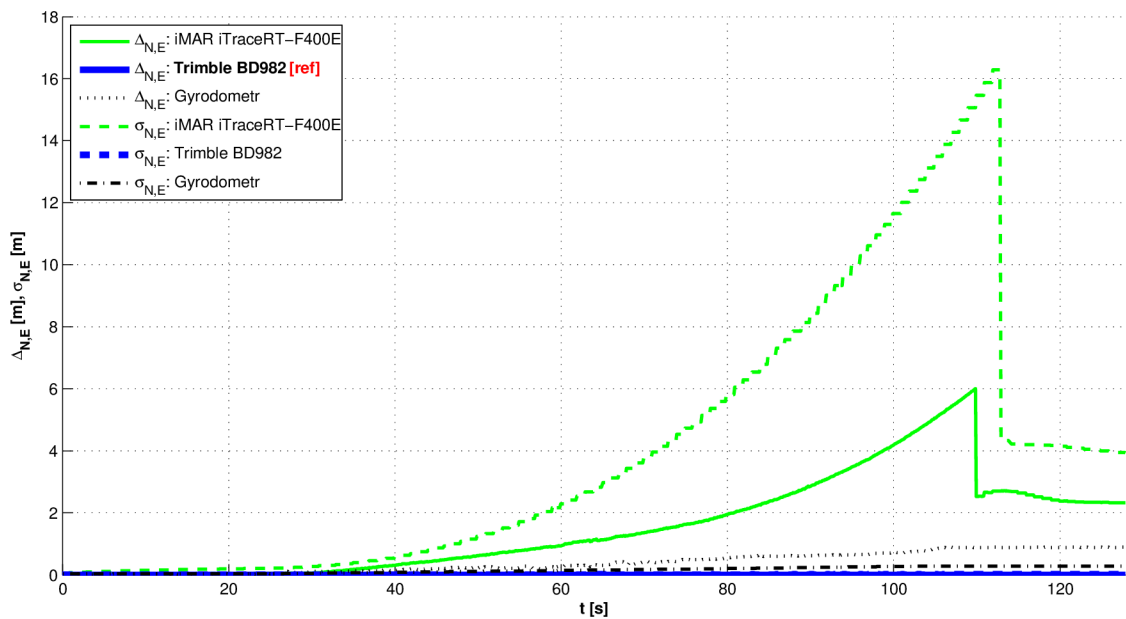
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(iTraceRT-F400E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS sig. omezen u iTraceRT-F400E Jízda v travnatém svahu



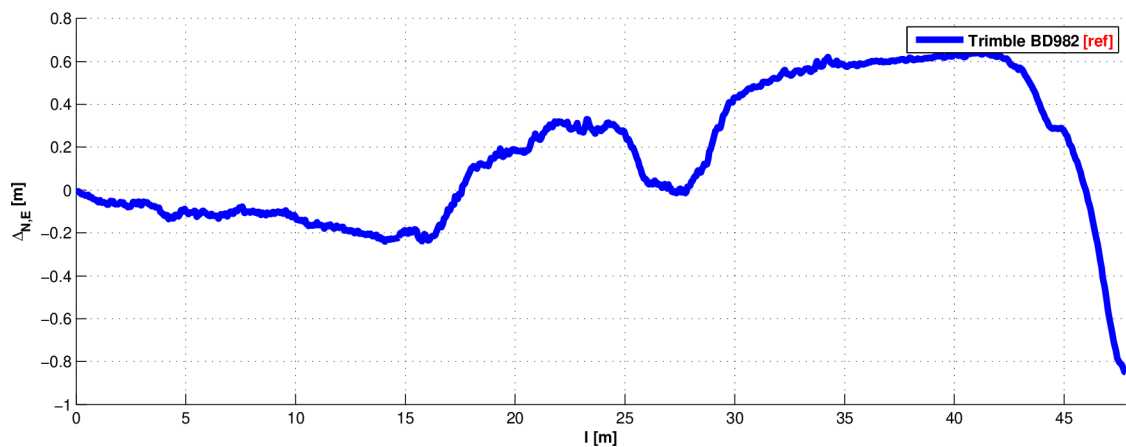
Obr. C.100: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.101: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



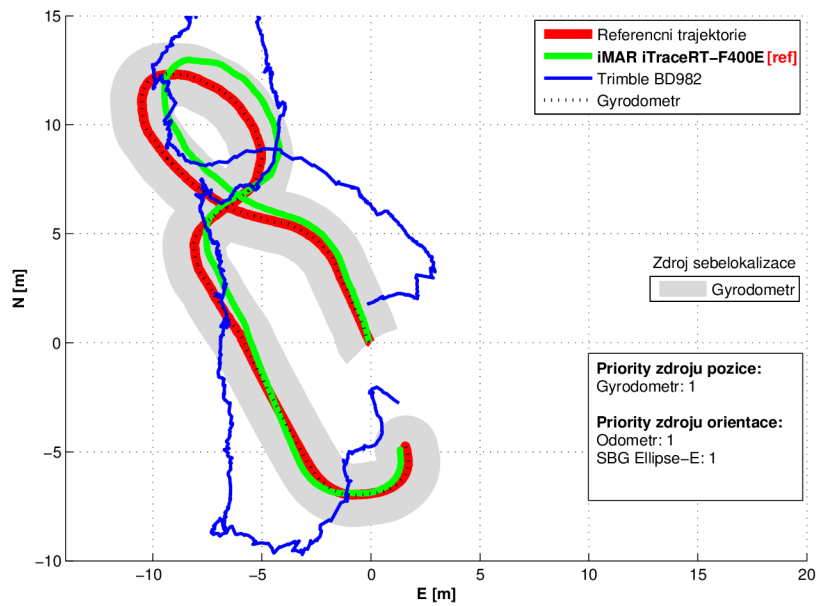
Obr. C.102: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



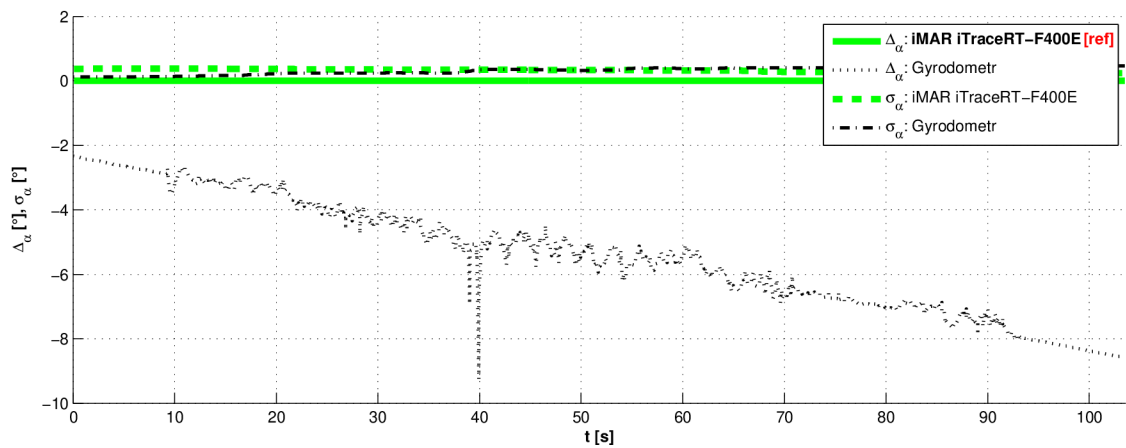
Obr. C.103: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy

C.28 Experiment č. 28

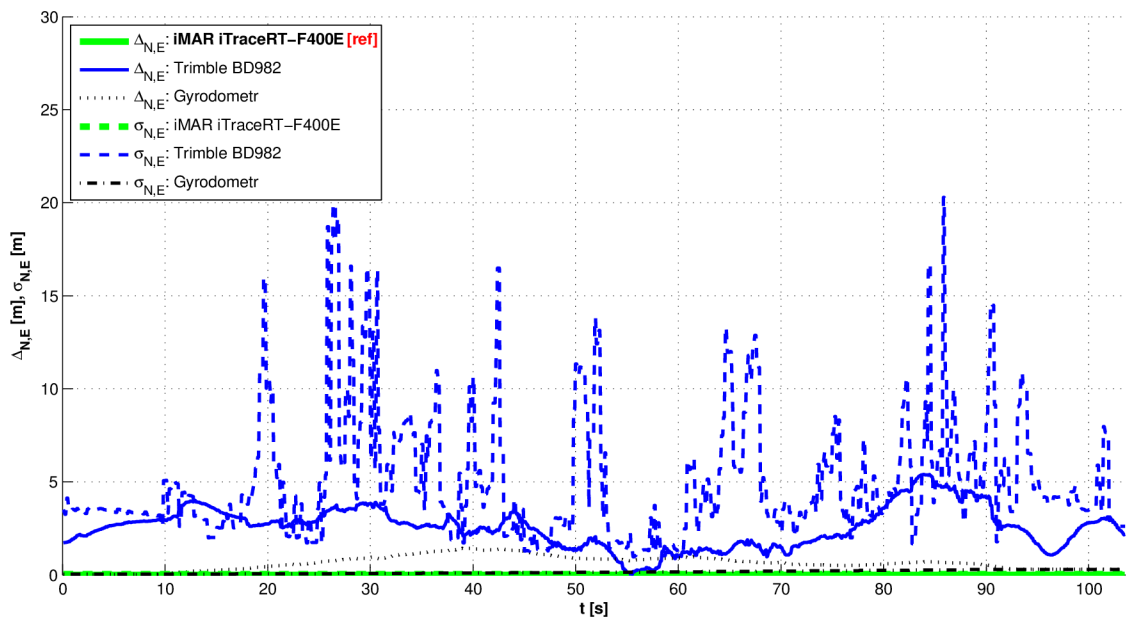
Typ experimentu	Vyhodnocení navigace
Použitá zařízení pro navigaci	Gyrodometr(Ellipse-E + Odometr)
Podmínky experimentu	Příjem GNSS signálů omezen u BD982 Jízda v travnatém svahu



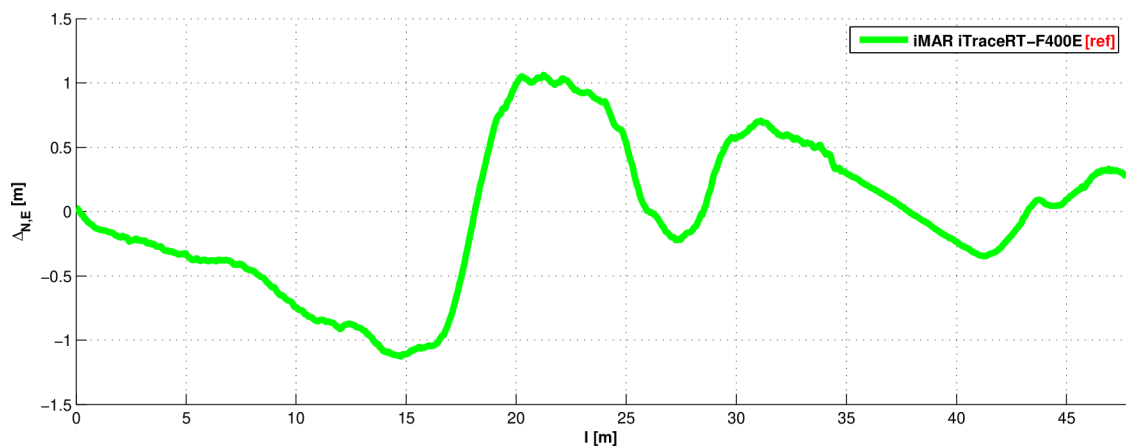
Obr. C.104: 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.105: Naměřené odchylky Δ_α a predikované směrodatné odchylky σ_α jednotlivých řešení azimutu α_R mobilního robotu



Obr. C.106: Naměřené odchylky $\Delta_{N,E}$ a predikované směrodatné odchylky $\sigma_{N,E}$ jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině ρ



Obr. C.107: Odchylka $\Delta_{N,E}$ 2D pozice robotu v horizontální rovině ρ od požadované trajektorie v průběhu jízdy