

## Úloha VI.P ... i-jablko

6 bodů; průměr 4,33; řešilo 30 studentů

Vymyslete co nejlépe způsob, jak sestavit zařízení, které pozná, jakým směrem je natočeno vůči směru tíhového zrychlení a tuto informaci nějakým způsobem převede na elektrický signál. (Zařízení na způsob akcelerometru v chytrých telefonech.)

*Napadlo Terku, když už se jí nechtěla učit analýza.*

Zadání je poměrně obecné, nespecifikuje, jak se bude informace o orientaci dále využívat (otočení fotografie, prostředek k ovládní telefonu, detekce pohybu telefonu). To ovlivňuje parametry navrhaného zařízení jako přesnost detekované orientace, či latence poskytnuté orientace<sup>1</sup>. Dle striktního výkladu zadání by naše zařízení mělo fungovat i ve volně padajícím výťahu (neboť směr tíhového zrychlení se nezmění, jen se k pozorovanému zrychlení přičte zrychlení pozorovatele v neinerciální soustavě).

Výstupem zařízení by měla být přinejmenším dvojice úhlů, která reprezentuje orientaci zařízení (představujeme si například bod na jednotkové kouli, která je pevně spojená se zařízením). V konečném důsledku budeme chtít tato data zpracovávat digitálně, a tak onen elektrický signál může být výstup z A/D převodníku anebo například výstup ze snímače kamery.

Nyní se pojďme zamyslet nad různými přístupy.

Náš problém již vyřešila evoluce u bezobratlých živočichů v podobě orgánu obecně zvaného *statocysta*. Jde o dutinku, v níž se může pohybovat drobný předmět (*statolit*) a tento pak silově působí na vnitřní povrch dutiny, což je nakonec převedeno na nervový signál. U savců (včetně člověka) tuto funkci plní *vestibulární aparát*, v němž je tělísko nahrazeno tekutinou. Naše zařízení založené na tomto principu by tedy mohlo být dutou koulí, na jejíž vnitřní straně jsou kontakty, které jsou spojovány menší vodivou kuličkou pohybující se uvnitř.

Nejenom evoluce, ale i řemeslníci mají odpověď na naši otázku – olovnice. Pro naše účely by měla být závaží na tuhém ramenu, přičemž v čepu by se úhel naklonění měřil například potenciometrem. Pro zjištění úplné orientace v prostoru by byly potřeba dvě olovnice operující v kolmých rovinách s možností „přetočení“, aby zařízení fungovalo i vzhůru nohama.

Obě zatím navržená zařízení by přestala fungovat v padajícím výťahu, ostatně to je problém všech přístupů, které nějakým způsobem zužitkovávají (nerozlišitelné) efekty setrvačného zrychlení a gravitace.

Abychom toto obešli, musíme využít nějakou další znalost o směru tíhového zrychlení. Pokud magnetické pole Země zjednodušíme tak, že magnetické siločáry kopírují zemské poledníky, pak platí, že tíhové zrychlení je vždy kolmé na směr magnetické indukce. Tento přístup by nám určil rovinu, v níž se tíhové zrychlení nachází, ale nikoli směr (přímku)<sup>2</sup>.

Již jsme se dotkli toho, že tíhové zrychlení je ve vztahu se zemským povrchem (téměř kolmé), kdybychom dokázali určit naši orientaci vůči zemskému povrchu, zjistíme tak i námi požadovanou orientaci vůči tíhovému zrychlení. Nabízí se tedy metoda vytvořit zařízení ze dvou GPS modulů, které by zjišťovaly pozici vzhledem k Zemi a z těchto dvou poloh bychom již mohli

<sup>1</sup>U fotoaparátu nám nevedí, pokud orientaci snímku zjistíme až při ukládání, pokud bychom však informaci potřebovali např. pro ovládní hry, je jakákoli postřehnutelná latence na obtíž.

<sup>2</sup>Pro náčrt této ideje jsme zjednodušili model zemského magnetického pole a tíhové zrychlení jsme efektivně nahradili gravitačním. Problém zjišťování orientace vůči směru tíhové zrychlení jsme pak převedli na problém zjišťování směru vůči magnetické indukci, jímž se v této úloze podrobněji zabývat nebudeme.

dopočítat orientaci zařízení. Očekávaná přesnost pozice z GPS je 5 metrů<sup>3</sup> a bez nějakého vyčíslování odhadneme, že vzdálenost přijímačů by musela být řádově alespoň srovnatelná s touto délkou. Takové zařízení by tedy nebylo praktické pro přenos ani manipulaci.

Námořníci používali pozorování nebeských objektů k určení své polohy, my tak můžeme informaci z (jediného) GPS modulu a polohy nebeských těles využít k určení orientace. Chytré telefony bývají vybaveny kamerami, které zabírají poměrně významnou část sféry kolem telefonu, a tak (pokud není zataženo nebo nejsme v interiéru) v některé z nich uvidíme Slunce či Měsíc. Tyto objekty jsou v obraze jasně rozpoznatelné a lokalizovatelné a pokud kameru zkalibrujeme,<sup>4</sup> můžeme určit její orientaci vůči směru k danému nebeskému tělesu – ze znalosti zeměpisné polohy a času, pak zjistíme i směr tíhové zrychlení vůči tomuto směru. Z hlediska naší úlohy taktó však zjistíme jen rovinu<sup>5</sup> v níž se nachází tíhové zrychlení (srovnejte s orientací vůči magnetickému poli Země). Pro úplné určení směru bychom tak potřebovali kamerami snímat alespoň dvě kosmická tělesa, což už nemusí být tak jednoduché ať kvůli detekci (ve dne prakticky vyloučeno), tak rozpoznání (které těleso je které).

Dalším způsobem, jak zjišťovat orientaci by byl gyroskop, který při vhodném uchycení zachovává směr osy své rotace a naše zařízení by mohlo určovat svou orientaci právě vůči tomuto směru, jenž by se při počáteční kalibraci svázal se směrem tíhové zrychlení. Setrvačnicků v praxi používají letecké přístroje (umělý horizont), mobilní zařízení využívají gyroskopy s vibrujícími závažíčky,<sup>6</sup> jež jsou ovlivňována Coriolisovou silou při rotaci.

Výčet nápadů zakončíme tím, jenž se též prakticky využívá – neurčíme jenom směr tíhové zrychlení, ale i jeho velikost.<sup>7</sup> Díky superpozičnímu principu stačí umět sestrojít jen jednorozměrný akcelerometr a pak spojit dva nebo tři (pokud chceme, aby naše zařízení fungovalo opravdu ve všech orientacích) kolmo na sebe pro zjištění vektoru zrychlení.

Zrychlení v jedné ose můžeme měřit mnoha způsoby: poloha závaží na pružince, efekt závaží na tlakový senzor, měření doby pádu nebo energie dopadu (pád „po kolejnici“) nebo měření periody kyvadla. Zřejmě ne všechny způsoby jsou vhodné k integraci do přenosného zařízení, ale nejpříhodnější je kombinace prvního a druhého způsobu za využití piezoelektrického jevu, případně ovlivňování kapacity kondenzátoru polohou závaží.

Prezentovali jsme různé více či méně reálné návrhy zjišťování orientace vůči tíhovému zrychlení. V nejjednodušších aplikacích bychom vystačili s kuličkou propojující kontakty na vnitřních povrchu koule. Vyšší přesnosti bychom dosáhli použitím sady kolmých akcelero­metrů, případně doplněné sadou gyroskopů, pokud znalost orientace vůči tíhovému zrychlení nebyla dostatečná (rotace kolem vodorovné osy).

### *Komentáře k došlým řešením*

Řešitelé nejčastěji popisovali zařízení, jež by se dle základu dala pojmenovat jako: gyroskop, nádoba s kapalinou, olovnice, siloměr/váhy, statolit, teplotní akcelerometr, ucho (vestibulární aparát) a vodováha.

<sup>3</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)

<sup>4</sup>Ilustrace možného postupu <https://youtu.be/ViPN810E0SU>.

<sup>5</sup>Uvažujte, že máte v hledáčku jen Slunce. Jakékoli otočení kamery kolem optické osy pak definuje nový směr zrychlení (linii horizontu nebereme v potaz).

<sup>6</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Vibrating\\_structure\\_gyroscope](https://en.wikipedia.org/wiki/Vibrating_structure_gyroscope)

<sup>7</sup>Zde připouštíme volnější výklad zadání, kdy určujeme orientaci vůči celkovému zrychlení přístroje, nikoli jen tíhovému.

Větší část bodů byla udělována za rozmanitost navrhovaných nápadů, další body přibyly za výstižný popis, propracovanost návrhu a realizovatelnost zařízení. Zvláštní zmínku si zaslouží řešení Jáchyma Bártíka a Matěje Mezery, kteří navrhli přístroje nespolehající jen na zrychlení, ale *kombinující* i gyroskop.

*Michal Koutný*  
michal@fykos.cz

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.