



České vysoké učení technické  
v Praze  
Fakulta biomedicínského inženýrství



Úloha KA03/č. 6:

## Určování polohy těžiště stabilometrickou plošinou

Ing. Patrik Kutílek, Ph.D., Ing. Adam Žižka  
(kutilek@fbmi.cvut.cz, zizka@fbmi.cvut.cz)

### Poděkování:

Tato experimentální úloha vznikla za podpory Evropského sociálního fondu v rámci realizace projektu „Modernizace výukových postupů a zvýšení praktických dovedností a návyků studentů oboru Biomedicínský technik“, CZ.1.07/2.2.00/15.0415.

Období realizace projektu 11. 10. 2010 – 28. 2. 2013.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## **6. Určování polohy těžiště stabilometrickou plošinou**

### **Úkol měření a výpočtu**

- Určete polohu těžiště měřené osoby z hodnot změřených na čtyřech senzorech stabilometrické plošiny/vázních čidlech. Pro min. dva případy různé polohy těžiště (osoba bez dalšího zatížení, osoba s nesoucím zatížením (batoh, atp.))

### **Teoretický základ řešených úloh**

Lékaři požadují hodnotit působíště výsledných kontaktních sil pod chodidly při stojí či chůzi. K tomuto měření se nejčastěji používá metoda zvaná posturografie. K měření se používají rovinné desky s tlakovými či siloměrnými čidly. V průběhu měření se deskou, na které se pohybuje či stojí pacient, určuje poloha těžiště těla (Center of Mass - COM) což je bod, kolem něhož je tělesná hmotnost rovnoměrně rozložena, a při statické posturografii se určuje poloha jeho průmětu do transverzální roviny. Poloha COM odpovídá poloze výsledné reakční síly, tj. kontaktní síly pod oběma chodidly na plošině. Dále se při vyšetřování stanovuje tzv. centrum tlaku (Center of Pressure - COP), což je střed rozložení tlaku, resp. bod, kolem něhož je rovnoměrně distribuována výsledná kontaktní resp. reakční síla působící po celé styčné ploše jednoho chodidla, popř. dalších segmentů těla. Metoda zjišťování COP a COM se používá ke zjištění funkce rovnováhy a k určení stavu vestibulárních reflexů.

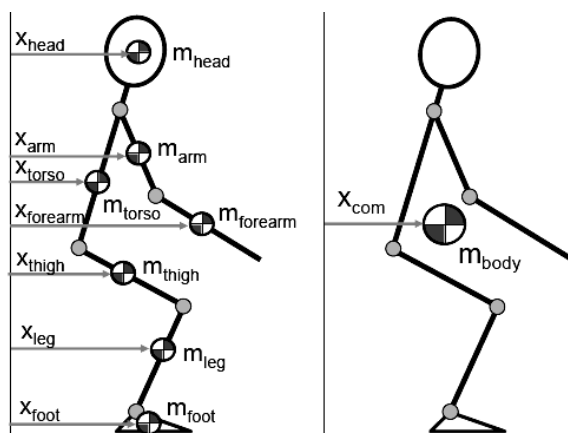
Vyšetření se nejčastěji provádí na tzv. statické nebo pohyblivé balanční plošině. Plošiny určují polohu výsledné kontaktní síly pomocí několika siloměrných snímačů umístěných ve vhodných místech pod tuhou plošinou (deskou), na které stojí nebo se pohybuje pacient. Typická konstrukce balanční (posturografické) plošiny (komerční jsou např. Kistler, Nintendo atp.) je složena z rovné desky, která je podložena snímači (minimálně po jednom snímači v každém rohu plošiny). Plošina umožňuje změřit rozložení váhy na snímače, spočítat celkovou váhu a také určit polohu průmětu těžiště těla pacienta stojícího na plošině do transverzální roviny. Na deskách bývají vyznačena místa pro pravou a levou nohu. Pro výpočet COP či COM jsou důležité vzdálenosti jednotlivých senzorů plošiny. Z těchto hodnot vzdáleností a z hodnot zatížení jednotlivých senzorů je možné přesně vypočítat polohu výsledné kontaktní síly, tj. těžiště, od středu plošiny pomocí rovnic statické rovnováhy momentů a sil působících na desku. Data z desky bývají zaznamenávána do modulu záznamu dat prostřednictvím kabelu či bezdrátového spojení. Modul záznamu dat může tvořit přímo součást PC, na kterém jsou data zpracována a vyhodnocena.

K studiu trajektorie pohybu COM a COP v transverzální rovině se také používají tzv. tlakové plošiny (komerční názvy jsou Footscan, Emed, atp.). Tyto sledují průběh tlaku pod chodidly na čase. Měření mohou být prováděna s obuví i bez ní. Z rozložení tlaku pod chodidly umožňují plošiny určit pohyb COP a COM během testu stability. Tlakové plošiny se vyrábějí ve tvaru desek, kobereců či vložek do bot, které jsou modifikací tlakových desek, a tak měří rozložení tlaku pod ploskou, obvykle při chůzi či různých modifikacích stoje. K měření jsou používány tlakové plošiny s vysokou hustotou tlakových senzorů. Plošiny jsou spojeny kabelem k modulu záznamu dat. Tlakových senzorů existuje řada typů. V plantografických plošinách jsou nejčastěji používány kapacitní a odporové senzory.

Úkolem vyšetřovaného bývá často během vyšetření či rehabilitace přesouvat těžiště do různých míst nebo těžiště udržet v požadovaném bodě, jedná se o rehabilitační proces, tzv. biofeedback. Následně je prováděna analýza a hodnocení stability postoje. Hodnotí se velikosti výchylek těžiště těla, rychlost pohybu těžiště, délka křivky pohybu průmětu těžiště a plocha jím opsaná (v transverzální rovině), atd. K dispozici je množství testů s různou délkou trvání a náročností podle vhodnosti vzhledem k měřené osobě. Výsledkem zpracování signálu z plošiny jsou obvykle tabulky a grafy zachycující jak rozložení tlaku pod ploskou tak i řadu dalších z něj odvozených parametrů, tj. COP a COM.

### **Určení těžiště těla**

Polohu těžiště celého těla (COM) můžeme zjistit z polohy těžišť jednotlivých segmentů těla.



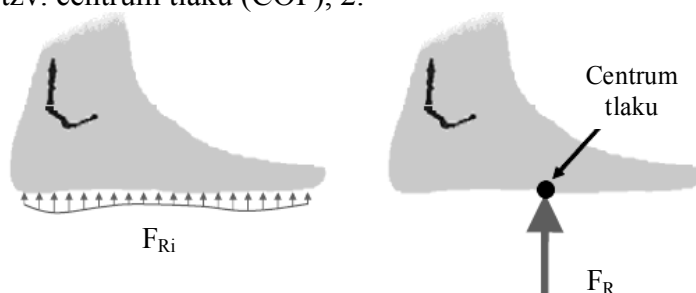
Obr.1: Schéma určení polohy těžiště člověka, [4].

Vztah pro výpočet polohy těžiště v předozadním směru pomocí statických momentů segmentů části těla, Obr. 1, je:

$$x_{com} = \frac{\sum(x_i \cdot m_i)}{\sum m_i} \quad (1)$$

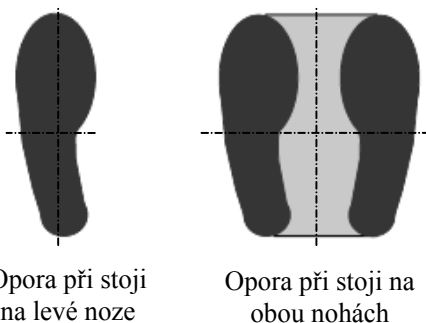
kde  $x_{com}$  je poloha těžiště celého těla,  $x_i$  a  $m_i$  jsou polohy jednotlivých těžišť segmentů a hmotnosti segmentů těla.

Abychom mohli definovat stabilitu člověka, tak nám k tomu pouze znalost polohy těžiště těla nestačí a musíme ještě definovat tzv. centrum tlaku (COP), 2.



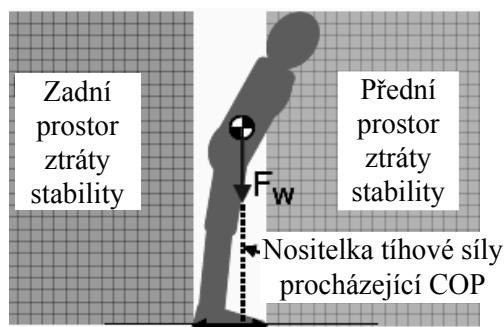
Obr.2: Působení výsledné reakční síly a její distribuce pod chodidlem, [4].

Další informace nutná k určení statické stability těla je znalost tzv. opory. Necht' opora je ohraničená všemi místy, v nichž je tělo v kontaktu s opěrnou plochu. Osoba se může pohybovat s centrem tlaku v rámci opory, ale centrum tlaku nelze přesunout mimo oporu.



Obr.3: Možné způsoby opory při stojí na nohou, [4].

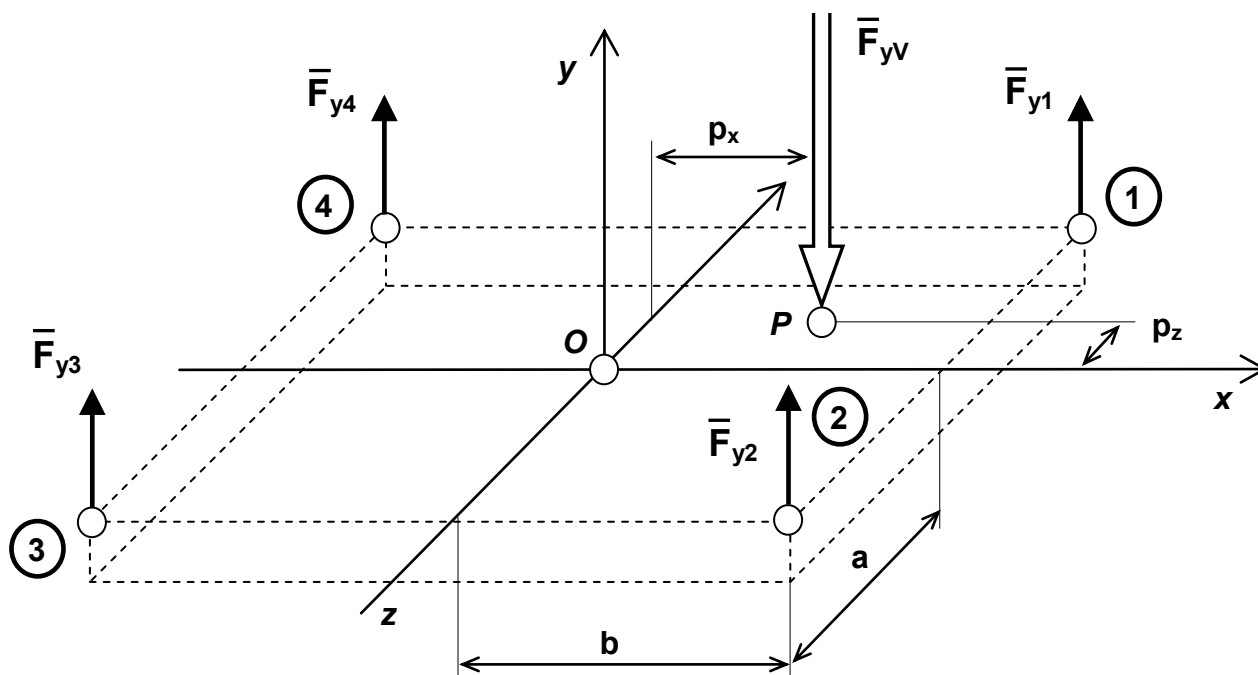
Statická stabilita je tedy rovnováha, při které centrum tlaku musí ležet přímo pod těžištěm těla a průmět těžiště těla musí být v rámci hranic opory.



Obr.4: Statická stabilita člověka při stoji, [4].

Další stabilitou, především realizovanou při pohybu, je dynamická stabilita. Mnoho dynamických pohybů, včetně chůze a běhu, je nestabilních. Chůze a běh se v podstatě skládají ze série přerušovaných pádů. V případě řešení dynamické stability jde o obtížnější kvantifikaci stability. Lze říci, že pokud není podmínka statické stability splněna (průmět těžiště těla se nenachází v oporném obrazci), pádu brání další, během pohybu se v určitých okamžicích vyskytující, externí síly, momenty sil či setrvačné síly.

K identifikaci polohy těžiště používáme silových podložek. Existuje celá řada konstrukcí silových podložek. V tomto ohledu se budeme blíže zabývat siloměrnou deskou pro určování polohy výsledné působící svíslé síly na podložku, přičemž se obvykle vyhodnocuje poloha tíhové síly těla resp. průmětu COM, za předpokladu totožné polohy s COP, při zachování statické stability těla. Takováto deska se nazývá „stabilometrická plošina“. Siloměrná podložka má obvykle pravoúhlý tvar a je umístěna na čtyřech podpěrách. V těchto podpěrách se nacházejí piezoelektrické nebo tenzometrické senzory velikosti sil. Součet velikostí měřených sil do daného směru ze všech podpěr určuje velikost výsledné síly působící na podložku. Tím, že určíme síly působící v jednotlivých podpěrách, je také možné určit vznikající momenty na podložce, a odtud působíště výsledné síly, popř. průmět těžiště těla, [3].



Obr.5: Schéma stabilometrické plošiny

Označíme jednotlivé podpěry 1 až 4. Výslednou sílu působící na podložku určíme vztahem:

$$\vec{F}_{yV} = \vec{F}_{y1} + \vec{F}_{y2} + \vec{F}_{y3} + \vec{F}_{y4}. \quad (2)$$

Abychom určili polohu výsledné síly, vyjádříme momenty sil v jednotlivých podpěrách vzhledem ke středu podložky  $O$ :

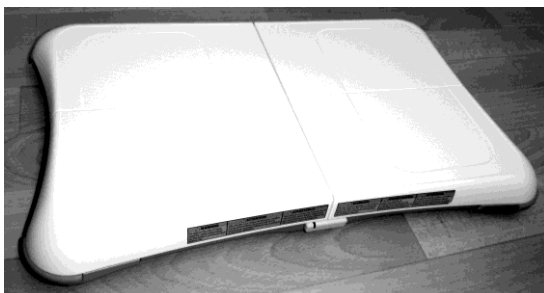
$$\vec{M}_x = a \cdot (\vec{F}_{y1} - \vec{F}_{y2} - \vec{F}_{y3} + \vec{F}_{y4}), \quad (3)$$

$$\vec{M}_z = b \cdot (\vec{F}_{y1} + \vec{F}_{y2} - \vec{F}_{y3} - \vec{F}_{y4}). \quad (4)$$

Tyto momenty musí být shodné s momenty, které vytvoří síla  $\vec{F}_{yV}$  působící v bodě  $P$  vzhledem k bodu  $O$ .

$$\vec{M}_x = p_z \cdot \vec{F}_{yV}, \quad \vec{M}_z = p_x \cdot \vec{F}_{yV}. \quad (5)$$

Řešením výše uvedených rovnic určíme  $\vec{M}_x, \vec{M}_z$  a pomocí těchto momentů hledanou polohu působišť síly  $p_x, p_z$ .

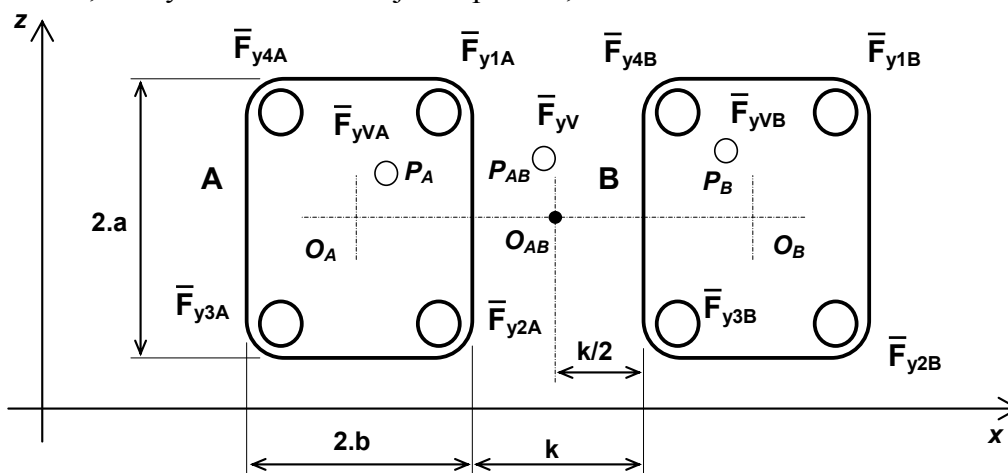


Obr.6: Stabilometrická plošina firmy Nintendo se čtyřmi vážními čidly v rozích desky.

Pro posouzení stability se mimo stabilometrické plošiny používají také systémy sofistikovanější, takovým příkladem je např. L.A.S.A.R. Posture pro posouzení statické stability pomocí laseru od firmy Otto Bock. Přístroj určuje vertikální složku reakční síly (COP), ale mimo to ji ještě během měření promítá prostřednictvím laserového paprsku na tělo pacienta. Díky tomuto přístroji lze promítnout jinak pouhým okem neviditelné těžiště (COM) resp. COP, což umožňuje kontrolovat např. držení těla pacienta, vzdálenosti vertikální složky reakční síly od určitých kloubních nebo referenčních bodů, popř. je možné zkontrolovat statickou stabilitu ortoticko-protetických pomůcek, [3].

### Určení velikosti sil pod chodidly

Ve sportovní biomechanice či ekonometrii nás mimo znalost polohy COM také zajímá velikost zatížení levé a pravé nohy a poloha COP pod chodidly na podložce a pohyb COP během stoji či pohybu. Předpokládejme teorii výpočtu působišť výsledné síly, tak jako v úloze pro nalezení celkového těžiště těla pomocí stabilometrické plošiny, ale tentokrát bude měřená osoba stát na plošinách dvou, každým chodidlem na jedné plošině, Obr.7.



Obr.7: Dvě siloměrné plošiny pro měření sil pod oběma chodidly.

Výpočet velikosti síly pod chodidlem, tj. síly přenášené do jedné končetiny, je jednoduchý, daný součtem sil na jedné siloměrné plošině, tj. pro chodidlo na desce A:

$$\vec{F}_{yVA} = \vec{F}_{y1A} + \vec{F}_{y2A} + \vec{F}_{y3A} + \vec{F}_{y4A} \quad (6)$$

Pro určení polohy působíště výsledné síly pod chodidlem, reprezentující bod polohy COP, opět použijeme moment sil v jednotlivých podpěrách vzhledem ke středu podložky  $O_A$ :

$$\vec{M}_{xA} = a_A \cdot (\vec{F}_{y1A} - \vec{F}_{y2A} - \vec{F}_{y3A} + \vec{F}_{y4A}), \quad (7)$$

$$\vec{M}_{zA} = b_A \cdot (\vec{F}_{y1A} + \vec{F}_{y2A} - \vec{F}_{y3A} - \vec{F}_{y4A}). \quad (8)$$

Tyto momenty musí být opět shodné s momenty, které vytvoří síla  $\vec{F}_{yVA}$  působící v bodě  $P_A$  vzhledem k bodu  $O_A$ .

$$\vec{M}_{xA} = p_{zA} \cdot \vec{F}_{yVA}, \quad \vec{M}_{zA} = p_{xA} \cdot \vec{F}_{yVA}. \quad (9)$$

Řešením uvedených rovnic určíme  $\vec{M}_{xA}, \vec{M}_{zA}$  a pomocí těchto momentů hledanou polohu působíště síly  $p_{xA}, p_{zA}$  na první siloměrné desce A. Identicky by se určovala poloha působíště výsledné síly také pro druhou desku B. Budeme-li chtít určit polohu těžiště těla ze dvou siloměrných desek, nejprve musíme určit velikost výsledné síly působící na obě podložky:

$$\vec{F}_{yV} = \vec{F}_{y1A} + \vec{F}_{y2A} + \vec{F}_{y3A} + \vec{F}_{y4A} + \vec{F}_{y1B} + \vec{F}_{y2B} + \vec{F}_{y3B} + \vec{F}_{y4B}. \quad (10)$$

Abychom mohli určit působíště výsledné síly si vyjádříme moment sil v jednotlivých podpěrách vzhledem ke středu mezi deskami  $O_{AB}$ , přičemž předpokládáme totožné rozměry obou siloměrných desek  $a_A = a_B$  a  $b_A = b_B$  a uspořádání podle Obr.7:

$$\vec{M}_{xAB} = a_A \cdot (\vec{F}_{y1A} - \vec{F}_{y2A} - \vec{F}_{y3A} + \vec{F}_{y4A}) + a_B \cdot (\vec{F}_{y1B} - \vec{F}_{y2B} - \vec{F}_{y3B} + \vec{F}_{y4B}) \quad (11)$$

$$\vec{M}_{zAB} = \left(\frac{k}{2} + 2 \cdot b_A\right) \cdot (\vec{F}_{y3A} + \vec{F}_{y4A}) + \left(\frac{k}{2} + 2 \cdot b_B\right) \cdot (-\vec{F}_{y1B} - \vec{F}_{y2B}) \quad (12)$$

$$+ \frac{k}{2} \cdot (\vec{F}_{y1A} + \vec{F}_{y2A} - \vec{F}_{y3B} - \vec{F}_{y4B})$$

Tyto momenty musí být shodné s momenty, které vytvoří výsledná síla  $F_{yV}$  působící v bodě  $P_{AB}$  vzhledem k bodu  $O_{AB}$ :

$$\vec{M}_{xAB} = p_{zAB} \cdot \vec{F}_{yV}, \quad \vec{M}_{zAB} = p_{xAB} \cdot \vec{F}_{yV}. \quad (13)$$

Řešením výše uvedených rovnic určíme  $\vec{M}_{xAB}, \vec{M}_{zAB}$  a pomocí těchto momentů hledanou polohu působíště  $p_{xAB}, p_{zAB}$  výsledné síly  $\vec{F}_{yV}$  procházející COM resp. COP v případě statické stability.