

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

**Ing. Jakub Novák**

Pojednání ke státní doktorské zkoušce

**Snímání a zpracování údajů lokalizace  
dopravního prostředku**

**Školitel:**

Doc. Ing. Ivan Mazůrek CSc.

**Druh vědecké výchovy:**

Doktorský studijní program – prezenční forma

**Obor:**

Konstrukční a procesní inženýrství

Brno, říjen 2005

# Obsah

Úvod.....	2
<b>1 Dosavadní vývoj.....</b>	<b>4</b>
1.1 Snímání pohybu .....	4
1.1.1 Dead reckoning.....	4
1.1.2 INS – Inerciální navigační systém.....	5
1.1.3 GPS – Globální polohovací systém.....	6
1.1.4 Integrace INS a GPS – Kalmanův filtr .....	8
1.2 Strukturování pohybu vozidla .....	9
1.2.1 Typické aplikace .....	9
1.2.2 Souřadné systémy .....	10
1.2.3 Vybrané modely .....	11
<b>2 Cíle disertace .....</b>	<b>15</b>
<b>3 Stav řešení.....</b>	<b>17</b>
3.1 Realizovaná měřicí zařízení .....	18
3.2 Knihovna diagnostických rutin.....	19
<b>Reference.....</b>	<b>20</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Integrace gyroskopického systému a RTK-GPS [4].....	6
Obr. 2 – Přehled uvažovaných souřadných systémů.....	11
Obr. 3 – Jednostopý model vozidla .....	12
Obr. 4 – Měřicí box třetí generace .....	18

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Srovnání různých technik snímání pohybu [14].....	4
Tab. 2 – Přesnosti dosahované při použití RTK-GPS ve výzkumu [4].....	7

# Úvod

Automobily se stávají stále vyspělejšími a dostupnějšími a na našich silnicích jich přibývá. Snímání pohybu automobilu je v laické veřejnosti obecně spojováno především s určením jeho přesné polohy případně s automatizovanou navigací v neznámém terénu. Existuje ale i řada jiných důvodů pro vývoj pohybových diagnostických systémů. Rostoucí objem silniční dopravy neznamena jen zácpy a časové ztráty, bohužel skrze dopravní nehody vede i ke škodám na majetku, zdraví či dokonce životech zúčastněných osob. Pojem, který je v tomto smyslu stále více diskutován, je tzv. udržitelně bezpečná silniční doprava (*Sustainably Safe Road Traffic* [22]). Udržitelně bezpečná doprava si žádá bezpečná vozidla stejně jako bezpečnou infrastrukturu. Představa udržitelné bezpečnosti zdůrazňuje chápání lidského řidiče se všemi jeho schopnostmi, mezemi a pohnutkami. Již nějaký čas provozní a dopravní specialisté vidí v rámci vytváření udržitelně bezpečné silniční dopravy důležitou roli pro inteligentní dopravní systémy. V takovém systému jsou vozidla technicky vybavena tak, aby zjednodušila řízení a aby poskytla veškerou dostupnou ochranu zranitelným lidským bytostem.

Některé z takových technologií, jako je varování při změně jízdního pruhu nebo brzdový asistent, již přicházejí na trh, ačkoliv se to zatím týká většinou luxusnějších modelů. Některé technologie se snaží kolizi předcházet, příkladem může být inteligentní tempomat (*Advanced Cruise Control*), který automaticky udržuje nastavenou rychlost, ale zároveň dokáže dodržet minimální požadovanou vzdálenost od vozidla vpředu; jiné pouze zmírnit její následky. Zástupcem té druhé skupiny je Pre-Collision System nabízený v modelech GS a LS značky Lexus. Pre-Collision používá radar s řadou antén a senzorů k prohledávání vozovky do vzdálenosti kolem 150 m odhadující možné kolize. Systém rovněž snímá dopřednou a stáčivou rychlost a úhel natočení kol a pokud dojde k závěru, že hrozí bezprostřední kolize, napne bezpečnostní pásy, uvede do pohotovosti brzdového asistenta a sníží zavěšení karosérie (podobný systém na některých modelech Mercedes-Benz, zvaný Pre-Safe, v případě bezprostředního ohrožení napíná pásy, upravuje polohu sedadel a zavírá boční a střešní okna). S brzdovým asistentem v pohotovosti stačí řidičovi dotknout se brzdového pedálu a automobil zastaví tak rychle, jak to jen jde. Podobná technologie je působivá, a drahá. Přestože je schopna zaměřit z úctyhodné vzdálenosti objekt velikosti tvárnice, nepodaří se jí zatím vždy zaznamenat tzv. měkké objekty, mezi které patří objekty z masa a kostí.

Nejde vždy o zdraví a životy, na přeplněném trhu s automobily se stejně usilovně soupeří i v oblasti jízdního pohodlí. Komfort jízdy je určován pohybem karoserie vozidla, zatímco její bezpečnost je dána kontaktem kol s vozovkou. Přenášení nerovností vozovky na posádku je eliminováno prostřednictvím pružného uložení karoserie, jehož klíčovým prvkem je tlumič odpružení, který svými vlastnostmi

stanovuje jak míru pohodlí, tak i hranici bezpečnosti jízdy a životnosti součástí celého závěsu. Konečnému nastavení vlastností tlumiče předchází řada jízdnicích zkoušek a simulací, pro jejichž vyhodnocení je nutné umět dostatečně přesně zachytit pohyb karoserie v prostoru. Protože experimentální měření jsou časově, potažmo finančně náročná, stále častěji jsou nahrazována matematickým modelováním. Pružně uložená karoserie je popisována jako těleso se šesti stupni volnosti, její pohyb je ovlivněn mnoha okolnostmi a reálný model tohoto pohybu je netriviální. Ke správné identifikaci modelu a nalezení hodnot jeho vstupních parametrů ještě stále velmi dobře slouží experimentální měření.

Navržením a vyrobením perfektního tlumiče úkoly měřicích a modelovacích systémů nekončí, neboť tlumič i celý závěs kola se během provozu opotřebovávají a jejich vlastnosti se mění. Pro bezpečnost nejen majitele daného automobilu, ale i ostatních účastníků silničního provozu je velice důležité, aby závady na podvozcích vozidel byly včas odhalovány a odstraňovány. V současné době je to nejčastěji zajišťováno preventivními prohlídkami, budoucností v tomto ohledu je integrace podvozkových skupin do rozvíjejících se interních diagnostických systémů vozidel (tzv. on-board diagnostika, palubní diagnostika).

Poslední, ale neméně významnou oblastí použití měřicích systémů pro zkoumání pohybu vozidla je automobilový sport. Ten je dnes na takové úrovni, že se jezdci mnohdy pohybují na samotné hranici fyzikálních zákonů. Najít tuto hranici bezpečně jim pomáhají právě vyspělé systémy sledující a zaznamenávající parametry chování závodního vozu.

# 1 Dosavadní vývoj

Pojmem „pohyb“ bývá obecně označován v čase proměnný stavový vektor, který se skládá z polohy a orientace pohybujícího se tělesa vzhledem k nějakému globálnímu souřadnému systému. Složky tohoto vektoru tvoří souřadnice polohy ( $x, y, z$ ) a úhly natočení tělesa kolem podélné, příčné a svislé osy – v tomto pořadí os se otáčení tělesa zpravidla nazývá klopení, klonění a stáčení, v anglické literatuře označované jako roll, pitch a yaw nebo heading.

## 1.1 Snímání pohybu

Snímání pohybu objektů může být prováděno řadou technologií zahrnující radar, magnetická či elektrická pole, GPS a inerciální systémy (viz. dále). Všechny uvedené snímací technologie, s výjimkou inerciálních systémů, závisí na vnějších referencích a jejich způsob snímání je tak vždy nějakým způsobem omezen. Rychlé srovnání nabízí následující tabulka:

Tab. 1 – Srovnání různých technik snímání pohybu [14]

Druh snímání	Reference	Aplikace	Omezení
radar	vnější objekt v pohybu	sledování letecké dopravy	v pohybu
elektrické pole	vnější objekt s nábojem	3D mouse	omezený dosah
magnetické pole	vysílač	Polhemus [23]	omezený dosah
GPS	síť satelitů obíhajících Zemi	navigace	volné prostranství, na Zemi
INS	vlastní subjekt	řízení ICBM <sup>1</sup>	chyby rostoucí s časem

### 1.1.1 Dead reckoning

Na konci 15. století byla astronomická navigace v Evropě teprve rozvíjena, především Portugalci. Před jejím nástupem se mořeplavci orientovali pomocí hrubého výpočtu polohy zvaného „deduced“ či „dead“ reckoning. To byla také metoda, kterou používal Kolumbus a většina ostatních mořeplavců jeho doby [15]. Pomocí DR nalezne navigátor svou pozici změřením kurzu a vzdálenosti, kterou se pohyboval z nějakého známého místa, například z výchozího přístavu. Aby tato metoda fungovala, potřebuje navigátor způsob, jak měřit kurz a ujetou vzdálenost.

---

<sup>1</sup> ICBM – Intercontinental Ballistic Missile (mezikontinentální balistická střela)

Kurz byl měřen magnetickým kompasem, který je v Evropě známý minimálně od roku 1183, a vzdálenost byla určována výpočtem z času a rychlosti.

### 1.1.2 INS – Inerciální navigační systém

Inerciální navigační systémy jsou typu dead-reckoning, v nichž je vyžadován počáteční odhad pozice a aktuální pozice je určována relativně k té výchozí. INS nedokáže najít svou výchozí pozici na Zemi (s obtížemi umí zjistit zeměpisnou šířku, ale nikoliv zeměpisnou délku). Inerciální snímání je prováděno prostřednictvím dvou typů snímačů: akcelerometry a gyroskopy. Akcelerometry se chovají jako mechanické systémy se dvěma stupni volnosti (tj. tlumený systém hmoty na pružině pod zatížením) a snímají posuvná zrychlení. V nejjednodušším případě je pozice nalezena dvojí integrací. Gyroskopy snímají úhlové rychlosti, hodnot natočení v určité ose je tedy dosahováno jednoduchou integrací výstupu odpovídajícího gyra. Gyroskopy původně pracovaly na principu zachování rotační energie, většina moderních elektromechanických gyr dnes však ke své činnosti využívá principu Coriolisovy síly. Spojíme-li tři akcelerometry tak, aby jejich osy citlivosti byly ortogonální, orientované severojižně, východozápadně resp. vertikálně, můžeme teoreticky měřit polohu tělesa v prostoru. Aby uvedená orientace byla dodržena, zatímco prostředek manévruje, jsou akcelerometry zavěšeny v soustavě tří gyroskopicky stabilizovaných závěsů zvaných „gimbals“. Vnitřní závěs tak lze považovat za stabilní plošinu, celé uspořádání je obecně nazýváno „gimbaled INS“ a používá se v kosmických lodích, řízených střelách i v pozemních vozidlech.

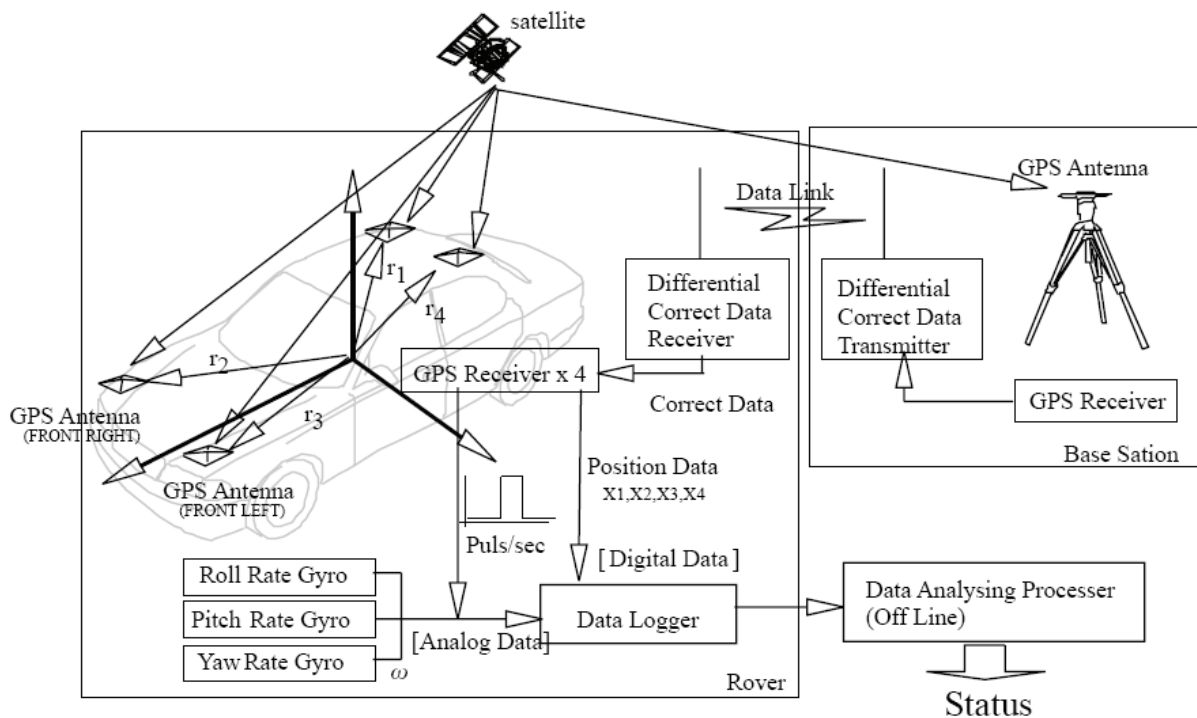
Gimbaled INS může být velmi spolehlivý, přesný a s dobrým poměrem cena/výkon. Uspořádání závěsů je ale mechanicky velmi komplikované a drahé na údržbu. Pokud je nutné některý akcelerometr nebo gyroskop vyměnit, musí být složitá soustava závěsů rozebrána a v chirurgicky čistém prostředí opět složena dohromady. Na to navazují dlouhé kalibrační procedury a časově velmi náročné testování. Na začátku 70-tých let se proto začalo uvažovat o alternativním, jednodušším uspořádání, které by bylo zcela zbaveno systému závěsů – snímače zrychlení a úhlových rychlostí by byly pevně spojeny s konstrukcí přístroje. Takové řešení se nazývá „strapdown INS“ a gyra v něm nefungují jako stabilizátory stálé polohy, ale jako prostředek k měření otáčení tělesa v prostoru. Systém tak v každém okamžiku ví, kterým směrem jsou osy akcelerometrů orientovány a mechanický systém závěsů je tím fakticky nahrazen systémem matematickým.

V porovnání gimbaled INS proti strapdown vykazuje každý z nich určité výhody i nevýhody. Zřejmě největší výhodou gimbaled systémů je jejich principiálně nižší chybovost. Jelikož jsou jejich tři ortogonální akcelerometry drženy v neměnné poloze, pouze jeden, který je orientován vertikálně, měří gravitační zrychlení a je tak zatížen chybami, které s gravitací souvisí. To je v kontrastu se strapdown systémy, jejichž všechny akcelerometry se pohybují a rotují v prostoru a každý z nich je tím

ovlivněn gravitací a následnými chybami. Další výhodou gimbaled systémů je jednoduchost jejich gyroskopů. Hlavním úkolem gyr v gimbaled systémech je jejich rotace, která zajišťuje velký moment setrvačnosti, zatímco gyra ve strapdown systémech musí ve skutečnosti měřit protilehlé úhly pohybu. Hlavní výhodou strapdown systémů proti gimbaled je jednoduchost jejich mechanického provedení.

### 1.1.3 GPS – Globální polohovací systém

GPS je satelitní navigační systém. Poloha přijímače je v něm počítána z poloh satelitů pomocí určení časového zpoždění signálu, který satelity vysílají. Pro určení polohy ve třech rozměrech a korekci chyby vnitřních hodin přijímače jsou potřeba signály ze čtyř různých satelitů. Atmosférické podmínky a další náhodný šum sice narušují přesnost udávání polohy, ale hlavní zdroj chyb – umělý nízkofrekvenční šum zvaný *Selective Availability* (SA) byl odstraněn v květnu 2000, což umožnilo přijímačům pro běžné automobilové navigační systémy určovat absolutní polohu s přesností asi 10 m, tj. výsledkem měření by měla být taková poloha, která se alespoň v 95% všech uskutečněných měření nachází v okruhu 10 m od skutečné polohy. Při potřebě přesností 1 m a méně je nutné zvolit některou z tzv. diferenčních technik.



Obr. 1 – Integrace gyroskopického systému a RTK-GPS [4]

Hlavní myšlenkou diferenčního určování polohy je korekce odchylek na neznámém místě pomocí odchylek změřených v místě se známou polohou. Referenční přijímač (základní stanice) vypočítává korekce pro každý satelit v dosahu. Použití jednoduché opravy polohy vzdáleného přijímače odchylkami referenčního přijímače má omezené použití, protože oba přijímače musí ve svém výpočtu používat stejnou

množinu satelitů, aby byly oba zatíženy stejnou chybou. Diferenční postupy mohou být aplikovány buď v reálném čase, nebo později prostřednictvím technik post-processingu. DGPS dokáže odstranit pouze chyby společné pro referenční i vzdálený přijímač, nikoliv tedy například vlastní šum přijímače.

Kinematická GPS (K-GPS) je metoda využívající rozdílů fáze nosných vln satelitních signálů. Je to typ diferenčního GPS, který rovněž používá odchylky z referenční stanice. Technika, která v reálném čase měří polohu metodou K-GPS se nazývá real-time kinematic GPS (RTK-GPS, viz Obr. 1). RTK-GPS se skládá ze dvou GPS přijímačů. Jeden pracuje jako základní stanice pevně stojící na zemi a druhý jako pohyblivá stanice připevněná na zkoušeném vozidle. Obě stanice spolu navzájem komunikují prostřednictvím bezdrátového modemu. RTK-GPS pracuje velmi dobře ve spojení se signály z dalších pohybových čidel (viz. [4] nebo [6]). Dosahované přesnosti takovéto integrace uvádí Tab. 2.

Tab. 2 – Přesnosti dosahované při použití RTK-GPS ve výzkumu [4]

horizontální pozice	1,4 cm
vertikální pozice	1,4 cm
poloha v prostoru	0,2 °
podélná rychlost	0,28 km/h
příčná a vertikální rychlost	0,046 m/s
úhlová rychlost	0,1 °

Přesnost měření rychlosti pomocí GPS se ve světle přesnosti polohy může zdát překvapivá, ale rychlost není získávána prostým rozdílem sousedních měření polohy. Narozdíl od určování polohy, při kterém se používá kódová složka satelitního signálu, hodnota rychlosti může být vypočtena přijímačem pomocí 19 cm

(1575,42 MHz) nosné vlny jedním ze dvou způsobů. V první metodě jsou v přijímači sledovány změny ve frekvenci nosné vlny, které jsou následně interpretovány jako Dopplerův jev nastávající při vzájemném pohybu přijímače a vysílače. Ze znalosti poloh a rychlostí satelitů mohou být tyto Dopplerovy změny převedeny na absolutní rychlost přijímače. Alternativně může být k odhadu rychlosti přijímače použita změna ve fázi nosné vlny mezi dvěma po sobě jdoucími vzorky. Tato metoda, používaná některými přijímači, vnáší do informace o rychlosti faktické zpoždění o polovinu vzorkovací periody, které musí být odstraněno před porovnáváním s dalšími signály. Dle výroků výrobců přijímačů může GPS poskytnout trojrozměrný vektor rychlosti s přesností 5 cm/s v každé ose. Testy uveřejněné v [2] ukazují, že jsou tyto výroky spíše konzervativní.

Klíčem k použití GPS-měření rychlosti je transformace rychlosti do souřadnic spojených s tělesem dopravního prostředku. To vyžaduje znalost orientace podélné osy vozidla v prostoru (nazývané směr či kurz vozidla), k čemuž se nejčastěji používá snímač úhlové rychlosti v ose otáčení vozidla. Jelikož tento postup vyžaduje integraci signálu, musí být stejnosměrná složka rychlosti změny směru nejdříve



odstraněna. Jednoduchý model gyroskopu předpokládá, že jeho citlivost je známa a jeho výstup se skládá ze skutečné rychlosti otáčení, konstantního offsetu a bílého šumu. Měřená rychlost otáčení může být za účelem odhadu úhlu kurzu a offsetu gyroskopu použita jako vstup do Kalmanova filtru, což je v moderních výzkumech nejobvyklejší postup ([1]-[8]).

#### 1.1.4 Integrace INS a GPS – Kalmanův filtr

Globální polohovací systém a inerciální navigační systémy mají doplňující se vlastnosti. GPS umí poskytnout pozici, rychlost a polohu v prostoru s omezenou přesností, která se ale nezhoršuje s časem. GPS přijímače mohou být považovány za diskrétní snímače, svá měření obvykle poskytují s frekvencí 1 – 10 Hz. Taková vzorkovací frekvence nemusí být dostatečná, mění-li se dynamika vozidla relativně rychle. INS je soběstačný spojitý měřicí systém, který není závislý na vnějších signálech. Nabízí krátkodobou stabilitu, ale má jen omezenou dlouhodobou stabilitu kvůli chybám jeho senzorů. Použitím uvedených doplňujících se vlastností mohou být integrací GPS a INS vytvořeny navigační systémy poskytující dlouhodobou stabilitu i spojitě měření. Existuje několik metod integrace INS a GPS, ve všech se ale jako integrační člen typicky používá nějaká forma Kalmanova filtru.

Ideou Kalmanova filtru je implementace modelu skutečného systému v počítači pracujícím paralelně s modelovaným systémem. Kalmanův filtr je stochastický estimátor stavu, předpokládá se, že pozorovaný objekt je buzen šumem charakterizovaným stochastickými veličinami a že použité senzory jsou stochastickým šumem rušeny. Pro známý lineární stochastický model s gaussovským šumem s nulovou střední hodnotou a známou kovariancí je Kalmanův filtr optimálním rozptyl minimalizujícím filtrem. Pokud by model byl lineární, ale šum negaussovský, je Kalmanův filtr nejlepším lineárním rozptyl minimalizujícím filtrem. Estimátor je řízen stejnými vstupy jako pozorovaný objekt s výjimkou procesního šumu. Princip odhadu stavového vektoru systému je založen na srovnání změřených a odhadnutých výstupů. Vracení zjištěné odchylky zpět do filtru zajišťuje, že odhadovaný stavový vektor bude odpovídat skutečnému stavu objektu [9].

Obvykle se k dosažení přijatelné výkonnosti používá nepřímý (rozšířený) Kalmanův filtr, jehož stavy tvoří chyby inerciální měřicí jednotky (*Inertial Measurement Unit*, IMU). K dosažení výsledků blízkých optimálním je vyžadován filtr vysokého řádu, s nímž je spojena vysoká výpočtová náročnost vyplývající z nutnosti neustálé aktualizace tzv. Kalmanových zisků (matice zesílení). Často se pak ke snížení výpočetního zatížení použijí pevné Kalmanovy zisky, což vede ke zhoršení kvality výsledků. Za účelem eliminace těchto nevýhod představili např. autoři [5] integrační přístup s tzv. přímým Kalmanovým filtrem. Přímý Kalmanův filtr je filtr, mezi jehož stavy se nachází pozice a rychlost zkoumaného vozidla. Základním prvkem navrhované integrace je zpracování všech různých nelineárních operací před

Kalmanovou filtrací a přesunutí maximálního množství nezbytné dynamiky do vlastního filtru. Pochopitelně sofistikovanější modelování inerciálních chyb s rozšířeným Kalmanovým filtrem může zlepšit kvalitu výsledků, ale za cenu výpočetních nároků vyšších o řád i více.

## 1.2 Strukturování pohybu vozidla

V minulosti bylo pohodlí nejdůležitější otázkou při výběru a hodnocení osobních automobilů. Postupně jak se řidiči stejně jako o pohodlí začínají zajímat i o jistotu ovládání vozu, zvyšují výrobci automobilů investice do výzkumu zlepšování jízdní stability automobilů v krizových situacích. Dnešní vozy jsou v každém zlomku vteřiny monitorovány řadou senzorů, jejichž výstupy umožňují palubním počítačům vypočítat, kam chce řidič jet a kam vozidlo skutečně směřuje. Jakmile začne auto dostávat smyk, dříve než si řidič stačí vůbec všimnout, systém jízdní stability automaticky vrátí vozidlo zpět do zamýšleného směru. Systémy snímání pohybu vozu mají dále kromě elektronických stabilizačních systémů uplatnění i při ladění komponent podvozkových skupin a při matematickém modelování chování vozidla.

### 1.2.1 Typické aplikace

- |                           |                                      |
|---------------------------|--------------------------------------|
| • Advanced cruise control | <i>inteligentní tempomat</i>         |
| • Accident avoidance      | <i>předcházení nehodám</i>           |
| • Crash data recording    | <i>zaznamenání dat o nehodě</i>      |
| • Roll-over protection    | <i>ochrana proti převrácení vozu</i> |
| • In-car navigation       | <i>palubní navigace</i>              |
| • Dynamic chassis control | <i>dynamické seřizování podvozku</i> |
| • Next generation ABS     | <i>ABS nové generace</i>             |
| • Airbag deployment       | <i>konfigurace systému airbagů</i>   |
| • Headlamp steering       | <i>směrování předních světel</i>     |
| • Transmission control    | <i>regulace převodové soustavy</i>   |
| • Suspension control      | <i>regulace závěsů kol</i>           |

Obecná definice ACC (*Advanced Cruise Control*) tvrdí, že je to systém nebo metoda pro předcházení automobilovým nehodám, v nichž je určena absolutní pozice automobilu (např. pomocí navigačního systému jako je GPS) a následně pak jeho umístění vzhledem k okrajům vozovky, které vychází ze zjištěné absolutní pozice a z uložených informací o komunikacích, po kterých by vozidlo mohlo cestovat. Pokud se automobil příliš přiblíží hranici vozovky nebo ji protne, aktivuje se výstražný systém, příp. systém automatického navádění.

V praxi se termín ACC pojí především s tzv. inteligentním tempomatem, který pracuje tak, že pokud není před ACC automobilem žádné vozidlo, systém udržuje určenou rychlost nastavenou řidičem, stejně jak je tomu u konvenčního tempomatu.

Je-li před automobilem zjištěno jiné vozidlo, ACC upraví rychlost auta tak, aby byla dodržena řidičem požadovaná vzdálenost. Když překážející vozidlo zmizí, ACC opět zrychlí na původní určenou rychlost.

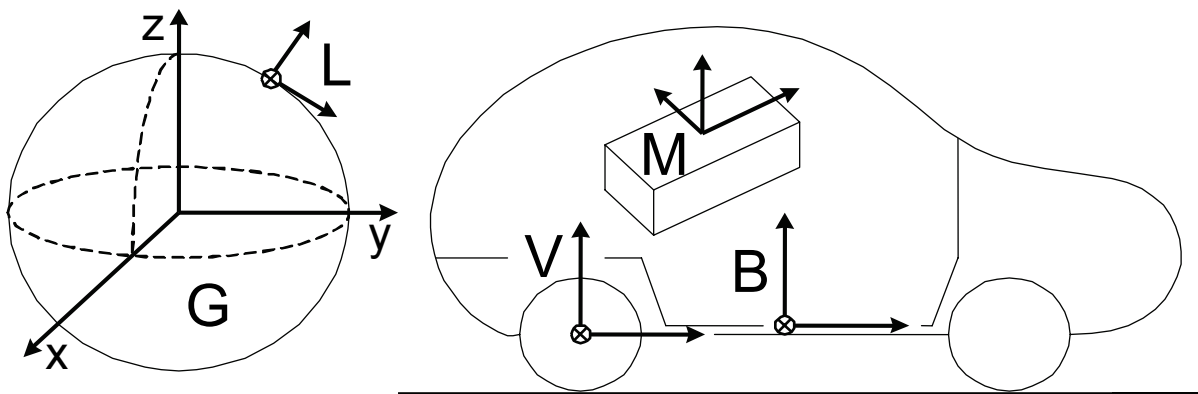
Systemy jízdní stability bývají nazývány různými jmény, lišícími se podle výrobce, který je nabízí. Nejznámějšími pojmy jsou ESP (*Electronic Stability Program*), DSC (*Dynamic Stability Control*) či VDC (*Vehicle Dynamics Control*). Smyk automobilu v pojmech fyziky je jednoduše jeho otáčení kolem vlastní vertikální osy. Čím rychlejší je tato rotace, tím větší je smykový pohyb a tím větší je nebezpečí nehody. Rozdíl mezi ESP a ABS (*Antilock Braking System*) resp. TCS (*Traction Control System*) je právě v tom, že ABS a TCS pracují v podélné ose vozidla tak, aby zamezily ztrátě adheze a pomohly udržet přímou linii jízdy při brždění a akceleraci, zatímco ESP posuzuje chování vozidla a řidiče v okamžicích změny směru jízdy a upravuje pohyb vozidla tak, aby odpovídal pokynům řidiče [13]. Například systém AdvanceTrac od automobilky Ford používá sedm senzorů k monitorování úhlu natočení volantu, rychlostí otáčení kol, stáčivé rychlosti vozidla a dalších faktorů, aby určil, zda se vozidlo pohybuje po trajektorii, kterou řidič zamýšlí. Pokud systém zjistí, že auto dostává smyk zadních kol (přetáčí se), pošle brzdový impuls k vnějšímu přednímu kolu a pomůže tak řidiči se stabilizací auta. Zjistí-li systém, že se naopak přední část vozu pohybuje ven ze zatáčky (nedotáčí), pošle podobný brzdový impuls vnitřnímu zadnímu kolu. Je-li to nutné, systém také sníží výkon motoru.

Oproti ABS nebo TCS vyžadují systémy ESP o podmínkách řízení více informací. K vývoji takového systému je nezbytné získat informace o stáčivé rychlosti vozidla a o úhlech boční směrové úchylnosti vozidla a směrových úchylnostech jednotlivých kol, stejně jako koeficient přilnavosti vozovky. Neexistence levného a zároveň spolehlivého snímače, který by mohl být použit k přímému měření těchto stavů způsobila v posledních výzkumech zvýšení počtu technik stavových odhadů. Protože stáčivá rychlost a směrová úchylnost jsou klíčové hodnoty v různých kontrolních aplikacích, většina odhadových technik se věnuje právě těmto hodnotám.

### **1.2.2 Souřadné systémy**

Jsou-li k dispozici potřebné snímače, je možné přistoupit ke zpracování jejich výstupů. Signály získané z měřicího zařízení můžeme považovat za průběhy dynamických veličin vyjádřených v souřadném systému pevně spojeném s tímto měřicím zařízením. Pro přesnou rekonstrukci pohybu vozidla ale potřebujeme znát průběhy veličin v souřadném systému spojeném s jeho neodpruženou hmotou a umístěným v jeho těžišti. Tyto hodnoty nelze dostatečně přesně vypočítat bez současné detailní znalosti polohy karosérie vozidla v prostoru (viz např. [8]). Přehled uvažovaných souřadných systémů obsahuje Obr. 2 níže.

Souřadný systém  $M$  (*measuring device*) je již dříve zmíněný systém spojený s měřicím zařízením. Systém označený písmenem  $B$  (*body*) je spojený s karosérií vozidla, ve kterém je měřicí zařízení umístěno. Před dalšími výpočty je evidentně nutné specifikovat vztah mezi systémy  $M$  a  $B$ , přičemž předpokládáme, že vzájemná poloha těchto dvou systémů se během zkoušky nemění. Tento proces nazýváme rektifikace signálů a je to jedna z částí problému, které již máme metodicky i technicky zvládnuté. Systém  $V$  (*vehicle*) je souřadný systém vozidla jako celku. Na obrázku je umístěn v oblasti jednoho z kol, aby byl dostatečně patrný rozdíl mezi systémy  $V$  a  $B$ , tj. mezi neodpruženou a odpruženou hmotou vozidla. Jinak se většinou umísťuje do těžiště vozidla, veličiny v něm vyjádřené nejsou ovlivněny kloněním a klopením karosérie a mohou tak již přímo sloužit k popisu jízdních stavů zkoumaného automobilu. Mnohdy ovšem nejsme schopni tyto veličiny dostatečně přesně vyjádřit pouze z naměřených hodnot a jsme nuceni do řešení začlenit ještě další referenční informace.



Obr. 2 – Přehled uvažovaných souřadných systémů

GPS poskytuje speciálně kódované satelitní signály, které umožňují přijímači vypočítat svou polohu a rychlost pohybu. Údaje o poloze jsou přijímači počítány v tzv. ECEF XYZ souřadnicích (*Earth-Centred Earth-Fixed*), kterým v Obr. 2 odpovídá systém označený písmenem  $G$  (*global*). Většinou je přesná poloha na Zemi pro výsledky testů nepodstatná a může být výhodnější převádět výstupy GPS přijímače do lokálního souřadného systému  $L$ . GPS přijímače používají k výpočtu polohy elipsoidní zemský model WGS-84 (*World Geodetic System 1984*), který byl vypočten na základě družicových měření. Pozice v souřadnicích  $x$ ,  $y$ ,  $z$  bývá uvnitř běžně prodávaných přijímačů přepočítávána na souřadnice geodetické.

### 1.2.3 Vybrané modely

Existují dva druhy modelů pro analýzu dynamických vlastností vozidel – model pro analýzu jízdní stability (ovladatelnosti) a model pro analýzu jízdního pohodlí. Modely prvně jmenované třídy lze rozdělit na skupiny modelů lineárních a nelineárních, z nichž každá má jiný počet stupňů volnosti. V rámci výzkumu

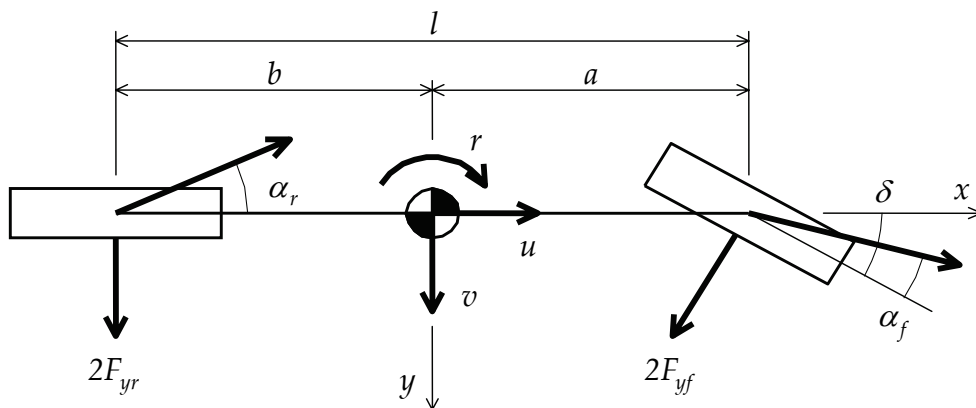
dynamiky automobilů je nutné vždy zvolit model odpovídající konkrétním potřebám. Dvojstupňový (jednostopý) model se obvykle přijímá kvůli jeho jednoduchosti. Tento model zachází s automobilem jako s jízdním kolem, které má pouze přední a zadní kolo, tj. levá a pravá kola jsou na obou koncích vozu spojena do jednoho celku, jak to ukazuje Obr. 3. Použijí-li se boční rychlost  $v$  a stáčivá rychlost  $r$  jako stavové proměnné, mohou být pohybové rovnice pro tento model vyjádřeny následovně:

$$\begin{aligned} m\dot{v} &= -mur + 2F_{yf} + 2F_{yr} \\ I_{zz}\dot{r} &= 2aF_{yf} + 2bF_{yr} \end{aligned} \quad (1)$$

kde  $m$  je celková hmotnost vozidla,  $I_{zz}$  je moment setrvačnosti ve svislé ose,  $u$  je podélná rychlost,  $F_{yf}$ ,  $F_{yr}$  jsou přední resp. zadní boční síly na pneumatikách,  $a$  a  $b$  jsou vzdálenosti mezi přední resp. zadní osou a těžištěm vozidla. Boční sílu na pneumatiku lze považovat za lineárně závislou na úhlu směrové úchyly příslušného kola:

$$F_{yi} = -C_{\alpha i}\alpha_i \quad (2)$$

pro  $i = f$  a  $r$ , kde  $C_{\alpha i}$  je boční tuhost dané pneumatiky.



Obr. 3 – Jednostopý model vozidla

Jednostopý model dává dobrou shodu v lineární oblasti (přibližně pro boční zrychlení do hodnoty 0,3 g), avšak v nelineární oblasti dosahuje významných chyb. Přestože některé výsledky tohoto dynamického modelu nejsou dostatečně přesné, je stále široce používán v mnoha kontrolních aplikacích kvůli jeho jednoduchosti, snadné implementaci a minimu potřebných informací o parametrech vozidla. Proto bylo navrženo několik metod získání lepších výsledků i v nelineární oblasti. Například práce [1] uvádí odhad úhlové rychlosti stáčení použitím vylepšeného dynamického modelu, jímž byly chyby vyskytující se v nelineární oblasti minimalizovány. Navrhovaný model je postaven na následujících třech prvcích, které nejsou v původním jednostopém modelu uvažovány: 1) nelinearity pneumatik; 2) změny bočního zatížení vlivem odstředivých sil během zatáčení; 3) efekt

proměnného převodového poměru vlivem nežádoucích vůlí v řízení, vlivem systémů řízení s posilovačem apod. Boční zrychlení v těžišti vozidla je zde za účelem odhadu stáčivé rychlosti použito jako měřený údaj. Dalšími měřenými vstupy jsou úhel natočení volantu a podélná (dopředná) rychlost. Pohybové rovnice pro tento model mohou být zapsány v maticové formě

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\delta + \mathbf{w} \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\delta + w_y \end{aligned} \quad (3)$$

kde  $x = [v \ r]^T$  je vektor stavových proměnných,  $\delta$  je vstupní úhel natočení volantu,  $w = [w_1 \ w_2]^T$  je procesní šum,  $y$  je měřené boční zrychlení v těžišti a  $w_y$  je šum měření.

Častěji než odhad stáčivé rychlosti z měřeného bočního zrychlení se používá její měření pomocí elektromechanických gyroskopů. Jak již bylo uvedeno, jednoduchý model gyroskopu předpokládá, že jeho výstup se skládá ze skutečné rychlosti otáčení, konstantního offsetu a bílého šumu. Jenže u běžně používaných gyroskopů je právě stejnosměrná část signálu částí nejvíce problémovou, neboť závisí na různých okolních skutečnostech, jako jsou napájecí napětí nebo teplota okolí. Proto vznikají pokročilejší metody modelování výstupů gyroskopů jako např. v práci [3], kde jsou tři ortogonálně uspořádané gyroskopy integrovány s GPS za účelem kontinuálního měření prostorové orientace platformy.

Z pohledu přesnosti mají gyra poměrně stabilní chování během krátkých intervalů a lze je proto účinně použít k omezení vysokofrekvenčního šumu, který se vyskytuje v odhadech orientace založených na výstupech přijímače GPS. Naopak během výpadků GPS signálu mohou být změny orientace platformy odhadovány přímo z gyroskopických měření, což zlepšuje použitelnost systému. Jelikož ale gyra mohou poskytovat informace pouze o úhlových rychlostech, musí být výchozí absolutní orientace určena z GPS, což vyžaduje během inicializační fáze jeho plnou dostupnost. Stavový vektor Kalmanova filtru se v tomto modelu skládá ze tří offsetů gyroskopů, tří Eulerových úhlů a k nim příslušných úhlových rychlostí.

$$\mathbf{X} = \left[ \psi \ \theta \ \varphi \ \dot{\psi} \ \dot{\theta} \ \dot{\varphi} \ \delta w_z \ \delta w_x \ \delta w_y \right]^T \quad (4)$$

Vztah mezi úhlovými rychlostmi, polohovými úhly a offsety gyr je pak dán rovnicí

$$\begin{bmatrix} w_z \\ w_x \\ w_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi)\cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\varphi)\cos(\theta) & \cos(\varphi) & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta w_z \\ \delta w_x \\ \delta w_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

Během výpadků GPS nejsou k dispozici žádné jeho výstupy a parametry polohy jsou odhadovány výhradně z dat gyroskopů, s jejichž použitím může být rotace

platformy určena integrováním odhadovaných úhlových rychlostí. Odhady úhlových rychlostí závisí na výstupech gyroskopů, na jejich ofsetech a také na odhadech polohových parametrů. Úhlové rychlosti jsou z gyroskopických měření počítány přímo po kompenzaci ofsetu takto:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin(\varphi)/\cos(\theta) & \cos(\varphi)/\cos(\theta) \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\theta) \\ 1 & \sin(\varphi)\text{tg}(\theta) & \cos(\varphi)\text{tg}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_z - \delta w_z \\ w_x - \delta w_x \\ w_y - \delta w_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

Výsledky odhadů polohy během výpadků GPS také závisí na délce těchto výpadků, protože nejsou-li k dispozici GPS data pro aktualizaci ofsetu gyroskopů, odhady ofsetů zůstávají nezměněné a zhoršují se vlivem změny hodnot skutečných ofsetů v čase. Kompenzace ofsetů gyroskopů je tak tím méně efektivní, čím větší jsou intervaly nedostupnosti GPS, což následně vede k posunu hodnot polohových parametrů.

Většina Kalmanových filtrů může být považována za virtuální senzory, protože s pomocí matematického modelu a konkrétních měřených signálů mohou být odhadovány neznámé stavy, které je buď příliš složité měřit přímo, nebo jsou příslušné senzory příliš drahé. Například systémy kontroly jízdní stability automobilů vyžadují ke své činnosti informace o prokluzu kol a úhlu směrové úchytky vozidla, které bez přítomnosti drahých specializovaných senzorů pro měření rychlosti pohybu tělesa nad zemí nejsou dostupné. Bez přímých měření je prokluz kola odhadován porovnáním hodnoty ze snímače rychlosti otáčení daného kola s odhadem rychlosti vozidla, který je vypočtený z rychlostí otáčení všech kol, případně s použitím informací z dalších snímačů. Avšak za podmínek vysokého prokluzu, kde jsou systémy kontroly stability nejvíce potřebné, se tento odhad rychlosti vozidla stává méně přesným. V podobných případech klade chyba spojená s odhadem přísná omezení na použitý řídicí algoritmus. Použitím GPS a Kalmanova filtru je ale dle práce [2] možné tyto kritické hodnoty namísto odhadu měřit.

Citovaný experiment je založen na jednostopém modelu. Autorům se daří úspěšně odhadovat úhel boční směrové úchytky vozidla, úhly směrových úchytek jednotlivých kol i jejich prokluz. Ve výpočtovém modelu ale figuruje pouze otáčení vozidla kolem jeho svislé osy, klonění a klopení se neuvažuje, neboť pro dané účely nemá příliš velký význam. Pro účely vyšetřování parametrů automobilových podvozků je ale tento model nevhodný, v takových případech je nutné použít model se šesti stupni volnosti jako například ve [4], kde podobný model slouží k analýze pohybu karosérie, přesněji okamžité polohy její osy otáčení, za účelem nalezení objektivního způsobu posuzování jízdních vlastností, které jsou obvykle určovány pouze subjektivně prostřednictvím testovacích jezdců.

## 2 Cíle disertace

V uplynulých letech bylo na našem ústavu vyzkoušeno několik různých řešení jak za jízdy automobilu zaznamenávat potřebné dynamické veličiny. Na základě těchto zkušeností byla navržena koncepce měřicího zařízení jako černé skříňky s využitím snímačů zrychlení a úhlových rychlostí a s patřičnými podpůrnými obvody pro filtraci a zesílení signálu. Analýza průběhů veličin, jako jsou rychlosti a zrychlení v jednotlivých osách a úhly klonění, klopení a stáčení, má své nezastupitelné místo především v oblasti experimentálního ověřování počítačových simulací při vývoji vozidel, bezpečnostních a srovnávacích zkouškách vozidel a v neposlední řadě v automobilovém sportu.

1. Prvním krokem uvažovaného procesu je v souladu s fakty, uvedenými v kapitole 1.2.2, vhodná konfigurace inerciální měřicí jednotky. V tomto ohledu je pro nás většinou nejdůležitější operativnost přípravy zkoušeného automobilu. Požadavek snadného a rychlého umístění IMU v jakémkoliv vozidle do značné míry omezuje přesnost zarovnání os souřadného systému měřicího zařízení se souřadným systémem karosérie vozidla. I v případě, že by zarovnání těchto dvou systémů bylo absolutně přesné, je nutné počítat s absolutní chybou orientace odpružené hmoty vozidla (ať už vlivem náklonu způsobeného nerovnoměrným obsazením vozidla posádkou či v důsledku podélné směrové úchylnosti pocházející z nepřesné geometrie náprav), kterou je z praktického hlediska vhodné k rozdílu výše uvedených souřadných systémů přičíst. Proto je třeba v první řadě vytvořit obecnou metodiku autonomní rektifikace IMU, přičemž termín „autonomní“ je zde použit ve smyslu, že hledaný rektifikační proces nepotřebuje ke své realizaci jiné signály, než výstupy dané inerciální jednotky.
2. Následujícím úkolem, jedním ze stěžejních, je sestavení a exaktní matematické vyjádření postupu úplné rekonstrukce pohybu karosérie vozidla z naměřených signálů, tedy nejen rekonstrukce pohybu vozidla jako celku, jako hmotného bodu pohybujícího se v lokálním souřadném systému, ale také pohybů odpružené hmoty vozidla, jakožto tělesa se šesti stupni volnosti. Již tak komplexní problém je ještě komplikován požadavky technické diagnostiky na operativní přípravu zkoušeného vozidla a na dostupnost maximálně širokého spektra potenciálních zákazníků. Z toho vyplývá praktická nepoužitelnost specializovaných, např. optických, snímacích systémů, které vyžadují časově a technicky náročnou aplikaci na zkoušené vozidlo, potažmo nutnost vyrovnat se ve výpočetním modelu s řadou neznámých parametrů vozidla a dalších nepřesností. Zařazení dynamické filtrace se zpětnou vazbou do procesního řetězce je předpokládaným řešením tohoto problému. Úkolem disertační práce je proto vytvoření modelu výše



popsaného pohybu a sestavení rovnic dynamického filtru. Dostupná literatura je v tomto ohledu dobrým zdrojem dílčích modelů, které bude pravděpodobně možné využít při návrhu komplexního modelu, jemuž podobná definice přímo nalezena nebyla.

3. Samotné výstupy inerciální jednotky jsou zatíženy degradujícími faktory jako jsou vysokofrekvenční šum použitých snímačů nebo závislosti definičních parametrů snímačů na vlastnostech okolí, především napájecím napětí a teplotě prostředí. Poslední jmenovaný faktor činí obvykle největší potíže v případech, kdy nelze z finančních nebo technických důvodů, použít pokročilé mikro-elektro-mechanické snímače s integrovanou teplotní korekcí, ale je potřeba se spokojit s tzv. low-end senzory. Jako zdroj referenčních informací k odstranění nežádoucích vlivů se v mnoha aplikacích čím dál častěji používá globální navigační systém GPS. Jak již bylo nastíněno v kapitole 1.2.3, nachází se v dostupné vědecko-technické literatuře řada modelů integrace GPS a INS. Bohužel žádný z nalezených modelů nevyhovuje přesně specifikaci problému, který má být v disertační práci řešen. Navíc mnoho z nich používá speciální jednoúčelové GPS přijímače, které jsou sice vysoce přesné (viz. Tab. 2), ale také vysoce nákladné a těžko dostupné. Z toho důvodu je dalším cílem disertační práce nalezení vhodné modifikace modelu systému, vycházející ze zařazení výstupů běžného integrovaného GPS přijímače mezi měřené signály.
4. Druhým ze stěžejních úkolů disertace je návrh a realizace analytického software, schopného detailního rozkladu rekonstruovaného pohybu na jednotlivé dynamické parametry, které jsou významné při posuzování chování vozidla během jízdni zkoušky. Hlavní vlastností tohoto software by měla být možnost promítání zaznamenaného pohybu, a to jak ve formě uceleného náhledu na kompletní absolvovanou trajektorii, tak formou maximálně možného rozfázování pohybu, které by umožňovalo podrobné studium důležitých jízdni parametrů v konkrétních izolovaných okamžicích zkoušky. Tyto požadavky by z velké části případně zcela mohl splňovat některý z analytických programů dodávaných k telemetrickým systémům (od výrobců jako Stack, Motec, Magneti-Marelli a dalších), používaným v automobilovém sportu. Problémem těchto aplikací je obtížná dostupnost bez současného pořízení nákladného hardware a naprostá uzavřenost, typická pro komerční systémy, která je činí obtížně použitelnými při experimentálních a výzkumných činnostech. Součástí vlastního vývoje programového vybavení bude zároveň konzultace možností integrace a reprodukce videozáznamu společně s ostatními signály a možností začlenění komponent mapového software, což jsou funkce, které existující programy běžně nenabízejí.

### 3 Stav řešení

Rekonstrukcí pohybu vozidla se obvykle rozumí získání co nejúplnější informace o pohybu vozidla pomocí vhodně zvolených snímačů. Zejména se jedná o polohu karosérie v prostoru, o úhly směrových úchylek na nápravách a v těžišti a o podélné a příčné zrychlení. Možnostmi rekonstrukce se zabývá článek [10], který vznikl v rámci rozsáhlých měření jízdních manévřů vozidel. Zkoušky byly voleny tak, aby byl simulován jeden z charakteristických manévřů vozidla, kterým je změna jízdních pruhů. Testováno bylo celkem sedm užitkových a osobních vozidel, včetně jízdní soupravy. Testovací vozidlo Škoda Octavia bylo pro účely rekonstrukce pohybu osazeno senzory rozdělenými do tří subsystémů. První subsystém byl tvořen snímači firmy Corrsys-Datron GmbH. Snímače druhého subsystému (snímače zrychlení ADXL105 firmy Analog Devices a snímače úhlové rychlosti Gyrostar ENF-05D-52 firmy Murata) byly integrovány do již zmiňovaného měřicího přístroje MBox a třetí subsystém byl určen k měření trajektorie vozidla.

Cílem uvedeného článku [10] bylo vyzkoušet využití jednak optických snímačů od firmy Corrsys-Datron a jednak snímačů zrychlení a úhlových rychlostí v měřicím přístroji MBox. Základem pro programové vyhodnocení obou variant měření je představa pevného tělesa, reprezentujícího karosérii, pohybujícího se v prostoru. V každém měřeném okamžiku musí být splněny podmínky, které předepisují shodnost měřených signálů s vypočítanými signály z virtuálních snímačů. Vhodnou kombinací těchto podmínek a stavových veličin ovlivňujících pohyb hmoty je možné zrekonstruovat sledovaný kinematický děj.

Ve variantě 1 byly s využitím snímačů od firmy Corrsys-Datron snímány horizontální rychlost a úhel směrové úchyly bodu v přední a v zadní části vozu, výška v přední části vozu a dvě výšky v levém a v pravém bodu zadní části vozu. Měřené signály byly zvoleny tak, aby bylo možné spočítat vektor rychlosti pohybu počátku souřadného systému tělesa, jeho stáčivou rychlost, úhel klopení a klonění, úhel směrové úchyly těžiště, úhel směrové úchyly zadní nápravy a v případě znalosti natočení předních kol i úhel směrové úchyly přední nápravy. Derivací je možné získat i další veličiny jako je např. podélné a příčné zrychlení.

U varianty 2 se využívá signálů měřicího přístroje MBox, který je navržen tak, aby snímal informace o všech šesti stupních volnosti karosérie, tj. zrychlení pro translační pohyby a úhlové rychlosti pro pohyby rotační. Vzhledem k omezenému počtu měřicích kanálů nebylo vždy měřeno svislé zrychlení a úhlová rychlost klonění, proto byly zavedeny zjednodušující předpoklady, a to že výška vozu a úhel klonění se v průběhu měření nemění. Výsledky výpočtů ukázaly, že obě prezentované metody mají pro stanovení polohy karosérie vozidla v prostoru stejně dobrý potenciál.

### 3.1 Realizovaná měřicí zařízení

Současná, v pořadí třetí, realizace zařízení MBox byla osazena osvědčenými snímači zrychlení ADXL105 firmy Analog Devices a aktuálně novými modely gyroskopických senzorů úhlových rychlostí ENC-03J firmy Murata. Oproti předchozí verzi byl integrován výkonný mikrokontroler ADuC812 také od firmy Analog Devices a jednotka pro zaznamenávání výsledků měření na přenositelné paměťové médium. Díky těmto modifikacím se z MBoxu stalo naprosto samostatné, nezávislé měřicí zařízení, které je možno kvalifikovat jako SINS.

Měřené veličiny při uvažované metodě bezdemontážní diagnostiky tlumičů (analýza pohybu karoserie při brzděném manévru) dosahují maximální frekvence do 20 Hz. Vyšší kmitočty již nejsou způsobeny vlastním kýváním karoserie, ale jejím kmitáním. Po předchozích zkušenostech byly snímače v MBoxu opatřeny hardwarovým dolnoproputným filtrem s mezní frekvencí 30 Hz. Zatímco pro přesné výsledky lokalizace je nutno analyzovat i



Obr. 4 – Měřicí box třetí generace

pohyb karoserie (odpružené hmoty), bezdemontážní diagnostika závěsů kol jízdní zkouškou zase vyžaduje sledovat rychlost vozidla jako celku. Problémy lokalizace a diagnostiky podvozku tedy spolu z hlediska snímání a zpracování signálů velmi úzce souvisí a jsou proto řešeny v podstatě společně.

S tímto úmyslem bylo v rámci projektu Fondu vědy Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně s číslem BD 135 3029 realizováno zařízení schopné měřit bezdrátově v reálném čase zrychlení neodpružené hmoty podvozkových skupin všech čtyř kol osobního automobilu. Základem jsou akcelerometry řady ADXL202/210 s duty-cycle výstupem umístěné v hliníkovém, mechanicky odolném pouzdře. Snímače jsou spojeny kabelem s centrální jednotkou, která zajišťuje sběr dat ze snímačů, jejich zpracování jednoduchým mikrokontrolerem ATtiny2313 a následný rádiový přenos do operátorského počítače, realizovaný prostřednictvím modulů Aerocomm AC4486, komunikujících v ISM pásmu s generální licencí na frekvenci 868 MHz. Na straně PC je přijímač, který zajišťuje převod rádiového signálu na sériová data, která dále předává do PC přes komunikační rozhraní USB.

## 3.2 Knihovna diagnostických rutin

Současně s pořizováním hardwarového vybavení započala také realizace obslužného software. Základem aplikace je dynamicky linkovaná knihovna (*Dynamically Linked Library*, DLL) pojmenovaná *Vehicle Diagnostics Library*, která obsahuje exportované třídy, rozhraní a funkce pro digitální zpracování signálů. Kromě jmenných symbolů obsahuje také typovou knihovnu (*Type Library*) pro snadné použití v jazyce Visual Basic, potažmo v prostředí VBA aplikace Excel a jiných. Knihovna umožňuje sestavit si vlastní softwarový řetězec pro číslicové zpracování signálu. Digitální signál je zde chápán jako vícekanálová řada vzorků, v níž konkrétní vzorek může být identifikován buď svým pořadovým číslem nebo časem sejmutí. Libovolný řetězec je možné sestavit pomocí čtyř základních abstraktních elementů, pro které jsem pro účely této knihovny zavedl následující pojmenování:

- Buffer – slouží primárně k zachycení proudu vzorků vícekanálového signálu. Zprostředkovává přístup k jednotlivým vzorkům a zajišťuje synchronizaci procesorů.
- Processor – reprezentuje objekt, který provádí výpočetní či manipulační operace se vzorky signálu. Typicky se jedná o filtr, integrátor nebo jiný kalkulační případně akviziční proces.
- Source – představuje zdroj dat digitálního signálu. Data mohou pocházet z fyzického souboru, z některého komunikačního portu nebo mohou být zdrojem generována.
- Target – představuje cíl, neboli místo pro uložení zpracovaných dat. Pracovní řetězec může být zakončen buď objektem typu Target, který přijatá data konečným způsobem zpracuje (uloží do souboru, vykreslí na obrazovku apod.), nebo objektem typu Buffer, který signál pouze zachytí v operační paměti pro další použití.

Spojování elementů do řetězce probíhá pomocí dvou významově opačných rozhraní *ISource* a *ITarget*, neboť procesní řetězec je možné zjednodušit maximálně do tvaru zdroj-cíl. Pojmeme-li zdroj a cíl jako abstraktní rozhraní, pak zdrojem případně cílem může být kterýkoliv z výše uvedených základních elementů. Zatímco Source a Target plní skutečně pouze úlohu zdroje resp. cíle, komponenty Buffer a Processor pracují uprostřed řetězce, a proto mohou pracovat v obou rolích, implementují obě tato rozhraní. Uvažujme řetězec ve formě zdroj-proces-cíl. Pak proces je cílem pro zdroj a zdrojem pro cíl, přičemž za zdrojem i cílem se může skrývat další proces.

V době vzniku tohoto pojednání knihovna úspěšně slouží k post-procesovému zpracování datových souborů z měřicího zařízení MBox i k obsluze datového toku z bezdrátových akcelerometrů v reálném čase. Podporuje zatím základní funkce uživatelského rozhraní, jako jsou rychlé náhledy obsahu souboru, detailní výřezy, filtrace a decimace signálu a zpracování časových bran. Ve fázi rozpracování je třída

typu Processor interpretující věty ve formátu NMEA [21] přicházející z přijímače GPS. Následují grafické komponenty typu Target sloužící k zobrazení vypočtených dynamických parametrů vozidla, pomocí nichž by měla v konečné fázi vzniknout virtuální palubní deska, která bude plnit funkci uživatelského rozhraní při analýze zaznamenaných jízdních zkoušek.

Součástí této palubní desky by mělo být i okno umožňující zobrazení polohy testovaného automobilu na mapě. Tato funkce bude zřejmě pouze dodatečná v tom smyslu, že bude dostupná, pouze pokud bude mít uživatel nainstalován jiný mapový software, který bude umět zobrazit svou mapu v podobě jiného programu. Hlavní plánovanou funkcí je ovšem synchronizovaná prezentace dynamických parametrů vozidla s audiovizuálním záznamem jízdni zkoušky. Každé digitální video má tzv. frame-rate, což je vlastně vzorkovací frekvence (počet snímků za vteřinu), která má například u systému PAL hodnotu 25 Hz. Ze závěrů článku [12] pak vyplývá, že rekonstrukce synchronizačního signálu z videozáznamu je prakticky realizovatelná prostřednictvím prahování energie obrazové funkce a k synchronizaci obou zdrojů signálu tak zbývá pouze navrhnout vhodné synchronizační zařízení, které bude generovat pravidelný vizuální signál a zároveň odesílat napěťové pulsy na značkovací vstup měřicího zařízení MBox.

## Reference

- [1] Shin M, Bae S, Lee JM, Lee J, Heo SJ, Tak TO, New Vehicle Dynamics Model for Yaw Rate Estimation. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 37 (2002), Suppl. S, pp. 96-106.
- [2] Bevely DM, Gerdes JC, Wilson C, The Use of GPS-based Velocity Measurements for Measurement of Sideslip and Wheel Slip. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 38 (2002), No. 2, pp. 127-147.
- [3] Wang C, Lachapelle G, Cannon ME, Development of an Integrated Low-Cost GPS/Rate Gyro System for Attitude Determination. *Journal of Navigation*, Vol. 57 (2004), No. 1, pp. 85-101.
- [4] Fukuba H, Adachi T, Yoshimoto A, Takahashi H, Yoshioka T, Measurement of Vehicle Attitude with RTK-GPS for Analyzing the Vehicle Motion Behavior. *JSAE Review*, Vol. 24 (2003), No. 3, pp. 313-320.
- [5] Qi HH, Moore JB, Direct Kalman Filtering Approach for GPS/INS Integration. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38 (2002), No. 2, pp. 687-693.
- [6] Omae M, Shimizu H, Fujioka T, GPS-based Automatic Driving Control in Local Area with Course of Large Curvature and Parking Space. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 42 (2004), Nos. 1-2, pp. 59-73.

- [7] Best MC, Gordon TJ, Dixon PJ, An Extended Adaptive Kalman Filter for Real-time State Estimation of Vehicle Handling Dynamics. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 34 (2000), No. ??? , pp. 57-75.
- [8] Hong S, Lee MH, Kwon SH, Chun HH, A Car Test for the Estimation of GPS/INS Alignment Errors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 5 (2004), No. 3, pp. 208-218.
- [9] Venhovens PJT, Naab K, Vehicle Dynamics Estimation Using Kalman Filters. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 32 (1999), Nos. 2-3, pp. 171-184.
- [10] Porteš P, Rekonstrukce pohybu automobilu na základě měřených signálů. Sborník přednášek národní konference Inženýrská mechanika 2002. Svratka: UMT FSI VUT v Brně, 2002. ISBN 80-214-2109-6.
- [11] King AD, Inertial Navigation – Forty Years of Evolution. *GEC Review*, Vol. 13 (1998), No. 3, pp. 140-149.
- [12] Havlík J, Synchronizace EEG záznamu a videozáznamu při snímání pohybu prstu ruky. Katedra teorie obvodů, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze.
- [13] Silicon Sensing – Case Studies – ABS/ESP. » <http://www.siliconsensing.com> «
- [14] MIT Media Laboratory – PPhysics and Media Group Research – Field Imaging and Inertial Sensing. » <http://www.media.mit.edu/physics/projects.html> «
- [15] Pickering KA, Columbus and Dead Reckoning Navigation.  
» <http://www1.minn.net/~keithp/dr.htm> «
- [16] How Black Boxes Work. » <http://www.howstuffworks.com/black-box.htm> «
- [17] L-3 Communications – Aviation Recorders. » <http://www.l-3ar.com> «
- [18] Micro Spacecraft to Pave the Way for Future Space Exploration.  
» <http://www.nasa.gov/centers/ames/research> «
- [19] About Digital Tachograph. » <http://www.digitaltachograph.gov.uk> «
- [20] GPS Centrum – Aplikční GPS přístroje. » <http://www.gpscentrum.cz> «
- [21] NMEA data. » <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm> «
- [22] Institute for Road Safety Research – Research Activities 24 – Advanced Cruise Control and Road Safety. » <http://www.swov.nl/en/publicaties/index.htm> «
- [23] Polhemus, three-dimensional scanning, position/orientation tracking systems, eye tracking and head tracking systems. » <http://www.polhemus.com> «