



## Určování kinematických a dynamických veličin pohybu akcelerometrickými systémy

Patrik Kutílek

### Úkoly měření a výpočtu

- Určete vzájemnou maximální flexi/extenzi segmentů horní či dolní končetiny pomocí dvou inerciálních systémů.
- Identifikujte varozitu nebo valgozitu nohou.
- Určete velikosti zrychlení/zpomalení ruky a předloktí, porovnejte a stanovte přibližné velikost síly v zápěstí při úderu a volném pohybu.
- Určete přibližnou velikost tlaku mezi segmentem a překážkou.

### Teoretický základ řešených úloh

Akcelerometrické systémy (také zvané inerciální) poskytují informaci o kinematických veličinách (poloha, rychlost, zrychlení) díky umístění senzorů přímo na sledovaný objekt. Inerciální systém se obvykle skládá z měřící jednotky obsahující akcelerometry a gyroskopy (popř. také magnetometry), a z mikropočítače, který vyhodnocuje data z měřící jednotky. Zrychlení pohybu, resp. sílu vznikající při změnách rychlosti pohybujícího se předmětu, a gravitační zrychlení, resp. sílu vzniklou působením gravitace Země, zaznamenávají akcelerometry. Výpočtové operace v akcelerometrickém senzoru jsou založeny na Newtonově pohybovém zákonu, který nám říká, že vyprodukovaná síla je přímo úměrná zrychlení tělesa.

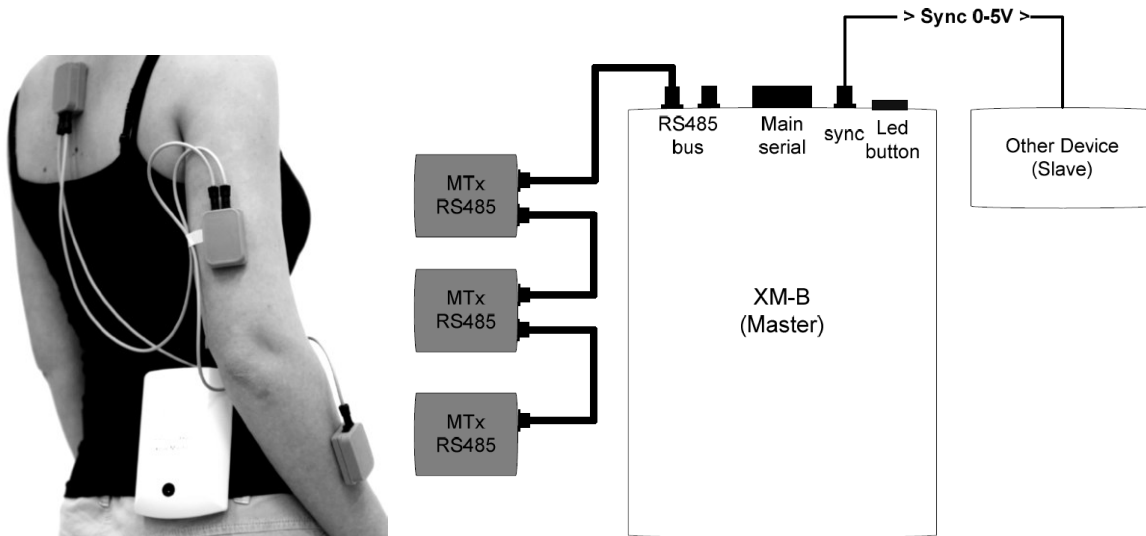
Pro účel identifikace polohy/pohybu měřeného objektu v předem definovaném souřadnicovém systému je nezbytné dodržení polohy/pohybu inerciálního systému ve směru zrychlení objektu. Což je prakticky nemožné, a proto se používají pro zjištění rotačního pohybu, tj. náklonu, gyroskopy. Vzhledem k tomu, že každý volný objekt v prostoru má šest stupňů volnosti (vnitřní vzájemně nezávislé proměnné), tak se obvykle inerciální navigační systém skládá ze tří gyroskopů a tří akcelerometrů, kde každá dvojice (gyroskop, akcelerometr) je schopna zaznamenat rotaci či zrychlení ve směru jedné osy kolmé na ostatní. Z šesti stupňů to jsou tři lineární stupně volnosti a to posun v ose  $x$ ,  $y$  a  $z$  – ty udávají polohu (občas se používá synonymum „pozice“) objektu a tři stupně volnosti rotace a to otočení kolem osy  $x$ ,  $y$  a  $z$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) – ty udávají orientaci (občas se používá synonymum „poloha“) objektu. Pokud je známo těchto šest proměnných, je známá i poloha objektu. Jsou-li tyto údaje sledovány po jistou dobu, je z nich možné určit dráhu a rychlost pohybu objektu v rámci námi definovaného souřadného systému.





Obr.1: Jednoduchý jednoosý a tříosý akcelerometr firmy Vernier, (převzato z návodu k přístrojům Vernier).

Akcelerometry mohou být jednoosé, dvouosé nebo tříosé. Výstupem z akcelerometru je informace o akceleraci ve směru os akcelerometru, a to pro jeden, dva či tři směry pohybu, obr.1. Složitější jsou systémy obsahující také gyroskopy. Takovýmto systémem je systém Xbus Kit. Systém Xbus Kit měření polohy segmentů těla od firmy Xsens obsahuje inerciální snímače polohy série Xsens MTi, které jsou složeny z 3D akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Výstupními daty ze snímače jsou informace o orientaci snímače v prostoru, akceleraci ve směru souřadného systému snímače a poloze snímače vůči magnetickému poli. Pro sběr dat a napájení snímačů obsahuje systém digitální Xbus datovou sběrnici, která je připojena k PC.



Obr.2: Motion capture systém firmy Xsens založený na inerciálních snímačích polohy, (převzato z návodu k použití MoCap systému firmy Xsens).

Obvykle měření zahájíme tak, že na vhodné anatomické body segmentů těla umístíme senzory. Měřená osoba následně zaujme výchozí polohu a provede požadovaný pohyb, během kterého jsou zaznamenávána data ze senzorů. Analýzou dat zjistíme změny polohy



senzorů v prostoru, které odpovídají změnám polohy segmentů těla, na kterých jsou jednotlivé senzory umístěny.

Inerciální systémy v biomechanice se především uplatňují ve sportovní biomechanice a rehabilitaci při studiu pohybu. Pomocí těchto systémů můžeme řešit především tyto fyzikální problémy: náklon, vibrace, rychlost a poloha v prostoru, síly.

### **Měření náklonu v prostoru**

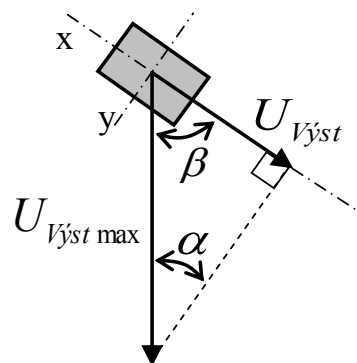
V biomechanice nás zajímá často pouze náklon objektů v prostoru, k jehož měření můžeme použít nejen gyroskopy, ale přímo akcelerometry. K měření náklonu stacionárních objektů je u akcelerometrických snímačů využívána paradoxně jejich největší nevýhoda v inerciálních systémech a to jejich možnost měření gravitačního zrychlení Země. K měření se využívají citlivé senzory (piezoelektrické, piezodoporové, atp.), schopné indikovat velikost tíhového zrychlení v souřadných osách akcelerometru. Z poměru gravitačního zrychlení ve dvou osách lze zjistit náklon. Pokud je tíhové zrychlení přesně v ose senzoru (svislý směr), pak je odezva senzoru maximální, pokud je sensor natočen, pak výstupní signál odpovídá tomuto natočení:

$$U_{Výst} = U_{Výst\ max} \cdot \sin(\alpha), \quad (1)$$

respektive

$$U_{Výst} = U_{Výst\ max} \cdot \cos(\beta), \quad (2)$$

dle obr.3.



Obr.3: Využití akcelerometru k měření náklonu.

Před vlastním měřením by měl být akcelerometr, tak jako ve všech dalších případech, kalibrován na hodnotu 0 Volt pokud na něj nepůsobí žádné zrychlení.

Pokud bychom měřili vzájemnou polohu více segmentů těla, měřili bychom jejich polohu odpovídajícím počtem akcelerometrů (např. dvou umístěných na dvou segmentech těla) a



vzájemnou polohu segmentů pak určili rozdílem zjištěných úhlů v zemské souřadné soustavě, což je v našem případě zvolený absolutní souřadný systém:

$$\kappa = \alpha - \beta. \quad (3)$$

### **Měření vibrací**

Sensory sledující kmitající objekt mohou, v závislosti na principu snímání, mít odezvu přímo odpovídající okamžité výchylce kmitajícího objektu (snímače výchylky např. indukčnostní), přímo odpovídající první derivaci okamžité výchylky kmitajícího objektu (snímače rychlosti např. elektrodynamické, dnes se používají jen zřídka) a přímo odpovídající druhé derivaci okamžité výchylky kmitajícího objektu (snímače zrychlení, tj. akcelerometry, dnes nejrozšířenější). Tímto můžeme například studovat tlumící účinky při vývoji sportovní obuvi, v pedometrech a dalších sportovních přístrojích. Dále můžeme snímačů využít pro ergonomickou optimalizaci, jako například pro vývoj sedaček v dopravních prostředcích. Obvykle se sleduje velikost amplitudy posuvu, rychlosti, zrychlení, frekvence a doba ustálení kmitání. Odtud se hodnotí další veličiny, jako je velikost setrvačné síly, přetížení nebo deformace pohybujícího se objektu.

### **Měření rychlosti a pozice v prostoru**

Pomocí akcelerometrů je možné realizovat zařízení, které dokáže určit pozici objektu v prostoru. Jak již bylo řečeno, překonanou vzdálenost a okamžitou polohu lze určit nepřímo. Je-li předmět v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, je zrychlení nulové. Při nabírání rychlosti je zrychlení kladné, při zastavování záporné. Z této veličiny lze určit okamžitou rychlost a z rychlosti překonanou vzdálenost. Real-time výpočet rychlosti a překonané dráhy, z akcelerometrem změřeného zrychlení v konkrétním směru, je prováděn např. jednoduchou numerickou integrací

$$v_i = a_i \cdot (t_i - t_{i-1}) + v_{i-1} = a_i \cdot \Delta t + v_{i-1}, \quad (4)$$

$$x_i = v_i \cdot (t_i - t_{i-1}) + x_{i-1} = v_i \cdot \Delta t + x_{i-1}, \quad (5)$$

kde  $x$  je pozice,  $v$  je rychlost,  $a$  je zrychlení,  $\Delta t$  je časový interval,  $i$  značí aktuální hodnotu,  $i-1$  je předchozí změřená hodnota. Tato metoda se nazývá Obdélníková metoda. Snahou je, z důvodu přesnosti, aby  $\Delta t$  časový interval byl co nejmenší. Obecný zápis integrace pro určení vektoru okamžité rychlosti v čase  $t$  pro jeden směr je:

$$v(t) = \int_{t_0} a(t) \cdot dt + v_0, \quad (6)$$

kde  $v_0$  je rychlost v čase počátku integrace  $t_0$ ,  $a$  je zrychlení v časovém okamžiku  $t$ . Dvojitou integrací signálu z akcelerometru lze určit překonanou vzdálenost  $x$ , kterou urazil určitý bod za danou dobu. Pro přírůstek dráhy platí vztah:



$$x(t) = \int_{t_0} v(t) \cdot dt + x_0 = \iint_{t_0} a(t) \cdot dt \cdot dt + v_0 \cdot t + x_0, \quad (7)$$

kde  $v$  je rychlost v časovém okamžiku  $t$ ,  $x_0$  je pozice v čase počátku integrace  $t_0$  a ostatní parametry jsou stejné jako u předchozího vzorce. V programové implementaci se často využívá přesnějších numerických derivací, jedná se například o Lichoběžníkovou metodu

$$v_i = \frac{(a_i + a_{i-1})}{2} \cdot \Delta t + v_{i-1} \quad (8)$$

nebo Simpsonovou metodou:

$$v_i = \frac{\Delta t}{3} \cdot [a_i + 4 \cdot a_{i-1} + a_{i-2}] + v_{i-2}. \quad (9)$$

Obdobně by se řešilo určování dráhy, přičemž existuje celá řada dalších numerických integračních metod a jejich úprav. Integrací zrychlení ve všech třech osách lze teoreticky získat vektor okamžité rychlosti a další integrací pozici v 3D prostoru. V praxi se však u inerciálních systémů setkáváme s nepřesností v detekci rychlosti a pozice z důvodu velkého  $\Delta t$  časového intervalu při integraci a projevem gravitačního zrychlení Země  $g$ , které nemá vztah k akceleraci měřeného objektu, a tudíž zanáší chybu do výpočtu přesné a skutečné rychlosti a pozice objektu. K eliminaci tohoto problému se používá pokročilých filtračních a kompenzačních metod.

### **Měření síly a prostého tlaku**

Využitím naměřených hodnot rychlostí a zrychlení lze určit, při znalosti dalších fyzikálních vlastností, odvozené veličiny, jako je například síla, vykonaná práce, atd. Například ve sportovní biomechanice nás může zajímat velikost síly při zrychleném/zpomaleném pohybu podle 2. Newtonova pohybového zákona

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}, \quad (10)$$

kde  $\vec{F}$  je zjišťovaná síla,  $m$  je hmotnost pohybujícího se tělesa,  $d\vec{v}/dt$  je derivace okamžité rychlosti podle času, tedy  $\vec{a}$  - naměřené zpomalení/zrychlení ve směru účinku síly. Naměřené zrychlení může obsahovat i složku zrychlení gravitačního. Pokud nás bude zajímat hmotnost segmentů těla, která je nutná pro výpočet sil, lze ji určit na základě znalosti celkové hmotnosti a výšky jedince dvěma užívanými postupy. Méně přesný postup vychází ze znalosti procentuálního rozdělení celkové hmotnosti, publikované výsledky jednotlivých autorů se však značně liší. Přesnější je metoda založená na experimentálně stanovených koeficientech  $B_{0i}$ ,  $B_{1i}$  a  $B_{2i}$  pro každý segment. Pro vyjádření hmotnosti daného segmentu pak platí vícenásobná regresní rovnice

$$m_i = B_{0i} + B_{1i} \cdot m + B_{2i} \cdot v. \quad (11)$$



Ze znalosti setrvačných sil segmentů můžeme určovat velikosti silových účinků v kloubních spojeních. Využitím znalosti o antropometrii konkrétní části těla můžeme určit například velikost síly při úderu.

$$F_{ruka} = a_{ruka} \cdot m_{ruka} , \quad (12)$$

kde  $F_{ruka}$  je hledaná síla,  $m_{ruka}$  je hmotnost pohybující se ruky a  $a_{ruka}$  je naměřené zpomalení/zrychlení ve směru účinku síly.

Pokud by nás zajímala síla v jednotlivých kloubech horní končetiny, pro reakční síly v kloubech platí

$$F_{zapesti} = a_{ruka} \cdot m_{ruka} , \quad (13)$$

$$F_{loket} = F_{zapesti} + a_{predlokti} \cdot m_{predlokti} , \quad (14)$$

$$F_{rameno} = F_{loket} + a_{nadlokti} \cdot m_{nadlokti} . \quad (15)$$

Zrychlení pro jednotlivé části zjistíme měřením z jednotlivých akcelerometrických snímačů umístěných na konkrétní anatomické body segmentů těla. Ze znalosti velikosti sil můžeme pokračovat například ve výpočtu tlaku  $p$  generovaného silou působící na uvažovanou plochu  $S$ :

$$p = \frac{dF}{dS} = \frac{F}{S} . \quad (16)$$

Uvedeného předpokladu můžeme využít ve sportovní biomechanice, forenzní biomechanice atd.

