

POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE

06 INERCIÁLNÍ NAVIGACE

doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

- Princip
- Sensory inerciálních jednotek
- Souřadnicové systémy v inerciální navigaci
- Typy řešení inerciálních navigačních jednotek
- Chyby inerciálních sensorů

- inertia = setrvačnost
- Inertial Measurement Unit (IMU) = inerciální měřicí jednotka
- Inertial Navigation System (INS) = inerciální navigační systém
- Dead Reckoning (DR) = technika navigace, kdy známe výchozí polohu a pomocí měření směru a rychlosti pohybu stanovujeme aktuální polohu
 - v minulosti hojně využívána technika v námořní navigaci
 - dnes ve spojení zejména s inerciálními navigačními systémy

- **IMU (Inertial Measurement Unit) = zařízení měřící zrychlení a změnu orientace, díky čemuž je schopné určovat rychlost a směr pohybu a z nich odvozovat změnu své polohy v čase**
- pro absolutní určení polohy je potřeba znát souřadnice výchozí polohy (plus výchozí orientaci v prostoru a rychlost pohybu)
- po inicializaci je nezávislý na jakékoliv externí referenci, příjmu signálů, prostředí, atd.
- vysoká obnovovací frekvence výstupu (běžně 10 až 1000 Hz)
- chyba určení polohy se v čase akumuluje, tzv. integrační drift (možno eliminovat (ne)pravidelným vstupem z jiného zdroje, např. GNSS)

- nositelná elektronika (fitness náramky, krokoměry)
- mobilní zařízení (orientace a náklon displeje, hraní her, virtuální a rozšířená realita)
- navigace robotických systémů (robotické sekačky, vysavače, atd.)
- navigace vozidel
- navigace lodí, podvodních plavidel (ponorky)
- navigace letadel, dronů
- navádění raket, torpéd (výrazný vývoj během 2. světové války - německé rakety V2)
- navigace raket, družic

- inerciální jednotky využívají měření následujících senzorů:
 - **akcelerometr** (měření zrychlení)
 - **gyroskop** (měření úhlové rychlosti)
 - **magnetometr** (měření orientace vůči magnetickému severu, ne vždy tvoří součást IMU)
- barometr – některé IMU jednotky bývají doplněny barometrem pro měření změny atmosférického tlaku vzduchu, což umožňuje přesně odvozovat změnu nadmořské výšky

- pro navigaci v 3D prostoru (x, y, z) jsou standardně využívány jednotky s trojicí gyroskopů a trojicí akcelerometrů -> pro měření na jedné ose je potřeba jeden gyroskop a jeden akcelerometr:
 - Pohyb dopředu a dozadu (akcelerometr)
 - Pohyb doleva a doprava (akcelerometr)
 - Pohyb nahoru a dolů (akcelerometr)
 - Naklánění doleva a doprava (gyroskop)
 - Naklánění dopředu a dozadu (gyroskop)
 - Otáčení v rovině doleva a doprava (gyroskop)

- zařízení sloužící k měření zrychlení v definovaném směru
- zrychlení = změna rychlosti za jednotku času [$m \cdot s^{-2}$]
 - integrací zrychlení podle času získáme rychlost pohybu
 - integrací rychlosti získáme ujetou dráhu

- do určité míry je možno měřit i úhel náklonu zařízení
- běžně využíváno mobilními zařízeními (mobily, tablety) k rozpoznání orientace displeje
- díky gravitačnímu zrychlení je měření jedné z os vždy vychýleno, viz obrázek na předchozí straně
- podle toho, která z os je vychýlená, je možno poznat, zdali je zařízení orientováno na výšku, na šířku, leží displejem nahoru či dolů – je však potřeba, aby zařízení bylo v danou chvíli v klidu

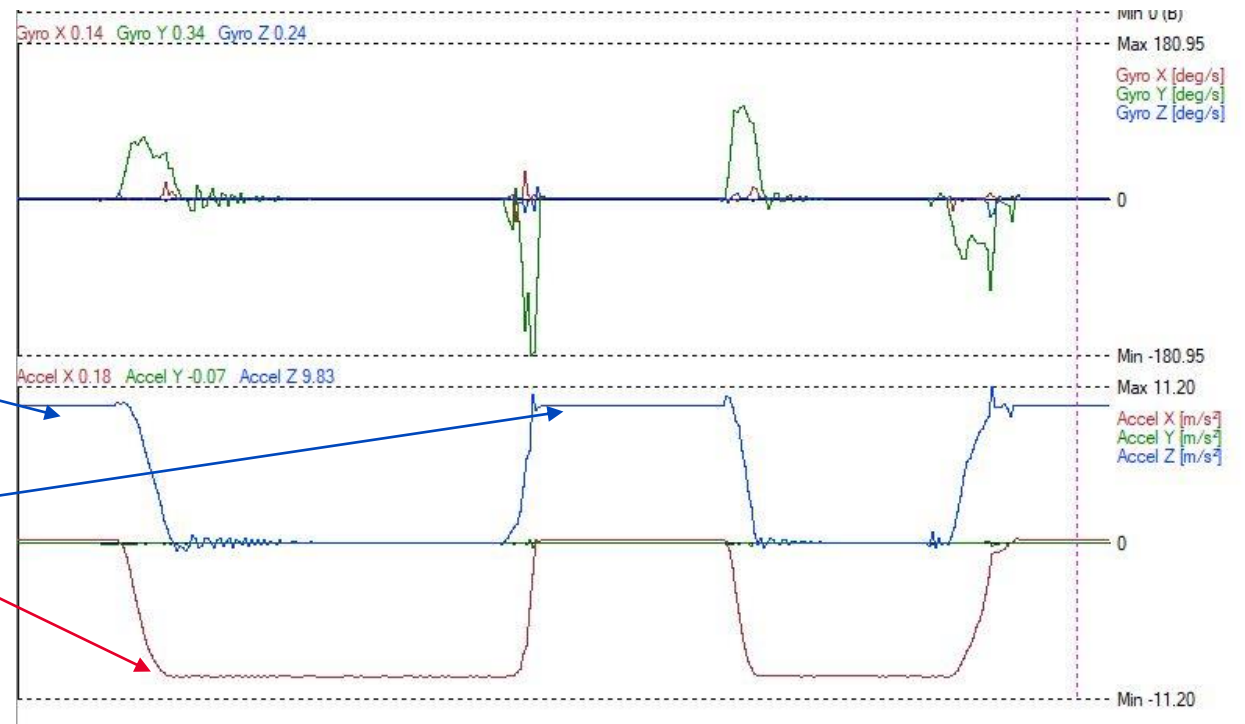
Ukázka záznamu z tříosého akcelerometru a gyroskopu nízkonákladové jednotky u-blox M8U

V záznamu se 2x zopakuje manévr:

1, jednotka leží (osa z směřuje nahoru, měří tíhové zrychlení)

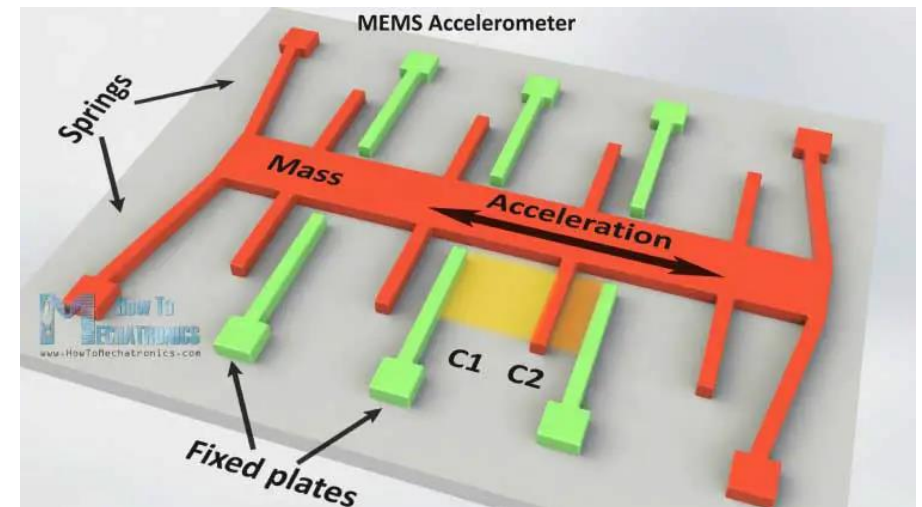
2, jednotka je postavena na stojato (osa x směřuje dolů, měří tíhové zrychlení)

3, jednotka je zpět položena



MEMS akcelerometr

- existuje celá řada konstrukčních řešení akcelerometrů, většina z nich však využívá principu vychýlení tělesa způsobeného zrychlením a měřením velikosti jeho pohybu
- dnes je nejběžnější využití technologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), která obecně slouží ke kombinování elektrických a mechanických komponent v miniaturních čipech – změna fyzikálních veličin se zjišťuje pomocí elektromagnetických charakteristik miniaturních oscilujících a pohybujících se součástí
- **MEMS akcelerometr:** jedná se o tzv. kapacitní akcelerometr – vlivem zrychlení dochází k pohybu jedné elektrody a měření změny elektrických charakteristik vůči jedné či dvěma pevným elektrodám



- další běžné typy akcelerometrů:
 - piezoelektrický – vlivem zrychlení dochází k deformaci piezoelektrické struktury (krystal) a generaci elektrického napětí
 - piezorezistivní – vlivem deformace piezoelektrického krystalu dochází ke změně elektrického odporu
 - mechanický - pohyblivé těleso je připevněno na pružinách k rámu a je měřen jeho pohyb

- zařízení sloužící k měření úhlové rychlosti okolo definované osy či k zachování orientace
 - úhlová rychlost (ω , $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) = změna úhlu v obloukové míře (radiány) za jednotku času, jinými slovy rychlost otáčení objektu okolo konkrétní osy rotace
 - například ručičky všech hodin a hodinek mají stejnou úhlovou rychlost
- v praxi využit již za 1. sv. války Německem pro udržení torpéda v přímočarém pohybu (Ignác Kotrnetz)

Mechanický gyroskop

- využívá principu zákona zachování momentu hybnosti
- jde o setrvačnick (rotor) připevněný prostřednictvím osy rotace ke gimbalu (závěsu), který je připevněn k rámu
- po roztočení má setrvačnick tendenci udržet směr rotace bez ohledu na otáčení rámu gyroskopu – nutná je však dostatečná rychlost otáčení



Optický gyroskop

- dvě technologie: Fiber Optics Gyroscope (FOG) nebo Ring Laser Gyroscope (RLG)
- využití Sagnacova efektu
- princip:
 - laserový paprsek je vyslán po směru a proti směru hodinových ručiček v použité struktuře (u FOG cívka optického vlákna)
 - s ohledem na rotaci struktury okolo své osy jeden z paprsků urazí kratší/delší vzdálenost
 - výsledný fázový posun odpovídá úhlové rychlosti rotace a je možno jej interferometricky odvodit
- vysoká přesnost, vysoká cena

Vibrační gyroskop

- nejrozšířenější řešení v běžných IMU jednotkách
- k měření úhlové rychlosti využívá Coriolisovy síly (setrvačná síla působící na pohybující se tělesa, možno pozorovat např. při točení víru při odtoku vody z umyvadla)
- základem je objekt upevněný pomocí pružin v rámu, periodicky se pohybující, jeho rotace vyvolá Coriolisovu sílu a způsobí měřitelné stlačení pružin
- existuje řada konstrukčních řešení
- dnes je nejběžnější využití technologie MEMS
- miniaturní velikost, nízká cena, omezená přesnost

Gyroskop - ukázka

- Analýzou periodického signálu z akcelerometrů či gyroskopů je možné např. měřit kroky
- *Příklad: výstup tříosého gyroskopu v běžném mobilním telefonu zachycený během chůze – v jednotlivých sloupcích jsou výstupy pro různé umístění telefonu během chůze*

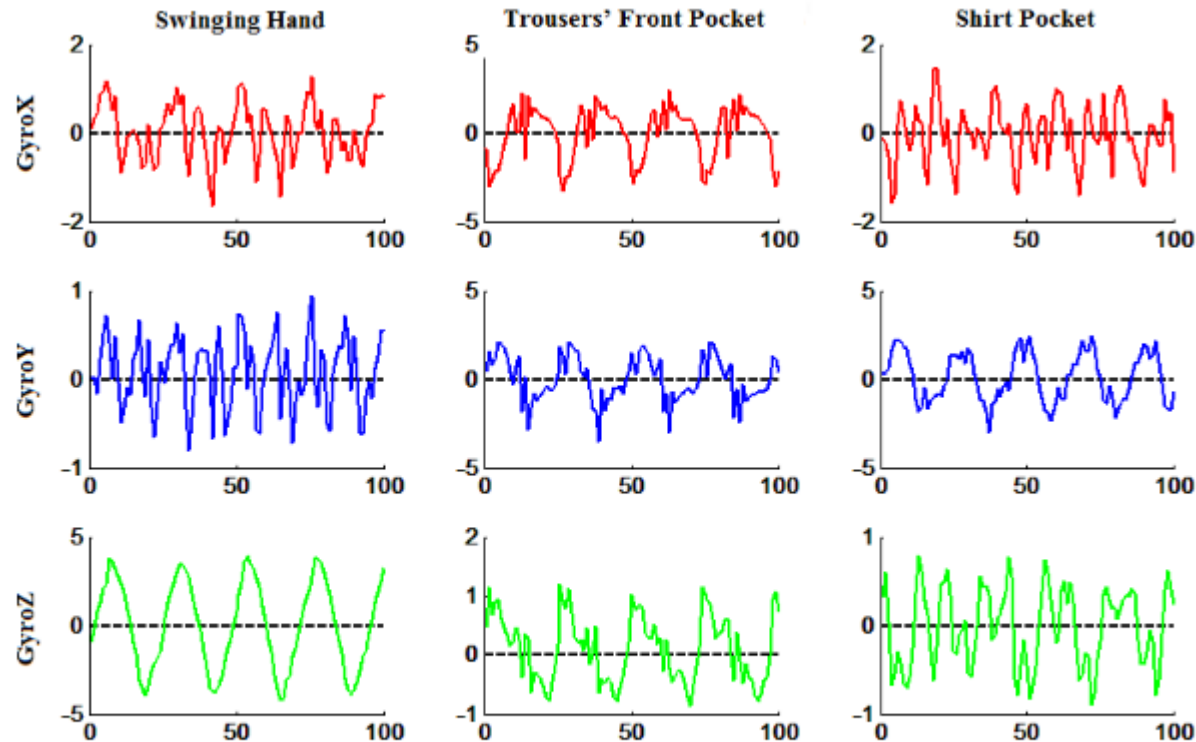
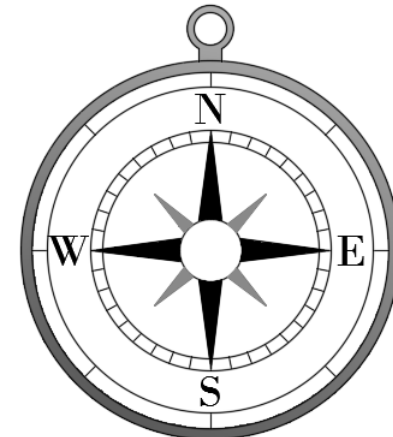


Figure 1. The 3D data derived by the gyroscope of a smartphone placed in three different positions. The horizontal axes denote time.

Zdroj: Kang et al. (2018)

Magnetometr

- zařízení měří sílu a směr magnetického pole Země
- umožňuje určit orientaci zařízení vůči magnetickému severu (k přepočtu vůči reálnému severu je potřeba znát hodnotu magnetické deklinace v místě měření)
- vysoká citlivost na magnetické pole okolních předmětů a objektů (problém v blízkosti magnetických kovů)
- v IMU jednotkách se využívá zejména pro kalibraci měření úhlu okolo svislé osy (otáčení doleva a doprava v horizontální rovině)



Magnetometr

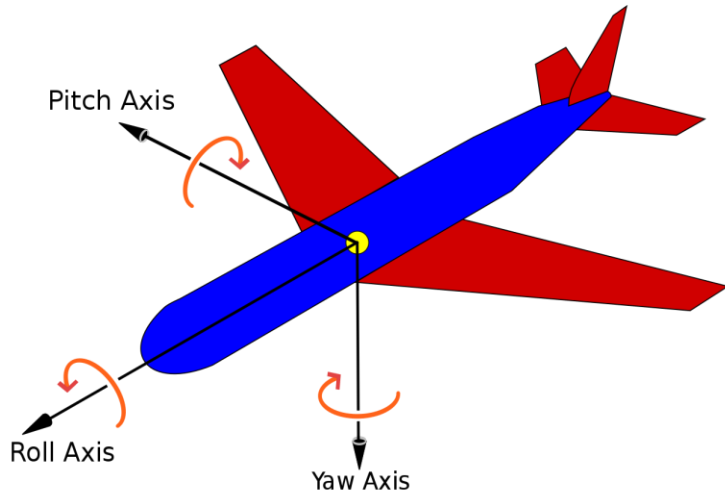
- magnetometry využívající tzv. Hallova jevu
 - vznik příčného napětí v polovodiči vystaveném magnetickému poli, to je kolmé na protékající proud
- magnetorezistivní magnetometry
 - využívají materiály citlivé na magnetické pole (obvykle železo a nikl)
 - změnou magnetického pole dochází ke změně jejich odporu

Souřadnicové systémy

Letadlo, robot, respektive jakýkoliv objekt se při svém pohybu ve 3D prostoru může otáčet okolo tří os (tzv. Tait-Bryanovy úhly):

- **yaw (heading)** – kurz udaný rotací okolo svislé osy v rozsahu 0-360 °
- **pitch** – klopení nahoru/dolů v ose směru pohybu stroje
- **roll** – náklon doleva/doprava v ose směru pohybu stroje

Zdroj <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-measurement-unit-imu-an-introduction/>



yaw



pitch



roll

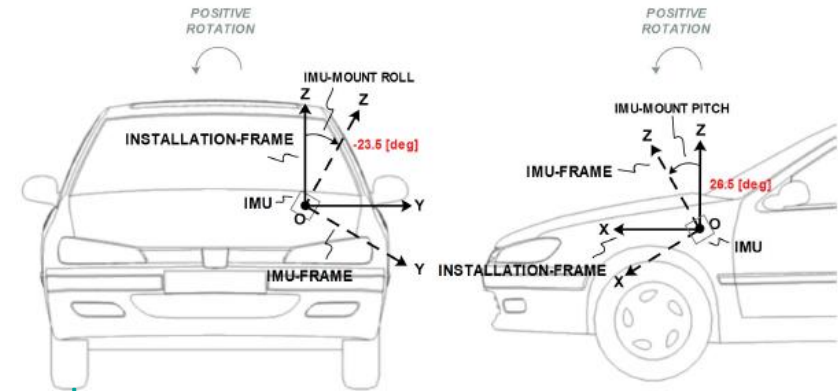
Zdroj https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_principal_axes

Souřadnicové systémy

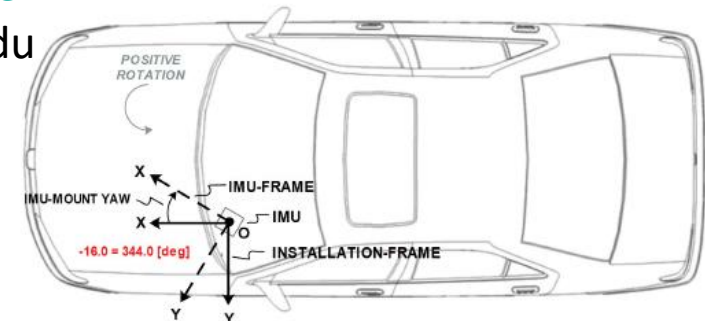
1. souřadnicový systém IMU (IMU frame) – počátek a orientace os x , y , z čipu obsahujícího inerciální sensory
2. souřadnicový systém konstrukce pohybujícího se objektu (body frame) – počátek a orientace os x , y , z definujících směr pohybu objektu (x – obvykle dopředu, y – doleva, z – svisle nahoru)
3. (výsledný souřadnicový systém) – např. ECEF souř. systém WGS-84, orientace os x , y , z (LAT , LON , h) vztažených k rotačnímu elipsoidu



1. Souřadnicový systém konstrukce IMU, příklad čipu u-blox ZED-F9R, osa z směřuje nahoru



2. Souřadnicový systém konstrukce pohybujícího se objektu na příkladu vozidla a vyjádření jeho orientace vůči 1. Souřadnicovému systému konstrukce IMU



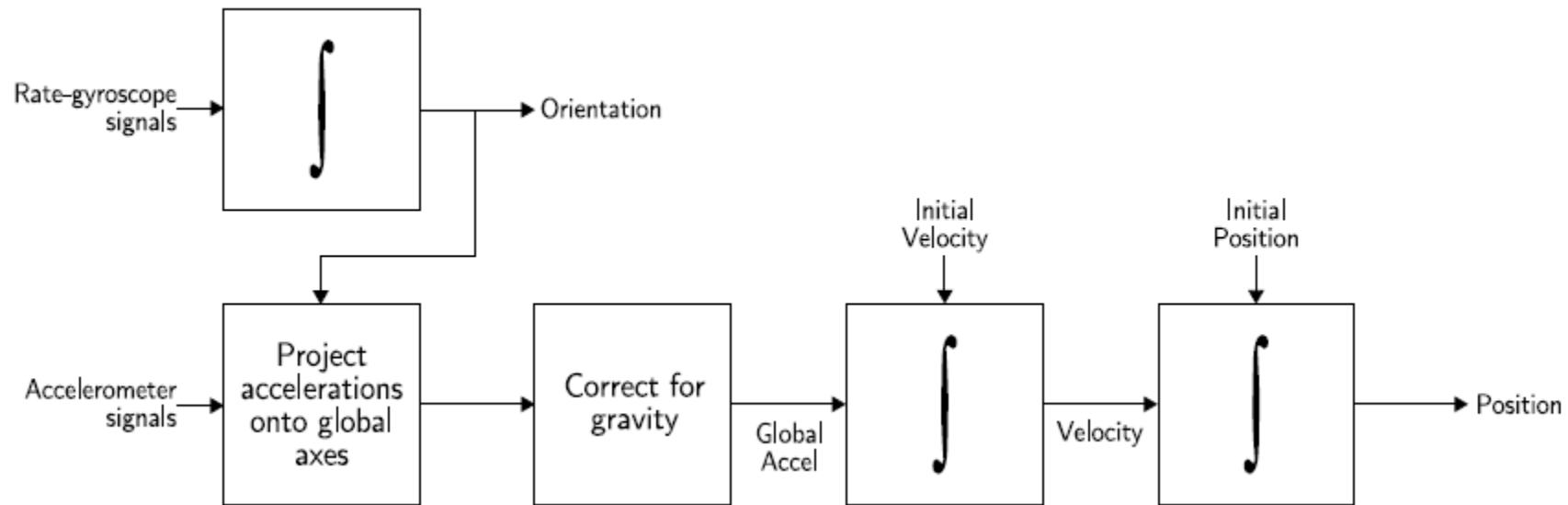
Zdroj obrázků: UBX-22035176 - R01

Strapdown systémy

- strapdown systém = řešení, kdy je IMU fyzicky instalována přímo na rám pohybujícího se objektu
- IMU musí být instalována takovým způsobem, aby její souřadnicový systém (**IMU frame**) byl zcela ve shodě se souřadnicovým systémem konstrukce pohybujícího se objektu (**body frame**)
- pokud toto není splněno, musí být IMU nastaveny korekční úhly, které pro všechny tři osy specifikují rozdíl mezi orientací osy IMU a odpovídající osy konstrukce pohybujícího se objektu (*viz obrázek na předchozím snímku*)
- chyby v nastavení korekčních úhlů vedou při provozu k chybám v určování polohy (rychlosti, směru)!

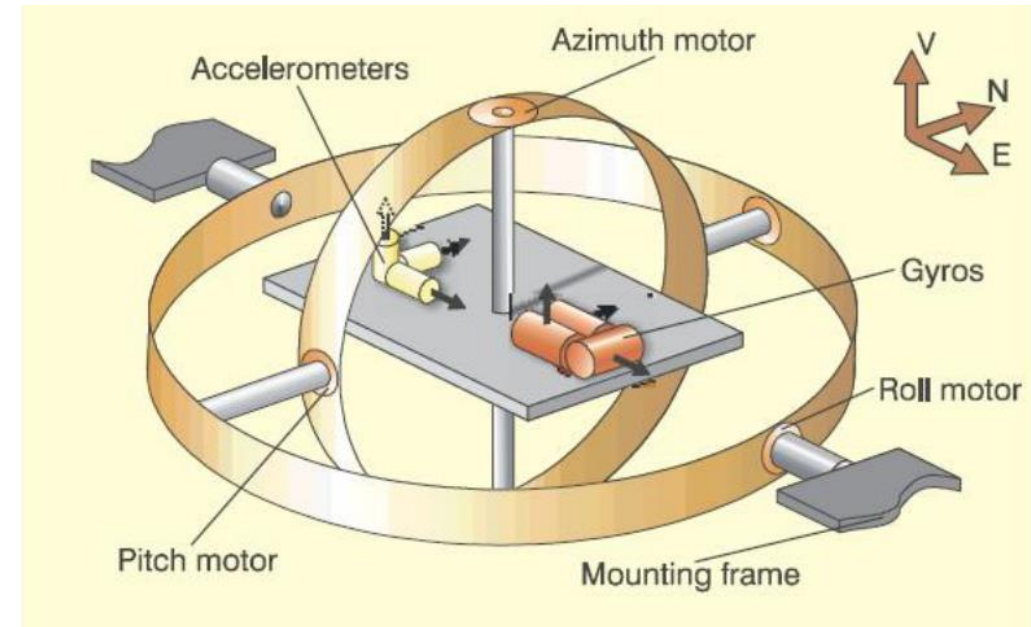
Algoritmus určení polohy při použití Strapdown systému

- pro zjištění orientace objektu v prostoru se musí integrovat výstupy gyroskopů



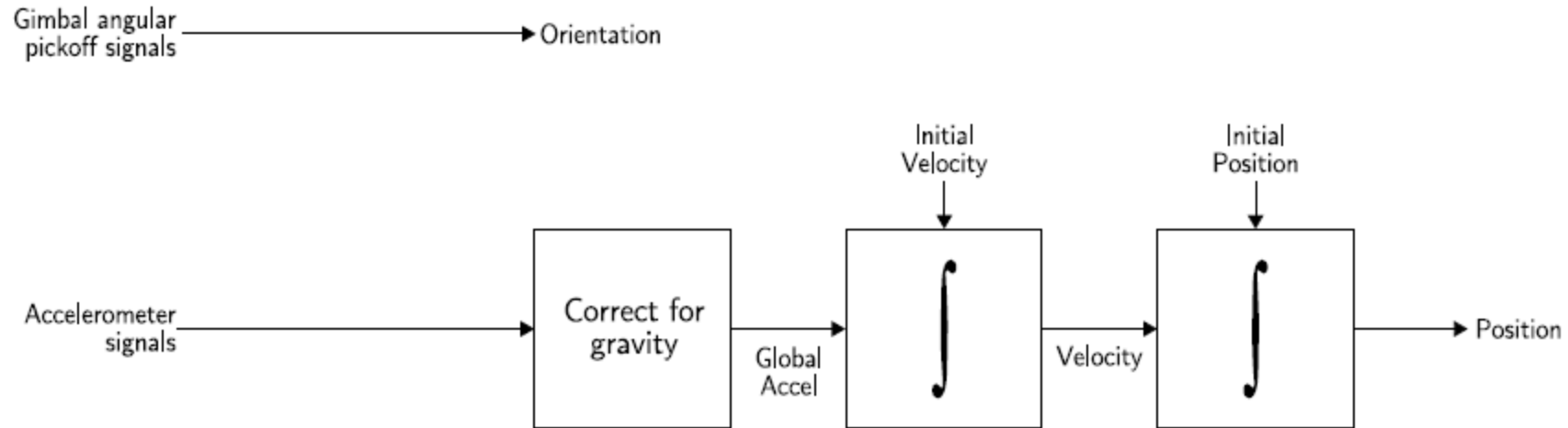
Zdroj: Woodman (2007)

- stable-platform systém = řešení, kdy je IMU fyzicky instalována na vyrovnávací platformě a ta je spojená s konstrukcí pohybujícího se objektu
 - sensory IMU dávají na základě pohybu zpětnou vazbu motorům vyrovnávací platformy, které se ji snaží stále udržet ve vyrovnané poloze
 - monitorují se úhly natočení uchycení vyrovnávací platformy vůči konstrukci objektu (přímo úhly yaw, pitch, roll)
- analogie s tříosým stabilizovaným závěsem (gimbalem)
- starší řešení než strapdown systémy, dnes spíše na ústupu
- využívají větší množství mechanických komponentů, jsou tedy náročnější a nákladnější na výrobu
- výhodou je však nižší výpočetní náročnost navigace



Algoritmus určení polohy při použití Stable-platform systému

- orientace objektu v prostoru je přímo určena



Zdroj: Woodman (2007)

Deterministické (lze je popsat matematickou funkcí)

- permanentní odchylka po inicializaci (initial bias)
- stabilita permanentní odchylky (bias instability, in-run bias stability, BI)
- vstupní citlivost (scale factor)
- chyba ortogonality (axis misalignment):
- variabilita tíhového zrychlení (g-sensitive error)

Stochastické (náhodné, nelze je popsat matematickou funkcí, obvykle popisujeme statistickými parametry)

- šum (noise)

Permanentní odchylka po inicializaci (initial bias):

- v klidovém stavu by naměřená výstupní hodnota sensoru měla být nulová, což ale v reálu není
- hodnotu je možné určit z dlouhodobějšího měření sensoru nevykonávajícího pohyb/rotaci a zprůměrování výstupních hodnot → po vypnutí/zapnutí se však hodnota obvykle změní
- značný vliv má teplota prostředí (dochází k roztažení či stažení mikroskopických komponent)

Stabilita permanentní odchytky (bias instability, in-run bias stability, BI):

- hodnota permanentní odchytky měření je i při zachování teploty v čase proměnlivá vlivem fyzikálních vlastností sensoru
- stabilita permanentní odchytky určuje, jak rychle a v jakém rozsahu se mění permanentní odchytky v průběhu měření
- u gyroskopu se udává ve $^{\circ}/h$, u akcelerometru v m/hod^{-2}
- jedná se o jeden ze základních parametrů určujících kvalitu IMU jednotky

Chyby sensorů IMU

- **vstupní citlivost** (scale factor): poměr změny výstupního napětí na změnu vstupního signálu, obvykle se uvádí v %, mívá nelineární průběh (např. gyroskop má faktor měřítka 1 %, fyzicky se otočí o $1,00^\circ$, ale změřená hodnota napětí bude odpovídat $1,01^\circ$); je závislý na teplotě; je možné kalibrovat
- **chyba ortogonality** (axis misalignment): algoritmus očekává, že jednotlivé osy měření gyroskopu/akcelerometru jsou na sebe zcela kolmé, díky nedokonalosti ve výrobě tomu tak však není a pohyb realizovaný jen v jedné z os způsobí drobnou reakci i v jiné ose; je možné kalibrovat
- **variabilita tíhového zrychlení** (g-sensitive error): čip očekává, že hodnota tíhového zrychlení je rovna konstantně, v reálném světě se však tíhové zrychlení mírně mění; lze kompenzovat

Šum (noise):

- výstup sensoru je rušen tepelně-mechanickým šumem, který se mění s frekvencí vyšší než je vzorkovací frekvence snímače
- má podobu bílého šumu s nulovou střední hodnotou a normálním rozdělením
- při integraci zašuměných naměřených hodnot v čase dochází ke driftu (kumulující se chybě), která je ve specifikacích IMU jednotek standardně vyjadřována parametrem Angular Random Walk (ARW, jednotka $^{\circ}/\sqrt{\text{hod}}$) pro gyroskopy a Velocity Random Walk (VRW, jednotka $\text{m/s}/\sqrt{\text{hod}}$) pro akcelerometry

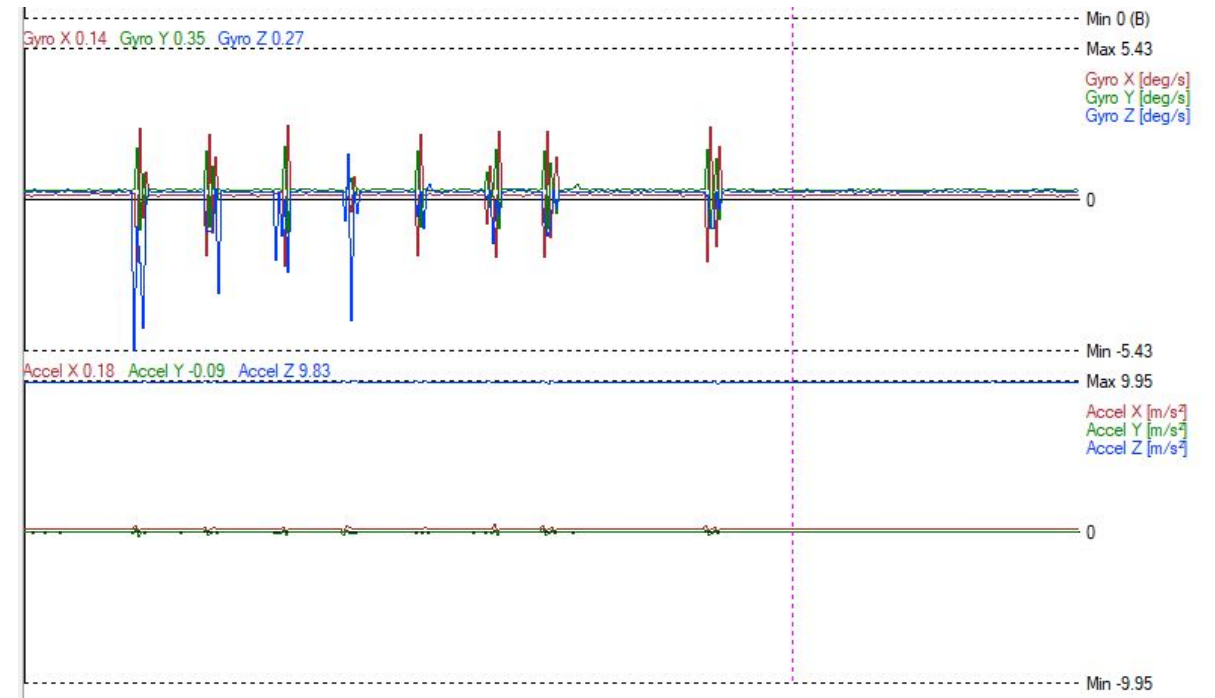
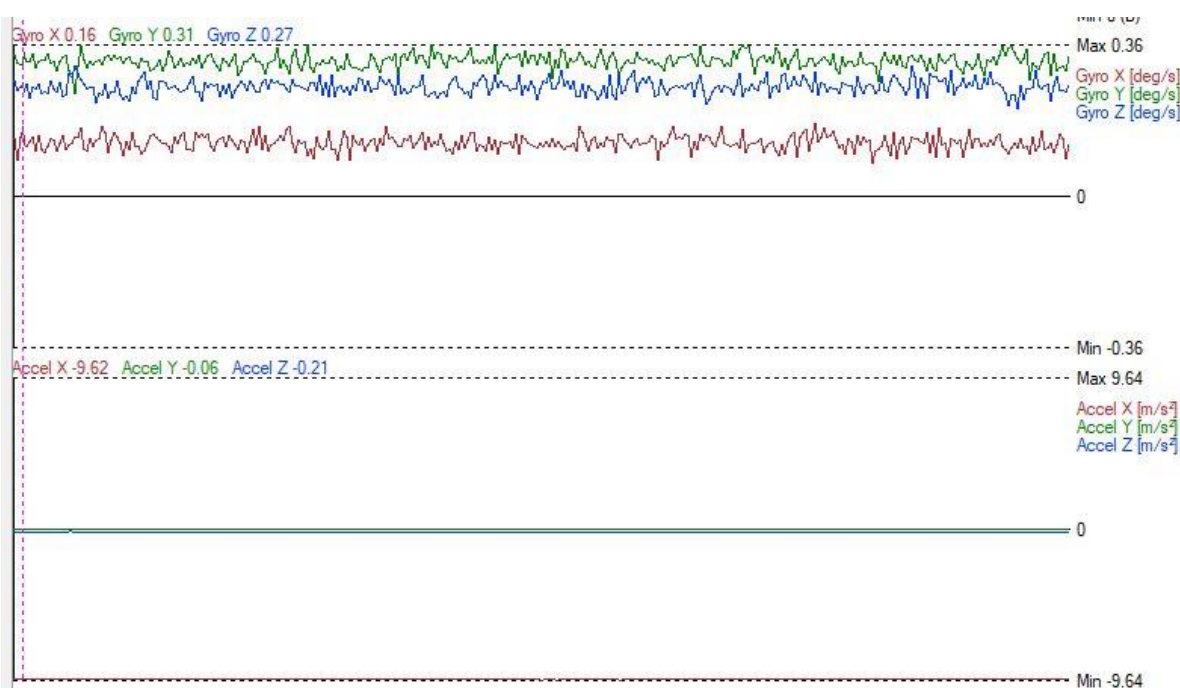
Chyby sensorů IMU

- měření gyroskopu je velmi citlivé na otřesy (může způsobovat problémy při provozu)

Ukázka záznamu z tříosého akcelerometru a gyroskopu nízkonákladové jednotky u-blox M8U

Vlevo: jednotka leží klidně na stole, naměřené hodnoty úhlové rychlosti jsou dány permanentní odchylkou a šumem

Vpravo: jednotka leží klidně na stole, naměřené hodnoty úhlové rychlosti jsou několikrát výrazně vychýleny obyčejným poklepáním prsty na jednotku



Chyby sensorů IMU

- inerciální navigace je relativní technikou, chyba určení polohy (směru, rychlosti) proto roste v čase vlivem kumulace chyb z předchozích epoch – chyby se integrují a způsobují tzv. integrační drift
- chyba způsobená permanentní odchylkou gyroskopu vede v čase ke kubickému růstu (mocnina na ³) chyby určení polohy
- chyba způsobená permanentní odchylkou akcelerometru vede v čase ke kvadratickému růstu (mocnina na ²) chyby určení polohy

Letecká, námořní navigace

Autonomní pozemní vozidla

Nositelná elektronika

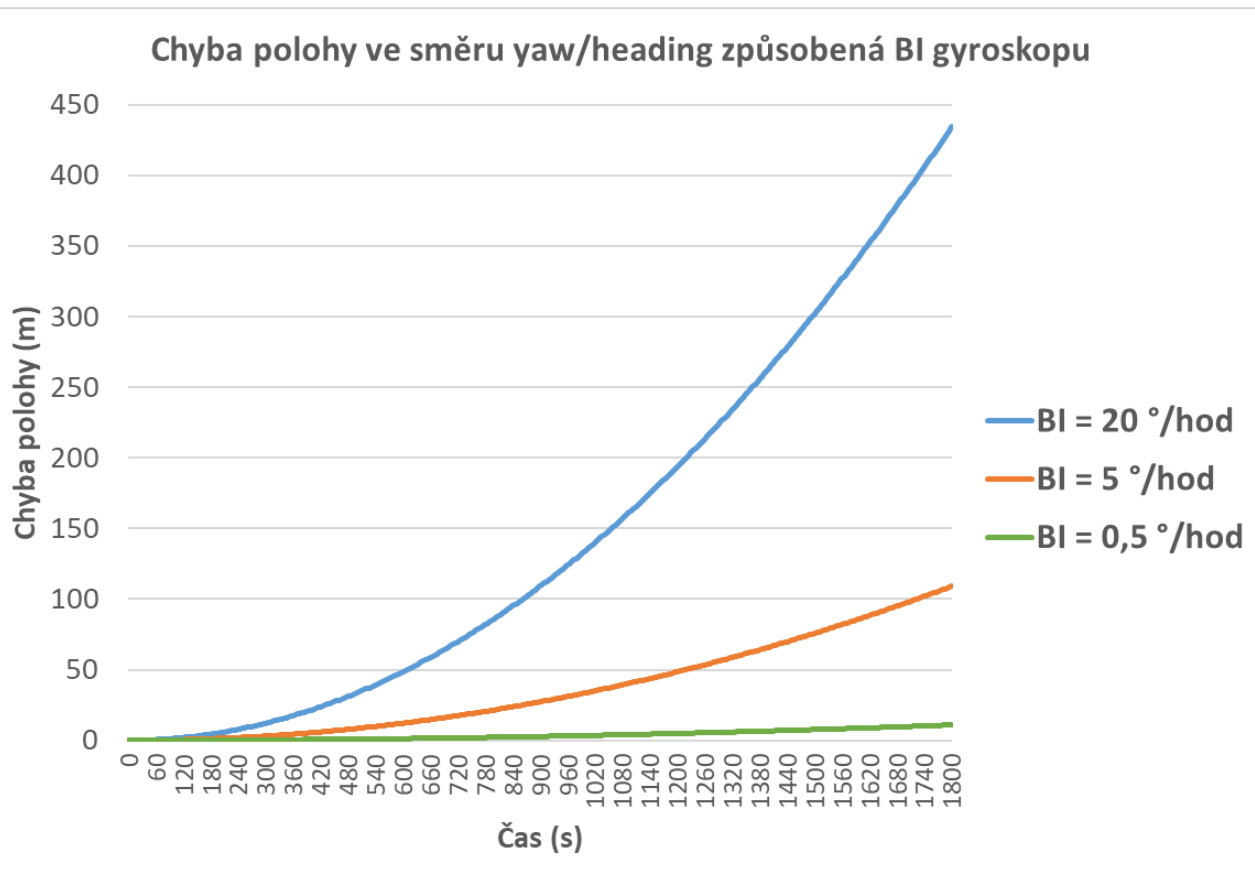
Error parameter	Navigation grade	Tactical grade	Consumer-grade
Gyro bias	0.01 deg/hr (σ); 1 hr (correlation time)	0.1-1 deg/hr (σ); 1 hr (correlation time)	50 deg/hr (σ); 30 min (correlation time)
Gyro random walk	0.001 deg/hr ^{1/2} (σ)	0.1-1 deg/hr ^{1/2} (σ)	10-50 deg/hr ^{1/2} (σ)
Accelerometer bias	1 μ g (σ); 1 hr (correlation time)	0.1 - 1mg (σ); 1 hr (correlation time)	10 mg (σ); 30 min (correlation time)
Accelerometer noise	1 μ g (σ)	0.1 - 1 mg (σ)	10 mg (σ)
Axis misalignment	10 μ rad	0.1-1 mrad	2-5 mrad

TABLE 2 Examples of INS error models.

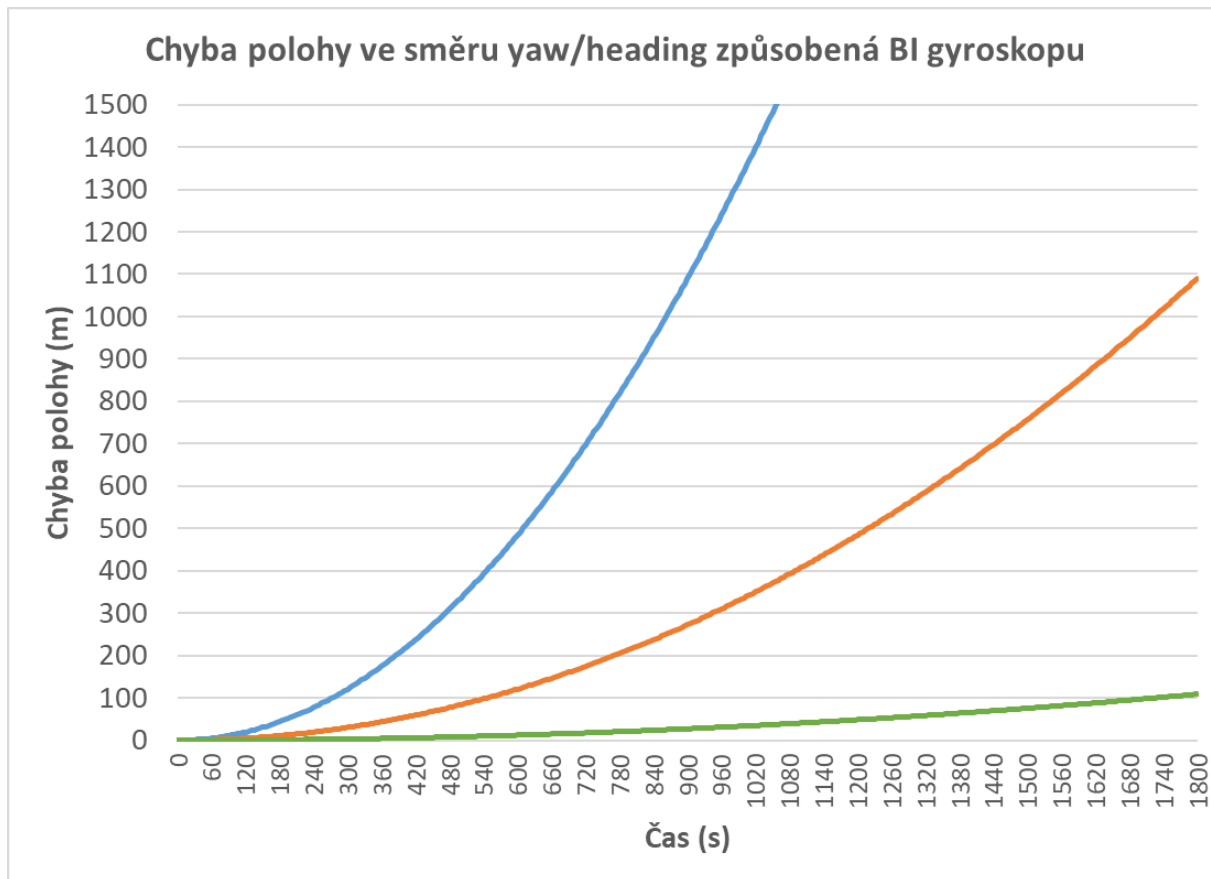
Chyby sensorů IMU - příklad

- Vliv stability permanentní odchyly gyroskopu (bias instability, BI) na přesnost určení polohy ve směru yaw/heading (kolmo ke směru jízdy)

Rychlost pohybu = 5 km/h



Rychlost pohybu = 50 km/h



- Chotaš, K. *Polohový a kursový referenční systém*. VUT Brno, 2014.
- Jakl, M. *Inerciální navigační systém pro mobilní telefony*. Univerzita Karlova, 2019.
- Kang, X., Huang, B., Qi, G. *A Novel Walking Detection and Step Counting Algorithm Using Unconstrained Smartphones*. *Sensors*, 18, 2018.
- Soloviev, A. *Inertial Error Propagation: Understanding Inertial Behavior*. Inside GNSS, 2022.
- Teunissen, P. J.G., Montenbruck, O. (ed.). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer, 2017.
- u-blox. *ZED-F9R Getting started with high-precision sensor fusion*. UBX-22035176, 2023.
- Woodman, O. *An introduction to inertial navigation*. University of Cambridge, Technical Report UCAM-CL-TR-696, 2007.
- <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-measurement-unit-imu-an-introduction/>
- <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>
- <https://medium.com/anello-photonics/how-to-easily-estimate-vehicle-localization-errors-from-imu-specs-31e6174ff065>
- <https://www.zive.cz/clanky/pojdme-programovat-elektroniku-jak-vlastne-funguje-akcelerometr-a-gyroskop-nejen-ve-vasem-telefonu/jak-funguje-gyroskop/sc-3-a-194858-ch-114926/default.aspx#articleStart>

Děkuji za pozornost

Michal Kačmařík,
e-mail: michal.kacmarik@vsb.cz
<https://www.hgf.vsb.cz/548/cs/>



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY